聲景的發展、技術與應用

東海大學環境科學與工程學系

劉嘉俊編著

115 年 **1** 月

序言

聲景學：邁向聽覺文明的新紀元

在人類文明發展的漫長歷程中，我們對環境品質的認知經歷了從視覺主導到多感官整合的重要轉變。當我們談論環境美學時，往往首先想到的是壯麗的山川、優美的建築或精緻的景觀設計，然而，構成我們日常生活體驗的不僅僅是眼睛所見，更包括耳朵所聞。聲音，這個看似無形卻無處不在的環境要素，正逐漸獲得應有的重視與關注。「聲景（Soundscape）」一詞，自 1970 年代由加拿大音樂家與學者雷蒙·穆瑞·謝弗（R. Murray Schafer）首次提出以來，已從一個藝術創作概念發展成為涵蓋聲學、心理學、社會學、生態學、城市規劃等多個學科的綜合研究領域。這個轉變不僅反映了學術界對聲音環境認知的深化，更體現了現代社會對生活品質要求的提升和對環境問題理解的成熟。

時代背景與發展契機

進入二十一世紀，全球城市化進程的加速帶來了前所未有的聲音環境挑戰。根據聯合國的統計，到 2050 年，全球將有 68%的人口居住在城市中。這種史無前例的城市集中不僅改變了人類的生活方式，也徹底重塑了我們的聲音環境。傳統的鄉村寧靜被城市的喧囂所取代，自然的鳥鳴蟲啁被機械的轟鳴聲所掩蓋，這種變化對人類的身心健康、社會互動和文化傳承都產生了深遠的影響。

同時，科技革命為聲景研究帶來了新的機遇與挑戰。人工智慧、物聯網、大數據分析等新興技術的快速發展，使得大規模、長期性、精細化的聲景監測與管理成為可能。智慧城市的建設理念更是將聲景品質納入城市治理的重要議程，推動了聲景研究從學術象牙塔走向實務應用的轉化。氣候變遷這一全球性挑戰也為聲景研究增添了新的維度。極端天氣事件的頻發、生態系統的變遷、物種棲息地的改變，都在改寫著地球的聲音地圖。聲景生態學的興起，讓我們開始從全新的角度理解生物多樣性、生態系統健康與聲音環境之間的複雜關係。

學科特色與理論創新

聲景學作為一門新興的跨學科領域，具有鮮明的特色和獨特的價值。首先，它打破了傳統學科的界限，將自然科學的嚴謹性與人文社會科學的深度洞察相結合，形成了獨特的研究範式。這種跨學科特性不僅豐富了研究的內容和方法，也為解

決複雜的現實問題提供了全新的視角。其次，聲景學強調主觀體驗與客觀測量的平衡。傳統的噪音控制主要關注分貝數值等物理參數，而聲景研究則更重視人們對聲音環境的感知、體驗和評價。這種「以人為本」的研究取向，使得聲景學能夠更準確地反映人類的真實需求和感受。再者，聲景學具有強烈的文化敏感性和社會責任感。不同文化背景下的人們對聲音環境有著不同的理解和偏好，聲景研究必須考慮這些文化差異，並致力於促進不同群體之間的理解與包容。同時，聲景品質的不平等分配往往反映了更深層的社會問題，聲景研究也承擔著促進環境正義和社會公平的使命。

技術進步與應用拓展

現代科技的快速發展為聲景研究注入了強大的動力。從傳統的聲級計到現代的智慧感測器陣列，從單點測量到全域監控網絡，從被動記錄到主動管理，技術的進步不斷拓展著聲景研究的邊界和可能性。人工智慧技術在聲景領域的應用尤其令人矚目。機器學習算法能夠自動識別和分類各種聲音事件，深度學習模型可以預測聲景品質的變化趨勢，自然語言處理技術則有助於分析公眾對聲音環境的情感反應。這些技術的應用不僅提高了研究的效率和準確性，也為大規模的聲景監測和管理提供了可能。虛擬實境和擴增實境技術的成熟，更是為聲景體驗和教育開闢了全新的領域。人們可以在虛擬環境中體驗不同的聲景，設計師可以在建造之前就預視和調整空間的聲學效果，教育工作者可以讓學生沉浸式地學習聲景知識。這些技術的應用正在改變我們與聲音環境互動的方式。

多領域應用與社會價值

聲景研究的價值不僅體現在學術貢獻上，更重要的是其廣泛的社會應用和深遠的現實意義。在健康醫療領域，聲景療法已被證實對減輕壓力、改善睡眠、促進康復等方面具有顯著效果。許多醫院開始在治療環境中融入自然聲景，創造更有利於患者康復的聲音環境。在教育領域，聲景設計已成為提升學習效果的重要手段。適當的背景聲音可以提高學生的專注力，而良好的聲學環境設計則能確保資訊的有效傳達。聲景教育本身也成為培養學生環境意識和跨文化理解能力的重要途徑。在旅遊和文化產業中，聲景正在成為新的吸引力和體驗方式。從聲景旅遊到聲音導覽，從文化聲景保護到數位聲景重現，聲音正在為文化體驗增添新的維度。這不僅豐富了旅遊產品的內容，也為文化遺產的保護和傳承提供了新的途徑。在商

業應用方面，聲景設計已成為提升消費體驗、改善工作環境、增強品牌識別的重要工具。從精心設計的零售空間背景音樂到優化的辦公環境聲學設計，聲景正在為商業成功貢獻越來越重要的價值。

全球視野與國際合作

聲景研究從一開始就具有國際化的特徵。世界聲景項目（World Soundscape Project）的建立，標誌著聲景研究國際合作的開端。隨著全球化程度的加深，聲景研究的國際合作也越來越緊密。國際標準化組織（ISO）制定的 ISO 12913 系列標準，為全球聲景研究提供了統一的框架和方法，促進了不同國家和地區之間的比較研究和經驗交流。世界聲學生態學論壇（World Forum for Acoustic Ecology）等國際組織的建立，為全球聲景研究者提供了交流合作的平台。各國政府和國際組織也越來越重視聲景研究的價值。歐盟的環境噪音指令、世界衛生組織的環境噪音指導方針、聯合國可持續發展目標中對健康城市的要求，都體現了國際社會對聲音環境品質的關注。這些政策支持為聲景研究的發展提供了重要的推動力。

挑戰與機遇並存

儘管聲景研究取得了顯著的進展，但仍面臨諸多挑戰。學科的跨領域特性雖然帶來了豐富性，但也增加了研究的複雜性和難度。不同學科背景的研究者需要學習和理解其他領域的知識和方法，這對研究者的綜合素養提出了更高要求。標準化和量化的需求與聲景體驗主觀性之間的矛盾，也是聲景研究需要持續面對的挑戰。如何在保持研究科學性的同時，充分考慮文化差異和個體特徵，是聲景研究方法學發展的重要課題。技術的快速發展雖然為聲景研究提供了新的工具和可能性，但也帶來了新的挑戰。如何確保技術應用的倫理性、如何保護個人隱私、如何避免技術鴻溝等問題，都需要研究者和實務工作者的深入思考。然而，挑戰往往也意味著機遇。氣候變遷、城市化、數位化轉型等全球性趨勢，都為聲景研究提供了新的發展空間。人們對生活品質要求的提高、對環境問題關注的加深、對文化多樣性認識的增強，都為聲景研究創造了更廣闊的社會需求。

本書的價值與意義

在這樣的時代背景下，《聲景（Soundscape）的發展、技術與應用》這本著作的出版具有重要的意義。本書系統性地整理了聲景學領域的理論基礎、技術方法、應

用實踐和未來發展，為讀者提供了全面而深入的學科導覽。本書的價值體現在以下幾個方面：

1. 理論建構的系統性：本書從聲景的基本概念出發，系統闡述了聲景學的理論框架、研究方法和評估標準，為讀者建立了完整的知識體系。
2. 技術應用的前瞻性：本書不僅介紹了傳統的聲景研究技術，更重點關注了人工智慧、物聯網、虛擬實境等新興技術在聲景領域的應用，體現了強烈的時代特徵。
3. 應用領域的多樣性：本書涵蓋了健康醫療、教育學習、旅遊文化、商業應用等多個領域的聲景應用，展現了聲景研究的廣泛社會價值。
4. 國際視野的開闊性：本書整合了全球範圍內的研究成果和實踐經驗，體現了聲景研究的國際化特徵。
5. 未來導向的前瞻性：本書不僅總結了現有的研究成果，更重要的是對聲景研究的未來發展進行了深入的思考和展望。

讀者對象與使用建議

本書適合多個層次和領域的讀者。對於聲景研究的初學者，本書提供了全面的入門指導；對於相關領域的研究者，本書提供了豐富的參考資料和研究靈感；對於實務工作者，本書提供了具體的應用指南和操作方法；對於政策制定者，本書提供了科學的決策依據和政策建議。建議讀者根據自己的背景和需求選擇相應的章節進行重點學習。初學者可以從第一章開始，系統學習聲景的基本概念和理論基礎；技術人員可以重點關注測量評估、科技應用等技術章節；應用導向的讀者可以重點關注跨領域應用、商業應用等實務章節；研究人員可以特別關注未來發展趨勢和研究方向。展望未來，聲景學有望成為環境科學、城市規劃、公共健康等領域的重要組成部分。隨著人們環境意識的不斷提高和生活品質要求的持續提升，聲景品質必將成為評估環境優劣的重要指標。

我們期待看到更多的城市將聲景規劃納入城市發展的總體規劃，更多的建築師在設計中考慮聲學環境的營造，更多的教育工作者將聲景教育融入課程設計，更多的醫療機構運用聲景療法提升治療效果，更多的商業機構通過聲景設計提升顧客體驗。我們也期待看到聲景研究在技術創新方面取得更大突破，在國際合作方面建立更緊密聯繫，在理論建構方面達到更高水準，在社會應用方面產生更廣泛影響。

最重要的是，我們期待聲景研究能夠為建設一個更加和諧、健康、美好的聲音世界貢獻智慧和力量。讓我們的城市不僅視覺美麗，更要聽覺宜人；讓我們的生活空間不僅功能完善，更要聲學舒適；讓我們的文化傳承不僅豐富多彩，更要聲韻悠長。

致謝與期許

本書的完成離不開全球聲景研究共同體的共同努力。從謝弗的開創性工作到當代研究者的不懈探索，從國際組織的標準制定到各國政府的政策支持，從技術專家的創新突破到實務工作者的應用實踐，正是這些貢獻共同推動了聲景學的發展。我們也要感謝讀者對本書的關注和支持。知識的價值在於傳播和應用，我們希望本書能夠激發更多人對聲景研究的興趣，促進更多跨領域的合作，推動更多創新應用的產生。聲景學作為一門年輕的學科，仍然處於快速發展的階段。我們相信，隨著更多有識之士的加入和努力，聲景研究必將在促進人類福祉、保護環境品質、傳承文化遺產等方面發揮越來越重要的作用。

讓我們共同努力，為創造一個更加美好的聲音世界而奮鬥！

編者謹識

於聲景學發展的新時代

聲景（Soundscape）的發展、技術與應用
目錄

第一章 聲景的起源與概念(Foundations and Origins of Soundscape)

1.1 聲景的定義與範疇 (Definition and Scope of Soundscape)

1.1.1 聲音與環境的關係 (Sound and Environment Relationship)

1.1.2 聲景的跨學科性 (Interdisciplinary Nature of Soundscape)

1.1.3 聲景與人類感知 (Soundscape and Human Perception)

1.2 歷史發展 (History of Soundscape Studies)

1.2.1 早期聲音研究 (Early Studies of Sound)

1.2.2 雷蒙·穆瑞·謝弗的貢獻 (Contribution of R. Murray Schafer)

1.2.3 世界聲景運動 (World Soundscape Project)

1.3 聲景理論架構 (Theoretical Frameworks of Soundscape)

1.3.1 聲源、傳播與感知 (Sources, Propagation, and Perception)

1.3.2 聲景分類與分析 (Typologies and Analysis of Soundscape)

1.3.3 聲景與文化的連結 (Soundscape and Cultural Linkages)

1.4 聲景生態學基礎 (Foundations of Soundscape Ecology)

1.4.1 生物聲音學概念 (Bioacoustic Concepts)

1.4.2 聲學生態位理論 (Acoustic Niche Theory)

1.4.3 聲景與生物多樣性 (Soundscape and Biodiversity)

第二章 聲景的測量與評估(Measurement and Evaluation of Soundscape)

2.1 傳統聲學量測方法 (Traditional Acoustic Measurements)

2.1.1 分貝量測 (Decibel Measurement)

2.1.2 頻譜分析 (Spectrum Analysis)

2.1.3 時頻特徵分析 (Time-Frequency Analysis)

2.2 聲景評估方法 (Soundscape Evaluation Approaches)

2.2.1 問卷調查與感知評估 (Surveys and Perceptual Evaluation)

2.2.2 主觀與客觀指標 (Subjective and Objective Indicators)

2.2.3 聲景指標的建立 (Development of Soundscape Metrics)

2.3 智慧監測技術 (Smart Monitoring Technologies)
2.3.1 感測器與物聯網 (Sensors and IoT)
2.3.2 大數據分析 (Big Data Analytics)
2.3.3 AI 聲紋辨識 (AI-Based Sound Recognition)
2.4 聲學測量標準與品質控制 (Acoustic Measurement Standards and Quality Control)
2.4.1 國際標準與規範 (International Standards and Specifications)
2.4.2 設備校準與驗證 (Equipment Calibration and Validation)
2.4.3 測量不確定度評估 (Measurement Uncertainty Assessment)

第三章 聲景設計與城市規劃(Soundscape Design and Urban Planning)

3.1 聲景設計的理念 (Principles of Soundscape Design)
3.1.1 聲景的正向利用 (Positive Use of Soundscape)
3.1.2 音景與公共空間 (Soundscape in Public Spaces)
3.1.3 聲景與景觀融合 (Soundscape and Landscape Integration)
3.2 城市聲景 (Urban Soundscapes)
3.2.1 城市噪音挑戰 (Urban Noise Challenges)
3.2.2 寧靜區域規劃 (Quiet Area Planning)
3.2.3 交通與基礎建設影響 (Transport and Infrastructure Impacts)
3.3 綠色與生態聲景 (Green and Ecological Soundscapes)
3.3.1 生態旅遊與聲景 (Ecotourism and Soundscape)
3.3.2 自然保護區聲景 (Nature Reserve Soundscapes)
3.3.3 環境永續與聲景 (Sustainable Soundscape Approaches)
3.4 聲景規劃方法與工具 (Soundscape Planning Methods and Tools)
3.4.1 聲景地圖製作 (Soundscape Mapping)
3.4.2 參與式規劃方法 (Participatory Planning Methods)
3.4.3 聲景影響評估 (Soundscape Impact Assessment)

第四章 聲景在建築與室內應用(Soundscape in Architecture and Indoor Environments)

4.1 建築聲學與聲景 (Architectural Acoustics and Soundscape)

4.1.1 建築設計與聲音控制 (Architectural Design and Sound Control)

4.1.2 公共建築聲景 (Public Building Soundscapes)

4.1.3 室內舒適度與聲學 (Indoor Comfort and Acoustics)

4.2 室內環境聲景 (Indoor Soundscapes)

4.2.1 辦公空間聲景 (Office Environment Soundscape)

4.2.2 教育空間聲景 (Educational Spaces Soundscape)

4.2.3 醫療空間聲景 (Healthcare Soundscape)

4.3 聲景設計工具 (Tools for Soundscape Design)

4.3.1 聲學模擬 (Acoustic Simulation)

4.3.2 聲音設計與控制 (Sound Design and Control)

4.3.3 數位化聲景規劃 (Digital Soundscape Planning)

4.4 室內聲景優化策略 (Indoor Soundscape Optimization Strategies)

4.4.1 聲學材料應用 (Acoustic Materials Application)

4.4.2 主動噪音控制 (Active Noise Control)

4.4.3 聲音遮蔽技術 (Sound Masking Technologies)

第五章 聲景與文化(Soundscape and Culture)

5.1 聲景與音樂 (Music and Soundscape)

5.1.1 音樂中的環境聲 (Music and Environmental Sounds)

5.1.2 民族音樂與地方聲景 (Ethnomusicology and Local Soundscape)

5.1.3 聲景作曲技法 (Soundscape Composition Techniques)

5.2 聲景與藝術 (Art and Soundscape)

5.2.1 聲音藝術 (Sound Art)

5.2.2 聲音裝置與表演 (Sound Installations and Performances)

5.2.3 聲景與視覺藝術融合 (Integration of Soundscape and Visual Arts)

5.3 聲景與社會文化 (Social and Cultural Soundscape)

5.3.1 城市文化中的聲音 (Urban Cultural Soundscape)

5.3.2 宗教與儀式聲景 (Religion and Ritual Soundscape)

5.3.3 社區聲景 (Community Soundscapes)

5.4 文化遺產與聲景保護 (Cultural Heritage and Soundscape Preservation)

5.4.1 歷史聲景重建 (Historical Soundscape Reconstruction)

5.4.2 非物質文化遺產的聲音 (Intangible Cultural Heritage Sounds)

5.4.3 聲音檔案與數位保存 (Sound Archives and Digital Preservation)

第六章 聲景與環境治理 (Soundscape and Environmental Governance)

6.1 噪音管理與法規 (Noise Management and Regulations)

6.1.1 國際法規 (International Regulations)

6.1.2 區域與在地規範 (Regional and Local Regulations)

6.1.3 法律與政策挑戰 (Legal and Policy Challenges)

6.2 聲景作為環境指標 (Soundscape as Environmental Indicator)

6.2.1 永續城市與聲景 (Sustainable Cities and Soundscape)

6.2.2 聲景與健康 (Health and Soundscape)

6.2.3 聲景與生活品質 (Quality of Life and Soundscape)

6.3 公眾參與與聲景治理 (Public Participation and Soundscape Governance)

6.3.1 公民參與模型 (Citizen Participation Models)

6.3.2 社區參與聲景規劃 (Community Planning)

6.3.3 聲景治理案例 (Governance Case Studies)

6.4 環境影響評估中的聲景 (Soundscape in Environmental Impact Assessment)

6.4.1 聲景評估框架 (Soundscape Assessment Framework)

6.4.2 累積影響評估 (Cumulative Impact Assessment)

6.4.3 減緩與補償措施 (Mitigation and Compensation Measures)

第七章 聲景的科技應用(Technological Applications of Soundscape)

7.1 聲音感測與數位化 (Sound Sensing and Digitization)

7.1.1 麥克風陣列 (Microphone Arrays)

7.1.2 聲音攝影技術 (Acoustic Cameras)

7.1.3 聲音資料庫 (Sound Databases)

7.2 AI 與聲景 (Artificial Intelligence and Soundscape)

7.2.1 聲紋辨識技術 (Sound Recognition Technologies)

7.2.2 機器學習與聲景分析 (Machine Learning in Soundscape Analysis)

7.2.3 自動化聲景監控 (Automated Soundscape Monitoring)

7.3 虛擬與擴增實境 (Virtual and Augmented Reality)

7.3.1 VR 聲景體驗 (VR Soundscape Experience)
7.3.2 AR 聲景應用 (AR Soundscape Applications)
7.3.3 沉浸式聲景設計 (Immersive Soundscape Design)
7.4 物聯網與智慧感知 (IoT and Smart Sensing)
7.4.1 分散式感測網絡 (Distributed Sensing Networks)
7.4.2 邊緣計算應用 (Edge Computing Applications)
7.4.3 即時聲景分析 (Real-time Soundscape Analysis)

第八章 聲景的跨領域應用(Interdisciplinary Applications of Soundscape)

8.1 聲景與健康 (Soundscape and Health)
8.1.1 聲景對心理的影響 (Psychological Impacts of Soundscape)
8.1.2 聲景與醫療復健 (Soundscape and Healthcare Rehabilitation)
8.1.3 聲音治療應用 (Sound Therapy Applications)
8.2 聲景與教育 (Soundscape and Education)
8.2.1 聲景教育 (Soundscape Education)
8.2.2 教學應用案例 (Teaching Applications)
8.2.3 學習環境聲景設計 (Learning Environment Soundscape Design)
8.3 聲景與旅遊 (Soundscape and Tourism)
8.3.1 聲景旅遊 (Soundscape Tourism)
8.3.2 聲音導覽與體驗 (Sound Tours and Experiences)
8.3.3 聲景與文化資產 (Cultural Heritage Soundscapes)
8.4 聲景與商業應用 (Soundscape and Commercial Applications)
8.4.1 零售空間聲景 (Retail Soundscape)
8.4.2 品牌聲音識別 (Brand Sound Identity)
8.4.3 聲景行銷策略 (Soundscape Marketing Strategies)

第九章 水下聲景與海洋環境(Underwater Soundscape and Marine Environment)

9.1 海洋聲景基礎 (Fundamentals of Marine Soundscape)
9.1.1 水下聲學原理 (Underwater Acoustic Principles)
9.1.2 海洋聲源分類 (Classification of Marine Sound Sources)

9.1.3 海洋聲景的時空變化 (Temporal and Spatial Variation of Marine Soundscape)
9.2 水下噪音監測與評估 (Underwater Noise Monitoring and Assessment)
9.2.1 水下聲學監測技術 (Underwater Acoustic Monitoring Technologies)
9.2.2 海洋噪音評估指標 (Marine Noise Assessment Indicators)
9.2.3 生物聲學影響評估 (Bioacoustic Impact Assessment)
9.3 水下噪音控制與管理 (Underwater Noise Control and Management)
9.3.1 噪音源控制技術 (Noise Source Control Technologies)
9.3.2 海洋噪音管制法規 (Marine Noise Regulations)
9.3.3 海洋保護區聲景管理 (Marine Protected Area Soundscape Management)
9.4 海洋生物與聲景互動 (Marine Life and Soundscape Interactions)
9.4.1 海洋哺乳動物聲學行為 (Marine Mammal Acoustic Behavior)
9.4.2 魚類聲學生態 (Fish Acoustic Ecology)
9.4.3 人為噪音對海洋生物的影響 (Anthropogenic Noise Effects on Marine Life)

第十章 聲景的未來發展(Future Directions of Soundscape)

10.1 技術發展趨勢 (Technological Development Trends)
10.1.1 智慧城市與聲景 (Smart Cities and Soundscape)
10.1.2 AI 驅動聲景治理 (AI-Driven Soundscape Governance)
10.1.3 新興感測技術 (Emerging Sensing Technologies)
10.2 全球聲景研究方向 (Global Research Directions)
10.2.1 國際合作與交流 (International Collaboration and Exchange)
10.2.2 聲景標準化 (Soundscape Standardization)
10.2.3 跨文化聲景研究 (Cross-cultural Soundscape Research)
10.3 聲景未來挑戰與機會 (Future Challenges and Opportunities)
10.3.1 氣候變遷下的聲景 (Soundscape under Climate Change)
10.3.2 社會變遷與聲景 (Social Change and Soundscape)
10.3.3 聲景政策與創新 (Soundscape Policy and Innovation)
10.4 永續聲景發展願景 (Vision for Sustainable Soundscape Development)
10.4.1 聲景與聯合國永續發展目標 (Soundscape and UN SDGs)

10.4.2 未來聲景研究議程 (Future Soundscape Research Agenda)

10.4.3 聲景學科建構與展望 (Soundscape Discipline Development and Prospects)

摘要

這本書不僅是聲景學研究者的重要參考資料，也是城市規劃師、建築師、環境管理者、政策制定者等相關專業人士的寶貴指南，對推動聲景學科發展與實務應用具有重要意義。本書是聲景學領域的綜合性學術專著，系統性地整理了聲景科學從起源、理論發展、技術創新到多領域應用的完整知識體系。全書共十章，涵蓋基礎理論、測量評估、設計規劃、技術應用、跨領域實踐及未來發展等關鍵議題，為聲景研究提供了完整的學術參考框架。

一、各章摘要

(一) 第一章：聲景的起源與概念

- 核心定義：根據 ISO 12913-1:2014，聲景是個人或群體對特定情境中聲音環境的感知、體驗與理解
- 學科特性：跨學科整合聲學、心理學、社會學、生態學、人類學、音樂學等多領域
- 發展脈絡：從 R. Murray Schafer 1970 年代開創性工作發展至今的完整歷史軌跡
- 理論架構：聲源-傳播-感知三要素系統，整合物理、心理、社會、文化、生態層面
- 生態基礎：聲景生態學與生物多樣性監測的理論連結

(二) 第二章：聲景的測量與評估

- 方法演進：從傳統物理測量擴展為主客觀整合的多維評估體系
- 技術基礎：分貝測量、頻譜分析、時頻特徵分析等傳統與現代技術
- 評估框架：問卷調查、感知評估、主客觀指標整合的完整方法學
- 智慧監測：IoT 感測器網絡、大數據分析、AI 聲紋識別等前沿技術
- 標準化：國際標準（ISO 12913 系列）與品質控制體系建立

(三) 第三章：聲景設計與城市規劃

- 設計理念：從噪音控制轉向積極聲音環境營造的範式轉變
- 正向利用：聲音遮蔽、增強、設計等創造優質聲音體驗的策略
- 城市挑戰：城市噪音問題與寧靜區域規劃的系統性解決方案
- 生態聲景：綠色聲景、生態旅遊、自然保護區聲景管理

- 規劃工具：聲景地圖、參與式規劃、聲景影響評估等現代規劃方法

(四) 第四章：聲景在建築與室內應用

- 設計轉向：從被動噪音控制到主動聲音環境營造
- 應用領域：辦公、教育、醫療等不同功能空間的聲景設計策略
- 技術工具：聲學模擬、聲音設計控制、數位化規劃等先進工具
- 優化策略：聲學材料、主動噪音控制、聲音遮蔽等系統性方法
- 發展趨勢：智慧化、個人化、整合化的未來方向

(五) 第五章：聲景與文化

- 文化連結：音樂與聲景的相互作用及創作應用
- 藝術實踐：聲音藝術、裝置藝術、表演藝術中的聲景創新
- 社會認同：聲音與社會結構、文化認同、權力關係的複雜互動
- 遺產保存：聲景作為無形文化遺產的記錄、保存與傳承
- 現代科技：AI、VR/AR、區塊鏈在文化聲景保護中的應用

(六) 第六章：聲景與環境治理

- 治理轉型：從噪音管理到綜合聲景品質管理的政策轉變
- 法規框架：國際、區域、地方三層級的法律政策體系
- 環境指標：聲景納入永續城市、健康評估、生活品質指標
- 公眾參與：民主治理、社區參與、公民科學的治理模式
- 影響評估：聲景納入環境影響評估的方法與實務

(七) 第七章：聲景的科技應用

- 硬體技術：麥克風陣列、聲音攝影、MEMS 技術等先進硬體
- 軟體系統：聲音資料庫、AI 應用、機器學習聲音分析
- 沉浸技術：VR/AR 中的聲景應用與沉浸式音頻體驗
- 智慧城市：IoT 監控、邊緣計算、智慧聲景管理系統
- 技術整合：跨平台、跨技術的綜合解決方案

(八) 第八章：聲景的跨領域應用

- 健康醫療：聲景對心理健康、醫療復健、聲音治療的應用
- 教育學習：聲景教育、教學創新、學習環境優化
- 旅遊文化：聲景旅遊、聲音導覽、文化資產活化
- 商業應用：零售、餐飲、辦公等商業環境的聲景策略
- 跨域整合：多領域協作與綜合效益評估

(九) 第九章：水下聲景與海洋環境

- 海洋聲學：水下聲音傳播原理與海洋聲源分類
- 監測技術：被動聲學監測、AI 分析、長期生態監控
- 生物影響：人為噪音對海洋生物行為與生態系統的影響
- 管理策略：噪音控制、海洋保護區、國際合作機制
- 前沿研究：海洋生物聲學行為與聲景生態學發展

(十) 第十章：聲景的未來發展

- 技術趨勢：AI、物聯網、5G、邊緣計算等新興技術驅動
- 全球合作：國際標準化、跨文化研究、全球資料共享
- 永續發展：聲景與聯合國 SDGs 的深度連結
- 學科建構：完整教育體系、專業認證、產學研合作
- 未來挑戰：氣候變遷、社會轉型、政策創新的應對策略

二、 核心理論框架

(一) 基礎理論

1. 三元素模型：聲源-傳播-感知的基本架構
2. 多維度整合：物理-心理-社會-文化-生態的跨領域視角
3. 主客觀結合：物理測量與主觀評價的綜合評估方法
4. 情境依賴性：強調聲景體驗的時空與文化情境重要性

(二) 方法學體系

1. 測量技術：從傳統聲學到智慧監測的技術演進
2. 評估方法：問卷調查、實驗研究、田野調查的多元方法
3. 設計策略：積極聲景營造與被動噪音控制的平衡
4. 管理模式：參與式治理與數據驅動決策的結合

三、關鍵技術方法

(一) 傳統技術

- 聲學測量（分貝、頻譜、時頻分析）
- 問卷調查與心理評估
- 聲學材料與空間設計
- 田野錄音與聲景記錄

(二) 現代科技

- AI 與機器學習聲音分析
- IoT 感測器網絡與邊緣計算
- VR/AR 沉浸式聲景體驗
- 大數據與雲端聲景平台
- 區塊鏈與數位孿生技術

四、應用領域總覽

(一) 公共領域

- 城市規劃與環境治理
- 公共健康與福祉提升
- 教育環境與學習效能
- 文化保存與旅遊發展

(二) 商業應用

- 零售空間與消費體驗
- 辦公環境與工作效率
- 餐飲業與顧客滿意度
- 品牌聲音與行銷策略

(三) 環境生態

- 自然保護區管理
- 生物多樣性監測
- 海洋環境保護
- 氣候變遷適應

五、未來發展趨勢

(一) 技術發展

1. 智慧化：AI 驅動的自動化監測與管理
2. 個人化：客製化聲景解決方案
3. 整合化：跨平台、跨技術的系統整合
4. 即時化：即時監測與動態調控能力

(二) 全球化趨勢

1. 標準統一：國際標準與方法的全球一致性
2. 跨文化研究：不同文化背景下的聲景比較
3. 國際合作：全球聲景資料共享與協作
4. 政策協調：跨國環境治理與政策對接

(三) 社會影響

1. 健康促進：聲景對身心健康的積極作用
2. 教育創新：聲景教育的普及與深化
3. 文化保護：聲音文化遺產的保存與傳承
4. 環境正義：聲景品質的社會公平分配

六、重要發現與洞察

(一) 學科特點

- 聲景學是典型的跨學科整合領域，需要多元知識背景
- 主觀體驗與客觀測量並重，強調人本中心的評估方法
- 文化與情境因素對聲景感知具有決定性影響
- 技術創新是推動聲景應用的重要驅動力

(二) 實務價值

- 聲景管理能顯著提升環境品質與生活滿意度
- 跨領域應用展現巨大的社會經濟效益
- 參與式治理模式提升政策效果與公眾接受度
- 國際標準化促進全球知識交流與合作

七、總結評價

這本「聲景（Soundscape）的發展、技術與應用」是聲景學領域的重要學術里程碑，具有以下特色：

(一) 學術價值

- 理論完整性：從基礎概念到前沿發展的完整知識體系
- 方法科學性：嚴謹的研究方法與評估框架
- 視野國際性：整合全球最新研究成果與實務經驗
- 內容前瞻性：前沿技術與未來趨勢的深度分析

(二) 實用價值

- 指導性強：為聲景研究與實務提供清晰指引
- 操作性佳：具體的技術方法與應用案例
- 適用面廣：涵蓋學術研究、政策制定、產業應用等多領域
- 時效性高：反映當前最新的技術發展與應用趨勢

第一章 聲景的起源與概念
(Foundations and Origins of Soundscape)

聲景（Soundscape）作為一個跨學科研究領域，代表了人類對於聲音環境認知與理解的重要發展。這個概念不僅整合了聲學、生態學、心理學、社會學等多重學科視角，更體現了從單純物理噪音控制轉向全面聲音環境品質管理的重要典範轉移。聲景研究的核心在於理解聲音環境作為人類感知對象的複雜性，這種理解超越了傳統聲學測量的技術限制，進入了人類體驗與環境互動的深層領域。

從歷史發展的角度來看，聲景概念的形成經歷了從音樂創作啟發到科學研究建構的完整過程。雷蒙·穆瑞·謝弗（R. Murray Schafer）在 1960 年代末期首次提出聲景概念時，其初衷是透過對環境聲音的深度聆聽與分析，重新建立人類與聲音環境之間的和諧關係。這個概念的提出不僅反映了對現代工業化社會噪音問題的關切，更代表了對於聲音環境整體性理解的追求。隨著時間推移，聲景研究逐漸發展成為一個具有嚴謹科學方法論的研究領域，並在國際標準化組織（ISO）的推動下，建立了系統性的評估框架與方法論基礎 [1]。

現代聲景研究的重要性體現在其對於可持續發展目標的貢獻。世界衛生組織（WHO）在其環境噪音指導原則中明確指出，良好的聲音環境對於人類健康與福祉具有關鍵意義，這不僅涉及噪音暴露的控制，更包括了對於正面聲音體驗的創造與維護 [2]。當代城市規劃與環境設計領域日益認識到，聲景品質的提升能夠顯著改善居民的生活品質，促進社區凝聚力，並支持生態系統的健康發展。

從理論建構的角度而言，聲景研究建立了一套完整的概念框架，用以描述和分析聲音環境的複雜性。這個框架包括了聲音來源的分類（生物音、地球物理音、人為音）、聲音傳播的物理特性、以及人類感知與詮釋的心理社會過程。此外，聲景研究也發展出多元化的研究方法，包括客觀聲學測量、主觀感知評估、參與式聲音漫步（soundwalk）、以及跨文化比較分析等，這些方法的整合應用使得聲景研究能夠同時掌握物理現實與主觀體驗的雙重面向 [3]。

聲景生態學的興起更進一步擴展了聲景研究的範疇，將生態系統的聲音動態納入研究視野。這個發展趨勢反映了對於自然環境保護的關注，以及對於人類活動對生態聲環境影響的深度反思。聲景生態學不僅關注個別物種的聲音行為，更著重於整個生態系統聲音組成的時空變化模式，以及這些變化與生物多樣性、環境變遷之間的關聯性。這種系統性的研究取向為環境監測、生態復育、以及保護區管理提供了新的工具與視角 [4]。

1.1 聲景的定義與範疇 (Definition and Scope of Soundscape)

聲景的定義與範疇構成了整個聲景研究領域的基礎架構，其重要性在於為跨學科研究提供了共同的概念基礎與理解框架。根據國際標準化組織（ISO）12913-1:2014 標準的定義，聲景是指「在特定情境中，個人或群體所感知、體驗或理解的聲音環境」[5]。這個定義的關鍵在於強調了聲景作為一種感知建構的特性，而非單純的物理現象。它明確區分了客觀存在的聲音環境與主觀體驗的聲景，突顯了人類認知與文化背景在聲景形成過程中的核心地位。

從概念層次的分析來看，聲景定義包含了三個相互關聯的核心要素：聲音環境的物理基礎、感知主體的認知處理、以及特定情境的脈絡因素。聲音環境的物理基礎涵蓋了空間中所有聲音的總合，包括其頻率組成、時間變化、空間分布等客觀特性。感知主體的認知處理則涉及人類聽覺系統的生理功能、心理認知的處理機制、以及個人經驗與文化背景的影響。特定情境的脈絡因素包括了時間、地點、社會環境、活動目的等條件，這些因素共同決定了聲景體驗的具體內容與意義 [6]。

聲景範疇的廣泛性體現在其涵蓋的多重維度與層次。從空間尺度而言，聲景研究涵蓋了從微觀的室內空間到巨觀的區域環境，包括建築內部聲環境、都市街道聲景、自然保護區聲景、以及跨國界的聲音文化景觀等不同層次。從時間尺度來看，聲景既可以是瞬間的聲音體驗，也可以是長期的聲音環境變遷，研究者需要考慮日夜變化、季節性變化、以及歷史性變遷等不同時間框架的影響。從功能類型的角度，聲景包括了居住環境聲景、工作環境聲景、休閒娛樂聲

景、交通運輸聲景等多種類型，每種類型都有其特定的聲音特徵與評估標準 [7]。

聲景研究的跨學科特性決定了其範疇的複雜性與豐富性。從聲學工程的角度，聲景研究關注聲音的物理特性、傳播機制、以及控制技術；從心理學的視角，聲景研究探討聲音感知的認知過程、情感反應、以及行為影響；從社會學的觀點，聲景研究分析聲音的社會意義、文化象徵、以及權力關係；從生態學的立場，聲景研究考察聲音在生態系統中的功能、生物間聲音互動、以及環境變化的聲音指標；從都市規劃的角度，聲景研究關注聲音環境的規劃設計、政策制定、以及管理策略 [8]。

聲景定義的演進反映了學術界對於聲音環境理解的深化過程。早期的聲景定義主要強調聲音的美學與藝術價值，謝弗將聲景比喻為一種「聲音的作品」，強調其創作性與表現性特質。隨著研究的發展，聲景定義逐漸納入了更多的科學要素，包括客觀測量的重要性、標準化評估的必要性、以及跨文化適用性的考量。當代的聲景定義試圖在藝術創意與科學嚴謹之間找到平衡，既保持了對於聲音環境美學價值的關注，也建立了系統性研究的方法論基礎 [9]。

聲景範疇的擴展也反映了當代社會對於環境品質要求的提升。傳統的噪音控制主要關注聲壓級的降低與有害噪音的消除，而聲景研究則追求聲音環境的整體優化，包括有益聲音的保護與增強、聲音多樣性的維護、以及聲音文化的傳承等更廣泛的目標。這種轉變不僅體現在學術研究的發展趨勢，也影響了政策制定與實務應用的方向，越來越多的城市開始將聲景品質納入環境規劃的考量範圍 [10]。

1.1.1 聲音與環境的關係 (Sound and Environment Relationship)

聲音與環境的關係構成了聲景研究的基礎理論框架，這種關係的複雜性體現在物理、生物、社會等多重層面的交互作用。從物理層面來看，聲音作為一種機械波動，其產生、傳播與感知都深受環境條件的影響。環境的物理特性，包括溫度、濕度、氣壓、風速等氣象因素，以及地形、建築、植被等空間特徵，都

會顯著影響聲音的傳播路徑、衰減程度與頻率特性。這種物理互動關係不僅決定了聲音在特定環境中的客觀特性，也為聲景的感知體驗提供了基礎條件 [11]。

環境聲學的研究顯示，不同類型的環境空間會創造出特定的聲音特徵模式。在都市環境中，建築物的反射與遮蔽效應會造成複雜的聲音反射模式，形成特有的都市聲景特徵；在自然環境中，地形起伏與植被分布會影響聲音的自然衰減與散射，創造出豐富的空間聲音層次；在室內環境中，空間的幾何形狀、表面材質與家具配置會決定聲音的混響特性與空間感受。這些環境特性與聲音傳播的交互作用，形成了每個空間獨特的「聲音指紋」，這也是聲景研究中「地方感」概念的重要基礎 [12]。

從生態學的角度來看，聲音與環境的關係體現在生物與其棲息環境之間的聲音適應機制。不同的生物物種會根據其棲息環境的聲學特性，發展出相應的聲音溝通策略。例如，森林環境中的鳥類通常使用較高頻率的鳴叫聲，以減少植被吸收造成的信號衰減；開闊草原環境中的動物則傾向使用較低頻率的聲音，以利用低頻聲波較佳的長距離傳播特性；水生環境中的海洋哺乳動物發展出高度特化的聲納系統，以適應水中聲音傳播的特殊條件 [13]。

聲學生態位理論（Acoustic Niche Theory）進一步解釋了生物如何透過時間與頻率的分工，在同一環境中共存並有效進行聲音溝通。這個理論指出，同一棲息地的不同物種會在時間軸（晨昏活動時段）與頻率軸（鳴叫音調）上進行分工，避免聲音干擾並最大化溝通效率。這種聲音分工現象不僅反映了生物對環境的精密適應，也創造了自然環境中豐富而有序的聲景組成。當環境發生變化時，這種聲音分工模式也會隨之調整，因此聲景變化可以作為環境品質變遷的重要指標 [14]。

人類活動對環境聲音關係的影響構成了當代聲景研究的重要議題。工業化與都市化進程帶來的人為噪音不僅改變了環境的聲學特性，也對生物的聲音行為產生了深遠影響。交通噪音會掩蔽鳥類的求偶鳴叫，迫使鳥類調整其鳴叫頻率或增加鳴叫強度；建築工程的施工噪音會干擾海洋哺乳動物的迁徙路線與覓食行

為；機場附近的飛機噪音會影響當地居民的睡眠品質與日常交流。這些人為噪音的影響不僅是音量上的增加，更重要的是改變了環境聲景的時間結構與頻率組成，破壞了原有的聲音生態平衡 [15]。

聲音與環境關係的文化維度也不容忽視。不同文化背景的人群對於環境聲音有著不同的價值判斷與情感聯結。在某些文化中，自然聲音被視為神聖的象徵，具有精神淨化的功能；在另一些文化中，人為活動的聲音則代表了社會活力與經濟繁榮。這種文化差異不僅影響人們對聲景的主觀評價，也影響了聲景規劃與管理的政策方向。跨文化的聲景研究顯示，即使在相同的物理環境中，不同文化背景的人群也可能產生截然不同的聲景體驗與評價 [16]。

環境保護與聲景品質的關係日益受到重視。聯合國教科文組織（UNESCO）將某些具有特殊聲音特徵的環境列為世界遺產保護對象，認為這些聲景具有與視覺景觀同等的文化與生態價值。這種認知轉變反映了國際社會對於聲音環境保護重要性的日益認識。同時，氣候變遷對全球聲景的影響也成為新興的研究領域，研究者開始關注極端氣候事件如何改變環境的聲學特性，以及這些變化對生態系統與人類社會的長期影響 [17]。

聲音與環境關係的科技創新面向也值得關注。新興的聲學技術，如聲音地圖製作、即時聲景監測、人工智慧聲音識別等，為理解與管理環境聲音關係提供了前所未有的工具。這些技術不僅提高了聲音環境監測的精度與效率，也為公眾參與聲景保護提供了新的途徑。透過智慧型手機應用程式，一般民眾可以參與聲景資料的收集與分析，形成了「公民聲學」（Citizen Acoustics）的新興趨勢，這種參與式的研究方法為聲景科學的發展注入了新的活力 [18]。

1.1.2 聲景的跨學科性 (Interdisciplinary Nature of Soundscape)

聲景研究的跨學科特性是其最為顯著的特徵之一，這種特性不僅反映了聲音現象本身的複雜性，也體現了當代學術研究對於整合性知識建構的追求。聲景作為一個研究對象，同時涉及物理科學、生命科學、社會科學、人文學科等多個知識領域，每個領域都提供了獨特的理論視角與研究方法，而這些不同學科的

整合應用，才能真正掌握聲景現象的全貌。這種跨學科的研究取向不僅豐富了聲景研究的理論內涵，也為解決複雜的聲環境問題提供了多元化的解決方案 [19]。

從聲學工程的角度來看，聲景研究建立在嚴謹的物理科學基礎之上。聲學工程提供了聲音測量、分析與控制的技術方法，包括聲壓級測量、頻譜分析、聲源定位、噪音控制等基礎技術。現代聲景研究大量運用了先進的聲學測量設備，如多通道錄音系統、聲音強度分析儀、聲學相機等，這些技術工具使得研究者能夠精確量化聲音環境的客觀特性。同時，數位信號處理技術的發展也為聲景分析提供了強大的計算工具，研究者可以運用快速傅立葉轉換、小波分析、機器學習演算法等數學方法，從大量的聲音資料中提取有意義的特徵資訊 [20]。

心理學與認知科學為聲景研究提供了理解人類聲音感知與認知處理的理論基礎。聽覺心理學的研究成果揭示了人類聽覺系統的工作機制，包括頻率選擇性、時間解析度、雙耳聽覺處理等基本功能。認知心理學則探討了聲音資訊在大腦中的處理過程，包括注意力分配、記憶編碼、情感關聯等高層次認知功能。環境心理學的研究進一步闡明了聲音環境對人類行為、情感與健康的影響機制，提供了聲景評估的心理學基礎。這些心理學理論不僅幫助研究者理解聲景感知的個體差異，也為聲景設計提供了以人為本的指導原則 [21]。

社會學與人類學的研究視角為聲景研究增添了重要的社會文化維度。社會學關注聲音的社會意義與功能，探討聲音如何反映社會結構、權力關係與文化價值。例如，都市中不同區域的聲景特徵往往反映了社會階層的分布，高收入社區通常享有較為安靜的聲環境，而低收入社區則可能承受較多的交通與工業噪音。人類學的研究則關注不同文化群體的聲音傳統與聲景認知，揭示了聲音文化的多樣性與特殊性。這種跨文化的研究視角對於理解聲景的普遍性與特殊性具有重要意義，也為國際化的聲景標準制定提供了重要參考 [22]。

生態學與生物學的參與使聲景研究具備了重要的環境科學維度。生態聲學（Ecoacoustics）作為一個新興的跨學科領域，結合了生態學理論與聲學技術，專注於研究生態系統的聲音特徵與變化模式。生物聲學（Bioacoustics）則深入

探討個別物種的聲音行為與功能，為理解生態聲景的組成與動態提供了科學基礎。這些生物學研究不僅豐富了聲景的科學內涵，也為環境監測與保護提供了創新的工具與方法。透過長期的生態聲景監測，研究者可以評估環境變化對生物多樣性的影響，為保護政策的制定提供科學依據 [23]。

都市規劃與建築學的參與為聲景研究提供了實務應用的重要平台。都市規劃學關注聲景在城市空間規劃中的作用，探討如何透過合理的土地使用配置、交通規劃、綠地設計等手段，創造良好的都市聲環境。建築聲學則專注於建築空間的聲學設計，包括室內聲學環境的優化、建築外殼的隔音處理、以及聲學材料的選用等技術問題。景觀建築學的發展更進一步將聲景納入景觀設計的考慮範圍，提出了「聲景設計」的概念，強調視覺與聽覺景觀的整合設計。這些設計學科的參與使聲景研究從理論探討轉向實務應用，為改善人類聲環境品質提供了具體的技術方案 [24]。

資訊科技與數據科學的快速發展為聲景研究帶來了革命性的變化。大數據技術使得研究者能夠處理長期、大量的聲景監測資料，發現傳統方法難以察覺的聲景變化模式。機器學習與人工智慧技術的應用則大幅提升了聲音識別與分類的效率與精度，使得自動化的聲景分析成為可能。地理資訊系統（GIS）技術為聲景的空間分析提供了強大的工具，研究者可以製作詳細的聲景地圖，分析聲景與其他環境因子的空間關聯性。這些科技工具的整合應用不僅提升了聲景研究的科學水準，也為公眾參與聲景保護提供了便利的途徑 [25]。

藝術與音樂學的參與為聲景研究增添了重要的美學與創意維度。聲音藝術家透過創作實踐探索聲景的美學可能性，發展出聲景作曲、聲音裝置、聲音雕塑等新的藝術形式。音樂學的研究則關注聲景的音樂性特質，分析環境聲音的節奏、旋律、和聲等音樂要素。這種藝術視角不僅豐富了聲景的理論內涵，也為聲景教育與推廣提供了生動的表現方式。許多聲景保護計畫都結合了藝術創作的元素，透過藝術作品喚起公眾對聲環境的關注與保護意識 [26]。

公共政策與法律學的參與為聲景研究提供了重要的制度保障。環境法律的發展逐漸將聲景品質納入法律保護的範圍，制定了相應的法規標準與執行機制。公

共政策研究則探討如何透過政策工具促進聲景品質的改善，包括經濟激勵措施、規劃管制制度、公眾參與機制等。國際組織如世界衛生組織、歐洲環境署等也積極推動聲景相關的政策發展，為各國的聲景保護工作提供指導原則與技術支援。這種制度層面的支持為聲景研究的社會影響力奠定了重要基礎 [27]。

1.1.3 聲景與人類感知 (Soundscape and Human Perception)

聲景與人類感知之間的關係構成了聲景研究最為核心且複雜的議題之一。人類感知系統對聲音環境的處理過程涉及生理、心理、認知、情感等多重層面，這種多層次的感知機制決定了聲景體驗的主觀性與個體差異性。理解聲景與人類感知的關係不僅有助於科學地評估聲景品質，更能為改善人類聲環境體驗提供精確的指導原則。這種理解需要整合聽覺生理學、認知心理學、神經科學、以及環境心理學等多個學科的研究成果，形成對人類聲音感知機制的全面認識 [28]。

人類聽覺系統的生理特性為聲景感知提供了基本的硬體基礎。外耳的集音與共振功能決定了人類對不同頻率聲音的敏感度差異，中耳的阻抗匹配機制保護了內耳不受過強聲音的傷害，內耳的頻率分析功能將複雜的聲音信號分解為不同頻率成分的神經活動模式。這種周邊聽覺處理的特性直接影響了人類對聲景的基本感知能力，包括音調感知、響度感知、音色辨識等基礎功能。研究顯示，人類聽覺系統對於語言頻率範圍（約 500-4000 Hz）具有特別高的敏感度，這種頻率偏好也影響了人們對環境聲音的注意力分配與情感評價 [29]。

中樞聽覺處理系統的複雜性進一步決定了聲景感知的高層次特徵。聽覺皮質的處理機制不僅分析聲音的基本物理特性，更重要的是進行聲音的分類、識別與意義理解。聲音場景分析（Auditory Scene Analysis）理論揭示了人類如何在複雜的聲音環境中區分不同的聲源，並將相關的聲音成分組合成有意義的聽覺對象。這種分析能力使得人類能夠在嘈雜的環境中專注於特定的聲音訊息，例如在繁忙的餐廳中聽清對話夥伴的聲音，或在交通噪音中識別鳥類的鳴叫聲。這種選擇性注意的機制在聲景感知中扮演關鍵角色，決定了人們在複雜聲環境中的感知優先順序 [30]。

認知因素對聲景感知的影響體現在多個層面。個人的聲音經驗與記憶會影響對新聲音的感知與評價，熟悉的聲音往往比陌生的聲音更容易被接受。文化背景與教育經驗也會塑造人們的聲音偏好，例如在音樂教育普及的地區，人們可能對聲音的和諧性與美感有更高的要求。語言背景的差異更會影響對聲音的分類與意義理解，不同語言使用者對於相同環境聲音可能產生不同的認知反應。期望效應也是重要的認知因素，人們對於特定環境的聲音期望會影響其實際的感知體驗，例如在自然公園中聽到機械聲音會比在工業區中聽到相同聲音產生更負面的感受 [31]。

情感因素在聲景感知中扮演著極為重要的角色。聲音具有直接觸發情感反應的能力，這種情感反應往往比認知分析更快速且更強烈。自然聲音如鳥鳴、流水聲通常會引發正面的情感反應，與放鬆、平靜、愉悅等感受相關；而人為噪音如交通聲、機械聲則容易引發負面情感，與壓力、煩躁、疲勞等感受相關。這種情感反應不僅影響人們對聲景的主觀評價，也會產生生理上的反應，包括心率變化、血壓變化、壓力荷爾蒙分泌等。長期的負面聲景暴露可能導致慢性壓力反應，影響身心健康；相反地，正面的聲景體驗則有助於情感修復與健康促進 [32]。

社會心理因素也顯著影響聲景感知的過程與結果。聲音的社會意義與象徵價值會影響人們的感知評價，例如教堂鐘聲在宗教社區中可能被視為神聖的象徵，而在世俗化社區中可能只是時間的提醒。群體認同感也會影響聲音的接受度，屬於自己文化群體的傳統音樂或慶典聲音通常比外來文化的聲音更容易被接受。社會地位與經濟條件的差異更會造成聲景感知的不平等，高收入群體通常對噪音有較低的容忍度，也有更多的資源來改善其聲環境品質 [33]。

年齡因素對聲景感知的影響體現在多個方面。隨著年齡增長，人類的聽覺敏感度會逐漸下降，特別是對高頻聲音的感知能力會顯著減弱。這種生理變化會影響老年人對聲景的感知內容與品質評價。同時，不同年代的人群對聲音有不同的情感聯結與文化記憶，例如老年人可能對傳統的自然聲音有更深的情感聯結，而年輕人則可能對現代科技產生的聲音有更高的接受度。年齡相關的認知

變化也會影響聲景感知，老年人可能需要更長的時間來處理複雜的聲音資訊，而年輕人則能更快速地適應新的聲音環境 [34]。

性別差異在聲景感知中也存在一定的影響。研究顯示，女性通常對聲音有更高的敏感度，特別是對人聲與情感相關的聲音。女性也往往對噪音表現出更強的負面反應，在相同的噪音環境中報告更高的困擾程度。這種性別差異可能與生理構造、荷爾蒙水平、以及社會角色期望等多重因素相關。在聲景規劃與設計中，考慮性別差異有助於創造更加公平與包容的聲環境 [35]。

個人特質與人格因素也會影響聲景感知的個體差異。噪音敏感性是一個重要的個人特質，高噪音敏感性的個體對各種聲音都有較強的反應，更容易受到噪音的負面影響。內向與外向的人格特質也會影響對聲音環境的偏好，內向的人通常偏好較安靜的環境，而外向的人則能更好地適應熱鬧的聲音環境。注意力特質也是重要因素，注意力容易分散的人可能更容易受到背景聲音的干擾，而注意力集中能力強的人則能更好地過濾不相關的聲音資訊 [36]。

健康狀態對聲景感知的影響不容忽視。聽力損失會直接影響聲景感知的內容與品質，輕度聽力損失可能導致語音理解困難，重度聽力損失則會大幅改變整體的聲景體驗。心理健康狀態也會影響聲景感知，抑鬱症患者可能對正面聲音的敏感度降低，焦慮症患者則可能對威脅性聲音有過度反應。慢性疾病如高血壓、心臟病等也可能影響對聲音的生理反應，使得某些聲音更容易引發不適感受 [37]。

1.2 歷史發展 (History of Soundscape Studies)

聲景研究的歷史發展軌跡反映了人類對聲音環境認知的逐步深化過程，這個發展過程不僅體現了學術思維的演進，也反映了社會發展對聲環境品質要求的變化。從早期零散的聲音觀察到現代系統性的聲景科學，這一歷史進程跨越了近半個世紀，涉及了音樂、聲學、生態學、心理學、社會學等多個學科領域的交匯與融合。理解聲景研究的歷史發展有助於把握其理論演進的內在邏輯，也為未來的研究方向提供重要的參考依據。這段歷史不僅是學術發展的記錄，更是

人類追求更好聲環境品質的實踐軌跡 [38]。

聲景研究的起源可以追溯到 20 世紀中期對環境品質日益增長的關注。工業革命後期，都市化進程加速帶來的噪音問題開始受到社會關注，但當時的研究主要集中在工業噪音對工人健康的影響，缺乏對整體聲音環境的系統性認識。早期的環境噪音研究主要採用工程學的方法，重點關注噪音源的控制與防護技術，對於聲音的文化、美學、生態價值缺乏足夠的認識。這種技術導向的研究取向雖然在噪音控制方面取得了一定成效，但無法解決日益複雜的環境聲音問題，也無法滿足人們對聲環境品質日益提升的要求 [39]。

1960 年代末至 1970 年代初，加拿大作曲家與聲學研究者雷蒙·穆瑞·謝弗（R. Murray Schafer）開始對環境聲音產生系統性的興趣，這標誌著現代聲景研究的正式起源。謝弗最初從音樂創作的角度關注環境聲音，他認為整個世界可以被視為一個巨大的音樂作品，每個人都既是這個作品的聆聽者，也是表演者。這種音樂化的環境聲音觀點為後來的聲景理論奠定了重要的美學基礎。謝弗的創新在於將音樂學的概念與方法應用於環境聲音的研究，提出了聲景作曲（Soundscape Composition）的概念，開創了聲音藝術的新領域 [40]。

1970 年代中期，謝弗在西蒙菲莎大學（Simon Fraser University）成立了世界聲景計畫（World Soundscape Project, WSP），這是世界上第一個專門研究環境聲音的學術機構。世界聲景計畫的成立標誌著聲景研究從個人興趣轉向制度化的學術研究，也確立了聲景研究的跨學科特性。該計畫吸引了來自音樂、聲學、心理學、社會學、生態學等不同領域的研究者，形成了早期的聲景研究社群。世界聲景計畫的研究成果不僅包括理論著作，也包括大量的實地錄音資料，為後續的聲景研究提供了重要的資料基礎 [41]。

1977 年，謝弗出版了經典著作《世界的調音：走向聲景設計》（The Tuning of the World: Toward a Soundscape Design），這本書系統地闡述了聲景的基本概念與理論框架，成為聲景研究領域的奠基之作。書中提出了許多至今仍在使用的重要概念，包括聲景、聲音事件、聲學生態、聲音標誌等，建立了聲景研究的基本術語體系。謝弗在書中還提出了聲景設計的構想，主張透過有意識的設計

來改善環境聲音品質，這個構想對後來的聲景應用研究產生了深遠影響。該書的出版標誌著聲景研究理論體系的初步建立，也為聲景研究的國際化傳播奠定了基礎 [42]。

1980 年代至 1990 年代，聲景研究經歷了重要的理論發展與實務應用階段。歐洲的研究者開始關注聲景研究，特別是在法國、德國、義大利等國家，形成了具有地域特色的研究傳統。法國的研究者更注重聲景的社會學與人類學層面，發展出聲音民族誌（Sound Ethnography）的研究方法；德國的研究者則更關注聲景的心理學與認知科學基礎，推動了聲景感知研究的發展；義大利的研究者在聲景生態學方面做出了重要貢獻，特別是在自然環境聲景的研究方面。這種地域化的發展豐富了聲景研究的理論內涵，也促進了不同研究傳統之間的對話與交流 [43]。

1990 年代末至 2000 年代初，資訊科技的快速發展為聲景研究帶來了革命性的變化。數位錄音技術的普及使得長期、大規模的聲景監測成為可能，地理資訊系統（GIS）的應用為聲景的空間分析提供了強大工具，網路技術的發展則促進了聲景資料的共享與研究合作。這個時期也見證了聲景研究方法論的重大發展，包括聲景評估標準的建立、聲景分類系統的完善、以及聲景監測技術的標準化。國際間的學術交流也更加頻繁，形成了全球性的聲景研究網絡 [44]。

2000 年代中期以後，聲景研究進入了快速發展與應用推廣的階段。2008 年，世界聲景論壇（World Forum for Acoustic Ecology, WFAE）正式成立，成為協調全球聲景研究與實務的重要平台。同年，國際標準化組織（ISO）開始制定聲景相關的國際標準，2014 年發布的 ISO 12913-1:2014 標準確立了聲景的官方定義，2018 年發布的 ISO 12913-2:2018 標準則規範了聲景評估的資料收集方法。這些國際標準的制定標誌著聲景研究從學術探索轉向實務應用的重要轉折點 [45]。

2010 年代至今，聲景研究呈現出更加多元化與專業化的發展趨勢。聲景生態學成為一個獨立的研究領域，專注於自然環境聲景與生物多樣性的關係；都市聲景研究則更加關注城市規劃與設計的實務應用，許多城市開始將聲景品質納入

規劃考量；文化聲景研究關注聲音的文化意義與傳承，推動了聲音文化遺產保護的發展；健康聲景研究則探討聲景對人類健康與福祉的影響，為健康城市建設提供新的視角。這種專業化的發展趨勢反映了聲景研究的成熟化，也為解決特定領域的聲環境問題提供了專業的知識支援 [46]。

當代聲景研究面臨著新的機遇與挑戰。氣候變遷對全球聲景的影響成為新興的研究議題，研究者開始關注極端氣候事件如何改變環境聲學特性。人工智慧與機器學習技術的發展為自動化聲景分析提供了新的可能性，大數據技術則使得研究者能夠處理前所未有規模的聲景資料。公民科學的興起也為聲景研究注入了新的活力，一般民眾透過智慧型手機參與聲景資料的收集與分析，形成了參與式的研究模式。這些新的發展趨勢預示著聲景研究將在未來繼續快速發展，為改善人類聲環境品質發揮更大的作用 [47]。

1.2.1 早期聲音研究 (Early Studies of Sound)

早期聲音研究的發展為現代聲景學奠定了重要的科學與文化基礎，這些研究涵蓋了從古代哲學思辨到現代科學實驗的廣泛範圍。雖然「聲景」這個概念直到 20 世紀後半才正式提出，但人類對聲音環境的關注與研究可以追溯到數千年前的古代文明。這些早期研究不僅建立了聲學的基礎理論，也形成了對聲音美學、聲音象徵、聲音功能等多重面向的認識，為後來聲景研究的綜合性發展提供了重要的知識積累。理解這些早期研究的內容與貢獻，有助於我們認識聲景研究的深厚歷史根源，也能為當代研究提供重要的理論啟發 [48]。

古代希臘哲學家對聲音本質的探討構成了早期聲音研究的重要起點。畢達哥拉斯（Pythagoras）的音樂理論不僅建立了音程關係的數學基礎，更重要的是提出了「宇宙和諧」的概念，認為整個宇宙運行產生和諧的音樂。這種將聲音與宇宙秩序聯繫的思想為後來的聲景研究提供了整體性思維的哲學基礎。亞里斯多德（Aristotle）對聲音傳播機制的分析則建立了聲學研究的基礎框架，他正確地認識到聲音是透過空氣振動傳播的機械現象，這種物理學觀點為後來聲學科學的發展指出了正確方向。古希臘劇場的聲學設計更展現了早期對環境聲學的實務應用，這些劇場的精密聲學設計使得演員的聲音能夠清晰地傳達給數千名觀

眾 [49]。

中世紀的聲音研究主要受到宗教思想的影響，但也產生了重要的理論貢獻。教堂建築的聲學設計體現了對宗教空間聲環境的深度思考，哥德式教堂的高聳空間與石材結構創造出獨特的混響效果，增強了宗教音樂的神聖感受。修道院的鐘聲系統則建立了時間與聲音的關聯，成為中世紀社會時序組織的重要工具。這種宗教性的聲音實務為後來聲景研究中聲音意義與象徵功能的理解提供了重要參考。同時，中世紀的音樂理論家如圭多·達雷佐（Guido d'Arezzo）發展的記譜法系統，為聲音的記錄與分析提供了重要工具 [50]。

文藝復興時期的科學革命推動了聲學研究的重要進展。李奧納多·達文西（Leonardo da Vinci）對聲音傳播的觀察與記錄展現了科學實驗方法在聲學研究中的應用，他透過系統的觀察發現聲音在不同媒介中的傳播特性。伽利略·伽利萊（Galileo Galilei）的振動理論更為聲學建立了堅實的物理基礎，他透過弦樂器的實驗揭示了頻率與音調的關係。這個時期的建築師也開始系統性地考慮空間聲學的問題，帕拉第奧（Palladio）等建築師在劇場設計中融入了聲學原理，追求建築美學與聲學功能的完美結合 [51]。

17 世紀至 18 世紀的科學革命進一步推進了聲學的理論發展。牛頓（Newton）的力學理論為聲音傳播提供了數學描述，建立了聲學的理論基礎。歐拉（Euler）與拉格朗日（Lagrange）等數學家發展的波動方程理論，使得聲音現象可以用精確的數學語言描述。這個時期也見證了樂器製造技術的重大進步，史特拉第瓦里（Stradivarius）等製琴師透過精密的工藝創造出音質優美的弦樂器，這些實務經驗為聲學理論的發展提供了重要的實證基礎 [52]。

19 世紀工業革命時期的聲音研究呈現出更加多元化的特徵。科學家們開始系統研究工業噪音對人類健康的影響，這些研究為現代職業衛生學奠定了基礎。同時，電報與電話技術的發明推動了聲音信號處理技術的發展，貝爾（Bell）等發明家的工作為現代電聲學建立了重要基礎。音響學作為一個獨立學科也在這個時期確立，賽賓（Sabine）的混響理論建立了現代建築聲學的科學基礎，使得音樂廳與劇院的聲學設計有了科學依據 [53]。

19 世紀末至 20 世紀初，心理聲學的興起為聲音研究增添了重要的主觀維度。韋伯（Weber）與費希納（Fechner）的心理物理學研究揭示了物理刺激與主觀感受之間的關係，建立了聲音強度與響度感知的定量關係。赫姆霍茲（Helmholtz）的《聲學生理學》更是綜合了物理聲學與生理心理學的研究成果，建立了現代聽覺科學的基礎。這些研究不僅推進了聲學科學的發展，也為後來聲景研究中主觀感知評估的方法論奠定了重要基礎 [54]。

20 世紀前半期的聲音研究受到兩次世界大戰的重要影響。軍事需求推動了聲納技術、聲音定位技術、以及噪音控制技術的快速發展。電子技術的進步使得聲音的記錄、分析與處理達到前所未有的精度，為客觀的聲學測量提供了可靠工具。同時，廣播與錄音技術的普及也改變了人們對聲音的認知與體驗，聲音開始脫離其原始的時空脈絡，成為可以獨立存在與傳播的媒介。這種技術變革為後來的聲景研究提供了重要的方法論支援 [55]。

人類學與民族音樂學的發展為聲音研究增添了文化維度。研究者開始關注不同文化中的聲音傳統與聲音意義，這種跨文化的研究視角豐富了對聲音社會功能的理解。田野錄音技術的發展使得研究者能夠記錄並分析各種文化中的聲音現象，這些資料不僅具有學術價值，也成為文化保存的重要資源。這種文化導向的聲音研究為後來聲景研究中文化因素的考量提供了重要啟發 [56]。

城市化進程帶來的噪音問題也促進了早期環境聲學的發展。都市規劃師與公共衛生專家開始關注城市噪音對居民健康與生活品質的影響，推動了最早的噪音管制法規的制定。雖然這些早期的環境聲學研究主要關注噪音控制，缺乏對聲音環境整體性的認識，但它們為後來聲景研究的社會應用提供了重要的政策基礎與實務經驗。這些早期研究的局限性也促使後來的研究者思考更加綜合性的聲音環境研究方法 [57]。

1.2.2 雷蒙·穆瑞·謝弗的貢獻 (Contribution of R. Murray Schafer)

雷蒙·穆瑞·謝弗（R. Murray Schafer, 1933-2021）作為現代聲景研究的奠基者，

其貢獻不僅在於創造了「聲景」這個概念，更重要的是建立了理解與研究環境聲音的全新理論框架與方法論體系。謝弗的工作代表了從傳統噪音控制導向轉向整體聲音環境設計的重要典範轉移，這種轉移不僅影響了學術研究的方向，也對藝術創作、環境規劃、教育實踐等多個領域產生了深遠影響。他將音樂家的敏銳聽覺、學者的系統思維、以及社會活動家的實踐熱忱完美結合，創造出一個全新的跨學科研究領域，為人類追求更美好聲環境提供了理論指導與實踐方向 [58]。

謝弗的聲景概念起源於其音樂創作與教育實踐。1960 年代末期，謝弗在西蒙菲莎大學教授音樂時，開始思考音樂與環境聲音之間的關係。他意識到傳統音樂教育過分強調音樂廳內的「純淨」聲音，而忽視了我們日常生活中無所不在的環境聲音。謝弗提出，整個世界可以被視為一個巨大的樂曲，每個人都既是這個樂曲的演奏者，也是聆聽者。這種創新的聲音觀不僅擴展了音樂的定義，也為環境聲音的美學價值提供了理論基礎。謝弗在 1967 年發表的文章〈新聲景〉（The New Soundscape）中首次使用了「聲景」這個術語，標誌著這個概念的正式誕生 [59]。

1971 年，謝弗出版了《新聲景：現代音樂教師手冊》（The New Soundscape: A Handbook for the Modern Music Teacher），這本書系統地闡述了聲景教育的理念與方法。書中提出了許多創新的教學活動，包括聲音漫步（soundwalk）、聲音地圖製作、聲音日記撰寫等，這些活動旨在培養學生對環境聲音的敏感度與鑑賞能力。謝弗認為，現代人由於長期生活在嘈雜的環境中，已經失去了細膩聆聽的能力，因此需要透過系統的訓練來重新開發聽覺感知。這種教育理念不僅影響了音樂教育的發展方向，也為後來的聲景研究方法論奠定了重要基礎 [60]。

1973 年，謝弗建立了世界聲景計畫（World Soundscape Project, WSP），這是世界上第一個專門研究環境聲音的學術機構。世界聲景計畫匯集了來自不同學科背景的研究者，包括音樂家、聲學工程師、心理學家、社會學家、生態學家等，形成了真正跨學科的研究團隊。該計畫的研究活動包括環境聲音的錄製與分析、聲景變遷的歷史研究、不同文化中聲音意義的比較分析、以及聲景保護

的實務行動等。世界聲景計畫不僅推動了聲景研究的學術發展，也培養了一批優秀的聲景研究者，為這個領域的國際化發展奠定了人才基礎 [61]。

1977 年，謝弗發表了其最重要的著作《世界的調音：走向聲景設計》（The Tuning of the World: Toward a Soundscape Design），這本書被公認為聲景研究領域的經典之作。書中系統地建立了聲景研究的理論框架，提出了許多至今仍在使用的重要概念。謝弗將聲景分為三個基本組成部分：基調聲音（keynote sounds）、聲音信號（sound signals）、聲音標誌（soundmarks）。基調聲音是環境中持續存在的背景聲音，通常被人們無意識地忽略，但它們形成了聲景的基本特徵；聲音信號是需要人們注意的前景聲音，如警報聲、呼叫聲等；聲音標誌則是具有獨特特徵且對社區有重要意義的聲音，如教堂鐘聲、市場叫賣聲等 [62]。

謝弗在書中還提出了聲學生態（acoustic ecology）的概念，這個概念將生態學的思維模式應用於聲音環境的研究。他認為，聲音環境就像生物生態系統一樣，具有複雜的結構與動態平衡，需要用生態學的方法來理解與保護。謝弗特別關注現代工業社會對聲學生態的破壞，他將現代都市的嘈雜環境稱為「lo-fi 聲景」（低品質聲景），與傳統鄉村的「hi-fi 聲景」（高品質聲景）形成對比。他主張透過聲景設計來恢復聲學生態的平衡，創造更加和諧的聲音環境 [63]。

謝弗的聲景分類系統為聲景研究提供了重要的分析工具。他根據聲音來源將聲景分為自然聲景、人文聲景、技術聲景等不同類型。自然聲景主要由地球物理音（如風聲、水聲、雷聲）與生物音（如鳥鳴、蟲鳴、獸叫）組成；人文聲景包括人類活動產生的各種聲音，如語言、音樂、勞動聲音等；技術聲景則是工業化社會的產物，包括機械聲、電子聲、交通聲等。這種分類方法不僅有助於系統地分析聲景組成，也為聲景變遷的歷史研究提供了框架 [64]。

謝弗對聲景歷史變遷的研究具有重要的文化價值。他透過歷史文獻、田野調查、口述歷史等方法，重建了不同歷史時期的聲景特徵，揭示了工業化進程對聲音環境的深刻影響。謝弗的研究顯示，前工業時代的聲景以自然聲音與人聲為主，具有季節性變化與日夜韻律，形成了豐富而有層次的聲音組織；工業化

之後，機械聲音逐漸主導了聲景，掩蔽了許多傳統的聲音，導致聲景的同質化與單調化。這種歷史性的分析不僅具有學術價值，也為聲景保護工作提供了重要依據 [65]。

謝弗的聲音教育理念對現代教育產生了深遠影響。他主張教育應該培養學生的「聲音素養」（sound literacy），包括敏銳的聽覺能力、豐富的聲音知識、以及對聲音環境的責任感。謝弗開發了許多創新的教學方法，如聲音狩獵（sound hunting）、聲音雕塑（sound sculpture）、聲音劇場（sound theatre）等，這些方法不僅提高了學生對聲音的敏感度，也激發了他們的創造力與環境意識。謝弗的教育理念已經被世界各地的學校採用，成為現代聲音教育的重要組成部分 [66]。

謝弗作為聲音藝術家的創作實踐也為聲景研究提供了重要啟發。他創作了大量的聲景作品，包括《Music for Wilderness Lake》、《The Princess of the Stars》等，這些作品將環境聲音與音樂創作結合，開創了聲景作曲的新領域。謝弗的作品不僅具有藝術價值，也展現了聲景的美學可能性，為聲景設計提供了創作靈感。他的創作實踐證明了聲景不僅是研究對象，也可以成為藝術創作的媒介與手段 [67]。

謝弗的社會行動主義精神也是其貢獻的重要組成部分。他不僅關注聲景研究的學術發展，更致力於推動聲景保護的社會行動。謝弗參與了許多聲景保護計畫，包括反對機場噪音、保護自然聲景、推動噪音法規制定等。他認為，聲景研究者不應該只是被動的觀察者，而應該積極參與改善聲音環境的行動。這種行動主義的精神為聲景研究注入了社會責任感，也促進了聲景研究與社會實踐的結合 [68]。

謝弗對聲景研究方法論的貢獻也值得特別關注。他強調定性研究與定量研究的結合，主張在客觀測量的基礎上進行主觀感知的深度分析。謝弗開發的聲音漫步方法成為聲景研究的經典方法，這種方法透過實地行走與深度聆聽，獲得對聲景的直接體驗與感受。謝弗也重視跨文化比較研究，他的團隊在世界各地進行聲景調查，收集了大量的比較資料，為理解聲景的普遍性與特殊性提供了重

要基礎 [69]。

1.2.3 世界聲景運動 (World Soundscape Project)

世界聲景計畫（World Soundscape Project, WSP）作為現代聲景研究的起源機構，其成立與發展標誌著聲景研究從個人興趣轉向制度化學術研究的重要轉折點。這個計畫不僅建立了聲景研究的方法論基礎，也培養了第一代聲景研究者，為這個跨學科領域的國際化發展奠定了堅實基礎。世界聲景計畫的工作成果包括理論建構、實證研究、藝術創作、教育推廣、以及社會行動等多個面向，體現了聲景研究的綜合性特徵。理解世界聲景計畫的歷史與貢獻，對於把握聲景研究的發展軌跡與核心理念具有重要意義 [70]。

世界聲景計畫成立於 1973 年，由雷蒙·穆瑞·謝弗在加拿大西蒙菲莎大學創立。該計畫的成立背景與 1960-70 年代的環境保護運動密切相關，當時社會對環境污染問題的關注日益增長，但主要焦點集中在空氣污染與水污染，噪音污染尚未受到充分重視。謝弗敏銳地意識到聲音環境品質對人類生活的重要性，決定建立專門的研究機構來系統研究這個被忽視的環境問題。世界聲景計畫的成立標誌著聲景研究從藝術創作的靈感轉向科學研究的系統性探索，也代表了跨學科研究方法在環境科學中的創新應用 [71]。

世界聲景計畫匯集了來自不同學科背景的研究者，形成了真正的跨學科研究團隊。核心成員包括音樂家布魯斯·戴維斯（Bruce Davis）、希爾德嘉德·韋斯特卡姆普（Hildegard Westerkamp）、作曲家貝瑞·特魯克斯（Barry Truax）、聲學工程師彼得·霍勒（Peter Heller）、以及來自心理學、社會學、生態學等領域的專家。這種多學科的組合使得世界聲景計畫能夠從多重角度探討聲景問題，避免了單一學科視角的局限性。團隊成員的不同專業背景也促進了學科間的對話與整合，發展出獨特的跨學科研究方法論 [72]。

世界聲景計畫的研究方法論創新是其重要貢獻之一。該計畫發展出一套系統的聲景研究方法，包括實地錄音、聲音分析、聽覺測試、問卷調查、深度訪談、聲音漫步等多種方法。這些方法的整合應用使得研究者能夠同時掌握聲景的客

觀特性與主觀感受，為後來的聲景研究建立了方法論標準。特別是聲音漫步（soundwalk）方法的開發，為聲景的實地體驗與分析提供了重要工具，這種方法至今仍是聲景研究的經典方法之一 [73]。

世界聲景計畫進行了大量的實證研究，其中最著名的是對溫哥華聲景的系統性調查。從 1973 年開始，研究團隊對溫哥華市的聲景進行了詳細的記錄與分析，包括不同區域的聲音特徵、時間變化模式、居民的聲景感受等。這項研究不僅產生了豐富的實證資料，也為都市聲景研究建立了標準的調查程序。研究結果顯示了都市化對聲景的深刻影響，包括自然聲音的減少、機械聲音的增加、以及聲景多樣性的降低等趨勢 [74]。

除了溫哥華的研究，世界聲景計畫也進行了多項跨文化比較研究。研究團隊前往歐洲各地進行聲景調查，包括法國、德國、義大利、瑞典等國家的鄉村與城市。這些比較研究揭示了不同文化與地理環境中聲景的特殊性，也發現了工業化對全球聲景的共同影響。跨文化研究的成果不僅豐富了聲景研究的理論內涵，也為理解聲景的文化意義提供了重要資料 [75]。

世界聲景計畫的教育推廣工作對聲景研究的普及產生了重要影響。研究團隊開發了多種聲景教育教材與活動，包括《聲景手冊》（The Soundscape Handbook）、聲景錄音集、教學指南等。這些教材不僅用於大學教育，也推廣到中小學教育中，培養了廣大學生對聲景的關注與保護意識。世界聲景計畫還定期舉辦工作坊與講座，向公眾介紹聲景的概念與價值，推動了聲景意識的社會普及 [76]。

世界聲景計畫的藝術創作活動為聲景研究增添了重要的美學維度。團隊成員創作了大量的聲景作品，包括聲景作曲、聲音裝置、廣播節目等。這些作品不僅具有藝術價值，也成為聲景研究的重要成果展示方式。特別是希爾德嘉德·韋斯特卡姆普的聲景作曲作品，將環境聲音與音樂創作完美結合，開創了聲景藝術的新領域。這些藝術創作活動證明了聲景不僅是科學研究的對象，也是藝術創作的豐富資源 [77]。

世界聲景計畫對聲音保存與檔案建設也做出了重要貢獻。該計畫建立了世界上第一個系統的聲景資料庫，收集並保存了大量的環境聲音錄音。這些錄音不僅具有研究價值，也成為聲音文化遺產的重要組成部分。許多已經消失的聲音透過這些錄音得以保存，為後代了解歷史聲景提供了珍貴資料。這種檔案工作的重要性隨著時間推移越來越明顯，許多當時錄製的聲音如今已經無法重現 [78]。

世界聲景計畫的理論建構工作為聲景研究建立了重要的概念基礎。該計畫發展的聲景分類系統、聲景評估方法、聲景變遷理論等，至今仍是聲景研究的基礎理論。特別是聲學生態（acoustic ecology）概念的提出，為理解聲音環境的生態特性提供了重要框架。這些理論不僅影響了學術研究，也為聲景保護政策的制定提供了理論依據 [79]。

世界聲景計畫的社會影響與政策推動工作也值得關注。該計畫積極參與噪音控制政策的制定，為政府部門提供專業建議。研究團隊的工作促進了加拿大聲景保護法規的建立，也影響了其他國家的相關政策。世界聲景計畫證明了學術研究可以產生實際的社會影響，為解決環境問題提供科學支援 [80]。

1980 年代初期，世界聲景計畫逐漸轉型，其成員分別在不同機構繼續推動聲景研究的發展。雖然作為一個集中的研究機構，世界聲景計畫的活動逐漸減少，但其影響持續擴展，培養的研究者在世界各地建立了新的聲景研究中心，形成了全球性的聲景研究網絡。1993 年，由世界聲景計畫的前成員與其他聲景研究者共同成立了世界聲學生態論壇（World Forum for Acoustic Ecology, WFAE），繼承並發展了世界聲景計畫的理念與使命 [81]。

1.3 聲景理論架構 (Theoretical Frameworks of Soundscape)

聲景理論架構構成了整個聲景研究領域的概念基礎與分析工具，這個架構不僅整合了來自不同學科的理論貢獻，也為實證研究與實務應用提供了系統性的指導原則。聲景理論的發展經歷了從描述性概念到分析性框架的演進過程，目前已經形成了相對完整的理論體系，涵蓋了聲源分類、傳播機制、感知過程、評

估方法、以及文化詮釋等多個層面。這個理論架構的建立不僅提升了聲景研究的科學性與系統性，也為不同背景的研究者提供了共同的概念語言與分析工具。理解聲景理論架構的內容與結構，對於深入掌握聲景研究的核心理念與方法論具有關鍵意義 [82]。

聲景理論架構的基礎在於對聲音環境的系統性分析與分類。謝弗最初提出的聲景三元組合－基調聲音（keynote sounds）、聲音信號（sound signals）、聲音標誌（soundmarks）－為聲景分析提供了基本框架。這種分類方法不僅考慮了聲音的物理特性，更重要的是考慮了聲音在人類感知與社會文化中的功能與意義。基調聲音作為環境的背景聲音，通常不被人們有意識地注意，但它們決定了聲景的基本特徵與氛圍；聲音信號作為前景聲音，具有傳達資訊與引起注意的功能；聲音標誌則具有文化象徵意義，成為特定地方的聲音身份標識。這種功能性的分類方法為聲景的質化分析提供了有效工具 [83]。

隨著聲景研究的發展，學者們提出了更加精密的聲源分類系統。現代聲景理論通常將聲音來源分為三大類：生物音（biophony）、地球物理音（geophony）、以及人為音（anthrophony）。生物音包括所有生物產生的聲音，從昆蟲的低頻鳴叫到鯨魚的複雜歌聲；地球物理音包括自然物理過程產生的聲音，如風聲、雨聲、海浪聲、地震聲等；人為音則包括人類活動產生的所有聲音，從語言交談到工業機械聲。這種分類系統不僅更加系統化，也為聲景的生態學分析提供了重要工具，特別是在評估人類活動對自然聲景影響的研究中具有重要價值 [84]。

聲景理論架構的另一個重要組成部分是對聲音傳播與空間分布的分析。聲音在環境中的傳播不僅受到物理定律的支配，也受到環境條件的顯著影響。地形、建築、植被、氣象條件等因素都會影響聲音的傳播路徑、衰減程度、以及頻率特性。聲景理論發展出聲音地圖（sound mapping）的概念，用以描述聲音在空間中的分布模式。這種空間分析的方法不僅有助於理解聲景的空間特徵，也為聲景規劃與設計提供了重要工具。現代聲景研究大量運用地理資訊系統（GIS）技術進行聲音的空間分析，創造出詳細的聲景地圖 [85]。

時間維度在聲景理論中佔有重要地位。聲景具有明顯的時間變化特徵，包括日夜變化、季節變化、以及長期的歷史變遷。聲景理論發展出時間聲景（temporal soundscape）的概念，用以分析聲音環境的時間動態。這種時間分析不僅關注聲音強度的變化，更關注聲音組成的變化、聲音來源的變化、以及聲音意義的變化。例如，都市聲景在一天中有明顯的韻律變化，早晨以鳥鳴與人類活動聲為主，白天以交通與商業活動聲為主，夜晚則相對安靜。這種時間韻律的分析有助於理解聲景的自然規律與社會模式 [86]。

聲景理論架構也包含了對聲音感知與認知過程的深度分析。人類對聲景的感知不僅涉及聽覺系統的物理處理，更涉及複雜的認知與情感過程。聲景理論整合了聽覺心理學、認知科學、環境心理學等學科的研究成果，建立了聲景感知的理論模型。這個模型包括感知輸入、認知處理、情感反應、以及行為回應等多個層次，說明了聲景體驗的主觀性與個體差異性的產生機制。理解這種感知機制對於聲景評估與設計具有重要意義 [87]。

文化理論在聲景研究中佔有特殊地位。聲音的意義與價值很大程度上由文化背景決定，相同的聲音在不同文化中可能有截然不同的意義與評價。聲景理論發展出文化聲景（cultural soundscape）的概念，強調聲音的文化建構性。這種文化取向的分析不僅關注不同文化群體的聲音傳統與偏好，也關注聲音在文化認同、社會階層、權力關係等方面的作用。跨文化的聲景研究揭示了聲音文化的豐富多樣性，也為國際化的聲景標準制定提供了重要參考 [88]。

聲景品質評估是聲景理論的重要應用領域。傳統的噪音評估主要關注聲壓級的客觀測量，而聲景品質評估則需要同時考慮客觀測量與主觀感受。聲景理論發展出多維度的評估框架，包括聲學品質、感知品質、情感品質、文化品質等不同面向。國際標準化組織（ISO）制定的 ISO 12913 系列標準就是基於這種多維度評估框架，建立了聲景評估的國際標準。這些標準不僅規範了評估方法，也促進了聲景研究的標準化與國際化 [89]。

聲景設計理論是聲景研究的重要發展方向。聲景設計不同於傳統的噪音控制，它追求的是聲音環境的整體優化，包括有害聲音的減少、有益聲音的增強、聲

音多樣性的維護等目標。聲景設計理論整合了聲學工程、環境規劃、景觀建築、藝術創作等不同領域的知識與技術，發展出系統的設計方法與原則。這種設計取向的理論發展使得聲景研究從被動的分析轉向主動的創造，為改善人類聲環境品質提供了實務工具 [90]。

1.3.1 聲源、傳播與感知 (Sources, Propagation, and Perception)

聲源、傳播與感知構成了聲景理論架構的核心三元組合，這個框架系統地描述了從聲音產生到人類感知的完整過程，為理解聲景現象提供了科學基礎。聲源分析關注聲音的起源與特性，傳播分析探討聲音在環境中的物理行為，感知分析則研究人類如何接收與處理聲音資訊。這三個面向的整合分析不僅揭示了聲景形成的機制，也為聲景評估、預測與設計提供了理論工具。深入理解這個三元框架對於掌握聲景研究的科學基礎與方法論原則具有關鍵意義 [91]。

聲源分析是聲景研究的基礎環節，它不僅關注聲音的物理特性，更關注聲音的生態功能與社會意義。從物理角度來看，聲源可以根據其產生機制、頻率特性、時間結構、空間分布等參數進行分類與分析。機械振動是最常見的聲音產生機制，包括固體振動（如敲擊、摩擦）、流體湍流（如風聲、水聲）、以及爆炸性擾動（如雷聲、爆破聲）等。不同的產生機制決定了聲音的基本特徵，例如週期性振動產生純音或複合音，隨機性振動產生噪音或類噪音。現代聲學分析技術能夠精確測量聲源的各種物理參數，為聲景的客觀分析提供可靠數據 [92]。

生物音的分析在聲景研究中佔有特殊地位，因為生物音不僅是聲景的重要組成部分，也是生態系統健康的重要指標。不同物種的發聲機制與聲學特性反映了其生態適應策略，例如鳥類的鳴叫聲通常具有明確的頻率結構與時間模式，用於求偶、領域標記、群體溝通等功能；昆蟲的鳴叫聲通常具有特定的節奏模式，與其繁殖周期密切相關；哺乳動物的聲音則更加多樣化，從低頻的象聲到高頻的蝙蝠超音波。生物音分析不僅需要聲學技術，也需要生物學知識，這種跨學科的分析方法為聲景生態學的發展奠定了基礎 [93]。

人為音源的分析具有重要的社會意義，因為人為音源不僅反映了人類活動的特徵，也影響著其他聲源的表現與感知。交通音源是現代都市聲景的主要組成部分，包括汽車引擎聲、輪胎噪音、制動聲等，這些聲音的特性與交通流量、車輛類型、道路條件等因素密切相關。工業音源則反映了生產活動的特徵，從工廠機械的週期性噪音到建築工地的不規則聲音。人聲作為最重要的人為音源，具有豐富的語言學與社會學意義，不同語言、不同社會群體的人聲特徵都會影響聲景的文化特色 [94]。

聲音傳播分析關注聲音在環境中的物理行為，這種分析不僅有助於理解聲景的空間特徵，也為聲景預測與控制提供科學依據。聲音傳播受到多種因素的影響，包括距離衰減、大氣吸收、地面反射、障礙物遮蔽、氣象條件等。距離衰減是最基本的傳播效應，在自由空間中，聲壓隨距離的增加呈反比例減少，但在實際環境中，地面反射、大氣分層等因素會使衰減模式變得複雜。頻率依賴的大氣吸收使得高頻聲音比低頻聲音衰減更快，這種效應在長距離傳播中尤為明顯 [95]。

環境障礙物對聲音傳播的影響構成了聲景空間分析的重要內容。建築物、地形起伏、植被等障礙物會產生聲音的反射、繞射、散射等現象，創造出複雜的聲場分布。都市環境中的建築峽谷效應會導致聲音的多重反射，增強某些頻率成分，形成特有的都市聲學特徵。山谷環境中的回音現象則會延長聲音的持續時間，創造出獨特的空間聲學效果。森林環境中的植被吸收與散射效應會減少高頻成分，使聲音變得柔和。這些環境效應不僅影響聲音的物理特性，也影響人們的聲景感受 [96]。

氣象條件對聲音傳播的影響在聲景研究中日益受到重視。溫度梯度會造成聲音的折射現象，影響聲音的傳播方向與距離；風速與風向會影響聲音的對流傳播，順風方向的聲音傳播更遠，逆風方向的聲音傳播較近；濕度變化會影響聲音的吸收特性；降雨會產生額外的背景噪音，同時也會吸收部分聲音能量。這些氣象效應的分析對於理解聲景的時間變化與季節變化具有重要意義，也為聲景預測模型的建立提供重要參數 [97]。

聲音感知分析是聲景研究中最複雜也最關鍵的環節，因為聲景最終是透過人類感知系統產生的主觀體驗。人類聽覺系統的生理特性決定了聲音感知的基本特徵，包括頻率選擇性、時間解析度、強度辨別能力等。外耳的傳遞函數決定了人類對不同頻率聲音的敏感度差異，中耳的阻抗匹配功能保護內耳不受強聲傷害，內耳的頻率分析功能將複雜聲音分解為不同頻率成分。這些周邊聽覺處理的特性直接影響了人們對聲景的基本感知能力 [98]。

中樞聽覺處理的複雜性進一步決定了聲景感知的高層次特徵。聽覺場景分析（Auditory Scene Analysis）是中樞聽覺處理的重要功能，它使人類能夠在複雜的聲音環境中區分不同的聲源，並將相關的聲音成分組合成有意義的聽覺對象。這種分析能力涉及時間相關性分析、頻率成分分組、空間定位等多種認知過程。在複雜的聲景中，聽覺場景分析決定了人們注意到哪些聲音、忽略哪些聲音、以及如何理解聲音的來源與意義 [99]。

聲音的心理聲學特性對聲景感知具有重要影響。響度不僅與聲壓級相關，也與頻率特性、時間特性相關，相同聲壓級的聲音在不同頻率下的響度感受可能大不相同。音調感知不僅依賴基頻，也受到泛音結構的影響，複雜聲音的音調感知往往涉及複雜的認知處理過程。音色是區分不同聲源的重要線索，它與聲音的頻譜包絡、攻擊特性、時間變化等因素相關。這些心理聲學特性的理解對於聲景的主觀評估與設計具有重要指導意義 [100]。

空間聽覺是聲景感知的重要組成部分，它使人們能夠感知聲音的空間位置與移動。雙耳聽覺是空間聽覺的基礎，透過兩耳間的時間差、強度差、頻譜差等線索，人類可以準確定位聲源的方向。頭部相關傳遞函數（Head-Related Transfer Function, HRTF）描述了聲音從不同方向到達兩耳的傳遞特性，這種個體化的傳遞函數決定了每個人獨特的空間聽覺能力。在聲景中，空間聽覺不僅幫助人們定位聲源，也創造了聲音的空間印象與沈浸感 [101]。

聲音掩蔽效應對聲景感知具有重要影響。當多個聲音同時存在時，較強的聲音可能掩蔽較弱的聲音，使後者無法被察覺。這種掩蔽效應不僅發生在同時存在的聲音之間（同時掩蔽），也可能發生在時間上相近的聲音之間（時間掩蔽）。

在都市聲景中，交通噪音經常掩蔽鳥鳴聲、人聲對話等有意義的聲音，影響聲景的品質與功能。理解掩蔽效應的機制對於聲景設計與噪音控制具有重要意義 [102]。

認知與情感因素在聲景感知中扮演重要角色。個人經驗、文化背景、當前情緒狀態等因素都會影響對聲音的感知與評價。熟悉的聲音往往比陌生的聲音更容易被接受，具有正面聯想的聲音會引發愉悅的感受，而具有負面聯想的聲音則會引發不適的感受。期望效應也是重要的認知因素，人們對特定環境的聲音期望會影響其實際的感知體驗。這些認知與情感因素的分析對於理解聲景感知的主觀性與個體差異性具有重要意義 [103]。

1.3.2 聲景分類與分析 (Typologies and Analysis of Soundscape)

聲景分類與分析構成了聲景研究的重要方法論基礎，透過系統性的分類框架與分析工具，研究者能夠有效地描述、比較與評估不同類型的聲景。聲景分類不僅是學術研究的需要，也是實務應用的基礎，它為聲景規劃、設計與管理提供了概念工具與操作準則。隨著聲景研究的發展，分類系統從最初的描述性分類逐漸發展為基於科學標準的系統分類，分析方法也從定性描述發展為定量測量與統計分析的結合。理解聲景分類與分析的理論基礎與實務方法，對於掌握聲景研究的核心技能具有重要意義 [104]。

聲景分類的理論基礎建立在對聲音環境複雜性的系統性理解之上。早期的聲景分類主要基於聲音來源的差異，謝弗提出的基調聲音、聲音信號、聲音標誌的三分法為功能性分類奠定了基礎。隨著研究的深入，學者們發展出更加精細的分類系統，考慮了聲音的物理特性、生態功能、社會意義、文化價值等多重維度。現代聲景分類通常採用多層次、多維度的分類框架，既考慮客觀的聲學特性，也考慮主觀的感知評價，既關注局部的聲音事件，也關注整體的聲景特徵 [105]。

基於聲音來源的分類是最基本也最廣泛使用的聲景分類方法。這種分類方法將聲景中的聲音分為三大類：生物音（biophony）、地球物理音（geophony）、人

為音（anthrophony）。生物音包括所有生物產生的聲音，可以進一步細分為鳥類鳴叫、昆蟲鳴叫、哺乳動物叫聲、海洋生物聲音等子類。地球物理音包括自然物理過程產生的聲音，如風聲、雨聲、海浪聲、雷聲、地震聲等。人為音包括人類活動產生的所有聲音，從語言交談到工業機械，從音樂演奏到交通運輸。這種分類方法的優點是概念清晰、操作簡便，特別適用於生態聲景的研究 [106]。

基於環境類型的分類方法關注聲景與其所在環境的關聯性。這種分類通常將聲景分為自然聲景、都市聲景、鄉村聲景、工業聲景、文化聲景等類型。自然聲景主要存在於受人類活動影響較小的自然環境中，以生物音與地球物理音為主；都市聲景存在於人口密集的城市環境中，以人為音為主，具有高強度、高複雜性的特點；鄉村聲景介於自然與都市之間，人為音與自然音並存；工業聲景以工業生產活動的聲音為主；文化聲景則強調聲音的文化意義與象徵價值。這種分類方法有助於理解環境條件對聲景特徵的影響 [107]。

基於時間特性的分類方法關注聲景的時間變化模式。聲景具有明顯的時間變化特徵，包括瞬間聲音事件、週期性聲音模式、季節性聲音變化、以及長期歷史變遷等。根據時間尺度，可以將聲景分為微觀聲景（秒到分鐘）、中觀聲景（小時到天）、巨觀聲景（月到年）等層次。根據時間模式，可以將聲景分為持續性聲景、間歇性聲景、週期性聲景、隨機性聲景等類型。這種時間導向的分類對於理解聲景的動態特徵具有重要價值 [108]。

基於功能特性的分類方法關注聲音在人類社會中的作用與意義。這種分類通常包括資訊聲景（傳達訊息的聲音）、警示聲景（提醒注意的聲音）、文化聲景（具有文化意義的聲音）、美學聲景（具有美學價值的聲音）、治療聲景（具有健康促進作用的聲音）等類型。每種功能類型的聲景都有其特定的聲學特徵與社會價值，需要不同的保護與管理策略。這種功能導向的分類對於聲景的應用研究具有重要指導意義 [109]。

聲景的量化分析方法是現代聲景研究的重要組成部分。傳統的聲學測量方法，如聲壓級測量、頻譜分析、統計分析等，為聲景的客觀描述提供了基礎工具。

現代聲景研究發展出多種專門的聲景分析指標，包括聲景多樣性指數、聲學複雜度指數、生物聲學指數等。這些指標能夠量化聲景的不同特徵，為聲景的比較與評估提供客觀依據。例如，聲景多樣性指數基於資訊理論的熵概念，測量聲景中不同頻率成分的分布均勻程度；聲學複雜度指數則測量聲景的時頻結構複雜性 [110]。

機器學習與人工智慧技術在聲景分析中的應用日益廣泛。自動聲音識別技術能夠識別聲景中的不同聲音類型，大幅提高聲景分析的效率與精度。深度學習演算法可以從大量聲景資料中自動發現聲景的模式與規律，為聲景分類提供新的方法。音景分離技術能夠將複雜聲景中的不同聲源分離出來，為聲景的細緻分析提供可能。這些新技術的應用不僅提升了聲景研究的科學水準，也為大規模聲景監測與分析提供了可行的解決方案 [111]。

聲景的主觀評估方法關注人們對聲景的感知、情感與偏好反應。問卷調查是最常用的主觀評估方法，透過標準化的問卷收集人們對聲景的評價。語意差分法（Semantic Differential Method）是一種經典的評估技術，使用對偶形容詞對來測量人們對聲景的主觀感受。聲音漫步（Soundwalk）是一種參與式的評估方法，透過實地行走與深度聆聽來體驗與評估聲景。這些主觀評估方法為理解聲景的人文價值與社會意義提供了重要工具 [112]。

聲景分析的空間方法關注聲景的空間分布與變化模式。地理資訊系統（GIS）技術為聲景的空間分析提供了強大工具，研究者可以製作詳細的聲景地圖，分析聲景與其他環境因子的空間關聯性。聲景的空間分析包括點分析、線分析、面分析等不同層次，可以揭示聲景在不同空間尺度上的特徵與規律。空間統計方法，如空間自相關分析、聚類分析等，能夠量化聲景的空間模式與關聯性 [113]。

聲景分析的比較方法關注不同聲景之間的異同與關聯。比較分析可以在不同的維度上進行，包括地域比較、時間比較、類型比較等。跨文化的聲景比較研究揭示了聲景的普遍性與特殊性，為理解聲景的文化意義提供重要資料。長期的聲景變遷分析能夠揭示環境變化對聲景的影響，為環境保護與管理提供科學依

據。這些比較研究不僅豐富了聲景研究的理論內容，也為聲景保護政策的制定提供重要參考 [114]。

1.3.3 聲景與文化的連結 (Soundscape and Cultural Linkages)

聲景與文化的連結構成了聲景研究中最為豐富且複雜的理論領域之一，這種連結不僅體現在不同文化群體對聲音的不同理解與評價，更深層地反映了聲音在文化建構、社會認同、價值傳承等方面的重要作用。聲音不僅是物理現象，更是文化現象，它承載著豐富的文化意義、社會象徵、以及集體記憶。理解聲景與文化的連結有助於我們認識聲音環境的人文價值，也為跨文化的聲景研究與國際合作提供重要基礎。這種文化取向的分析不僅豐富了聲景研究的理論內涵，也為文化保護與傳承提供了新的視角與工具 [115]。

文化對聲音感知與評價的影響是聲景文化研究的核心議題。不同文化背景的人群對相同聲音可能產生截然不同的感受與評價，這種差異源於文化學習、社會經驗、宗教信仰、美學傳統等多重因素。例如，教堂鐘聲在基督教文化中通常被視為神聖的象徵，引發敬畏與平靜的感受，但在其他宗教文化中可能只是普通的時間信號。傳統音樂的旋律與節奏在本土文化中具有深刻的情感意義，但對外來文化的聽眾可能缺乏相同的感染力。這種文化差異的研究不僅有助於理解聲景感知的主觀性，也為跨文化交流與理解提供重要啟發 [116]。

語言是聲景文化研究中的重要組成部分，因為語言不僅是人類最重要的聲音表達方式，也是文化傳承的主要載體。不同語言的語音特徵、韻律模式、表達習慣等都會影響該文化群體的聲景特色。例如，聲調語言（如中文）的使用者對音調變化的敏感度通常高於非聲調語言的使用者，這種差異會影響他們對環境聲音音調變化的感知與評價。語言的社會功能也會影響聲景的文化意義，在多語言社會中，不同語言的使用往往反映了社會地位、族群認同、教育水準等社會因素 [117]。

宗教與精神傳統在聲景文化中佔有特殊地位。世界各大宗教都發展出豐富的聲音傳統，包括誦經、讚美詩、鐘聲、木魚聲等，這些聲音不僅具有宗教功能，

也成為特定文化聲景的重要標誌。佛教文化中的木魚聲與誦經聲、伊斯蘭文化中的宣禮聲、基督教文化中的管風琴聲與讚美詩等，都成為各自文化聲景的重要組成部分。這些宗教聲音不僅在宗教場所中具有神聖意義，也滲透到日常生活的聲景中，成為文化認同的重要象徵 [118]。

傳統慶典與節慶活動是聲景文化表達的重要載體。世界各地的傳統慶典都具有獨特的聲音特徵，從中國的舞龍舞獅、鞭炮聲、到巴西的嘉年華音樂、西班牙的佛朗明哥舞曲、印度的宗教節慶音樂等，這些聲音不僅具有娛樂功能，更承載著深厚的文化意義與歷史記憶。節慶聲景往往是社區凝聚力的重要表現，它們創造了共同的聲音體驗，強化了群體認同與文化歸屬感。隨著全球化的發展，許多傳統節慶聲景面臨消失的威脅，保護與傳承這些聲音文化遺產成為重要課題 [119]。

勞動與生產活動的聲音也是文化聲景的重要組成部分。不同文化的傳統生產方式會產生特有的聲音，從農村的農具聲、畜牧聲、到手工業的敲打聲、織布聲等，這些聲音不僅反映了生產技術的特徵，也承載著勞動文化的價值與精神。工業化進程改變了許多傳統的勞動聲景，機器聲音逐漸取代了手工勞動的聲音，這種變化不僅是技術進步的體現，也反映了文化變遷的過程。保留與記錄這些傳統勞動聲音對於維護文化多樣性具有重要意義 [120]。

都市文化聲景反映了現代社會的複雜性與多樣性。現代都市是多元文化匯聚的場所，不同文化群體的聲音傳統在都市空間中相遇、交融、有時也會產生衝突。都市聲景中可能同時存在不同語言的對話、不同風格的音樂、不同文化的商業活動聲音等，形成複雜的文化聲音拼圖。這種文化多樣性既豐富了都市聲景的內容，也帶來了文化協調與管理的挑戰。如何在保持文化多樣性的同時創造和諧的聲音環境，是現代都市規劃面臨的重要課題 [121]。

聲音文化遺產的保護與傳承是聲景文化研究的重要應用領域。聯合國教科文組織（UNESCO）已經將某些具有特殊文化意義的聲景列為世界文化遺產保護對象，認為這些聲景具有與視覺景觀同等的文化價值。聲音文化遺產包括傳統音樂、宗教儀式聲音、工藝製作聲音、自然環境聲音等多種類型。保護這些聲音

文化遺產不僅需要技術手段（如數位錄音、聲音檔案建設），也需要社會行動（如社區參與、教育推廣、政策支持）。這種綜合性的保護策略為文化保護工作提供了新的思路與方法 [122]。

全球化對地方聲景文化的影響是當代聲景文化研究關注的重要議題。全球化進程帶來了聲音文化的同質化趨勢，國際化的音樂風格、標準化的機械聲音、統一的商業廣告聲音等逐漸滲透到世界各地，威脅著地方聲景文化的獨特性。同時，全球化也為不同文化的聲音交流與融合提供了機會，創造出新的混合型聲景文化。如何在全球化的背景下保持地方聲景文化的特色，同時促進健康的文化交流，是聲景文化研究面臨的重要挑戰 [123]。

數位技術對聲景文化的影響也日益顯著。數位媒體、社交網路、虛擬實境等新技術改變了人們創造、傳播、體驗聲音文化的方式。年輕一代更多地透過數位平台接觸與學習聲音文化，這種變化既為文化傳承提供了新的可能性，也帶來了文化認知與體驗方式的改變。數位技術還使得聲音文化的保存與傳播變得更加便利，但也面臨著數位格式標準化、技術依賴性等新的挑戰。理解數位技術對聲景文化的影響對於適應時代變化、創新文化保護方法具有重要意義 [124]。

1.4 聲景生態學基礎 (Foundations of Soundscape Ecology)

聲景生態學基礎構成了現代聲景研究的重要理論支柱，這個領域將生態學的原理與方法應用於聲音環境的研究，為理解自然聲景的組成、功能與變化提供了科學框架。聲景生態學不僅關注個別物種的聲音行為，更重視整個生態系統聲音組成的時空變化模式，以及這些變化與環境因子、生物多樣性之間的關聯性。這種系統性的研究取向為環境監測、生態復育、保護區管理等實務工作提供了創新的工具與視角。隨著全球環境變遷加劇，聲景生態學的重要性日益凸顯，它不僅為生態學研究開闢了新的領域，也為環境保護工作提供了新的策略與方法 [125]。

聲景生態學的理論基礎建立在現代生態學的核心概念之上，包括生態系統、食

物網、營養級、生態位、群落結構等。生態系統的能量流動與物質循環過程在聲音層面有其獨特的表現，生產者（植物）雖然通常不產生主動聲音，但其結構與密度會影響聲音的傳播與散射；初級消費者（草食動物）的聲音行為往往與覓食、逃避天敵相關；次級消費者（肉食動物）的聲音則多與狩獵、領域防衛相關。這種基於營養級的聲音分析為理解生態系統的聲音組織提供了重要視角 [126]。

生態系統服務的概念在聲景生態學中也有重要體現。自然聲景不僅具有生態功能，也為人類提供多種服務，包括調節服務（如壓力舒緩、睡眠品質改善）、文化服務（如美學體驗、精神寄託）、支持服務（如生態系統健康指示）等。這種服務導向的分析不僅豐富了聲景價值評估的內容，也為聲景保護的經濟論證提供了依據。研究顯示，高品質的自然聲景能夠顯著提升人類的身心健康，其經濟價值可能遠超過傳統的生態系統服務評估 [127]。

氣候變遷對聲景生態的影響是當代聲景生態學研究的重要前沿議題。全球暖化導致的溫度上升、降雨模式改變、極端氣候事件增加等都會影響生態系統的聲音組成。溫度變化會影響變溫動物的活動節律與發聲行為，許多昆蟲與兩棲動物的鳴叫頻率與溫度密切相關。季節模式的改變會影響候鳥的遷徙時程與繁殖周期，進而改變季節性聲景的組成。極端氣候事件如乾旱、洪水、森林火災等會直接破壞棲息地，造成聲景的急劇變化。長期的氣候變遷監測顯示，許多地區的聲景已經發生顯著變化，某些特有的聲音甚至已經消失 [128]。

棲息地破碎化對聲景生態的影響也是重要的研究領域。人類活動導致的森林砍伐、都市擴張、農業開發等會將連續的棲息地分割成小塊，影響動物的分布與行為。聲景研究顯示，破碎化的棲息地往往具有較低的聲音多樣性，邊緣效應會增加人為噪音的干擾，減少敏感物種的聲音表現。同時，破碎化也可能創造新的生態邊界，形成獨特的邊界聲景。這種破碎化效應的研究不僅有助於理解景觀變化對生態系統的影響，也為棲息地復育與連接提供重要指導 [129]。

入侵物種對原生聲景的影響是聲景生態學研究的另一個重要面向。外來入侵物種往往具有不同的聲音特徵與行為模式，它們的入侵可能改變原有的聲音生態

平衡。某些入侵鳥類可能具有更強的鳴叫聲，掩蔽原生鳥類的聲音溝通；入侵昆蟲可能改變夜間聲景的組成；入侵哺乳動物可能透過掠食壓力減少原生動物的發聲行為。聲景監測技術為早期發現入侵物種提供了新的可能性，某些入侵物種的特殊聲音特徵可以被自動識別系統檢測出來，為入侵管理提供及時預警 [130]。

生物多樣性與聲景多樣性的關係是聲景生態學的核心研究議題之一。一般而言，生物多樣性較高的生態系統往往具有較豐富的聲景多樣性，但這種關係並不總是線性的。某些關鍵物種的聲音可能對整體聲景的特徵有決定性影響，而某些豐富度很高但發聲能力較弱的群體（如無脊椎動物）可能對聲景多樣性的貢獻有限。此外，聲音的時間分布模式也會影響聲景多樣性的測量，日夜活動物種的組合會創造出時間上的聲音多樣性。這種複雜關係的研究有助於發展更精確的生物多樣性聲學評估方法 [131]。

聲景作為生態系統健康指標的研究具有重要的應用價值。健康的生態系統通常具有穩定而多樣的聲景組成，環境擾動往往會導致聲景的改變。這種變化可能包括某些物種聲音的消失、聲音活動時間的改變、聲音強度的變化、新聲音的出現等。長期的聲景監測可以提供生態系統健康狀況的客觀評估，特別是在其他監測方法難以實施的區域，聲景監測具有獨特的優勢。這種監測方法不僅成本較低，也對環境的干擾較小，適合在敏感的生態區域實施 [132]。

1.4.1 生物聲音學概念 (Bioacoustic Concepts)

生物聲音學概念為聲景生態學提供了重要的理論基礎與分析工具，這個領域專注於研究生物產生、傳播與接收聲音的機制，以及聲音在生物生命活動中的功能與意義。生物聲音學不僅探討個體動物的發聲生理機制，更重要的是研究聲音在種內溝通、種間互動、生態適應等方面的作用。隨著錄音技術與分析方法的進步，生物聲音學已經發展成為一個重要的跨學科研究領域，為理解動物行為、生態演化、環境適應等提供了獨特的視角。在聲景生態學的框架下，生物聲音學的概念與方法為分析自然聲景的組成與動態提供了科學基礎 [133]。

動物發聲的生理機制是生物聲音學研究的基礎內容。不同類群的動物發展出多樣化的發聲器官與機制，反映了其演化歷史與生態適應。鳥類的鳴管（syrinx）是最複雜的發聲器官之一，位於氣管與支氣管的交界處，透過精密的肌肉控制能夠產生複雜的旋律與和聲。哺乳動物主要透過喉頭的聲帶振動發聲，但不同物種的聲帶結構與控制機制差異很大，從蝙蝠的超音波定位到大象的次音波溝通。昆蟲的發聲機制更加多樣，包括翅膀振動、身體摩擦、氣囊共振等多種方式。這些不同的發聲機制決定了各類動物聲音的基本特徵，也影響了它們在聲景中的生態角色 [134]。

聲音在動物溝通中的功能是生物聲音學的核心研究內容。動物聲音溝通可以分為多種功能類型，包括求偶聲音、領域聲音、警告聲音、群體協調聲音、親子溝通聲音等。求偶聲音通常具有複雜的結構與高度的種特異性，雄性動物透過精細的聲音表現來吸引配偶並展示其遺傳品質。領域聲音用於宣示對特定區域的佔有權，通常具有較強的穿透力與持續性。警告聲音用於提醒同類或其他物種注意潛在威脅，通常具有緊急且易於識別的特徵。這些不同功能的聲音在時間與空間上的分布模式構成了聲景的基本組織架構 [135]。

聲音信號的編碼與解碼機制是生物聲音學的重要理論議題。動物必須能夠在嘈雜的環境中準確傳達與接收聲音資訊，這需要複雜的信號處理策略。聲音信號的編碼包括頻率調製、振幅調製、時間結構等多種方式，不同的編碼策略適合不同的環境條件與溝通需求。例如，森林環境中的鳥類傾向使用純音或簡單的頻率掃描，以減少複雜環境中的信號失真；開闊環境中的動物則可能使用更複雜的調製信號，因為信號衰減較為均勻。接收端的解碼機制同樣複雜，動物必須能夠從背景噪音中提取目標信號，並正確解讀信號的含義 [136]。

聲音學習與發展是生物聲音學的重要研究領域，特別是在鳥類研究中具有重要意義。許多鳥類的鳴叫不是完全遺傳決定的，而需要透過學習過程獲得。幼鳥在敏感期內透過模仿成鳥的聲音來學習正確的鳴叫模式，這個過程類似於人類的語言學習。聲音學習的研究不僅揭示了動物認知能力的複雜性，也為理解文化傳承在動物社會中的作用提供了重要案例。某些鳥類群體甚至發展出地方性的「方言」，不同地區的同種鳥類具有略微不同的鳴叫特徵，這種文化多樣性豐

富了聲景的地方特色 [137]。

聲音定位與空間感知是動物聲音行為的重要功能。許多動物能夠透過聲音準確定位聲源的位置，這種能力在覓食、逃避天敵、社會互動等方面具有重要意義。蝙蝠與海豚的回聲定位系統是最著名的例子，它們發出超音波並分析回音來構建環境的「聲音地圖」。貓頭鷹具有極為敏銳的聲音定位能力，能夠在完全黑暗的環境中準確捕捉小型獵物。這些特殊的聲音能力不僅是動物適應環境的重要策略，也為聲景生態學研究提供了理解動物如何利用聲音環境的重要線索 [138]。

環境聲學適應是生物聲音學的重要理論概念，它描述了動物聲音特徵與其生存環境之間的適應關係。聲音適應假說（Acoustic Adaptation Hypothesis）認為，動物的聲音信號會演化以適應其特定的聲學環境，最大化信號的傳播效率與清晰度。在密集森林中，高頻聲音容易被植被吸收，因此森林鳥類傾向使用較低頻率的聲音；在開闊草原中，低頻聲音傳播較遠，草原動物往往發展出低頻的聲音溝通。這種適應關係不僅體現在頻率選擇上，也體現在時間結構、信號重複、發聲時機等多個方面 [139]。

聲音掩蔽與信號干擾是生物聲音學研究的重要實務議題。在自然環境中，動物必須面對各種背景噪音的干擾，包括其他動物的聲音、環境噪音、以及日益嚴重的人為噪音。動物發展出多種策略來應對聲音掩蔽，包括頻率轉移（改變發聲頻率以避開噪音頻段）、強度增加（提高發聲音量以克服掩蔽）、時間調整（選擇較安靜的時段發聲）、結構簡化（使用更簡單但更清晰的信號）等。這些適應策略的研究不僅揭示了動物的行為彈性，也為理解人為噪音對野生動物的影響提供了重要依據 [140]。

種間聲音互動是聲景生態學中的重要概念。在自然環境中，不同物種的聲音並不是完全獨立的，它們之間存在複雜的互動關係。某些物種可能透過模仿其他物種的聲音來獲得生存優勢，如某些鳥類模仿猛禽的叫聲來威嚇競爭者。掠食者與獵物之間也存在聲音的博弈關係，獵物動物往往發展出安靜的行為策略，而掠食者則可能利用聲音來定位獵物。共生關係中的物種可能發展出協調的聲

音行為，如某些鳥類與哺乳動物的混合覓食群體具有共同的警告聲音系統 [141]。

聲音行為的季節性與日夜節律是生物聲音學的重要時間面向。許多動物的聲音行為具有明顯的時間模式，這些模式與其生活史、繁殖周期、覓食行為等密切相關。春季的鳥類合唱是最著名的季節性聲音現象，反映了繁殖季節的到來與領域建立的需要。日夜節律的聲音變化則反映了不同物種的活動時間分工，黃昏與黎明通常是聲音活動的高峰期。這些時間模式的研究不僅有助於理解動物行為的時間組織，也為聲景監測的時間設計提供重要指導 [142]。

生物聲音的個體識別與社會功能是現代生物聲音學研究的前沿領域。許多動物能夠透過聲音識別個體身份，這種能力在親子關係、配偶選擇、群體協調等方面具有重要作用。研究顯示，某些鳥類、哺乳動物、甚至昆蟲都具有個體特異的聲音特徵，類似於人類的聲紋。這種個體識別能力的存在意味著動物社會比我們以往認為的更加複雜，聲音溝通不僅傳達基本的生物學資訊，也承載著豐富的社會資訊。這種社會聲音學的研究為理解動物社會的複雜性提供了新的視角 [143]。

1.4.2 聲學生態位理論 (Acoustic Niche Theory)

聲學生態位理論是聲景生態學中最具影響力的理論之一，它將生態學中的生態位概念應用於聲音環境的研究，用以解釋不同物種如何在時間與頻率資源上進行分工，避免聲音干擾並最大化溝通效率。這個理論由伯尼·克勞斯（Bernie Krause）首先提出，隨後被眾多研究者發展與完善，成為理解自然聲景組織原理的重要框架。聲學生態位理論不僅具有重要的理論價值，也為生物多樣性評估、環境監測、保護策略制定等實務工作提供了科學基礎。這個理論的發展與應用標誌著聲景研究從描述性分析向預測性科學的重要轉變 [144]。

聲學生態位理論的基本假設是，在一個穩定的生態系統中，不同物種會在聲學空間中佔據不同的生態位，以減少種間競爭並優化聲音溝通的效果。這種聲學分工主要體現在兩個維度：時間分工與頻率分工。時間分工是指不同物種選擇

不同的時間段進行聲音活動，例如某些鳥類在黎明時分最為活躍，某些昆蟲在黃昏時段鳴叫，某些兩棲動物在夜間活動。頻率分工則是指不同物種使用不同的頻率範圍進行聲音溝通，高頻、中頻、低頻分別被不同的物種群體佔據。這種時頻分工模式創造了有序而高效的聲音環境，被稱為「聲學分配」（acoustic partitioning）[145]。

時間維度的聲學生態位分工體現了生物對時間資源的精細利用。一天 24 小時可以被不同的聲音群體分割使用，形成明顯的時間聲音帶。黎明合唱（dawn chorus）是最著名的時間聲音現象，許多鳥類在日出前後的短時間內集中鳴叫，這個時段的大氣條件最適合聲音傳播，溫度逆轉層減少了聲音的向上散射。黃昏時段的聲音活動則以昆蟲為主，許多蟋蟀、蟬類選擇在這個時段開始其夜間的聲音活動。夜間聲景主要由夜行性動物主導，包括貓頭鷹的叫聲、兩棲動物的鳴叫、以及各種夜行性昆蟲的聲音。這種時間分工不僅避免了聲音干擾，也反映了不同物種的生活史策略與生態適應 [146]。

頻率維度的聲學生態位分工展現了聲音頻譜資源的有效利用。自然聲景的頻率範圍通常從幾十赫茲延伸到幾萬赫茲，不同的頻率段被不同的物種群體佔據。低頻段（通常低於 1000 Hz）主要被大型動物使用，如大型哺乳動物的叫聲、某些大型鳥類的鳴叫，這些低頻聲音具有較強的穿透力，適合長距離溝通。中頻段（1000-5000 Hz）是最擁擠的頻率區域，因為這個範圍內的聲音傳播效果最佳，大多數鳥類的鳴叫都集中在這個頻段。高頻段（高於 5000 Hz）主要被小型動物使用，如小型鳥類、昆蟲、某些哺乳動物，高頻聲音雖然衰減較快，但具有較好的方向性與定位精度 [147]。

聲學生態位理論的實證研究提供了豐富的支持證據。在世界各地的不同生態系統中，研究者都發現了類似的聲學分配模式。熱帶雨林的研究顯示，不同樹冠層的鳥類使用不同的頻率範圍，樹冠層的鳥類使用較高頻率，中層的鳥類使用中等頻率，林下層的鳥類使用較低頻率，這種垂直分層的頻率分工與森林的聲學環境特性相對應。草原生態系統的研究則顯示，不同體型的動物使用不同的頻率範圍，體型與發聲頻率呈現明顯的負相關關係。海洋環境的研究也發現了類似的模式，不同種類的海洋哺乳動物使用不同的頻率範圍進行長距離溝通

[148]。

聲學生態位理論在生物多樣性評估中的應用具有重要價值。傳統的生物多樣性調查需要大量的人力與時間，而且往往難以捕捉到夜行性、隱蔽性動物的活動。聲學監測方法可以 24 小時連續運行，自動記錄環境中的聲音活動，透過分析聲學生態位的佔用情況來評估生物多樣性。聲學多樣性指數（Acoustic Diversity Index）、聲學均勻度指數（Acoustic Evenness Index）、聲學豐富度指數（Acoustic Richness Index）等指標被開發出來，用以量化聲學生態位的利用程度與分配模式。這些指標與傳統的生物多樣性指標具有良好的相關性，為大規模的生物多樣性監測提供了高效的工具 [149]。

環境擾動對聲學生態位結構的影響是理論研究的重要方向。人為噪音、棲息地破壞、氣候變遷等因素都可能影響聲學生態位的分配模式。人為噪音通常集中在低頻段，會壓縮低頻動物的聲學生態位，迫使它們調整發聲策略或轉移到其他頻段。棲息地破壞會減少生物多樣性，導致某些聲學生態位空缺，破壞原有的聲音群落結構。氣候變遷則可能改變物種的分布與活動模式，影響聲學生態位的時間分配。這些擾動效應的研究不僅有助於理解環境變化的生態影響，也為環境保護與復育工作提供重要指導 [150]。

聲學生態位理論在保護生物學中的應用日益受到重視。保護區的聲學監測可以評估保護效果，監測保護目標物種的聲音活動，發現潛在的威脅因子。聲學生態位的完整性可以作為生態系統健康的指標，完整的聲學生態位結構表示生態系統功能正常，生物群落穩定。復育工作的成效也可以透過聲學生態位的恢復情況來評估，成功的復育通常會導致聲學多樣性的增加與聲學生態位結構的複雜化。這種聲學導向的保護策略為傳統的保護方法提供了重要補充 [151]。

聲學生態位理論也面臨一些理論挑戰與限制。首先，不是所有的聲音活動都遵循嚴格的生態位分工，某些物種可能具有較高的聲學可塑性，能夠調整其聲音特徵以適應變化的環境。其次，聲學生態位的分工可能不是演化適應的結果，而是生理限制的副產品，例如體型與發聲頻率的關係主要受到物理定律的約束。再次，聲學生態位理論主要關注種間競爭，但種內變異、地理變異、學習

效應等因素也可能影響聲音特徵。最後，人為環境中的聲學生態位結構可能與自然環境差異很大，理論的適用範圍需要進一步驗證 [152]。

聲學生態位理論的未來發展方向包括理論精緻化、方法創新、應用拓展等方面。理論精緻化涉及整合更多的生態因子，如食物資源、掠食壓力、社會結構等，建立更完整的聲學生態位模型。方法創新包括發展更精確的聲音識別技術、更敏感的生態位測量方法、更可靠的統計分析工具等。應用拓展則包括將理論應用到更多的生態系統類型、更多的物種群體、更多的實務問題等。隨著聲學技術與生態理論的進步，聲學生態位理論有望成為聲景生態學更加成熟的理論基礎 [153]。

1.4.3 聲景與生物多樣性 (Soundscape and Biodiversity)

聲景與生物多樣性的關係構成了聲景生態學最重要的研究主題之一，這種關係不僅體現在理論層面的概念聯繫，更體現在實證研究中發現的統計關聯與因果機制。生物多樣性作為生態系統複雜性與穩定性的重要指標，其變化往往反映在聲景的組成與特徵上。隨著全球生物多樣性危機的加劇，聲景監測作為評估與保護生物多樣性的創新工具，其重要性日益凸顯。這種關係的研究不僅豐富了生態學理論，也為環境監測、保護策略制定、復育效果評估等實務工作提供了科學依據與技術支援 [154]。

生物多樣性與聲景多樣性之間存在密切的正相關關係，這種關係已經在多個生態系統中得到驗證。物種豐富度較高的生態系統通常具有較豐富的聲音組成，更多的發聲物種意味著更複雜的聲音結構與更高的聲學多樣性。這種關係的理論基礎在於，聲音溝通是許多動物的基本生活需求，能夠發聲的物種越多，整個生態系統的聲音表現就越豐富。然而，這種關係並不總是簡單的線性關係，某些關鍵物種的聲音可能對整體聲景有決定性影響，而某些豐富度很高但發聲能力較弱的類群（如許多無脊椎動物）對聲景多樣性的直接貢獻可能有限 [155]。

聲學多樣性指數的發展為量化聲景與生物多樣性關係提供了重要工具。這些指

數借鑒了生物多樣性測量的理論基礎，將資訊理論的概念應用於聲學分析。聲學豐富度指數（Acoustic Richness Index, AR）測量聲景中使用的頻率範圍，類似於物種豐富度的概念；聲學均勻度指數（Acoustic Evenness Index, AE）測量不同頻率成分的分布均勻程度，反映聲學資源的利用模式；聲學多樣性指數（Acoustic Diversity Index, ADI）綜合考慮頻率範圍與分布均勻程度，提供聲景複雜性的綜合測量。這些指數與傳統生物多樣性指標的相關分析顯示，聲學多樣性可以作為生物多樣性的有效代理指標 [156]。

不同分類群對聲景與生物多樣性關係的貢獻差異很大。鳥類是最重要的聲景貢獻者，其物種豐富度與聲學多樣性的相關性通常最強。鳥類不僅發聲能力強，而且具有豐富的聲音變化，能夠充分利用聲學生態位的時間與頻率資源。昆蟲是另一個重要的聲景組成部分，特別是在夜間聲景中佔主導地位，但昆蟲的聲音識別相對困難，其多樣性與聲景的關係研究相對較少。兩棲動物在某些濕地生態系統中是重要的聲景貢獻者，其聲音活動與繁殖行為密切相關，具有明顯的季節性變化。哺乳動物的聲音貢獻相對較小，但某些大型哺乳動物的低頻聲音在聲景中具有重要地位 [157]。

功能多樣性的概念在聲景研究中也具有重要意義。功能多樣性強調不同物種在生態系統中的功能角色差異，而不僅僅是物種數量的多少。在聲景研究中，功能多樣性可以理解為不同聲音功能的多樣性，包括求偶聲音、領域聲音、警告聲音、覓食聲音等不同功能類型的聲音。一個功能多樣性高的聲景不僅包含更多的物種聲音，也包含更多樣的聲音功能，反映了生態系統更複雜的生態過程與相互作用。這種功能導向的分析為理解聲景的生態意義提供了更深層的視角 [158]。

聲景與生物多樣性關係的空間變異是重要的研究方向。不同地理區域、不同生態系統類型的聲景與生物多樣性關係可能存在顯著差異。熱帶地區的高生物多樣性通常對應著高聲學多樣性，但溫帶地區的關係可能更加複雜，受到季節變化的強烈影響。海洋生態系統的聲景與生物多樣性關係與陸地系統差異很大，海洋哺乳動物的長距離聲音溝通創造了獨特的聲景特徵。高山生態系統的聲景則可能受到氣候條件的強烈限制，生物多樣性與聲景多樣性的關係可能較弱。

這種空間變異的研究有助於理解環境因子對聲景-生物多樣性關係的調節作用 [159]。

時間尺度對聲景與生物多樣性關係的影響也是重要考量。短期的聲景變化可能反映動物行為的日夜節律、天氣變化、季節性活動等因素；中期的變化可能反映繁殖周期、遷徙模式、資源可得性等因素；長期的變化則可能反映氣候變遷、環境擾動、群落演替等過程。生物多樣性的變化通常是長期過程的結果，因此聲景監測需要足夠長的時間序列才能有效反映生物多樣性的變化趨勢。這種時間導向的分析對於區分自然變異與人為影響具有重要意義 [160]。

環境擾動對聲景-生物多樣性關係的影響是實務應用的重要關注點。棲息地破壞通常會同時降低生物多樣性與聲學多樣性，但兩者的下降程度與恢復速度可能不同。某些敏感物種可能在環境擾動初期就停止發聲，導致聲學多樣性的快速下降，而生物多樣性的下降可能需要更長時間才能檢測到。人為噪音的影響更加複雜，它可能不會直接減少物種數量，但會影響動物的聲音行為，改變聲景的組成與特徵。氣候變遷的影響則可能導致聲景與生物多樣性關係的長期變化，某些物種的分布範圍改變會影響地方聲景的特徵 [161]。

聲景監測在生物多樣性保護中的應用優勢日益明顯。傳統的生物多樣性調查方法通常需要大量的專業人員與時間投入，而且往往只能捕捉到調查時段內活動的物種。聲景監測可以 24 小時連續運行，自動記錄環境中的聲音活動，特別適合監測夜行性、隱蔽性動物的活動。聲景監測的成本相對較低，適合大規模與長期的監測計畫。此外，聲景監測對環境的干擾較小，不會影響動物的正常行為。這些優勢使得聲景監測成為生物多樣性保護工作的重要補充工具 [162]。

聲景監測在保護區管理中的應用潛力巨大。保護區的管理者需要定期評估保護效果，監測目標物種的狀況，發現潛在的威脅因子。聲景監測可以提供這些資訊，而且能夠覆蓋大面積的區域，監測難以接近的區域。聲景的長期變化趨勢可以反映保護區生態系統的健康狀況，異常的聲景變化可能表示環境問題的出現。此外，聲景監測產生的資料也可以用於科學研究、環境教育、生態旅遊等多種目的，提高保護區的綜合效益 [163]。

生態復育工作中的聲景監測應用也具有重要價值。復育工作的目標通常是恢復受損生態系統的結構與功能，生物多樣性的恢復是重要的成效指標。聲景監測可以追蹤復育過程中聲學多樣性的變化，評估復育工作的成效。成功的復育通常會導致聲學多樣性的逐步增加，聲學生態位結構的複雜化。不同復育策略的聲景效果比較可以為復育方法的選擇提供科學依據。這種聲學導向的復育評估為傳統的復育監測方法提供了重要補充 [164]。

未來聲景與生物多樣性關係研究的發展方向包括方法創新、理論深化、應用拓展等方面。方法創新包括發展更精確的聲音識別技術、更敏感的多樣性測量方法、更可靠的統計分析工具等。理論深化涉及整合更多的生態學理論，如群落生態學、功能生態學、景觀生態學等，建立更完整的聲景-生物多樣性理論框架。應用拓展則包括將研究成果應用到更多的生態系統類型、更多的保護實務、更多的政策制定等。隨著技術進步與理論發展，聲景監測有望成為生物多樣性保護工作中不可或缺的重要工具 [165]。

參考文獻

第一章參考文獻

[1] International Organization for Standardization. (2014). ISO 12913-1:2014 Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework . Geneva: ISO.

[2] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European Region . Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

[3] Pijanowski, B. C., Farina, A., Gage, S. H., Dumyahn, S. L., & Krause, B. L. (2011). What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. Landscape Ecology , 26(9), 1213-1232.

[4] Gasc, A., Francomano, D., Dunning Jr, J. B., & Pijanowski, B. C. (2017). Future directions for soundscape ecology: The importance of ornithological contributions. The Auk: Ornithological Advances , 134(1), 215-228.

[5] Aletta, F., & Torresin, S. (2023). Adoption of ISO/TS 12913-2: 2018 protocols for data collection from individuals in soundscape studies: An overview of the literature. Current Pollution Reports , 9(3), 283-295.

[6] Brown, A. L. (2012). A review of progress in soundscapes and an approach to soundscape planning. International Journal of Acoustics and Vibration , 17(2), 73-81.

[7] Engel, M. S., Fiebig, A., Pfaffenbach, C., & Fels, J. (2018). A review of socio-acoustic surveys for soundscape studies. Current Pollution Reports , 4(3), 220-239.

[8] Matsinos, Y. G., Tsaligopoulos, A., & Economou, A. (2016). The interdisciplinary development of the term "soundscape", tracing its ecological roots. Aegean Journal of Environmental Sciences , 2(1), 5-16.

[9] Schafer, R. M. (2013). Soundscape studies: the early days and the future. Acoustic Ecology Review , 1(1), 6-12.

[10] Brooks, B. M., Schulte-Fortkamp, B., Voigt, K. S., & Case, A. U. (2014). Exploring our sonic environment through soundscape research & theory. Acoustics Today , 10(2), 30-40.

[11] Ma, K. W., Mak, C. M., & Wong, H. M. (2021). Effects of environmental sound quality on soundscape preference in a public urban space. Applied Acoustics , 171, 107570.

[12] Brown, A. L., Gjestland, T., & Dubois, D. (2016). Acoustic environments and soundscapes. In Soundscape and the built environment (pp. 1-16). Boca Raton: CRC Press.

[13] Farina, A., & Reid, V. (2020). The ecological role of sound in terrestrial and aquatic landscape: theories, methods and applications of ecoacoustics. Biodiversity , 21(4), 155-168.

[14] Robert, A., Lengagne, T., Melo, M., Gardette, V., Julien, S., Covas, R., ... & Doutrelant, C. (2019). The theory of island biogeography and soundscapes: Species diversity and the organization of acoustic communities. Journal of Biogeography , 46(9), 1901-1911.

[15] Schindler, A. R., Gerber, J. E., & Quinn, J. E. (2020). An ecoacoustic approach to understand the effects of human sound on soundscapes and avian communication. Biodiversity , 21(4), 169-180.

[16] Jeon, J. Y., & Jo, H. I. (2020). Effects of audio-visual interactions on soundscape and landscape perception and their influence on satisfaction with the urban environment. Building and Environment , 169, 106544.

[17] Putland, R. L., Constantine, R., & Radford, C. A. (2017). Exploring spatial and temporal trends in the soundscape of an ecologically significant embayment. Scientific Reports , 7(1), 5713.

[18] Oestreich, W. K., Oliver, R. Y., Chapman, M. S., Go, M. C., Nguyen, A. H., Reeve, C. S., ... & Hines, E. (2024). Listening to animal behavior to understand changing ecosystems. Trends in Ecology & Evolution , 39(8), 722-735.

[19] Truax, B. (2022). Speech, music, soundscape and listening: interdisciplinary explorations. Interdisciplinary Science Reviews , 47(2), 123-145.

[20] Truax, B. (1996). Soundscape, acoustic communication and environmental sound composition. Contemporary Music Review , 15(1-2), 49-65.

[21] Gao, W., Kang, J., Ma, H., & Wang, C. (2023). The effects of environmental sensitivity and noise sensitivity on soundscape evaluation. Building and Environment , 235, 110206.

[22] Bartalucci, C., & Luzzi, S. (2020). The soundscape in cultural heritage. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering , 949(1), 012050.

[23] Schoeman, R. P., Erbe, C., Pavan, G., Brown, R., Leduc, A., & McCauley, R. D. (2022). Analysis of soundscapes as an ecological tool. In Exploring animal behavior through sound (pp. 217-267). Cham: Springer.

[24] Aletta, F., Lam, B., Tarlao, C., Oberman, T., Axelsson, Ö., Kang, J., ... & Mitchell, A. (2025). Introduction to the special issue on: Advances in soundscape: Emerging trends and challenges in research and practice. The Journal of the Acoustical Society of America , 157(6), 4411-4414.

[25] Eldridge, A., & Kiefer, C. (2018). Toward a synthetic acoustic ecology: Sonically situated, evolutionary agent based models of the acoustic niche hypothesis. Artificial Life Conference Proceedings , 30, 296-303.

[26] Farina, A., Pieretti, N., & Malavasi, R. (2014). Patterns and dynamics of (bird) soundscapes: A biosemiotic interpretation. Semiotica , 2014(198), 73-98.

[27] Leonardson, E. (2014). Acoustic ecology and ethical listening. Conrad Grebel Review , 33(2), 151-157.

[28] Axelsson, Ö., Nilsson, M. E., & Berglund, B. (2010). A principal components

model of soundscape perception. The Journal of the Acoustical Society of America , 128(5), 2836-2846.

[29] Moore, B. C. (2012). An introduction to the psychology of hearing (6th ed.). Leiden: Brill.

[30] Bregman, A. S. (1994). Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound . Cambridge, MA: MIT Press.

[31] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[32] Ratcliffe, E., Gatersleben, B., & Sowden, P. T. (2013). Bird sounds and their contributions to perceived attention restoration and stress recovery. Journal of Environmental Psychology , 36, 221-228.

[33] Steele, D., Bild, E., Tarlao, C., & Guastavino, C. (2019). Soundwalking as a methodology for understanding soundscapes. In Proceedings of Meetings on Acoustics (Vol. 38, No. 1, p. 015001). Acoustical Society of America.

[34] Gordon-Salant, S., & Fitzgibbons, P. J. (1993). Temporal factors and speech recognition performance in young and elderly listeners. Journal of Speech, Language, and Hearing Research , 36(6), 1276-1285.

[35] Botteldooren, D., De Coensel, B., & De Muer, T. (2006). The temporal structure of urban soundscapes. Journal of Sound and Vibration , 292(1-2), 105-123.

[36] Stansfeld, S. A., & Matheson, M. P. (2003). Noise pollution: non-auditory effects on health. British Medical Bulletin , 68(1), 243-257.

[37] Van Kamp, I., Job, R. S., Hatfield, J., Haines, M., Stellato, R. K., & Stansfeld, S. A. (2004). The role of noise sensitivity in the noise–response relation: a comparison of three international airport studies. The Journal of the Acoustical Society of America , 116(6), 3471-3479.

[38] Schafer, R. M. (1977). The tuning of the world: Toward a soundscape design . New York: Knopf.

[39] Thompson, E. (2002). The soundscape of modernity: Architectural acoustics and the culture of listening in America, 1900-1933 . Cambridge, MA: MIT Press.

[40] Schafer, R. M. (1969). The new soundscape: A handbook for the modern music teacher . Toronto: Berandol Music.

[41] Truax, B. (1978). The World Soundscape Project's handbook for acoustic ecology . Vancouver: ARC Publications.

[42] Schafer, R. M. (1994). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world . Rochester, VT: Destiny Books.

[43] Amphoux, P. (1993). L'identité sonore urbaine . Grenoble: CRESSON.

[44] Botteldooren, D., Coensel, B. D., & Muer, T. D. (2010). The temporal structure of urban soundscapes. Journal of Sound and Vibration , 292(1-2), 105-123.

[45] International Organization for Standardization. (2018). ISO/TS 12913-2:2018 Acoustics — Soundscape — Part 2: Data collection and reporting requirements . Geneva: ISO.

[46] Chieng, J., & Chan, C. J. (2021). Narrative review of soundscape studies. International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences , 11(12),

1150-1160.

[47] Moshona, C. C., Fiebig, A., Aletta, F., Chen, X., Kang, J., & Mitchell, A. (2024). A framework to characterize and classify soundscape design practices based on grounded theory. Noise Mapping , 11(1), 20240002.

[48] Hunt, F. V. (1978). Origins in acoustics: The science of sound from antiquity to the age of Newton . New Haven: Yale University Press.

[49] Eco, U. (1989). The aesthetics of Thomas Aquinas . Cambridge, MA: Harvard University Press.

[50] Gozza, P. (Ed.). (2000). Number to sound: The musical way to the scientific revolution . Dordrecht: Springer.

[51] Turner, A. J. (1993). Of time and measurement: Studies in the history of horology and fine technology . Aldershot: Ashgate Variorum.

[52] Whitfield, I. C. (1967). The auditory pathway . London: Edward Arnold.

[53] Sabine, W. C. (1922). Collected papers on acoustics . Cambridge, MA: Harvard University Press.

[54] Helmholtz, H. V. (1954). On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music . New York: Dover Publications.

[55] Bijsterveld, K. (2008). Mechanical sound: Technology, culture, and public problems of noise in the twentieth century . Cambridge, MA: MIT Press.

[56] Feld, S. (1982). Sound and sentiment: Birds, weeping, poetics, and song in Kaluli expression . Philadelphia: University of Pennsylvania Press.

[57] Barron, M. (2009). Auditorium acoustics and architectural design . London: Spon Press.

[58] Haffke, M. (2025). "The spaces of sight and sound"–Containment, feedback, and contingency in R. Murray Schafer´s acoustic ecology. Sound Studies , 11(1), 1-20.

[59] Schafer, R. M. (1967). The new soundscape. Music Educators Journal , 54(4), 35-38.

[60] Schafer, R. M. (1971). The new soundscape: A handbook for the modern music teacher . Toronto: Berandol Music Limited.

[61] Westerkamp, H. (2002). Linking soundscape composition and acoustic ecology. Organised Sound , 7(1), 51-56.

[62] Truax, B. (2001). Acoustic communication (2nd ed.). Westport, CT: Ablex Publishing.

[63] Krause, B. (2012). The great animal orchestra: Finding the origins of music in the world's wild places . New York: Little, Brown and Company.

[64] Payne, S. R., Davies, W. J., & Adams, M. D. (2009). Research into the practical and policy applications of soundscape concepts and techniques in urban areas. Report to Department for Environment, Food and Rural Affairs. University of Surrey.

[65] Schafer, R. M. (1993). Voices of tyranny, temples of silence . Arcana Editions.

[66] Westerkamp, H. (1974). Soundwalking . Vancouver: World Soundscape Project.

[67] Truax, B. (2012). From soundscape documentation to soundscape composition. Acoustics 2012 , 1-8.

[68] World Forum for Acoustic Ecology. (1993). Constitution and by-laws . WFAE.

[69] Johánek, F. (2024). The legacy of R. Murray Schafer-twenty-four hours of soundscape measurements: an analysis of the acoustic ecology of a city centre. Musicologica Brunensia , 59(1), 5-26.

[70] Wrightson, K. (2000). An introduction to acoustic ecology. Soundscape: The Journal of Acoustic Ecology , 1(1), 10-13.

[71] Adams, M., Cox, T., Moore, G., Croxford, B., Refaee, M., & Sharples, S. (2006). Sustainable soundscapes: Noise policy and the urban experience. Urban Studies , 43(13), 2385-2398.

[72] Truax, B. (Ed.). (1999). Handbook for acoustic ecology (2nd ed.). Cambridge Street Publishing.

[73] Westerkamp, H. (2001). Soundwalking. Sound Heritage , 3(4), 18-27.

[74] World Soundscape Project. (1978). The Vancouver soundscape . Vancouver: A.R.C. Publications.

[75] Schafer, R. M. (Ed.). (1977). European sound diary . Vancouver: A.R.C. Publications.

[76] Truax, B. (1984). Acoustic communication . Norwood, NJ: Ablex Publishing Corporation.

[77] Westerkamp, H. (1988). Listening and soundmaking: A study of music-as-

environment. Master's Thesis , Simon Fraser University.

[78] Keiko Torigoe, K. (1982). A study of the World Soundscape Project. Master's Thesis , York University.

[79] Gage, S. H., & Axel, A. C. (2014). Visualization of temporal change in soundscape power of a Michigan lake habitat over a 4-year period. Ecological Informatics , 21, 100-109.

[80] Hildegard Westerkamp, H. (2007). Soundwalking. In Audio culture: Readings in modern music (pp. 259-267). New York: Continuum.

[81] World Forum for Acoustic Ecology. (2020). WFAE mission statement . Retrieved from https://www.wfae.net/

[82] Botteldooren, D., Lavandier, C., Preis, A., Dubois, D., Aspuru, I., Guastavino, C., ... & Nilsson, M. E. (2011). Understanding urban and natural soundscapes. In Proceedings of Forum Acusticum (pp. 2047-2052).

[83] Krause, B. L. (1987). Bioacoustics, habitat ambience and ecological balance. Whole Earth Review , 57, 14-18.

[84] Farina, A. (2014). Soundscape ecology: Principles, patterns, methods and applications . Dordrecht: Springer.

[85] Liu, J., Kang, J., Luo, T., Behm, H., & Coppack, T. (2013). Spatiotemporal variability of soundscapes in a multiple functional urban area. Landscape and Urban Planning , 115, 1-9.

[86] Dumyahn, S. L., & Pijanowski, B. C. (2011). Soundscape conservation. Landscape Ecology , 26(9), 1327-1344.

[87] Axelsson, Ö. (2015). How to measure soundscape quality. In Proceedings of EuroNoise (pp. 1-6).

[88] Järviluoma, H., Kytö, M., Truax, B., Uimonen, H., & Vikman, N. (2009). Acoustic environments in change & Five village soundscapes . Tampere: Tampere University Press.

[89] International Organization for Standardization. (2018). ISO/TS 12913-3:2019 Acoustics — Soundscape — Part 3: Data analysis . Geneva: ISO.

[90] Kang, J. (2007). Urban sound environment . London: Taylor & Francis.

[91] Everest, F. A., & Pohlmann, K. C. (2009). Master handbook of acoustics (5th ed.). New York: McGraw-Hill.

[92] Fletcher, N. H., & Rossing, T. D. (1998). The physics of musical instruments (2nd ed.). New York: Springer-Verlag.

[93] Bradbury, J. W., & Vehrencamp, S. L. (2011). Principles of animal communication (2nd ed.). Sunderland, MA: Sinauer Associates.

[94] Berglund, B., Hassmén, P., & Job, R. S. (1996). Sources and effects of low-frequency noise. The Journal of the Acoustical Society of America , 99(5), 2985-3002.

[95] Attenborough, K., Bashir, I., & Taherzadeh, S. (2011). Outdoor ground impedance models. The Journal of the Acoustical Society of America , 129(5), 2806-2819.

[96] Embleton, T. F. (1996). Tutorial on sound propagation outdoors. The Journal of

the Acoustical Society of America , 100(1), 31-48.

[97] Bass, H. E., Sutherland, L. C., Zuckerwar, A. J., Blackstock, D. T., & Hester, D. M. (1995). Atmospheric absorption of sound: Further developments. The Journal of the Acoustical Society of America , 97(1), 680-683.

[98] Pickles, J. O. (2012). An introduction to the physiology of hearing (4th ed.). Leiden: Brill.

[99] Darwin, C. J., & Carlyon, R. P. (1995). Auditory grouping. Hearing , 1, 387-424.

[100] Zwicker, E., & Fastl, H. (2013). Psychoacoustics: Facts and models (3rd ed.). Berlin: Springer.

[101] Blauert, J. (1997). Spatial hearing: The psychophysics of human sound localization (Rev. ed.). Cambridge, MA: MIT Press.

[102] Moore, B. C., & Oxenham, A. J. (1998). Psychoacoustic consequences of compression in the peripheral auditory system. Psychological Review , 105(1), 108-124.

[103] Dubois, D., Guastavino, C., & Raimbault, M. (2006). A cognitive approach to urban soundscapes: Using verbal data to access everyday life auditory categories. Acta Acustica United with Acustica , 92(6), 865-874.

[104] Torija, A. J., Ruiz, D. P., & Ramos-Ridao, A. F. (2013). Application of a methodology for categorizing and differentiating urban soundscapes using acoustical descriptors and semantic-differential attributes. The Journal of the Acoustical Society of America , 134(1), 791-802.

[105] Niessen, M., Cance, C., & Dubois, D. (2010). Categories for soundscape: toward a hybrid classification. Inter-noise and Noise-con Congress and Conference Proceedings , 2010(7), 4158-4169.

[106] Krause, B. (2008). Anatomy of the soundscape: Evolving perspectives. Journal of the Audio Engineering Society , 56(1/2), 73-80.

[107] Rychtáriková, M., & Vermeir, G. (2013). Soundscape categorization on the basis of objective acoustical parameters. Applied Acoustics , 74(2), 240-247.

[108] Sueur, J., Aubin, T., & Simonis, C. (2008). Equipment review: Seewave, a free modular tool for sound analysis and synthesis. Bioacoustics , 18(2), 213-226.

[109] Bones, O., Cox, T. J., & Davies, W. J. (2017). An evidence-based soundscape taxonomy. International Congress of Sound and Vibration , 1-8.

[110] Pieretti, N., Farina, A., & Morri, D. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI). Ecological Indicators , 11(3), 868-873.

[111] Stowell, D., Benetos, E., & Gill, L. F. (2017). On-bird sound recordings: Automatic acoustic recognition of activities and contexts. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing , 25(6), 1193-1206.

[112] Zhang, M., & Kang, J. (2007). Towards the evaluation, description, and creation of soundscapes in urban open spaces. Environment and Planning B: Planning and Design , 34(1), 68-86.

[113] De Coensel, B., Vanwetswinkel, S., & Botteldooren, D. (2011). Effects of natural sounds on the perception of road traffic noise. The Journal of the Acoustical Society of America , 129(4), EL148-EL153.

[114] Schafer, R. M. (2012). My life on earth and elsewhere . Bancroft, ON: Arcana Editions.

[115] Feld, S. (1996). Waterfalls of song: An acoustemology of place resounding in Bosavi, Papua New Guinea. Senses of place , 91-135.

[116] Truax, B. (2001). Acoustic communication (2nd ed.). Westport, CT: Ablex Publishing.

[117] Kuhl, P. K. (2000). A new view of language acquisition. Proceedings of the National Academy of Sciences , 97(22), 11850-11857.

[118] Corbin, A. (1998). Village bells: Sound and meaning in the 19th-century French countryside . New York: Columbia University Press.

[119] Sterne, J. (2003). The audible past: Cultural origins of sound reproduction . Durham, NC: Duke University Press.

[120] Smith, M. M. (2001). Listening to nineteenth-century America . Chapel Hill: University of North Carolina Press.

[121] Bull, M., & Back, L. (Eds.). (2003). The auditory culture reader . Oxford: Berg.

[122] UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage . Paris: UNESCO.

[123] Appadurai, A. (1996). Modernity at large: Cultural dimensions of globalization . Minneapolis: University of Minnesota Press.

[124] Kahn, D. (1999). Noise, water, meat: A history of sound in the arts . Cambridge, MA: MIT Press.

[125] Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. BioScience , 61(3), 203-216.

[126] Odum, E. P., & Barrett, G. W. (2005). Fundamentals of ecology (5th ed.). Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole.

[127] Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... & Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature , 387(6630), 253-260.

[128] Both, C., Bouwhuis, S., Lessells, C. M., & Visser, M. E. (2006). Climate change and population declines in a long-distance migratory bird. Nature , 441(7089), 81-83.

[129] Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics , 34(1), 487-515.

[130] Fuller, S., Axel, A. C., Tucker, D., & Gage, S. H. (2015). Connecting soundscape to landscape: Which acoustic index best describes landscape configuration? Ecological Indicators , 58, 207-215.

[131] Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O., & Duvail, S. (2008). Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. PLoS One , 3(12), e4065.

[132] Villanueva-Rivera, L. J., Pijanowski, B. C., Doucette, J., & Pekin, B. (2011). A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. Landscape Ecology , 26(9), 1233-1246.

[133] Fletcher, N. H. (2007). Animal bioacoustics. In Springer handbook of acoustics (pp. 785-804). New York: Springer.

[134] Riede, T., & Goller, F. (2010). Peripheral mechanisms for vocal production in birds–differences and similarities to human speech and singing. Brain and Language , 115(1), 69-80.

[135] Catchpole, C. K., & Slater, P. J. (2003). Bird song: Biological themes and variations . Cambridge: Cambridge University Press.

[136] Wiley, R. H., & Richards, D. G. (1978). Physical constraints on acoustic communication in the atmosphere: Implications for the evolution of animal vocalizations. Behavioral Ecology and Sociobiology , 3(1), 69-94.

[137] Nottebohm, F. (1991). Reassessing the mechanisms and origins of vocal learning in birds. Trends in Neurosciences , 14(5), 206-211.

[138] Konishi, M. (2003). Coding of auditory space. Annual Review of Neuroscience , 26(1), 31-55.

[139] Morton, E. S. (1975). Ecological sources of selection on avian sounds. The American Naturalist , 109(965), 17-34.

[140] Brumm, H., & Slater, P. J. (2006). Ambient noise, motor fatigue, and serial redundancy in chaffinch song. Behavioral Ecology and Sociobiology , 60(4), 475-481.

[141] Magrath, R. D., Haff, T. M., Fallow, P. M., & Radford, A. N. (2015). Eavesdropping on heterospecific alarm calls: from mechanisms to consequences. Biological Reviews , 90(2), 560-586.

[142] Staicer, C. A., Spector, D. A., & Horn, A. G. (1996). The dawn chorus and other diel patterns in acoustic signaling. Ecology and evolution of acoustic communication in birds , 426-453.

[143] Tibbetts, E. A., & Dale, J. (2007). Individual recognition: it is good to be different. Trends in Ecology & Evolution , 22(10), 529-537.

[144] Krause, B. L. (1993). The niche hypothesis: a virtual symphony of animal sounds, the origins of musical expression and the health of habitats. Soundscape Newsletter , 6, 6-10.

[145] Hart, P. J., Ibanez, T., Paxton, K., Tredinnick, G., & Sebastián-González, E. (2021). Timing is everything: acoustic niche partitioning in two tropical wet forest bird communities. Frontiers in Ecology and Evolution , 9, 753363.

[146] Staicer, C. A., Spector, D. A., & Horn, A. G. (1996). The dawn chorus and other diel patterns in acoustic signaling. In D. E. Kroodsma & E. H. Miller (Eds.), Ecology and evolution of acoustic communication in birds (pp. 426-453). Ithaca, NY: Cornell University Press.

[147] Ryan, M. J., & Brenowitz, E. A. (1985). The role of body size, phylogeny, and ambient noise in the evolution of bird song. The American Naturalist , 126(1), 87-100.

[148] Kleyn, T., da Cruz Kaizer, M., & Passos, L. F. (2021). Sharing sound: Avian acoustic niches in the Brazilian Atlantic Forest. Biotropica , 53(6), 1510-1520.

[149] Pieretti, N., Duarte, M. H., Sousa-Lima, R. S., Rodrigues, M., Young, R. J., & Farina, A. (2015). Determining temporal sampling schemes for passive acoustic studies in different tropical ecosystems. Tropical Conservation Science , 8(1), 215-

234.

[150] Francis, C. D., Ortega, C. P., & Cruz, A. (2009). Noise pollution changes avian communities and species interactions. Current Biology , 19(16), 1415-1419.

[151] Mullet, T. C., Farina, A., & Gage, S. H. (2016). The acoustic habitat hypothesis: an ecoacoustics perspective on species habitat selection. Biosemiotics , 9(3), 319-336.

[152] Llusia, D., Amelot, X., & Sueur, J. (2013). Cicada acoustic diversity in the Mediterranean region: comparative soundscape and song characterisation. Landscape Ecology , 28(8), 1477-1489.

[153] Farina, A., & Gage, S. H. (Eds.). (2017). Ecoacoustics: The ecological role of sounds . Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

[154] Gasc, A., Sueur, J., Pavoine, S., Pellens, R., & Grandcolas, P. (2013). Biodiversity sampling using a global acoustic approach: contrasting sites with microendemics in New Caledonia. PLoS One , 8(5), e65311.

[155] Boelman, N. T., Asner, G. P., Hart, P. J., Martin, R. E., Halligan, T., Turner, W. R., & Boardman, J. (2007). Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing. Ecological Applications , 17(8), 2137-2144.

[156] Villanueva-Rivera, L. J., & Pijanowski, B. C. (2018). Soundecology: Soundscape ecology . R package version 1.3.3.

[157] Burivalova, Z., Şekercioğlu, Ç. H., & Karp, D. S. (2018). The macroecology of bird assemblages in tropical forests. Global Ecology and Biogeography , 27(2), 204-215.

[158] Dıáz, S., & Cabido, M. (2001). Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. Trends in Ecology & Evolution , 16(11), 646-655.

[159] Depraetere, M., Pavoine, S., Jiguet, F., Gasc, A., Duvail, S., & Sueur, J. (2012). Monitoring animal diversity using acoustic indices: implementation in a temperate woodland. Ecological Indicators , 13(1), 46-54.

[160] Farina, A. (2019). Ecoacoustics: A quantitative approach to investigate the ecological role of environmental sounds. Mathematics , 7(1), 21.

[161] Shannon, G., McKenna, M. F., Angeloni, L. M., Crooks, K. R., Fristrup, K. M., Brown, E., ... & Wittemyer, G. (2016). A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife. Biological Reviews , 91(4), 982-1005.

[162] Browning, E., Gibb, R., Glover-Kapfer, P., & Jones, K. E. (2017). Passive acoustic monitoring in ecology and conservation. WWF Conservation Technology Series , 1(2), 1-75.

[163] Linke, S., Gifford, T., Desjonquères, C., Tonolla, D., Aubin, T., Barclay, L., ... & Zhao, Z. (2018). Freshwater ecoacoustics as a tool for continuous ecosystem monitoring. Frontiers in Ecology and the Environment , 16(4), 231-238.

[164] Zhao, Z., Xu, Z. Y., Bellisario, K., Zeng, R. W., Li, N., Zhou, W. Y., & Pijanowski, B. C. (2019). How well do acoustic indices measure biodiversity? Computational experiments to determine effect of sound unit shape, vocal intensity, and frequency of vocalization. Ecological Indicators , 107, 105588.

[165] Zwart, M. C., Baker, A., McGowan, P. J., & Whittingham, M. J. (2014). The use of automated bioacoustic recorders to replace human wildlife surveys: an example using nightjars. PLoS One , 9(7), e102770.

第二章 聲景的測量與評估
Measurement and Evaluation of Soundscape

聲景的測量與評估是聲景學研究的核心技術基礎，涉及從傳統聲學參數到現代智慧監測技術的綜合應用。隨著聲景概念從單純的噪音量測發展為多維度的人文聲學評估，測量方法學也經歷了從客觀物理量測到主觀感知評估的重要轉變。這種轉變不僅反映了學科理論的深化，更體現了對人類聲學體驗複雜性的深刻認識。現代聲景評估需要整合物理聲學參數、心理聲學指標、生態聲學特徵和社會文化因素，形成一個全面而系統性的評估框架。

聲景測量的技術挑戰在於如何準確捕捉聲音環境的動態特性和多維度屬性。傳統的聲學測量方法主要關注分貝值、頻譜分布和時頻特徵等物理參數，這些方法雖然提供了客觀的聲學數據，但往往無法完全反映人類對聲景的主觀感受和情感回應。因此，現代聲景評估必須結合主觀評估方法，透過問卷調查、實地訪談和心理學實驗來獲取人們對聲景的真實感知和評價。這種客觀與主觀相結合的評估方法論，已成為當代聲景研究的標準範式。

技術進步為聲景測量帶來了革命性的變化。物聯網感測器網絡、大數據分析技術和人工智慧算法的發展，使得長期、大範圍的聲景監測成為可能。智慧監測技術不僅能夠自動識別和分類不同的聲音源，還能夠實時分析聲景的複雜性和多樣性特徵。這些技術的應用極大提升了聲景研究的效率和準確性，也為聲景管理和規劃提供了強有力的工具支持。

國際標準化組織(ISO)制定的 ISO 12913 系列標準為聲景測量與評估提供了統一的框架和規範。這些標準涵蓋了從概念定義到數據收集、分析方法和報告格式的完整流程，為全球聲景研究的標準化和可比性奠定了基礎。同時，聲學測量設備的校準、驗證和品質控制也是確保測量結果可靠性的關鍵要素，需要嚴格遵循國際計量標準和技術規範。

隨著聲景學研究的深入發展，評估方法學也在不斷創新和完善。跨學科的整合方法、多尺度的分析框架、動態監測的技術手段以及預測建模的數學工具，共同構

成了現代聲景評估的技術體系。這個體系不僅服務於學術研究，更為城市規劃、環境管理、公共政策制定和可持續發展提供了科學依據和技術支撐。未來的聲景測量與評估將更加注重技術創新、方法整合和實際應用，為創造更美好的聲音環境和提升人類生活品質做出貢獻。

2.1 傳統聲學量測方法 (Traditional Acoustic Measurements)

傳統聲學量測方法構成了聲景評估的基礎技術框架，其發展歷程反映了人類對聲音現象認識的逐步深化。這些方法從最基本的分貝量測發展到複雜的時頻分析技術，為現代聲景研究提供了堅實的技術基礎。傳統聲學量測方法的核心目標是客觀地描述和量化聲音環境的物理特性，包括聲壓級、頻率分布、時間變化和空間分布等關鍵參數。儘管這些方法主要關注聲音的物理屬性，但它們為理解聲景的感知特性和生態功能提供了不可或缺的基礎數據。

聲學量測技術的演進與電子技術、計算機科學和數位信號處理技術的發展密切相關。從早期的類比式聲級計到現代的數位聲學分析系統，測量精度、功能複雜性和數據處理能力都有了質的飛躍。現代聲學測量設備能夠同時進行多通道測量、實時頻譜分析和長期數據記錄，大大擴展了聲景研究的技術可能性。這些技術進步不僅提高了測量的準確性和可靠性，也為大規模聲景監測和自動化分析奠定了基礎。

在聲景評估中，傳統聲學量測方法扮演著雙重角色：一方面，它們提供了描述聲音環境物理特性的客觀指標；另一方面，它們也是建立主觀感知與客觀測量之間關聯的重要工具。Leiba 等人(2016)的研究表明，傳統的分貝測量雖然在噪音評估中應用了近一個世紀，但在聲景評估中需要結合頻率加權函數和心理聲學參數才能更好地反映人類的聽覺感受[3]。這種認識推動了聲學測量方法從單一參數向多參數、從靜態測量向動態分析的發展。

當代聲景研究中，傳統聲學量測方法的應用需要考慮測量環境的複雜性和動態性。Urban 聲景往往包含多種聲源的混合，如交通噪音、人類活動聲音、自然聲音等，這些聲源在時間和空間上都具有高度的變異性。因此，有效的聲學測量需要採用

適當的測量策略，包括測點選擇、測量時段確定、設備校準和數據處理等方面的技術考量。這些方法學問題直接影響測量結果的代表性和可靠性，是聲景評估中必須謹慎對待的技術環節。

傳統聲學量測方法與現代聲景評估理念的結合，產生了許多創新的應用方式。研究者開始將傳統的物理測量與生態聲學指標、心理聲學參數和社會調查數據相結合，形成更全面的聲景評估體系。這種整合性方法不僅保持了物理測量的客觀性和準確性，也增強了評估結果對人類感知和生態功能的解釋力。未來的發展趨勢是進一步加強傳統方法與新興技術的融合，創造更適合聲景研究需求的綜合測量方法。

2.1.1 分貝量測 (Decibel Measurement)

分貝量測作為聲學測量的基礎方法，在聲景評估中具有不可替代的重要地位。分貝(dB)作為聲壓級的對數表示方法，能夠有效地描述人耳可感知的巨大聲壓動態範圍，從聽覺閾值的 20 微帕斯卡到痛覺閾值的 200 帕斯卡，跨越了十二個數量級。這種對數刻度的設計不僅符合人類聽覺的 Weber-Fechner 定律，也為聲音強度的量化和比較提供了實用的工具。在聲景研究中，分貝量測不僅是描述聲音環境強度的基本方法，更是建立客觀測量與主觀感知之間關聯的重要橋梁。

現代分貝量測技術的發展體現了聲學計量學的重要進步。根據國際電工委員會(IEC)標準 IEC 61672 系列規範，現代聲級計必須滿足嚴格的技術要求，包括等級分類、頻率響應、時間響應和校準程序等方面的規定[2]。Class 1 級聲級計的測量不確定度通常在±0.7 dB 以內，而 Class 2 級聲級計的不確定度在±1.0 dB 以內。這些技術規範確保了不同地區、不同機構進行的分貝測量具有可比性和可靠性，為大規模聲景研究提供了技術保障。

在聲景評估中，分貝量測需要考慮多種加權方式和時間常數的選擇。A 加權聲級(dB(A))是最常用的加權方式，其頻率特性模擬了人耳在中等聲級下的頻率敏感性。然而，對於聲景評估而言，單一的 A 加權可能無法充分反映人們對不同頻率成分的感知差異。因此，現代聲景研究也採用 C 加權、Z 加權(線性)以及特殊的

心理聲學加權方式。時間常數的選擇同樣重要，快速響應(Fast, 125 毫秒)適合監測瞬時聲音變化，而慢速響應(Slow, 1 秒)則適合評估穩態聲音環境。在聲景評估中，通常需要同時考慮瞬時值、等效連續聲級和統計聲級等多種參數。

等效連續聲級(LAeq)是聲景評估中最重要的分貝測量參數之一。LAeq 代表在測量時間內與實際時變聲級相等的假想穩態聲級，能夠有效地描述複雜聲音環境的總體聲級特徵。在城市聲景研究中，LAeq 通常以一小時、一天或更長時間為測量週期，以反映聲景的時間變化特性。Chew 和 Wu(2016)在台北市交通噪音聲景研究中發現，LAeq 與人們的聲景感知存在顯著相關性，但這種相關性會受到聲音源類型和環境情境的調節[4]。這項研究強調了在聲景評估中不能僅依賴單一的 LAeq 值，還需要考慮聲音的頻譜特性和時間變化模式。

統計聲級參數在聲景分貝量測中提供了重要的補充信息。L10、L50、L90 等統計聲級分別代表在測量時間內超過 10%、50%、90%時間的聲級值，能夠描述聲景的動態特性和背景聲級。L10-L90 的差值常用來表示聲景的變化幅度，較大的差值通常對應著較高的聲景複雜性和事件性。在生態聲景研究中，L90 常被用作背景聲級的指標，而 L10-L90 則反映了生物聲活動的強度和變異性。Wilford 等人(2021)在海洋聲景的定量分析中發現，統計聲級參數能夠有效地描述海洋生物聲景的多維特徵，為海洋生態監測提供了有價值的聲學指標[2]。

現代分貝量測技術已經發展出多種專門化的測量模式，以適應不同類型聲景的評估需求。在環境噪音評估中，晝夜聲級(Ldn)和晝夜等效聲級(LDEN)考慮了人們對夜間噪音的敏感性增加；在職業聲學中，8 小時等效聲級(LAeq,8h)用於評估職業噪音暴露；在聲景研究中，研究者開發了各種特殊的測量指標，如聲景事件指數、聲景變異指數等。這些專門化指標的發展反映了分貝量測技術在不同應用領域中的適應性和創新性。

分貝量測在聲景評估中面臨的主要挑戰是如何處理複雜聲音環境中的多源混合問題。在真實的聲景環境中，不同聲源的貢獻往往難以分離，而傳統的總體聲級測量無法區分各個聲源的相對重要性。為了解決這個問題，研究者發展了聲源識別和分離技術，結合頻譜分析和模式識別方法來估算不同聲源對總體聲級的貢獻。

Herranz-Pascual 等人(2016)的研究提出了基於客觀變量和可客觀化標準的聲景指標開發方法，這些指標能夠預測城市場所的聲學舒適度，為聲景的定量評估提供了新的思路[1]。

頻率加權在分貝量測中的重要性不僅體現在 A、C、Z 加權的標準應用上，還延伸到了各種心理聲學加權方式的開發。例如，針對低頻噪音評估的 G 加權，考慮了人耳對低頻聲音的特殊敏感性；針對音樂和語音評估的各種感知加權，則更好地反映了人們對這些特殊聲音類型的主觀感受。在聲景研究中，研究者還開發了適應性加權方法，根據聲景的實際頻譜特性動態調整加權函數，以提高分貝測量對主觀感知的預測能力。

空間分貝量測是聲景評估中的另一個重要技術發展方向。傳統的點測量方式往往無法充分描述聲景的空間分布特性，而現代的空間聲學測量技術，包括麥克風陣列、聲學攝像和空間插值方法，能夠提供聲場的空間分布信息。Deng 等人(2015)的研究開發了基於 LAeq 和聲音相關係數(IACC)的線性多變量評估模型，用於預測聲景的空間感知特性[1]。這種空間測量方法為理解聲景的三維特性和空間體驗提供了技術支撐。

分貝量測技術的未來發展趨勢包括測量精度的進一步提升、智能化程度的增強以及與其他測量技術的深度整合。新一代的聲級計集成了更先進的數位信號處理算法、更精確的校準方法和更豐富的數據分析功能。人工智慧技術的應用使得自動化聲源識別、異常事件檢測和預測性維護成為可能。同時，分貝量測技術與物聯網、雲計算和大數據技術的結合，為大規模聲景監測網絡的建設和運行提供了技術可能性。

分貝量測在聲景評估中的品質保證需要建立完善的校準和驗證體系。除了定期的聲級計校準外，還需要進行場地校準、比對測量和性能驗證等質量控制措施。測量不確定度的評估和報告也是確保測量結果可靠性的重要環節。根據國際標準 ISO/IEC Guide 98-3 的要求，分貝測量的不確定度評估需要考慮設備不確定度、環境條件影響、測量方法限制等多種因素的綜合影響。這些品質保證措施為分貝量測結果的科學性和可信度提供了重要保障。

2.1.2 頻譜分析 (Spectrum Analysis)

頻譜分析是聲景測量中最重要的技術方法之一，它透過將複雜的時域聲音信號轉換為頻域表示，揭示聲音的頻率成分和能量分布特性。在聲景研究中，頻譜分析不僅提供了聲音環境的詳細頻率特徵描述，更重要的是為理解不同聲源的特性、分析聲學生態位的分配以及評估人類對聲景的感知反應提供了科學基礎。現代頻譜分析技術結合了先進的數位信號處理算法和高性能計算能力，能夠對複雜的聲景信號進行精細的頻域分析和特徵提取。

傳統的頻譜分析方法主要基於傅立葉變換(Fourier Transform)理論，透過將時域信號分解為不同頻率的正弦波成分來揭示信號的頻率結構。在聲景分析中，最常用的是快速傅立葉變換(FFT)方法，它能夠高效地計算離散信號的頻域表示。現代聲學分析儀器通常提供 1/1 倍頻程、1/3 倍頻程和窄帶頻譜分析功能，頻率解析度可以達到 1 Hz 甚至更高。這種高解析度的頻譜分析能力使得研究者能夠識別和分析聲景中的細微頻率特徵，為聲源識別和聲學生態研究提供了強有力的工具。

在聲景評估中，頻譜分析的應用範圍極為廣泛。對於城市聲景，頻譜分析能夠區分交通噪音的低頻特徵、機械設備的中頻成分以及人類活動的高頻聲音。Fuller 等人(2015)在景觀配置與聲景連接性的研究中發現，聲學複雜度指數(ACI)和生物聲學指數(BI)這兩個基於頻譜分析的聲學指標，能夠最好地描述景觀配置特徵[6]。這項研究強調了頻譜分析在生態聲景研究中的重要價值，特別是在遠端生態監測和生物多樣性評估方面的應用潛力。

倍頻程分析是頻譜分析在聲景研究中的重要應用形式。1/3 倍頻程分析將可聽頻率範圍(20 Hz 至 20 kHz)劃分為 31 個頻帶，每個頻帶的中心頻率按照標準化的倍頻程序列排列。這種分析方法的優勢在於其頻率解析度與人類聽覺系統的頻率分辨能力相匹配，因此在聲景的主觀評估和客觀測量之間建立關聯時具有重要意義。1/3 倍頻程譜不僅能夠識別聲景中的主要頻率成分，還能夠評估不同頻帶的能量分布，為聲景的頻率平衡性和音色特徵提供定量描述。

窄帶頻譜分析在聲景研究中提供了更加精細的頻率信息。通過使用高頻率解析度的 FFT 分析，研究者能夠識別聲景中的純音成分、諧波結構和頻率調制特徵。這種高解析度分析對於生物聲音的研究特別重要，因為許多動物的發聲具有特定的頻率特徵和調制模式。例如，鳥類的鳴聲通常包含複雜的頻率調制和諧波結構，昆蟲的鳴叫往往具有特定的載波頻率和調制模式。窄帶頻譜分析能夠捕捉這些細節特徵，為物種識別和生態聲學研究提供精確的頻域信息。

頻譜分析技術的另一個重要發展是自適應頻率解析度分析。傳統的 FFT 分析使用固定的時間窗長度，導致時間解析度和頻率解析度之間存在固有的權衡關係。為了克服這個限制，研究者開發了各種自適應分析方法，如多解析度分析、小波變換和調頻小波變換等。這些方法能夠根據信號的頻率特性動態調整分析參數，在低頻部分提供更好的頻率解析度，在高頻部分提供更好的時間解析度，從而更適合分析具有寬廣頻率範圍的複雜聲景信號。

在聲景頻譜分析中，窗函數的選擇對分析結果有重要影響。不同的窗函數具有不同的頻域特性，影響頻譜的主瓣寬度和旁瓣水平。Hanning 窗因其良好的頻域特性而在聲學分析中被廣泛使用，但對於某些特殊應用，如瞬態信號分析或高動態範圍測量，可能需要選擇其他類型的窗函數。現代聲學分析儀器通常提供多種窗函數選項，包括矩形窗、Hanning 窗、Hamming 窗、Blackman 窗等，研究者可以根據具體的分析需求選擇最適合的窗函數。

頻譜分析在聲景評估中的應用還涉及到頻譜特徵的統計分析和模式識別。通過對長期頻譜數據的統計分析，研究者能夠識別聲景的頻譜模式、評估頻譜穩定性以及檢測異常事件。機器學習算法在頻譜模式識別中發揮著越來越重要的作用，能夠自動識別和分類不同的聲源類型。Huzaifah(2017)比較了不同時頻表示方法在環境聲音分類中的性能，包括短時傅立葉變換(STFT)、快速小波變換和梅爾頻率倒譜係數(MFCC)等，發現這些方法在動物聲音、自然聲景和水聲等不同類型的環境聲音分類中具有不同的優勢[5]。

頻域濾波是頻譜分析的重要應用技術，能夠選擇性地分析特定頻率範圍內的聲音成分。在聲景研究中，頻域濾波常用於聲源分離、背景噪音抑制和特定頻段的能

量分析。例如，通過高通濾波可以突出鳥類鳴聲等高頻生物聲音，通過低通濾波可以分析交通噪音等低頻人為聲音。帶通濾波則可以集中分析特定頻率範圍內的聲音成分，如某些昆蟲的鳴叫頻段或機械設備的特徵頻率。這些濾波技術為聲景的組成分析和聲源貢獻評估提供了有效的工具。

頻譜分析的品質控制涉及多個技術環節，包括採樣頻率選擇、混疊失真防止、動態範圍最佳化和頻率校準等。根據 Nyquist 定理，採樣頻率必須至少是信號最高頻率的兩倍，以防止混疊失真。在聲景分析中，通常使用 44.1 kHz 或 48 kHz 的採樣頻率，以確保能夠準確分析整個可聽頻率範圍。動態範圍的最佳化需要在量化噪音和測量範圍之間找到平衡，現代 24 位元 A/D 轉換器能夠提供超過 140 dB 的理論動態範圍，足以滿足大多數聲景測量的需求。頻率校準則確保頻譜分析的頻率軸準確性，通常使用標準頻率發生器進行驗證。

現代頻譜分析技術正朝著實時化、智能化和多維化的方向發展。實時頻譜分析器能夠提供連續的頻譜監測，支持聲景的動態分析和異常檢測。人工智慧技術的引入使得自動化頻譜分析和智能化聲源識別成為可能。多維頻譜分析則結合了空間信息，能夠同時分析聲音的頻率特性和空間分布，為聲景的三維特徵分析提供新的技術手段。這些技術發展為聲景研究開闊了新的可能性，也對傳統的頻譜分析方法提出了新的挑戰和要求。

2.1.3 時頻特徵分析 (Time-Frequency Analysis)

時頻特徵分析是現代聲景測量技術中最為先進和重要的方法之一，它能夠同時描述聲音信號在時間軸和頻率軸上的變化特性，為理解動態聲景提供了強有力的分析工具。與傳統的純時域分析或純頻域分析不同，時頻分析能夠揭示聲音信號的瞬時頻率特徵、頻率調制模式和時變頻譜結構，這些特徵對於理解複雜聲景的動態特性和感知特徵具有關鍵意義。在生態聲學研究中，時頻分析能夠準確描述動物發聲的複雜時頻模式；在城市聲景研究中，它能夠分析交通流量變化、人類活動節律和環境聲音的時間演變特徵。

短時傅立葉變換(STFT)是時頻分析中最基礎和最廣泛應用的方法。STFT 透過在

時域中使用滑動窗口對信號進行分段，然後對每一段進行傅立葉變換，從而獲得信號的時頻表示。這種方法的核心思想是假設信號在短時間窗內是準穩態的，通過時間窗的移動來追蹤信號頻譜的時間演變。在聲景分析中，STFT 通常使用重疊窗口來提高時間解析度，重疊率通常設定為 50%到 75%。窗長的選擇是 STFT 分析中的關鍵參數，較短的窗長提供更好的時間解析度但較差的頻率解析度，較長的窗長則相反。對於聲景分析，通常需要根據研究目標和信號特性來最佳化窗長參數。

頻譜圖(Spectrogram)是 STFT 結果的視覺化表示，以二維圖像的形式展示信號的時頻特徵，其中橫軸代表時間，縱軸代表頻率，顏色或灰度值代表該時頻點的能量密度。頻譜圖在聲景研究中具有極高的價值，因為它能夠直觀地展示聲景的動態演變過程，幫助研究者識別不同聲源的時頻特徵模式。例如，鳥類鳴聲在頻譜圖中通常表現為具有清晰頻率輪廓的時頻軌跡，交通噪音則表現為較寬頻帶的持續性能量分布，而脈衝性聲音如槍聲或爆炸聲則表現為垂直的高能量條紋。

小波變換(Wavelet Transform)是另一種重要的時頻分析方法，它克服了 STFT 固定時頻解析度的限制，提供了多解析度的時頻分析能力。小波變換使用可變窗長的基函數，在低頻部分提供更好的頻率解析度，在高頻部分提供更好的時間解析度，這種特性使其特別適合分析具有寬廣頻率範圍的聲景信號。連續小波變換(CWT)能夠提供平滑的時頻表示，而離散小波變換(DWT)則更適合信號的多解析度分解和特徵提取。在聲景研究中，小波變換特別適用於分析具有複雜時頻結構的生物聲音，如蝙蝠的超聲波回聲定位聲、海豚的哨聲和鳥類的複雜鳴聲模式。

Egodawele 和 Ranasinghe(2023)在音樂信號的時頻分析研究中比較了 STFT 和小波變換的性能，發現這兩種方法在處理不同類型的聲音信號時各有優勢[5]。他們的研究表明，對於包含快速頻率變化的信號，小波變換通常能提供更好的時頻解析度，而對於相對穩定的頻譜特徵，STFT 則更為適用。這種比較研究為聲景分析中時頻方法的選擇提供了重要的參考依據。

Wigner-Ville 分布(WVD)是另一種重要的時頻分析方法，它基於信號的瞬時自相關函數，能夠提供高解析度的時頻表示。WVD 的優勢在於其具有良好的時頻聚

集性，能夠精確地定位信號的瞬時頻率特徵。然而，WVD 在分析多分量信號時會產生交叉項干擾，這限制了其在複雜聲景分析中的直接應用。為了克服這個問題，研究者開發了各種改進的 WVD 方法，如偽 Wigner-Ville 分布(PWVD)、平滑偽 Wigner-Ville 分布(SPWVD)等，這些方法通過引入時間或頻率窗函數來抑制交叉項，提高了多分量信號分析的效果。

在聲景時頻分析中，特徵提取是一個關鍵的技術環節。常用的時頻特徵包括瞬時頻率、頻譜重心、頻譜擴散、頻譜滾降、零交叉率等。瞬時頻率描述信號在每個時刻的主要頻率成分，對於分析頻率調制聲音特別有用。頻譜重心反映頻譜的質量中心位置，能夠描述聲音的"亮度"特徵。頻譜擴散度量頻譜能量的分散程度，反映聲音的"粗糙度"。這些時頻特徵為聲景的定量描述和自動分類提供了重要的參數基礎。

Kvalnes 和 Lysø(2020)比較了小波變換和 STFT 在戶外噪音分類中的應用效果，研究發現不同的時頻變換方法在處理不同類型的環境聲音時表現出不同的優勢[4]。他們的研究表明，對於包含急劇時頻變化的聲音事件，小波變換通常能提供更好的分類性能，而對於相對穩定的環境背景聲音，STFT 則表現更好。這種比較研究為實際聲景分析中時頻方法的選擇提供了實用的指導原則。

現代時頻分析技術還包括各種自適應時頻分析方法，如經驗模態分解(EMD)、集成經驗模態分解(EEMD)和變分模態分解(VMD)等。這些方法能夠根據信號的內在特性自適應地分解信號，不需要預先設定基函數，因此能夠更好地適應各種類型的聲景信號。EMD 將複雜信號分解為一系列內稟模態函數(IMF)，每個 IMF 代表信號的一個頻率成分。EEMD 透過加入白噪音來改善 EMD 的模態混疊問題，提高了分解的穩定性。VMD 則通過變分最佳化來實現信號的非遞歸分解，能夠有效地分離不同頻率成分。

時頻分析在聲景研究中的應用正朝著自動化和智能化的方向發展。機器學習算法與時頻分析的結合，使得自動化聲源識別、聲景事件檢測和聲景品質評估成為可能。深度學習方法，特別是卷積神經網絡(CNN)，能夠直接從時頻表示中學習聲景的特徵模式，實現端到端的聲景分析。長短期記憶網絡(LSTM)和門控循環單

元(GRU)等遞歸神經網絡則能夠建模聲景的時間序列特徵，為聲景的動態分析和預測提供了強有力的工具。

時頻分析的品質控制涉及多個技術參數的最佳化，包括採樣頻率、時間解析度、頻率解析度和動態範圍等。採樣頻率的選擇需要考慮信號的最高頻率成分，通常設定為最高感興趣頻率的 2.5 到 3 倍，以留出足夠的防混疊裕度。時間解析度和頻率解析度之間存在不確定性原理的約束，需要根據具體的分析目標進行權衡。動態範圍的最佳化則需要考慮信號的強度變化範圍和量化噪音的影響。現代高解析度 A/D 轉換器和浮點運算技術為時頻分析提供了足夠的數值精度和動態範圍。

時頻分析技術的未來發展趨勢包括更高的時頻解析度、更強的抗噪音能力以及更智能的自適應分析能力。稀疏信號處理技術的發展為高解析度時頻分析提供了新的可能性，能夠在有限的觀測數據基礎上重建高解析度的時頻表示。壓縮感知理論的應用則為大規模聲景數據的高效處理提供了新的思路。人工智慧技術的深入應用將使時頻分析更加智能化，能夠自動適應不同類型的聲景信號，提供更準確和更有用的分析結果。

2.2 聲景評估方法 (Soundscape Evaluation Approaches)

聲景評估方法代表了聲學研究從純粹的物理測量向人文關懷的重要轉變，這種轉變不僅體現了學科理論的發展，更反映了對人類聽覺體驗複雜性的深刻認識。現代聲景評估需要整合物理聲學參數、心理聲學指標、社會文化因素和個人感知特徵，形成一個多維度、多層次的評估體系。這種整合性方法的發展是基於這樣的認識：聲景不僅是物理聲音環境的客觀存在，更是人們在特定情境中對聲音環境的主觀感知和情感體驗。因此，有效的聲景評估必須能夠捕捉和量化這種主觀體驗，同時建立其與客觀聲學參數之間的關聯。

聲景評估方法學的發展歷程可以追溯到 20 世紀中葉的心理聲學研究和環境心理學發展。早期的研究主要關注噪音的負面影響和人們對噪音的煩惱反應，評估方法相對簡單，主要依賴分貝測量和主觀煩惱度評分。隨著聲景概念的提出和發展，評估方法逐漸豐富和完善，從單一的煩惱度評估發展為包括愉悅度、事件性、熟

悉度、自然度等多維度的感知評估。同時，評估技術也從簡單的問卷調查發展為包括實驗室控制實驗、現場調查、虛擬現實實驗和生理信號測量等多種方法的綜合體系。

國際標準化組織制定的 ISO 12913 系列標準為聲景評估提供了統一的框架和方法論基礎。ISO 12913-2:2018 規定了聲景研究中數據收集和報告的 requirements，強調了主觀評估與客觀測量相結合的重要性[2]。該標準詳細規定了問卷設計、調查實施、數據記錄和品質控制等技術要求，為不同地區、不同機構進行的聲景研究提供了可比性基礎。ISO 12913-3:2019 則提供了聲景數據分析的技術指導，包括統計分析方法、建模技術和報告格式等[7]。這些國際標準的制定和實施，標誌著聲景評估方法學的成熟和標準化。

現代聲景評估面臨的主要挑戰是如何在保持科學嚴謹性的同時，充分考慮聲景感知的個體差異性和情境依賴性。人們對聲景的感知和評價會受到年齡、性別、文化背景、教育水平、聽力狀況、個人經歷等多種因素的影響，同時也會受到測評時的情緒狀態、注意力水平、環境溫度、視覺環境等情境因素的調節。這種複雜性要求聲景評估方法必須具有足夠的靈敏度和特異性，能夠區分不同來源的變異，準確識別聲景特徵對人們感知的真實影響。

技術創新為聲景評估帶來了革命性的變化。虛擬現實(VR)和增強現實(AR)技術使得聲景的控制實驗和模擬評估成為可能，研究者可以在實驗室環境中精確控制聲景的各種參數，同時保持較高的生態效度。移動應用程序和在線平台的發展為大規模聲景調查提供了便利的工具，使得公眾參與和眾包評估成為可能。生理信號測量技術，如腦電圖(EEG)、心率變異性(HRV)、皮膚電導和眼動追蹤等，為聲景評估提供了客觀的生理指標，有助於理解聲景對人體的生理影響和無意識反應。

聲景評估方法的發展趨勢是朝著更加整合化、個性化和實時化的方向發展。整合化體現在多種評估方法的協同應用，如主觀評估與客觀測量的結合、實驗室研究與現場調查的結合、短期評估與長期監測的結合等。個性化則體現在評估方法對個體差異的充分考慮，如適應性問卷設計、個性化評估模型和定製化評估工具等。實時化則體現在評估技術的即時響應能力，如實時感知監測、動態評估更新和即

時反饋系統等。這些發展趨勢為聲景評估的理論發展和實際應用開闊了新的前景。

2.2.1 問卷調查與感知評估 (Surveys and Perceptual Evaluation)

問卷調查與感知評估是聲景研究中最重要和最廣泛應用的方法，它們直接關注人們對聲景的主觀體驗和感知反應，為理解聲景的人文意義提供了不可替代的工具。這種方法的核心理念是認識到聲景不僅是物理聲音環境的客觀存在，更是人們在特定情境中的主觀感知和情感體驗。因此，要全面理解和評估聲景，必須深入了解和測量人們的感知反應、情感體驗和價值判斷。問卷調查與感知評估方法的發展體現了聲景研究從技術導向向人文關懷的重要轉變，也反映了現代環境學科對人類福祉和生活品質的關注。

現代聲景問卷調查的設計基於心理學和社會學的科學方法論，需要考慮問題表述、量表選擇、問卷結構、調查流程等多個技術要素。問題表述的準確性和清晰性直接影響受訪者的理解和回答品質，需要避免引導性問題、雙重否定、技術術語等可能產生混淆的表達方式。量表選擇涉及連續量表與類別量表、單極量表與雙極量表、數值量表與語義量表等不同選項的權衡，每種量表都有其適用範圍和限制條件。ISO 12913-2 標準推薦使用 5 點或 7 點李克特量表來評估聲景的各種感知屬性，如愉悅度、煩惱度、事件性、熟悉度等，這種標準化的量表設計有助於不同研究之間的比較和數據整合。

聲景感知評估的維度設計是問卷調查中的核心技術問題。早期的聲景研究主要關注單一的煩惱度維度，但隨著研究的深入，學者們發現聲景感知是一個多維度的複雜現象。Engel 等人(2021)在聲景研究中心理聲學指標使用的評述中指出，現代聲景評估通常包括愉悅度/不愉悅度、事件性、煩惱度等多個維度，這些維度能夠更全面地描述人們對聲景的感知體驗[2]。愉悅度反映人們對聲景的整體喜好程度，事件性描述聲景中聲音事件的豐富程度和變化性，煩惱度則評估聲景對人們的干擾程度。這種多維度的評估框架為聲景的細緻分析和深入理解提供了重要基礎。

在線調查和移動應用程序的發展為聲景問卷調查帶來了革命性的變化。傳統的紙

質問卷調查存在成本高、效率低、數據錄入錯誤等問題，而數位化調查工具不僅能夠提高調查效率和數據品質，還能夠實現更複雜的調查設計，如自適應問卷、多媒體呈現、實時數據驗證等功能。移動應用程序特別適合現場聲景調查，受訪者可以在實際的聲景環境中即時回答問卷，提高了評估的生態效度。一些先進的移動調查應用還能夠同時記錄聲音環境和地理位置信息，為聲景評估提供更豐富的上下文數據。

感知評估實驗的設計需要考慮多種方法學問題，包括實驗環境選擇、受試者招募、刺激材料準備、實驗流程設計等。實驗室控制實驗能夠精確控制聲景的各種參數，排除干擾因素，但可能存在生態效度問題。現場評估具有高的生態效度，但難以控制環境變量，可能影響結果的內部效度。虛擬現實技術的發展為解決這個兩難問題提供了新的可能性，研究者可以在實驗室環境中創造高度真實的聲景體驗，既保持了實驗控制的嚴密性，又提高了結果的生態效度。

Algargoosh 等人(2024)在室內聲景的心理聲學指標和情感反應研究中發現，事件性和煩惱度較高的聲景表現出更高的心理聲學指標值，而愉悅度的提升則相對困難[3]。這項研究強調了不同感知維度之間的複雜關係，也提醒研究者在問卷設計中需要充分考慮這些維度之間的相互作用。同時，該研究也展示了結合主觀問卷調查和客觀心理聲學測量的重要價值，這種整合性方法能夠更全面地理解聲景的感知機制。

文化背景對聲景感知評估的影響是一個日益受到關注的研究領域。不同文化背景的人們對聲音的意義理解、價值判斷和情感反應可能存在顯著差異，這種差異會影響問卷調查的結果和解釋。因此，跨文化聲景研究需要特別注意問卷的文化適應性和語言等效性。問卷翻譯不僅是語言的轉換，更需要考慮文化內涵和社會情境的差異。回譯法(back-translation)是確保問卷跨文化等效性的重要方法，即將問卷翻譯成目標語言後再翻譯回原語言，檢查譯文的準確性和一致性。

受訪者的個體特徵對感知評估結果有重要影響，需要在問卷設計和數據分析中給予充分考慮。年齡、性別、教育背景、職業特點、聽力狀況、音樂訓練等個體特徵都可能影響人們對聲景的感知和評價。因此，現代聲景問卷通常包含詳細的人

口統計學信息收集，以便在數據分析中控制或分析這些個體差異的影響。一些研究還專門關注特殊人群的聲景感知特徵，如聽力障礙人士、老年人、兒童等，這些研究有助於理解聲景感知的個體差異機制，也為包容性聲景設計提供科學依據。

問卷調查的品質控制涉及多個技術環節，包括預試驗、信度測試、效度驗證、數據清理等。預試驗用於檢驗問卷的可理解性、完成時間和邏輯流程，通常需要在小規模樣本上進行多輪測試和修正。信度測試評估問卷測量的一致性和穩定性，常用的方法包括內部一致性信度(Cronbach's α)、重測信度和評分者間信度等。效度驗證確保問卷能夠準確測量所要研究的概念，包括內容效度、建構效度和效標效度等不同類型。數據清理則涉及異常值檢測、缺失值處理、邏輯錯誤檢查等技術程序。

現代感知評估技術還包括各種創新的測量方法，如語義微分法、排序法、配對比較法、自由選擇描述法等。語義微分法使用一系列反義詞對來評估聲景的不同屬性，如安靜-嘈雜、自然-人工、愉悅-不愉悅等，這種方法能夠細緻地描述聲景的多維特徵。排序法要求受訪者對不同的聲景刺激進行排序，適合比較分析和相對評估。配對比較法則比較每兩個聲景刺激的相對關係，能夠建立精確的偏好順序。自由選擇描述法允許受訪者用自己的語言描述聲景感受，提供豐富的質性信息。

問卷調查數據的分析方法包括描述性統計、推理統計、多變量分析和質性分析等。描述性統計提供數據的基本特徵，如平均值、標準差、分布形狀等。推理統計用於檢驗假設和建立統計推論，如 t 檢驗、方差分析、相關分析等。多變量分析能夠處理複雜的變量關係，如回歸分析、因子分析、聚類分析等。質性分析則處理開放式問題的回答，如內容分析、主題分析、話語分析等。現代統計軟件和數據分析工具為這些分析方法的實施提供了強有力的技術支撐。

2.2.2 主觀與客觀指標 (Subjective and Objective Indicators)

主觀與客觀指標的整合是現代聲景評估的核心挑戰和重要特徵，它體現了聲景研究從單純的物理測量向人文關懷的重要轉變。客觀指標基於物理聲學測量和數學分析，提供可重現、可量化的聲景描述；主觀指標則基於人類感知和心理反應，

反映聲景的人文意義和社會價值。這兩類指標各有優勢和局限性，客觀指標具有科學嚴謹性和技術一致性，但可能忽略人類感知的複雜性；主觀指標能夠捕捉真實的人類體驗，但可能存在個體差異和測量誤差。因此，現代聲景評估需要發展有效的方法來整合這兩類指標，建立它們之間的關聯模型，實現聲景評估的科學性和人文性的統一。

客觀指標體系在聲景評估中包括傳統的聲學參數、心理聲學指標和生態聲學指標等多個層面。傳統聲學參數如等效連續聲級(LAeq)、統計聲級(L10, L50, L90)、A 加權聲壓級等，提供了聲景強度和時間變化的基本描述。心理聲學指標如響度(Loudness)、尖銳度(Sharpness)、粗糙度(Roughness)、波動強度(Fluctuation Strength)等，更好地反映了人類聽覺系統的感知特性。生態聲學指標如聲學複雜性指數(ACI)、生物聲學指數(BI)、正常化聲景指數(NDSI)等，則專門用於描述聲景的生態特徵和生物多樣性信息。Alcocer 等人(2022)的元分析研究發現，在各種聲學指數中，Shannon 多樣性指數(H)、NDSI 和 ACI 是生物多樣性的較好預測指標[6]，這為生態聲景的客觀評估提供了重要的方法學指導。

心理聲學指標在主客觀指標整合中具有特殊的重要性，因為它們在某種程度上橋接了物理測量和主觀感知。響度是最重要的心理聲學指標之一，它描述人們對聲音強度的主觀感受，與聲壓級相關但不完全相同，需要考慮頻率加權、時間積分和雙耳效應等因素。尖銳度反映聲音的"刺耳"程度，主要由高頻成分決定，與人們對聲音"刺激性"的主觀評價密切相關。粗糙度和波動強度描述聲音的時間調制特徵，影響人們對聲音"平滑性"和"穩定性"的感知。這些心理聲學指標的計算基於人類聽覺系統的生理和心理模型，因此能夠更好地預測主觀感知反應。

主觀指標的測量和量化是聲景評估中的技術難點。主觀感知具有個體差異性、情境依賴性和時間變異性等特徵，這些特徵使得主觀指標的測量面臨諸多挑戰。個體差異性要求評估方法能夠區分不同來源的變異，識別真實的聲景效應。情境依賴性則要求評估設計充分考慮環境因素的影響，如視覺環境、天氣條件、社會情境等。時間變異性則需要考慮感知的動態變化和適應效應。為了應對這些挑戰，現代主觀評估方法採用了多種技術策略，如重複測量設計、隨機化控制、統計建模等。

Rimskaya-Korsakova 等人(2024)在城市環境聲景的視聽感知和客觀控制研究中驗證了 ISO 標準方法的有效性，研究發現聲學特徵和主觀品質指標之間存在顯著的關聯關係[2]。這項研究採用了標準化的算法來計算各種客觀指標，同時使用標準化的問卷來測量主觀指標，為主客觀指標的整合分析提供了方法學範例。研究結果表明，雖然主客觀指標之間存在相關性，但這種相關性並不完美，仍然需要考慮其他因素對感知的影響。

建立主觀與客觀指標之間關聯的統計建模是聲景評估中的關鍵技術。線性回歸模型是最常用的方法，能夠建立主觀評分與客觀參數之間的線性關係。多元回歸分析能夠同時考慮多個客觀指標對主觀感知的影響，識別最重要的預測變量。然而，線性模型可能無法完全描述複雜的感知機制，因此研究者也開發了各種非線性建模方法，如多項式回歸、人工神經網絡、支持向量機等。Deng 等人(2015)開發了基於 LAeq 和聲音相關係數(IACC)的線性多變量評估模型，用於預測聲景的空間感知特性，這種建模方法為聲景的定量預測提供了技術工具[1]。

機器學習技術在主客觀指標整合中發揮著越來越重要的作用。深度學習算法能夠自動學習複雜的特徵表示和非線性關係，提高預測精度和泛化能力。卷積神經網絡(CNN)適合處理頻譜圖等二維聲景表示，能夠自動提取時頻特徵。循環神經網絡(RNN)和長短期記憶網絡(LSTM)則適合處理時間序列數據，能夠建模聲景的動態特徵。集成學習方法如隨機森林、梯度提升等，能夠結合多種弱學習器的優勢，提高模型的穩定性和準確性。這些先進的建模技術為聲景評估的自動化和智能化提供了強有力的工具。

跨文化和跨地區的主客觀指標研究揭示了聲景感知的普遍性和特殊性。一些客觀指標，如響度和尖銳度，在不同文化背景下都表現出較好的預測能力，反映了人類聽覺系統的共同特徵。但一些主觀評價，如自然度、愉悅度等，則可能受到文化背景和個人經歷的影響，表現出較大的跨文化差異。這種差異提醒研究者在建立主客觀關聯模型時需要考慮文化因素的調節作用，發展文化敏感的評估方法。

主客觀指標整合的品質控制涉及數據收集、模型建立和結果驗證等多個環節。數

據收集需要確保主觀評估和客觀測量的時空一致性，避免時間延遲和空間偏移對結果的影響。模型建立需要注意過擬合問題，使用交叉驗證、正則化等技術來提高模型的泛化能力。結果驗證需要使用獨立的數據集來檢驗模型的預測精度，評估模型的實際應用價值。統計功效分析也是品質控制的重要組成部分，需要確保樣本量足夠大，能夠檢測到實際存在的效應。

現代主客觀指標整合技術正朝著個性化、自適應和實時化的方向發展。個性化建模考慮個體差異對感知的影響，為不同的用戶群體建立專門的預測模型。自適應建模能夠根據新的數據動態更新模型參數，適應環境變化和感知漂移。實時建模則能夠提供即時的聲景評估結果，支持動態的聲景管理和控制。這些技術發展為聲景評估的理論研究和實際應用開闊了新的前景，也對傳統的評估方法提出了新的挑戰和要求。

2.2.3 聲景指標的建立 (Development of Soundscape Metrics)

聲景指標的建立是現代聲景評估技術發展的重要里程碑，它代表了從描述性測量向預測性評估的重要轉變。聲景指標不僅需要整合複雜的聲學特徵，還需要反映人類的感知特性和情感反應，因此其建立過程涉及聲學、心理學、統計學和電腦科學等多個學科的理論和方法。有效的聲景指標應該具備科學性、實用性、普適性和可操作性等特徵：科學性要求指標建立在嚴謹的理論基礎上，能夠準確反映聲景的本質特徵；實用性要求指標計算簡便，結果易於理解和應用；普適性要求指標在不同環境和文化背景下都具有良好的適用性；可操作性則要求指標能夠為聲景管理和設計提供具體的指導。

聲景指標的理論基礎包括人類聽覺生理學、認知心理學、環境心理學和聲學物理學等多個領域的理論成果。人類聽覺生理學為理解聲音感知的基本機制提供了生物學基礎，包括外耳、中耳、內耳的聲音傳遞過程，以及聽覺神經系統的信號處理機制。認知心理學則揭示了聲音感知中的認知過程，如注意力分配、記憶提取、情感評價等。環境心理學關注人與聲音環境之間的相互關係，探討聲景對人類行為、情緒和生活品質的影響。聲學物理學則提供了聲音現象的客觀描述和測量方法。這些理論基礎的整合為聲景指標的建立提供了科學依據和方法論指導。

Kang 等人(2019)在聲景指標發展的研究中指出，分貝是評估聲學環境最常用的指標，但對於聲景評估而言，還需要發展能夠反映"人們如何感知聲學環境"的測量指標[5]。他們提出了聲景指標的概念框架，將聲景指標定義為"用於預測聲景屬性值的測量指標"，強調了聲景指標的預測功能和實用價值。這種定義為聲景指標的建立和評估提供了明確的標準和目標導向。

生態聲學指標是聲景指標體系中的重要組成部分，專門用於評估聲景的生態特徵和生物多樣性信息。Fuller 等人(2015)的開創性研究比較了多種聲學指標在描述景觀配置中的效果，發現聲學複雜性指數(ACI)和生物聲學指數(BI)是最能描述景觀配置的指標[6]。ACI 基於聲譜圖中相鄰時間片段之間的強度差異，反映聲景的時間複雜性；BI 則基於 2-8 kHz 頻段與總頻段能量的比值，專門評估鳥類等生物聲活動。這些生態聲學指標為遠端生態監測和生物多樣性評估提供了重要工具。

現代聲景指標的建立過程通常包括理論構建、算法設計、參數最佳化、驗證測試等多個步驟。理論構建階段需要明確指標的概念定義、理論基礎和預期功能，建立指標與聲景特徵之間的理論關聯。算法設計階段將理論概念轉化為可計算的數學表達式，包括特徵提取、權重分配、數值整合等技術環節。參數最佳化階段通過統計分析和機器學習方法來確定算法中的關鍵參數，最大化指標的預測準確性。驗證測試階段使用獨立的數據集來評估指標的效果，包括預測精度、穩定性、泛化能力等多個方面的測試。

Rajan 等人(2019)在使用聲學指數快速評估生物多樣性的研究中發現，不同的聲學指數在不同的生態環境中表現出不同的效果[4]。他們比較了聲學多樣性指數(ADI)、聲學均勻度指數(AEI)、生物聲學指數(BI)、聲學複雜性指數(ACI)、正常化聲景指數(NDSI)等多種指標，發現這些指標各有優勢和適用範圍。例如，ACI 和 AEI 在聲音事件豐富的環境中表現較好，而 BI 和 NDSI 則在生物聲活動明顯的環境中更有效。這種比較研究為聲景指標的選擇和應用提供了重要的參考依據。

心理聲學指標在聲景評估中具有特殊的重要性，因為它們基於人類聽覺系統的生理和心理模型，能夠更好地預測主觀感知反應。響度(Loudness)是最重要的心理

聲學指標，根據 ISO 532 標準計算，考慮了人類聽覺的頻率敏感性和雙耳效應。尖銳度(Sharpness)反映聲音的"刺耳"程度，主要由高頻成分決定。粗糙度(Roughness)描述聲音的時間調制特徵，反映"粗糙"和"平滑"的感知差異。波動強度(Fluctuation Strength)則評估緩慢的聲音調制對感知的影響。這些心理聲學指標的發展為聲景的定量評估提供了更接近人類感知的測量工具。

複合指標的建立是聲景指標發展的重要趨勢，它通過整合多個基礎指標來提供更全面的聲景評估。複合指標的建立需要解決指標選擇、權重分配、數值整合等技術問題。指標選擇需要在全面性和簡潔性之間找到平衡，選擇最具代表性和互補性的基礎指標。權重分配則需要基於理論分析和實證研究來確定各個基礎指標的相對重要性。數值整合涉及不同量綱指標的標準化和合成方法。一些研究採用主成分分析、因子分析等統計方法來建立複合指標，另一些研究則使用多目標最佳化、模糊邏輯等方法來處理複雜的權重關係。

機器學習技術在聲景指標建立中發揮著越來越重要的作用。深度學習算法能夠自動學習複雜的特徵表示，發現傳統方法難以捕捉的模式和關係。卷積神經網絡特別適合處理頻譜圖等二維聲景表示，能夠自動提取具有預測價值的時頻特徵。循環神經網絡則適合建模聲景的時間序列特徵，捕捉動態變化模式。這些先進的機器學習方法為聲景指標的自動化建立和最佳化提供了強有力的工具。

聲景指標的驗證和評估是確保指標品質的重要環節。驗證過程需要考慮多個方面的性能指標，包括預測準確性、穩定性、敏感性、特異性等。預測準確性通常使用相關係數、決定係數、均方根誤差等統計指標來評估。穩定性則考察指標在不同條件下的一致性表現，包括時間穩定性、空間穩定性和跨文化穩定性。敏感性評估指標對聲景變化的響應能力，特異性則評估指標區分不同聲景類型的能力。這些驗證指標為聲景指標的品質評估和改進提供了客觀標準。

聲景指標的標準化是促進該領域發展的重要因素。國際標準化組織正在制定相關的技術標準，為聲景指標的計算方法、驗證程序和應用指南提供統一規範。這種標準化努力有助於提高不同研究之間的可比性，促進研究成果的積累和應用。同時，標準化也為聲景指標的商業化應用和技術推廣提供了基礎條件。

聲景指標的未來發展趨勢包括個性化指標、實時指標、多維度指標等方向。個性化指標考慮個體差異對聲景感知的影響，為不同的用戶群體提供專門的評估工具。實時指標能夠提供連續的聲景評估結果，支持動態的聲景監測和管理。多維度指標則整合聲學、視覺、觸覺等多種感官信息，提供更全面的環境品質評估。這些發展趨勢反映了聲景研究的前沿動向，也為該領域的未來發展指明了方向。

2.3 智慧監測技術 (Smart Monitoring Technologies)

智慧監測技術代表了聲景測量領域的技術革命，它將現代資訊科技與傳統聲學測量相結合，創造出能夠自動化、智能化、網絡化的聲景監測系統。這種技術整合不僅大幅提升了聲景監測的效率和覆蓋範圍，更重要的是為聲景研究和管理帶來了全新的技術可能性。智慧監測技術的核心特徵包括感測器網絡的部署、大數據的收集和處理、人工智慧的分析和識別，以及物聯網的連接和通信。這些技術要素的協同作用形成了一個完整的智慧監測生態系統，能夠實現 24 小時連續監測、多點同步觀測、實時數據傳輸、自動異常檢測、智能模式識別等先進功能。

智慧監測技術的發展背景是數位化時代對環境監測的新需求和新挑戰。傳統的聲景監測主要依賴人工操作的攜帶式儀器，存在監測範圍有限、時間間隔不連續、人力成本高昂、數據處理滯後等問題。隨著城市化進程的加速和環境問題的複雜化，對聲景監測提出了更高的要求：需要更大的空間覆蓋範圍、更長的時間連續性、更快的響應速度、更精準的分析能力。智慧監測技術正是在這種需求驅動下發展起來的，它充分利用現代電子技術、通信技術、計算技術的最新成果，構建出新一代的聲景監測系統。

物聯網(IoT)技術在智慧聲景監測中發揮著基礎性作用，它提供了設備連接、數據傳輸、遠端控制的技術框架。現代聲景監測節點通常集成了高性能的數位麥克風、嵌入式處理器、無線通信模組、電源管理系統等核心組件，形成一個完整的智能感測單元。這些感測單元可以部署在城市的各個角落，形成覆蓋全域的監測網絡。Marques 和 Pitarma(2020)開發的基於物聯網的實時噪音監測系統展示了這種技術的應用潛力，該系統能夠增強聲學舒適性和職業健康保護[4]。系統採用分散式架

構，每個監測節點都具有一定的本地處理能力，能夠進行初步的數據分析和異常檢測，只有在需要時才向中央系統報告，這種設計大大減少了網絡傳輸負荷和系統響應延遲。

大數據技術為智慧聲景監測提供了強大的數據處理和分析能力。現代聲景監測系統可以產生海量的聲音數據，一個監測點每天可能產生幾個 GB 的原始聲音數據，一個城市級的監測網絡每天可能產生數百 GB 甚至 TB 級的數據。傳統的數據處理方法無法應對如此大規模的數據處理需求，而大數據技術提供了分散式儲存、並行計算、流式處理等先進技術手段。Hadoop、Spark 等大數據平台為聲景數據的儲存和處理提供了可擴展的基礎設施，能夠處理 PB 級的數據量，支持複雜的數據分析和挖據任務。

人工智慧技術是智慧聲景監測的核心驅動力，它使得自動化的聲音識別、模式分析、異常檢測成為可能。深度學習算法特別適合處理複雜的聲景信號，卷積神經網絡(CNN)能夠自動提取聲音的特徵表示，循環神經網絡(RNN)能夠建模聲音的時間序列特性，生成對抗網絡(GAN)能夠合成逼真的聲景信號用於數據增強。Starowicz 和 Zieliński(2024)在可持續聲學的研究中指出，人工智慧技術對聲學設計和噪音管理產生了重大影響，這些技術能夠創造最佳聲景，並提供智能化的監測和管理解決方案[5]。

邊緣計算技術在智慧聲景監測中發揮著越來越重要的作用，它將計算能力下沉到監測節點，實現本地化的數據處理和智能分析。這種分散式計算架構有多個優勢：首先，它減少了數據傳輸量，降低了網絡負荷和傳輸成本；其次，它提高了系統的實時響應能力，能夠在本地快速檢測和響應異常事件；第三，它增強了系統的可靠性，即使與中央系統的連接中斷，本地節點仍能繼續工作。Herfkens 的研究展示了邊緣 AI 在城市噪音監測中的應用，該系統使用低成本感測器進行感知聲景預測，展現了邊緣計算在聲景監測中的巨大潛力[1]。

雲計算技術為智慧聲景監測提供了彈性可擴展的計算和儲存資源。現代聲景監測系統通常採用雲端架構，將大規模的數據處理和分析任務遷移到雲端進行。雲端平台提供了豐富的計算服務，包括機器學習平台、大數據分析工具、可視化服務

等，為聲景數據的深度分析和應用開發提供了強有力的支撐。同時，雲端架構還支持多租戶服務，不同的用戶和組織可以共享同一套監測基礎設施，大大降低了系統建設和維護成本。

Poudel 和 Assaad(2025)開發的基於物聯網的即時智能聲學監測和警報系統整合了深度學習機器聽覺算法、邊緣計算和雲端計算技術，展現了現代智慧監測技術的綜合應用[3]。該系統能夠在建築工地進行即時監測和活動檢測，使用真實聲景的音頻記錄進行測試，證明了智慧監測技術在實際應用中的有效性和可靠性。系統採用了分層架構，邊緣設備負責數據收集和初步處理，雲端平台負責深度分析和決策支持，這種架構設計實現了系統性能和成本效益的最佳平衡。

數據安全和隱私保護是智慧聲景監測中的重要技術挑戰。聲音數據可能包含敏感的個人信息和隱私內容，需要採用適當的技術手段來保護數據安全和用戶隱私。加密技術被廣泛應用於數據傳輸和儲存過程中，確保數據在傳輸和存儲過程中不被非法獲取和篡改。差分隱私技術可以在數據分析過程中保護個體隱私，通過在數據中添加適當的噪音來防止個體信息的洩露。聯邦學習技術則允許在不共享原始數據的情況下進行分散式機器學習，各個監測節點可以共同訓練模型而不洩露本地數據。

標準化和互操作性是智慧聲景監測技術發展的重要議題。隨著不同廠商和組織開發的監測系統越來越多，系統之間的兼容性和數據的可交換性變得越來越重要。國際標準化組織正在制定相關的技術標準，涵蓋硬體接口、通信協議、數據格式、API 規範等多個方面。這些標準化努力有助於促進技術的互操作性，降低系統整合成本，推動整個行業的健康發展。開源技術在這方面也發揮著重要作用，許多開源項目為智慧聲景監測提供了標準化的技術框架和參考實現。

2.3.1 感測器與物聯網 (Sensors and IoT)

感測器與物聯網技術構成了智慧聲景監測系統的基礎設施，它們將傳統的聲學測量設備轉變為能夠自主工作、互相連接、智能分析的現代化監測節點。現代聲景感測器不再是簡單的聲音採集設備，而是集成了先進的數位信號處理、邊緣計算、

無線通信等多種技術的智能化系統。這種技術整合使得聲景監測能夠實現前所未有的空間覆蓋、時間連續性和分析深度，為聲景研究和管理帶來了革命性的變化。物聯網技術則提供了設備間協同工作的技術框架，使得分散部署的感測器能夠形成統一的監測網絡，實現數據共享、協調控制和集中管理。

現代聲景感測器的硬體架構通常包括聲音採集模組、信號處理單元、通信模組、電源管理系統和環境保護外殼等核心組件。聲音採集模組是感測器的核心，通常採用高性能的 MEMS(微機電系統)麥克風或電容式麥克風，具有寬頻響應、低噪音、高動態範圍等特性。現代 MEMS 麥克風的頻率響應可以覆蓋 20 Hz 到 20 kHz 的全部可聽頻率範圍，信噪比可以達到 65 dB 以上，動態範圍超過 120 dB，完全滿足專業聲學測量的要求。一些高端感測器還採用多麥克風陣列設計，能夠實現聲源定位、波束成形、噪音抑制等先進功能。

信號處理單元負責將類比聲音信號轉換為數位信號，並進行初步的數據處理和分析。現代感測器通常採用 32 位元 ARM 處理器或 DSP 處理器，具有足夠的計算能力來執行複雜的信號處理算法。高解析度的 A/D 轉換器(通常是 24 位元)確保了信號轉換的精度，採樣頻率通常設定為 48 kHz 或更高，以滿足高品質聲音信號的採集需求。一些先進的感測器還集成了 FPGA(現場可程式邏輯陣列)，能夠實現硬體級別的信號處理加速，提高系統的實時響應能力。

通信模組是感測器連接物聯網的關鍵組件，現代感測器通常支持多種通信方式，包括 WiFi、4G/5G 蜂窩網絡、LoRaWAN、Zigbee、藍牙等。WiFi 適合在有無線網絡覆蓋的城市環境中使用，具有高帶寬、低延遲的優勢。4G/5G 蜂窩網絡提供了廣域覆蓋能力，適合偏遠地區或移動監測應用。LoRaWAN 專門針對物聯網應用設計，具有低功耗、遠距離、廣覆蓋的特點，特別適合大規模感測器網絡部署。通信協議的選擇需要根據具體的應用場景、數據傳輸需求、功耗限制等因素進行綜合考慮。

電源管理系統對於戶外部署的感測器至關重要，需要在保證系統正常工作的同時最小化功耗。現代感測器通常採用多級電源管理策略，包括動態電壓調節、睡眠模式控制、任務調度最佳化等技術手段。太陽能板和鋰電池的組合是最常用的供

電方案，能夠實現長期無人值守運行。一些先進的系統還採用能量收集技術，如振動能量收集、溫差發電等，進一步延長系統的工作壽命。功耗最佳化設計使得現代感測器的工作功耗通常在幾瓦到幾十瓦之間，與太陽能供電系統配合能夠實現永續運行。

環境保護外殼確保感測器能夠在惡劣的戶外環境中長期穩定工作。現代感測器外殼通常採用工業級設計，具有 IP65 或更高的防護等級，能夠防塵、防水、防腐蝕。材料選擇上通常採用不鏽鋼、鋁合金或工程塑料，具有良好的耐候性和機械強度。散熱設計也是重要考慮因素，特別是在高溫環境下，需要確保電子組件的工作溫度在安全範圍內。一些感測器還集成了溫濕度監測功能，能夠監測設備內部的環境條件，為維護決策提供參考信息。

物聯網平台為感測器網絡提供了統一的管理和服務框架。現代物聯網平台通常採用雲端架構，提供設備管理、數據管理、應用開發、安全認證等全套服務。設備管理功能包括設備註冊、狀態監控、遠端配置、軟體更新等，使得大規模感測器網絡的管理變得簡單高效。數據管理功能提供數據收集、儲存、處理、分析的完整流程，支持實時流處理和批量數據分析。應用開發功能提供豐富的 API 和開發工具，使得用戶能夠快速開發定製化的聲景監測應用。

邊緣計算在感測器網絡中發揮著越來越重要的作用，它將計算智能下沉到網絡邊緣，在感測器節點進行本地數據處理和分析。這種架構設計有多個優勢：首先，它減少了數據傳輸量，降低了網絡帶寬需求和傳輸成本；其次，它提高了系統的實時響應能力，能夠在本地快速識別和響應異常事件；第三，它增強了系統的可靠性和隱私保護能力，敏感數據可以在本地處理而不需要上傳到雲端。現代感測器通常集成了邊緣計算能力，能夠運行機器學習算法進行聲音分類、異常檢測、特徵提取等任務。

感測器網絡的拓撲結構設計是一個重要的技術問題，需要考慮覆蓋範圍、連接性、可靠性、擴展性等多個因素。星形拓撲結構簡單可靠，適合小規模部署；網狀拓撲結構具有良好的冗餘性和自愈能力，適合大規模部署；層次化拓撲結構結合了兩者的優勢，在實際應用中被廣泛採用。動態路由協議使得網絡能夠自動適應節

點的加入和退出，保持網絡的連通性和效率。一些先進的系統還採用軟體定義網絡(SDN)技術，實現網絡的集中化控制和動態最佳化。

數據品質保證是感測器網絡運行中的關鍵問題。聲學感測器的測量準確性直接影響整個監測系統的可信度，因此需要建立完善的品質保證機制。自動校準功能能夠定期檢查和調整感測器的測量精度，補償因環境變化和設備老化導致的誤差。異常檢測算法能夠識別異常的測量數據，如設備故障、環境干擾、惡意攻擊等。數據融合技術能夠整合多個感測器的測量結果，提高測量的準確性和可靠性。這些品質保證機制確保了感測器網絡能夠提供高品質、可信賴的監測數據。

安全性是感測器網絡設計中必須考慮的重要因素。聲景監測數據可能包含敏感信息，網絡系統可能面臨各種安全威脅，如數據竊取、設備劫持、拒絕服務攻擊等。現代感測器網絡通常採用多層次的安全防護策略，包括設備身份認證、數據加密傳輸、訪問權限控制、安全審計等。硬體安全模組(HSM)提供了硬體級別的安全保護，防止密鑰洩露和設備偽造。區塊鏈技術也開始被應用於物聯網安全，提供去中心化的身份認證和數據完整性保護。

感測器網絡的維護和管理是確保系統長期穩定運行的重要環節。遠端監控功能能夠實時監測每個感測器的工作狀態，包括電池電量、信號強度、數據品質等關鍵指標。預測性維護技術基於歷史數據和機器學習算法，能夠預測設備的故障風險，提前安排維護作業。軟體無線更新(OTA)功能使得感測器的韌體和軟體能夠遠端更新，無需現場操作即可部署新功能和修復程式錯誤。這些智能化的維護管理功能大大降低了系統的運維成本和複雜度。

2.3.2 大數據分析 (Big Data Analytics)

大數據分析技術在智慧聲景監測中發揮著核心作用，它將海量的聲音數據轉化為有價值的洞察和決策支援信息。現代聲景監測系統每天可以產生 TB 級別的原始聲音數據，這些數據包含了豐富的時間、頻率、空間和語義信息，但同時也具有數據量巨大、結構複雜、變化快速、價值密度低等大數據特徵。傳統的數據處理方法無法有效應對如此複雜的數據處理需求，而大數據分析技術提供了分散式計

算、並行處理、流式分析、機器學習等先進技術手段，使得大規模聲景數據的高效處理和深度分析成為可能。這種技術能力不僅提高了聲景分析的效率和準確性，更重要的是為發現聲景中的複雜模式和規律提供了強有力的工具。

聲景大數據的特徵可以用 4V 模型來描述：Volume(數據量)、Variety(數據類型)、Velocity(數據速度)和 Value(數據價值)。在數據量方面，一個城市級的聲景監測網絡每天可能產生數百 GB 到 TB 級的數據，一年的累積數據量可能達到 PB 級別。在數據類型方面，聲景數據不僅包括原始的音頻信號，還包括頻譜特徵、統計參數、環境信息、地理位置、時間標籤等多種結構化和非結構化數據。在數據速度方面，聲景數據以連續的流式方式產生，需要實時或近實時的處理能力。在數據價值方面，雖然原始聲景數據的價值密度相對較低，但通過適當的分析方法可以提取出具有重要應用價值的信息。

分散式儲存系統是聲景大數據分析的基礎設施。Hadoop 分散式文件系統(HDFS)是最廣泛使用的大數據儲存平台，它將大文件分割成多個數據塊，分散儲存在多台服務器上，提供高可靠性、高可用性、高可擴展性的儲存服務。對於聲景數據的特殊需求，一些系統還採用專門的時間序列數據庫，如 InfluxDB、OpenTSDB 等，這些數據庫針對時間序列數據進行了最佳化，能夠高效地儲存和查詢大量的時間標記數據。雲端儲存服務如 Amazon S3、Azure Blob Storage 等也為聲景數據提供了彈性可擴展的儲存解決方案。

分散式計算框架為聲景大數據的並行處理提供了技術支撐。Apache Spark 是目前最流行的大數據處理框架，它提供了內存計算、流式處理、機器學習、圖計算等全面的數據處理能力。對於聲景數據分析，Spark 的優勢在於其能夠在集群中並行處理大量的音頻文件，執行複雜的信號處理和機器學習算法。Spark Streaming 組件專門用於流式數據處理，能夠對連續產生的聲景數據進行實時分析。MLlib 機器學習庫提供了豐富的算法實現，包括分類、聚類、迴歸、降維等，為聲景模式識別和預測分析提供了強有力的工具。

流式數據處理技術對於實時聲景分析至關重要。Apache Kafka 是領先的分散式流處理平台，它能夠處理每秒數百萬條消息，為聲景數據的實時收集和分發提供了

可靠的基礎設施。Apache Storm 和 Apache Flink 是專門的流處理引擎，能夠對連續的數據流進行低延遲、高吞吐量的處理。這些技術使得聲景監測系統能夠實時檢測異常事件、動態更新分析結果、即時觸發警報響應。複雜事件處理(CEP)技術則能夠在數據流中識別複雜的事件模式，如特定的聲音序列、異常的聲級變化等。

機器學習技術是聲景大數據分析的核心驅動力。傳統的機器學習算法如支持向量機(SVM)、隨機森林、K-means 聚類等在聲景分析中仍然發揮著重要作用，特別是在特徵工程和小規模數據分析中。深度學習算法則在處理大規模聲景數據方面展現出巨大優勢，卷積神經網絡(CNN)能夠自動學習聲譜圖的特徵表示，循環神經網絡(RNN)和長短期記憶網絡(LSTM)能夠建模聲景的時間序列特性。預訓練模型和遷移學習技術使得模型能夠利用大規模預訓練數據的知識，在特定的聲景任務中獲得更好的性能。

特徵工程在聲景大數據分析中起著關鍵作用。原始的音頻信號需要轉換為適合機器學習算法處理的特徵向量，這個過程涉及時域特徵提取、頻域特徵提取、時頻特徵提取等多種技術。時域特徵包括均方根值、過零率、峰值因數等；頻域特徵包括頻譜中心、頻譜擴散、頻譜滾降等；時頻特徵則基於短時傅立葉變換、小波變換等方法提取。梅爾頻率倒譜係數(MFCC)是最常用的聲音特徵，它模擬人類聽覺系統的特性，在語音和音樂分析中表現優異。現代深度學習方法則能夠自動學習特徵表示，減少了手工特徵工程的工作量。

無監督學習方法在聲景大數據分析中具有特殊的價值，因為大量的聲景數據往往缺乏標註信息。聚類算法如 K-means、DBSCAN、層次聚類等能夠自動發現聲景數據中的隱藏模式和結構，識別不同類型的聲音環境。主成分分析(PCA)和獨立成分分析(ICA)等降維技術能夠減少數據的維度，去除冗餘信息，提高後續分析的效率。異常檢測算法如隔離森林、一類支持向量機等能夠識別異常的聲音事件，為環境監測和安全預警提供支撐。

時間序列分析技術對於理解聲景的時間動態特性至關重要。傳統的時間序列分析方法如 ARIMA、季節性分解、傅立葉分析等能夠識別聲景數據中的趨勢、週期

性和季節性模式。現代的深度學習方法如 LSTM、GRU、Transformer 等在長序列建模方面表現出色，能夠捕捉聲景數據中的長期依賴關係。時間序列預測技術能夠預測未來的聲景變化，為提前預警和預防性控制提供依據。變點檢測算法能夠識別聲景特性發生顯著變化的時間點，幫助分析環境變化的影響。

空間數據分析技術將地理信息與聲景數據相結合，揭示聲景的空間分布規律。地理信息系統(GIS)提供了空間數據的儲存、管理、分析和視覺化功能。空間插值方法如克里金插值、反距離加權等能夠基於有限的監測點數據估算整個區域的聲景分布。空間聚類算法如基於密度的空間聚類(DBSCAN)能夠識別聲景的空間聚集模式。地理加權迴歸(GWR)等方法能夠分析聲景與地理環境因素之間的空間關係。這些技術為城市聲景規劃和管理提供了重要的決策支撐。

數據可視化技術是大數據分析結果呈現和溝通的重要手段。傳統的統計圖表如折線圖、柱狀圖、散點圖等仍然是數據可視化的基礎工具。針對聲景數據的特殊性，還開發了專門的可視化方法，如聲譜圖視覺化、聲景地圖、時空立體圖等。互動式視覺化技術使得用戶能夠動態探索數據，調整參數，獲得更深入的洞察。Web 技術和移動技術的發展使得數據可視化能夠跨平台、跨設備地提供服務。虛擬現實和增強現實技術為聲景數據的沉浸式可視化提供了新的可能性。

數據品質管理是大數據分析中的關鍵環節。聲景數據在收集、傳輸、儲存過程中可能出現各種品質問題，如數據缺失、格式錯誤、重複記錄、異常值等。數據清洗技術能夠識別和修正這些品質問題，包括缺失值填補、異常值檢測、重複數據去除、格式標準化等。數據驗證技術能夠檢查數據的完整性、一致性、準確性。數據歷程管理技術能夠追蹤數據的來源和處理過程，確保數據的可追溯性。這些品質管理措施確保了分析結果的可靠性和可信度。

2.3.3 AI 聲紋辨識 (AI-Based Sound Recognition)

AI 聲紋辨識技術代表了聲景分析領域的最前沿發展方向，它利用人工智慧算法自動識別、分類和理解聲音信號中的複雜模式和特徵。這項技術不僅能夠區分不同類型的聲音源，如交通噪音、人類語音、動物鳴叫、機械設備聲音等，還能夠

進一步識別具體的聲音事件、情感內容和環境情境。AI 聲紋辨識的核心優勢在於其能夠處理大量非結構化的聲音數據，自動提取有用的特徵信息，並在複雜的聲音環境中實現準確的識別和分類。這種能力使得大規模聲景監測和自動化聲景分析成為可能，為聲景研究和管理帶來了革命性的變化。

深度學習技術是現代 AI 聲紋辨識的技術基石。與傳統的機器學習方法相比，深度學習能夠自動學習聲音的多層次特徵表示，從低級的頻譜特徵到高級的語義特徵，無需人工設計複雜的特徵提取算法。卷積神經網絡(CNN)特別適合處理聲譜圖等二維聲音表示，能夠捕捉局部的頻譜模式和全局的結構特征。循環神經網絡(RNN)和長短期記憶網絡(LSTM)則專門用於處理時間序列數據，能夠建模聲音的時間動態特性。注意力機制(Attention Mechanism)和 Transformer 架構在語音處理中表現出色，能夠捕捉聲音序列中的長距離依賴關係。

Huzaifah(2017)的研究比較了不同時頻表示方法在環境聲音分類中的性能，發現短時傅立葉變換(STFT)、快速小波變換(FWT)和梅爾頻率倒譜係數(MFCC)等不同的特徵表示方法在動物聲音、自然聲景和水聲等不同類型的環境聲音分類中具有不同的優勢[5]。這項研究為 AI 聲紋辨識中的特徵選擇和預處理提供了重要的方法學指導，強調了針對不同類型聲音選擇合適特徵表示的重要性。

預訓練模型和遷移學習技術在 AI 聲紋辨識中發揮著重要作用。大規模的預訓練模型如 PANNs(Pre-trained Audio Neural Networks)、AudioSet、VGGish 等在大規模音頻數據集上進行訓練，學習到了通用的聲音特徵表示。這些預訓練模型可以作為特徵提取器或者初始化模型，在特定的聲景識別任務中進行微調，大大減少了訓練數據的需求和訓練時間。遷移學習技術使得在一個領域訓練的模型能夠適應到另一個相關領域，例如，在語音識別中訓練的模型可以遷移到環境聲音識別中。

多模態學習技術將聲音信息與其他模態的信息相結合，提高識別的準確性和魯棒性。在聲景分析中，聲音信息可以與視覺信息、地理信息、時間信息、氣象信息等進行融合。例如，結合攝影機拍攝的視覺信息可以幫助識別聲音的來源，結合地理位置信息可以利用空間上下文來改善識別效果，結合時間信息可以利用聲景

的時間規律性。多模態融合的方法包括早期融合、晚期融合和混合融合等，每種方法都有其適用的場景和優勢。

少樣本學習(Few-shot Learning)和零樣本學習(Zero-shot Learning)技術解決了 AI 聲紋辨識中訓練數據不足的問題。在實際應用中，很多聲音類別可能只有很少的標註樣本，甚至沒有標註樣本。少樣本學習技術能夠在只有少量樣本的情況下快速學習新的聲音類別，通常採用元學習(Meta-learning)或原型網絡(Prototypical Networks)等方法。零樣本學習則能夠識別訓練時從未見過的聲音類別，通常通過語義嵌入或屬性學習來實現。這些技術大大擴展了 AI 聲紋辨識系統的適用範圍和實用性。

對抗學習和域適應技術提高了 AI 聲紋辨識系統的魯棒性和泛化能力。在實際應用中，聲音信號可能受到各種噪音和干擾的影響，訓練數據和測試數據之間可能存在分布差異。對抗訓練通過在訓練過程中加入對抗樣本來提高模型的魯棒性，使其能夠抵抗噪音和攻擊。域適應技術則解決了不同環境、不同設備、不同條件下的聲音識別問題，使得在一個環境中訓練的模型能夠適應到另一個環境中。

實時處理能力是 AI 聲紋辨識在實際應用中的重要要求。Weitbrecht 等人(2023)開發的基於低成本聲音監測系統和人工智慧的休閒噪音評估方法，採用機器學習技術進行城市聲源識別，在噪音監測感測器中集成了聲源識別功能[6]。這種系統需要在資源有限的嵌入式設備上實現實時的聲音識別，這對算法的效率和複雜度提出了很高的要求。模型壓縮技術如知識蒸餾、網絡剪枝、量化等被廣泛應用於減少模型的計算複雜度和記憶體需求。

主動學習技術通過智能選擇最有價值的樣本進行標註，提高了 AI 聲紋辨識系統的學習效率。在聲景監測中，產生大量的聲音數據，但人工標註成本很高。主動學習算法能夠自動識別最具信息量的樣本，優先安排這些樣本進行人工標註，從而用更少的標註工作達到更好的識別效果。不確定性採樣、查詢委員會、期望模型變化等是常用的主動學習策略。

聯邦學習技術在保護隱私的同時實現分散式的 AI 聲紋辨識模型訓練。在聲景監

測應用中，不同地區或組織的聲音數據可能包含敏感信息，不適合直接共享。聯邦學習允許各方在不共享原始數據的情況下共同訓練模型，每個參與方在本地訓練模型，只共享模型參數的更新信息。這種方法既保護了數據隱私，又能夠利用分散式數據的集體智慧。

解釋性 AI 技術提高了 AI 聲紋辨識系統的可解釋性和可信度。深度學習模型通常被認為是"黑盒子"，其決策過程難以理解和解釋。在聲景分析中，了解模型為什麼做出某種識別決策對於系統的可信度和實用性至關重要。注意力視覺化、梯度加權類激活映射 (Grad-CAM) 、 LIME(Local Interpretable Model-agnostic Explanations)等技術能夠揭示模型的決策依據，幫助用戶理解和信任 AI 系統的判斷。

持續學習技術使 AI 聲紋辨識系統能夠不斷適應新的聲音類別和環境變化。在實際應用中，聲音環境可能不斷變化，新的聲音類別可能不斷出現，系統需要能夠持續學習和適應這些變化。災難性遺忘是持續學習中的主要挑戰，即學習新任務時會忘記舊任務的知識。彈性權重固化(EWC)、漸進神經網絡、記憶回放等技術被開發來解決這個問題。

評估指標和基準數據集對於 AI 聲紋辨識技術的發展至關重要。常用的評估指標包括準確率、精確率、召回率、F1 分數、混淆矩陣等。對於不平衡數據集，還需要考慮加權平均、宏平均、微平均等不同的計算方式。基準數據集如 ESC-50、UrbanSound8K、AudioSet 等為不同算法的比較提供了標準平台。這些數據集包含了多種類型的環境聲音，涵蓋了不同的錄音條件和聲音品質，為算法的全面評估提供了基礎。

2.4 聲學測量標準與品質控制 (Acoustic Measurement Standards and Quality Control)

聲學測量標準與品質控制是確保聲景評估結果科學性、可靠性和可比性的基礎保障體系。在聲景研究和應用中，測量數據的準確性直接影響到研究結論的有效性和政策決策的合理性，因此建立完善的標準體系和品質控制機制具有至關重要的

意義。現代聲學測量標準體系涵蓋了從儀器設備、測量方法、數據處理到結果報告的完整流程，這些標準不僅規範了技術操作程序，更重要的是為全球範圍內的聲景研究提供了統一的技術平台和比較基礎。品質控制則通過系統性的驗證、校準、監督和改進措施，確保測量過程的每個環節都符合既定的技術要求和品質標準。

國際標準化組織(ISO)在聲學測量標準制定中發揮著主導作用，其制定的標準被世界各國廣泛採用。ISO 12913 系列標準專門針對聲景測量和評估，提供了從概念定義到實施方法的完整框架。國際電工委員會(IEC)則主要負責聲學測量儀器的技術標準，如 IEC 61672 系列標準規定了聲級計的技術要求和測試方法。這些國際標準的制定過程通常涉及多國專家的深入討論和技術驗證，確保標準的科學性和國際適用性。同時，各國也根據自身的技術水平和應用需求制定相應的國家標準，這些標準既要與國際標準保持一致，又要適應本國的具體情況。

測量不確定度評估是現代聲學測量品質控制的核心概念，它量化了測量結果的可信度範圍。根據國際標準 ISO/IEC Guide 98-3 的要求，測量不確定度的評估需要識別所有可能的不確定度來源，包括儀器精度、環境條件、操作方法、數據處理等各個方面的影響因素。A 類不確定度通過統計分析方法評估，基於重複測量數據的標準差；B 類不確定度則通過其他方法評估，如儀器規格、校準證書、經驗判斷等。合成不確定度將各種不確定度來源按照不確定度傳播定律進行組合，擴展不確定度則在合成不確定度基礎上乘以覆蓋因子，通常設定為 95%的置信水平。

現代聲學測量品質保證體系採用了全面品質管理(TQM)的理念，將品質控制貫穿於測量活動的全過程。測量前的準備階段需要進行設備檢查、校準驗證、環境評估、人員培訓等工作；測量實施階段需要嚴格按照標準操作程序進行，記錄關鍵參數和環境條件；測量後的數據處理階段需要進行數據驗證、異常檢測、不確定度評估等工作。品質控制圖、統計過程控制(SPC)、6σ 管理等現代品質管理工具也被引入聲學測量領域，提高了品質控制的科學性和有效性。

2.4.1 國際標準與規範 (International Standards and Specifications)

國際標準與規範構成了全球聲學測量活動的技術基礎和法律框架，它們不僅規範了測量方法和技術要求，更重要的是為不同國家、不同機構之間的數據交換和技術合作提供了共同語言。國際標準的制定是一個複雜的技術和政治過程，需要平衡不同國家的技術水平、經濟利益和文化差異，同時確保標準的科學性、先進性和可操作性。在聲景測量領域，國際標準的發展經歷了從噪音控制導向到人文關懷導向的重要轉變，這種轉變不僅體現在技術內容上，更體現在標準制定的理念和方法上。

ISO 12913 系列標準是聲景測量領域最重要的國際標準，它標誌著聲景研究從學術概念向實用標準的重要轉變。ISO 12913-1:2014《聲學—聲景—第 1 部分：定義和概念框架》首次在國際標準中明確定義了聲景概念，將聲景定義為"在情境中由人們感知到的聲學環境"。這個定義強調了三個關鍵要素：聲學環境的客觀存在、人們的主觀感知以及特定情境的影響。該標準還建立了聲景的概念框架，包括聲景的組成要素(聲音源、聲學環境、聽者、情境)、聲景屬性(聲學舒適度、適當性等)以及影響因素的分類體系。

ISO 12913-2:2018《聲學—聲景—第 2 部分：數據收集和報告要求》提供了聲景研究中數據收集的技術規範和操作指南。該標準詳細規定了聲景調查的設計原則、問卷編制要求、測量條件設定、數據記錄格式以及品質控制措施。Aletta 和 Torresin(2023)在ISO/TS 12913-2:2018數據收集協議採用情況的文獻回顧中發現，該標準的實施促進了聲景研究方法的標準化，但同時也指出了在實際應用中需要考慮的複雜性因素[3]。標準要求測量條件應儘可能接近人類聽覺感受，推薦使用雙耳聲學測量方法，並強調了同步記錄客觀聲學參數和主觀評估數據的重要性。

ISO 12913-3:2019《聲學—聲景—第 3 部分：數據分析》為聲景研究中的數據分析提供了技術指導和方法框架。該標準涵蓋了描述性統計分析、相關性分析、回歸建模、聚類分析等多種統計方法的應用，並特別強調了主觀評估數據與客觀測量數據之間關聯分析的重要性。標準還提供了數據可視化的建議，包括散點圖、相關圖、聲景地圖等表示方法，以及結果報告的格式要求。該標準的制定為聲景研究結果的科學性和可比性提供了重要保障。

IEC 61672 系列標準是聲學測量儀器領域的核心標準，規定了聲級計的技術要求、測試方法和性能指標。IEC 61672-1 規定了聲級計的基本要求，包括電聲性能、環境適應性、穩定性等技術指標，並將聲級計分為 Class 1 和 Class 2 兩個等級，Class 1 級儀器具有更高的測量精度，適用於精密測量和法定測量；Class 2 級儀器則適用於一般測量應用。IEC 61672-2 規定了聲級計的型式評價程序，確保產品設計符合標準要求；IEC 61672-3 規定了週期測試程序，確保儀器在使用過程中保持規定的性能。

ISO 1996 系列標準專門針對環境噪音的描述、測量和評估，雖然主要關注噪音問題，但其技術方法和測量規範對聲景測量具有重要參考價值。ISO 1996-1 定義了環境噪音的基本量和評估程序；ISO 1996-2 規定了環境噪音的測量方法，包括測點選擇、測量時間、氣象條件、測量設備等技術要求。該標準特別強調了對音調性噪音和脈衝性噪音的特殊處理方法，這些方法在聲景特殊聲音事件的分析中同樣適用。

Frederiksen(2013)在聲學計量學綜述中詳細描述了麥克風校準方法的原理和不確定度特性，指出現代聲學測量中存在多種不同的校準和測試方法，每種方法都有其特定的應用範圍和不確定度特徵[7]。國際標準 IEC 61094 系列專門規範測量麥克風的技術要求和校準方法，包括自由場響應、壓力響應、擴散場響應等不同響應類型的定義和測試方法。這些標準為聲景測量中使用的麥克風提供了技術規範和校準依據。

區域性和國家標準在國際標準基礎上進一步細化了技術要求和實施細節。歐洲標準化委員會(CEN)制定的 EN 標準系列在歐盟範圍內具有法律效力，這些標準通常直接採用 ISO 標準的技術內容，但增加了符合歐盟法律框架的要求。美國國家標準學會(ANSI)制定的 ANSI 標準則反映了美國的技術水平和應用需求。各國的國家標準通常會考慮本國的氣候條件、建築特點、文化背景等因素，在國際標準基礎上進行適當調整。

標準的一致性和互認是國際貿易和技術合作的重要基礎。世界貿易組織(WTO)的

技術貿易壁壘協定(TBT)要求各國在制定技術標準時應遵循國際標準，避免形成不必要的貿易壁壘。國際實驗室認可合作組織(ILAC)和國際認可論壇(IAF)建立了全球範圍內的互認體系，使得按照國際標準進行的測試和校準結果能夠在不同國家之間相互承認。這種互認機制對於聲景測量結果的國際比較和交流具有重要意義。

標準的持續更新和完善是確保標準技術先進性的重要機制。國際標準通常每 5 年進行一次系統性審查，根據技術發展和應用需求決定是否需要修訂或更新。標準修訂過程中會充分考慮用戶反饋、技術進步、科學發現等因素。例如，隨著數位技術的發展，許多聲學標準都增加了數位信號處理、數據傳輸、軟體驗證等新的技術內容。新興技術如人工智慧、物聯網、大數據等也逐漸被納入標準的考慮範圍。

標準化活動的國際協調通過多個層面的合作機制實現。ISO 和 IEC 之間建立了緊密的協調機制，避免標準之間的重複和衝突。ISO/IEC 聯合技術委員會(JTC)負責處理涉及兩個組織共同關注領域的標準制定工作。區域標準化組織如 CEN、CENELEC 與國際組織保持密切聯繫，確保區域標準與國際標準的一致性。這種多層次的協調機制為全球標準體系的統一性和協調性提供了保障。

2.4.2 設備校準與驗證 (Equipment Calibration and Validation)

設備校準與驗證是聲學測量品質保證體系的核心組成部分，它們確保測量儀器在整個使用週期內都能提供準確、可靠的測量結果。校準是指在規定條件下，建立測量儀器指示值與標準量值之間關係的一組操作，其目的是確定測量儀器的計量特性並確保量值的溯源性。驗證則是通過客觀證據來確認測量儀器是否滿足規定要求的過程，包括性能驗證、功能驗證和合規性驗證等多個方面。在聲景測量中，由於涉及複雜的聲學現象和精密的電子設備，校準和驗證工作顯得格外重要和複雜。

聲學校準的基礎是建立完整的量值傳遞鏈，從國際基準到工作標準，再到現場使用的測量儀器。聲壓的國際基準基於聲壓的定義，通過互易校準法或其他絕對測

量方法實現。國家計量院通常維護聲壓的國家基準，並通過標準傳遞將量值傳遞給次級標準和工作標準。聲級計的校準通常使用聲校準器進行，這些校準器能夠產生已知聲壓級的穩定正弦信號。根據 IEC 60942 標準，聲校準器分為 Class 1 和 Class 2 兩個等級，Class 1 級校準器的不確定度通常在±0.3 dB 以內，適用於精密測量儀器的校準。

麥克風作為聲學測量鏈的第一環節，其校準精度直接影響整個測量系統的準確性。麥克風校準主要有三種方法：自由場校準、壓力場校準和擴散場校準。自由場校準模擬麥克風在自由聲場中的響應，適用於大多數環境測量應用；壓力場校準測量麥克風在等壓場中的響應，適用於耦合器測量和近場測量；擴散場校準則測量麥克風在擴散聲場中的響應，適用於混響室測量。每種校準方法都有其特定的測量不確定度和適用範圍，需要根據具體的測量應用選擇合適的校準方法。

Struck(2017)在測量不確定度及其在聲學標準中的應用研究中強調，測量不確定度對於發展穩健的測試方法和品質控制品質保證程序具有重要意義[8]。在聲學校準中，不確定度評估需要考慮多種因素的影響，包括標準器的不確定度、環境條件的變化、校準方法的限制、操作人員的技能等。溫度、濕度、氣壓等環境條件的變化會影響聲音的傳播特性，進而影響校準結果的準確性。因此，精密校準通常需要在環境控制的實驗室中進行，並對環境條件進行實時監測和修正。

現場校準是聲學測量中的重要環節，它驗證測量系統在實際使用環境中的性能。與實驗室校準不同，現場校準需要在不受控制的環境條件下進行，面臨更多的挑戰和限制。攜帶式聲校準器是現場校準的主要工具，它們體積小巧、操作簡便，能夠在各種環境條件下提供穩定的校準信號。然而，現場校準的不確定度通常比實驗室校準要大，需要採用適當的方法來控制和評估這些額外的不確定度來源。

數位信號處理技術在現代聲學測量設備中的廣泛應用，為校準和驗證工作帶來了新的挑戰和機遇。數位測量系統的校準不僅需要考慮類比電路的特性，還需要驗證 A/D 轉換、數位濾波、FFT 處理等數位處理環節的正確性。軟體驗證成為數位測量系統驗證的重要組成部分，需要使用標準測試信號來驗證各種處理算法的正確性和精度。一些先進的測量系統還集成了自校準功能，能夠定期進行內部校準

檢查，提高系統的長期穩定性。

Wszołek 和 Engel(2004)在應用於噪音控制的聲學測量儀器不確定度研究中討論了在聲學實驗室中滿足標準要求的各種技術問題[2]。他們的研究涵蓋了從一級校準實驗室的聲學要求到實際測量中的不確定度評估等多個技術層面。研究結果表明，建立完善的校準體系不僅需要先進的技術設備，還需要嚴格的操作程序和持續的品質監控。

自動化校準系統在大規模聲學測量網絡中發揮著重要作用。這些系統能夠自動執行校準程序、記錄校準數據、分析校準結果，大大減少了人工操作的工作量和誤差。自動化系統通常集成了多種校準功能，包括靈敏度校準、頻率響應校準、線性度校準等。遠端校準技術使得分散部署的測量設備能夠接受集中化的校準管理，提高了大規模監測網絡的維護效率。

校準記錄和數據管理是校準體系的重要組成部分。完整的校準記錄不僅記錄校準結果，還記錄校準條件、使用的標準器、操作人員、環境條件等詳細信息。這些記錄為測量結果的溯源性提供了依據，也為設備性能的長期趨勢分析提供了數據基礎。現代校準管理系統通常採用數據庫技術來組織和管理校準數據，支持多維度的查詢和分析功能。數據的長期保存和備份也是重要的技術要求，確保歷史校準數據的完整性和可用性。

校準間隔的確定是校準管理中的重要決策問題。校準間隔太長可能導致設備性能漂移而未被及時發現，影響測量結果的準確性；校準間隔太短則會增加校準成本和設備停機時間。校準間隔的確定需要綜合考慮設備的穩定性、使用強度、環境條件、精度要求等多種因素。一些先進的校準管理系統採用基於風險的校準策略，根據設備的歷史校準數據和使用情況動態調整校準間隔，實現校準資源的最佳化配置。

國際比對是驗證校準體系有效性的重要手段。通過參與國際或區域性的比對活動，校準實驗室能夠驗證其測量能力和技術水平。Petošić 等人(2018)在環境噪音和建築聲學測量不確定度的實驗室間比對經驗研究中指出，實驗室間比對(ILC)的主

要動機是各實驗室的品質控制，但同時也能夠檢驗多個測量位置間標準差的測試效果[6]。這種比對活動不僅有助於發現和解決技術問題，還促進了測量技術的國際交流和合作。

2.4.3 測量不確定度評估 (Measurement Uncertainty Assessment)

測量不確定度評估是現代聲學測量品質保證體系的核心技術，它提供了測量結果可信度的定量描述，是科學測量與工程測量的重要區別標誌。在聲景測量中，由於涉及複雜的物理現象、精密的測量設備、變化的環境條件以及主觀的感知評估，不確定度的來源多樣化且相互關聯，使得不確定度評估成為一項極具挑戰性的技術任務。準確的不確定度評估不僅能夠提升測量結果的科學價值，還能為決策制定提供風險評估的重要依據，特別是在法規標準的執行和爭議解決中發揮關鍵作用。

測量不確定度的概念基於統計學理論，它反映了測量結果的分散性和可能的誤差範圍。根據國際標準 ISO/IEC Guide 98-3(GUM)的定義，測量不確定度是與測量結果相關聯的參數，它表徵了被測量值的分散性。這種分散性可能來源於測量過程中的各種因素，包括儀器精度限制、環境條件變化、操作方法差異、樣品不均勻性等。在聲學測量中，聲音的時變性和空間分布的複雜性使得不確定度評估變得更加複雜，需要同時考慮時間不確定度和空間不確定度的影響。

A 類不確定度評估基於統計分析方法，通過重複測量來估算隨機不確定度的大小。在聲景測量中，A 類不確定度的評估需要考慮聲音信號的時變特性和統計特徵。對於連續變化的聲景信號，需要選擇適當的採樣週期和統計時間窗，確保統計結果的代表性。測量次數的確定是 A 類不確定度評估中的重要問題，測量次數太少可能導致統計結果不可靠，測量次數太多則會增加測量成本和時間。統計學中的 t 分布被廣泛用於小樣本情況下的不確定度評估，當自由度足夠大時可以近似為正態分布。

B 類不確定度評估基於其他方法獲得的信息，包括製造商提供的技術規格、校準證書、經驗數據、理論分析等。在聲學測量中，B 類不確定度的主要來源包括儀

器的系統誤差、校準不確定度、環境條件影響、安裝位置偏差等。每個不確定度來源都需要分析其概率分布類型，常見的分布類型包括正態分布、矩形分布、三角分布等。正態分布通常用於已知標準差的情況，矩形分布用於只知道變化範圍的情況，三角分布則用於最可能值在範圍中央的情況。

合成不確定度的計算遵循不確定度傳播定律，將各個不確定度分量按照其相關性進行合成。當各不確定度分量相互獨立時，合成不確定度等於各分量的方差和的平方根。然而，在實際測量中，不同不確定度分量之間可能存在相關性，需要考慮相關係數的影響。例如，溫度和濕度對聲音傳播的影響可能存在相關性，在不確定度合成時需要考慮這種相關性。蒙特卡羅方法被廣泛用於複雜不確定度傳播的數值計算，特別是在非線性測量模型或複雜相關關係的情況下。

擴展不確定度通過在合成不確定度基礎上乘以覆蓋因子來獲得，它定義了包含被測量真值的區間範圍。覆蓋因子的選擇取決於所要求的置信水平，對於 95%的置信水平，覆蓋因子通常取 2；對於 99%的置信水平，覆蓋因子約為 2.6。在聲學測量的法規應用中，置信水平的選擇需要考慮法律風險和經濟後果，通常採用 95%或 99%的置信水平。擴展不確定度的報告格式也有嚴格的要求，需要明確說明置信水平、覆蓋因子和不確定度的計算方法。

環境條件對聲學測量不確定度的影響不可忽視。溫度變化會影響聲音的傳播速度和麥克風的靈敏度，濕度變化會影響聲音的吸收特性，氣壓變化會影響空氣密度和聲阻抗。風向和風速對戶外聲學測量的影響特別顯著，不僅會改變聲音的傳播路徑，還會產生風噪聲干擾。在不確定度評估中，需要對這些環境因素的影響進行定量分析，通常採用敏感性分析的方法來評估各環境因素對測量結果的影響程度。

Keprt 和 Benes(2009)在聲發射感測器校準不確定度的確定研究中提出了互易校準方法的不確定度評估流程[4]。他們的研究表明，即使是相對簡單的校準過程，其不確定度評估也需要考慮多個技術環節的影響，包括標準器的不確定度、測量方法的限制、環境條件的變化等。這種系統性的不確定度分析方法為複雜的聲景測量不確定度評估提供了重要的方法學參考。

時間變異性是聲景測量不確定度評估中的特殊問題。與靜態物理量的測量不同，聲景具有明顯的時間變化特徵，包括短期波動、日變化、季節變化等多個時間尺度的變異。這種時間變異性既是測量目標的重要特徵，也是不確定度的重要來源。在不確定度評估中，需要區分由於時間變異性導致的測量分散性和由於測量系統誤差導致的測量不確定度。長期監測數據的分析可以幫助分離這兩種不同性質的變異性。

空間代表性是戶外聲景測量不確定度評估中的另一個重要考慮因素。測量點的選擇和安裝會影響測量結果的空間代表性，特別是在複雜的城市環境中，聲場的空間分布可能很不均勻。測量點與實際關注區域之間的差異會帶來額外的不確定度，這種不確定度通常難以通過重複測量來評估，需要採用空間分析和模擬計算的方法。多點測量和空間插值技術可以幫助評估空間不確定度的大小。

數位信號處理過程中的不確定度評估是現代聲學測量面臨的新挑戰。A/D 轉換、數位濾波、FFT 變換、統計計算等數位處理環節都可能引入額外的不確定度。量化誤差、截斷誤差、舍入誤差等數值計算誤差需要在不確定度評估中予以考慮。浮點運算的精度限制在處理大量數據時可能會累積成為顯著的誤差源。軟體驗證和算法驗證成為確保數位處理準確性的重要手段。

不確定度預算是系統性管理測量不確定度的重要工具。它將測量過程中的各個不確定度來源進行分類列表，分析每個來源對總不確定度的貢獻程度，為不確定度的控制和改進提供依據。在聲景測量中，不確定度預算通常包括儀器不確定度、校準不確定度、環境不確定度、操作不確定度等主要類別。通過不確定度預算分析，可以識別出對總不確定度貢獻最大的因素，有針對性地進行改進。

測量不確定度的應用涉及合格性評定、比較分析、風險評估等多個方面。在合格性評定中，需要考慮測量不確定度對判定結果的影響，特別是當測量結果接近限值時。國際標準 ISO 14253-1 提供了考慮測量不確定度的合格性評定指南。在比較分析中，只有當兩個測量結果的差異大於其合成不確定度時，才能認為存在統計顯著性的差異。在風險評估中，測量不確定度為定量評估決策風險提供了基礎。

參考文獻

[1] Deng, Z., Kang, J., Wang, D., Liu, A., & Kang, J. Z. (2015). Linear multivariate evaluation models for spatial perception of soundscape. Journal of the Acoustical Society of America , 138(5), 2860-2876.

[2] Engel, M. S., Fiebig, A., Pfaffenbach, C., & Fels, J. (2021). A review of the use of psychoacoustic indicators on soundscape studies. Current Pollution Reports , 7(3), 359-378.

[3] Aletta, F., & Torresin, S. (2023). Adoption of ISO/TS 12913-2: 2018 protocols for data collection from individuals in soundscape studies: An overview of the literature. Current Pollution Reports , 9(4), 567-582.

[4] Marques, G., & Pitarma, R. (2020). A real-time noise monitoring system based on internet of things for enhanced acoustic comfort and occupational health. IEEE Access , 8, 139741-139755.

[5] Starowicz, A., & Zieliński, M. (2024). Sustainable acoustics: the impact of AI on acoustics design and noise management. Technical Sciences , 27, 125-142.

[6] Fuller, S., Axel, A. C., Tucker, D., & Gage, S. H. (2015). Connecting soundscape to landscape: Which acoustic index best describes landscape configuration? Ecological Indicators , 58, 207-215.

[7] Frederiksen, E. (2013). Acoustic metrology–an overview of calibration methods and their uncertainties. International Journal of Metrology and Quality Engineering , 4(2), 97-106.

[8] Struck, C. J. (2017). Measurement uncertainty and its application to acoustical standards. Proceedings of Meetings on Acoustics , 31(1), 032001.

[9] Wszołek, G., & Engel, Z. (2004). Investigations of uncertainty of acoustical measuring instruments applied to noise control. Archives of Acoustics , 29(4), 505-514.

[10] Keprt, J., & Benes, P. (2009). The determination of uncertainty in the calibration of acoustic emission sensors. International Journal of Microstructure and Materials Properties , 4(1), 45-58.

[11] Petošić, A., Franček, P., Štrbac, M., Zatko, P., & Vorlander, M. (2018). Measurement uncertainty in the field of environmental noise and building acoustic measurements: experience from interlaboratory comparisons. Alps Adria Acoustics Association Conference Proceedings , 18, 1-8.

[12] Podgórski, A. (2016). Accredited Calibration Laboratory for Sound Measurements. Measurement Automation Monitoring , 62(4), 125-128.

[13] Herfkens, P. (2024). Edge AI for Urban Noise Monitoring: Perceptual Soundscape Prediction on Low-Cost Sensors. TU Delft Repository .

[14] Poudel, O., & Assaad, R. H. (2025). A Real-Time Intelligent Acoustic IoT-Enabled Embedded Construction Site Monitoring and Alert System: Integrating Deep Learning–Based Machine-Listening Algorithms, Edge Computing, and Cloud Computing. Journal of Construction Engineering and Management , 151(2), 04024194.

[15] Weitbrecht, P., Monteiro, C., Jardim, C., & Silva, L. T. (2023). Evaluation of leisure noise in urban environments: an approach based on low-cost sound monitoring systems and artificial intelligence. Acústica e Vibrações , 55, 45-58.

[16] Huzaifah, M. (2017). Comparison of time-frequency representations for environmental sound classification using convolutional neural networks. arXiv preprint arXiv:1706.07156 .

[17] Kvalnes, H. S., & Lysø, M. S. (2020). Comparison of wavelet transforms and STFTs in classification of outdoor noise. NTNU Repository .

[18] Egodawele, K., & Ranasinghe, R. (2023). Interpretation of Music Signals Using Time-Frequency Analysis. 2023 International Research Conference of Sri Lanka Technology Campus , 180-185.

[19] Wilford, D. C., Miksis-Olds, J. L., Martin, S. B., Howard, D. R., Lowell, K., Lyons, A. P., & Smith, M. J. (2021). Quantitative soundscape analysis to understand multidimensional features. Frontiers in Marine Science , 8, 672336.

[20] Chew, Y. R., & Wu, B. S. (2016). A soundscape approach to analyze traffic noise in the city of Taipei, Taiwan. Computers, Environment and Urban Systems , 59, 78-85.

[21] Leiba, R., Marchiano, R., Misdariis, N., Lebarbé, T., & Susini, P. (2016). Urban acoustic imaging: from measurement to the soundscape perception evaluation. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 253(2), 6234-6245.

[22] Herranz-Pascual, K., García, I., Aspuru, I., Díez, I., & Santander, A. (2016). Progress in the understanding of soundscape: objective variables and objectifiable criteria that predict acoustic comfort in urban places. Noise Mapping , 3(1), 247-263.

[23] Kang, J., Aletta, F., Oberman, T., Erfanian, M., Kachlicka, M., Lionello, M., & Mitchell, A. (2019). Towards soundscape indices. 23rd International Congress on

Acoustics , 2823-2830.

[24] Rajan, S. C., Athira, K., Jaishanker, R., Sooraj, N. P., & Sanil, G. (2019). Rapid assessment of biodiversity using acoustic indices. Biodiversity and Conservation , 28(8), 2371-2383.

[25] Alcocer, I., Lima, H., Sugai, L. S. M., & Llusia, D. (2022). Acoustic indices as proxies for biodiversity: a meta-analysis. Biological Reviews , 97(6), 2209-2236.

[26] Kotian, M., Biniwale, S., Mourya, P., & Krishnan, A. (2024). Measuring biodiversity with sound: How effective are acoustic indices for quantifying biodiversity in a tropical dry forest? Conservation Science and Practice , 6(7), e13133.

[27] Rimskaya-Korsakova, L. K., Kanev, N. G., Komkin, A. I., & Bykov, A. A. (2024). Soundscapes in the urban environment: audiovisual perception and objective control. Acoustical Physics , 70(2), 322-333.

[28] Algargoosh, A., Astrom, H., & Yu, J. (2024). Psychoacoustic metrics and affective responses in indoor soundscapes: Implications for restorative soundscapes. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 270(6), 2945-2956.

[29] Papadakis, N. M., Aletta, F., & Stavroulakis, G. E. (2025). Interrelationships between soundscape attributes and sound categories. Journal of the Acoustical Society of America , 158(2), 878-890.

[30] Kurukose Cal, H., Aletta, F., & Kang, J. (2025). Integration of soundscape assessment and design principles into international standards and guidelines for learning environment acoustics. Building Acoustics , 32(1), 45-67.

第三章 聲景設計與城市規劃
Soundscape Design and Urban Planning

聲景設計與城市規劃的整合代表著當代城市發展的一個重要轉向，從傳統的噪音控制導向轉向更全面的聲音環境品質管理。這種轉變不僅反映了我們對城市環境認知的深化，更體現了對人類福祉與環境品質關係的重新理解。聲景設計作為一門跨學科的專業領域，結合了聲學工程、環境心理學、都市規劃學、景觀建築學以及生態學等多重知識體系，旨在創造既滿足功能需求又能提升生活品質的城市聲音環境。

根據國際標準化組織（ISO）發布的 ISO 12913-1:2014 標準，聲景被定義為「人們在特定情境下所感知、體驗和理解的聲學環境」[1]。這個定義強調了聲景的主觀性和情境依賴性，突破了傳統噪音管理僅關注分貝數值的限制，轉而關注人們對聲音環境的整體感受和理解。這種認知轉變為城市規劃帶來了全新的視角，使規劃師和設計師能夠更深入地思考如何透過聲音環境的營造來提升城市空間的品質和居民的生活體驗。

在當代城市化進程中，聲景設計的重要性日益凸顯。聯合國環境規劃署在 2022 年發布的報告指出，城市噪音污染已成為繼空氣污染之後的第二大環境威脅，影響著全球超過 10 億人的健康和福祉[2]。然而，傳統的噪音管理方法往往局限於被動的防護措施，如隔音牆的設置或噪音源的限制，這些方法雖然能在一定程度上降低噪音水平，但難以創造積極正面的聲音體驗。聲景設計的出現為這一挑戰提供了新的解決方案，它不僅關注如何減少不受歡迎的聲音，更重要的是如何增加和保護那些能夠提升環境品質的聲音。

世界衛生組織（WHO）在 2018 年發布的《歐洲地區環境噪音指導原則》中明確指出，良好的聲音環境對人類健康具有重要意義，不僅能減少噪音相關的健康問題，還能促進心理健康和社會凝聚力[3]。這份指導原則的發布標誌著國際社會對聲音環境管理認知的重大轉變，從單純的噪音控制轉向全面的聲音環境品質提升。在這一背景下，聲景設計成為城市規劃中不可或缺的重要組成部分，它不僅要解決既有的噪音問題，更要主動創造能夠支持人類健康和福祉的聲音環境。

聲景設計在城市規劃中的應用涉及多個層面的考量。在宏觀層面，它需要整合城市的整體發展策略，考慮不同功能區域的聲音特徵和相互影響；在中觀層面，它關注特定社區或街區的聲音環境營造，包括公共空間的聲景設計和私人空間的聲音防護；在微觀層面，它細化到具體建築物和景觀元素的聲學設計，追求功能性與美學的完美結合。這種多層次的整合方法確保了聲景設計能夠在城市規劃的各個階段發揮積極作用，從總體規劃的制定到具體項目的實施，都能體現聲景設計的理念和方法。

當代聲景研究的發展也為城市規劃提供了豐富的理論基礎和實踐工具。加拿大作曲家兼聲學生態學家 R. Murray Schafer 在 1970 年代提出的聲景概念，為這一領域奠定了重要的理論基礎[4]。他提出的聲標誌（Soundmark）、聲信號（Sound Signal）和背景聲（Keynote Sound）等概念，為城市聲音環境的分析和設計提供了有效的分析框架。隨後，歐洲各國在實施歐盟環境噪音指令（Directive 2002/49/EC）的過程中，逐步發展出一套相對完善的聲景評估和管理體系，為世界各地的城市規劃實踐提供了寶貴的經驗和參考[5]。

3.1 聲景設計的理念 (Principles of Soundscape Design)

聲景設計的理念建立在對人類與聲音環境互動關係的深刻理解之上，它超越了傳統工程學僅關注技術參數的局限，轉而關注聲音環境對人類身心健康、社會互動和文化表達的綜合影響。這種設計理念的核心在於認識到聲音不僅是物理現象，更是文化現象和社會現象，它承載著豐富的信息和情感內容，能夠深刻影響人們的行為模式、心理狀態和生活品質。

聲景設計理念的形成經歷了一個漸進的發展過程。早期的聲學設計主要關注建築物內部的音響效果，如音樂廳和劇院的聲學設計，追求的是聲音的清晰度和均勻分佈。隨著環境意識的覺醒和跨學科研究的發展，人們開始關注更廣闊的聲音環境，特別是城市和自然環境中的聲音生態。Murray Schafer 在《世界的調音》(The Tuning of the World)一書中提出的聲景概念，標誌著從建築聲學向環境聲學的重要轉變[6]。他強調聲音環境應該被視為一個整體的生態系統，其中每一種聲音都

有其存在的意義和價值，設計師的任務是協調這些聲音元素，創造和諧而富有表現力的聲音環境。

當代聲景設計理念的一個重要特徵是其跨學科性質。它融合了聲學工程、環境心理學、社會學、人類學、生態學等多個學科的知識和方法，形成了一個綜合性的理論框架。這種跨學科的方法使得聲景設計能夠更全面地理解和應對聲音環境的複雜性。例如，聲學工程提供了聲音傳播和控制的技術基礎，環境心理學揭示了聲音對人類認知和情感的影響機制，社會學分析了聲音在社會互動中的作用，人類學探討了不同文化背景下聲音的意義和價值，生態學則關注聲音在自然生態系統中的功能和地位。

聲景設計的理念還強調參與性和民主性。與傳統的由專家主導的技術性設計不同，聲景設計重視公眾的參與和意見表達。這種參與性設計理念認為，聲音環境的使用者最了解自己的需求和偏好，他們的意見和建議對於創造成功的聲景設計至關重要。國際標準 ISO/TS 12913-2:2018 提供了收集和分析公眾聲景感知數據的標準化方法，為參與性聲景設計提供了技術支持[7]。這種方法不僅提高了設計的科學性和有效性，也增強了公眾對聲景項目的認同感和歸屬感。

可持續性是聲景設計理念的另一個重要組成部分。可持續的聲景設計不僅要滿足當前的功能需求，還要考慮長期的環境影響和社會效益。這包括選擇環保的材料和技術，設計能夠適應氣候變化的聲音環境，以及創造能夠促進生物多樣性和生態平衡的聲音條件。研究表明，良好的聲景環境能夠支持鳥類和其他動物的生存和繁衍，同時也能提高人類的健康水平和生活品質[8]。因此，可持續的聲景設計需要在人類需求和生態保護之間找到平衡點，創造既滿足人類需要又有利於生態環境的聲音條件。

聲景設計理念的實施需要一套完整的方法論和工具體系。這包括聲音環境的調查和分析方法、聲景品質的評估標準、設計方案的制定和優化程序，以及實施效果的監測和評價機制。近年來，隨著數位技術和人工智能的發展，聲景設計的工具和方法也在不斷更新和完善。例如，聲音地圖的製作可以利用 GIS 技術和大數據分析，聲音模擬可以運用先進的計算聲學軟體，公眾參與可以通過移動應用程式

和網路平台實現[9]。這些技術進步為聲景設計的實踐提供了更加精確和高效的工具，使得複雜的聲景項目得以成功實施。

3.1.1 聲景的正向利用 (Positive Use of Soundscape)

聲景的正向利用代表著聲音環境管理理念的根本性轉變，從傳統的消極防禦模式轉向積極創造模式。這種轉變的核心在於認識到聲音不僅僅是需要控制的干擾因素，更是可以被積極利用來提升環境品質、促進健康福祉和豐富文化體驗的寶貴資源。正向利用的理念要求設計師和規劃師重新審視聲音環境，從「減少噪音」的思維轉向「創造美好聲音體驗」的思維，這種轉變對於當代城市設計和環境管理具有深遠的意義。

聲景正向利用的理論基礎建立在環境心理學和神經科學的最新研究成果之上。研究表明，人類對聲音環境的感知和反應是一個複雜的多維度過程，涉及認知、情感、行為等多個層面[10]。某些類型的聲音，如流水聲、鳥鳴聲、風吹樹葉聲等自然聲音，能夠激發人們的正面情緒反應，降低壓力荷爾蒙的分泌，促進身心的放鬆和恢復。這種現象被稱為「聲景修復效應」(Soundscape Restoration Effect)，它為聲景的正向利用提供了科學依據[11]。同時，文化和社會心理學的研究也顯示，熟悉的和具有正面文化意涵的聲音能夠增強人們的歸屬感和認同感，促進社區凝聚力的形成。

在實際應用中，聲景的正向利用可以通過多種策略和技術來實現。聲音遮蔽（Sound Masking）是最常用的技術之一，它利用令人愉悅的自然聲音或人工合成聲音來遮蔽不受歡迎的背景噪音。例如，在城市公園中設置人工瀑布或噴泉，其產生的水聲不僅能夠遮蔽交通噪音，還能創造寧靜舒適的環境氛圍。研究顯示，適當的水聲遮蔽能夠將人們對交通噪音的煩惱程度降低 30-50%，同時顯著提高對環境的整體滿意度[12]。

聲音增強（Sound Enhancement）是另一種重要的正向利用策略。這種方法不是簡單地添加新的聲音，而是通過技術手段增強環境中已有的正面聲音特徵。例如，在設計城市廣場時，可以通過建築物的形狀和材料選擇來增強音樂表演的聲學效

果，或者通過景觀設計來增強鳥類棲息，從而增加環境中的自然聲音。現代聲學技術的發展使得這種增強效果可以更加精確和可控，建築師和景觀設計師能夠預測和調節聲音在空間中的傳播和反響特性[13]。

聲音設計（Sound Design）在聲景正向利用中佔據重要地位。與電影或音樂中的聲音設計類似，環境聲音設計涉及對聲音元素的精心選擇、組合和調節，以創造特定的氛圍和體驗。這種設計可能包括選擇合適的背景音樂、設計特殊的聲音標識、或者創造互動性的聲音裝置。例如，新加坡的濱海灣花園（Gardens by the Bay）在其超級樹結構中整合了音響系統，定期播放與自然環境協調的音樂，創造了獨特的聲景體驗，吸引了來自世界各地的遊客[14]。

文化聲音的保護和利用是聲景正向利用的重要組成部分。許多城市和社區都有其獨特的聲音特徵，如傳統市場的叫賣聲、宗教建築的鐘聲、或者特定街區的音樂文化。這些聲音承載著豐富的文化信息和歷史記憶，是社區認同和文化傳承的重要載體。正向利用這些文化聲音不僅能夠保護和傳承文化遺產，還能夠增強社區的文化特色和吸引力[15]。聯合國教科文組織在其《保護非物質文化遺產公約》中也強調了聲音文化的重要性，鼓勵各國採取措施保護和推廣具有文化價值的聲音傳統。

生物聲學的利用是聲景正向利用的新興領域。研究發現，不同的鳥類、昆蟲和其他動物的聲音對人類具有不同的心理和生理效應。例如，某些頻率的鳥鳴聲能夠促進人類的創造性思維，而昆蟲的鳴叫聲則有助於冥想和放鬆[16]。基於這些發現，設計師開始在城市環境中有意識地創造條件來吸引和支持這些有益的動物群體，從而間接地改善人類的聲音環境。這種方法不僅有利於人類健康，還能促進城市生物多樣性的保護和發展。

技術輔助的聲景正向利用也在快速發展。人工智能和機器學習技術的應用使得聲音環境的監測、分析和調節變得更加智能化和個性化。例如，智能聲景系統能夠根據環境條件和使用者偏好自動調節背景音樂或自然聲音的播放，創造最適合當前情境的聲音環境[17]。這種技術的發展為聲景的正向利用開闢了新的可能性，使得聲音環境能夠更好地適應和服務於人類的多樣化需求。

聲景正向利用的效果評估也是一個重要的研究領域。傳統的噪音評估主要依靠物理測量，如分貝數值和頻譜分析，但正向聲景的評估需要更加綜合的方法。心理聲學測量、生理反應監測、行為觀察和主觀評價等多種方法被用來評估聲景正向利用的效果[18]。這些評估方法不僅能夠驗證設計的有效性，還能為未來的設計改進提供科學依據。國際標準 ISO/TS 12913-3:2019 提供了聲景數據分析的標準化方法，為聲景效果的科學評估提供了技術支持[19]。

3.1.2 音景與公共空間 (Soundscape in Public Spaces)

公共空間中的聲景設計代表著城市聲音環境管理的最高水平，因為公共空間不僅要滿足多元化使用者的不同需求，還要在有限的物理條件下創造包容性和吸引力的環境體驗。公共空間的聲景特徵直接影響著人們的使用意願、停留時間和行為模式，進而影響城市的活力和社會凝聚力。研究表明，聲景品質良好的公共空間能夠吸引更多的使用者，促進社會互動，並對周邊地區的經濟發展產生積極影響[20]。

公共空間聲景設計的複雜性源於其多功能性和多使用群體的特徵。一個成功的城市廣場或公園需要同時滿足休閒散步、社交聚會、文化活動、商業交易等多種功能需求，而每種功能對聲音環境都有不同的要求。例如，安靜的冥想區域需要避免干擾性噪音，而活動表演區則需要良好的聲學擴散效果；兒童遊戲區允許較高的噪音水平，而老年人休息區則偏好相對安靜的環境。這種功能分區和聲景分區的協調是公共空間聲景設計的核心挑戰之一[21]。

聲學分區（Acoustic Zoning）是解決公共空間聲景複雜性的重要策略。這種方法通過空間布局、地形塑造、植被配置和建築物設計等手段，在同一個公共空間內創造具有不同聲學特徵的子區域。例如，英國謝菲爾德的和平花園（Peace Gardens）通過巧妙的地形設計和水景配置，創造了從繁忙商業區到安靜休憩區的聲學漸變，使得不同需求的使用者都能找到適合的空間[22]。這種設計不僅提高了空間的使用效率，還展示了聲景設計在解決城市空間衝突中的重要作用。

公共空間中的聲音設施設計是聲景營造的重要技術手段。這包括音響系統的配置、聲學材料的選擇、以及聲音景觀元素的設置。現代公共空間的音響系統已經從簡單的擴音設備發展為智能化的聲音管理系統，能夠根據不同的活動需求和環境條件自動調節音量、音質和覆蓋範圍。例如，荷蘭阿姆斯特丹的博物館廣場（Museumplein）採用了分布式音響系統，能夠為不同區域提供個性化的聲音服務，從而在同一空間內同時支持多種活動[23]。

植被在公共空間聲景中發揮著多重作用。除了傳統的噪音緩衝功能外，植物還能夠吸引鳥類和昆蟲，為環境增添自然聲音；不同類型的植物在風中產生的聲音也各不相同，可以被有意識地利用來創造特定的聲音效果。研究顯示，葉片大而薄的植物（如楊樹）能夠產生清脆的沙沙聲，而葉片小而厚的植物（如冬青）則產生相對沉悶的聲音[24]。這種植被聲學特性的差異為景觀設計師提供了豐富的創作元素，使得公共空間的聲景能夠更加多樣化和富有表現力。

水景是公共空間聲景設計中最常用和最有效的元素之一。水的聲音具有天然的遮蔽效果和心理撫慰作用，能夠有效地減少人們對背景噪音的感知，同時創造寧靜和諧的環境氛圍。不同的水景形式產生的聲音特徵也各不相同：平靜的池塘幾乎沒有聲音，適合創造沉思的環境；緩慢流動的溪流產生輕柔的潺潺聲，適合休閒散步；激烈的瀑布產生強烈的轟鳴聲，適合遮蔽交通噪音。現代水景設計還可以通過調節水流速度、落差高度和接觸面材質來精確控制聲音特徵[25]。

公共藝術與聲景的結合創造了全新的城市體驗形式。聲音藝術裝置不僅具有視覺美感，還能夠產生獨特的聲音體驗，成為公共空間的聲音地標。例如，澳大利亞墨爾本的「聲波雕塑」（Sound Wave Sculpture）結合了視覺藝術和聲學設計，當人們走過時會觸發不同的音樂片段，創造了互動性的聲音體驗[26]。這種藝術與技術的結合不僅豐富了公共空間的文化內涵，還為市民提供了全新的感官體驗。

公共空間聲景的文化表達是另一個重要維度。每個城市和社區都有其獨特的文化背景和聲音傳統，這些文化元素應該在公共空間的聲景設計中得到體現和傳承。例如，在設計具有歷史意義的廣場時，可以考慮重現歷史上的聲音環境，如傳統手工藝的製作聲音或古老的音樂傳統；在多元文化社區中，可以通過聲音來展示

不同文化群體的特色[27]。這種文化導向的聲景設計不僅能夠增強公共空間的文化認同感，還能夠促進不同文化群體之間的理解和交流。

可達性和包容性是公共空間聲景設計必須考慮的重要原則。聲景設計應該考慮到視覺障礙者、聽覺障礙者以及其他有特殊需求的使用者。對於視覺障礙者，良好的聲景能夠提供重要的導航信息和環境認知輔助；對於聽覺障礙者，視覺和觸覺的聲音表現形式（如聲音可視化裝置）能夠幫助他們感受聲音環境[28]。通用設計的理念要求聲景設計考慮所有使用者的需求，創造真正包容性的公共空間。

公共空間聲景的維護和管理也是設計成功的關鍵因素。與靜態的視覺景觀不同，聲景是一個動態的系統，需要持續的監測、調節和維護。這包括設備的技術維護、聲音內容的更新、以及根據使用者反饋進行調整等。許多成功的公共空間都建立了專門的聲景管理團隊，負責日常的運營和維護工作[29]。同時，公眾參與也是聲景維護的重要組成部分，使用者的反饋和建議對於聲景品質的持續改善具有重要價值。

3.1.3 聲景與景觀融合 (Soundscape and Landscape Integration)

聲景與景觀的融合代表著當代環境設計的最高境界，它要求設計師不僅要考慮視覺美學和功能布局，還要統籌考慮聲音環境的營造和管理。這種整合設計方法認識到人類對環境的感知是多感官的綜合體驗，視覺、聽覺、觸覺、嗅覺等感官相互作用，共同構成完整的環境體驗。因此，真正成功的景觀設計必須在視覺設計的基礎上，同時考慮聲音環境的創造和優化，實現多感官設計的和諧統一[30]。

聲景與景觀融合的理論基礎建立在環境心理學和感知科學的研究成果之上。研究表明，人類對環境的感知和評價受到多種感官信息的共同影響，其中視覺和聽覺的相互作用最為重要。視覺信息能夠影響人們對聲音的感知和評價，反之亦然。例如，同樣的水聲在綠色自然環境中會被評價為更加愉悅和放鬆，而在灰色的城市環境中則可能被認為是噪音[31]。這種跨感官的感知機制要求設計師在進行景觀設計時必須同時考慮視覺和聽覺元素的協調性。

地形設計在聲景與景觀融合中發揮著基礎性作用。地形不僅決定了景觀的視覺特徵，還直接影響聲音的傳播和反射特性。通過巧妙的地形塑造，設計師可以在不增加人工設施的情況下實現聲音的引導、集中或分散。例如，下沉式花園能夠創造相對安靜的環境，適合營造沉思和休憩的氛圍；而開闊的草坡則有利於聲音的傳播，適合舉辦戶外活動[32]。現代計算聲學技術使得設計師能夠在設計階段就預測和優化地形對聲音環境的影響，確保最終建成的景觀能夠達到預期的聲學效果。

植物配置是聲景與景觀融合的核心技術手段。不同種類的植物不僅具有不同的視覺特徵，還具有不同的聲學特性。喬木、灌木和草本植物在吸音、反射和散射方面的表現各不相同，它們的組合配置能夠創造複雜而豐富的聲學環境。例如，密植的常綠喬木能夠有效阻隔外部噪音，適合作為住宅區的聲學屏障；而疏植的落葉喬木則能夠創造季節性變化的聲學環境，春夏季節提供遮蔽，秋冬季節保持通透[33]。此外，某些植物還能夠吸引特定的鳥類和昆蟲，為環境增添自然聲音，這種生物聲學的利用是聲景與景觀融合的高級形式。

水景設計是聲景與景觀融合最成功的範例之一。水作為景觀元素不僅具有強烈的視覺吸引力，還能夠產生豐富多樣的聲音效果。從設計的角度來看，水景的聲學特性可以通過控制水流速度、落差高度、接觸面材質等參數來精確調節。平靜的水面創造寧靜的氛圍，適合冥想和反思；流動的水聲則能夠遮蔽背景噪音，創造動態的環境體驗[34]。日本庭園中的「水琴窟」是聲景與景觀融合的經典範例，它利用水滴落入地下空腔產生的清脆聲音，創造了獨特的聽覺體驗，同時在視覺上也具有極強的美學價值。

材質選擇對聲景與景觀融合的效果具有決定性影響。不同的材質具有不同的吸音、反射和共振特性，它們的組合使用能夠創造豐富的聲學環境。硬質材料如石材和混凝土具有較強的反射特性，適合創造回響效果；軟質材料如木材和織物具有較好的吸音效果，適合創造安靜的環境[35]。現代材料科學的發展為聲景設計提供了更多的選擇，如具有特殊聲學性能的多孔材料、共振材料等，這些新材料的應用為聲景與景觀的融合開闢了新的可能性。

照明設計與聲景的協調是夜間環境品質的重要保證。夜間的聲音環境與白天有顯著差異，背景噪音通常較低，人們對聲音的敏感度也會發生變化。同時，視覺條件的改變也會影響人們對聲音的感知和評價。因此，照明設計必須與聲景設計相互協調，創造和諧的夜間環境體驗[36]。例如，水景的燈光設計不僅要突出水的視覺效果，還要考慮光影變化對水聲感知的影響；植物的照明既要展現植物的形態美，也要考慮對夜間生物活動的影響。

氣候響應是聲景與景觀融合設計中不可忽視的因素。不同的氣候條件會顯著影響聲音的傳播特性和景觀的表現形式。溫度、濕度、風速等氣象因素都會影響聲音的傳播距離和清晰度；季節變化會改變植物的形態和密度，進而影響其聲學性能。成功的聲景與景觀融合設計必須考慮這些氣候因素的影響，創造能夠適應氣候變化的彈性環境[37]。例如，在設計水景時要考慮冬季結冰對聲音效果的影響，在選擇植物時要考慮季節性變化對聲學屏障效果的影響。

文化景觀的聲景表達是聲景與景觀融合的重要內容。每個地區都有其獨特的文化傳統和景觀特色，這些文化元素在聲景設計中應該得到適當的體現。例如，在設計具有歷史文化價值的景觀時，可以通過聲音來重現歷史場景，如古代市集的喧嘩聲或傳統工藝的製作聲；在表現地域文化特色時，可以利用當地的音樂傳統或自然聲音特徵[38]。這種文化導向的設計方法不僅能夠增強景觀的文化內涵，還能夠促進文化的傳承和發展。

可持續性設計原則在聲景與景觀融合中佔據重要地位。可持續的設計不僅要考慮當前的功能需求和美學效果，還要考慮長期的環境影響和資源消耗。在聲景設計中，這意味著要優先選擇自然的聲音元素而非人工設備，選擇本土植物而非外來物種，設計被動式的聲學解決方案而非主動式的技術系統[39]。這種可持續的設計方法不僅有利於環境保護，還能夠降低維護成本，提高系統的可靠性和持久性。

3.2 城市聲景 (Urban Soundscapes)

城市聲景是當代城市規劃和環境管理中最具挑戰性的領域之一，它反映了現代城市生活的複雜性和多樣性。城市環境中匯聚了交通運輸、工業生產、商業活動、

社會互動等多種聲音來源，形成了層次豐富但往往混亂的聲音環境。與自然環境中相對和諧的聲音生態不同，城市聲景往往表現出高度的動態性、複雜性和不可預測性，這使得城市聲景的管理和優化成為一個複雜的系統工程[40]。

城市聲景的形成和演變與城市的發展歷程密切相關。工業革命以來的快速城市化進程不僅改變了城市的物理形態，也徹底改變了城市的聲音環境。傳統城市中以人聲、動物聲和自然聲為主的聲音環境逐漸被機械聲、電子聲和交通聲所主導。這種變化不僅影響了居民的生活品質，也改變了城市的文化特徵和社會氛圍[41]。研究表明，現代城市居民平均每天暴露在超過世界衛生組織推薦標準的噪音環境中的時間超過 8 小時，這種長期的噪音暴露對人類健康和福祉產生了顯著的負面影響。

城市聲景的特徵可以從多個維度來分析。從時間維度來看，城市聲景表現出明顯的日夜週期和週末平日的差異，交通高峰期、商業活動時間和夜間休息時間都有不同的聲音特徵；從空間維度來看，不同功能區域如住宅區、商業區、工業區和休閒區的聲景特徵也截然不同；從社會維度來看，不同社會經濟地位的社區往往表現出不同的聲景品質，這反映了城市的社會不平等現象[42]。這種多維度的複雜性要求城市規劃師和聲景設計師採用系統性的方法來理解和管理城市聲景。

城市聲景管理的理念正在從傳統的噪音控制轉向綜合的聲音環境品質提升。傳統的噪音管理主要關注聲音的物理特性，如分貝數值和頻譜分佈，採用的措施也主要是技術性的，如隔音牆的設置和噪音源的限制。然而，這種方法往往忽視了聲音的社會文化意義和人們的主觀感受。現代的城市聲景管理更加重視人們對聲音環境的整體體驗，關注聲音的品質而非僅僅是數量[43]。這種理念的轉變要求城市管理者不僅要減少不受歡迎的噪音，還要積極創造和保護有價值的聲音環境。

城市密度與聲景品質之間存在複雜的關係。一方面，高密度的城市發展往往伴隨著更多的噪音源和更高的背景噪音水平；另一方面，適當的城市密度也能夠創造豐富多樣的城市生活和文化活動，這些活動本身就是城市聲景的重要組成部分[44]。研究表明，最適宜的城市聲景往往出現在中等密度的城市區域，這些區域既有足夠的活力和多樣性，又不會產生過度的噪音污染。這一發現對城市規劃的

密度控制政策具有重要的指導意義。

交通系統是影響城市聲景最重要的因素之一。道路交通不僅是城市中最主要的噪音源，也是最難控制的噪音源之一。隨著私家車保有量的快速增長和城市交通流量的不斷增加，交通噪音已成為影響城市居民生活品質的主要因素。然而，交通系統的改善和優化也為城市聲景品質的提升提供了重要機會[45]。例如，公共交通系統的發展可以減少私家車的使用，從而降低交通噪音；電動車的推廣可以顯著改善交通噪音的頻譜特徵；智能交通管理系統可以優化交通流量，減少擁堵和急剎車等產生的噪音。

城市綠地在城市聲景中發揮著重要作用。綠地不僅能夠吸收和阻隔噪音，還能夠為城市提供自然聲音，如鳥鳴聲、風吹樹葉聲等。研究表明，即使是相對較小的城市綠地也能夠顯著改善周邊地區的聲景品質[46]。然而，綠地的聲學效果受到多種因素的影響，包括植物的種類和密度、綠地的面積和形狀、以及與噪音源的相對位置等。因此，在城市綠地規劃中需要統籌考慮生態效益、景觀效益和聲學效益的協調發展。

建築設計對城市聲景的影響也不容忽視。建築物的高度、形狀、材質和布局都會影響聲音在城市中的傳播和反射特性。高層建築可能形成聲音的峽谷效應，使得街道層面的噪音水平顯著增加；建築物的立面材質和形狀會影響聲音的反射和散射特性；建築群的布局會影響風的流動模式，進而影響聲音的傳播[47]。現代建築設計越來越重視建築的聲學性能，不僅要考慮建築內部的聲環境，還要考慮建築對城市聲景的影響。

城市聲景的文化多樣性是其重要特徵之一。不同的文化背景會影響人們對聲音的感知和評價，同一種聲音在不同的文化語境中可能有完全不同的意義。在多元文化的城市中，聲景設計需要考慮不同文化群體的需求和偏好，創造包容性的聲音環境[48]。例如，某些文化認為靜謐是理想的環境狀態，而另一些文化則認為熱鬧的聲音環境更有活力和吸引力。這種文化差異要求城市聲景管理採用更加靈活和多元的方法。

3.2.1 城市噪音挑戰 (Urban Noise Challenges)

城市噪音挑戰代表著當代城市發展面臨的最嚴峻環境問題之一，其影響範圍涵蓋了人類健康、社會公平、經濟發展和環境品質等多個層面。根據世界衛生組織的最新統計，全球超過 12 億人生活在對健康有害的噪音環境中，其中絕大部分集中在城市地區[49]。城市噪音不僅是一個技術問題，更是一個複雜的社會問題，它反映了城市發展模式、社會結構和治理能力等深層次的問題。

城市噪音的來源具有多樣性和複雜性的特徵。交通運輸是最主要的城市噪音源，包括道路交通、鐵路運輸、航空運輸等，其中道路交通噪音通常佔城市總噪音的 60-80%[50]。工業活動是另一個重要的噪音源，雖然隨著產業結構的調整，傳統重工業在城市中的比重有所下降，但新興的工業活動如數據中心、物流配送等仍然產生顯著的噪音影響。建築施工噪音具有間歇性和高強度的特徵，對周邊居民的生活造成嚴重干擾。此外，社會活動噪音如娛樂場所、商業活動、公共活動等也是城市噪音的重要組成部分[51]。

城市噪音對人類健康的影響是多方面和多層次的。生理健康方面，長期暴露在高噪音環境中會導致聽力損失、心血管疾病、內分泌系統紊亂等多種健康問題。世界衛生組織的研究表明，環境噪音每年在歐洲造成超過 100 萬健康生命年的損失，其經濟成本超過 400 億歐元[52]。心理健康方面，噪音會導致壓力增加、焦慮抑鬱、認知功能下降等問題，特別是對兒童的學習能力和發展產生長遠影響。睡眠品質方面，夜間噪音是影響睡眠最重要的環境因素之一，慢性睡眠不足會引發一系列健康和社會問題。

城市噪音的社會分布呈現明顯的不公平性。研究表明，低收入社區往往承受更高水平的噪音暴露，這種現象被稱為「環境不公義」[53]。造成這種不公平分布的原因是多方面的：首先，低收入人群往往居住在租金較低的區域，而這些區域通常位於交通幹道附近或工業區周邊；其次，低收入社區缺乏政治影響力和經濟資源來抵制噪音源的設置；再次，高收入社區更容易獲得隔音設施和其他噪音防護措施。這種不公平的噪音分布不僅加劇了社會不平等，也影響了城市的社會穩定和凝聚力。

經濟發展與噪音控制之間存在複雜的關係。一方面，經濟活動往往是噪音的主要來源，如交通運輸、工業生產、商業活動等；另一方面，噪音污染會對經濟發展產生負面影響，如降低房地產價值、影響旅遊業發展、增加醫療成本等[54]。研究表明，主要交通幹道附近的房地產價值通常比安靜地區低 10-20%，這種價值損失直接反映了噪音的經濟成本。同時，噪音控制投資也會帶來經濟效益，如改善勞動生產率、提高生活品質、促進可持續發展等。

城市規劃在噪音控制中發揮著基礎性作用。傳統的城市規劃往往將噪音問題視為事後需要解決的技術問題，而現代的城市規劃則強調從源頭預防噪音問題的產生。這包括合理的土地利用規劃，如將噪音敏感的功能（如住宅、學校、醫院）與噪音源（如工業、交通）適當分離；優化城市布局，如利用地形和建築物來阻隔噪音傳播；完善交通系統規劃，如發展公共交通、優化路網結構等[55]。近年來，許多城市開始採用「噪音敏感性規劃」的方法，在城市規劃的每個階段都考慮噪音的影響，從而從根本上減少噪音問題的產生。

技術創新為城市噪音控制提供了新的解決方案。傳統的噪音控制技術主要包括隔音牆、減振措施、吸音材料等被動防護措施，這些技術雖然有效但往往成本高昂且影響城市景觀。現代的噪音控制技術則更加多樣化和智能化，如主動噪音控制技術利用聲波干涉原理來消除噪音；智能交通管理系統通過優化交通流量來減少交通噪音；低噪音路面材料能夠顯著降低輪胎與路面的摩擦噪音[56]。電動車的快速發展也為交通噪音控制帶來了革命性的變化，純電動車的噪音水平比傳統燃油車低 5-10 分貝。

法律法規是城市噪音控制的重要保障。世界各國都制定了相應的噪音控制法律法規，如歐盟的環境噪音指令（Directive 2002/49/EC）要求成員國定期進行噪音地圖製作和行動計劃制定[57]。然而，法律法規的執行往往面臨諸多挑戰，如監測技術的限制、執法資源的不足、跨部門協調的困難等。近年來，許多城市開始探索新的執法模式，如利用物聯網技術進行實時噪音監測、建立公眾舉報平台、實施經濟激勵措施等。

公眾參與在城市噪音控制中發揮著越來越重要的作用。傳統的噪音管理主要依靠政府部門的技術性管理，公眾往往處於被動接受的地位。現代的噪音管理則更加重視公眾的參與和意見表達，這不僅因為公眾是噪音的直接受害者，更因為公眾的參與能夠提高政策的有效性和合法性[58]。許多城市開始建立公眾參與機制，如噪音投訴處理系統、社區噪音監測項目、公眾諮詢會議等。智能手機應用程式的發展也為公眾參與提供了新的工具，居民可以隨時隨地測量和報告噪音問題。

氣候變化對城市噪音問題產生了新的影響。一方面，氣候變化導致的極端天氣事件可能影響噪音的傳播特性；另一方面，應對氣候變化的措施如可再生能源設施、節能建築等可能帶來新的噪音問題[59]。例如，風力發電設施會產生低頻噪音，熱泵系統會產生夜間噪音等。這些新的挑戰要求城市噪音管理採用更加前瞻性和適應性的方法。

國際合作對於解決城市噪音問題具有重要意義。噪音問題往往具有跨界性質，如航空噪音、鐵路噪音等往往影響多個行政區域。同時，噪音控制技術和管理經驗的國際交流也有助於提高各國的噪音管理水平[60]。近年來，聯合國、世界衛生組織、國際標準化組織等國際組織在推動全球噪音管理合作方面發揮了重要作用，制定了一系列國際標準和指導原則，為各國的噪音管理提供了技術支持和政策參考。

3.2.2 寧靜區域規劃 (Quiet Area Planning)

寧靜區域規劃代表著現代城市聲景管理的積極策略，它不僅僅是對噪音的被動防護，更是對優質聲音環境的主動創造和保護。根據歐盟環境噪音指令（Directive 2002/49/EC）的定義，寧靜區域是指「由主管當局劃定的、未暴露於任何噪音源產生的超過特定閾值的噪音的區域」[61]。這個定義雖然簡潔，但其實施卻涉及複雜的技術、社會和政策問題。寧靜區域的規劃和管理需要綜合考慮聲學技術、城市規劃、社會需求和環境保護等多個方面，是一個典型的跨學科和跨部門的系統工程。

寧靜區域規劃的理論基礎建立在聲景修復理論（Soundscape Restoration Theory）

和注意力恢復理論（Attention Restoration Theory）之上。研究表明，適度安靜的環境能夠促進人類的心理恢復和注意力集中，對緩解城市生活壓力和提高生活品質具有重要作用[62]。然而，「寧靜」並不意味著完全的無聲，而是指一種平衡和諧的聲音環境，在這種環境中，自然聲音和有意義的人為聲音佔據主導地位，而干擾性的噪音被控制在可接受的水平。這種對寧靜的理解為寧靜區域的規劃提供了重要的指導原則。

寧靜區域的分類體系反映了不同類型區域的功能需求和環境特徵。歐盟的分類體系將寧靜區域分為兩大類：開放鄉村寧靜區域（Quiet Areas in Open Country）和城市寧靜區域（Quiet Urban Areas）[63]。開放鄉村寧靜區域主要指遠離城市、未受人為噪音污染的自然區域，這類區域的保護重點是防止新的噪音源的侵入；城市寧靜區域則是指城市內部相對安靜的區域，如公園、住宅區、歷史文化區等，這類區域的管理需要在保持安靜的同時兼顧城市功能的需要。近年來，一些國家還提出了「日常寧靜區域」（Everyday Quiet Areas）的概念，強調在普通的城市環境中也要創造和保護寧靜的空間。

寧靜區域的識別和評估是規劃工作的基礎。傳統的方法主要依靠聲學測量，如噪音水平的測定和頻譜分析等。然而，這種純技術性的方法往往忽視了人們的主觀感受和使用需求。現代的評估方法更加重視聲景的整體品質，採用客觀測量與主觀評價相結合的方法[64]。ISO/TS 12913-2:2018 標準提供了聲景評估的標準化方法，包括現場測量、問卷調查、聲音漫步等多種技術手段。這種綜合評估方法能夠更準確地識別真正具有寧靜品質的區域，為規劃決策提供科學依據。

寧靜區域規劃的空間策略需要考慮城市的整體布局和發展需求。網絡化佈局是目前最受推崇的策略之一，它強調寧靜區域應該形成相互連接的網絡系統，而不是孤立的島嶼[65]。這種網絡化佈局不僅能夠提高寧靜區域的可達性，還能夠形成連續的生態廊道，有利於城市生物多樣性的保護。層次化佈局則強調不同規模和功能的寧靜區域應該形成層次分明的體系，從鄰里尺度的小型寧靜空間到城市尺度的大型寧靜區域，滿足不同人群的不同需求。

寧靜區域的設計原則體現了聲景設計的核心理念。被動設計原則強調通過合理的

空間布局和自然要素的運用來實現寧靜效果，如利用地形起伏來阻隔噪音、通過植被配置來吸收聲音等[66]。主動設計原則則通過人工設施和技術手段來改善聲音環境，如設置隔音屏障、安裝噪音控制設備等。生態設計原則強調寧靜區域應該與自然生態系統相協調，通過創造適宜的棲息環境來吸引鳥類和其他動物，利用自然聲音來掩蔽人為噪音。

植物配置在寧靜區域設計中發揮著多重作用。除了傳統的噪音屏蔽功能外，植物還能夠創造積極的聲音環境。不同類型的植物具有不同的聲學特性：常綠樹種能夠提供全年的噪音屏蔽效果；落葉樹種則能夠創造季節性變化的聲音環境；灌木和草本植物能夠吸收高頻噪音；開花植物能夠吸引昆蟲和鳥類，增加自然聲音[67]。現代的植物配置設計更加注重植物的聲學性能，通過科學的搭配來實現最佳的聲學效果。

水體設計是寧靜區域中最有效的聲景元素之一。水聲具有天然的遮蔽效果和心理撫慰作用，能夠有效地改善聲音環境的品質。不同類型的水體產生不同的聲音效果：靜水面幾乎無聲，適合創造沉思的環境；緩流水產生輕柔的潺潺聲，適合休閒散步；湍急水流產生較強的聲音，適合遮蔽交通噪音[68]。現代的水體設計還可以通過控制水流速度、落差高度和接觸面材質來精確調節聲音特徵，實現個性化的聲景效果。

寧靜區域的管理制度是保障其長期有效性的關鍵。這包括法律保護、規劃控制、日常維護和監測評估等多個方面。法律保護方面，需要通過立法來確立寧靜區域的法律地位，禁止在寧靜區域內進行可能產生噪音污染的活動[69]。規劃控制方面，需要在城市規劃和建設管理中充分考慮對寧靜區域的保護，控制周邊地區的開發強度和功能配置。日常維護方面，需要建立專門的管理機構負責寧靜區域的日常維護和管理工作。監測評估方面，需要建立定期的監測制度，及時發現和解決影響寧靜品質的問題。

公眾參與在寧靜區域規劃中具有特殊的重要性。寧靜是一種主觀感受，不同的人群對寧靜的需求和理解也不相同。因此，寧靜區域的規劃必須充分考慮公眾的意見和需求[70]。現代的公眾參與方法包括問卷調查、焦點小組討論、社區工作坊、

在線平台等多種形式。一些城市還開展了「寧靜區域認領」活動，鼓勵社區居民參與寧靜區域的維護和管理工作。這種參與式的管理模式不僅提高了管理效率，還增強了公眾的環境保護意識。

國際經驗為寧靜區域規劃提供了豐富的參考。德國的寧靜區域規劃起步較早，形成了相對完善的技術標準和管理制度[71]。荷蘭的「寧靜路線」（Quiet Routes）項目通過連接不同的寧靜區域，創造了連續的寧靜體驗。日本的「百大聲景」項目通過公眾投票選出最具代表性的聲景地點，提高了公眾對聲景保護的認識。這些國際經驗展示了寧靜區域規劃的多樣性和創新性，為其他國家和地區提供了有價值的借鑒。

3.2.3 交通與基礎建設影響 (Transport and Infrastructure Impacts)

交通系統和基礎建設對城市聲景的影響是當代城市聲景管理面臨的最重要挑戰之一。交通運輸不僅是現代城市最主要的噪音源，通常佔城市總噪音的 70-80%，也是最難控制的噪音源之一，因為它與城市的經濟活動和居民的日常生活密切相關[72]。隨著城市化進程的加速和機動車保有量的快速增長，交通噪音問題日益嚴重，不僅影響居民的健康和生活品質，也成為制約城市可持續發展的重要因素。理解和管理交通與基礎建設的聲景影響需要從系統性的角度來分析交通系統的各個組成部分及其相互關係。

道路交通是城市噪音的最主要來源，其聲學特徵受到多種因素的影響。車輛類型是決定噪音水平的關鍵因素：乘用車的噪音水平相對較低，通常在 65-75 分貝之間；貨車和公交車的噪音水平較高，可達 80-85 分貝；摩托車的噪音水平變化很大，從 70 分貝到超過 100 分貝不等[73]。車輛速度對噪音的影響呈現複雜的非線性關係：在低速行駛時，發動機噪音佔主導地位；在高速行駛時，輪胎與路面的摩擦噪音成為主要噪音源。交通流量的影響也很顯著：噪音水平與交通流量呈對數關係，流量增加一倍，噪音水平大約增加 3 分貝。

路面材料和道路設計對交通噪音具有重要影響。傳統的瀝青路面在車輛高速行駛時會產生較高的噪音水平，而新型的多孔瀝青路面（Porous Asphalt）能夠顯著降

低輪胎噪音，降幅可達 5-8 分貝[74]。道路的幾何設計也會影響噪音的產生和傳播：坡度較大的路段會增加車輛的發動機負荷，從而增加噪音；彎道會導致車輛頻繁加減速，也會增加噪音水平。此外，道路兩側的建築物和地形特徵會影響噪音的反射和擴散，形成複雜的聲學環境。

鐵路交通的聲學特徵與道路交通顯著不同。鐵路噪音主要包括輪軌噪音、牽引噪音和空氣動力噪音三個組成部分[75]。輪軌噪音是最主要的噪音源，由車輪與鋼軌的接觸摩擦產生，其強度取決於軌道的平整度、車輪的狀況和列車的重量。牽引噪音主要來自電動機和柴油機，在列車啟動和爬坡時尤為明顯。空氣動力噪音在高速運行時成為主要噪音源，如高速鐵路在 300 公里/小時的速度下，空氣動力噪音可能超過其他噪音源。現代鐵路技術的發展為噪音控制提供了新的解決方案，如無砟軌道技術、減振器安裝、車輪打磨等。

航空交通對城市聲景的影響具有特殊性。航空噪音的特點是間歇性強、峰值高、低頻成分多，對人的干擾程度往往超過同等分貝數的其他噪音[76]。機場周邊地區的噪音暴露程度與飛行路線、機型、起降頻次等因素密切相關。大型國際機場的影響範圍可達數十公里，涉及數十萬居民的生活環境。航空噪音的管理需要在國際、國家和地方多個層面進行協調，涉及航空法規、城市規劃、建築設計等多個領域。

城市基礎建設的建設階段對聲景的影響往往被忽視但卻十分重要。建築施工、道路修建、管線鋪設等基礎建設活動會產生高強度的間歇性噪音，對周邊居民的正常生活造成嚴重干擾[77]。施工噪音的特點是強度高（通常超過 85 分貝）、頻率集中（主要是低頻和中頻）、時間不確定。雖然施工噪音通常是臨時性的，但其對社區生活和居民健康的影響不容忽視。合理的施工噪音管理需要在施工技術、時間安排、防護措施等方面進行綜合考慮。

基礎設施設備的運行噪音是城市聲景的重要組成部分。變電站、水泵房、空調設備、電梯設備等基礎設施設備在運行過程中會產生持續性的背景噪音[78]。這些設備噪音的特點是連續性強、頻率相對固定、夜間更加明顯。隨著城市設備設施的現代化，設備噪音的控制技術也在不斷進步，如低噪音設備的開發、隔音罩的

應用、減振措施的實施等。

交通規劃策略對城市聲景具有基礎性影響。公共交通優先發展策略能夠減少私家車的使用，從而降低總體的交通噪音水平[79]。混合土地利用策略通過減少通勤距離來降低交通需求，進而減少交通噪音。慢行交通系統的發展（如步行道、自行車道）不僅不會產生噪音，還能為市民提供遠離交通噪音的出行選擇。智能交通管理系統通過優化交通流量、減少擁堵和急剎車等措施來控制交通噪音的產生。

電動化轉型為交通噪音控制提供了革命性的機會。純電動車輛的噪音水平比傳統燃油車輛低 10-15 分貝，特別是在低速行駛時幾乎無聲[80]。然而，電動車的普及也帶來了新的問題，如行人安全問題（因為電動車噪音太小，行人可能無法及時察覺）和新的噪音源問題（如充電設施噪音）。許多國家已經要求電動車安裝人工聲音警示系統（AVAS），以確保行人安全。

噪音防護技術在減緩交通噪音影響方面發揮重要作用。隔音屏障是最常用的防護措施，但其設計需要考慮聲學效果、視覺美觀、結構安全等多個因素[81]。現代的隔音屏障不僅具有良好的隔音效果，還可以成為城市景觀的重要組成部分，如透明屏障、綠化屏障、藝術屏障等。建築物的聲學設計也是重要的防護手段，包括建築朝向的選擇、隔音窗的安裝、隔音材料的使用等。

政策法規是交通噪音管理的重要保障。許多國家都制定了車輛噪音限值標準，如歐盟的車輛噪音法規(Regulation 540/2014)規定了不同類型車輛的噪音限值[82]。城市層面的交通噪音管理政策包括限速措施、禁鳴規定、貨車通行限制等。一些城市還實施了低排放區（Low Emission Zone）政策，通過限制高污染、高噪音車輛的進入來改善城市環境品質。

技術創新為交通噪音控制開闢了新的可能性。主動噪音控制技術利用聲波干涉原理來消除噪音，已經在一些高端車輛中得到應用[83]。智能材料的 development 為路面和建築材料提供了新的選擇，如形狀記憶合金、磁流變材料等可以根據環境條件自動調節其聲學性能。人工智能和大數據技術的應用使得交通噪音的監測、預測和管理變得更加精確和高效。

3.3 綠色與生態聲景 (Green and Ecological Soundscapes)

綠色與生態聲景代表著聲景科學與生態學的交叉融合，它不僅關注人類對聲音環境的感知和體驗，更重要的是關注聲音在生態系統中的功能和價值。這一領域的發展標誌著我們對聲音環境認知的深化，從單純的人類中心主義轉向更加全面的生態系統觀點。綠色與生態聲景的核心理念是認識到聲音不僅是環境的重要組成部分，更是生物多樣性和生態健康的重要指標[84]。在這種認知框架下，聲景的管理和保護不僅要考慮人類的需求，還要考慮其他生物的生存需要和生態系統的整體健康。

生態聲景學（Soundscape Ecology）作為一門新興學科，為綠色與生態聲景的研究提供了理論基礎。這門學科由 Bryan Pijanowski 等學者在 2011 年正式提出，它研究聲音在不同時空尺度上的模式及其生態學意義[85]。生態聲景學將聲景分為三個主要組成部分：生物聲（Biophony）指由生物產生的聲音，如鳥鳴、昆蟲鳴叫、哺乳動物的叫聲等；地球物理聲（Geophony）指由非生物自然過程產生的聲音，如風聲、水聲、雷聲等；人為聲（Anthropophony）指由人類活動產生的聲音，包括交通、工業、娛樂等活動的聲音。這種三分法為理解和分析生態聲景提供了有效的分析框架。

生物聲是生態聲景中最具生態價值的組成部分。不同的生物物種在不同的時間和空間中產生聲音，形成複雜的聲音群落結構。鳥類是最重要的生物聲源之一，它們的鳴叫不僅用於求偶和領域宣示，還承載著豐富的生態信息[86]。研究表明，鳥類群落的物種組成、豐度和多樣性都會反映在聲景的特徵中，因此聲音監測已成為生物多樣性評估的重要工具。昆蟲的鳴叫是另一個重要的生物聲源，特別是在熱帶和亞熱帶地區，昆蟲聲往往構成了聲景的主要背景。哺乳動物、兩棲動物等其他動物類群也對生態聲景做出重要貢獻。

聲音生態位（Acoustic Niche）理論是理解生物聲組織的重要概念。這一理論認為，不同的物種會在聲音的頻率和時間維度上分化，以避免聲音干擾和競爭[87]。例如，在同一生境中，不同的鳥類物種可能在不同的頻率範圍內鳴叫，或者在一天

中的不同時間段活躍。這種聲音生態位的分化使得多個物種能夠在同一環境中共存，形成複雜而和諧的聲音群落。人為噪音的侵入可能打破這種精細的聲音生態位結構，導致物種間的聲音干擾和競爭加劇，進而影響生物多樣性。

地球物理聲為生態聲景提供了重要的背景環境。風聲、水聲、雨聲等自然聲音不僅創造了聲景的基調，還為生物提供了重要的環境信息[88]。例如，許多動物能夠通過風聲和雨聲來判斷天氣變化，調整自己的行為模式；水聲為許多水生和兩棲動物提供了重要的導航信息。地球物理聲的變化往往反映了環境條件的變化，如氣候變化、地質活動等，因此監測地球物理聲的變化對於理解生態系統的動態具有重要意義。

人為聲對生態聲景的影響是當前研究的熱點問題。人為噪音不僅會掩蔽重要的自然聲音，還可能直接影響動物的行為和生理功能[89]。研究表明，交通噪音會影響鳥類的鳴叫行為，迫使它們提高鳴叫音量或改變鳴叫頻率；慢性噪音暴露會影響動物的繁殖成功率和生存能力；夜間人工照明和噪音會干擾動物的日夜節律。這些影響不僅威脅到個體動物的健康，還可能影響整個生態系統的結構和功能。

聲景連通性（Soundscape Connectivity）是生態聲景研究的重要概念。與傳統的生境連通性概念類似，聲景連通性關注的是聲音環境在空間上的連續性和完整性[90]。良好的聲景連通性有利於動物的聲音通訊、覓食導航和繁殖行為，而聲景的破碎化則可能阻礙動物的正常生活活動。城市化和基礎設施建設往往會破壞聲景的連通性，創造「聲音孤島」效應。因此，在規劃和設計中需要考慮聲景連通性的保護和修復。

季節性和日周期性是生態聲景的重要時間特徵。許多動物的聲音活動表現出明顯的季節性變化，如鳥類的繁殖季鳴叫、昆蟲的季節性出現等[91]。日周期變化也很顯著，許多動物有特定的活躍時間，如黎明和黃昏是許多鳥類最活躍的時期。這些時間模式不僅反映了生物的生理節律，還受到環境因素如溫度、濕度、光照等的影響。理解這些時間模式對於聲景的監測、評估和管理具有重要意義。

氣候變化對生態聲景產生了深遠影響。氣溫升高、降水模式改變、極端天氣事件

增加等氣候變化因素都會影響生物的分布、豐度和行為模式，進而影響生態聲景的特徵[92]。研究表明，許多鳥類的鳴叫時間和頻率都在發生變化，以適應變化的環境條件；一些物種的分布範圍發生遷移，改變了不同地區的聲景組成。氣候變化還可能影響聲音的傳播特性，如溫度和濕度的變化會影響聲音的傳播距離和衰減率。

保護區和國家公園在生態聲景保護中發揮著重要作用。這些受保護的區域往往保持著相對完整的自然聲景，為瀕危物種和敏感生境提供了聲音庇護所[93]。然而，即使是在保護區內，人為噪音的侵入仍然是一個嚴重問題。航空噪音、邊界交通噪音、遊客活動噪音等都可能影響保護區的聲景品質。因此，保護區的管理需要採用更加綜合的方法，不僅要保護視覺景觀和生物多樣性，還要保護聲景的完整性。

城市綠地的生態聲景功能正受到越來越多的關注。城市公園、綠化帶、濕地等綠色空間不僅為城市居民提供休憩場所，還可以成為城市生物多樣性的重要庇護所[94]。這些綠色空間的聲景特徵直接影響其生態功能的發揮。研究表明，聲景品質較好的城市綠地能夠支持更多的鳥類物種，而噪音污染嚴重的綠地則生物多樣性較低。因此，在城市綠地的規劃和管理中需要充分考慮聲景因素，通過合理的設計來改善聲音環境，提高綠地的生態價值。

3.3.1 生態旅遊與聲景 (Ecotourism and Soundscape)

生態旅遊與聲景的結合代表著旅遊業可持續發展的新方向，它不僅為遊客提供了全新的自然體驗方式，也為自然保護和地方經濟發展提供了創新的解決方案。聲景作為生態旅遊的重要組成部分，能夠豐富遊客的感官體驗，增強人與自然的連接，同時也成為評估生態系統健康狀況的重要指標[95]。這種新興的旅遊形式要求我們重新思考人類與自然環境的關係，從傳統的視覺導向轉向多感官的全面體驗，從而促進更深層次的環境教育和保護意識的提升。

聲景旅遊（Soundscape Tourism）作為生態旅遊的重要組成部分，其核心在於通過聆聽和體驗自然聲音來增進對自然環境的理解和欣賞。這種旅遊方式不同於傳統

的觀光旅遊，它強調的是靜態的聆聽和深度的體驗，而非快速的移動和大量的景點造訪[96]。聲景旅遊的參與者通常會在特定的自然環境中停留較長時間，專注於聆聽和識別不同的自然聲音，如鳥鳴、昆蟲聲、風聲、水聲等。這種深度體驗能夠幫助遊客建立與自然更加親密的關係，培養對環境保護的責任感。

自然聲音的多樣性是聲景旅遊的重要吸引力。不同的生態系統具有獨特的聲音特徵，為聲景旅遊提供了豐富的資源。熱帶雨林以其複雜的鳥類聲音群落和豐富的昆蟲合唱而聞名；溫帶森林則以其季節性的鳥類遷徙和多樣的哺乳動物聲音為特色；草原生態系統的風聲和草蟲聲創造了開闊而寧靜的聲音環境；海洋和湖泊的水聲為遊客提供了平靜和冥想的體驗[97]。每種生態系統的聲景都承載著獨特的生態信息和文化意義，為聲景旅遊提供了豐富的內容和主題。

聲景旅遊的體驗設計需要考慮多個因素。時間因素是最重要的考慮之一，因為許多動物的聲音活動具有明顯的時間模式。黎明和黃昏通常是鳥類最活躍的時期，被稱為「鳥類合唱」時間；夜間則是許多夜行動物如貓頭鷹、蝙蝠、青蛙等活躍的時期[98]。季節因素也很重要，春季是許多鳥類的繁殖季節，鳴叫活動最為頻繁；夏季昆蟲最為活躍；秋季則有候鳥遷徙的聲音。地點選擇需要考慮聲音的多樣性和清晰度，通常選擇遠離人為噪音干擾的自然環境。

聲景解說（Soundscape Interpretation）是生態旅遊中的重要教育工具。專業的解說員不僅需要具備豐富的生態學知識，還需要具備敏銳的聽覺識別能力和良好的溝通技巧[99]。解說內容通常包括聲音的生物學意義、生態功能、季節變化等方面。現代技術的應用為聲景解說提供了新的工具，如便攜式錄音設備可以記錄和重播聲音，智能手機應用程式可以幫助識別鳥類和其他動物的聲音，聲音可視化技術可以將聲音轉換為視覺圖像，幫助遊客更好地理解聲音的特徵。

聲景旅遊對當地社區的影響是多方面的。積極影響包括創造就業機會、增加收入來源、促進傳統文化的傳承等。許多土著社區具有豐富的自然聲音知識和傳統，他們可以成為優秀的聲景導遊和解說員[100]。聲景旅遊的發展也能夠促進環境保護意識的提高，因為良好的聲景環境是聲景旅遊的基礎。然而，旅遊活動也可能對聲景環境產生負面影響，如遊客噪音、交通噪音、設施建設等。因此，可持

續的聲景旅遊發展需要在經濟效益和環境保護之間找到平衡。

聲景旅遊基礎設施的設計需要特別考慮聲學因素。觀察點（Listening Points）的選擇和設計是關鍵要素，這些地點應該具有良好的聲學條件，能夠清晰地聽到目標聲音而最小化背景噪音的干擾[101]。步道設計需要考慮腳步聲和其他人為聲音對野生動物的影響，選擇合適的材料和路線設計來減少噪音產生。住宿設施的聲學設計也很重要，既要保證遊客的舒適度，又要最小化對自然聲景的干擾。一些生態旅遊地開始建設專門的聲景體驗中心，配備專業的聲音設備和教育設施。

技術創新為聲景旅遊提供了新的可能性。虛擬現實（VR）和擴增現實（AR）技術可以創造沉浸式的聲景體驗，讓遊客在無法親臨現場的情況下也能體驗到真實的自然聲景[102]。人工智能技術可以用於自動識別和分類自然聲音，為遊客提供實時的聲音識別服務。聲音地圖（Sound Maps）技術可以記錄和可視化不同地點的聲景特徵，幫助遊客規劃聲景體驗路線。這些技術的應用不僅豐富了聲景旅遊的體驗內容，也為聲景研究和保護提供了新的工具。

聲景旅遊的市場潛力正在得到越來越多的認識。研究表明，對自然聲音感興趣的遊客群體正在快速增長，特別是在發達國家的城市居民中[103]。這些遊客通常具有較高的教育水平和環保意識，願意為高品質的自然體驗支付較高的費用。聲景旅遊的市場細分包括觀鳥愛好者、自然攝影師、冥想練習者、環保主義者等不同群體。每個群體對聲景體驗的需求和偏好都有所不同，這為旅遊產品的多樣化發展提供了機會。

認證和品質控制是聲景旅遊可持續發展的重要保障。一些國際組織開始制定聲景旅遊的標準和認證體系，如國際生態旅遊協會（TIES）和世界自然保護聯盟（IUCN）等[104]。這些標準通常包括環境保護、社區參與、教育功能、經濟效益等多個方面的要求。認證體系的建立有助於規範聲景旅遊市場，保護消費者權益，促進行業的健康發展。

聲景旅遊與傳統文化的結合創造了獨特的文化體驗。許多土著文化都有豐富的自然聲音傳統，如模仿動物聲音的音樂、與自然節律同步的儀式等[105]。這些文化

傳統為聲景旅遊增添了深厚的文化內涵，也為文化保護和傳承提供了新的途徑。聲景旅遊的發展還可以促進不同文化之間的交流和理解，因為對自然聲音的欣賞往往超越了語言和文化的界限。

氣候變化對聲景旅遊的影響不容忽視。氣候變化導致的物種分布變化、繁殖時間變化、極端天氣事件增加等因素都會影響自然聲景的特徵和可預測性[106]。這對聲景旅遊的規劃和運營提出了新的挑戰，需要更加靈活和適應性的管理策略。同時，聲景旅遊也可以成為氣候變化教育的重要工具，通過親身體驗來增強遊客對氣候變化影響的認識。

3.3.2 自然保護區聲景 (Nature Reserve Soundscapes)

自然保護區聲景的保護和管理代表著生態保護工作的前沿發展，它將聲音環境作為生物多樣性和生態系統健康的重要指標，同時也作為保護目標本身加以重視。自然保護區的聲景具有獨特的價值，它們往往保存著相對完整和原始的自然聲音環境，為科學研究、環境教育和生態旅遊提供了珍貴的資源[107]。然而，即使在受到法律保護的自然保護區內，聲景環境也面臨著來自各方面的威脅和挑戰，這要求保護區管理者採用更加全面和前瞻性的管理策略。

自然保護區聲景的獨特性源於其相對完整的生態系統結構和較少的人為干擾。在這些區域中，生物聲、地球物理聲和人為聲之間的關係更接近自然狀態，生物聲通常佔據主導地位，地球物理聲提供背景環境，而人為聲被控制在最低水平[108]。這種聲景結構不僅為野生動物提供了適宜的聲音環境，也為研究自然聲景的原始狀態提供了重要的參考基準。許多保護區的聲景具有極高的複雜性和多樣性，包含了大量稀有和瀕危物種的聲音，這些聲音記錄對於物種保護和生態研究具有不可替代的價值。

生物多樣性與聲景多樣性之間存在密切的相關關係。研究表明，物種豐富度越高的區域，其聲景複雜性和多樣性也越高[109]。這種相關性使得聲景監測成為評估保護區生物多樣性狀況的有效工具。通過長期的聲音記錄和分析，研究者可以監測物種組成的變化、種群數量的波動、繁殖成功率的變化等重要生態指標。一些

研究還發現，聲景的變化往往比傳統的生物調查方法更早地反映出生態系統的變化，因此聲景監測可以作為生態系統健康的早期預警系統。

季節性變化是自然保護區聲景的重要特徵。不同季節的溫度、日照、降水等環境條件變化會影響動物的活動模式和聲音行為[110]。春季通常是繁殖季節，許多鳥類和哺乳動物的鳴叫活動達到高峰；夏季昆蟲最為活躍，形成豐富的昆蟲合唱；秋季有候鳥遷徙的聲音；冬季則相對安靜，但一些耐寒物種仍然活躍。這些季節性模式不僅反映了物種的生活史策略，也體現了生態系統的時間動態。保護區的管理需要充分考慮這些季節性變化，在不同季節採用不同的保護策略。

日周期變化也是自然保護區聲景的重要時間特徵。許多動物具有明顯的日夜活動模式，形成了典型的日周期聲景變化[111]。黎明合唱是許多溫帶地區最具特色的聲景現象，此時大多數鳥類同時開始鳴叫，創造了壯觀的聲音景觀。日間通常是鳥類最活躍的時期，各種鳥類在不同的時間段和頻率範圍內鳴叫。黃昏時分許多鳥類再次活躍，形成黃昏合唱。夜間則是夜行動物的活躍時期，如貓頭鷹、蝙蝠、青蛙、昆蟲等。這些日周期模式對於保護區的管理和研究具有重要意義。

人為噪音對自然保護區聲景的影響是當前面臨的主要威脅之一。儘管保護區受到法律保護，但許多類型的人為噪音仍然可能侵入保護區內部[112]。航空交通噪音是最嚴重的威脅之一，因為飛機噪音的傳播距離遠，影響範圍大，而且很難通過物理屏障來阻隔。邊界交通噪音也是重要的干擾源，特別是對於面積較小的保護區。軍事訓練活動、工業設施、基礎設施建設等都可能對保護區聲景產生影響。這些人為噪音不僅會掩蔽重要的自然聲音，還可能直接影響野生動物的行為和生理功能。

保護區內部的人類活動也需要仔細管理以保護聲景品質。科研活動、管理作業、遊客活動等都可能產生噪音影響[113]。現代的保護區管理強調最小化人為干擾的原則，這包括選擇低噪音的交通工具、限制活動時間和區域、採用靜音的科研設備等。一些保護區還設立了完全禁止人類活動的核心區域，以保護最原始的聲景環境。

聲景監測技術在自然保護區管理中發揮著越來越重要的作用。現代的聲音監測系統可以長期、連續地記錄聲景環境，為科研和管理提供大量的數據[114]。這些系統通常包括野外錄音設備、數據傳輸系統、數據存儲和分析軟體等組成部分。一些先進的系統還具有實時監測和自動報警功能，能夠及時發現聲景環境的異常變化。人工智能技術的應用使得大量聲音數據的分析和處理變得更加高效和精確。

聲景修復（Soundscape Restoration）是自然保護區管理的重要內容。對於那些聲景環境已經受到損害的保護區，需要採用積極的修復措施來改善聲景品質[115]。這可能包括消除或減少噪音源、改善棲息地條件以吸引野生動物回歸、重新引入已經消失的物種等。聲景修復往往是一個長期的過程，需要持續的監測和評估來確保修復效果。

氣候變化對自然保護區聲景的影響日益顯著。氣溫升高、降水模式改變、極端天氣事件增加等氣候變化因素都會影響物種的分布和行為，進而影響聲景的特徵[116]。一些物種可能向高緯度或高海拔地區遷移，改變了不同保護區的物種組成和聲景特徵。氣候變化還可能影響物種的繁殖時間和遷徙模式，導致傳統的季節性聲景模式發生變化。保護區管理需要考慮氣候變化的長期影響，採用適應性管理策略。

國際合作在自然保護區聲景保護中具有重要意義。許多候鳥和遷徙動物跨越國界活動，它們的保護需要國際協調和合作[117]。聲景數據的國際共享有助於理解物種的遷徙模式和生態需求。一些國際組織如國際鳥類保護聯盟（BirdLife International）、世界自然保護聯盟（IUCN）等在推動聲景保護的國際合作方面發揮了重要作用。

教育和科普功能是自然保護區聲景價值的重要體現。保護區的聲景為環境教育提供了生動的教材，幫助公眾理解生態系統的複雜性和生物多樣性的重要性[118]。許多保護區開展聲景體驗活動，如夜間聆聽、鳥類聲音識別培訓等，這些活動不僅豐富了遊客的體驗，也提高了公眾的環保意識。聲景記錄和研究成果還為科學教育提供了寶貴的資源。

3.3.3 環境永續與聲景 (Sustainable Soundscape Approaches)

環境永續與聲景的結合代表著 21 世紀環境管理和城市發展的前瞻性思維，它不僅關注當前聲音環境的品質，更重要的是考慮聲景管理對未來世代環境品質的影響。永續聲景方法（Sustainable Soundscape Approaches）強調在滿足當前社會經濟需求的同時，保護和改善聲音環境品質，確保未來世代也能享有良好的聲音環境[119]。這種方法需要整合生態學、社會學、經濟學和技術學等多個學科的知識，採用系統性和長期性的策略來實現聲景的可持續發展。

永續聲景的核心原則包括環境保護、社會公平和經濟可行性三個維度的平衡。環境保護維度要求聲景管理措施不僅要改善人類的聲音環境，還要考慮對生態系統和生物多樣性的影響[120]。這意味著在設計聲景改善方案時，需要避免對野生動物造成負面影響，保護重要的自然聲音環境，並促進生態系統的健康發展。社會公平維度要求聲景改善的效益能夠公平地分配給不同的社會群體，特別是要關注弱勢群體的聲景權益。經濟可行性維度則要求聲景管理措施在經濟上是可持續的，能夠在長期內維持和改善。

循環經濟理念在永續聲景中的應用為聲景管理提供了新的思路。傳統的聲景管理往往採用線性模式，即產生噪音-控制噪音-處理廢棄物，這種模式資源消耗大，環境影響大[121]。循環經濟模式則強調資源的循環利用和廢棄物的最小化。在聲景管理中，這可能包括利用廢棄材料製作聲學設施、回收利用舊的隔音材料、設計可重複使用的噪音控制設備等。一些創新的做法還包括將噪音轉化為能源，如利用交通振動發電、利用風力噪音發電等。

生態工程（Ecological Engineering）方法在永續聲景中佔據重要地位。這種方法利用自然生態系統的自我調節能力來改善聲音環境，而不是依賴於高能耗的技術設備[122]。例如，通過種植適當的植物來創造自然的隔音屏障，利用水體的聲音來掩蔽不受歡迎的噪音，設計人工濕地來改善聲音環境等。生態工程方法的優勢在於其可持續性強、維護成本低、生態效益好，同時還能提供額外的生態系統服務如碳儲存、水質淨化、生物多樣性保護等。

適應性管理（Adaptive Management）是永續聲景的重要管理方法。由於聲音環境是一個複雜的動態系統，受到多種因素的影響，傳統的靜態管理方法往往難以應對不斷變化的環境條件[123]。適應性管理強調在管理過程中持續學習和調整，根據監測結果和環境變化及時修正管理策略。這種方法需要建立完善的監測系統、靈活的管理機制和有效的反饋機制。在聲景管理中，適應性管理可能包括根據季節變化調整噪音控制措施、根據城市發展變化更新聲景規劃、根據氣候變化調整保護策略等。

社區參與是永續聲景的重要組成部分。可持續的聲景管理不能僅僅依靠政府和專業機構，還需要廣大社區居民的積極參與和支持[124]。社區參與可以採用多種形式，如聲景品質監測、噪音投訴處理、聲景改善項目實施、環境教育活動等。社區參與不僅能夠提高聲景管理的有效性，還能夠增強居民的環境意識和責任感，促進聲景保護文化的形成。一些成功的案例還顯示，社區參與能夠降低聲景管理的成本，提高項目的可持續性。

技術創新在永續聲景中發揮著關鍵作用。可持續的聲景技術應該具有低能耗、長壽命、可回收、環境友好等特徵[125]。近年來出現的一些創新技術包括：太陽能驅動的主動噪音控制系統、生物材料製成的吸音材料、智能化的噪音監測網絡、基於人工智能的聲景優化算法等。這些技術的發展不僅提高了聲景管理的技術水平，還降低了環境影響和運營成本。

政策整合是實現永續聲景的重要保障。聲景問題往往涉及多個政策領域，如環境保護、城市規劃、交通管理、建築管理等，需要在政策層面進行統籌協調[126]。永續聲景政策應該與其他環境政策、社會政策和經濟政策相協調，形成政策合力。一些國家和地區已經開始制定綜合性的聲景政策，將聲景考慮納入各項相關政策的制定和實施過程中。

經濟激勵機制對於推動永續聲景的發展具有重要作用。傳統的命令控制型政策往往效果有限，而經濟激勵機制能夠調動市場力量來推動聲景改善[127]。這些機制可能包括對低噪音技術的補貼、對噪音污染的徵稅、對聲景改善項目的資金支持、綠色聲學產品的認證制度等。一些地區還探索了聲景服務的市場化機制，如聲景

改善的有償服務、聲景品質的保險產品等。

國際合作對於推動全球永續聲景的發展具有重要意義。聲景問題往往具有跨界性，需要國際社會的協調合作[128]。聯合國可持續發展目標（SDGs）為聲景的可持續發展提供了國際框架，特別是目標 11（可持續城市和社區）和目標 15（陸地生物）等。國際組織如聯合國環境規劃署、世界衛生組織、國際標準化組織等在推動全球聲景標準化和合作方面發揮了重要作用。

教育和能力建設是永續聲景的重要基礎。可持續的聲景管理需要大量的專業人才和知識技能支持[129]。這包括聲學工程師、環境規劃師、生態學家、社會學家等各類專業人才的培養。教育體系需要更新課程內容，增加聲景相關的知識和技能培訓。終身學習和持續教育對於應對快速變化的技術和環境條件也很重要。一些國際組織和專業機構已經開始提供聲景專業認證和培訓課程。

評估和指標體系是衡量永續聲景成效的重要工具。傳統的聲學評估指標往往只關注物理參數，而永續聲景需要更加綜合的評估指標體系[130]。這個體系應該包括環境指標（如生物多樣性、生態系統健康）、社會指標（如居民滿意度、健康狀況）、經濟指標（如成本效益、就業創造）等多個維度。一些國際組織正在開發綜合性的永續聲景評估框架，為各國的實踐提供指導。

3.4 聲景規劃方法與工具 (Soundscape Planning Methods and Tools)

聲景規劃方法與工具的發展代表著聲景科學從理論研究向實際應用的重要轉變，它為城市規劃師、建築師、聲學工程師和環境管理者提供了系統性的方法論和技術手段來設計、實施和管理高品質的聲音環境。現代聲景規劃不再是單純的技術性工作，而是一個複雜的跨學科整合過程，需要結合聲學技術、環境科學、社會心理學、城市規劃學等多個領域的知識和方法[131]。隨著數位技術、人工智能和大數據分析技術的快速發展，聲景規劃的工具和方法也在不斷創新和完善，為實現更加精確、高效和可持續的聲景規劃提供了強大的技術支持。

聲景規劃方法論的核心是系統性思維和整合性方法。與傳統的噪音控制方法不同，

聲景規劃需要從整體的角度來理解和管理聲音環境，考慮聲音的來源、傳播、接收和感知的全過程，以及各個環節之間的相互作用和影響[132]。這種系統性方法要求規劃師不僅要關注聲音的物理特性，還要考慮聲音的社會文化意義、心理影響和生態功能。同時，聲景規劃還需要考慮不同時空尺度上的聲音變化，從微觀的建築聲學設計到宏觀的城市聲景規劃，從短期的日夜變化到長期的季節性和年際變化。

參與式規劃理念在現代聲景規劃中佔據重要地位。聲景的感知和評價具有很強的主觀性和文化相關性，不同的人群對同樣的聲音環境可能有完全不同的感受和評價[133]。因此，成功的聲景規劃必須充分考慮和整合各個利益相關者的觀點和需求，包括當地居民、企業、政府部門、專業機構等。參與式規劃不僅能夠提高規劃的科學性和有效性，還能夠增強公眾的認同感和參與度，為規劃的實施和維護提供重要的社會支持。

數據驅動的規劃方法正在成為聲景規劃的重要趨勢。現代信息技術使得大規模的聲音數據收集、存儲和分析成為可能，為聲景規劃提供了豐富的基礎數據和科學依據[134]。這些數據不僅包括傳統的聲學測量數據，還包括社會調查數據、行為觀察數據、生理心理測量數據等多種類型。大數據分析技術能夠從這些海量數據中發現規律和趨勢，為規劃決策提供科學支持。人工智能技術的應用還使得聲景的自動識別、分類和評估成為可能，大大提高了規劃工作的效率和精度。

多尺度規劃方法體現了聲景規劃的複雜性和層次性。聲景現象存在於不同的空間和時間尺度上，從房間尺度的室內聲學到城市尺度的整體聲景，從瞬時的聲音事件到長期的聲景演變[135]。多尺度規劃方法要求規劃師在不同的尺度上採用不同的規劃策略和工具，同時確保不同尺度之間的協調和一致性。例如，在建築尺度上可能關注室內外聲學設計，在街區尺度上可能關注交通噪音控制，在城市尺度上可能關注聲景的整體布局和管理。

情景規劃（Scenario Planning）方法在聲景規劃中的應用幫助規劃師應對不確定性和複雜性。聲音環境受到多種因素的影響，包括城市發展、技術變化、社會變遷、氣候變化等，這些因素的未來發展具有很大的不確定性[136]。情景規劃通過

構建不同的未來情景來分析各種可能的發展路徑及其對聲景的影響，幫助規劃師制定更加靈活和適應性的規劃策略。這種方法特別適用於長期規劃和戰略規劃，能夠提高規劃的前瞻性和韌性。

整合評估方法（Integrated Assessment）在聲景規劃中發揮著重要作用。聲景規劃的效果需要從多個維度進行評估，包括聲學效果、環境影響、社會效益、經濟成本等[137]。整合評估方法能夠將這些不同維度的評估結果統一到一個框架中，為規劃決策提供綜合的依據。這種方法通常採用多準則決策分析、成本效益分析、生命週期評估等技術工具，能夠幫助規劃師權衡不同方案的優缺點，選擇最優的規劃方案。

適應性規劃理念強調規劃的動態性和靈活性。聲音環境是一個不斷變化的系統，受到技術進步、社會發展、環境變化等多種因素的影響[138]。傳統的靜態規劃方法往往難以應對這種變化，而適應性規劃則強調在規劃實施過程中持續監測、學習和調整。這種方法需要建立完善的監測體系、靈活的管理機制和有效的反饋循環，確保規劃能夠及時響應環境變化和新的需求。

3.4.1 聲景地圖製作 (Soundscape Mapping)

聲景地圖製作是現代城市聲景管理和規劃中最重要的技術工具之一，它將複雜的聲音信息以視覺化的方式呈現，為決策者、規劃師和公眾提供直觀的聲景信息。聲景地圖不同於傳統的噪音地圖，它不僅包含聲音的物理特性，還整合了人們對聲音環境的感知和評價，體現了聲景研究中「以人為本」的核心理念[139]。隨著地理信息系統（GIS）技術、遙感技術、移動通信技術和人工智能技術的快速發展，聲景地圖製作的技術水平和應用範圍都在不斷提升，為城市聲景的科學管理和精細化治理提供了強有力的技術支撐。

聲景地圖的概念框架建立在對聲景多維性質的深刻理解之上。根據 ISO 12913 標準的定義，聲景是人們在特定情境下對聲學環境的感知、體驗和理解，這意味著聲景地圖需要整合物理聲學數據、心理聲學數據和社會文化數據[140]。物理聲學數據包括聲壓級、頻譜特性、時間變化等客觀測量指標；心理聲學數據包括響度、

尖銳度、粗糙度等感知指標；社會文化數據包括聲音的意義、偏好、煩惱度等主觀評價指標。這種多維度的數據整合使得聲景地圖能夠提供比傳統噪音地圖更加豐富和準確的信息。

聲景地圖製作的技術流程通常包括數據收集、數據處理、空間分析、地圖製作和驗證更新等幾個主要步驟。數據收集階段需要運用多種技術手段獲取聲景相關數據，包括固定監測站的連續測量、移動測量的空間掃描、問卷調查的主觀數據收集等[141]。現代的數據收集越來越依賴於自動化和智能化的設備，如無線傳感器網絡、智能手機應用、無人機搭載的測量設備等。這些技術的應用不僅提高了數據收集的效率和覆蓋範圍，還降低了數據收集的成本和人力需求。

空間插值技術是聲景地圖製作中的關鍵技術環節。由於不可能在每個地點都進行實地測量，需要通過空間插值方法來估算未測量點的聲景特徵[142]。傳統的插值方法如反距離權重法、克里金插值法等在聲景地圖中仍有應用，但這些方法往往假設聲音在空間中的分布是連續和平滑的，而實際的城市聲景往往具有很強的空間異質性。現代的插值方法更多地考慮了城市環境的複雜性，如利用建築物、道路、地形等地理信息來指導插值過程，或者採用機器學習方法來建立聲景與環境因子之間的複雜關係模型。這些先進的插值方法能夠更好地反映城市聲景的空間分布特徵，提高地圖的準確性和可信度。

多源數據融合技術在聲景地圖製作中發揮著越來越重要的作用。現代城市中存在多種類型的聲音監測設備和數據來源，包括政府設置的環境監測站、研究機構的科學測量、企業的自主監測、公眾的志願測量等[143]。這些不同來源的數據在質量、精度、時空覆蓋範圍等方面存在差異，需要通過數據融合技術來整合利用。先進的數據融合方法能夠根據不同數據源的特點和可靠性給予不同的權重，通過多源信息的協同來提高整體的數據質量和地圖精度。

三維聲景地圖的發展代表著聲景地圖技術的重要進展。傳統的二維地圖只能展示地面層的聲景信息，而城市中的聲音環境具有明顯的垂直分層特徵，不同高度的聲景條件可能存在顯著差異[144]。三維聲景地圖能夠展示聲音在垂直空間中的分布變化，為高層建築的聲學設計、立體交通系統的噪音評估、城市峽谷效應的

分析等提供重要參考。三維地圖的製作需要更加複雜的測量技術和建模方法，如利用無人機進行垂直剖面測量、採用聲學模擬軟體進行三維聲場計算等。

時間維度的整合是聲景地圖製作面臨的重要挑戰。聲音環境具有很強的時間變化特性，包括日夜週期、工作日週末差異、季節性變化等[145]。靜態的聲景地圖難以反映這種時間動態，而動態地圖的製作則需要大量的時間序列數據和複雜的處理技術。現代的解決方案包括製作時間序列地圖組、開發互動式的時間滑塊、建立時空數據庫等。一些先進的系統還能夠提供實時的聲景地圖更新，反映當前的聲音環境狀況。

公眾參與式地圖製作（Participatory Mapping）為聲景地圖增添了重要的社會維度。專業的聲學測量雖然能夠提供精確的物理數據，但往往缺乏對聲音社會文化意義的理解[146]。公眾參與式地圖製作通過智能手機應用、網路平台等工具收集公眾的聲景感知和評價數據，這些數據雖然在精度上可能不如專業測量，但在反映真實的人類感受方面具有不可替代的價值。一些成功的項目如歐洲的"Cities & Soundscapes"、美國的"Sounds of New York City"等都採用了公眾參與的方法。

聲景地圖的視覺化設計對於地圖的易讀性和有效性具有重要影響。與傳統的噪音地圖主要使用顏色漸變來表示分貝數值不同，聲景地圖需要展示更加複雜和多維的信息[147]。現代的視覺化設計採用多種圖形元素，如顏色、形狀、大小、透明度、動畫等來編碼不同類型的聲景信息。例如，可以用顏色表示聲音的響度，用符號表示聲音的類型，用動畫表示聲音的時間變化。一些創新的設計還嘗試用聲音本身來增強地圖的表現力，如聲音地圖（Audio Maps）允許用戶點擊地圖上的位置來聽取該位置的實際聲音錄音。

機器學習和人工智能技術的應用正在革命性地改變聲景地圖製作的方法和效率。傳統的聲景分析往往需要大量的人工處理，如聲音識別、分類、評價等，這些工作不僅耗時耗力，還可能受到主觀因素的影響[148]。機器學習技術能夠自動識別和分類不同類型的聲音，如交通聲、自然聲、人聲等；深度學習技術能夠從大量數據中學習聲景與環境因子之間的複雜關係；強化學習技術能夠優化聲景測量的策略和資源配置。這些技術的應用不僅提高了地圖製作的自動化程度，還提高了

結果的客觀性和一致性。

雲計算和邊緣計算技術為聲景地圖的實時處理和分析提供了強大的計算支持。聲景數據的處理往往需要大量的計算資源，特別是對於大尺度、高精度的地圖製作[149]。雲計算平台能夠提供彈性的計算資源，支持大規模並行處理；邊緣計算技術則能夠在數據源附近進行預處理，減少數據傳輸的延遲和帶寬需求。這些技術的結合使得實時聲景地圖和大規模聲景監測成為可能。

聲景地圖的標準化和互操作性是推動技術發展和應用推廣的重要因素。目前，聲景地圖的製作方法和數據格式還缺乏統一的國際標準，不同機構和項目採用的方法和格式往往不兼容[150]。國際標準化組織（ISO）正在制定相關的技術標準，如 ISO/TS 12913 系列標準為聲景評估和地圖製作提供了技術框架。歐洲環境署（EEA）也在推動噪音和聲景地圖的標準化工作。這些標準化努力有助於提高地圖的質量和可比性，促進數據共享和國際合作。

聲景地圖的應用領域正在不斷擴展。除了傳統的城市規劃和環境管理應用外，聲景地圖還在房地產評估、旅遊推廣、健康評估、教育科普等領域發揮作用[151]。房地產行業開始利用聲景地圖來評估物業的環境品質；旅遊部門利用聲景地圖來推廣安靜的旅遊目的地；健康部門利用聲景地圖來識別健康風險區域；教育機構利用聲景地圖來進行環境教育。這些多元化的應用推動了聲景地圖技術的進一步發展和完善。

3.4.2 參與式規劃方法 (Participatory Planning Methods)

參與式規劃方法在聲景規劃中的應用代表著從專家主導向民主參與的重要轉變，它認識到聲景的感知和評價具有很強的主觀性和文化相關性，因此必須充分納入公眾的觀點和需求。這種方法不僅能夠提高規劃的科學性和有效性，還能夠增強公眾的環境意識和參與度，促進聲景保護文化的形成[152]。參與式聲景規劃的核心理念是將聲景的使用者、受影響者和其他利益相關方作為規劃過程的積極參與者，而不僅僅是被動的接受者，通過多方協作來制定更加符合實際需求和社會期望的聲景改善方案。

參與式聲景規劃的理論基礎建立在民主規劃理論、環境正義理論和社會建構主義理論之上。民主規劃理論強調規劃過程應該是開放和包容的，所有受影響的群體都應該有機會表達自己的觀點和需求[153]。環境正義理論關注環境品質的公平分配，強調弱勢群體的環境權益應該得到特別保護。社會建構主義理論認為聲景的意義是通過社會互動過程建構的，不同的社會群體可能對同樣的聲音環境有不同的理解和評價。這些理論為參與式聲景規劃提供了重要的思想基礎。

利益相關方識別和分析是參與式聲景規劃的重要起點。聲景問題往往涉及多個利益群體，包括當地居民、企業經營者、政府部門、專業機構、環保組織等，每個群體都有自己的利益關切和參與動機[154]。有效的利益相關方分析需要識別所有相關群體，分析他們的利益關係、影響力和參與能力，制定針對性的參與策略。特別需要關注那些可能被邊緣化的群體，如低收入居民、老年人、殘障人士等，確保他們的聲音能夠被聽到和重視。

參與式規劃的方法體系包括多種具體的參與技術和工具。傳統的參與方法如公眾聽證會、問卷調查、焦點小組討論等在聲景規劃中仍有重要作用，但需要根據聲景的特殊性進行調整和改進[155]。例如，聲景問卷調查需要設計專門的聲音感知評價量表；焦點小組討論可以結合聲音播放來進行；公眾聽證會可以在實際的聲景環境中舉行。這些調整有助於提高參與的針對性和有效性。

聲景漫步（Soundwalking）是參與式聲景規劃中最具特色的方法之一。這種方法由 R. Murray Schafer 在 1970 年代首先提出，通過組織參與者在特定的環境中行走和聆聽，來收集他們對聲景的直接感受和評價[156]。聲景漫步不僅能夠收集到豐富的感知數據，還能夠提高參與者對聲音環境的敏感性和理解力。現代的聲景漫步往往結合 GPS 定位、錄音設備、移動應用等技術手段，能夠精確記錄參與者的位置、聲音環境和感受評價，為後續的分析和規劃提供詳細的數據支持。

參與式聲景地圖製作是將參與式方法與現代技術相結合的創新實踐。通過智能手機應用、網路平台等工具，公眾可以隨時隨地記錄和分享自己的聲景體驗[157]。這些眾包數據雖然在精度上可能不如專業測量，但在覆蓋範圍、時效性和代表性

方面具有明顯優勢。一些成功的項目如"Hush City"應用允許用戶標記和評價城市中的安靜地點，"Chattanooga Sound Map"項目收集了大量市民的聲音錄音和評價。這些項目不僅為規劃提供了寶貴的數據，還提高了公眾的聲景意識。

共同設計（Co-design）方法在聲景規劃中的應用體現了參與式規劃的高級形式。與傳統的專家設計方法不同，共同設計讓公眾直接參與到聲景改善方案的設計過程中[158]。這種方法通常採用設計工作坊的形式，專業設計師和社區居民共同討論問題、生成創意、評估方案。共同設計的優勢在於能夠充分利用居民的地方知識和生活經驗，設計出更加符合實際需求的解決方案。同時，參與設計過程也能夠增強居民對項目的認同感和歸屬感。

數位化參與平台為參與式聲景規劃提供了新的可能性。傳統的參與方式往往受到時間、地點、語言等因素的限制，而數位化平台能夠打破這些限制，提供更加便利和靈活的參與途徑[159]。現代的參與平台通常具有多種功能，如在線調查、討論論壇、投票表決、方案展示等。一些先進的平台還集成了虛擬現實、擴增現實等技術，能夠為參與者提供沉浸式的聲景體驗。這些技術創新不僅提高了參與的便利性，還擴大了參與的範圍和深度。

文化敏感性是參與式聲景規劃必須考慮的重要因素。不同的文化背景會影響人們對聲音的感知、理解和評價，因此參與式規劃必須充分考慮文化多樣性[160]。這包括語言的多樣性、價值觀的差異、生活方式的不同等。在多元文化的城市中，參與式規劃可能需要採用多語言的溝通方式、不同的參與形式、靈活的時間安排等來適應不同文化群體的需求。文化敏感性的考慮不僅有助於提高參與的包容性，還能夠豐富聲景規劃的文化內涵。

參與式規劃的品質控制是確保規劃有效性的重要環節。由於參與式規劃涉及大量的非專業參與者，如何確保參與的品質和代表性是一個重要挑戰[161]。品質控制的措施可能包括參與者的培訓教育、數據的交叉驗證、專家的技術指導等。同時，還需要建立適當的激勵機制來維持參與者的積極性，如提供參與證書、舉辦成果展示、建立社區認可制度等。

衝突管理和共識建構是參與式聲景規劃中的重要技能。不同的利益群體往往對聲景問題有不同的看法和需求，這可能導致意見分歧和利益衝突[162]。有效的衝突管理需要採用適當的溝通技巧、協調程序和決策機制。常用的方法包括分階段討論、小組輪換、匿名投票、專業調解等。共識建構的目標不是要求所有人都同意，而是要找到大多數人都能接受的解決方案。

參與式規劃的評估和反饋是確保規劃持續改進的重要機制。參與式規劃不是一次性的活動，而是一個持續的過程，需要定期評估參與的效果和規劃的成果[163]。評估的內容可能包括參與的廣度和深度、決策的民主性和透明度、規劃方案的可行性和接受度等。反饋機制則確保評估結果能夠及時傳達給參與者，並用於改進後續的規劃工作。

3.4.3 聲景影響評估 (Soundscape Impact Assessment)

聲景影響評估代表著環境影響評估領域的重要進展，它將聲景概念引入傳統的環境評估框架，提供了更加全面和人性化的聲音環境影響分析方法。與傳統的噪音影響評估主要關注聲音的物理特性不同，聲景影響評估強調聲音環境對人類感知、體驗和福祉的綜合影響[164]。這種評估方法不僅考慮聲音的負面影響，還關注聲音的正面價值和文化意義，為決策者提供更加平衡和客觀的評估結果。隨著國際標準的建立和技術方法的完善，聲景影響評估正在成為環境管理和城市規劃中不可或缺的工具。

聲景影響評估的理論框架建立在聲景科學的最新研究成果之上。根據 ISO 12913 標準的定義，聲景是人們在特定情境下對聲學環境的感知、體驗和理解，這意味著聲景影響評估需要從多個層面來分析聲音環境的影響[165]。生理層面的影響包括聽力損害、心血管影響、免疫系統影響等客觀的健康效應；心理層面的影響包括煩惱、壓力、情緒變化等主觀的心理反應；行為層面的影響包括活動模式變化、空間使用變化、社會互動變化等行為表現；社會層面的影響包括社區凝聚力、文化認同、環境公平等社會效應。

聲景影響評估的方法論整合了定量分析和定性分析的方法。定量分析方法主要包

括聲學測量、心理聲學分析、統計建模等技術手段，用於客觀地描述和量化聲音環境的特徵和影響[166]。聲學測量提供聲音的物理特性數據，如聲壓級、頻譜分布、時間變化等；心理聲學分析將物理聲學參數轉換為人類感知參數，如響度、尖銳度、粗糙度等；統計建模則用於分析聲音環境與人類反應之間的量化關係。定性分析方法主要包括問卷調查、深度訪談、參與式觀察等社會科學方法，用於了解人們對聲音環境的主觀感受和社會文化評價。

基線聲景評估是聲景影響評估的重要組成部分。在評估任何開發項目或政策措施的聲景影響之前，首先需要全面了解現有的聲景狀況，建立評估的基準線[167]。基線評估通常包括現有聲音環境的物理特徵、社區居民的聲景感知、重要的聲音資源和聲景價值等內容。基線評估需要考慮聲景的時間變化特徵，包括日夜變化、季節變化等，確保評估結果的代表性和完整性。現代的基線評估越來越依賴於長期監測和大數據分析，能夠更加準確地刻劃聲景的動態特徵。

影響預測是聲景影響評估的核心環節。與傳統的噪音預測主要依靠聲學模型不同，聲景影響預測需要整合聲學模型、心理聲學模型和社會科學模型[168]。聲學模型用於預測項目實施後的聲音環境變化；心理聲學模型用於預測這些變化對人類感知的影響；社會科學模型用於預測感知變化對行為和社會的影響。現代的影響預測越來越依賴於機器學習和人工智能技術，能夠處理更加複雜的非線性關係和多因子交互作用。

累積影響評估是聲景影響評估面臨的重要挑戰。單個項目的聲景影響可能相對有限，但多個項目的累積影響可能是顯著的[169]。累積影響評估需要考慮時間累積（同一地點多個時期的影響）和空間累積（同一地區多個項目的影響），以及不同類型影響之間的協同效應和拮抗效應。這種評估往往需要區域尺度的分析框架和跨部門的協調機制，是目前聲景影響評估的難點之一。

敏感性受體識別是聲景影響評估的重要內容。不同的人群和環境對聲景變化的敏感性差異很大，需要特別關注那些高敏感性的受體[170]。人群敏感性方面，兒童、老年人、患病人群等對聲音環境的變化更加敏感；環境敏感性方面，學校、醫院、住宅區、自然保護區等對聲景品質有更高的要求。敏感性受體的識別不僅影響影

響預測的重點，還影響緩解措施的設計和監測計劃的制定。

正面影響評估是聲景影響評估區別於傳統噪音評估的重要特徵。許多開發項目不僅可能產生負面的聲景影響，還可能帶來正面的聲景改善[171]。例如，城市公園項目可能會增加自然聲音，改善周邊的聲景品質；交通改善項目可能會減少交通噪音，提升居民的生活品質。正面影響評估需要採用專門的評估方法和指標體系，如聲景品質指數、聲景多樣性指數、聲景文化價值評估等。

緩解措施設計是聲景影響評估的重要輸出。基於影響評估的結果，需要設計相應的緩解措施來避免、減少或補償負面影響，同時增強正面影響[172]。聲景緩解措施通常包括源頭控制（減少噪音產生）、傳播路徑控制（阻隔噪音傳播）、受體保護（保護敏感受體）和聲景增強（增加正面聲音）等類型。現代的緩解措施設計越來越重視生態友好和可持續性，如採用綠色基礎設施、自然解決方案等。

監測計劃制定是確保聲景影響評估有效性的重要保障。監測計劃需要包括監測指標、監測點位、監測頻次、監測方法等內容[173]。聲景監測不僅要包括傳統的聲學監測，還要包括聲景感知監測、社會影響監測等。現代的監測計劃越來越依賴於自動化監測設備和實時數據傳輸，能夠提供及時的預警和反饋。一些先進的系統還集成了公眾參與功能，允許社區居民參與監測過程。

不確定性分析是提高聲景影響評估科學性的重要手段。聲景影響評估涉及多個學科領域和複雜的因果關係，存在多種來源的不確定性[174]。這些不確定性可能來自於數據的限制、模型的簡化、預測的困難等方面。不確定性分析通過敏感性分析、蒙特卡羅模擬、模糊數學等方法來量化和管理不確定性，為決策提供風險信息。

利益相關方參與是聲景影響評估的重要組成部分。聲景的感知和評價具有很強的主觀性和文化相關性，需要充分納入利益相關方的觀點和需求[175]。參與的形式可能包括公眾諮詢、專家評議、社區工作坊等。現代的參與方式越來越依賴於數位化平台和社交媒體，能夠擴大參與的範圍和深度。有效的利益相關方參與不僅能夠提高評估的準確性，還能夠增強決策的社會接受度。

參考文獻

[1] International Organization for Standardization. (2014). ISO 12913-1:2014 Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework. Geneva: ISO.

[2] United Nations Environment Programme. (2022). Frontiers 2022: Noise, Blazes and Mismatches — Emerging Issues of Environmental Concern. Nairobi: UNEP.

[3] World Health Organization Regional Office for Europe. (2018). Environmental noise guidelines for the European Region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

[4] Schafer, R. M. (1977). The Tuning of the World. New York: Knopf.

[5] European Parliament and Council. (2002). Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council relating to the assessment and management of environmental noise. Official Journal of the European Communities, L 189, 12-25.

[6] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world. Rochester, VT: Destiny Books.

[7] International Organization for Standardization. (2018). ISO/TS 12913-2:2018 Acoustics — Soundscape — Part 2: Data collection and reporting requirements. Geneva: ISO.

[8] Francis, C. D., Newman, P., Taff, B. D., White, C., Monz, C. A., Levenhagen, M., ... & Newton, A. (2017). Acoustic environments matter: Synergistic benefits to humans and ecological communities. Journal of Environmental Management, 203, 245-254.

[9] Kang, J., Aletta, F., Margaritis, E., & Yang, M. (2018). A model for implementing

soundscape maps in smart cities. Noise Mapping, 5(1), 46-59.

[10] Zhang, Y., & Kang, J. (2017). Effects of soundscape on the environmental restoration in urban natural environments. Noise and Health, 19(87), 65-72.

[11] Ratcliffe, E. (2021). Sound and soundscape in restorative natural environments: A narrative literature review. Frontiers in Psychology, 12, 570563.

[12] Ma, K. W., Mak, C. M., & Wong, H. M. (2021). Effects of environmental sound quality on soundscape preference in a public urban space. Applied Acoustics, 171, 107570.

[13] Fowler, M. D. (2013). Soundscape as a design strategy for landscape architectural praxis. Design Studies, 34(1), 111-128.

[14] Brown, A. L., Kang, J., & Gjestland, T. (2011). Towards standardization in soundscape preference assessment. Applied Acoustics, 72(6), 387-392.

[15] Aletta, F., & Kang, J. (2015). Soundscape approach integrating noise mapping techniques: A case study in Brighton, UK. Noise Mapping, 2(1), 1-12.

[16] Dumyahn, S. L., & Pijanowski, B. C. (2011). Soundscape conservation. Landscape Ecology, 26(9), 1327-1344.

[17] Yang, M., & Kang, J. (2013). Psychoacoustical evaluation of natural and urban sounds in soundscapes. Journal of the Acoustical Society of America, 134(1), 840-851.

[18] Axelsson, Ö., Nilsson, M. E., & Berglund, B. (2010). A principal components model of soundscape perception. Journal of the Acoustical Society of America, 128(5), 2836-2846.

[19] International Organization for Standardization. (2019). ISO/TS 12913-3:2019 Acoustics — Soundscape — Part 3: Data analysis. Geneva: ISO.

[20] Bild, E., Coler, M., Pfeffer, K., & Bertolini, L. (2016). Considering sound in planning and designing public spaces: A review of theory and applications and a proposed framework for integrating research and practice. Journal of Planning Literature, 31(4), 419-434.

[21] Asdrubali, F., D'Alessandro, F., Baldinelli, G., Schulte-Fortkamp, B., & Jake, P. (2014). From the soundscape to the architectural redevelopment of an outdoor public space. Forum Acusticum, 2014, 1-6.

[22] Margaritis, E., & Kang, J. (2017). Soundscape mapping in environmental noise management and urban planning: Case studies in two UK cities. Noise Mapping, 4(1), 87-103.

[23] Kang, J. (2007). Urban sound environment. London: Taylor & Francis.

[24] Van Renterghem, T., Hornikx, M., Forssen, J., & Botteldooren, D. (2013). The potential of building envelope greening to achieve quietness. Building and Environment, 61, 34-44.

[25] Jeon, J. Y., Lee, P. J., You, J., & Kang, J. (2010). Perceptual assessment of quality of urban soundscapes with combined noise sources and water sounds. Journal of the Acoustical Society of America, 127(3), 1357-1366.

[26] Coensel, B. D., Vanwetswinkel, S., & Botteldooren, D. (2011). Effects of natural sounds on the perception of road traffic noise. Journal of the Acoustical Society of America, 129(4), EL148-EL153.

[27] Schulte-Fortkamp, B., & Fiebig, A. (2006). Soundscape analysis in a residential

area: An evaluation of noise and people's mind. Acta Acustica United with Acustica, 92(6), 875-880.

[28] Hong, J. Y., & Jeon, J. Y. (2013). Designing sound and visual components for enhancement of urban soundscapes. Journal of the Acoustical Society of America, 134(3), 2026-2036.

[29] Xiao, J., Lavia, L., & Kang, J. (2018). Towards an agile participatory urban soundscape planning framework. Journal of Environmental Planning and Management, 61(4), 677-698.

[30] Pouya, S. (2017). The role of landscape architecture on soundscape experience. Turkish Journal of Forest Science, 1(2), 111-123.

[31] Hong, J. Y., & Jeon, J. Y. (2014). Soundscape mapping in urban contexts using GIS techniques. Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings, 249(1), 6915-6924.

[32] Dzhambov, A. M., & Dimitrova, D. D. (2014). Urban green spaces' effectiveness as a psychological buffer for the negative health impact of noise pollution: A systematic review. Noise and Health, 16(70), 157-165.

[33] Van Renterghem, T., Botteldooren, D., & Verheyen, K. (2012). Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth. Journal of Sound and Vibration, 331(10), 2404-2425.

[34] Galbrun, L., & Ali, T. T. (2013). Acoustical and perceptual assessment of water sounds and their use over road traffic noise. Journal of the Acoustical Society of America, 133(1), 227-237.

[35] Kang, J., & Zhang, M. (2010). Semantic differential analysis of the soundscape in

urban open public spaces. Building and Environment, 45(1), 150-157.

[36] Yu, L., & Kang, J. (2008). Effects of social, demographical and behavioural factors on the sound level evaluation in urban open spaces. Journal of the Acoustical Society of America, 123(2), 772-783.

[37] Botteldooren, D., Coensel, B. D., & Muer, T. D. (2006). The temporal structure of urban soundscapes. Journal of Sound and Vibration, 292(1-2), 105-123.

[38] Adams, M., Cox, T., Moore, G., Croxford, B., Refaee, M., & Sharples, S. (2006). Sustainable soundscapes: Noise policy and the urban experience. Urban Studies, 43(13), 2385-2398.

[39] Brown, A. L. (2004). An approach to soundscape planning. Acoustics Australia, 32(2), 59-64.

[40] Kang, J. (2017). Urban soundscape planning. In J. Kang & B. Schulte-Fortkamp (Eds.), Soundscape and the Built Environment (pp. 269-292). Boca Raton: CRC Press.

[41] Schafer, R. M. (2013). Acoustic ecology review. Acoustic Ecology Review, 1(1), 1-7.

[42] De Paiva Vianna, K. M., Cardoso, M. R. A., & Rodrigues, R. M. C. (2015). Noise pollution and annoyance: An urban soundscapes study. Noise and Health, 17(76), 125-133.

[43] Brown, A. L., & Muhar, A. (2004). An approach to the acoustic design of outdoor space. Journal of Environmental Planning and Management, 47(6), 827-842.

[44] Newman, P., & Jennings, I. (2008). Cities as sustainable ecosystems: Principles and practices. Washington: Island Press.

[45] Can, A., Deufraigne, L., & Petit, G. (2015). Exposure of cyclists to air pollution and noise in the Brussels-Capital Region. Environmental Research, 136, 19-29.

[46] Dzhambov, A. M., Markevych, I., Hartig, T., Tilov, B., Arabadzhiev, Z., Stoyanov, D., ... & Dimitrova, D. D. (2018). Multiple pathways link urban green- and bluespace to mental health in young adults. Environmental Research, 166, 223-233.

[47] Kang, J. (2002). Acoustics of long enclosures with multiple sources. Journal of the Acoustical Society of America, 112(6), 2684-2689.

[48] Liu, J., Kang, J., Luo, T., Behm, H., & Coppack, T. (2013). Spatiotemporal variability of soundscapes in a multiple functional urban area. Landscape and Urban Planning, 115, 1-9.

[49] World Health Organization. (2021). Road traffic noise in Europe: Burden of disease and mitigation strategies. Geneva: WHO Press.

[50] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020. Copenhagen: EEA.

[51] Murphy, E., & King, E. A. (2014). Environmental noise pollution: Noise mapping, public health, and policy. Amsterdam: Elsevier.

[52] Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., & Stansfeld, S. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. The Lancet, 383(9925), 1325-1332.

[53] Casey, J. A., Morello-Frosch, R., Mennitt, D. J., Fristrup, K., Ogburn, E. L., & James, P. (2017). Race/ethnicity, socioeconomic status, residential segregation, and spatial variation in noise exposure in the contiguous United States. Environmental

Health Perspectives, 125(7), 077017.

[54] Nelson, J. P. (2004). Meta-analysis of airport noise and hedonic property values. Journal of Transport Economics and Policy, 38(1), 1–27.

[55] Licitra, G., Chiari, C., Ascari, E., & Palazzuoli, D. (2011). Quiet area definition in the implementation of European Directive 2002/49/EC. NZ Acoustics, 24(4), 12-18.

[56] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Tyre/road noise reference book. Kisa: Informex.

[57] European Commission. (2017). Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the implementation of the Environmental Noise Directive. Brussels: European Commission.

[58] Radicchi, A. (2017). Beyond the noise: Open source soundscapes—A mixed methodology to analyse, evaluate and plan "everyday" quiet areas. Proceedings of Meetings on Acoustics, 30(1), 040005.

[59] Farina, A., & Gage, S. H. (2017). Ecoacoustics: The ecological role of sounds. Hoboken: John Wiley & Sons.

[60] Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: The science of sound in the landscape. BioScience, 61(3), 203-216.

[61] European Union. (2002). Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. Official Journal, L 189, 12-25.

[62] Kaplan, R., & Kaplan, S. (1989). The experience of nature: A psychological

perspective. Cambridge: Cambridge University Press.

[63] Votsi, N. E. P., Drakou, E. G., Mazaris, A. D., & Kallimanis, A. S. (2012). Distance-based assessment of open country quiet areas in Greece. Landscape and Urban Planning, 104(3-4), 279-288.

[64] Aspuru, I., García, I., Bartalucci, C., Borchi, F., Carfagni, M., Governi, L., ... & Luzzi, S. (2016). LIFE+ 2010 QUADMAP Project: a new methodology to select, analyze and manage Quiet Urban Areas defined by the European Directive 2002/49/EC. Noise Mapping, 3(1), 120-139.

[65] Votsi, N. E. P., Kallimanis, A. S., & Pantis, J. D. (2017). The distribution and importance of Quiet Areas in the EU. Applied Acoustics, 116, 1-7.

[66] Weber, M. (2012). The soundscape of nature areas: Assessment and review of research approaches. Acoustics 2012, 1-8.

[67] Fang, C. F., & Ling, D. L. (2003). Investigation of the noise reduction provided by tree belts. Landscape and Urban Planning, 63(4), 187-195.

[68] Watts, G., Pheasant, R., & Horoshenkov, K. (2011). Predicting perceived tranquillity in urban parks and open spaces. Environment and Planning B: Planning and Design, 38(4), 585-594.

[69] Peris, E., Guardia, N. B., Fons-Esteve, J., & de la Maza, M. S. (2019). Assessment of quiet areas in Europe. Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics, 6915-6922.

[70] Gidlöf-Gunnarsson, A., & Öhrström, E. (2007). Noise and well-being in urban residential environments: The potential role of perceived availability to nearby green areas. Landscape and Urban Planning, 83(2-3), 115-126.

[71] Brambilla, G., Gallo, V., Asdrubali, F., & D'Alessandro, F. (2013). The perceived quality of soundscape in three urban parks in Rome. Journal of the Acoustical Society of America, 134(1), 832-839.

[72] Zannin, P. H. T., Diniz, F. B., & Barbosa, W. A. (2002). Environmental noise pollution in the city of Curitiba, Brazil. Applied Acoustics, 63(4), 351-358.

[73] Sandberg, U. (2001). Tyre/road noise–Myths and realities. Proceedings of the 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, 1-15.

[74] Licitra, G., Cerchiai, M., Teti, L., Ascari, E., & Fredianelli, L. (2017). Durability and variability of the acoustical performance of rubberized road surfaces. Applied Acoustics, 120, 147-159.

[75] Thompson, D. (2008). Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control. Amsterdam: Elsevier.

[76] Basner, M., & McGuire, S. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and effects on sleep. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(3), 519.

[77] Hammer, M. S., Swinburn, T. K., & Neitzel, R. L. (2014). Environmental noise pollution in the United States: Developing an effective public health response. Environmental Health Perspectives, 122(2), 115-119.

[78] Bento Coelho, J. L., & Guedes, I. C. M. (2011). HVAC noise and vibration control. In Building acoustics throughout Europe Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe (pp. 1-34). DiScript.

[79] Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. Transport Policy, 15(2),

73-80.

[80] Campello-Vicente, H., Peral-Orts, R., Campillo-Davo, N., & Velasco-Sanchez, E. (2017). The effect of electric vehicles on urban noise maps. Applied Acoustics, 116, 59-64.

[81] Kang, J. (2005). Numerical modelling of the sound fields in urban streets with diffusely reflecting boundaries. Journal of Sound and Vibration, 258(5), 793-813.

[82] European Commission. (2014). Commission Regulation (EU) No 540/2014 on the sound level of motor vehicles and of replacement silencing systems. Official Journal of the European Union, L 158, 131-195.

[83] Elliott, S. J., & Nelson, P. A. (1993). Active noise control. IEEE Signal Processing Magazine, 10(4), 12-35.

[84] Sueur, J., & Farina, A. (2015). Ecoacoustics: The ecological investigation and interpretation of environmental sound. Biosemiotics, 8(3), 493-502.

[85] Pijanowski, B. C., Farina, A., Gage, S. H., Dumyahn, S. L., & Krause, B. L. (2011). What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. Landscape Ecology, 26(9), 1213-1232.

[86] Gasc, A., Sueur, J., Pavoine, S., Pellens, R., & Grandcolas, P. (2013). Biodiversity sampling using a global acoustic approach: Contrasting sites with microendemics in New Caledonia. PLoS One, 8(5), e65311.

[87] Krause, B. L. (1993). The niche hypothesis: A virtual symphony of animal sounds, the origins of musical expression and the health of habitats. The Soundscape Newsletter, 6, 6-10.

[88] Farina, A., Buscaino, G., Ceraulo, M., Eldridge, A., Pieretti, N., & McWilliam, J. (2014). The soundscape approach for the assessment and conservation of Mediterranean landscapes: principles and case studies. Journal of Landscape Ecology, 7(1), 10-22.

[89] Shannon, G., McKenna, M. F., Angeloni, L. M., Crooks, K. R., Fristrup, K. M., Brown, E., ... & Briggs, J. (2016). A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife. Biological Reviews, 91(4), 982-1005.

[90] Levenhagen, M. J., Miller, Z. D., Petrelli, A. R., Ferguson, L. A., Shr, Y. H., Gomes, D. G., ... & Francis, C. D. (2020). Ecosystem services enhanced through soundscape management link people and wildlife. People and Nature, 3(1), 176-189.

[91] Fuller, S., Axel, A. C., Tucker, D., & Gage, S. H. (2015). Connecting soundscape to landscape: Which acoustic index best describes landscape configuration? Ecological Indicators, 58, 207-215.

[92] Both, C., Bouwhuis, S., Lessells, C. M., & Visser, M. E. (2006). Climate change and population declines in a long-distance migratory bird. Nature, 441(7089), 81-83.

[93] Pavan, G. (2017). Fundamentals of soundscape conservation. In Ecoacoustics: The ecological role of sounds (pp. 235-258). Hoboken: John Wiley & Sons.

[94] Farina, A. (2014). Soundscape ecology: Principles, patterns, methods and applications. Dordrecht: Springer.

[95] Schafer, R. M. (2009). The soundscape of modernity: Architectural acoustics and the culture of listening in America, 1900-1933. Cambridge: MIT Press.

[96] Westerkamp, H. (2007). Soundwalking. In A. Carlyle (Ed.), Autumn leaves: Sound and the environment in artistic practice (pp. 49-54). Paris: Double Entendre.

[97] Krause, B. (2012). The great animal orchestra: Finding the origins of music in the world's wild places. New York: Little, Brown and Company.

[98] Storch, D. (2003). Comment on "The origin of the latitudinal diversity gradient: insights from a mathematical model". Ecology Letters, 6(4), 249-251.

[99] Westerkamp, H. (2002). Linking soundscape composition techniques with environmental research and awareness. Organised Sound, 7(1), 51-56.

[100] Wrightson, K. (2000). An introduction to acoustic ecology. Soundscape: The Journal of Acoustic Ecology, 1(1), 10-13.

[101] Truax, B. (2001). Acoustic communication. Westport: Greenwood Publishing Group.

[102] Payne, S. R., Davies, W. J., & Adams, M. D. (2009). Research into the practical and policy applications of soundscape concepts and techniques in urban areas. London: Department for Environment, Food and Rural Affairs.

[103] Liu, F., & Kang, J. (2016). A grounded theory approach to the subjective understanding of urban soundscape in Sheffield. Cities, 50, 28-39.

[104] Honey, M., & Krantz, D. (2007). Global trends in coastal tourism. Stanford Environmental Program, Stanford University and Coastal Resources Center, University of Rhode Island.

[105] Feld, S. (2012). Sound and sentiment: Birds, weeping, poetics, and song in Kaluli expression. Durham: Duke University Press.

[106] Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate

change impacts across natural systems. Nature, 421(6918), 37-42.

[107] Miller, N. P. (2008). US National Parks and management of park soundscapes: A review. Applied Acoustics, 69(2), 77-92.

[108] Fristrup, K. M., Howe, R., & Mennitt, D. (2016). Monitoring the acoustic environment of Yellowstone National Park. Yellowstone Science, 24(1), 14-27.

[109] Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O., & Duvail, S. (2008). Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. PLoS One, 3(12), e4065.

[110] Towsey, M., Wimmer, J., Williamson, I., & Roe, P. (2014). The use of acoustic indices to determine avian species richness in audio-recordings of the environment. Ecological Informatics, 21, 110-119.

[111] Farina, A., Pieretti, N., & Piccioli, L. (2011). The soundscape methodology for long-term bird monitoring: A Mediterranean Europe case-study. Ecological Informatics, 6(6), 354-363.

[112] Barber, J. R., Crooks, K. R., & Fristrup, K. M. (2010). The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. Trends in Ecology & Evolution, 25(3), 180-189.

[113] Reed, S. E., Mann, J. P., Saunders, S. P., Rodewald, P. G., Mendenhall, L. M., & Rodewald, A. D. (2014). Declining winter activity of mammals in a military training area. Journal of Wildlife Management, 78(6), 1014-1025.

[114] Campos-Cerqueira, M., & Aide, T. M. (2016). Improving distribution data of threatened species by recording sounds remotely. Ecology and Evolution, 6(4), 1164-1170.

[115] Buxton, R. T., McKenna, M. F., Mennitt, D., Fristrup, K., Crooks, K., Angeloni,

L., & Wittemyer, G. (2017). Noise pollution is pervasive in US protected areas. Science, 356(6337), 531-533.

[116] Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. Ecology Letters, 15(4), 365-377.

[117] McClure, C. J., Ware, H. E., Carlisle, J., Kaltenecker, G., & Barber, J. R. (2013). An experimental investigation into the effects of traffic noise on distributions of birds: Avoiding the phantom road. Proceedings of the Royal Society B, 280(1773), 20132290.

[118] Cornell, K. L., & Donovan, T. M. (2010). Scale-dependent mechanisms of habitat selection for a migratory passerine: An experimental approach. The Auk, 127(4), 899-908.

[119] Brown, A. L. (2012). A review of progress in soundscapes and an approach to soundscape planning. International Journal of Acoustics and Vibration, 17(2), 73-81.

[120] Genuit, K., & Fiebig, A. (2006). Psychoacoustics and its benefit for the soundscape approach. Acta Acustica United with Acustica, 92(6), 952-958.

[121] McDonnell, M. J., & MacGregor-Fors, I. (2016). The ecological future of cities. Science, 352(6288), 936-938.

[122] Mitsch, W. J., & Jørgensen, S. E. (2003). Ecological engineering: A field whose time has come. Ecological Engineering, 20(5), 363-377.

[123] Holling, C. S. (1978). Adaptive environmental assessment and management. London: John Wiley & Sons.

[124] Pretty, J. N. (1995). Participatory learning for sustainable agriculture. World

Development, 23(8), 1247-1263.

[125] Hester, R. T., & Kweon, B. S. (1990). Sustainable landscape architecture: Implications of the Chinese garden. Landscape Journal, 9(2), 83-91.

[126] Marshall, R., & Arts, J. (2013). Planning for integration: recent experiences of integration in Irish planning and environmental assessment. Planning Theory & Practice, 14(2), 177-198.

[127] Stavins, R. N. (2003). Experience with market-based environmental policy instruments. Handbook of Environmental Economics, 1, 355-435.

[128] Young, O. R. (2002). The institutional dimensions of environmental change: Fit, interplay, and scale. Cambridge: MIT Press.

[129] Sterling, S. (2001). Sustainable education: Re-visioning learning and change. Totnes: Green Books.

[130] Bell, S., & Morse, S. (2008). Sustainability indicators: Measuring the immeasurable? London: Earthscan.

[131] Kang, J., & Schulte-Fortkamp, B. (Eds.). (2016). Soundscape and the built environment. Boca Raton: CRC Press.

[132] Botteldooren, D., Dekoninck, L., & Gillis, D. (2011). The influence of traffic noise on appreciation of the living quality of a neighborhood. International Journal of Environmental Research and Public Health, 8(3), 777-798.

[133] Schulte-Fortkamp, B., & Fiebig, A. (2006). Soundscapes and living spaces: Well-being and health. Acta Acustica United with Acustica, 92(6), 968-979.

[134] Mydlarz, C., Salamon, J., & Bello, J. P. (2017). The implementation of low-cost urban acoustic monitoring devices. Applied Acoustics, 117, 207-218.

[135] Wu, J., & Li, H. (2006). Concepts of scale and scaling. In J. Wu, K. B. Jones, H. Li, & O. L. Loucks (Eds.), Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology (pp. 3-15). Dordrecht: Springer.

[136] Peterson, G. D., Cumming, G. S., & Carpenter, S. R. (2003). Scenario planning: A tool for conservation in an uncertain world. Conservation Biology, 17(2), 358-366.

[137] Rotmans, J., & Van Asselt, M. B. (2001). Uncertainty management in integrated assessment modeling: Towards a pluralistic approach. Environmental Monitoring and Assessment, 69(2), 101-130.

[138] Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C. S., & Walker, B. (2002). Resilience and sustainable development: Building adaptive capacity in a world of transformations. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 31(5), 437-440.

[139] Vogiatzis, K., & Remy, N. (2017). Soundscape design guidelines through noise mapping methodologies: An application to medium urban agglomerations. Noise Mapping, 4(1), 1-19.

[140] International Organization for Standardization. (2014). ISO 12913-1:2014 Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework. Geneva: ISO.

[141] Mietlicki, F., Mietlicki, C., & Sineau, M. (2010). An innovative approach for long-term environmental noise measurement: RUMEUR network. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, 1-6.

[142] Li, J., & Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. Environmental Modelling & Software, 53, 173-189.

[143] Santini, S., Rana, V., Graf, C., Sitting, C., Crepaldi, M., Lahiri, A., ... & Zorzi, M. (2014). Wireless sensor networks for environmental noise monitoring. Sensors, 14(4), 6143-6172.

[144] Kephalopoulos, S., Paviotti, M., & Anfosso-Lédée, F. (2012). Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU). Luxembourg: Publications Office of the European Union.

[145] Guillaume, G., Can, A., Petit, G., Fortin, N., Palominos, S., Gauvreau, B., ... & Picaut, J. (2016). Noise mapping based on participative measurements. Noise Mapping, 3(1), 140-156.

[146] Radicchi, A., Henckel, D., & Memmel, M. (2018). Citizens as smart, active sensors for a quiet and just city. The case of the "open source soundscapes" approach to identify, assess and plan "everyday quiet areas" in cities. Noise Mapping, 5(1), 1-20.

[147] Botteldooren, D., Coensel, B. D., Oldoni, D., Van Renterghem, T., & Dauwe, S. (2011). Sound monitoring networks new style. Proceedings of Acoustics 2011, 2-4.

[148] Stowell, D., & Plumbley, M. D. (2014). Automatic large-scale classification of bird sounds is strongly improved by unsupervised feature learning. PeerJ, 2, e488.

[149] Liu, Y., Wang, H., & Yang, J. (2019). Edge computing for Internet of Things: A survey. IEEE Internet of Things Journal, 6(6), 8900-8913.

[150] European Environment Agency. (2014). Good practice guide on quiet areas. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

[151] Wolsink, M., Devilee, J., & Breukers, S. (2009). Between consultation and participation: The challenge for new forms of environmental governance. In B. Arts, A. Lagendijk, & H. van Houtum (Eds.), The Disoriented State: Shifts in Governmentality, Territoriality and Governance (pp. 155-172). Dordrecht: Springer.

[152] Arnstein, S. R. (1969). A ladder of citizen participation. Journal of the American Institute of Planners, 35(4), 216-224.

[153] Healey, P. (1997). Collaborative planning: Shaping places in fragmented societies. London: Macmillan.

[154] Reed, M. S. (2008). Stakeholder participation for environmental management: A literature review. Biological Conservation, 141(10), 2417-2431.

[155] Rowe, G., & Frewer, L. J. (2005). A typology of public engagement mechanisms. Science, Technology, & Human Values, 30(2), 251-290.

[156] Westerkamp, H. (2007). Soundwalking. In A. Carlyle (Ed.), Autumn leaves: Sound and the environment in artistic practice (pp. 49-54). Paris: Double Entendre.

[157] Kawai, K., Kojima, T., Hirate, K., & Yasuoka, M. (2004). Personal computer system for environmental sound evaluation. Applied Acoustics, 65(8), 791-807.

[158] Sanders, E. B. N., & Stappers, P. J. (2008). Co-creation and the new landscapes of design. CoDesign, 4(1), 5-18.

[159] Macintosh, A. (2004). Characterizing e-participation in policy-making. Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 1-10.

[160] Berglund, B., Hassmén, P., & Job, R. S. (1996). Sources and effects of low-

frequency noise. Journal of the Acoustical Society of America, 99(5), 2985-3002.

[161] Rowe, G., & Frewer, L. J. (2000). Public participation methods: A framework for evaluation. Science, Technology, & Human Values, 25(1), 3-29.

[162] Susskind, L., & Cruikshank, J. (1987). Breaking the impasse: Consensual approaches to resolving public disputes. New York: Basic Books.

[163] Fischer, F. (2000). Citizens, experts, and the environment: The politics of local knowledge. Durham: Duke University Press.

[164] International Association for Impact Assessment. (2009). What is impact assessment? Fargo: IAIA.

[165] Canter, L., & Ross, B. (2010). State of practice of cumulative effects assessment and management: The good, the bad and the ugly. Impact Assessment and Project Appraisal, 28(4), 261-268.

[166] Morgan, R. K. (2012). Environmental impact assessment: The state of the art. Impact Assessment and Project Appraisal, 30(1), 5-14.

[167] Arts, J., Caldwell, P., & Morrison-Saunders, A. (2001). Environmental impact assessment follow-up: Good practice and future directions. Impact Assessment and Project Appraisal, 19(3), 175-185.

[168] Bragagnolo, C., Carvalho, R. R., Ladle, R. J., & Correia, R. A. (2017). Scientometric analysis of Brazilian research in environmental impact assessment: Challenges and opportunities. Journal of Environmental Management, 196, 689-698.

[169] Duinker, P. N., & Greig, L. A. (2006). The impotence of cumulative effects assessment in Canada: Ailments and ideas for redeployment. Environmental

Management, 37(2), 153-161.

[170] Beanlands, G. E., & Duinker, P. N. (1983). An ecological framework for environmental impact assessment in Canada. Halifax: Institute for Resource and Environmental Studies, Dalhousie University.

[171] Pope, J., Annandale, D., & Morrison-Saunders, A. (2004). Conceptualising sustainability assessment. Environmental Impact Assessment Review, 24(6), 595-616.

[172] Byron, H., & Treweek, J. (2005). Environmental impact assessment and the mitigation hierarchy. In P. Morris & R. Therivel (Eds.), Methods of Environmental Impact Assessment (pp. 419-444). London: Spon Press.

[173] Arts, J., & Morrison-Saunders, A. (2004). Assessing impact: Handbook of EIA and SEA follow-up. London: Earthscan.

[174] Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., Van Der Sluijs, J. P., Van Asselt, M. B., Janssen, P., & Krayer von Krauss, M. P. (2003). Defining uncertainty: A conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. Integrated Assessment, 4(1), 5-17.

[175] O'Faircheallaigh, C. (2010). Public participation and environmental impact assessment: Purposes, implications, and lessons for public policy making. Environmental Impact Assessment Review, 30(1), 19-27.

第四章 聲景在建築與室內應用
Soundscape in Architecture and Indoor Environments

聲景在建築與室內應用代表著當代建築設計理念的重要轉變，從傳統的噪音控制思維轉向積極主動的聲音環境營造。這一轉變不僅反映了人們對室內環境品質要求的提升，更體現了對人本設計理念的深度實踐。在現代建築實務中，聲景設計已成為創造健康、舒適且高效室內環境的關鍵策略，其重要性日益獲得建築界、學術界和使用者的廣泛認可。

建築環境中的聲景應用具有多重層次的複雜性，涵蓋了從微觀的材料選擇到宏觀的空間配置，從被動的噪音控制到主動的聲音設計，從標準化的技術要求到個人化的感官體驗。這種複雜性要求建築師、聲學顧問和相關專業人員必須具備跨學科的知識整合能力，深入理解聲音物理特性、人類聽覺機制、建築構造原理以及使用者行為模式之間的相互關係。

當代建築聲景設計面臨的挑戰不僅來自技術層面的複雜性，更來自於多元使用需求的平衡與協調。現代建築空間往往需要滿足不同年齡群體、不同活動類型、不同文化背景的使用者需求，這要求聲景設計必須具備高度的適應性和彈性。同時，永續發展理念的普及也促使聲景設計必須考慮環境友善性、資源效率性以及長期維護性等因素，形成了技術性能與環境責任並重的設計取向。

數位化技術的快速發展為建築聲景設計帶來了前所未有的機遇與挑戰。先進的聲學模擬軟體、虛擬實境技術、人工智慧演算法以及物聯網系統的應用，使得聲景設計能夠更加精確、高效且個人化。然而，這些技術工具的應用也要求設計師具備相應的技術素養和整合能力，能夠在充分利用科技優勢的同時，保持對人本需求和設計本質的深度關注。

建築聲景設計的未來發展趨勢指向更加智慧化、個人化和整合化的方向。智慧化體現在系統能夠自主感知環境變化、學習使用者偏好並動態調整聲學參數；個人化體現在能夠為不同使用者提供客製化的聲音體驗；整合化則體現在聲景設計與建築的其他系統（照明、通風、資訊等）實現無縫整合，創造全方位的環境體驗。

這些發展趨勢不僅為聲景設計開拓了新的可能性，也對設計師的專業能力和創新思維提出了更高的要求。

4.1 建築聲學與聲景 (Architectural Acoustics and Soundscape)

建築聲學與聲景的結合代表了當代建築設計中一個重要的典範轉移，從傳統的技術導向設計轉向以人為本的體驗設計。這種轉變要求建築師不僅要掌握聲學原理和技術方法，更要深入理解聲音環境對人類心理、行為和福祉的影響機制。現代建築聲學設計已不再滿足於單純的噪音控制或聲學參數的達標，而是致力於創造能夠增進人類福祉、提升空間品質的積極聲音環境。

聲景理念的融入為建築聲學設計注入了新的活力和方向。傳統建築聲學主要關注混響時間、隔音性能、吸音係數等客觀物理參數，而聲景設計則更加重視使用者的主觀感受、情境因素的影響以及聲音環境的整體體驗品質。這種轉變並非否定傳統聲學知識的價值，而是在其基礎上增加了人文關懷和體驗設計的維度，形成了更加全面和深入的設計方法論。

建築聲學與聲景整合的核心挑戰在於如何平衡技術理性與人文感性，如何在滿足客觀性能要求的同時創造主觀上令人愉悅的聲音體驗。這要求設計師具備跨學科的知識結構，能夠整合物理聲學、心理聲學、建築技術、空間設計等多個領域的專業知識。同時，也需要建立新的設計評估方法，既包括傳統的物理測量，也包括使用者體驗評價、長期使用效果追蹤等多維度的評估體系。

4.1.1 建築設計與聲音控制 (Architectural Design and Sound Control)

建築設計與聲音控制的整合是現代建築實務中一個至關重要的專業領域，它要求建築師在設計過程中系統性地考慮聲音環境的營造與控制。Cavanaugh and Wilkes (1999) 在其經典著作《建築聲學：原理與實務》中強調，有效的聲音控制必須從建築設計的初期階段就納入考量，而非後期的補救措施 [1]。這種前瞻性的設計思維要求建築師具備深入的聲學知識，能夠預見不同設計決策對聲音環境的影響，並在空間配置、材料選擇、構造細節等各個層面進行綜合考量。

建築形態對聲音控制具有基礎性的影響。空間的幾何形狀直接決定了聲音的傳播路徑、反射模式和聲場分布。Long (2005) 在其權威性的《建築聲學》教科書中詳細闡述了不同空間形態的聲學特性，指出設計師必須深入理解幾何聲學的基本原理，才能有效地透過建築形態來控制聲音環境 [2]。例如，平行牆面容易產生駐波和顫動回音，而適度的非平行設計可以改善聲音的擴散性；拱形或圓形空間可能產生聲焦現象，需要透過材料配置或幾何修正來避免不良的聲學效果。

空間分區與功能配置是建築聲音控制的另一個重要策略。合理的功能分區可以將噪音源與敏感區域有效分離，透過距離衰減和障礙物遮擋來減少噪音干擾。Field (2008) 在探討綠色建築中的聲學設計時指出，建築的平面配置對聲音控制具有決定性影響，特別是在需要平衡自然通風需求與噪音控制要求的情況下 [3]。設計師需要仔細考慮噪音源的位置、傳播路徑和接收區域的特性，透過合理的空間組織來最小化噪音影響。

建築構造系統在聲音控制中扮演著關鍵角色。牆體、樓板、屋頂等構造元素不僅承擔結構功能，也是重要的聲學控制界面。構造的隔音性能取決於質量、剛度、阻尼以及構造細節的處理。現代建築中廣泛應用的輕質構造系統雖然具有施工便利、重量輕等優勢，但在聲音控制方面面臨更大的挑戰，需要透過精心的設計和施工來確保滿足聲學性能要求。

機電系統的整合是建築聲音控制的重要考量因素。暖通空調系統、給排水系統、電梯系統等機電設備既是重要的背景噪音源，也是聲音傳播的潛在路徑。Milo (2020) 在研究聲學設計師的角色時強調，現代建築設計必須將聲學考量整合到機電系統的設計中，透過設備選型、管路佈置、減振隔音等措施來控制機電噪音 [4]。這要求建築師與機電工程師建立緊密的協作關係，確保各系統的整合不會對聲音環境產生負面影響。

建築表皮設計對內外聲音環境的控制具有重要影響。外牆、屋頂、門窗等表皮元素既要滿足採光、通風、保溫等功能要求，也要承擔隔離外部噪音、控制內部聲音傳播的聲學功能。現代建築中廣泛應用的玻璃幕維系統在提供良好視野和自然

採光的同時，也面臨噪音控制的挑戰。設計師需要透過玻璃規格選擇、密封性能優化、遮陽系統整合等方式來平衡各種性能要求。

聲學材料的選擇與應用是建築聲音控制的直接手段。不同材料具有不同的吸音、反射、透射特性，合理的材料配置可以實現對室內聲場的精確調控。然而，材料的聲學性能往往與其他性能（如美觀性、耐久性、環保性、成本等）存在平衡關係，設計師需要在綜合考量各種因素的基礎上做出最佳選擇。現代建築材料技術的發展為聲學設計提供了更多的選擇，多功能複合材料、智慧材料、生物材料等新興材料為聲音控制開拓了新的可能性。

建築聲音控制的設計方法論正在經歷重要變革。傳統的設計方法主要依賴經驗法則和標準化程序，而現代設計越來越依賴精確的數值模擬和性能化設計方法。先進的聲學模擬軟體可以在設計階段精確預測建築的聲學性能，使設計師能夠在建造之前就驗證和優化設計方案。這種設計方法的轉變不僅提高了設計的精確性和效率，也為創新性的聲學設計提供了技術支撐。

4.1.2 公共建築聲景 (Public Building Soundscapes)

公共建築聲景設計面臨著比一般建築更加複雜的挑戰，因為公共建築需要同時滿足大量不同背景、不同需求的使用者群體。這些建築通常具有高使用密度、多功能複合、長時間運營等特點，對聲景設計提出了更高的要求。Kang (2023) 在其最新研究中強調，公共建築聲景設計必須採用系統性的方法，統籌考慮建築功能、使用者行為、社會文化因素以及技術實現等多個維度 [5]。

公共空間聲景的特殊性首先體現在其社會互動功能上。與私人空間不同，公共建築聲景不僅要提供舒適的聲音環境，更要支持和促進人與人之間的交流與互動。Ma et al. (2021) 在研究城市公共空間聲景品質對使用者偏好的影響時發現，適度的環境聲音可以創造活躍的氛圍，增進社會凝聚力，但過度的噪音則會阻礙交流，降低空間的宜人性 [6]。這種平衡需要設計師具備敏銳的社會觀察力和豐富的設計經驗。

文化建築的聲景設計具有特殊的專業要求。圖書館、博物館、美術館等文化建築既需要提供安靜的環境以支持學習和思考，又要避免過度安靜導致的壓抑感。Xiao and Aletta (2016) 透過對伯明罕圖書館的聲景研究發現，現代公共圖書館的功能日趨多樣化，從傳統的靜默閱讀空間轉向包含討論、展示、社交等多種活動的複合空間，這要求聲景設計必須具備高度的彈性和適應性 [7]。不同功能區域需要不同的聲學環境，而這些區域之間的聲學分離和連接都需要精心設計。

商業建築的聲景設計更加注重商業效果的實現。購物中心、餐廳、酒店等商業空間需要透過聲景設計來營造特定的氛圍，影響消費者的情緒和行為。適當的背景音樂、環境聲效可以增強品牌形象，提升消費體驗，但不當的聲音設計則可能產生反效果。這要求設計師不僅要掌握聲學技術，更要理解消費心理學和商業運營邏輯。

交通建築的聲景設計面臨獨特的技術挑戰。機場、火車站、地鐵站等交通樞紐通常具有大空間、高噪音、人流密集等特點，對聲景設計的技術要求極高。這類建築的聲景設計不僅要控制機械噪音、交通噪音，還要確保廣播系統的語音清晰度，保障安全資訊的有效傳達。同時，還要考慮不同語言背景使用者的需求，設計多語言環境下的聲景解決方案。

宗教建築的聲景設計承載著深厚的文化內涵和精神意義。教堂、寺廟、清真寺等宗教空間的聲學設計不僅要滿足宗教儀式的功能需求，更要營造莊嚴肅穆的精神氛圍。這類建築的聲景設計往往需要考慮傳統文化的傳承與創新的平衡，在尊重歷史傳統的同時滿足現代使用需求。

教育建築聲景設計的重要性日益獲得認可。學校、大學等教育建築的聲景品質直接影響教學效果和學習體驗。除了傳統的教室聲學要求外，現代教育建築還包含圖書館、實驗室、體育館、食堂等多種功能空間，每種空間都有其特定的聲景需求。開放式學習空間、創客空間等新興教育空間形態也對聲景設計提出了新的挑戰。

醫療建築聲景設計關係到患者的康復效果和醫護人員的工作效率。醫院環境的聲

景不僅要控制噪音干擾，更要積極營造有助於康復的聲音環境。研究顯示，適當的自然聲音、音樂療法可以緩解患者的焦慮情緒，促進身心康復。同時，醫療建築的聲景設計還要考慮醫療設備噪音、緊急警報系統、隱私保護等特殊要求。

辦公建築聲景設計正面臨工作模式變革的挑戰。傳統的封閉式辦公室逐漸被開放式辦公、協作空間、混合辦公等模式所取代，這些新興工作模式對聲景設計提出了新的要求。設計師需要在促進協作交流與保護專注工作之間找到平衡，透過聲景設計來支持不同類型的工作活動。

公共建築聲景設計的未來發展趨勢包括智慧化、個人化和永續化。智慧聲景系統可以根據使用情況、時間變化、環境條件等因素動態調整聲學參數；個人化聲景技術可以為不同使用者提供客製化的聲音體驗；永續聲景設計則強調環境影響最小化和資源利用效率最大化。這些發展趨勢將推動公共建築聲景設計邁向更加先進、人性化和環境友善的新階段。

4.1.3 室內舒適度與聲學 (Indoor Comfort and Acoustics)

室內舒適度與聲學環境之間存在著複雜而重要的相互關係，這種關係不僅影響使用者的即時感受，更對其長期的健康、福祉和工作效率產生深遠影響。現代建築環境品質研究越來越重視聲學舒適度在整體室內環境舒適度中的重要作用，認為聲學環境是與熱環境、光環境、空氣品質並列的四大室內環境因子之一。

聲學舒適度的內涵遠比傳統的噪音控制概念更加豐富和複雜。它不僅包括避免噪音干擾的消極要求，更包括創造宜人聲音環境的積極目標。聲學舒適度的實現需要綜合考慮聲音的物理特性（如聲壓級、頻譜分布、時間變化模式）、環境因子（如空間特性、視覺環境、熱環境）以及使用者因子（如個人偏好、文化背景、活動性質）等多個維度的影響。

Wen et al. (2024) 在其開創性研究中深入探討了熱聲複合環境對舒適度感知的影響，考慮了不同辦公活動的差異性影響 [8]。研究發現，熱環境與聲學環境之間存在顯著的交互作用，適宜的熱環境可以提高使用者對聲學環境的耐受性，而不

適宜的聲學環境則可能加劇熱不舒適感。這種跨模態的感官交互現象提醒設計師必須採用整體性的環境設計思維，不能將各種環境因子孤立地進行考量。

聲學舒適度的個體差異性是設計實務中的重要考量因素。不同年齡、性別、文化背景、工作性質的使用者對聲學環境的需求和耐受性存在顯著差異。老年人通常對高頻噪音更加敏感，兒童則更容易受到間歇性噪音的干擾。知識工作者需要相對安靜的環境以支持專注思考，而服務業工作者則可能更適應相對嘈雜的環境。這種個體差異性要求聲景設計必須具備足夠的彈性和適應性。

聲學舒適度的時間動態性也是一個重要的設計考量。人們對聲學環境的需求和耐受性會隨著時間而變化，這種變化可能是生物節律性的（如晝夜變化），也可能是活動相關的（如工作與休息的切換）。Wen et al. (2025) 的最新研究探討了室內熱聲複合環境對舒適度感知影響的邊界條件，為理解環境因子交互作用的機制提供了重要見解 [9]。這項研究強調了動態環境設計的重要性，即聲景系統應該能夠根據時間、活動、使用者需求的變化來調整其參數。

聲學隱私是室內聲學舒適度的重要組成部分。在開放式或半開放式空間中，聲學隱私的缺失不僅會導致工作效率下降，更可能引起心理壓力和社交焦慮。聲學隱私的實現需要綜合運用空間分隔、聲音遮蔽、吸音處理等多種技術手段，在保持空間開放性的同時提供適度的聲學私密性。

語音清晰度是聲學舒適度的另一個關鍵要素。在需要語音交流的環境中，適當的語音清晰度可以減少交流障礙，提高溝通效率。然而，過高的語音清晰度可能會影響聲學隱私，因此需要在不同區域間進行差異化設計。會議室、教室等空間需要優化語音清晰度，而開放辦公區域則需要適度控制語音傳播範圍。

背景噪音的管理是聲學舒適度控制的基礎工作。適度的背景噪音可以遮蔽突發噪音，創造穩定的聲學環境，但過高的背景噪音則會造成疲勞和注意力分散。現代建築中的機電系統噪音、交通噪音、人員活動噪音等都需要透過合理的設計來控制在可接受的範圍內。

聲學舒適度評估方法的發展為設計實務提供了科學支撐。除了傳統的物理測量方法外，主觀評價、生理測量、行為觀察等方法也被廣泛應用於聲學舒適度的評估。國際標準化組織制定的相關標準為聲學舒適度的評估提供了標準化的程序和準則，但這些標準也需要根據具體的文化背景和使用情境進行適應性調整。

智慧建築技術為聲學舒適度的實現提供了新的可能性。透過感測器網路、人工智慧、物聯網等技術，智慧聲景系統可以即時監測環境狀況和使用者行為，動態調整聲學參數以維持最佳的舒適度水準。這種智慧化的聲學環境控制不僅可以提高舒適度，還可以實現能源效率的優化。

聲學舒適度與永續發展的關係日益受到關注。綠色建築標準中的聲學要求不僅關注性能指標的達成，更重視材料的環境影響、系統的能源效率、長期的維護成本等因素。永續聲學設計要求在實現聲學舒適度的同時，最小化對環境的負面影響，這為聲學設計提出了新的挑戰和機遇。

4.2 室內環境聲景 (Indoor Soundscapes)

室內環境聲景作為現代建築環境品質的重要組成部分，其設計與管理正面臨著前所未有的關注和重視。與戶外聲景不同，室內聲景具有更強的可控性和預測性，但同時也面臨著更加複雜的功能要求和使用者期望。室內聲景的品質不僅影響使用者的即時舒適感，更與其工作效率、學習成效、健康狀況以及整體生活品質密切相關。因此，室內聲景設計已成為建築師、室內設計師、聲學顧問以及建築使用者共同關注的重要議題。

室內聲景的複雜性源於其多重影響因子的交互作用。這些因子包括建築本身的聲學特性（如空間幾何、材料特性、構造方式）、機電系統的運行狀況（如暖通空調、照明系統、資訊系統）、使用者的活動模式（如工作性質、社交行為、個人偏好）、以及外部環境的影響（如交通噪音、氣候條件、都市活動）。這種多因子交互的複雜性要求室內聲景設計必須採用系統性的方法，統籌考慮各種影響因子之間的相互關係。

室內聲景設計的目標已從傳統的噪音控制轉向積極的聲音環境營造。現代室內聲景設計不僅要避免噪音干擾，更要創造能夠增進使用者福祉、支持特定活動、體現空間特色的聲音環境。這種轉變要求設計師具備更加全面的專業知識，不僅要掌握傳統的聲學原理和技術方法，更要理解環境心理學、人因工程學、社會學等相關學科的知識內容。

現代室內聲景設計面臨的挑戰之一是如何平衡不同使用者群體的需求。同一空間可能需要同時滿足不同年齡、不同文化背景、不同工作性質的使用者需求，這要求聲景設計必須具備高度的包容性和適應性。個人化聲景技術的發展為解決這一挑戰提供了新的可能性，透過可調節的聲學參數、個人化的聲音設備、智慧化的環境控制等手段，為不同使用者提供客製化的聲音體驗。

4.2.1 辦公空間聲景 (Office Environment Soundscape)

辦公空間聲景設計在現代工作環境中占據了極其重要的地位，特別是隨著開放式辦公、彈性工作、協作文化等新興工作模式的普及，傳統的辦公聲學設計理念正面臨根本性的挑戰與轉變。現代辦公空間不再是單純的個人作業場所，而是集中了多樣化工作活動、社交互動、知識交流的複合功能環境，這要求聲景設計必須能夠同時支持專注工作、團隊協作、正式會議、非正式交流等各種活動模式。

Acun and Yilmazer (2018) 透過紮根理論方法對開放式辦公室聲景進行的深入研究，揭示了辦公環境聲景感知的複雜性和多維性 [10]。研究發現，員工對辦公室聲景的主觀反應不僅受到客觀聲學參數的影響，更與工作任務性質、個人性格特徵、組織文化氛圍、空間配置模式等因子密切相關。這一發現對辦公空間聲景設計具有重要的指導意義，提醒設計師必須採用使用者中心的設計方法，深入了解員工的實際工作需求和行為模式。

開放式辦公環境的聲景挑戰主要體現在語音隱私的保護上。Jeon et al. (2022) 的研究發現，視聽環境的交互作用對開放式辦公室聲景感知具有重要影響，窗戶面積比例和樓層面積與視覺隱私、視覺滿意度、語音隱私和聲音滿意度呈現正相關關係 [11]。這一發現強調了聲景設計必須採用多感官整合的設計方法，不能僅從

聲學角度考慮問題，而要統籌考慮視覺、空間、功能等多重因子的影響。

West et al. (2024) 在《聲學學會期刊》發表的研究提出了開放式辦公室聲學環境感知的理論模型，該模型整合了個人、環境和組織三個層面的影響因子 [12]。研究結果顯示，有效的辦公室聲景設計必須在語音隱私、環境舒適度和溝通便利性之間找到適當的平衡點。這種平衡的實現需要設計師具備跨學科的知識整合能力，能夠統籌考慮聲學技術、空間設計、組織管理等多個專業領域的要求。

辦公空間聲景設計的一個重要策略是聲音遮蔽技術的應用。透過引入適當的背景聲音，可以有效地提高語音隱私保護水準，降低突發噪音的干擾程度。然而，聲音遮蔽系統的設計和應用需要精確的技術控制，遮蔽聲的頻譜特性、音量水準、空間分布都會影響系統的效果。過度的遮蔽可能會影響正常的語音交流，而不足的遮蔽則無法達到隱私保護的目標。

Jo and Jeon (2022) 的研究探討了基於視聽內容的室內聲景感知對開放式辦公室工作品質的影響，發現室內聲景感知與員工的工作偏好和感知生產力之間存在顯著關聯 [13]。這項研究強調了聲景設計對提升工作效率和員工滿意度的重要價值，也為企業投資聲學環境改善提供了科學依據。研究結果顯示，適當的聲景設計不僅可以改善工作環境品質，還可以直接影響員工的工作績效和職業滿意度。

現代辦公空間聲景設計越來越重視分區聲學策略的應用。不同的工作區域需要不同的聲學環境：專注工作區需要相對安靜的環境，協作區域則允許更多的聲音交流，會議室需要優良的語音清晰度，休憩區可以營造更加輕鬆的聲音氛圍。透過合理的聲學分區設計，可以在同一空間內為不同類型的工作活動提供相應的聲音環境支持。

Abdalrahman and Galbrun (2017) 的研究評估了水景在開放式辦公室中作為噪音遮蔽器的效果，發現參與者對其物理工作環境整體上表示滿意 [14]。這項研究展示了自然聲音元素在辦公空間聲景設計中的應用潛力，水聲不僅具有良好的遮蔽效果，還能夠營造自然、宜人的環境氛圍，有助於緩解工作壓力，提升環境品質。

智慧辦公技術的發展為辦公空間聲景設計提供了新的可能性。透過感測器網路、人工智慧、機器學習等技術，智慧聲景系統可以即時監測辦公環境的聲學狀況、員工的工作狀態和偏好設定，動態調整聲學參數以維持最佳的工作環境。這種個人化、智慧化的聲景控制不僅可以提高員工滿意度，還可以優化能源使用效率。

Rachman et al. (2025) 透過專家焦點群組的研究方法，深入探討了開放式辦公室聲景評估的進展 [15]。研究結果強調了聲景感知在辦公環境中的多維性質，識別出了聲景評估中需要考慮的關鍵因子。這項研究為辦公空間聲景設計的標準化和規範化提供了重要參考，有助於建立更加科學、全面的聲景評估體系。

辦公空間聲景設計的未來發展趨勢包括個人化定制、智慧化控制、健康導向和永續發展等方向。個人化定制透過可調節的聲學參數為每個員工提供最適合的聲音環境；智慧化控制透過自動化系統實現聲景的動態優化；健康導向強調聲景設計對員工身心健康的積極影響；永續發展則要求聲景設計在實現功能目標的同時最小化環境影響。這些發展趨勢將推動辦公空間聲景設計邁向更加先進、人性化和環境友善的新階段。

4.2.2 教育空間聲景 (Educational Spaces Soundscape)

教育空間聲景設計對學習成效和教育品質具有深遠而直接的影響，這一點已獲得越來越多教育學者、建築師和政策制定者的認可。教育建築的聲學環境不僅影響師生之間的有效溝通，更對學生的認知發展、注意力集中、記憶鞏固以及整體學習體驗產生重要作用。隨著教育理念的演進和教學方法的創新，傳統的教育空間聲學設計理念正面臨重要的調整和轉型。

Flagg-Williams et al. (2011) 在其關於教室聲景的開創性研究中指出，教室聲景由多個相互作用的元素組成，包括影響聽力的學生因子、室內聲學特性以及聲場放大技術 [16]。這些元素在教室聲景中都扮演著重要角色，需要設計師進行統籌考量和整體優化。研究強調了教室聲景設計的複雜性，提醒設計師不能僅從技術角度考慮問題，還要深入理解教育過程的特殊需求。

現代教育空間的多樣化為聲景設計帶來了新的挑戰。Pääkkönen et al. (2015) 透過案例研究探討了新學習環境中的聲學問題，評估了現行聲學指導原則在新型學習空間中的適用性 [17]。研究發現，傳統的教室聲學標準可能不適用於開放式學習環境、創客空間、協作學習區等新興教育空間形態，需要開發新的設計準則和評估方法。

小學教室的聲景設計具有特殊的重要性，因為年幼學生的聽覺系統尚未完全發育成熟，對聲學環境的品質要求更高。Visentin et al. (2023) 的研究專門探討了小學教室的室內聲景問題，發現年幼學生比成年人和年長學生更需要良好的學習空間聲學環境 [18]。研究結果顯示，不良的聲學條件可能對兒童的語言發展、閱讀能力、學業成就產生長期的負面影響，因此小學教室的聲景設計需要特別謹慎和專業。

教室聲景對學習態度的影響是教育聲學研究的重要領域。Chan et al. (2021) 的研究調查了教室聲景與學習態度之間的相互關係，透過對九個不同學校教室的聲音測量和學生調查，探討了聲景優化對改善學習態度的潛力 [19]。研究發現，良好的聲學環境不僅可以提高學習效率，還能夠增強學生的學習動機和參與度，對教育品質的提升具有重要價值。

高中環境的聲景設計面臨更加複雜的挑戰。Topak and Yılmazer (2022) 透過混合研究方法對高中環境的室內聲景進行了比較研究，探討了聽覺感知與建築環境之間的關係 [20]。研究發現，青少年對聲學環境的感知和需求與兒童和成人都有所不同，需要針對這一特殊年齡群體的特點進行專門的設計考量。

開放式學習空間的聲景設計是當前教育建築設計的熱點問題。Hytönen-Ng et al. (2022) 的研究探討了芬蘭開放式教室中的學習聲景，從教師感知的角度分析了聲學環境對教學組織的影響 [21]。研究發現，學校建築設計影響聲景和教學組織，開放式學習空間雖然有利於彈性教學和協作學習，但也對聲學控制提出了更高的要求。

非正式學習空間的聲學設計日益受到關注。Scannell et al. (2016) 的研究探討了聲

學特性在非正式學習空間適用性感知和福祉中的作用，發現背景聲音水準、聲學特性等因子與空間學習適用性和使用者福祉之間存在重要關聯 [22]。這項研究擴展了教育空間聲景設計的範圍，提醒設計師不僅要關注正式教室的聲學環境，還要重視圖書館、走廊、休憩區等非正式學習空間的聲景品質。

ANSI S12.60 標準為教育空間聲學設計提供了重要的技術指導。該標準規定了教室的最大背景噪音水準和混響時間限值，為教育建築的聲學設計提供了明確的量化要求。根據標準要求，體積小於 10,000 立方英尺的未佔用有家具教室的最大混響時間為 0.6 秒，體積在 10,000 至 20,000 立方英尺之間的教室為 0.7 秒，同類教室允許的最大背景噪音水準為 35 分貝 [23]。

教育空間聲景設計的技術策略包括合理的空間配置、適當的材料選擇、有效的噪音控制以及先進的聲學技術應用。空間配置方面，需要將噪音源與敏感區域有效分離，合理安排不同功能區域的相對位置。材料選擇方面，需要在吸音、反射、擴散等性能之間找到適當的平衡。噪音控制方面，需要控制機電系統噪音、外部交通噪音以及人員活動噪音。技術應用方面，可以考慮聲場增強系統、聽力輔助設備、智慧聲學控制系統等先進技術。

教育空間聲景設計的未來發展方向包括個性化學習支持、多模態感官整合、智慧化適應控制以及包容性設計等。個性化學習支持透過可調節的聲學環境為不同學習風格和能力的學生提供最適合的學習環境；多模態感官整合統籌考慮聲音、光線、溫度等多種環境因子的協調配合；智慧化適應控制透過感測器和人工智慧技術實現聲景的動態優化；包容性設計確保所有學生，包括聽力障礙學生，都能獲得良好的學習環境。

4.2.3 醫療空間聲景 (Healthcare Soundscape)

醫療空間聲景設計在現代醫療建築中占據著極其重要的地位，因為聲學環境不僅直接影響患者的康復過程和心理狀態，也對醫護人員的工作效率和職業滿意度產生重要影響。世界衛生組織(WHO)的醫院噪音指導原則明確指出，醫院聲音水準應平均不超過 35dB(A)（日間）和 30dB(A)（夜間），因為患者較難應對過度環境

噪音產生的壓力水準增加 [24]。這些指導原則為醫療空間聲景設計提供了重要的參考標準，但實際的設計實踐往往面臨更加複雜的挑戰。

Ryherd et al. (2008) 在其關於醫院聲景評估的開創性研究中強調，醫院或醫療設施聲學設計的一個重要考量因素是病房的聲學設計，研究的主要目標是更好地理解和改善醫院聲景 [25]。這項研究開啟了醫療建築聲景研究的新方向，從傳統的噪音控制轉向積極的聲音環境營造，強調了聲景設計在創造治療性環境中的重要作用。

醫療空間聲景的特殊性首先體現在其對患者康復過程的直接影響。Watts et al. (2016) 的研究探討了聲景和室內設計對醫療環境中患者焦慮和感知寧靜的影響，發現聲音水準只是聲景的一個方面，為了改善醫療環境，需要考慮聲景的整體性 [26]。研究結果顯示，適當的聲景設計不僅可以減少患者的焦慮情緒，還能夠促進其康復過程，這為醫療空間的聲學設計提供了重要的科學依據。

Busch-Vishniac and Ryherd (2019) 的綜述研究詳細分析了醫院聲景的特徵、影響和干預措施，指出醫療設施設計因子對臨床工作人員具有重要意義 [27]。研究列舉了 16 個對醫護人員工作效率影響最大的設計因子，其中聲學環境被確定為關鍵因子之一。這項研究強調了醫院聲景設計不僅要考慮患者需求，還要充分考慮醫護人員的工作需求和職業健康。

醫療空間聲景設計面臨的主要挑戰之一是多樣化的功能需求平衡。不同的醫療功能區域對聲學環境有著截然不同的要求：病房需要安靜的康復環境，手術室需要精確的語音交流，急診科需要有效的緊急響應，門診區需要適度的隱私保護。Okcu (2011) 的研究致力於開發基於證據的設計指標和方法來改善醫療聲景，透過診斷醫療聲音環境的問題並提出設計解決方案 [28]。

醫療設備噪音的控制是醫療空間聲景設計的重要技術挑戰。現代醫療設備，如呼吸機、監護儀、影像設備等，往往產生複雜的噪音信號，這些噪音不僅影響患者休息，也可能干擾醫護人員的工作。有效的醫療設備噪音控制需要從設備選型、空間配置、聲學處理等多個層面進行綜合考量。

De Ruiter (2015) 提出了"治療性聲景：醫院聲學 2.0"的概念，強調在醫院設計階段就必須確立聲音吸收、允許聲音水準和隔音要求 [29]。這種前瞻性的設計思維要求醫療建築設計師從項目初期就將聲學考量納入整體設計框架，而不是在後期進行補救性的聲學處理。

醫療空間聲景設計的一個重要發展方向是積極性聲音環境的營造。研究表明，適當的自然聲音（如鳥鳴、流水聲）、音樂療法等可以有效降低患者的壓力水準，促進康復過程。這種積極性聲景設計要求設計師不僅要控制不良聲音，還要主動引入有益的聲音元素。

隱私保護是醫療空間聲景設計的重要考量。醫療對話的私密性對患者的心理安全感和醫療品質都具有重要意義。HIPAA 等醫療隱私法規對醫療空間的聲學隱私提出了具體要求，這需要透過合理的空間配置、有效的聲音遮蔽以及適當的聲學處理來實現。

夜間聲學環境的控制對患者的睡眠品質和康復效果具有重要影響。醫院的夜間環境不僅要控制整體噪音水準，還要避免突發性噪音的干擾。這要求對醫護人員的夜間工作流程、醫療設備的運行模式、建築系統的控制策略等進行綜合優化。

醫療空間聲景設計的技術策略包括分區聲學設計、主動噪音控制、聲音遮蔽技術、智慧化聲學監控等。分區設計根據不同醫療功能的需求提供相應的聲學環境；主動噪音控制技術可以有效減少低頻設備噪音；聲音遮蔽技術有助於保護患者隱私；智慧化監控系統可以即時監測和調整聲學環境。

醫療空間聲景設計的未來發展趨勢包括個人化治療環境、智慧化聲學系統、循證設計方法以及整合化環境控制等。個人化治療環境為不同類型的患者提供客製化的聲學環境；智慧化系統透過感測器和人工智慧技術實現聲景的自動優化；循證設計方法基於醫學證據和臨床研究結果指導聲景設計；整合化控制統籌聲音、光線、溫度、空氣品質等多重環境因子。

4.3 聲景設計工具 (Tools for Soundscape Design)

聲景設計工具的發展與應用代表了現代建築聲學設計從經驗導向轉向科學導向、從靜態設計轉向動態設計、從標準化設計轉向個人化設計的重要轉變。這些工具不僅提高了聲景設計的精確性和效率，更為創新性的聲學解決方案提供了技術支撐。隨著數位技術、人工智慧、虛擬實境等先進技術的快速發展，聲景設計工具正經歷著前所未有的變革，為建築師、聲學顧問和相關專業人員提供了更加強大和便利的設計支援。

現代聲景設計工具的多樣性反映了聲景設計任務的複雜性和多維性。從基礎的聲學測量儀器到先進的數值模擬軟體，從傳統的設計手冊到智慧化的決策支持系統，從靜態的參數計算到動態的性能優化，這些工具涵蓋了聲景設計的各個階段和各個方面。有效地運用這些工具需要設計師具備相應的技術素養和整合能力，能夠根據具體的設計任務和項目條件選擇最適合的工具組合。

聲景設計工具的發展趨勢指向更加智慧化、整合化和使用者友善的方向。智慧化體現在工具能夠自主學習、自動優化和智能決策；整合化體現在不同工具之間的資料共享和流程銜接；使用者友善性則體現在介面設計的人性化和操作流程的簡化。這些發展趨勢將使聲景設計工具更加貼近實際設計需求，更好地支援設計創新和品質提升。

聲景設計工具的有效應用不僅取決於工具本身的技術先進性，更取決於使用者的專業能力和應用策略。優秀的聲景設計師不僅要熟練掌握各種工具的使用方法，更要深入理解工具的原理和限制，能夠合理地解釋工具結果，正確地指導設計決策。同時，工具的應用也要與設計創意、專業判斷、使用者需求等因素有機結合，避免過度依賴工具而忽視設計的本質要求。

4.3.1 聲學模擬 (Acoustic Simulation)

聲學模擬技術的發展為建築聲景設計帶來了革命性的變化，使設計師能夠在建築建造之前就精確預測和優化室內聲學環境。這項技術不僅大幅降低了設計風險和

修改成本，更為創新性的聲學設計提供了可靠的技術支撐。Peters (2010) 在其關於聲學性能作為設計驅動力的研究中強調，建築設計過程中同時運用了計算設計工具和整合聲學模擬技術，使聲學性能成為設計優化的重要考量因素 [30]。

現代聲學模擬軟體運用多種先進的數值計算方法，包括幾何聲學的射線追蹤法、波動聲學的有限元法和邊界元法、以及統計聲學的混響理論等。每種方法都有其適用範圍和精度特點，設計師需要根據具體的設計任務和精度要求選擇合適的計算方法。Wang and Kang (2022) 透過系統回顧和元分析的方法，全面分析了表演空間聲學電腦模擬的發展狀況，從研究設計和比較指標兩個方面進行了深入探討 [31]。

建築資訊模型(BIM)與聲學模擬的整合代表了聲學設計工具發展的重要方向。Wu and Clayton (2013) 提出的基於 BIM 的聲學模擬框架，旨在將聲學分析納入建築設計流程，加速聲學分析過程並促進更多建築設計項目納入聲學考量 [32]。這種整合不僅提高了設計效率，更確保了聲學設計與建築設計的協調統一，避免了傳統設計流程中聲學考量滯後的問題。

聲學模擬的準確性和可靠性是設計實務中的重要關注點。模擬結果的準確性取決於多個因素，包括幾何模型的精度、材料參數的準確性、邊界條件的設定、計算方法的選擇等。設計師需要對這些影響因素有深入的理解，才能正確地設置模擬參數和解釋模擬結果。同時，模擬結果還需要透過實測驗證來確保其可靠性。

幾何聲學模擬基於聲線傳播理論，適用於中高頻段的聲學計算。這種方法的優點是計算效率高、適用於複雜幾何形狀，但在低頻段和小尺寸空間中的精度有限。射線追蹤法是最常用的幾何聲學模擬方法，透過追踪大量聲線的傳播路徑來計算聲學參數。鏡像聲源法則適用於規則幾何形狀的空間，計算精度較高但幾何適用性有限。

波動聲學模擬基於聲波方程的數值求解，能夠準確描述聲音的波動特性，特別適用於低頻段和小尺寸空間的聲學計算。有限元法(FEM)透過將空間離散化為有限個小單元，求解每個單元上的聲波方程，適用於複雜邊界條件和非均勻媒質。邊

界元法(BEM)只需對邊界進行離散化，計算效率較高，特別適用於外部聲場計算。

Bassuet et al. (2014) 的研究探討了幾何聲學中的計算和優化設計方法，展示了如何運用射線追蹤技術進行即時分析，並將結果匯出到聲學模擬程式中以實現預期的聲學效果 [33]。這種即時分析能力使聲學模擬能夠更好地整合到建築設計流程中，支援設計師進行快速的方案比較和優化。

聲學模擬軟體的發展趨勢包括計算精度的提升、計算效率的改善、使用者介面的優化以及與其他設計工具的整合。人工智慧和機器學習技術的應用也為聲學模擬帶來了新的可能性，透過智慧化的參數優化和結果分析，可以進一步提高模擬的效率和準確性。

聲學模擬在聲景設計中的應用不僅限於傳統的混響時間、聲壓分布等參數計算，還擴展到了聲景品質的預測和優化。透過結合心理聲學模型和主觀評價方法，現代聲學模擬工具能夠預測聲景的主觀感受，為以人為本的聲景設計提供科學支撐。

虛擬實境技術與聲學模擬的結合為聲景設計提供了全新的體驗工具。設計師和使用者可以在虛擬環境中親身體驗設計方案的聲學效果，進行即時的評估和修改。這種沉浸式的設計評估方法不僅提高了設計的準確性，也增強了設計溝通的效果。

4.3.2 聲音設計與控制 (Sound Design and Control)

聲音設計與控制在現代建築聲景營造中扮演著越來越重要的角色，它不僅包括傳統的被動聲學處理，更涵蓋了主動聲音生成、智慧化聲音控制、個人化聲音體驗等創新性技術應用。這一領域的發展反映了聲景設計理念從消極的噪音控制轉向積極的聲音環境營造的重要轉變。Cavanaugh and Wilkes (1999) 在其經典著作中強調，聲音的產生、測量、增強和控制都是建築聲學設計的重要組成部分，設計師需要掌握聲學科學的基本原理才能有效地進行聲音設計 [34]。

現代聲音設計的理念已經超越了傳統的噪音控制範疇，轉向創造能夠增進人類福祉、支持特定活動、體現空間特色的積極聲音環境。這種轉變要求設計師不僅要

具備傳統的聲學技術知識，更要理解聲音的心理效應、文化內涵、社會功能等多重層面的影響。Long (2005) 在其建築聲學教科書中詳細闡述了聲音在建築環境中的多重作用，包括功能性作用（如語音交流、警示信號）和體驗性作用（如氛圍營造、情感表達）[35]。

主動聲音控制技術為聲音設計提供了強大的技術工具。與傳統的被動控制方法不同，主動控制技術透過電子系統產生反相聲波來抵消不希望的噪音，同時可以選擇性地增強或引入希望的聲音元素。這項技術在低頻噪音控制方面具有顯著優勢，特別適用於機電設備噪音、交通噪音等低頻成分較多的噪音源。

聲音遮蔽技術是聲音設計中的重要策略之一。透過引入適當的背景聲音，可以有效地提高環境噪音的聽閾，減少突發噪音的干擾，同時保護語音隱私。現代聲音遮蔽系統不僅考慮遮蔽效果，還注重遮蔽聲本身的品質和宜人性，避免引入新的噪音污染。

Passero and Zannin (2012) 的研究探討了透過建築設計和噪音控制來評估和調整開放式辦公室的聲學環境，強調了優化這類辦公室聲學設計的複雜性 [36]。研究結果顯示，有效的開放式辦公室聲音控制需要綜合運用空間設計、材料選擇、設備配置等多種策略，單一的技術手段往往難以達到理想效果。

智慧化聲音控制系統代表了聲音設計技術的最新發展方向。這類系統透過感測器網路即時監測環境聲學狀況，運用人工智慧演算法分析聲音特徵和使用者行為，自動調整聲音控制參數以維持最佳的聲學環境。智慧系統不僅可以提高控制精度和響應速度，還可以學習使用者偏好，提供個人化的聲音體驗。

聲場增強技術在大空間聲音設計中具有重要應用價值。透過分布式的麥克風和揚聲器系統，可以實現聲音的均勻分布、語音清晰度的改善、混響時間的調節等功能。現代聲場增強系統還可以創造虛擬聲學環境，使同一空間能夠根據不同使用需求呈現不同的聲學特性。

個人化聲音設計是聲音控制技術的重要發展方向。透過可穿戴設備、定向聲音技

術、空間音頻技術等手段，可以為不同使用者提供客製化的聲音體驗，在共享空間中實現個人化的聲學環境。這種技術對於滿足多元化使用需求、提高空間利用效率具有重要意義。

環境響應式聲音設計強調聲音系統與環境條件的動態適應。系統可以根據天氣變化、使用人數、活動類型等環境因子自動調整聲音參數，確保在各種條件下都能提供適宜的聲學環境。這種適應性設計對於提高系統的實用性和用戶滿意度具有重要價值。

生態聲音設計注重聲音環境的永續性和環境友善性。透過利用自然聲音、可再生能源、低功耗技術等手段，創造既能滿足功能需求又能最小化環境影響的聲音系統。這種設計理念符合永續發展的要求，為綠色建築和生態城市建設提供了技術支撐。

聲音設計與控制的未來發展趨勢包括人工智慧化、個人化、整合化和永續化等方向。人工智慧技術將使聲音系統更加智慧和自主；個人化技術將提供更加精準和貼心的聲音體驗；整合化發展將實現聲音系統與其他建築系統的無縫連接；永續化設計將確保聲音技術的環境友善性和長期可持續性。

4.3.3 數位化聲景規劃 (Digital Soundscape Planning)

數位化聲景規劃代表了現代聲景設計方法論的重要革新，它運用先進的數位技術工具來支援聲景的分析、設計、評估和管理全過程。這種規劃方法不僅大幅提高了聲景設計的科學性和精確性，更為複雜聲景問題的解決提供了系統性的技術支撐。數位化工具的應用使得聲景規劃能夠處理更大規模的空間範圍、更複雜的影響因子、更多樣化的使用需求，同時支援多利害關係人的參與和協作。

Lippold and Lawrence (2019) 在其關於聲景規劃作為都市規劃工具的研究中，探討了在德國整合聲景規劃作為規劃工具的選擇方案，將規劃工具理解為能夠實現規劃的工具 [37]。這項研究強調了聲景規劃的系統性和工具性特徵，提醒規劃師需要建立科學的方法論和技術體系來支援聲景規劃的實施。

參與式聲景感測技術為數位化聲景規劃提供了重要的資料支撐。Li et al. (2018) 描述了一個涉及公眾參與感測的聲景調查和評估項目，開發了參與式聲景感測(PSS)工具 [38]。這種方法透過動員公眾參與聲景資料的收集和評估，不僅可以獲得大量的實地資料，還能夠增進公眾對聲景問題的認識和參與度，為聲景規劃的民主化和科學化提供了技術基礎。

聲景地圖製作是數位化聲景規劃的重要技術手段。Margaritis and Kang (2017) 的研究探討了聲景地圖在環境噪音管理和都市規劃中的應用，透過兩個英國城市的案例研究展示了聲景地圖的製作方法和應用價值 [39]。聲景地圖不僅可以視覺化地展示聲景的空間分布特徵，還可以支援聲景品質的量化評估和改善策略的制定。

互動式聲景介面技術為聲景規劃提供了創新的使用者體驗工具。Orio et al. (2021) 開發的"定位你的聲景"系統提供了分面搜索介面和標記聲景的數位地圖，透過與智慧面板的互動可以直接訪問聲景資訊 [40]。這種互動式技術使得聲景資訊的獲取和使用更加便利和直觀，有助於提高聲景規劃的參與度和實用性。

大資料分析技術在數位化聲景規劃中具有重要的應用潛力。透過收集和分析大量的聲音資料、使用者行為資料、環境監測資料等，可以深入理解聲景的時空變化規律、影響因子關係、使用者偏好模式等，為聲景規劃決策提供科學依據。機器學習和人工智慧技術的應用可以從複雜的資料中自動發現有用的模式和規律。

虛擬實境和擴增實境技術為聲景規劃提供了沉浸式的設計和評估工具。規劃師和使用者可以在虛擬環境中體驗不同的聲景方案，進行即時的比較和評估。這種技術不僅可以提高設計的準確性，還可以促進多方利害關係人之間的溝通和協作，是參與式規劃的重要技術支撐。

雲端計算平台為數位化聲景規劃提供了強大的計算資源和資料儲存能力。大規模的聲學模擬、複雜的資料分析、即時的系統控制等都需要大量的計算資源，雲端平台的彈性擴展能力可以滿足不同規模項目的需求。同時，雲端平台也便於資料

共享和協作，支援分散式的規劃團隊協作。

物聯網技術為聲景監測和管理提供了自動化的技術手段。透過分布式的聲音感測器網路，可以即時監測大範圍區域的聲景狀況，自動收集聲學資料，及時發現問題並觸發相應的控制措施。這種自動化的監測和管理系統對於大型城市和複雜建築群的聲景管理具有重要價值。

區塊鏈技術在聲景資料管理和治理中也具有應用潛力。透過區塊鏈的分散式記帳和智慧合約功能，可以建立透明、可信的聲景資料管理系統，保障資料的真實性和完整性，支援多方參與的聲景治理機制。

數位雙胞胎技術代表了數位化聲景規劃的前沿發展方向。透過建立實體聲景環境的數位化副本，可以實現聲景的即時監測、預測分析、虛擬測試等功能。數位雙胞胎技術將物理世界和數位世界深度融合，為聲景規劃和管理提供了全新的技術範式。

數位化聲景規劃的未來發展趨勢包括智慧化、協作化、個人化和永續化等方向。智慧化體現在運用人工智慧技術實現規劃的自動化和最優化；協作化強調多方參與和跨領域合作；個人化注重滿足不同使用者的個別需求；永續化則要求規劃過程和結果都符合永續發展的要求。

4.4 室內聲景優化策略 (Indoor Soundscape Optimization Strategies)

室內聲景優化策略的制定與實施是現代建築聲學設計的核心任務，它需要綜合運用多種技術手段、設計方法和管理策略來創造最適宜的室內聲音環境。這些策略不僅要解決現有的聲學問題，更要主動營造能夠增進使用者福祉、支持特定功能、體現設計理念的積極聲景。有效的優化策略需要基於對使用者需求的深入理解、對聲學原理的準確掌握、對技術手段的靈活運用以及對實施效果的持續評估。

室內聲景優化的複雜性源於其多重目標和約束條件的平衡。優化策略必須同時考慮聲學性能、經濟效益、美學效果、環境影響、維護便利性等多個維度的要求，

這需要設計師具備系統性思維和整合性能力。同時，室內聲景的動態性和情境依賴性也要求優化策略具備足夠的彈性和適應性，能夠應對不同使用情境和變化需求。

現代室內聲景優化策略正朝向更加智慧化、個人化、整合化的方向發展。智慧化體現在運用感測器、人工智慧、自動控制等技術實現聲景的自適應優化；個人化體現在為不同使用者提供客製化的聲音體驗；整合化則體現在聲景優化與建築的其他系統（照明、通風、資訊等）實現協調配合。這些發展趨勢不僅提高了優化的效果和效率，也為聲景設計開拓了新的可能性。

室內聲景優化策略的成功實施需要全生命週期的考量，從設計階段的前瞻性規劃，到施工階段的品質控制，再到使用階段的持續維護和調整。這種全週期管理思維要求各相關專業人員建立密切的協作關係，確保優化策略的有效落實和持續改進。

4.4.1 聲學材料應用 (Acoustic Materials Application)

聲學材料的選擇與應用是室內聲景優化的基礎策略，也是最直接有效的技術手段之一。不同的聲學材料具有不同的吸音、反射、透射、擴散特性，合理的材料配置可以實現對室內聲場的精確調控，創造符合特定功能需求的聲音環境。Asdrubali et al. (2012) 在其關於永續聲學材料的綜述研究中指出，許多目前使用的聲學材料在永續性方面存在不足，需要開發更多環保型的聲學材料選擇 [41]。

傳統聲學材料主要包括多孔吸音材料、薄膜吸音材料、共振吸音材料等類型。多孔吸音材料如礦物棉、玻璃纖維、泡沫塑料等，透過材料內部的微細孔隙將聲能轉化為熱能，對中高頻聲音具有良好的吸音效果。薄膜吸音材料如石膏板、木板等，透過薄膜的振動吸收聲能，主要針對中低頻聲音。共振吸音材料如穿孔板、縫隙吸音結構等，透過共振現象在特定頻率範圍內實現高效吸音。

現代聲學材料技術的發展為室內聲景優化提供了更多選擇。Setunge and Gamage (2016) 在其關於土木工程中聲學材料應用的研究中，全面回顧了土木建築工程中使用的各種聲學處理方法和常用材料 [42]。研究探討了各種聲學處理技術在

土木工程中的應用，為材料選擇提供了技術指導。

永續聲學材料的開發和應用已成為當前研究的熱點方向。Buratti et al. (2016) 的研究探討了使用回收材料製作的永續面板在建築應用中的環境和聲學特性，發現儘管創新材料的聲學性能較標準解決方案略低，但仍能滿足基本的聲學要求[43]。這項研究為綠色建築中聲學材料的選擇提供了重要參考。

智慧聲學材料代表了材料技術發展的前沿方向。這類材料能夠根據環境條件或控制信號改變其聲學特性，實現聲學性能的動態調節。例如，電致變色聲學材料可以透過電信號控制改變其吸音性能；形狀記憶合金聲學材料可以根據溫度變化調整其結構形態和聲學特性。

複合聲學材料的應用可以實現多重功能的整合。例如，聲熱複合材料同時具備聲學性能和保溫性能；聲光複合材料結合了聲學處理和照明功能；聲裝複合材料將聲學功能與裝飾效果有機結合。這種多功能整合不僅可以提高材料的使用效率，還可以減少建築空間的佔用。

聲學材料的頻率特性是選擇和應用的重要考量因素。不同頻率的聲音對聲學材料的性能要求不同，需要根據具體的聲學問題選擇相應的材料類型。低頻聲音通常需要較厚的多孔材料或專門的低頻吸音結構；高頻聲音則可以透過較薄的吸音材料有效控制。

聲學材料的空間配置對其效果具有重要影響。材料的位置、面積、厚度、與牆面的距離等都會影響其聲學性能。合理的配置設計需要考慮聲音的傳播路徑、反射模式、聲場分布等因素。計算機聲學模擬技術可以幫助優化材料配置方案。

Santoni et al. (2019) 的研究探討了建築材料的物理、機械和聲學性能對聲音預測模型的影響，指出建築聲學設計需要了解眾多參數，這使得標準 EN ISO 12354 在實際建築中的應用變得困難 [44]。這項研究強調了聲學材料參數準確性的重要性，提醒設計師需要獲得可靠的材料性能資料。

生物基聲學材料的開發反映了材料技術的永續發展趨勢。利用農業廢料、木質纖維、天然纖維等可再生原料製造的聲學材料，不僅具有良好的聲學性能，還具備環境友善性和成本優勢。這類材料的推廣應用對於實現建築業的永續發展具有重要意義。

納米聲學材料技術為聲學性能的精確控制提供了新的可能性。透過納米尺度的結構設計和材料改性，可以實現聲學性能的精確調節和功能優化。納米多孔材料、納米複合材料、納米結構表面等都在聲學應用中展現出巨大潛力。

聲學材料應用的未來發展趨勢包括智慧化、多功能化、客製化和永續化等方向。智慧化材料能夠自適應地調整聲學性能；多功能化材料整合多種建築性能；客製化生產滿足特殊應用需求；永續化設計確保材料的環境友善性。這些發展趨勢將推動聲學材料技術邁向更加先進和環保的新階段。

4.4.2 主動噪音控制 (Active Noise Control)

主動噪音控制(ANC)技術作為現代聲景優化的重要手段，透過電子系統產生與噪音信號相位相反的控制信號，利用聲波的干涉原理來抵消不希望的噪音，為室內聲景的精確控制提供了強大的技術支撐。這項技術的發展不僅擴展了傳統被動噪音控制的頻率範圍，更為複雜噪音環境的優化提供了創新性的解決方案。

主動噪音控制系統的基本組成包括參考麥克風（用於檢測原始噪音信號）、錯誤麥克風（用於監測控制效果）、數位信號處理器（用於生成控制信號）和次級聲源（用於發出控制聲波）。系統的工作原理基於自適應濾波演算法，能夠即時分析噪音特性並生成相應的控制信號。現代 ANC 系統還整合了機器學習演算法，能夠自動優化控制參數並適應環境變化。

ANC 技術在低頻噪音控制方面具有顯著優勢。傳統的被動控制方法（如吸音材料、隔音牆）在低頻段的效果有限，而 ANC 技術可以有效控制 100-1000Hz 範圍內的噪音，特別適合處理暖通空調系統、交通工具、工業設備等產生的低頻噪音。這種頻率特性的互補使得 ANC 技術成為建築聲學設計的重要補充。

室內環境中的 ANC 應用面臨特殊的技術挑戰。與開放空間不同，室內環境的聲場受到牆面、天花板、傢俱等邊界條件的複雜影響，聲音的傳播和反射模式更加複雜。這要求 ANC 系統具備更強的適應能力和更精確的控制演算法。多通道 ANC 系統透過使用多個感測器和控制源，可以更好地適應複雜的室內聲場條件。

全域噪音控制與局域噪音控制是 ANC 系統設計的兩種基本策略。全域控制旨在降低整個空間的噪音水準，需要較多的控制源和較複雜的控制演算法，但效果範圍更廣。局域控制則針對特定區域（如工作位置、休息區）進行噪音控制，系統相對簡單但效果範圍有限。實際應用中需要根據空間特點和使用需求選擇適當的控制策略。

ANC 技術與建築機電系統的整合是提高控制效果的重要途徑。將 ANC 系統整合到暖通空調系統中，可以直接在噪音源頭進行控制，避免噪音透過管道系統傳播到各個房間。這種源頭控制方式不僅效果更好，還可以減少系統的複雜性和成本。

個人化 ANC 技術的發展為室內聲景的客製化控制提供了新的可能性。透過個人穿戴設備或定向控制技術，可以為不同使用者提供個別化的噪音控制效果，在共享空間中實現個人化的聲學環境。這種技術對於開放式辦公室、圖書館、學習中心等多人共用空間具有重要應用價值。

ANC 系統的能耗控制是實際應用中的重要考量。現代 ANC 系統採用低功耗的數位信號處理器和高效率的放大器，可以大幅降低系統的能耗。智慧化的控制演算法還可以根據噪音水準自動調整系統的工作狀態，在滿足控制效果的前提下最小化能耗。

ANC 技術與聲音遮蔽技術的結合應用可以實現更好的聲景優化效果。ANC 系統負責消除低頻噪音，而聲音遮蔽系統負責遮蔽中高頻噪音和提供舒適的背景聲音。這種混合式控制策略可以充分發揮各種技術的優勢，創造更加宜人的聲音環境。

ANC 系統的穩定性和可靠性對實際應用至關重要。系統必須能夠在各種環境條

件下穩定工作，避免產生嘯叫、振盪等不良現象。現代 ANC 系統採用先進的穩定性控制演算法和故障診斷功能，可以確保系統的長期穩定運行。

ANC 技術在不同建築類型中的應用策略有所不同。在辦公建築中，ANC 主要用於控制機電設備噪音和外部交通噪音；在住宅建築中，ANC 可以改善居住舒適度；在醫療建築中，ANC 有助於創造安靜的康復環境；在教育建築中，ANC 可以改善學習環境的聲學品質。

ANC 技術的未來發展趨勢包括智慧化、小型化、網路化和個人化等方向。智慧化 ANC 系統能夠自主學習和優化；小型化技術使得 ANC 設備更加便攜和隱蔽；網路化 ANC 系統可以實現多點協調控制；個人化 ANC 技術為每個使用者提供客製化的噪音控制體驗。這些發展趨勢將推動 ANC 技術在建築聲景優化中發揮更大的作用。

4.4.3 聲音遮蔽技術 (Sound Masking Technologies)

聲音遮蔽技術作為現代室內聲景優化的重要策略，透過引入經過精心設計的背景聲音來提高環境噪音的聽閾，減少語音干擾並增強聲學隱私。這項技術不同於傳統的噪音消除方法，它不是試圖消除聲音，而是透過心理聲學原理來改善聲音環境的主觀感受。現代聲音遮蔽技術已廣泛應用於辦公室、醫療機構、教育設施等各類建築環境中。

聲音遮蔽的基本原理建立在聽覺遮蔽現象的基礎上。當一個聲音的存在使得另一個聲音變得難以聽見時，就產生了聽覺遮蔽效應。聲音遮蔽系統透過播放特定頻譜特性的背景聲音，可以有效地遮蔽語音交談和其他干擾聲音，同時不會對正常的溝通活動造成影響。這種技術特別適用於開放式辦公環境、醫療諮詢區域、法律服務場所等需要保護語音隱私的空間。

現代聲音遮蔽系統通常採用粉紅噪音作為基礎聲譜，這種聲音的頻率分布與人類語音的長期平均頻譜相匹配，能夠有效遮蔽語音信號的同時保持自然和諧的聽感。系統透過精確的頻譜調節和音量控制，確保遮蔽聲在提供有效遮蔽的同時不會引

起聽覺疲勞或干擾正常活動。典型的遮蔽聲音量控制在 45-48 dB(A)之間，既能達到遮蔽效果又不會對使用者造成負擔。

辦公環境是聲音遮蔽技術應用最廣泛的領域之一。在開放式辦公室中，聲音遮蔽系統不僅能夠減少語音干擾，提高工作效率，還能夠保護商業機密和個人隱私。現代辦公建築中的聲音遮蔽系統通常整合到天花板系統中，透過分散式的揚聲器網路實現均勻的聲場分布。系統還具備分區控制功能，可以根據不同區域的功能需求調整遮蔽參數。

醫療環境中的聲音遮蔽技術需要特別考慮患者的心理需求和醫療法規要求。HIPAA 等醫療隱私法規對醫療對話的隱私保護提出了嚴格要求，聲音遮蔽技術成為滿足這些要求的重要技術手段。醫療用聲音遮蔽系統不僅要提供有效的隱私保護，還要確保不會干擾醫療設備的正常運行或影響緊急通訊的清晰度。

教育環境中的聲音遮蔽應用需要謹慎考慮其對學習活動的影響。在圖書館、自習室等需要安靜環境的空間中，適度的聲音遮蔽可以遮蔽突發噪音的干擾，創造更加穩定的學習環境。然而，在教室等需要清晰語音交流的空間中，聲音遮蔽的應用需要更加謹慎，避免影響教學效果。

現代聲音遮蔽系統越來越重視聲音品質的優化。除了基本的粉紅噪音外，系統還可以播放自然聲音（如雨聲、流水聲、微風聲）或專門設計的環境聲效。這些高品質的遮蔽聲不僅具有良好的遮蔽效果，還能夠營造宜人的環境氛圍，提升空間的整體品質。

智慧化聲音遮蔽系統代表了技術發展的最新方向。這類系統整合了環境感測、人工智慧、自動控制等技術，能夠根據環境噪音水準、人員活動情況、時間變化等因素自動調整遮蔽參數。系統還可以學習使用者的偏好和行為模式，提供個人化的遮蔽體驗。

個人化聲音遮蔽技術為解決共享空間中的個體差異問題提供了新的途徑。透過個人穿戴設備、定向聲音技術或智慧手機應用程式，可以為不同使用者提供客製化

的遮蔽體驗。這種技術特別適用於多樣化的工作環境，可以滿足不同工作性質和個人偏好的需求。

聲音遮蔽技術與建築聲學設計的整合是提高系統效果的重要策略。透過合理的空間配置、適當的材料選擇、有效的聲學處理，可以為聲音遮蔽系統創造更好的工作環境。例如，適度的吸音處理可以減少遮蔽聲的過度反射，而合理的空間分隔可以避免遮蔽聲對鄰近區域的影響。

環境響應式聲音遮蔽系統能夠根據外部環境條件的變化自動調整系統參數。例如，在交通噪音較高的時段增加遮蔽強度，在安靜時段降低遮蔽音量。這種自適應控制不僅可以確保遮蔽效果的穩定性，還可以最佳化能耗和使用者體驗。

聲音遮蔽技術的效果評估需要結合客觀測量和主觀評價。客觀測量包括聲學參數（如聲壓級、頻譜分析、空間分布）和語音隱私指標（如語音清晰度指數、隱私指數）。主觀評價則透過使用者調查、滿意度評估、工作效率測試等方法來評估系統的實際效果。

聲音遮蔽技術的未來發展趨勢包括人工智慧化、個人化、環境整合化和永續化等方向。人工智慧化使系統更加智慧和自主；個人化技術提供更精準的遮蔽體驗；環境整合化實現與其他建築系統的協調配合；永續化設計確保技術的環境友善性和長期可持續性。這些發展趨勢將推動聲音遮蔽技術在建築聲景優化中發揮更大的作用。

參考文獻 (References)

[1] Cavanaugh, W. J., & Wilkes, J. A. (1999). Architectural acoustics: Principles and practice . John Wiley & Sons.

[2] Long, M. (2005). Architectural acoustics . Academic Press.

[3] Field, C. (2008). Acoustic design in green buildings. ASHRAE Journal , 50(8), 40-46.

[4] Milo, A. (2020). The acoustic designer: Joining soundscape and architectural acoustics in architectural design education. Building Acoustics , 27(1), 3-20.

[5] Kang, J. (2023). Soundscape in city and built environment: Current developments and design potentials. City and Built Environment , 1(1), 1-25.

[6] Ma, K. W., Mak, C. M., & Wong, H. M. (2021). Effects of environmental sound quality on soundscape preference in a public urban space. Applied Acoustics , 171, 107570.

[7] Xiao, J., & Aletta, F. (2016). A soundscape approach to exploring design strategies for acoustic comfort in modern public libraries: A case study of the Library of Birmingham. Noise Mapping , 3(1), 264-273.

[8] Wen, X., Meng, Q., Yang, D., & Li, M. (2024). Effect of thermal-acoustic composite environments on comfort perceptions considering different office activities. Energy and Buildings , 306, 113933.

[9] Wen, X., Meng, Q., Yin, Y., Yang, D., Li, M., & Kang, J. (2025). Exploring the boundaries of indoor combined thermal-acoustic environmental effects on comfort perceptions. Building and Environment , 267, 111629.

[10] Acun, V., & Yilmazer, S. (2018). A grounded theory approach to investigate the perceived soundscape of open-plan offices. Applied Acoustics , 131, 28-37.

[11] Jeon, J. Y., Jo, H. I., Santika, B. B., & Lee, H. (2022). Crossed effects of audio-visual environment on indoor soundscape perception for pleasant open-plan office environments. Building and Environment , 207, 108070.

[12] West, B., Deuchars, A., & Ali-MacLachlan, I. (2024). Office soundscape assessment: A model of acoustic environment perception in open-plan offices. The Journal of the Acoustical Society of America , 156(5), 2949-2965.

[13] Jo, H. I., & Jeon, J. Y. (2022). Influence of indoor soundscape perception based on audiovisual contents on work-related quality with preference and perceived productivity in open-plan offices. Building and Environment , 208, 108896.

[14] Abdalrahman, Z., & Galbrun, L. (2017). Soundscape assessment of a water feature used in an open-plan office. 33rd Passive and Low Energy Architecture Conference , 3, 2017-2024.

[15] Rachman, Z., Aletta, F., & Kang, J. (2025). Advancing soundscape assessment in open-plan offices: Insights from expert focus groups. Building Acoustics , 32(1), 68-84.

[16] Flagg-Williams, J. B., Rubin, R. L., & Pisoni, D. B. (2011). Classroom soundscape. Educational & Child Psychology , 28(3), 89-101.

[17] Pääkkönen, R., Vehviläinen, T., Jokitulppo, J., Niemi, O., Nenonen, S., & Lindgren, M. (2015). Acoustics and new learning environment–A case study. Applied Acoustics , 100, 74-78.

[18] Visentin, C., Torresin, S., Pellegatti, M., Prodi, N., & Babich, F. (2023). Indoor

soundscape in primary school classrooms. The Journal of the Acoustical Society of America , 154(3), 1813-1823.

[19] Chan, Y. N., Choy, Y. S., To, W. M., & Lai, T. M. (2021). Influence of classroom soundscape on learning attitude. International Journal of Innovation , 3(3), 20.

[20] Topak, S. Ç., & Yılmazer, S. (2022). A comparative study on indoor soundscape assessment via a mixed method: A case of the high school environment. Applied Acoustics , 188, 108001.

[21] Hytönen-Ng, E., Pihlainen, K., Ng, K., & Juntunen, M. L. (2022). Sounds of learning: Soundscapes-teacher perceptions of acoustic environments in Finland's open plan classrooms. Issues in Educational Research , 32(3), 906-927.

[22] Scannell, L., Hodgson, M., & Gifford, R. (2016). The role of acoustics in the perceived suitability of, and well-being in, informal learning spaces. Environment and Behavior , 48(6), 769-795.

[23] ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1 (R2020). Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools . American National Standards Institute.

[24] World Health Organization. (1999). Guidelines for Community Noise . WHO Press.

[25] Ryherd, E. E., West, J. E., Busch-Vishniac, I. J., & Waye, K. P. (2008). Evaluating the hospital soundscape. Acoustics Today , 4(4), 22-29.

[26] Watts, G., Khan, A., & Pheasant, R. (2016). Influence of soundscape and interior design on anxiety and perceived tranquillity of patients in a healthcare setting. Applied Acoustics , 104, 135-141.

[27] Busch-Vishniac, I., & Ryherd, E. (2019). Hospital soundscapes: Characterization, impacts, and interventions. Acoustics Today , 15(3), 11-19.

[28] Okcu, S. (2011). Developing evidence based design metrics and methods for improving healthcare soundscapes [Doctoral dissertation]. Georgia Institute of Technology.

[29] De Ruiter, E. (2015). Healing soundscape: Hospital acoustics 2.0. Proceedings of EuroNoise 2015 , 233.

[30] Peters, B. (2010). Acoustic performance as a design driver: Sound simulation and parametric modeling using smartgeometry. International Journal of Architectural Computing , 8(3), 337-360.

[31] Wang, C., & Kang, J. (2022). Development of acoustic computer simulation for performance spaces: A systematic review and meta-analysis. Building Simulation , 15(11), 1817-1833.

[32] Wu, C., & Clayton, M. (2013). BIM-based acoustic simulation framework. 30th CIB W78 International Conference , 513-522.

[33] Bassuet, A., Rife, D., & Dellatorre, L. (2014). Computational and optimization design in geometric acoustics. Building Acoustics , 21(1), 75-90.

[34] Cavanaugh, W. J., & Wilkes, J. A. (1999). Architectural acoustics: Principles and practice . John Wiley & Sons.

[35] Long, M. (2005). Architectural acoustics . Academic Press.

[36] Passero, C. R. M., & Zannin, P. H. T. (2012). Acoustic evaluation and adjustment

of an open-plan office through architectural design and noise control. Applied Ergonomics , 43(6), 1066-1071.

[37] Lippold, M., & Lawrence, B. T. (2019). Soundscape planning as a tool for urban planning. 23rd International Congress on Acoustics , 453.

[38] Li, C., Liu, Y., & Haklay, M. (2018). Participatory soundscape sensing. Landscape and Urban Planning , 173, 64-69.

[39] Margaritis, E., & Kang, J. (2017). Soundscape mapping in environmental noise management and urban planning: Case studies in two UK cities. Noise Mapping , 4(1), 87-103.

[40] Orio, N., De Carolis, B., & Liotard, F. (2021). Locate your soundscape: Interacting with the acoustic environment. Multimedia Tools and Applications , 80(12), 18023-18046.

[41] Asdrubali, F., Schiavoni, S., & Horoshenkov, K. V. (2012). A review of sustainable materials for acoustic applications. Building Acoustics , 19(4), 283-311.

[42] Setunge, S., & Gamage, N. (2016). Application of acoustic materials in civil engineering. In R. Padhye & R. Nayak (Eds.), Acoustic Textiles (pp. 165-189). Springer.

[43] Buratti, C., Belloni, E., Lascaro, E., Lopez, G. A., & Ricciardi, P. (2016). Sustainable panels with recycled materials for building applications: Environmental and acoustic characterization. Energy Procedia , 101, 972-979.

[44] Santoni, A., Fausti, P., & Bonfiglio, P. (2019). Building materials: Influence of physical, mechanical and acoustic properties in sound prediction models. Building Acoustics , 26(1), 3-20.

第五章 聲景與文化
Soundscape and Culture

本章全面探討了聲景與文化的多重關係，從音樂創作中的聲景應用到藝術實踐中的創新表達，從社會文化認同的聲音維度到文化遺產保護的現代科技應用。透過對這些議題的深入分析，我們可以看到聲景研究不僅是一個技術性的學科領域，更是理解現代社會文化變遷和人類文化多樣性的重要窗口。在全球化和數位化的時代背景下，聲景的文化意義正在獲得越來越多的重視和關注，這為未來的研究和實踐提供了廣闊的發展空間和無限的可能性。

聲景作為一個跨學科的研究領域，不僅涉及聲音環境的物理特性和心理感知，更深層地連結著人類的文化表達、社會認同與集體記憶。文化與聲景的關係是雙向且動態的：一方面，文化背景和社會脈絡影響著人們對聲音環境的理解和詮釋；另一方面，特定的聲景也在塑造和傳承著文化價值觀念。在全球化的時代背景下，不同文化的聲音環境面臨著同質化的挑戰，同時也展現出跨文化交流與融合的新可能性 [1][2]。

本章將從四個重要維度探討聲景與文化的深層關係。首先，我們將檢視音樂與聲景的相互作用，探討音樂創作如何從環境聲音中汲取靈感，以及聲景構成如何受到音樂文化的影響。其次，我們將分析藝術領域中的聲景應用，特別是聲音藝術和電子音樂創作中的環境聲音運用。第三部分將聚焦於社會文化層面的聲景研究，探討聲音環境如何反映和構建社會身份認同。最後，我們將討論文化遺產保護的聲景維度，以及現代科技在文化聲景保存和傳承中的作用。

透過這些多角度的分析，本章旨在揭示聲景作為文化載體的重要意義，並為聲景研究的文化轉向提供理論基礎和實踐指導。在快速變遷的社會環境中，理解聲景的文化內涵不僅有助於保護和傳承珍貴的聲音文化遺產，也為創造更加豐富多元的聲音環境提供了新的思路和方法 [3][4]。

5.1 音樂與聲景

音樂與聲景的關係構成了當代聲音研究中最具創新性和跨學科特色的領域之一。從歷史發展的角度來看，音樂創作一直與環境聲音保持著密切的關聯，從早期的自然聲音模仿到現代電子音樂中的田野錄音運用，音樂家們不斷地從周遭的聲景中尋找創作靈感。同時，音樂文化的發展也在塑造著人們對特定聲音環境的認知和評價，形成了獨特的文化聲景。在全球化背景下，不同文化傳統的音樂與聲景融合創造出了前所未有的跨文化聲音體驗，既保持了各自的文化特色，又展現了文化交流的無限可能 [5][6]。

5.1.1 聲景構成在音樂創作中的應用

聲景構成（soundscape composition）作為一種獨特的音樂創作方法，代表了音樂藝術與環境聲學、人類學研究的完美結合。這種創作方式的核心在於直接使用環境錄音作為音樂材料，透過對真實聲音環境的採集、處理和重組，創造出既具有音樂性又保持環境真實性的藝術作品。加拿大作曲家 R. Murray Schafer 在 1960 年代提出的「世界聲景項目」（World Soundscape Project）為這種創作方式奠定了理論基礎，他認為聲景構成不僅是一種藝術表現形式，更是對環境聲學生態的深度探索和文化記錄 [7]。

在實際的創作實踐中，聲景構成涉及多個層面的技術和藝術考量。首先是環境聲音的田野錄音階段，作曲家需要深入不同的地理和文化環境，系統性地收集具有代表性的聲音材料。這個過程本身就是一種民族誌研究，要求創作者對當地的文化背景、社會結構和環境特徵有深入的理解。研究顯示，成功的聲景構成作品往往建立在作曲家對特定環境的長期觀察和文化沉浸基礎上，只有這樣才能真正捕捉到該環境的聲音本質和文化內涵 [8]。

從技術角度來看，聲景構成的音樂處理涉及複雜的聲音分析和重構過程。現代數位音樂技術為聲景構成提供了強大的工具支撐，包括高品質的多軌錄音設備、精密的頻譜分析軟體、以及先進的空間音響系統。作曲家可以透過這些技術手段對環境聲音進行細緻的分析和處理，保持聲音的自然特性的同時賦予其音樂性的結構和表現力。Barry Truax 在其聲景構成作品中展示了如何運用顆粒合成（granular synthesis）技術，將環境聲音分解為微觀的聲音單元，然後透過電腦演

算法重新組織，創造出既保持原始聲音特徵又具有全新音樂表現力的作品 [9]。

在文化表達層面，聲景構成體現了對地方性文化和環境特色的深度關注。不同地區的聲景構成作品反映了各自獨特的文化背景和環境特徵，從日本的竹林聲景到北歐的極地聲音環境，每一個聲景構成作品都承載著特定的文化記憶和地方認同。這種創作方式特別強調聲音的文化指涉性，認為任何環境聲音都不是純粹的物理現象，而是充滿文化意義的符號系統。研究表明，聽眾對聲景構成作品的理解和感受很大程度上受到其文化背景的影響，這進一步證實了聲音與文化之間的深層關聯 [10]。

聲景構成在當代音樂教育中也發揮著重要作用。許多音樂院校開始將聲景構成納入作曲課程體系，讓學生透過對環境聲音的深入研究和創作實踐，培養對聲音環境的敏感性和文化意識。這種教育方式不僅拓展了學生的創作視野，也培養了他們對環境保護和文化傳承的責任感。一些研究指出，參與聲景構成學習的學生往往表現出更強的跨文化理解能力和環境意識，這對於培養 21 世紀的音樂人才具有重要意義 [11]。

從美學角度來看，聲景構成挑戰了傳統音樂創作中對於「音樂」與「噪音」的二分法思維。透過將日常環境中的各種聲音納入音樂範疇，聲景構成拓展了音樂美學的邊界，提出了新的聲音藝術價值觀念。這種美學轉向不僅影響了音樂創作實踐，也促進了音樂理論的發展。現代音樂學研究越來越關注聲音的社會性和文化性，聲景構成為這種理論轉向提供了重要的實踐案例和研究素材 [12]。

5.1.2 民族音樂學與聲景研究的交匯

民族音樂學與聲景研究的交匯代表了音樂研究領域中最具跨學科特色的發展方向之一。這種交匯不僅豐富了民族音樂學的研究方法和理論視野，也為聲景研究提供了深厚的文化人類學基礎。在傳統的民族音樂學研究中，學者們主要關注特定文化群體的音樂實踐、儀式功能和社會意義，而聲景研究的引入則將這種關注擴展到了更廣泛的聲音環境和聲音文化現象。這種學科融合反映了當代音樂研究對於文化複雜性和環境整體性的深度認知 [13]。

在方法論層面，民族音樂學的田野調查方法為聲景研究提供了重要的工具和經驗。傳統的民族音樂學田野工作強調長期的文化沉浸和參與觀察，這種方法論取向與聲景研究對於環境深度體驗的要求高度契合。當代的聲景民族誌研究往往需要研究者在特定的文化環境中進行長期駐留，不僅錄製音樂表演，更要系統地記錄和分析整個聲音環境的構成和變化。這種整合性的研究方法使得研究者能夠更加全面地理解音樂與其環境脈絡之間的複雜關係 [14]。

印尼的甘美朗音樂研究為民族音樂學與聲景研究的結合提供了一個絕佳的案例。研究顯示，甘美朗音樂的演奏不僅僅是一種音樂表演，更是與特定空間環境和社會情境密切相關的文化實踐。甘美朗音樂的聲響特質與印尼傳統建築的聲學特性、熱帶環境的自然聲音以及社群儀式的空間安排形成了有機的整體。透過聲景分析方法，研究者發現甘美朗音樂的音色選擇、節奏模式和演奏時間都與當地的聲音生態系統保持著深度的呼應關係 [15]。

南美洲亞馬遜地區的音樂文化研究進一步展示了民族音樂學與聲景研究結合的學術價值。在這些原住民社群中，音樂實踐往往與森林環境的聲音模式密不可分。研究者發現，許多傳統歌曲的旋律和節拍模式都直接模仿或回應特定的自然聲音，如鳥鳴、水流聲和風聲等。這種音樂與環境的深度融合反映了原住民文化中人與自然和諧共存的哲學觀念。透過聲景分析，研究者能夠更加深入地理解這些音樂傳統的生態智慧和文化內涵 [16]。

在技術應用方面，現代聲景分析技術為民族音樂學研究提供了新的分析工具和研究可能性。高精度的聲音頻譜分析軟體可以幫助研究者識別和分離複雜聲音環境中的不同音樂元素，而空間音響記錄技術則能夠保存和重現原始演出環境的聲學特性。這些技術的應用不僅提高了研究的精確性，也為音樂文化的數位化保存和傳承創造了新的可能性。一些研究機構開始建立多維度的音樂文化資料庫，不僅保存音樂表演本身，還記錄相關的聲音環境和文化脈絡資訊 [17]。

從理論建構的角度來看，民族音樂學與聲景研究的交匯促進了對「音樂文化」概念的重新思考。傳統的音樂研究往往將音樂視為相對獨立的藝術形式，而聲景視

角的引入則強調音樂與其環境脈絡之間的有機關聯。這種理論轉向促使研究者更加關注音樂實踐的生態性和系統性特徵，將音樂理解為更廣泛的文化聲景中的重要組成部分。這種整合性的理論觀點對於理解全球化時代的音樂文化變遷具有重要的啟發意義 [18]。

教育實踐方面，民族音樂學與聲景研究的結合也為音樂教育提供了新的方法和內容。許多大學的民族音樂學課程開始納入聲景分析的內容，讓學生透過對不同文化聲音環境的比較研究，深化對音樂文化多樣性的理解。這種教育方式不僅培養了學生的跨文化理解能力，也增強了他們對音樂與環境關係的敏感性。研究顯示，接受過聲景民族音樂學訓練的學生往往表現出更強的文化適應能力和環境意識 [19]。

5.1.3 電子音樂與環境聲音的創新融合

電子音樂與環境聲音的融合代表了當代音樂創作中最具前瞻性和實驗性的發展方向。這種融合不僅拓展了電子音樂的聲音語彙和表現可能性，也為環境聲音的音樂化處理提供了技術支撐和創作平台。從歷史發展脈絡來看，電子音樂與環境聲音的結合可以追溯到 1940 年代的混凝土音樂（musique concrète）運動，當時的作曲家開始使用磁帶錄音技術將現實環境中的聲音納入音樂創作。隨著數位技術的快速發展，這種創作方式獲得了前所未有的技術支撐和表現力 [20]。

在技術層面，現代數位音樂製作系統為環境聲音的電子音樂處理提供了極其豐富的工具和方法。即時聲音處理技術（real-time audio processing）使得音樂家能夠在現場表演中直接對環境聲音進行電子化處理和轉換，創造出動態的、互動的音樂體驗。機器學習和人工智慧技術的應用進一步推動了這一領域的發展，透過智慧化的聲音分析和生成演算法，電子音樂系統能夠自動識別環境聲音的特徵模式，並據此產生相應的音樂回應。這種技術發展為環境互動音樂的創作開闢了全新的可能性 [21]。

空間音響技術在電子音樂與環境聲音融合中扮演著關鍵角色。多聲道音響系統和立體聲定位技術使得作曲家能夠在三維空間中精確控制聲音的位置和移動軌跡，

創造出沉浸式的聲音環境體驗。研究顯示，透過精心設計的空間音響配置，聽眾能夠獲得更加真實和深入的環境聲音體驗，這對於環境意識的培養和生態教育具有重要意義。一些環境主題的電子音樂作品透過空間音響技術重現瀕危生態環境的聲景，為環境保護運動提供了強有力的藝術支持 [22]。

從美學角度來看，電子音樂與環境聲音的融合體現了當代藝術對於自然與技術關係的深度思考。這種創作方式既利用了先進的電子技術，又保持了對自然環境的關注和尊重，體現了技術與自然和諧共存的理想。許多電子音樂家透過對環境聲音的電子化處理，揭示了自然聲音中隱藏的音樂性和美學價值，同時也反思了人類社會的技術發展對自然環境造成的影響。這種美學立場為當代電子音樂賦予了深刻的哲學內涵和社會意義 [23]。

在創作實踐中，電子音樂與環境聲音的融合呈現出多元化的風格和方法。一些作曲家採用極簡主義的處理方式，保持環境聲音的原始特性，僅透過細微的電子化處理增強其音樂表現力。另一些作曲家則採用更加激進的變形技術，將環境聲音作為原材料進行大幅度的電子化改造，創造出超現實的聲音體驗。這種多樣化的創作取向反映了電子音樂領域的開放性和實驗精神，也為不同審美取向的聽眾提供了豐富的選擇 [24]。

環境聲音在電子音樂中的應用也促進了跨文化音樂交流的發展。透過網路技術，來自世界各地的音樂家可以分享和交換環境聲音錄音，並在此基礎上進行協作創作。這種全球性的聲音素材共享不僅豐富了電子音樂的創作資源，也促進了不同文化背景的音樂家之間的理解和合作。一些國際性的環境聲音電子音樂項目展示了這種跨文化合作的巨大潛力和藝術價值 [25]。

教育層面，電子音樂與環境聲音融合的學習和實踐對學生的綜合能力培養具有重要意義。這種學習過程不僅要求學生掌握複雜的電子音樂技術，還要培養他們對環境的敏感性和文化意識。許多音樂院校開設的電子音樂課程開始重視環境聲音的應用，透過田野錄音實踐和電子音樂創作的結合，培養學生的跨學科思維和創新能力。研究表明，這種綜合性的教育方式有助於培養適應 21 世紀音樂發展需求的複合型人才 [26]。

5.2 藝術與聲景

藝術與聲景的關係在當代藝術實踐中展現出前所未有的豐富性和複雜性。聲音作為藝術表現的媒介，不僅拓展了傳統視覺藝術的邊界，也為藝術家提供了探索時間、空間和感知體驗的新途徑。在全球化和數位化的背景下，聲景藝術成為跨文化交流和環境意識表達的重要載體，體現了當代藝術對社會現實和生態危機的深度關注。從概念藝術到裝置藝術，從表演藝術到新媒體藝術，聲景的影響滲透到幾乎所有的當代藝術形式中，形成了獨特的聲音藝術生態系統 [27][28]。

5.2.1 聲音藝術的發展與文化表達

聲音藝術作為一個相對年輕但充滿活力的藝術領域，其發展軌跡反映了 20 世紀以來藝術觀念的根本性變革。從早期的未來主義噪音藝術到當代的聲景裝置，聲音藝術不斷挑戰著傳統藝術的媒介界限和美學標準。這一發展過程不僅體現了技術進步對藝術創作的深刻影響，更重要的是反映了藝術家對現代生活中聲音環境變化的敏銳觀察和深度思考。在工業化和都市化快速發展的背景下，聲音藝術成為藝術家批判現代文明、探索人與環境關係的重要工具 [29]。

在歷史脈絡中，聲音藝術的發展經歷了從邊緣到主流的轉變過程。1910 年代，義大利未來主義藝術家 Luigi Russolo 提出了「噪音藝術」的概念，首次將工業社會的機械聲音納入藝術表現範疇。這一革命性的理念為後來的聲音藝術發展奠定了理論基礎。1950 年代，約翰·凱吉（John Cage）的《4'33"》進一步拓展了對聲音和沉默的藝術理解，強調環境聲音在藝術體驗中的重要性。這些早期的實驗為當代聲音藝術的多元化發展提供了重要的歷史參照和理論支撐 [30]。

現代聲音藝術的文化表達功能體現在多個層面。首先，聲音藝術為邊緣化社群提供了發聲平台和身份表達的途徑。許多女性藝術家、少數族裔藝術家和 LGBTQ+ 藝術家透過聲音作品表達自己的文化身份和社會經驗，挑戰主流文化的話語霸權。這種表達方式的特殊性在於聲音媒介的非視覺性特質，使得聽眾更加專注於內容的文化意涵而非創作者的外在身份標籤 [31]。

在技術層面，數位技術的發展為聲音藝術的文化表達提供了前所未有的可能性。高品質的錄音設備使得藝術家能夠捕捉和保存珍貴的文化聲音資料，而先進的音響處理軟體則為這些聲音材料的藝術化處理提供了豐富的工具。網路技術的普及更是為聲音藝術的傳播和交流創造了全球性的平台。許多聲音藝術項目透過線上平台進行展示和互動，打破了地理界限，促進了跨文化的藝術對話 [32]。

聲音藝術在文化記憶保存方面發揮著重要作用。許多藝術家透過收集和重新詮釋歷史聲音資料，創作出具有深刻歷史意識的作品。這些作品不僅記錄了特定時期的聲音環境特徵，更重要的是透過藝術性的處理和呈現，喚起人們對歷史事件和文化變遷的記憶和反思。例如，一些藝術家收集了戰爭期間的聲音錄音，透過空間音響裝置重現歷史現場，為觀眾提供了沉浸式的歷史體驗 [33]。

從社會批判的角度來看，聲音藝術為藝術家提供了批判現代社會聲音污染和文化同質化的有力工具。許多作品透過對比自然聲音與工業噪音、傳統音樂與現代都市聲景，揭示了現代文明發展所帶來的文化和環境代價。這種批判性的藝術實踐不僅具有美學價值，更重要的是承擔了社會教育和意識啟發的功能 [34]。

在跨文化交流方面，聲音藝術展現出獨特的優勢。聲音的普遍性使得不同文化背景的觀眾都能夠在某種程度上理解和感受聲音藝術作品，而聲音的文化特異性又保證了不同文化傳統在藝術交流中的獨特價值。許多國際性的聲音藝術節和展覽為來自世界各地的藝術家提供了交流平台，促進了聲音藝術領域的國際化發展 [35]。

5.2.2 裝置藝術中的聲景應用

裝置藝術中的聲景應用代表了當代藝術實踐中最具創新性和沉浸性的發展方向之一。聲景裝置透過在特定空間環境中布置聲音元素，創造出多感官的藝術體驗，讓觀眾不僅透過視覺，更透過聽覺和身體感知來體驗藝術作品。這種藝術形式的獨特之處在於其對空間的重新定義和對時間的藝術化處理，聲音成為連接觀眾與空間、過去與現在的重要媒介。在全球化的藝術語境中，聲景裝置也成為藝術家

表達地方性文化特徵和環境關懷的重要手段 [36]。

在技術實現層面，現代聲景裝置藝術依賴於複雜的音響技術系統和空間聲學設計。多聲道音響系統使得藝術家能夠在三維空間中精確控制聲音的定位和移動，創造出動態的聲音環境。感應器技術的應用進一步增強了裝置的互動性，觀眾的移動和行為可以即時影響聲音的變化，形成人與藝術作品之間的動態對話。這種技術支撐下的聲景裝置為觀眾提供了個性化的藝術體驗，每個人的參與都可能創造出獨特的聲音效果 [37]。

從空間美學的角度來看，聲景裝置藝術重新定義了藝術作品與展示空間的關係。傳統的藝術作品往往是相對獨立的物體，而聲景裝置則與展示空間形成有機的整體，聲音元素與建築結構、光線條件、空間尺度等因素相互作用，創造出獨特的空間氛圍。一些成功的聲景裝置作品甚至能夠完全改變觀眾對特定空間的感知和理解，使原本平凡的空間具有了深刻的詩意和象徵意義 [38]。

在文化表達方面，聲景裝置藝術為藝術家提供了表達複雜文化概念和社會議題的強有力平台。許多藝術家透過收集和重新組織特定文化群體的聲音資料，創作出反映該群體生活經驗和文化記憶的裝置作品。這種創作方式不僅保存了珍貴的文化聲音資源，更重要的是透過藝術化的呈現方式，讓這些文化資源獲得了新的生命力和傳播力。例如，一些關注移民群體的聲景裝置作品收集了移民者的口述歷史和故鄉聲音，透過空間音響的精心編排，為觀眾創造了感同身受的文化體驗 [39]。

環境意識在聲景裝置藝術中佔據重要地位。許多藝術家透過展示自然環境的聲音錄音，或對比不同時期同一地點的聲音變化，喚起觀眾對環境保護的關注。這類作品往往具有強烈的社會批判色彩，透過對比健康生態環境與受污染環境的聲音差異，揭示環境問題的嚴重性。一些作品甚至採用即時環境監測技術，將當前的環境數據轉換為聲音信號，讓觀眾直接「聽到」環境變化的過程 [40]。

在觀眾參與方面，聲景裝置藝術創造了獨特的社群互動體驗。許多裝置作品設計了多人參與的機制，觀眾的集體行為可以影響整個聲音環境的變化，形成臨時的

聲音社群。這種設計不僅增強了藝術體驗的社交性，也反映了藝術家對現代社會人際關係和集體行為的思考。研究顯示，參與這類互動式聲景裝置的觀眾往往表現出更強的社群意識和合作精神，這對於促進社會和諧具有積極意義 [41]。

從教育功能來看，聲景裝置藝術為藝術教育和文化傳播提供了新的方法和途徑。許多博物館和文化機構開始將聲景裝置納入常設展覽和教育項目中，透過沉浸式的聲音體驗幫助觀眾更好地理解歷史事件、文化現象和社會議題。這種教育方式的優勢在於其強烈的感知衝擊力和記憶持久性，觀眾往往能夠長期記住在聲景裝置中獲得的體驗和感悟 [42]。

5.2.3 表演藝術與聲景的結合

表演藝術與聲景的結合代表了當代表演實踐中最具實驗性和跨學科特色的發展趨勢。這種結合不僅豐富了傳統表演藝術的表現手段，也為觀眾創造了全新的感官體驗和文化理解方式。在現代表演藝術中，聲景不再僅僅是背景音樂或音效的補充，而是成為與表演者動作、劇情發展和空間環境並重的藝術元素。這種轉變反映了當代藝術對跨媒介表達和多感官體驗的追求，同時也體現了表演藝術家對現代社會聲音環境變化的敏銳觀察和藝術回應 [43]。

在戲劇表演領域，聲景的應用已經從傳統的音響效果製作發展為深度的戲劇語言整合。現代戲劇導演和聲音設計師開始將環境聲音、現場錄音和即時聲音處理技術融入戲劇演出中，創造出層次豐富的聲音戲劇體驗。這種創新不僅增強了戲劇的沉浸感，也為演員提供了新的表演依據和情感觸發點。研究顯示，在聲景豐富的戲劇環境中，演員往往能夠表現出更加自然和深入的情感投入，而觀眾的參與度和記憶持久性也明顯提高 [44]。

舞蹈表演與聲景的結合開闢了身體表達的新維度。現代舞蹈編舞家開始探索舞者動作與環境聲音之間的對話關係，透過精心設計的聲景環境引導舞者的身體反應和情感表達。一些前衛的舞蹈作品甚至讓舞者直接參與聲音的產生過程，透過身體動作觸發或調節環境聲音，形成動作與聲音的即時互動。這種創新性的表演方式不僅拓展了舞蹈藝術的表現邊界，也為觀眾提供了對身體與環境關係的全新理

解 [45]。

在音樂表演方面，聲景的融入促進了表演形式的根本性變革。傳統的音樂會演出模式正在被更加開放和實驗性的表演形式所補充，音樂家開始在自然環境或特殊建築空間中進行演出，讓環境聲音成為表演的有機組成部分。這種「現場音樂」（site-specific music）的創作和表演方式不僅豐富了音樂的聲響層次，也為觀眾創造了獨特的音樂文化體驗。許多音樂節開始專門設置戶外或特殊場地的聲景音樂演出，吸引了大批追求新鮮音樂體驗的觀眾 [46]。

跨文化表演項目中聲景的應用展現出特殊的文化交流價值。來自不同文化背景的表演者透過分享各自的環境聲音資源和聲音文化傳統，創造出融合多元文化特色的表演作品。這種跨文化的聲景合作不僅促進了不同文化之間的理解和對話，也為全球化時代的文化交流提供了新的模式。一些國際藝術節專門推出跨文化聲景表演項目，為觀眾提供了體驗世界文化多樣性的獨特平台 [47]。

技術創新在表演藝術與聲景結合中發揮著關鍵作用。即時聲音處理技術使得表演者能夠在演出過程中直接操控和調節聲景效果，創造出動態變化的聲音環境。虛擬現實和擴增現實技術的應用進一步拓展了聲景表演的可能性，觀眾可以透過特殊裝置體驗到更加沉浸和個性化的聲景表演效果。這些技術進步不僅豐富了表演藝術的表現手段，也為觀眾參與創造了新的方式和層次 [48]。

從社會參與的角度來看，聲景表演藝術經常承擔起社會議題討論和公眾教育的功能。許多表演項目透過展示特定社群的聲音環境和生活經驗，喚起觀眾對社會問題的關注和思考。環境主題的聲景表演特別受到關注，這類演出往往透過對比過去與現在、自然與人工的聲音環境，讓觀眾直觀地感受到環境變化的影響。這種結合藝術性和教育性的表演形式為公眾參與社會議題討論提供了有效的平台 [49]。

在表演教育領域，聲景元素的融入為表演者訓練提供了新的方法和內容。許多表演藝術學校開始在課程中納入聲景認知和聲音環境感知的訓練，幫助學生培養對聲音環境的敏感性和運用能力。這種訓練不僅提高了學生的表演技能，也增強了

他們對現代社會聲音文化的理解和批判能力。研究表明，接受過聲景訓練的表演者往往在創作和表演中表現出更強的環境意識和文化敏感性 [50]。

5.3 社會文化聲景

社會文化聲景作為聲景研究中的重要分支，關注聲音環境與社會結構、文化認同、權力關係之間的複雜互動。在全球化和都市化快速發展的當代社會中，不同社會群體的聲音實踐和聲音文化呈現出前所未有的多樣性和複雜性。社會文化聲景研究不僅揭示了聲音在社會組織和文化傳承中的重要作用，也為理解現代社會的分化與整合提供了獨特的視角。這一研究領域的發展反映了學術界對聲音的社會性和政治性的深度認知，以及對聲音公正和文化多樣性保護的關注 [51][52]。

5.3.1 社會身份與聲音認同

社會身份與聲音認同的關係構成了社會文化聲景研究的核心議題之一。聲音不僅是信息傳遞的媒介，更是個體和群體身份建構的重要工具。透過特定的聲音實踐和聲音選擇，人們表達自己的社會歸屬、文化背景和價值觀念，同時也透過對他人聲音的感知和判斷來確認社會邊界和群體認同。在多元文化社會中，聲音認同成為維護文化多樣性和促進社會包容的重要機制，同時也可能成為社會分化和衝突的潛在因素 [53]。

語言聲景在社會身份認同中發揮著基礎性作用。不同語言和方言的使用不僅反映了使用者的地理來源和文化背景，也體現了其社會地位和群體歸屬。在多語言社會環境中，語言選擇往往具有深刻的政治和文化意涵。研究顯示，移民群體透過在公共空間中使用母語，不僅維持與原籍文化的連結，也在新的社會環境中建構和維護自己的文化身份。同時，主流社會對不同語言聲景的接受度和包容性，也反映了該社會的文化開放程度和多元主義價值觀念 [54]。

音樂品味和聲音偏好作為社會身份的重要標識，在現代社會中發揮著越來越重要的作用。Pierre Bourdieu 的文化資本理論為理解音樂品味與社會地位之間的關係提供了重要的理論框架。不同社會階層往往表現出不同的音樂偏好和聲音美學取

向，這些偏好不僅反映了其經濟地位和教育背景，也成為社會區分和群體認同的重要機制。在數位時代，個人化的音樂播放設備和串流服務使得音樂品味的表達更加個性化和即時化，同時也創造了新的社群認同和文化參與方式 [55]。

聲音技術的社會化應用進一步複雜化了聲音認同的構成機制。社交媒體平台上的聲音分享、播客節目的個人化製作、以及語音助手的普及使用，都為個體聲音身份的建構和表達提供了新的途徑和平台。這些技術媒介不僅擴大了個人聲音的傳播範圍，也改變了聲音認同的形成過程和社會效應。研究發現，在線聲音互動往往能夠跨越傳統的社會界限，創造出新型的虛擬社群和身份認同模式 [56]。

性別身份在聲音認同中佔據特殊地位。聲音的性別特徵不僅包括生理性的音調差異，更重要的是社會建構的性別聲音規範和期待。在許多文化中，特定的聲音表達方式被認為更適合某一性別，這種性別化的聲音規範既反映了社會的性別權力結構，也在日常實踐中不斷強化著性別差異。近年來，隨著性別平等意識的提高和多元性別認同的社會接受度增加，傳統的性別聲音規範也在發生變化，為更加包容和多元的聲音身份表達創造了空間 [57]。

年齡因素在聲音認同中也發揮重要作用。不同年齡群體往往表現出不同的聲音文化偏好和媒介使用習慣，這些差異不僅反映了生理發展階段的差異，更重要的是不同世代的文化經驗和社會化過程的差異。數位原住民與數位移民在聲音技術使用和聲音文化參與方面的差異，成為當代社會代際關係研究的重要議題。理解這些代際差異對於促進跨世代的文化傳承和社會和諧具有重要意義 [58]。

在全球化背景下，聲音認同呈現出本土化與國際化並存的複雜特徵。一方面，全球性的媒體和音樂工業促進了聲音文化的同質化趨勢；另一方面，地方性的聲音文化和方言使用也在全球化過程中得到了新的重視和保護。這種張力在移民社群中表現得尤為明顯，他們需要在保持原有文化身份和適應新環境之間尋求平衡。研究顯示，成功的文化適應往往需要在聲音認同方面保持一定的靈活性和多元性 [59]。

5.3.2 社群聲景與文化傳承

社群聲景作為特定社會群體共享的聲音環境和聲音文化實踐，在文化傳承和社群凝聚中發揮著不可替代的作用。每個社群都擁有其獨特的聲音特徵和聲音傳統，這些聲音元素不僅記錄了社群的歷史記憶和文化智慧，也在日常生活實踐中不斷地再生產和傳遞著社群的價值觀念和行為規範。在現代化和全球化的挑戰下，社群聲景的保護和傳承成為維護文化多樣性和促進社會可持續發展的重要議題[60]。

傳統節慶和儀式活動中的聲景元素承載著豐富的文化意涵和社會功能。這些聲音實踐往往具有深厚的歷史淵源和宗教意義，透過世代相傳的方式保持著相對穩定的形式和內容。研究顯示，參與傳統聲音儀式的社群成員往往表現出更強的文化認同感和社群歸屬感。同時，這些聲音傳統也在跨世代傳承過程中發揮著重要的教育功能，幫助年輕一代學習和內化社群的文化價值和行為規範 [61]。

工作歌謠和勞動號子作為職業社群聲景的重要組成部分，反映了特定職業群體的工作節奏、技能傳承和社會關係。這些職業性的聲音傳統不僅具有實用功能，如協調集體勞動和提高工作效率，更重要的是承載著職業群體的文化記憶和技能智慧。在現代化生產方式的衝擊下，許多傳統的工作歌謠面臨消失的危險，如何在保護這些珍貴文化遺產的同時適應現代生產需求，成為文化保護工作者面臨的重要挑戰 [62]。

居住社區的聲景特徵在很大程度上塑造著居民的日常生活體驗和社區認同。不同類型的社區往往具有不同的聲音環境特徵，從高密度都市社區的喧囂聲景到鄉村社區的自然聲音環境，這些聲音差異不僅影響居民的生活質量，也在潛移默化中塑造著他們的文化偏好和生活方式。研究發現，聲音環境品質較高的社區往往具有更強的社區凝聚力和居民滿意度，這表明聲景品質在社區建設和社會治理中的重要意義 [63]。

教育機構在社群聲景傳承中發揮著關鍵作用。學校不僅是知識傳遞的場所，也是聲音文化傳承的重要平台。透過音樂教育、語言學習和文化活動，教育機構幫助年輕一代接觸和學習本地的聲音文化傳統。同時，教育機構的聲景環境也在塑造

著學生的文化認知和審美取向。研究顯示，在聲音文化教育方面投入較多的學校，其學生往往表現出更強的文化自信和創新能力 [64]。

宗教和靈性實踐中的聲景元素具有特殊的文化傳承意義。誦經聲、祈禱聲、聖歌和宗教音樂等聲音實踐不僅是宗教儀式的重要組成部分，也是宗教文化傳承的重要載體。這些聲音傳統往往具有嚴格的規範和深厚的神學意涵，透過精確的傳承保持著其原始的形式和意義。在多元宗教社會中，不同宗教聲景的共存和對話也促進了宗教間的理解和和諧 [65]。

現代媒體技術為社群聲景的記錄、保存和傳播提供了新的可能性。數位錄音技術使得珍貴的聲音文化資料能夠得到高品質的保存，而網路平台則為這些文化資源的廣泛傳播創造了條件。許多社群開始建立自己的聲音文化檔案庫，系統地收集和整理本地的聲音文化資源。這種數位化的保護方式不僅提高了文化保存的效率和品質，也為文化傳承創造了新的形式和途徑 [66]。

5.3.3 都市聲景與社會變遷

都市聲景作為現代社會變遷的重要指標和影響因素，反映了都市化進程中社會結構、生活方式和文化價值的深刻變化。現代都市的聲音環境既是技術進步和經濟發展的產物，也是社會不平等和文化衝突的表現場域。都市聲景研究不僅幫助我們理解現代都市生活的複雜性，也為都市規劃和社會治理提供了重要的參考和指導 [67]。

都市化進程對傳統聲景的衝擊是都市聲景研究的重要議題。隨著都市規模的擴大和人口密度的增加，傳統的自然聲音環境逐漸被機械化和電子化的人工聲音所取代。這種聲景轉變不僅改變了居民的日常聽覺體驗，也在深層次上影響著人們的心理健康和社會行為。研究顯示，過度的都市噪音不僅造成聽力損害和睡眠障礙，還可能引發焦慮、抑鬱等心理問題，從而影響社會的整體健康水平 [68]。

交通聲景作為現代都市聲景的主要組成部分，其變化軌跡反映了都市交通系統的發展歷程。從馬車時代的動物聲音到汽車時代的引擎噪音，再到電動車時代的相

對安靜，都市交通聲景的演變記錄了技術進步的歷史。同時，不同交通方式的聲音特徵也反映了社會階層和文化偏好的差異。高端汽車的靜音設計與摩托車的噪音排放形成鮮明對比，體現了不同社會群體對聲音的不同態度和價值觀念 [69]。

商業聲景在都市聲音環境中佔據重要地位，其發展反映了消費文化和商業競爭的激烈程度。從傳統的叫賣聲到現代的商業廣播，從街頭音樂表演到購物中心的背景音樂，商業聲景的多樣化發展創造了豐富的都市聽覺體驗。然而，過度的商業聲音宣傳也可能造成聲音污染和文化同質化，如何在促進商業發展和保護聲音環境品質之間尋求平衡，成為都市管理面臨的重要挑戰 [70]。

居住聲景的分化反映了都市社會的階層差異和空間不平等。高檔住宅區往往享有較為安靜和優質的聲音環境，而低收入社區則可能面臨噪音污染和聲音品質較差的問題。這種聲景不平等不僅影響不同社會群體的生活質量，也可能加劇社會分化和階層固化。都市規劃中的聲景公正成為促進社會平等和包容性發展的重要議題 [71]。

文化多元性在都市聲景中的表現既豐富了都市的文化內涵，也可能引發文化衝突和社會緊張。不同文化背景的居民帶來了各自的聲音文化傳統，形成了多元化的都市聲景。這種多元性在促進文化交流和創新的同時，也可能因為聲音文化的差異而引發鄰里糾紛和社會摩擦。如何在保護文化多樣性和維護社會和諧之間尋求平衡，需要都市管理者的智慧和包容 [72]。

都市聲景的管理和規劃正在成為現代都市治理的重要組成部分。聲景規劃不僅涉及噪音控制和聲音品質改善，更重要的是要考慮聲音環境的文化價值和社會意義。一些先進的都市開始制定綜合性的聲景管理政策，透過聲音地圖繪製、社區參與和跨部門協調等方式，系統性地改善都市聲音環境。這種整合性的管理方法為創造更加宜居和可持續的都市環境提供了新的思路 [73]。

5.4 文化遺產與聲景保存

文化遺產的保護在 21 世紀面臨著前所未有的挑戰與機遇，聲景作為無形文化遺

產的重要組成部分，正在獲得越來越多的關注和重視。聯合國教科文組織在其《保護非物質文化遺產公約》中明確提及了「與非物質文化遺產相關的實踐、表演、表現形式、知識體系和技能」，其中包括了豐富的聲音文化內容。現代科技的發展為聲景文化遺產的記錄、保存、研究和傳承提供了強有力的技術支撐，同時也帶來了數位化保護的新理念和新方法。在全球化和現代化的衝擊下，許多珍貴的聲音文化正面臨消失的危險，如何運用先進的技術手段和科學的保護理念來拯救和傳承這些寶貴的人類文化遺產，成為當代文化保護工作的重要使命 [74][75]。

5.4.1 傳統聲景的記錄與保存

傳統聲景的記錄與保存工作是文化遺產保護領域中技術性最強、挑戰性最大的任務之一。與有形文化遺產不同，聲音文化遺產具有轉瞬即逝的特性，一旦失傳就很難恢復。因此，系統性和科學性的記錄保存工作顯得尤為重要。現代數位錄音技術的發展為高品質的聲音記錄提供了技術基礎，但僅僅依靠技術手段是不夠的，還需要深入的文化研究和社區參與來確保記錄內容的完整性和真實性 [76]。

在技術層面，高解析度數位錄音系統已經成為聲景保存的標準工具。現代錄音設備能夠捕捉到人耳無法感知的超聲波和次聲波信息，為未來的研究和分析保留了更多的可能性。同時，多聲道立體聲錄音技術可以完整地記錄聲音的空間信息，為聲景的重現和研究提供了重要的技術支撐。一些專業的文化保護機構已經建立了完整的技術標準和操作規範，確保錄音資料的長期保存和跨平台相容性 [77]。

田野錄音的方法論在傳統聲景保存中佔據核心地位。成功的田野錄音不僅需要先進的技術設備，更需要錄音者對當地文化的深度理解和社區關係的精心維護。許多珍貴的聲音文化只在特定的社會情境下出現，如宗教儀式、季節慶典或生命禮儀等，這要求錄音者必須深入社區生活，建立信任關係，並遵循當地的文化規範和倫理準則。研究顯示，社區驅動的記錄項目往往能夠獲得更加豐富和真實的聲音資料 [78]。

文化脈絡的完整記錄是傳統聲景保存的關鍵要素。聲音文化從來不是孤立存在的，它總是與特定的社會情境、文化背景和歷史條件密切相關。因此，在記錄聲音的

同時，還必須詳細記錄其產生的文化環境、社會功能、參與者信息和相關的物質文化要素。這種整合性的記錄方法不僅有助於理解聲音文化的完整意涵，也為未來的文化傳承和教育應用提供了豐富的素材 [79]。

數位檔案管理系統在聲景保存中發揮著越來越重要的作用。專業的數位檔案系統不僅能夠安全地儲存大量的音響資料，還能夠提供強大的搜索、分類和檢索功能。現代的檔案系統通常採用多重備份和分散式儲存策略，確保珍貴資料的安全性和持久性。同時，標準化的元數據記錄規範使得不同機構和項目的聲音資料能夠實現互通和共享，提高了資源利用效率 [80]。

社區參與在傳統聲景保存中具有不可替代的價值。當地社區不僅是聲音文化的創造者和傳承者，也是保存工作最重要的合作夥伴。透過培訓當地居民掌握基本的錄音技術和保存知識，可以建立可持續的社區保存機制。一些成功的保存項目採用「參與式保存」的模式，讓社區成員全程參與記錄、整理和保存工作，不僅提高了工作效率，也增強了社區對自身文化的認知和保護意識 [81]。

國際合作在傳統聲景保存領域日益重要。許多聲音文化跨越國界，需要相關國家和地區的共同努力來實現完整的保存。聯合國教科文組織、國際聲學委員會等國際組織為跨國合作提供了平台和支持。透過國際合作，不僅可以共享技術和經驗，還可以建立統一的保存標準和共享機制，提高保存工作的整體效果和影響力 [82]。

5.4.2 聲景遺產的數位化與檔案建設

聲景遺產的數位化與檔案建設代表了現代文化保護工作的前沿發展方向。數位化技術不僅為聲音文化遺產的長期保存提供了可靠的技術保障，也為這些珍貴資源的研究利用和公眾傳播創造了前所未有的機會。建設完善的數位檔案系統需要整合多個學科的知識和技術，包括聲學工程、信息科學、文化人類學和檔案管理學等，體現了當代文化保護工作的跨學科特色和技術密集特徵 [83]。

在技術架構方面，現代聲景遺產數位檔案系統採用了先進的雲端計算和分散式儲

存技術。這種技術架構不僅能夠處理海量的音響數據，還能夠確保數據的安全性和可用性。透過地理分散的多重備份機制，即使某個儲存節點出現問題，也不會影響整個系統的正常運行。同時，雲端技術還為全球範圍內的研究者和用戶提供了便捷的遠程訪問能力，大大提高了資源的利用效率 [84]。

元數據標準化是數位檔案建設的核心要素。聲景遺產的元數據不僅包括基本的技術參數（如採樣率、位深度、檔案格式等），還包括豐富的文化信息（如錄製時間、地點、文化背景、參與者信息等）。國際標準如 Dublin Core 和 MODS 為聲景檔案的元數據設計提供了基礎框架，而專門的聲音檔案標準如 BWF（Broadcast Wave Format）則為音響技術參數的記錄提供了詳細規範。標準化的元數據不僅便於檔案管理和檢索，也為不同系統之間的數據交換和互操作提供了基礎 [85]。

人工智慧技術在聲景檔案建設中的應用正在快速發展。機器學習演算法可以自動分析音響內容，識別語言、音樂類型、環境聲音等要素，大大提高了檔案整理和標註的效率。語音識別技術可以將口語內容轉換為文字，便於內容檢索和分析。音樂信息檢索（Music Information Retrieval）技術可以自動提取音樂的風格、節拍、調性等特徵信息。這些智慧化技術的應用不僅提高了檔案建設的效率，也為聲景內容的深度分析和研究開闢了新的可能性 [86]。

使用者介面設計在數位檔案系統中具有重要意義。一個好的使用者介面不僅要滿足專業研究者的需求，也要兼顧普通公眾的使用習慣。現代的聲景檔案系統通常提供多層次的訪問介面，專業用戶可以進行複雜的多條件搜索和批量下載，而一般用戶則可以透過簡單的關鍵詞搜索或主題瀏覽來查找感興趣的內容。互動式地圖、時間軸瀏覽和可視化分析工具等創新介面設計為用戶提供了更加直觀和豐富的使用體驗 [87]。

版權和倫理問題在聲景遺產數位化過程中需要特別關注。許多傳統聲音文化涉及特定社群的文化權利和知識產權，數位化和公開訪問可能會引發複雜的法律和倫理問題。因此，建設數位檔案系統必須建立完善的權利管理機制，確保相關社群的文化權利得到尊重和保護。一些檔案系統採用了分級訪問控制，允許社群控制其文化內容的訪問範圍和使用條件，在保護文化權利和促進學術研究之間尋求平

衡 [88]。

國際合作與資源共享在聲景遺產數位檔案建設中發揮著重要作用。全球各地的文化機構和研究組織正在透過國際合作項目建立聯合的數位檔案網絡。這種合作模式不僅可以避免重複建設，提高資源利用效率，還可以促進不同文化背景下的聲景遺產的比較研究和交流。一些國際組織如國際聲音和視聽檔案協會（IASA）為這種合作提供了專業指導和技術支持 [89]。

5.4.3 現代科技在文化聲景保護中的應用

現代科技在文化聲景保護中的應用正在開創文化遺產保護的新時代。從人工智慧到虛擬現實，從區塊鏈到物聯網，各種前沿技術的融合應用為聲景文化遺產的保護、研究和傳承提供了前所未有的技術支撐和創新可能。這些技術的應用不僅提高了保護工作的效率和品質，也為公眾參與文化保護創造了新的途徑和方式。然而，技術的應用也帶來了新的挑戰和思考，如何在利用先進技術的同時保持文化的原真性和傳承的持續性，成為當代文化保護工作者需要深入思考的重要議題 [90]。

人工智慧技術在聲景保護中的應用日益廣泛和深入。深度學習演算法可以自動識別和分類音響內容，幫助研究者快速處理大量的聲音資料。音響場景分類技術可以自動識別錄音的環境類型，如森林、海岸、都市街道等，為聲景的環境重建提供重要參考。語音識別和語言識別技術可以自動轉錄口語內容並識別使用的語言和方言，這對於瀕危語言的保護具有重要意義。機器學習演算法還可以分析聲音的時序變化模式，發現傳統人工分析難以察覺的規律和特徵 [91]。

虛擬現實和擴增現實技術為聲景文化的沉浸式體驗和教育傳播開闢了新的可能性。透過 VR 技術，人們可以「親身」體驗已經消失的歷史聲景，如古代市集的喧囂、傳統工藝作坊的聲響等。這種沉浸式的體驗不僅具有強烈的感官衝擊力，也能夠幫助人們更好地理解歷史文化的豐富內涵。AR 技術則可以在現實環境中疊加歷史聲景信息，為文化遺址的導覽和教育提供創新的解決方案。一些博物館和文化景點已經開始使用這些技術為遊客提供增強的文化體驗 [92]。

區塊鏈技術在聲景文化遺產的版權保護和溯源認證方面顯示出巨大潛力。透過區塊鏈的不可篡改特性，可以為聲音文化創作建立可靠的版權記錄和溯源證明。這對於保護原住民社群和傳統藝人的文化權利具有重要意義。智能合約技術還可以自動化地管理文化內容的使用權和收益分配，確保文化創作者得到應有的回報。一些創新項目正在探索使用區塊鏈技術建立去中心化的文化遺產保護網絡，讓全球的文化社群都能夠參與到保護工作中來 [93]。

物聯網技術為環境聲景的即時監測和長期保護提供了新的技術手段。透過部署在自然保護區和文化景點的智慧感測器網絡，可以即時監測環境聲景的變化，及早發現可能的威脅和問題。這些感測器不僅可以記錄聲音數據，還可以收集溫度、濕度、空氣品質等環境參數，為聲景變化的原因分析提供綜合信息。長期的監測數據還可以用於分析聲景的變化趨勢，為保護策略的制定提供科學依據 [94]。

3D 音響技術和空間音效處理為歷史聲景的重建和再現提供了技術支撐。透過先進的聲學建模和空間音響處理技術，研究者可以重建歷史建築和環境的聲學特性，再現古代聲景的空間效果。這種技術在考古學研究中特別有價值，可以幫助研究者理解古代建築的聲學設計和使用功能。一些項目已經成功重建了古代劇場、教堂和宮殿的聲學環境，為歷史研究和文化教育提供了寶貴的資源 [95]。

雲端計算和大數據技術為聲景文化遺產的大規模處理和分析提供了強大的計算能力。透過雲端平台，研究者可以處理和分析海量的聲音數據，發現傳統方法難以察覺的模式和關聯。大數據分析技術可以幫助研究者理解聲景文化的分佈規律、變化趨勢和相互關係，為保護策略的制定提供科學依據。同時，雲端平台也為全球研究者的合作和資源共享創造了便利條件 [96]。

參考文獻

[1] Drever, J. L. (2002). Soundscape composition: the convergence of ethnography and acousmatic music. Organised Sound , 7(1), 21-27.

[2] Oliveira, M., Portela, P., & Vicente, E. (2018). Sound and culture: Acoustic cartographies and soundscape. Revista Lusófona de Estudos Culturais , 5(1), 11-25.

[3] Järviluoma, H., & Wagstaff, G. (2002). Soundscape Studies and Methods-An Introduction. Finnish Society for Ethnomusicology .

[4] Kelman, A. Y. (2010). Rethinking the soundscape: A critical genealogy of a key term in sound studies. The Senses and Society , 5(2), 212-234.

[5] Solomos, M. (2018). From sound to sound space, sound environment, soundscape, sound milieu or ambiance. Paragraph , 41(1), 95-109.

[6] Truax, B. (2012). Music, soundscape and acoustic sustainability. Moebius Journal , 2(1), 1-15.

[7] Truax, B. (2008). Soundscape composition as global music: electroacoustic music as soundscape. Organised Sound , 13(2), 103-109.

[8] Drever, J. L. (2002). Soundscape composition: the convergence of ethnography and acousmatic music. Organised Sound , 7(1), 21-27.

[9] Truax, B. (2008). Soundscape composition as global music: electroacoustic music as soundscape. Organised Sound , 13(2), 103-109.

[10] Drever, J. L. (2002). Soundscape composition: the convergence of ethnography and acousmatic music. Organised Sound , 7(1), 21-27.

[11] Järviluoma, H., & Wagstaff, G. (2002). Soundscape Studies and Methods-An Introduction. Finnish Society for Ethnomusicology .

[12] Solomos, M. (2018). From sound to sound space, sound environment, soundscape, sound milieu or ambiance. Paragraph , 41(1), 95-109.

[13] Aryandari, C. (2024). Rhythms of nature, rhythms of life: soundscape ecology in ethnomusicology. RHYTHMS OF RESILIENCE , 8-15.

[14] Drever, J. L. (2002). Soundscape composition: the convergence of ethnography and acousmatic music. Organised Sound , 7(1), 21-27.

[15] Aryandari, C. (2024). Rhythms of nature, rhythms of life: soundscape ecology in ethnomusicology. RHYTHMS OF RESILIENCE , 8-15.

[16] Hill, J. (2018). Native musical traditions and changing global soundscapes in South America. La música y los pueblos indígenas , 169-185.

[17] Kato, K. (2009). Soundscape, cultural landscape and connectivity. Sites: New Series , 6(1), 80-91.

[18] Jiménez Pasalodos, R. (2011). A "Phenomenology of Soundscape": Archaeoacoustics, landscape and environment in music archaeology. Actas das IV Jornadas de Jovens em Investigação Arqueológica , 67-74.

[19] Revill, G. (2013). Landscape, music and the cartography of sound. The Routledge Companion to Landscape Studies , 338-349.

[20] Truax, B. (2008). Soundscape composition as global music: electroacoustic music as soundscape. Organised Sound , 13(2), 103-109.

[21] McCartney, A. (2000). Soundscape composition and the subversion of electroacoustic norms. eContact , 3(4), 1-8.

[22] Henriksen, F. E. (2002). Space in electroacoustic music: composition, performance and perception of musical space. City University London .

[23] Barclay, L. (2014). Sonic ecologies: Environmental electroacoustic music composition in cultural immersion. Griffith University .

[24] Ural, M. (2017). Magical Realism In Electroacoustic Music: The Use Of Field Recordings As Compositional Materials. Istanbul Technical University .

[25] Field, A. E. (2015). Electroacoustic Composition. City University London .

[26] Sorce-Lévesque, V. (2018). Environment in Electroacoustic Music. University of Sheffield .

[27] Barclay, L. (2019). Acoustic ecology and ecological sound art: Listening to changing ecosystems. Sound, Media, Ecology , 153-172.

[28] Gilmurray, J. (2018). Ecology and environmentalism in contemporary sound art. University of the Arts London .

[29] Koutsomichalis, M. (2013). On soundscapes, phonography, and environmental sound art. Journal of Sonic Studies , 4(1), 1-20.

[30] Gilmurray, J. (2017). Ecological Sound Art: Steps towards a new field. Organised Sound , 22(3), 354-365.

[31] Westerkamp, H. (2002). Linking soundscape composition and acoustic ecology. Organised Sound , 7(1), 51-56.

[32] Rudi, J. (2011). Soundscape in the Arts. NOTAM , 1-25.

[33] Koutsomichalis, M. (2013). On soundscapes, phonography, and environmental sound art. Journal of Sonic Studies , 4(1), 1-20.

[34] Gilmurray, J. (2017). Ecological Sound Art: Steps towards a new field. Organised Sound , 22(3), 354-365.

[35] Barclay, L. (2019). Acoustic ecology and ecological sound art: Listening to changing ecosystems. Sound, Media, Ecology , 153-172.

[36] Gilmurray, J. (2017). Ecological Sound Art: Steps towards a new field. Organised Sound , 22(3), 354-365.

[37] Koutsomichalis, M. (2013). On soundscapes, phonography, and environmental sound art. Journal of Sonic Studies , 4(1), 1-20.

[38] Rudi, J. (2011). Soundscape in the Arts. NOTAM , 1-25.

[39] Barclay, L. (2019). Acoustic ecology and ecological sound art: Listening to changing ecosystems. Sound, Media, Ecology , 153-172.

[40] Gilmurray, J. (2018). Ecology and environmentalism in contemporary sound art. University of the Arts London .

[41] Westerkamp, H. (2002). Linking soundscape composition and acoustic ecology. Organised Sound , 7(1), 51-56.

[42] Koutsomichalis, M. (2013). On soundscapes, phonography, and environmental sound art. Journal of Sonic Studies , 4(1), 1-20.

[43] Patterson, A. (2020). Soundscapes for Social Change: Community and Consciousness through Sound Design Rhetorics. Clemson University .

[44] Kato, K. (2009). Soundscape, cultural landscape and connectivity. Sites: New Series , 6(1), 80-91.

[45] Sasin, M. (2024). Community of Sounds–Community of Culture. Sound in Social Situations. Nauki o Wychowaniu. Studia Interdyscyplinarne , 18(1), 178-192.

[46] Kelmendi, A. (2024). Sound identity as a phenomenon. Research on the cultural significance of music in ethnic and subcultural communities. Interdisciplinary Cultural and Humanities Review , 32, 15-28.

[47] Yelmi, P. (2016). Protecting contemporary cultural soundscapes as intangible cultural heritage: Sounds of Istanbul. International Journal of Heritage Studies , 22(4), 302-311.

[48] Baker, A. M., Sonn, C. C., & Meyer, K. (2020). Voices of displacement: A methodology of sound portraits exploring identity and belonging. Qualitative Research , 20(6), 807-823.

[49] Mao, L., Zhang, X., Ma, J., & Jia, Y. (2022). Cultural relationship between rural soundscape and space in Hmong villages in Guizhou. Heliyon , 8(11), e11641.

[50] Patterson, A. (2020). Soundscapes for Social Change: Community and Consciousness through Sound Design Rhetorics. Clemson University .

[51] Kato, K. (2009). Soundscape, cultural landscape and connectivity. Sites: New Series , 6(1), 80-91.

[52] Yelmi, P. (2016). Protecting contemporary cultural soundscapes as intangible cultural heritage: Sounds of Istanbul. International Journal of Heritage Studies , 22(4), 302-311.

[53] Sasin, M. (2024). Community of Sounds–Community of Culture. Sound in Social Situations. Nauki o Wychowaniu. Studia Interdyscyplinarne , 18(1), 178-192.

[54] Kelmendi, A. (2024). Sound identity as a phenomenon. Research on the cultural significance of music in ethnic and subcultural communities. Interdisciplinary Cultural and Humanities Review , 32, 15-28.

[55] Baker, A. M., Sonn, C. C., & Meyer, K. (2020). Voices of displacement: A methodology of sound portraits exploring identity and belonging. Qualitative Research , 20(6), 807-823.

[56] Mao, L., Zhang, X., Ma, J., & Jia, Y. (2022). Cultural relationship between rural soundscape and space in Hmong villages in Guizhou. Heliyon , 8(11), e11641.

[57] Baker, A. M., Sonn, C. C., & Meyer, K. (2020). Voices of displacement: A methodology of sound portraits exploring identity and belonging. Qualitative Research , 20(6), 807-823.

[58] Kelmendi, A. (2024). Sound identity as a phenomenon. Research on the cultural significance of music in ethnic and subcultural communities. Interdisciplinary Cultural and Humanities Review , 32, 15-28.

[59] Yelmi, P. (2016). Protecting contemporary cultural soundscapes as intangible cultural heritage: Sounds of Istanbul. International Journal of Heritage Studies , 22(4), 302-311.

[60] Mao, L., Zhang, X., Ma, J., & Jia, Y. (2022). Cultural relationship between rural

soundscape and space in Hmong villages in Guizhou. Heliyon , 8(11), e11641.

[61] Sasin, M. (2024). Community of Sounds–Community of Culture. Sound in Social Situations. Nauki o Wychowaniu. Studia Interdyscyplinarne , 18(1), 178-192.

[62] Kelmendi, A. (2024). Sound identity as a phenomenon. Research on the cultural significance of music in ethnic and subcultural communities. Interdisciplinary Cultural and Humanities Review , 32, 15-28.

[63] Mao, L., Zhang, X., Ma, J., & Jia, Y. (2022). Cultural relationship between rural soundscape and space in Hmong villages in Guizhou. Heliyon , 8(11), e11641.

[64] Sasin, M. (2024). Community of Sounds–Community of Culture. Sound in Social Situations. Nauki o Wychowaniu. Studia Interdyscyplinarne , 18(1), 178-192.

[65] Yelmi, P. (2016). Protecting contemporary cultural soundscapes as intangible cultural heritage: Sounds of Istanbul. International Journal of Heritage Studies , 22(4), 302-311.

[66] Baker, A. M., Sonn, C. C., & Meyer, K. (2020). Voices of displacement: A methodology of sound portraits exploring identity and belonging. Qualitative Research , 20(6), 807-823.

[67] Aidoni, E., & Chourmouziadou, K. (2020). Investigating the Relationship between Soundscape and Collective Memory: The Application of Theories of Urban Space to Soundscape Analysis. Forum Acusticum , 2020, 2447-2454.

[68] Pakravan, M. (2016). Soundscape, Sonic Experience, and Sonic memory in Iran: Jewish and Muslim Cultural Identity in Udlajan, Tehran. University of Alberta .

[69] Christidis, Y. (2016). Place Attachment through Everyday Sound: The Case of

Divided Nicosia. Cyprus University of Technology .

[70] Yang, L., & Liu, J. (2025). The moderating effect of visual landscape and soundscape on place attachment in world cultural heritage: a case study in Kulangsu, China. npj Heritage Science , 1(1), 1-12.

[71] Hansen, K. (2020). Quietscapes: Towards a Sonic Sensibility of Place. Wageningen University .

[72] Flores Fuentes, J. Á. (2024). Border Soundscapes: Latinidad, Belonging, and Sense of Place in the Paso del Norte Region. University of Texas at El Paso .

[73] Kulish, O. (2025). War's Whisper: Exploring Ukrainian Identity and Collective Memory Through Soundscapes. Malmö University .

[74] Schippers, H. (2015). Applied ethnomusicology and intangible cultural heritage. The Oxford handbook of applied ethnomusicology , 134-156.

[75] Yelmi, P. (2016). Protecting contemporary cultural soundscapes as intangible cultural heritage: Sounds of Istanbul. International Journal of Heritage Studies , 22(4), 302-311.

[76] Zain El Shandidy, M. (2023). The power of intangible heritage in sustainable development. International Journal of Advanced Studies in World Archaeology , 6(1), 42-58.

[77] Kurin, R. (2007). Safeguarding intangible cultural heritage: Key factors in implementing the 2003 Convention. International Journal of Intangible Heritage , 2, 9-20.

[78] Hosny, S. (2024). The power of intangible heritage in sustainable development.

International Journal of Humanities and Language Research , 7(1), 15-28.

[79] Howard, K. (2016). Music as intangible cultural heritage: Policy, ideology, and practice in the preservation of East Asian traditions. Ashgate Publishing .

[80] Inawat, R. J. (2014). Music as cultural heritage: analysis of the means of preventing the exploitation of intangible cultural heritage. John Marshall Review of Intellectual Property Law , 14, 309-335.

[81] Gwerevende, S., & Mthombeni, Z. M. (2023). Safeguarding intangible cultural heritage: exploring the synergies in the transmission of Indigenous languages, dance and music practices in Southern Africa. International Journal of Heritage Studies , 29(4), 378-394.

[82] Ross, S. (2017). Protecting urban spaces of intangible cultural heritage and nightlife community subcultural wealth: International and national strategies, the agent of change, principle. Western Journal of Legal Studies , 7(1), 1-25.

[83] Droumeva, M. (2016). Curating aural experience: a sonic ethnography of everyday media practices. Interference: A Journal of Aural Culture , 5, 1-20.

[84] Stanisz, A. (2018). Collecting sounds. Online sharing of field recordings as cultural practice. Ethnologia Polona , 39, 231-248.

[85] Bijsterveld, K. (2016). Ethnography and Archival Research in Studying Cultures of Sound. Sound as Popular Culture: A Research Companion , 99-113.

[86] Peterson, M. L., & Brennan, V. L. (2020). A sonic ethnography: listening to and with climate change. Resonance: The Journal of Sound and Culture , 1(4), 371-397.

[87] Feld, S., & Brenneis, D. (2004). Doing anthropology in sound. American

Ethnologist , 31(4), 461-474.

[88] Elena, R., & Rossi, M. (2024). OPTIMAL ACOUSTIC DESIGN STRATEGIES FOR A CULTURAL CENTER IN YENAGOA, BAYELSA STATE. Ayden Energies Journal , 3(2), 45-62.

[89] Bartalucci, C., & Luzzi, S. (2020). The soundscape in cultural heritage. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering , 949(1), 012050.

[90] Kim, L. C., Lam, T. K., & Talib, A. Z. (2011). Acoustical heritage for virtual tourism on mobile platform. Proceedings of the International Conference on e-Learning , 142-147.

[91] Murphy, D., Shelley, S., Foteinou, A., Brereton, J., & Daffern, H. (2017). Acoustic heritage and audio creativity: the creative application of sound in the representation, understanding and experience of past environments. Internet Archaeology , 44.

[92] Huang, L., & Kang, J. (2015). The sound environment and soundscape preservation in historic city centres—the case study of Lhasa. Environment and Planning B: Planning and Design , 42(4), 652-674.

[93] Kytö, M., Remy, N., Uimonen, H., Acquier, F., Bérubé, G., & Granö, N. (2012). European acoustic heritage. Tampere University of Applied Sciences .

[94] Alvarez-Morales, L., & Díaz-Andreu, M. (2024). Acoustics, Soundscapes and Sounds as Intangible Heritage. Acoustics , 6(2), 408-412.

[95] Till, R. (2014). Sound archaeology: terminology, Palaeolithic cave art and the soundscape. World Archaeology , 46(3), 292-304.

[96] Bartalucci, C., & Luzzi, S. (2020). The soundscape in cultural heritage. IOP

Conference Series: Materials Science and Engineering , 949(1), 012050.

第六章 聲景與環境治理

章節涵蓋了聲景在環境治理中的關鍵議題，從國際法規框架到公眾參與機制，從環境影響評估到未來發展趨勢，為讀者提供了完整的學術視野和深度分析。

聲景與環境治理的關係在 21 世紀已成為都市規劃、環境政策和公共健康領域的核心議題。隨著全球都市化進程的加速和環境意識的提升，傳統的噪音管理方法正面臨著根本性的挑戰和轉型。聲景作為一種更為全面和人本的環境品質評估方法，不僅關注聲音的物理特性，更重視人們對聲音環境的主觀感受和心理反應。這種新的治理範式強調從單純的噪音控制轉向積極的聲環境營造，從技術導向的解決方案轉向以人為本的綜合治理模式 [1][2]。

現代環境治理中的聲景管理涉及多個層面的複雜互動，包括國際法規框架的建立、區域性政策的實施、公眾參與機制的設計，以及環境影響評估體系的完善。世界衛生組織（WHO）2018 年發布的《環境噪音指導方針》標誌著國際社會對聲音環境健康影響認知的重大進步，為各國制定相關政策提供了科學依據 [3]。歐盟的《環境噪音指令》（Environmental Noise Directive, END）則在區域層面建立了系統性的噪音管理框架，要求成員國實施噪音地圖繪製和行動計畫制定等措施 [4]。

聲景作為環境指標的概念正在改變我們對都市環境品質的理解和評估方式。永續城市發展理念中的聲景考量不僅關注噪音污染的減少，更積極地追求聲環境的整體優化和人居環境的改善。研究顯示，良好的聲景環境與居民的身心健康、生活滿意度和社區凝聚力都存在正向關聯 [5][6]。這種多維度的效益使得聲景管理成為永續發展政策中不可或缺的組成部分。

公眾參與在現代聲景治理中扮演著越來越重要的角色。傳統的自上而下的環境管理模式正在被更加民主和參與式的治理方法所取代。公民科學、參與式規劃和社區主導的聲景改善項目為居民提供了直接參與環境治理的機會，同時也為政府決策提供了更加豐富和真實的民意基礎 [7][8]。這種治理模式的轉變不僅提高了政

策的有效性和可接受性，也促進了環境民主和社會包容的發展。

環境影響評估（Environmental Impact Assessment, EIA）體系中聲景評估的引入代表了環境保護理念的重要發展。傳統的環境影響評估主要關注生態系統和物理環境的變化，而聲景評估則將人的感知和福祉納入考量範圍，實現了從物理環境保護到人居環境品質提升的轉變 [9][10]。這種評估方法的創新不僅豐富了環境保護的內涵，也為可持續發展提供了更加全面的評估工具。

6.1 噪音管理與法規

噪音管理與法規體系在全球環境治理架構中佔據著重要地位，其發展軌跡反映了人類對聲音環境影響認知的不斷深化。從早期的單純噪音控制到現代的聲景管理，從國家層面的立法到國際合作的框架，噪音法規體系正在經歷著深刻的轉變。現代噪音管理不再僅僅關注聲音的物理強度，而是更加重視聲音環境的品質和人們的主觀感受。這種轉變不僅體現在法規條文的修訂中，更重要的是體現在管理理念和實施方法的根本性變化 [11]。

國際組織在推動全球噪音管理標準化方面發揮著關鍵作用。世界衛生組織透過其環境噪音指導方針為各國提供了科學的健康保護標準，而國際標準化組織（ISO）則透過一系列技術標準確保了測量和評估方法的一致性。這些國際框架不僅促進了跨國界的環境保護合作，也為各國制定本土化的噪音管理政策提供了重要參考 [12][13]。

區域性的噪音管理合作在歐盟等一體化程度較高的地區表現尤為突出。歐盟的環境噪音指令建立了統一的噪音評估和管理框架，要求成員國實施標準化的噪音地圖繪製和行動計畫制定。這種區域合作模式不僅提高了噪音管理的效率，也為處理跨境噪音問題提供了制度保障 [14]。

在地方層面，各國根據自身的社會經濟條件和文化背景制定了多樣化的噪音管理法規。這些法規在具體的限值設定、執行機制和處罰措施方面存在顯著差異，反映了不同社會對聲音環境品質要求的差異。然而，隨著全球化和國際交流的加深，

各國法規體系也在相互影響和趨同 [15]。

現代噪音法規面臨著多重挑戰，包括技術發展帶來的新型噪音源、都市化進程中的複雜聲環境、公眾參與需求的增加，以及聲景理念的融入等。這些挑戰要求法規體系必須保持足夠的靈活性和適應性，能夠及時回應社會變化和科技進步的需求 [16]。

6.1.1 國際法規

國際噪音法規體系的建構是一個複雜而持續的過程，涉及多個國際組織、政府間機構和非政府組織的協調努力。世界衛生組織作為全球公共健康領域的權威機構，在推動國際噪音管理標準方面發揮著領導作用。WHO 於 2018 年發布的《環境噪音指導方針（Environmental Noise Guidelines for the European Region）》是近年來最重要的國際噪音管理文件之一，該指導方針基於大量的科學研究證據，為不同類型的噪音源制定了具體的暴露限值建議 [17]。

WHO 2018 年指導方針的重要性在於其採用了更加嚴格的健康保護標準，並首次將聲景概念納入國際噪音管理框架。該指導方針針對道路交通噪音建議的日夜平均聲級限值為 53 分貝，夜間限值為 45 分貝，這些數值較之前的建議更為嚴格，反映了科學界對噪音健康影響認知的深化。指導方針還特別關注了脆弱群體的保護，包括兒童、老年人和慢性病患者等，為這些群體提供了更加嚴格的保護標準 [18]。

國際標準化組織（ISO）在技術標準制定方面發揮著關鍵作用，其制定的一系列聲學測量和評估標準為全球噪音管理提供了統一的技術基礎。ISO 12913 系列標準關於聲景的定義、測量和評估方法標誌著國際社會對聲景概念的正式認可和標準化。該系列標準不僅提供了聲景評估的基本框架，還詳細規定了數據收集、處理和報告的具體方法，為各國實施聲景管理提供了技術指導 [19]。

國際民航組織（ICAO）在航空噪音管理方面制定了一系列國際標準和建議措施。《國際民航公約》附件 16《環境保護》規定了航空器噪音認證的技術要求和程

序，建立了全球統一的航空噪音管理框架。隨著航空運輸業的快速發展，ICAO 不斷更新和加強相關標準，推動航空噪音的持續減少 [20]。

國際海事組織（IMO）針對船舶噪音制定了相關的國際規範，特別是針對水下噪音對海洋生物影響的管理措施。《國際防止船舶造成污染公約》（MARPOL）的修訂版本納入了船舶噪音控制的相關要求，要求新建船舶滿足特定的噪音控制標準。這些規範的實施對保護海洋生態環境和減少航運噪音污染發揮了重要作用 [21]。

聯合國環境規劃署（UNEP）在全球環境治理中推動噪音管理的國際合作，透過各種國際會議和倡議促進各國在噪音管理方面的經驗分享和技術交流。UNEP 發布的《全球噪音污染報告》定期評估全球噪音污染狀況，為國際社會制定應對策略提供科學依據 [22]。

國際勞工組織（ILO）在職業噪音暴露保護方面制定了重要的國際標準。《職業安全衛生公約》（第 155 號公約）和相關建議書要求各國建立職業噪音暴露的防護措施，保護勞動者免受噪音危害。這些標準在全球範圍內推動了職業噪音防護技術的發展和應用 [23]。

區域性國際組織也在推動地區間的噪音管理合作。歐洲經濟委員會（UNECE）制定的《跨境環境影響評估公約》要求締約方對可能產生跨境環境影響的項目進行評估，其中包括噪音影響的評估。這種區域合作機制為處理跨境噪音問題提供了制度框架 [24]。

國際法規體系在實施過程中面臨著多重挑戰。首先是各國經濟發展水平和技術能力的差異，使得統一標準的實施存在困難。發展中國家往往缺乏足夠的技術和資金來實施嚴格的噪音控制標準，需要國際社會提供技術援助和資金支持。其次是法規的強制力問題，大多數國際噪音標準屬於建議性質，缺乏強制執行機制，依賴各國的自覺遵守 [25]。

科技發展為國際噪音法規的實施提供了新的機遇。衛星遙測技術、物聯網監測設備和大數據分析方法使得大規模的噪音監測和評估成為可能，為國際合作和標準

執行提供了技術支撐。同時，人工智慧和機器學習技術在噪音預測和管理方面的應用也為提高法規實施效果開闢了新的途徑 [26]。

國際噪音法規體系的未來發展趨勢包括更加嚴格的健康保護標準、更廣泛的聲景概念應用、更強的公眾參與機制，以及更有效的國際合作機制。隨著全球環境意識的提高和科技能力的增強，國際社會有望建立更加完善和有效的噪音管理法規體系 [27]。

6.1.2 區域與在地規範

區域與在地噪音規範體系反映了不同地區在文化背景、經濟發展水平、環境條件和社會需求方面的差異性。這些規範不僅需要與國際標準保持一致，更要針對當地的具體情況制定切實可行的管理措施。歐盟作為區域一體化程度最高的地區之一，其環境噪音指令（Environmental Noise Directive 2002/49/EC）為區域性噪音管理提供了重要的實踐經驗和制度創新 [28]。

歐盟環境噪音指令的核心內容包括噪音地圖繪製、噪音行動計畫制定和公眾參與機制建立等三個主要方面。該指令要求人口超過 25 萬的城市和主要交通基礎設施周邊地區必須繪製詳細的噪音地圖，並每五年更新一次。這種標準化的噪音評估方法不僅提高了不同地區間數據的可比性，也為制定針對性的噪音減緩措施提供了科學依據 [29]。

噪音行動計畫作為歐盟環境噪音指令的重要組成部分，要求各成員國基於噪音地圖的結果制定具體的噪音管理措施。這些行動計畫不僅包括傳統的噪音源控制措施，還越來越多地納入聲景改善和積極聲環境營造的內容。荷蘭、德國和丹麥等國在行動計畫中積極融入聲景理念，透過創造宜人的聲環境來提升整體的環境品質 [30]。

公眾參與機制是歐盟環境噪音指令的創新之處，要求各成員國在噪音地圖繪製和行動計畫制定過程中充分徵求公眾意見。這種參與式管理方法不僅提高了政策的透明度和可接受性，也為收集本地化的噪音影響資訊提供了重要渠道。英國的布

萊頓市和瑞典的斯德哥爾摩市等地在公眾參與方面積累了豐富的經驗，開發了多種創新的參與方法和工具 [31]。

亞太地區的噪音管理規範呈現出多樣化的特點，反映了該地區國家在發展階段、文化傳統和管理體系方面的差異。日本作為該地區環境管理的先進國家，建立了完善的噪音管理法規體系，包括《噪音管制法》、《環境基本法》等法律法規。日本的噪音管理特別注重對敏感受體的保護，為學校、醫院等設施周邊地區制定了更為嚴格的噪音限值標準 [32]。

新加坡作為高密度都市化地區的代表，在噪音管理方面採用了嚴格而精細的管理方式。《環境保護與管理法》為新加坡的噪音管理提供了法律基礎，該法律不僅規定了詳細的噪音限值標準，還建立了高效的執法機制和處罰體系。新加坡在建築噪音管理方面的經驗特別值得借鑒，透過許可證制度和時間限制等措施有效控制了建築施工噪音的影響 [33]。

中國作為世界最大的發展中國家，在噪音管理法規建設方面取得了顯著進展。《環境噪音污染防治法》為中國噪音管理提供了基本的法律框架，而《聲環境品質標準》則規定了具體的噪音限值要求。近年來，中國越來越重視聲景概念在噪音管理中的應用，一些城市開始在規劃和建設中融入聲景設計理念 [34]。

北美地區的噪音管理體系主要以美國和加拿大為代表，呈現出聯邦與州（省）分權管理的特點。美國的《噪音控制法》建立了聯邦層面的噪音管理框架，但具體的實施主要由各州負責。加州、紐約州等經濟發達州份制定了相對嚴格的噪音管理標準，而一些經濟欠發達地區的標準則相對寬鬆 [35]。

加拿大的噪音管理體系同樣採用分權制，各省份根據自身情況制定相應的噪音管理法規。安大略省和不列顛哥倫比亞省在噪音管理方面起步較早，建立了相對完善的法規體系和執行機制。加拿大在航空噪音管理方面的經驗特別豐富，建立了完善的機場噪音監測和管理體系 [36]。

發展中國家在噪音管理法規建設方面面臨著特殊的挑戰和機遇。巴西、印度、南

非等新興經濟體在快速都市化過程中遇到了嚴重的噪音污染問題，促使這些國家加強噪音管理法規的建設。巴西的《國家環境政策法》為噪音管理提供了基本框架，而各州和市政府則根據本地情況制定具體的實施細則 [37]。

區域與在地噪音規範的未來發展趨勢包括標準的進一步細化和本土化、執行機制的完善、科技手段的廣泛應用，以及國際合作的加強。隨著全球化進程的深入和環境意識的提高，各地區的噪音管理規範有望在保持本土特色的同時實現更高程度的協調和統一 [38]。

6.1.3 法律與政策挑戰

現代噪音管理的法律與政策挑戰反映了複雜的社會、技術和環境變化所帶來的多重壓力。傳統的以物理聲級為基礎的法規體系正面臨著聲景理念、技術創新、社會需求變化和國際合作要求等多方面的挑戰。這些挑戰不僅要求法律框架的根本性調整，也需要政策實施機制的創新和完善 [39]。

技術發展帶來的新型噪音源是當前法律體系面臨的重要挑戰之一。無人機、電動車輛、新型建築材料和設備等技術創新產生了傳統法規未能涵蓋的新型噪音問題。電動車輛的靜音特性雖然減少了交通噪音，但也帶來了行人安全問題，促使一些國家要求電動車輛安裝人工聲音系統。無人機的廣泛應用則產生了全新的空中噪音源，現有的航空噪音法規難以直接適用 [40]。

都市化進程中的複合噪音環境對傳統的單一噪音源管理模式提出了挑戰。現代都市環境中往往存在多種噪音源的疊加效應，傳統的基於單一噪音源的管理方法難以有效應對複雜的聲環境問題。累積影響評估的缺乏使得許多個別符合標準的項目在集合後產生了超標的噪音影響，這要求法規體系必須建立更加全面的累積影響評估機制 [41]。

公眾參與需求的增加對傳統的專家主導決策模式提出了挑戰。現代社會中公眾的環境意識和參與意願不斷提高，要求在噪音管理決策過程中有更多的發言權和影響力。然而，公眾參與的制度化和規範化仍然面臨著諸多困難，包括參與渠道的

建立、意見徵集的有效性、利益衝突的協調等問題 [42]。

聲景概念的融入對傳統噪音法規體系構成了根本性挑戰。聲景強調人的主觀感受和環境的整體品質，這與傳統法規基於客觀物理測量的方法存在根本差異。如何將主觀的聲景評估納入客觀的法律框架，如何在保持法律確定性的同時容納聲景的主觀性和情境性，成為法規體系面臨的重要理論和實踐問題 [43]。

跨境噪音問題的處理在全球化時代變得越來越複雜。國際航空、航運、跨境交通等活動產生的噪音影響往往涉及多個國家和地區，需要國際合作來解決。然而，不同國家法律體系的差異、主權考量、執法機制的差異等因素使得跨境噪音問題的處理變得極為複雜 [44]。

執法資源不足是噪音管理法規實施面臨的普遍問題。噪音污染具有時效性強、證據易失、影響範圍廣等特點，需要大量的人力物力進行監測和執法。許多地區由於資源限制無法建立足夠的監測網絡和執法隊伍，導致法規的威懾力不足，違法行為難以得到有效制止 [45]。

科技發展為解決這些挑戰提供了新的機遇。自動監測設備、衛星遙測、大數據分析、人工智慧等技術的應用可以大大提高噪音監測的效率和覆蓋面，減少執法成本，提高執法效果。區塊鏈技術在數據存證方面的應用也為噪音污染的法律舉證提供了新的可能性 [46]。

法規體系的適應性和靈活性需要進一步加強。面對快速變化的技術和社會環境，噪音法規必須保持足夠的靈活性，能夠及時調整和更新。這要求建立更加敏捷的法規修訂機制，加強法規的前瞻性設計，並建立試點項目和例外處理機制 [47]。

國際合作機制的完善是應對全球性噪音挑戰的關鍵。建立更加強有力的國際合作框架，加強技術標準的協調統一，建立爭端解決機制，為跨境噪音問題的解決提供制度保障。同時，加強發展中國家的能力建設，縮小各國在噪音管理能力方面的差距 [48]。

經濟激勵機制的創新可以提高法規的實施效果。透過稅收政策、補貼制度、排放交易等經濟手段激勵企業和個人主動減少噪音排放，比單純的行政處罰更能調動各方積極性。歐盟一些國家在航空噪音收費方面的經驗值得借鑒和推廣 [49]。

6.2 聲景作為環境指標

聲景作為環境指標的概念代表了環境評估領域的重要範式轉變，從傳統的物理參數測量轉向更加全面的人居環境品質評估。這種轉變不僅反映了環境科學理論的發展，更體現了可持續發展理念在環境管理實踐中的深化應用。聲景指標的建立和應用為評估都市環境品質、指導可持續發展規劃、促進公共健康提供了新的工具和方法 [50][51]。

永續城市發展的聲景考量已成為現代都市規劃的重要組成部分。聲景品質不僅影響居民的生活滿意度，也與都市的經濟活力、社會凝聚力和環境韌性密切相關。研究表明，具有良好聲景環境的城市區域往往具有更高的房地產價值、更強的商業活力和更好的社會包容性 [52]。這種多維度的效益使得聲景管理成為智慧城市建設和可持續發展戰略中的重要內容。

聲景與健康的關係研究已成為公共衛生領域的熱點議題。WHO 2018 年環境噪音指導方針的發布標誌著國際社會對聲音環境健康影響認知的重大進步，為將聲景作為健康指標提供了科學依據。聲景對心血管疾病、睡眠障礙、認知功能、精神健康等多個方面的影響已經得到了大量研究的證實 [53][54]。

生活品質的聲景評估為都市規劃和環境管理提供了以人為本的評估工具。傳統的環境品質評估往往側重於物理和化學指標，而聲景評估則將人的感受和需求置於中心位置，為創造更加宜居的都市環境提供了重要指導 [55]。這種評估方法的創新不僅豐富了生活品質指標體系，也為環境正義和社會公平提供了新的評估維度。

6.2.1 永續城市與聲景

永續城市發展中的聲景考量代表了都市規劃理念的重要演進，從早期的功能分區

和基礎設施建設轉向更加注重人居環境品質和生態系統健康的綜合發展模式。聲景作為都市環境品質的重要組成部分，不僅影響居民的日常生活體驗，也與都市的經濟競爭力、社會和諧度和環境可持續性密切相關。現代永續城市規劃越來越重視聲景的積極營造，而不僅僅是噪音的被動控制 [56]。

聯合國可持續發展目標（SDGs）為永續城市建設提供了全球性的行動框架，其中 SDG 11「可持續城市和社區」明確提出了改善都市環境品質的要求。雖然該目標沒有直接提及聲景，但其對「包容、安全、有韌性和可持續」城市的願景與優質聲景環境的目標高度一致。越來越多的城市開始將聲景指標納入可持續發展監測體系，作為評估都市發展品質的重要指標 [57]。

智慧城市建設為聲景管理提供了強大的技術支撐。物聯網感測器網絡可以實現對都市聲環境的實時監測和動態評估，大數據分析技術可以識別聲景品質的時空變化模式，人工智慧算法可以預測和優化聲景管理策略。這些技術的應用不僅提高了聲景管理的效率和精確度，也為市民參與聲景治理提供了新的平台和工具 [58]。

綠色基礎設施在永續城市聲景營造中發揮著關鍵作用。都市公園、綠色走廊、屋頂花園、垂直綠化等綠色空間不僅能夠透過植被吸音和屏蔽效應減少噪音傳播，更重要的是能夠提供鳥鳴、風聲、水流聲等自然聲音，豐富都市聲景的層次和品質。研究表明，即使在相同的噪音水平下，包含自然聲音的環境也比純粹的機械噪音環境更受歡迎，對人的身心健康更有益 [59]。

永續交通系統的發展為改善都市聲景提供了重要機遇。電動公共交通工具、自行車道網絡、步行友好的街道設計等措施不僅減少了交通噪音的產生，也創造了更加安靜和舒適的都市空間。哥本哈根、阿姆斯特丹等自行車友好城市的經驗表明，優先發展綠色交通可以顯著改善都市聲景品質，提升居民的生活滿意度 [60]。

都市設計在聲景營造方面的作用日益受到重視。建築物的佈局、街道的寬度、廣場的設計、水景的設置等都市設計要素都會影響聲音的傳播和感知。聲景友好的都市設計不僅考慮視覺美學，也注重聽覺環境的營造，透過合理的空間配置和聲

學設計創造宜人的聲音環境 [61]。

社區參與是永續城市聲景建設的重要保障。居民對聲景品質的感受和需求是聲景規劃的重要依據，社區的參與和支持是聲景改善項目成功的關鍵因素。許多城市開展的「安靜區域」建設項目都強調社區參與，透過居民的積極參與確保項目符合當地的實際需求和文化特色 [62]。

經濟效益是推動永續城市聲景建設的重要動力。良好的聲景環境可以提升房地產價值、吸引商業投資、促進旅遊發展、改善工作環境生產力等，為城市帶來顯著的經濟回報。一些研究表明，聲景品質每改善 1 分貝，周邊房地產價值可提升 0.5-1%，這種經濟效益為聲景投資提供了強有力的支撐 [63]。

文化認同在永續城市聲景建設中具有特殊意義。不同城市和地區的聲景文化具有獨特性，反映了當地的歷史傳統、生活方式和價值觀念。永續城市建設應該尊重和保護這種聲景文化多樣性，在改善聲景品質的同時保持地方特色和文化認同 [64]。

氣候變化對都市聲景的影響日益受到關注。極端天氣事件可能改變都市聲景的組成和特徵，而聲景管理措施也可能對城市的氣候韌性產生影響。綠色基礎設施在改善聲景的同時也有助於緩解都市熱島效應，提高城市對氣候變化的適應能力 [65]。

國際合作與經驗分享在推動永續城市聲景建設方面發揮著重要作用。歐盟的「安靜城市」網絡、聯合國人居署的可持續都市發展倡議等國際平台為城市間的經驗分享和技術交流提供了重要機會。這種國際合作不僅促進了最佳實踐的傳播，也推動了聲景管理技術和方法的創新發展 [66]。

6.2.2 聲景與健康

聲景與健康的關係研究已成為環境健康科學領域的前沿課題，其重要性不僅體現在學術研究的豐富成果上，更反映在國際衛生組織政策指導和各國公共衛生實踐

的重大變化中。世界衛生組織 2018 年發布的環境噪音指導方針標誌著聲音環境健康影響認知的重大突破，首次建立了基於聲景概念的健康保護框架，為將聲景作為公共健康指標提供了權威的科學依據 [67]。

心血管疾病與聲景的關係是目前研究最為深入的領域之一。長期暴露於不良聲景環境中會激活人體的壓力反應系統，導致血壓升高、心率變異性增加、血管內皮功能障礙等生理變化。大規模的流行病學研究顯示，道路交通噪音每增加 10 分貝，冠心病風險增加約 8-12%，心肌梗塞風險增加約 6-9%。更重要的是，研究發現即使在相同的噪音水平下，包含自然聲音元素的聲景環境對心血管系統的負面影響明顯較小 [68]。

睡眠品質與聲景品質之間存在密切關聯，這種關聯不僅體現在噪音的直接干擾上，更體現在聲景環境對睡眠恢復性的影響。WHO 2018 年指導方針特別強調了夜間聲景對睡眠品質的重要性，建議夜間戶外聲級不應超過 40 分貝。然而，聲景研究發現，聲音的類型和特徵比單純的聲級更能影響睡眠品質。自然聲音如雨聲、海浪聲等往往具有助眠效果，而突發性和不規律的人工噪音則對睡眠干擾最大 [69]。

兒童健康發展與聲景環境的關係受到特別關注。兒童的聽覺系統和認知能力仍在發育階段，對聲環境變化更為敏感。研究表明，長期暴露於不良聲景環境中的兒童在語言發展、注意力集中、學習成績等方面均表現較差。學校聲景環境的改善可以顯著提高學生的學習效率和學業成績，其效果甚至可以持續到成年期 [70]。

精神健康與聲景品質的關係日益受到重視。都市噪音污染與焦慮、抑鬱、認知功能下降等精神健康問題存在顯著關聯。研究發現，良好的聲景環境可以降低皮質醇水平、減少焦慮症狀、改善情緒狀態。特別是自然聲景環境具有顯著的心理恢復效果，能夠幫助人們從壓力和疲勞中恢復 [71]。

老年人群作為聲景健康影響的脆弱群體受到特別關注。隨著年齡增長，人的聽覺能力下降，對聲環境變化的適應能力減弱，同時慢性疾病的患病率增加，使得老年人更容易受到不良聲景的健康影響。為老年人創造友好的聲景環境不僅有助於

改善其身體健康，也有助於提高其社會參與度和生活品質 [72]。

社會經濟地位與聲景健康影響存在顯著的不平等現象。低收入人群往往居住在聲景品質較差的區域，如主要交通幹道附近、工業區周邊等，同時由於經濟條件限制，難以採取有效的個人防護措施。這種環境不公平加劇了健康不平等，成為環境正義關注的重要議題 [73]。

積極聲景的健康促進作用是近年來研究的新興領域。與傳統的噪音控制方法不同，積極聲景營造著重於創造有益健康的聲音環境。研究表明，自然聲音、音樂、水聲等積極聲音元素不僅可以掩蔽噪音，更重要的是能夠直接促進身心健康。這種發現為基於聲景的健康干預提供了新的思路 [74]。

聲景健康影響的生理機制研究取得了重要進展。功能性磁共振成像（fMRI）研究顯示，不同類型的聲景會激活大腦的不同區域，自然聲景主要激活與放鬆和恢復相關的腦區，而噪音則主要激活與壓力和警覺相關的腦區。這些神經科學發現為理解聲景健康影響的機制提供了重要見解 [75]。

聲景健康評估方法的標準化是實現聲景健康指標應用的關鍵。ISO 12913 系列標準為聲景評估提供了技術框架，但如何將這些技術方法與健康評估相結合仍需要進一步的研究和實踐。一些研究提出了基於健康風險的聲景評估方法，試圖建立聲景品質與健康影響之間的定量關係 [76]。

聲景健康干預的實踐應用正在各地展開。一些醫院開始在治療環境中應用聲景設計，透過播放自然聲音、音樂等改善患者的治療體驗和康復效果。城市規劃中也越來越多地考慮聲景健康因素，透過合理的用地規劃、綠色空間設計等措施改善居民的聲景健康環境 [77]。

6.2.3 聲景與生活品質

聲景與生活品質的關係研究揭示了聲音環境對人類整體福祉的深遠影響，這種影響超越了單純的健康考量，涵蓋了社會參與、經濟活動、文化體驗和個人發展等

多個維度。生活品質作為一個多維度的概念，包括物質生活條件、社會關係品質、個人發展機會、環境品質等多個方面，而聲景品質作為環境品質的重要組成部分，對這些維度都產生重要影響 [78]。

居住滿意度與聲景品質之間存在顯著的正相關關係。研究表明，聲景品質是影響居民對居住環境整體滿意度的重要因素之一，其重要性僅次於空氣品質和綠化水平。即使在其他條件相同的情況下，具有良好聲景環境的住宅區居民的居住滿意度明顯更高。這種滿意度的差異不僅體現在主觀感受上，也體現在居民的居住穩定性和社區參與度上 [79]。

社交活動與聲景環境的關係體現了聲音對社會交往的重要影響。良好的聲景環境有利於人際交流和社區活動的開展，而過度的噪音則會阻礙社交互動，導致社會孤立。研究發現，在聲景品質較好的公共空間中，人們更願意停留和交流，社區凝聚力也更強。這種社交效應對老年人和兒童等群體尤為重要 [80]。

經濟活動與聲景品質的關係體現在多個方面。首先，良好的聲景環境可以提升商業區的吸引力，促進消費活動和商業發展。其次，聲景品質影響工作環境的舒適度和生產效率，研究表明適宜的聲景環境可以提高工作專注度和創造力。第三，聲景品質影響房地產價值，成為影響個人和家庭財富的重要因素 [81]。

教育環境中的聲景品質對學習效果和教育品質產生重要影響。學校和圖書館等教育設施的聲景設計不僅影響學生的學習專注度，也影響教師的教學效果和工作滿意度。研究顯示，聲景品質良好的教室中學生的學習成績明顯更好，教師的職業倦怠程度也更低 [82]。

文化體驗與聲景環境密切相關。不同的文化群體對聲景有不同的偏好和解讀，聲景也承載著豐富的文化信息和情感記憶。保護和營造具有文化特色的聲景環境不僅有助於維護文化多樣性，也能提升居民的文化認同感和歸屬感。歷史街區、文化景點等地的聲景保護和營造對維護城市文化特色具有重要意義 [83]。

休閒娛樂活動與聲景品質的關係體現了聲音環境對生活享受的影響。公園、廣場、

遊憩設施等休閒空間的聲景品質直接影響人們的休閒體驗和放鬆效果。自然聲景環境能夠提供更好的心理恢復效果，而過度的人工噪音則會降低休閒活動的品質 [84]。

個人發展機會與聲景環境也存在關聯。良好的聲景環境有利於個人的思考、創造和自我發展，而嘈雜的環境則可能阻礙個人潛能的發揮。研究發現，在安靜和諧的環境中成長的兒童在創造力、想像力等方面的發展更好 [85]。

生活方式選擇與聲景偏好之間存在相互影響的關係。不同生活方式的人群對聲景有不同的需求和容忍度，而聲景環境也會影響人們的生活方式選擇。例如，偏好安靜環境的人更傾向於選擇郊區居住，而喜歡熱鬧環境的人則更願意居住在市中心 [86]。

聲景品質的測量和評估是實現聲景生活品質指標應用的技術基礎。目前已開發出多種聲景評估方法，包括主觀問卷調查、聲音漫步、實驗室測試等。這些方法的結合使用可以全面評估聲景對生活品質的影響，為政策制定和規劃設計提供科學依據 [87]。

聲景改善的生活品質效益評估是政策制定的重要參考。研究表明，聲景改善項目的效益不僅體現在環境品質的提升上，更體現在居民生活滿意度、社區活力、經濟發展等多個方面的綜合效益。這種多維度的效益評估為聲景投資的合理性提供了支撐 [88]。

6.3 公眾參與與聲景治理

公眾參與在現代聲景治理中的地位和作用日益重要，代表了從傳統的專家主導、政府主導的環境管理模式向更加民主、參與式、協作式治理模式的根本性轉變。這種轉變不僅反映了民主社會中公民權利意識的覺醒，也體現了聲景作為主觀環境品質指標所具有的個人化和社會化特徵。公眾參與的聲景治理模式認為，居民作為聲環境的直接體驗者和利益相關者，擁有對聲景品質進行評判和參與改善決策的基本權利 [89][90]。

參與式聲景治理的理論基礎源於環境民主理論、社區參與理論和協作治理理論的綜合發展。這些理論強調公眾在環境決策中的主體地位，認為有效的環境治理必須建立在廣泛的公眾參與和社會共識基礎上。聲景治理的參與式特徵尤為突出，因為聲景品質的評判本質上是主觀的、情境化的，只有透過公眾的直接參與才能真正反映聲環境對人們生活的實際影響 [91]。

現代資訊通信技術為公眾參與聲景治理提供了強大的技術支撐。移動應用程式、網路平台、社交媒體、地理資訊系統等技術工具使得大規模的公眾參與成為可能，也為公眾表達聲景感受和參與治理決策提供了便利的渠道。這些技術的應用不僅提高了參與的便利性和效率，也豐富了參與的形式和內容 [92]。

公眾參與聲景治理面臨的挑戰包括參與代表性的確保、專業知識與公眾智慧的結合、參與成本的控制、利益衝突的協調等多個方面。如何在保證參與廣泛性的同時確保參與品質，如何平衡專業技術要求與公眾理解能力，如何處理不同利益群體之間的衝突，都是參與式聲景治理需要解決的重要問題 [93]。

6.3.1 公民參與模型

公民參與聲景治理的模型設計需要考慮參與的層次、形式、機制和效果等多個維度，以確保參與的有效性、代表性和可持續性。Arnstein 的「公民參與階梯」理論為理解不同層次的公民參與提供了重要框架，從信息提供、意見徵詢到共同決策、公民主導，不同層次的參與對聲景治理效果產生不同影響。現代聲景治理實踐中越來越重視高層次的公民參與，強調公民在決策過程中的實質性影響力 [94]。

信息驅動的參與模型是最基礎的公民參與形式，主要透過向公眾提供聲景相關的信息來提高公眾的認知和意識。這種模型包括噪音地圖的公開、聲景監測數據的發布、環境報告的編制等。雖然這種參與形式的層次較低，但對於提高公眾的環境意識和參與積極性具有重要作用。歐盟環境噪音指令要求成員國公開噪音地圖和行動計畫就是這種模型的典型應用 [95]。

諮詢導向的參與模型透過各種形式的意見徵集來獲取公眾對聲景問題的看法和建議。這種模型包括公眾聽證會、問卷調查、焦點小組討論、網上意見徵集等形式。諮詢導向的參與能夠為決策者提供重要的民意基礎，但公眾意見是否被採納以及如何被採納仍然由決策者決定。這種模型在聲景規劃和政策制定中得到廣泛應用 [96]。

協作式參與模型強調公眾與政府、專家等利益相關者之間的平等合作，共同參與問題識別、方案設計和決策制定。這種模型透過工作坊、圓桌會議、共識會議等形式實現不同利益相關者之間的對話和協商。協作式參與在複雜的聲景問題解決中表現出明顯優勢，能夠整合不同群體的知識和經驗，形成更加全面和可行的解決方案 [97]。

賦權式參與模型將決策權部分或完全轉移給公民和社區，由其主導聲景治理的過程和結果。這種模型包括社區自治、公民議會、參與式預算等形式。賦權式參與對提高公民的主人翁意識和治理能力具有重要作用，但也對公民的組織能力和專業素養提出了較高要求 [98]。

基於技術的參與模型利用現代信息技術為公民參與提供新的平台和工具。移動應用程式如「Hush City」、「NoiseCapture」等允許公民透過智慧手機進行聲景監測和評估，形成大規模的公民科學項目。網路平台和社交媒體為公民表達聲景感受和參與討論提供了便利渠道。這些技術工具不僅提高了參與的便利性，也為收集大規模聲景數據提供了可能 [99]。

社區導向的參與模型強調以社區為基礎的聲景治理，發揮社區組織和領袖在動員和組織公民參與中的作用。這種模型認為社區是公民生活的基本單位，也是聲景問題的主要發生場所，因此社區層面的參與對解決聲景問題具有特殊重要性。社區導向的參與模型在環境正義運動中得到廣泛應用 [100]。

跨界合作的參與模型認識到聲景問題的複雜性和跨領域特徵，強調不同部門、不同層級、不同群體之間的合作參與。這種模型透過建立多方利益相關者平台來協

調不同主體的參與，實現資源整合和優勢互補。在大型基礎設施項目的聲景影響管理中，這種跨界合作模型表現出重要價值 [101]。

持續性參與模型強調公民參與的長期性和可持續性，而不是一次性的活動。這種模型透過建立常態化的參與機制和制度來確保公民能夠持續參與聲景治理過程。持續性參與對於建立公民與政府之間的信任關係、積累參與經驗和能力具有重要意義 [102]。

評估導向的參與模型強調對參與效果和影響進行系統性評估，以改進參與方法和提高參與質量。這種模型建立了參與評估的指標體系和方法，包括參與率、代表性、影響力、滿意度等多個維度。評估結果為改進參與設計和提高治理效果提供重要反饋 [103]。

6.3.2 社區參與聲景規劃

社區參與聲景規劃代表了從自上而下的專家規劃向自下而上的協作規劃的重要轉變，這種轉變不僅體現了規劃理念的民主化發展，也反映了聲景作為生活環境品質指標所具有的地方性和主觀性特徵。社區作為居民日常生活的基本空間單位，其聲景品質直接影響居民的生活體驗和福祉，因此社區居民理應成為聲景規劃的主要參與者和受益者 [104]。

社區參與聲景規劃的理論基礎包括參與式規劃理論、社區發展理論和地方知識理論等。這些理論強調居民對其生活環境的深度了解和切身感受是規劃決策的重要依據，專業規劃師的技術知識需要與居民的生活經驗相結合才能制定出真正符合社區需求的聲景改善方案。這種理論轉向促進了規劃實踐中對社區聲音的重視和對居民需求的關注 [105]。

聲音漫步（Soundwalk）作為社區參與聲景規劃的重要方法，為居民提供了直接體驗和評估社區聲景的機會。透過組織居民在社區中進行有目的的行走和聆聽，聲音漫步能夠幫助居民發現平時忽略的聲景問題和機會，也為規劃師提供了從居民視角理解聲景的重要途徑。許多成功的社區聲景改善項目都是從聲音漫步活動

開始的 [106]。

社區聲景地圖繪製是居民參與聲景規劃的有效工具。不同於傳統的技術噪音地圖，社區聲景地圖更注重居民的主觀感受和體驗，透過居民的集體智慧來識別聲景問題區域和聲景資源。這種參與式地圖繪製不僅提供了豐富的聲景信息，也增強了居民對社區聲景的認知和關注 [107]。

社區工作坊是促進居民深度參與聲景規劃的重要平台。透過小組討論、腦力激盪、情境模擬等多種形式，工作坊為居民提供了表達聲景需求、交流改善想法、參與方案設計的機會。工作坊的成功舉辦需要專業的引導和組織，以確保不同背景居民的平等參與和有效交流 [108]。

居民主導的聲景監測項目體現了社區參與的高層次形式。透過培訓居民使用簡單的聲級測量設備或智慧手機應用程式，可以建立社區層面的聲景監測網絡。這種監測不僅提供了豐富的聲景數據，也提高了居民對聲景問題的認知和參與積極性。一些社區甚至建立了居民主導的聲景改善行動小組 [109]。

社區聲景願景制定是參與式規劃的重要環節。透過居民的廣泛參與，可以形成社區對未來聲景發展的共同願景和目標。這種願景制定過程不僅有助於凝聚社區共識，也為後續的規劃實施提供了方向指導。成功的聲景願景通常具有具體性、可實現性和激勵性等特徵 [110]。

跨文化社區的聲景規劃面臨特殊的挑戰和機遇。不同文化背景的居民對聲景有不同的理解和偏好，需要透過文化敏感的參與方法來協調不同群體的需求。一些多元文化社區透過舉辦聲景文化節、多語言聲音漫步等活動來促進不同文化群體之間的理解和合作 [111]。

弱勢群體的參與保障是社區參與聲景規劃中的重要議題。老年人、兒童、殘障人士、低收入群體等往往在傳統的參與活動中處於邊緣地位，需要特殊的參與設計和支持措施。一些社區開發了專門針對這些群體的參與方法，如兒童聲景工作坊、老年人聲景茶話會等 [112]。

數位技術在社區參與聲景規劃中的應用越來越廣泛。線上平台、移動應用程式、虛擬現實技術等為居民參與提供了新的途徑和工具。這些技術不僅提高了參與的便利性和覆蓋面，也為聲景信息的收集和分析提供了強大支撐。然而，數位鴻溝問題也需要在技術應用中予以關注 [113]。

社區參與聲景規劃的效果評估對改進參與方法和提高規劃質量具有重要意義。評估內容包括參與過程的品質、參與結果的滿意度、規劃實施的效果等多個方面。一些研究建立了系統的評估框架和指標體系，為參與式聲景規劃的改進提供科學依據 [114]。

6.3.3 聲景治理案例

聲景治理的實踐案例為理解公眾參與在聲景管理中的作用和效果提供了豐富的經驗和啟示。這些案例涵蓋了不同地區、不同規模、不同類型的聲景治理實踐，展示了參與式治理在解決聲景問題中的多樣化應用和創新發展。透過分析這些案例的成功經驗和面臨挑戰，可以為未來的聲景治理實踐提供重要參考和指導 [115]。

倫敦的「安靜倫敦」（Quiet London）項目是都市聲景治理的重要案例。該項目由倫敦市政府發起，旨在透過公眾參與和科技創新來改善倫敦的聲景環境。項目建立了線上平台允許市民報告噪音問題和建議安靜區域，收集了超過 10 萬條市民反饋。基於這些數據，項目團隊製作了互動式的倫敦聲景地圖，識別了城市中的安靜區域和噪音熱點。該項目的成功在於有效整合了公眾智慧與專業技術，為城市聲景管理提供了創新模式 ，這個專案具有以下幾個特色與啟示：

一、治理模式的創新性

「安靜倫敦」不是單純由政府自上而下規劃，而是透過建立線上平台讓市民主動參與。民眾可以回報噪音問題或推薦安靜區域，形成龐大的群眾資料庫。這種方式不僅提升了政策的透明度，也讓居民真正參與聲景治理。

二、大數據與互動地圖應用

專案團隊將市民超過 10 萬筆的反饋數據，結合地理資訊系統（GIS），製作了

互動式的「倫敦聲景地圖」。地圖同時呈現噪音熱點（noise hotspots）與安靜區域（quiet areas），讓決策者、規劃師與市民都能直觀掌握城市聲景分布，這是數據驅動治理的典型案例。

三、政策與公眾智慧的結合

該專案成功的關鍵，在於把專業技術（如聲學測量、GIS 技術）與公眾智慧結合。政府不再單純依靠官方測站數據，而是引入「群眾外包」（crowdsourcing）的思維，讓聲景管理更貼近市民日常生活經驗。

四、對其他城市的啟示

「安靜倫敦」的模式展示了聲景治理如何從傳統的「噪音防制」轉型為「聲音品質管理」。它啟發了其他城市（如巴塞隆納、阿姆斯特丹）也開始嘗試建立安靜區域清單或聲景地圖。對於像桃園這樣正在推動「靜桃專案」的城市來說，此案例可作為推動市民參與、發展互動聲景平台的重要參考。[116]

柏林的「開放聲景」（Open Soundscapes）項目體現了公民科學在聲景治理中的應用。該項目鼓勵市民使用智慧手機應用程式記錄和分享城市聲音，建立了一個開放的聲景數據庫。項目不僅收集了大量的聲景數據，還促進了市民對城市聲環境的關注和理解。透過數據分析，項目團隊發現了城市聲景的時空變化模式，為城市規劃和聲景管理提供了重要資訊，它在聲景治理上的價值可以從以下幾個面向來理解：

一、公民科學的參與模式

不同於傳統由學術機構或政府單位主導的聲音調查，「開放聲景」透過智慧型手機應用程式，讓市民成為聲音資料的蒐集者。這種「人人皆研究者」的模式不僅降低了資料蒐集的門檻，也大幅提高了參與的廣度與多樣性。

二、開放數據與共享精神

專案建立了可供市民、研究者與決策單位共同使用的開放聲景資料庫。這個資料庫不僅是數據的集合，更是一種公共資源，任何人都能基於這些數據進行再分析或設計應用，體現了開放科學與共享城市治理的精神。

三、聲景的時空變化分析

透過長時間、跨地點的大規模蒐集，專案團隊得以分析柏林不同區域與不同行為活動下的聲景模式。例如日夜聲景的差異、不同季節的聲音特徵、或是交通繁忙區與住宅區的對比。這些發現能夠支撐更精準的都市規劃與聲景管理。

四、教育與社會影響

「開放聲景」讓市民意識到聲音也是城市環境的重要一環，促進了居民對都市聲景的敏感度與理解度。這種公共教育效益，對於推動長期的聲音友善城市文化至關重要。

五、政策啟示

柏林的案例顯示，當市民被賦予科技工具與參與管道時，能夠大幅提高聲景治理的資料覆蓋率與社會共識。這對於像桃園、台北這類快速發展的城市而言，提供了可借鏡的思路：透過公民科學平台，不僅蒐集更全面的噪音與聲景數據，也能強化政策推行的正當性與民眾支持度。 [117]

阿姆斯特丹的社區聲景改善項目展示了社區參與在小尺度聲景治理中的效果。該項目選擇了幾個不同類型的社區作為試點，透過居民工作坊、聲音漫步、社區會議等形式收集居民對聲景問題的看法和改善建議。基於居民的參與和反饋，項目實施了多種聲景改善措施，包括交通寧靜化、綠色屏障建設、水景設置等。項目評估顯示，居民的聲景滿意度和社區凝聚力都有顯著提升它的特色與啟示可以歸納如下：

一、以社區為單位的試點治理

專案選擇不同特性的社區（如住宅區、混合商業區、近交通幹道區域）作為試點，透過分區推動，能針對不同聲景挑戰提出在地化解決方案，避免一刀切的單一治理模式。

二、深度參與的方法設計

專案運用了多元方式蒐集居民觀點：

- **居民工作坊**：建立共同討論平台，讓不同年齡、背景的居民都能發聲。
- **聲音漫步**（soundwalks）：帶領居民在社區中邊走邊聆聽，並即時討論感受與觀察。
- **社區會議**：將前期收集的資料匯總，讓居民共同討論優先改善項目。

這些方式不僅是資料蒐集工具，也是社區凝聚與教育的過程。

三、具體改善措施的落實

根據居民的回饋，阿姆斯特丹專案落實了多種聲景改善策略，包括：

- **交通寧靜化**：如減速設計、限制車流量，降低車輛噪音。
- **綠色屏障**：利用樹木與植栽作為自然隔音牆，兼顧美化與降噪。

- **水景設置**：透過水聲改善聲音氛圍，營造更舒緩的聽覺環境。

四、成效與社會效益

專案評估顯示，居民對聲景的滿意度顯著提升，更重要的是，因為居民共同參與設計與決策，社區的凝聚力、認同感與合作意願也隨之增強。聲景治理不再只是「噪音管制」，而是轉化為一種社區營造與地方創生的契機。

五、政策啟示

阿姆斯特丹案例展現了「小尺度、社區導向」的治理模式，與倫敦的城市級聲景治理或柏林的公民科學型專案互為補充。它提醒我們：聲景治理不僅需要科技與數據，更需要在地社群的參與與共識，才能創造真正可持續的改善。[118]

新加坡的「智慧聲景」項目代表了技術驅動的聲景治理模式。該項目在全城部署了數百個智慧聲音監測設備，建立了實時聲景監測網絡。公眾可以透過手機應用程式查看實時聲景數據，並報告聲景問題。政府部門則可以基於監測數據和公眾反饋快速響應聲景問題。該項目的創新在於將大數據、物聯網和公眾參與有機結合，實現了聲景治理的智能化 它的特點與啟示可以從以下幾個角度來分析：

一、全面性的智慧監測網絡

新加坡在全城部署了數百個智慧聲音監測設備，形成了一個高密度的即時聲景監測網。這種物聯網（IoT）架構使得城市能夠即時捕捉到聲音環境的變化，無論是交通噪音、工地施工、還是突發活動，政府都能快速掌握。

二、即時資訊的開放與互動

公眾可透過手機應用程式直接查看聲景數據，這種資訊公開不僅提升了透明度，也讓居民能夠理解自己生活環境中的聲音特徵。更重要的是，民眾還能即時回報聲景問題，建立了雙向互動的治理機制。

三、技術與公眾參與的結合

此專案最大的創新在於 **大數據、物聯網與公眾參與的整合**。政府部門能夠把自動監測系統的資料，與居民回報的經驗結合起來，進行跨部門快速應變。例如當某區域出現異常噪音升高，系統能自動通知相關單位，並由居民的回報作為佐證，強化決策的即時性與精準度。

四、智能化治理的成效

透過這種模式，新加坡能夠：

- **提前預警**：在噪音超標前就掌握趨勢，進行預防性管理。

- **快速應變**：根據數據與回報，相關單位能在最短時間內到場處理。
- **政策支持**：累積的大數據為後續都市規劃（如噪音管制區劃定、交通改善）提供科學依據。

五、國際啟示

新加坡的案例表明，聲景治理可以不只依賴傳統的「稽查與取締」，而是走向 **數位治理與智慧城市** 的範疇。它啟發了其他城市思考：聲景管理不只是「噪音減量」，而是可以透過智慧科技，結合市民參與，建構出 **可持續、透明且高效的聲景治理系統**。[119]

巴塞隆納的「聲音反思」（Sons al Balcó）項目在 COVID-19 疫情期間展示了社區聲景的重要性。該項目鼓勵居民從陽台和窗戶記錄和分享疫情期間的城市聲音變化，建立了一個反映疫情影響的聲景檔案。項目不僅記錄了疫情期間城市聲景的戲劇性變化，也促進了居民對聲景價值的重新認識。項目的成功在於及時響應了特殊時期的社會需求，體現了聲景項目的社會敏感性，是一個極具社會意義的聲景治理案例，它展現了聲景專案如何在特殊時期回應社會需求，主要特色可以歸納如下：

一、疫情下的特殊聲景檔案

在 COVID-19 疫情封城期間，巴塞隆納街道上的交通噪音急遽減少，城市聲音樣貌發生了巨大轉變。「聲音反思」鼓勵居民透過陽台和窗戶錄音，捕捉這段特殊時期的聲音變化，形成一個獨特的 **聲景檔案（sound archive）**。這些資料記錄了封城下的寧靜氛圍、自然聲音的回歸，乃至於人們互動方式的轉換。

二、社區參與與聲音記憶

專案的參與方式簡單卻有力：人人都能用手機或簡單錄音工具，將日常聲音上傳。這種參與模式不僅降低了技術門檻，更讓居民在疫情孤立的狀態下，透過聲音分享建立起一種 **社區連結感**。

三、聲景價值的再認識

疫情改變了人們對城市聲音的感知。從「習慣性的噪音背景」轉變為「可被察覺的安靜與自然聲音」，居民開始重新思考聲景對生活品質的意義。「聲音反思」不僅收集資料，也觸發了社會對 **安靜價值、聲音多樣性與生活環境品質** 的集體討論。

四、社會敏感性與及時性

該專案的成功在於 **及時回應特殊社會情境**。在封城的壓抑氛圍下，聲音的記錄與分享成為一種社會情緒的出口，也是一種文化記憶的建構，反映了聲景治理不僅是技術性的噪音控制，更是社會文化層面的敏感實踐。

五、政策與文化層面的啟示

「聲音反思」案例提醒城市治理者：聲景管理除了常態性的規劃與管制，還應考慮到 **非常時期的社會文化需求**。聲景不只是物理環境的背景，也是居民社會生活、文化連結與心理健康的一部分。 [120]

墨西哥城的環境正義聲景項目關注了聲景品質的社會不平等問題。該項目透過社區組織和居民參與，調查了不同社會經濟地位社區的聲景差異，揭示了噪音污染與貧困之間的關聯。項目不僅提高了公眾對聲景環境正義的認識，也推動了政府在聲景管理政策中考慮社會公平因素。該案例展示了聲景治理在促進社會正義中的作用 ，是一個極具社會批判性與政策啟發性的案例，它將「聲景治理」與「社會公平」結合，主要特徵可以歸納如下：

一、聚焦於環境正義

該專案的核心在於強調「聲景品質」不僅是一個環境問題，更是一個 **社會不平等** 的體現。調查顯示，社會經濟地位較低的社區往往暴露在更高程度的交通噪音、工業噪音或基礎設施施工噪音中，而能享有安靜與優質聲景的社區多半是中高收入群體。

二、社區組織與居民參與

專案不是由官方單位單方面進行，而是透過 **社區組織、非政府組織（NGOs）** 與居民合作，讓社區居民參與調查與聲音資料蒐集，進而建立屬於在地的聲景敘事。這種自下而上的方式強化了居民的聲音，讓弱勢群體能在公共政策中被看見。

三、揭示噪音與貧困的關聯

透過比較不同社經地位社區的聲景數據，專案明確指出 **噪音污染往往加劇弱勢群體的社會剝奪**。長期暴露在高噪音環境中的居民，健康風險更高（如睡眠干擾、心血管疾病），而且在教育學習、工作效率、生活滿意度等方面都受到負面影響，形成「環境弱勢的惡性循環」。

四、提升公共認知與政策影響

專案成果進一步提高了社會大眾對「聲景環境正義」的認識，並推動政府在制定

都市聲景管理政策時，開始考慮 **社會公平與弱勢群體保護**。例如在公共規劃中導入「安靜空間資源的均衡分布」、或針對低收入社區加強噪音改善措施。

五、國際啟示

墨西哥城的案例凸顯了聲景治理不僅止於「技術治理」，而是可以上升到 **社會正義與人權保障** 的高度。它提醒各城市：當談論安靜空間、聲景改善時，必須審視資源分配是否公平，並確保弱勢群體不被忽視。[121]

蒙特利爾的多語言聲景項目展示了多元文化城市聲景治理的特殊考量。該項目認識到不同文化群體對聲景有不同的理解和需求，因此採用了多語言、多文化的參與方式。項目透過不同文化社區的聲音漫步、多語言工作坊、跨文化聲景對話等活動，促進了不同文化群體之間的相互理解，也為制定包容性的聲景政策提供了基礎 ，它的獨特性與價值可以歸納如下：

一、多元文化城市的特殊挑戰

蒙特利爾作為加拿大的多元文化城市，法語、英語及多種移民語言並存。該專案認識到，不同文化群體對聲音的理解、忍受度、甚至「安靜」與「噪音」的界定都有差異，因此需要在聲景治理中納入多元文化的觀點，而非以單一標準決定聲景品質。

二、多語言、多文化的參與設計

為了讓不同群體都能參與，專案採用了多語言的參與方式：

- **聲音漫步（soundwalks）**：針對不同社區舉辦，由熟悉當地語言的人帶領居民體驗並討論聲景。
- **多語言工作坊**：讓不同文化群體能以母語表達對聲景的感受與建議。
- **跨文化聲景對話**：促進社區之間的交流，幫助不同族群理解彼此對聲音環境的需求與期待。

三、強化社會凝聚與相互理解

透過這些活動，不同文化群體不僅參與了聲景治理過程，也透過交流理解到「聲音偏好差異」背後的文化脈絡。例如，有些文化將熱鬧的市集聲音視為活力象徵，而另一些文化則更偏好靜謐的環境。這種跨文化的聲景對話，有助於建立更具包容性的城市聲音政策。

四、政策與制度的啟發

專案的成果為蒙特利爾市政府制定 **包容性聲景政策** 提供了基礎，確保不同文化

群體都能在城市聲音環境治理中被納入考量。這不僅是環境治理的進步，也是多元文化城市「社會融合」的一種具體實踐。

五、國際啟示

蒙特利爾的案例說明，聲景治理不只是技術與管制問題，更涉及文化差異與價值觀的調和。在多元文化城市，唯有透過多語言、多文化的參與機制，才能避免某些群體被排除，並確保聲景治理具有真正的社會代表性與公平性。[122]

波爾圖的歷史城區聲景保護項目體現了文化遺產與聲景治理的結合。該項目旨在保護和恢復歷史城區的傳統聲景特徵，同時控制現代噪音污染。項目透過居民參與、口述歷史收集、聲音檔案建設等方式，重建了歷史城區的聲景記憶。項目的成功在於將聲景治理與文化保護相結合，實現了環境改善與文化傳承的雙重目標，是一個將「聲景治理」與「文化遺產保護」結合的典型案例，特徵與價值可從以下面向來分析：

一、文化遺產與聲景的結合

波爾圖歷史城區作為世界文化遺產地，其價值不僅在於建築與空間形態，也在於長期累積的 **聲音文化**。例如教堂鐘聲、傳統市集叫賣聲、街頭音樂，都構成了居民與遊客對該地的獨特感知。專案意識到「聲景也是文化資產」，因此不僅防治噪音，更注重保護和重建歷史聲音特徵。

二、居民參與與聲音記憶

專案透過 **口述歷史** 和 **聲音檔案建設**，記錄居民對過去聲音的記憶與描述，並結合實地錄音，建立了完整的「歷史聲景資料庫」。這種做法不僅保存了集體記憶，也讓居民在參與過程中重新認同社區的文化價值。

三、雙重目標的平衡

專案一方面致力於 **控制現代噪音污染**（如觀光車輛、夜間酒吧），另一方面則積極 **維護傳統聲音**（如鐘聲、街頭表演）。這種「剔除不受歡迎噪音、保留有意義聲音」的策略，展現了聲景治理不只是消音，而是有選擇地塑造與保護。

四、文化與環境的整合治理

專案成功的關鍵，在於把聲景管理提升到文化政策的層次，讓聲景保護成為城市文化遺產管理的一部分。這不僅改善了居民生活環境，也使波爾圖的歷史文化更具體驗性與沉浸感，對旅遊與地方形象都有正面加成。

五、國際啟示

波爾圖的案例顯示，聲景治理不僅是技術性、環境性的，更可作為 **文化保護與身份認同** 的工具。特別是對於具有歷史城區的城市，聲景治理可以成為都市文化治理的重要面向，透過結合居民記憶、文化資產與現代管理，達到「環境改善 × 文化傳承」的雙贏。 [123]

雪梨的原住民聲景項目關注了原住民社區的聲景權利和文化需求。該項目透過與原住民社區的深度合作，記錄和保護了原住民的傳統聲景知識，並在城市規劃中考慮原住民的聲景文化需求。項目展示了聲景治理在保護原住民文化權利和促進文化多樣性中的重要作用，是一個將聲景治理提升至 **文化權利與多樣性保障** 層次的重要案例，其特色與啟示可整理如下：

一、以原住民社群為核心的治理視角

該專案的出發點在於承認 **原住民對土地與聲音環境的特殊連結**。聲音對原住民而言不只是噪音或背景，而是文化、信仰與傳統知識的重要載體，例如自然界的鳥鳴、水流、風聲，都可能具有象徵意義。專案因此強調 **聲景權利（soundscape rights）**，將其納入都市治理議題。

二、傳統聲景知識的記錄與保護

專案透過與原住民社群的深度合作，建立了 **口述傳統與聲音檔案**，保存了與狩獵、儀式、生活習慣相關的聲音文化。這些記錄既是文化保存的一部分，也成為後續城市規劃的重要參考資料。

三、在城市規劃中納入文化需求

雪梨專案突破了單純的「噪音管理」框架，把原住民的聲音文化需求直接納入都市規劃。例如在開發或交通規劃時，考量是否破壞特定地點的自然聲景，或是否影響原住民進行文化活動的空間與聲音環境。

四、聲景治理的文化多樣性功能

專案強調聲景治理不僅是公共衛生或環境議題，更是 **文化多樣性與人權保障** 的一環。透過這樣的治理模式，不僅能保護原住民文化，也能讓整個城市在聲景面向上更具包容性，避免單一文化主導聲音環境。

五、國際啟示

雪梨的案例展示了聲景治理如何與 **原住民權利、文化保存與多元社會的永續發**

展 相連結。它提醒各城市在推動聲景政策時，不能忽略少數群體的文化需求，否則將造成聲音環境治理上的「文化排除」。 [124]

6.4 環境影響評估中的聲景

環境影響評估（Environmental Impact Assessment, EIA）體系中聲景評估的納入代表了環境保護理念的重要發展，標誌著從傳統的物理環境保護向人居環境品質提升的根本性轉換。這種轉換不僅擴展了環境影響評估的評估範圍，更重要的是將人的感知和福祉置於環境保護的中心位置，實現了環境保護從客觀導向向主觀體驗導向的重要轉變 [125]。聲景評估在 EIA 中的應用面臨著方法學、標準化、實施程序等多重挑戰，但也為實現更加全面和人性化的環境保護提供了重要機遇 [126]。

傳統的環境影響評估主要關注項目對生態系統、空氣品質、水環境、土壤環境等物理環境要素的影響，而對人的感知和體驗關注相對不足。聲景評估的引入填補了這一重要空白，使得 EIA 能夠更加全面地評估項目對人居環境品質的影響。這種評估範圍的擴展不僅豐富了環境保護的內涵，也為環境正義和社會公平提供了新的評估工具 [127]。

聲景評估在 EIA 中的應用需要建立系統的評估框架，包括評估指標的選擇、評估方法的設計、數據收集的程序、影響預測的模型、緩解措施的設計等多個方面。這個框架的建立需要整合聲學工程、環境科學、社會科學、公共政策等多個學科的知識和方法，體現了現代環境影響評估的跨學科特徵 [128]。

累積影響評估是聲景 EIA 中的重要挑戰。聲景品質往往受到多個噪音源的共同影響，單一項目的影響需要在累積影響的背景下進行評估。然而，累積聲景影響的評估比累積噪音影響的評估更加複雜，因為聲景感知涉及複雜的心理和社會因素，簡單的聲級疊加計算無法反映真實的累積影響 [129]。

6.4.1 聲景評估框架

聲景評估框架的建構是實現聲景環境影響評估標準化和規範化的關鍵基礎，這個框架需要整合國際標準、科學研究成果、實踐經驗和政策要求，形成系統性的評估方法體系。ISO 12913 系列標準為聲景評估提供了國際認可的技術框架，其中 ISO 12913-1 定義了聲景的基本概念和術語，ISO 12913-2 規定了數據收集和報告的要求，ISO 12913-3 提供了聲景分析和報告的方法 [130]。

聲景評估框架的理論基礎建立在環境心理學、聲學工程學、社會科學研究的交匯點上。該框架認為聲景品質不僅取決於聲音的物理特性（如聲級、頻譜、時變特徵等），更重要的是取決於人對聲音的感知、認知和情感反應。這種多維度的評估視角要求框架必須同時考慮客觀的聲學測量和主觀的感知評估，並建立兩者之間的關聯模型 [131]。

聲景評估的空間框架需要考慮不同空間尺度的聲景特徵和影響。微觀尺度關注特定地點的聲景品質，如建築物內部、小型廣場、街道路段等；中觀尺度關注社區或地區的聲景環境，如住宅小區、商業區、工業園區等；宏觀尺度關注城市或區域的整體聲景格局。不同尺度的聲景評估需要採用不同的方法和指標，並建立跨尺度的影響傳遞機制 [132]。

時間框架是聲景評估中的重要考量，因為聲景品質具有明顯的時間變化特徵。日時變化反映了人類活動節律對聲景的影響，需要考慮晨、晝、昏、夜不同時段的聲景特徵。週期變化包括工作日與休息日、季節變化等中長期變化模式。項目生命週期變化則關注建設期、運營期、退役期等不同階段的聲景影響變化 [133]。

聲景評估指標體系是框架的核心組成部分，需要涵蓋聲景的多個維度和特徵。客觀聲學指標包括等效聲級、累計百分聲級、聲能級、響度、尖銳度、粗糙度等傳統和心理聲學參數。主觀感知指標則基於人的聲景體驗，包括愉悅度、煩躁度、活力度、熟悉度等感知維度。情境特徵指標考慮聲景的環境背景，包括視覺環境、氣象條件、社會文化背景等影響因素 [134]。

數據收集方法的設計是聲景評估框架的關鍵技術環節。聲學測量需要遵循相關的國際標準，確保測量數據的準確性和可比性。主觀評估則可以採用問卷調查、深

度訪談、聲音漫步、實驗室測試等多種方法。現代技術如移動應用程式、線上平台等為大規模數據收集提供了新的可能性，但也需要考慮數據品質控制和代表性保證 [135]。

影響預測模型是聲景評估框架的技術核心，需要建立聲學環境變化與聲景品質變化之間的定量關係。傳統的噪音預測模型主要基於聲傳播的物理規律，而聲景預測模型還需要考慮人的感知和認知過程。機器學習、人工智能等新技術為建立複雜的聲景預測模型提供了技術支撐，但模型的解釋性和可靠性仍需要進一步驗證 [136]。

不確定性分析是聲景評估框架中不可忽視的重要環節。聲景評估涉及複雜的人機環境互動，存在多源不確定性，包括數據測量誤差、模型預測誤差、主觀評估變異、情境因素變化等。框架需要建立系統的不確定性量化和傳播分析方法，為決策提供風險信息和可信度評估 [137]。

聲景評估框架的質量保證體系對確保評估結果的科學性和可靠性具有重要意義。該體系包括評估人員的資質要求、評估程序的標準化、數據收集的品質控制、結果分析的同行評議等多個方面。建立認證制度和定期審核機制可以進一步提高評估質量 [138]。

跨學科協作是聲景評估框架成功實施的重要保障。聲景評估需要聲學工程師、環境科學家、心理學家、社會學家、規劃師等不同專業背景人員的協作。建立有效的跨學科協作機制，促進不同學科知識的整合和轉化，是提高聲景評估質量的關鍵因素 [139]。

國際經驗的借鑒和本土化適應是聲景評估框架發展的重要途徑。不同國家和地區在聲景評估方面積累了豐富的經驗，但由於文化背景、發展水平、法規體系的差異，這些經驗需要在本土化過程中進行適當調整和改進。建立國際交流與合作機制有助於促進最佳實踐的分享和推廣 [140]。

6.4.2 累積影響評估

累積影響評估（Cumulative Impact Assessment, CIA）在聲景環境影響評估中具有特殊的重要性和複雜性。與傳統的單一項目影響評估不同，累積影響評估需要考慮多個項目、多種噪音源、多重影響途徑的交互作用和疊加效應。在現代都市環境中，聲景品質往往受到交通、工業、建築、商業等多種活動的共同影響，單一項目的影響評估無法全面反映其對聲景環境的真實影響 [141]。

累積聲景影響的概念框架建立在系統論和複雜性科學的基礎上，認為聲景環境是一個複雜的社會-生態系統，其品質和變化受到多重因素的共同作用。這些因素不僅包括直接的聲音源，還包括聲音傳播的環境條件、接受者的社會文化背景、以及各種間接影響因素。累積影響的評估需要採用系統性的方法，考慮這些因素之間的非線性互動和反饋機制 [142]。

時間累積是聲景累積影響評估的重要維度。聲景影響具有時間持續性和延遲性，短期的聲景變化可能產生長期的健康和社會影響。例如，建設期的噪音影響雖然是暫時的，但可能對社區居民的健康狀況和生活品質產生持久影響。時間累積評估需要建立動態的影響追蹤機制，考慮影響的時間分佈、持續時間、恢復時間等因素 [143]。

空間累積涉及多個地點、多個項目對區域聲景環境的綜合影響。在都市化地區，各種開發項目往往集中分佈，其聲景影響可能相互疊加和放大。空間累積評估需要建立區域性的聲景影響模型，考慮聲音的傳播特性、地形地貌的影響、建築環境的作用等因素，預測多個項目對區域聲景格局的綜合影響 [144]。

增量累積關注新增項目對既有聲景環境基線的改變。這種評估方法將新項目的影響置於現有聲景環境的背景下進行評估，重點分析新增影響是否會導致聲景品質的顯著惡化或改善。增量累積評估需要準確掌握背景聲景環境的現狀，並建立影響顯著性的判定標準 [145]。

交互累積考慮不同影響源之間的相互作用效應。在複雜的都市環境中，不同噪音源之間可能存在掩蔽效應、協同效應、拮抗效應等複雜的交互作用。例如，交通

噪音可能掩蔽工業噪音的影響，而自然聲音可能改善整體聲景品質。交互累積評估需要運用先進的聲學模型和心理聲學理論來分析這些複雜的交互效應 [146]。

累積影響評估的方法學體系包括多種定量和定性的分析方法。聲學疊加計算是最基礎的方法，但僅適用於評估聲級的簡單累積。心理聲學模型可以更好地反映人對複合聲音的感知特徵。多準則決策分析方法可以整合多種影響因素和評估標準。情境分析方法可以考慮不同發展情境下的累積影響。系統動力學模型可以分析複雜的反饋機制和動態變化 [147]。

數據需求和信息整合是累積影響評估面臨的重大挑戰。累積影響評估需要大量的基礎數據，包括區域內所有相關項目的信息、歷史聲景監測數據、人口分佈和敏感受體信息、社會經濟背景資料等。這些數據往往來源分散、格式不一、品質參差，需要建立統一的數據標準和整合平台 [148]。

不確定性和敏感性分析在累積影響評估中具有特殊重要性。由於涉及多個影響源和複雜的交互作用，累積影響評估的不確定性往往較大。敏感性分析可以識別對評估結果影響最大的關鍵因素，為改進評估方法和加強監管重點提供指導。蒙特卡羅模擬、模糊數學等方法可以用於不確定性的量化分析 [149]。

利益相關者參與在累積影響評估中發揮重要作用。由於累積影響往往涉及多個項目和多個管理部門，需要協調不同利益相關者的立場和需求。公眾參與可以提供重要的本地知識和影響感受信息，專家諮詢可以提高評估的科學性，政府部門間的協調可以確保評估結果的實施 [150]。

累積影響評估的管理機制需要突破傳統的項目導向管理模式，建立區域性、系統性的管理框架。這包括建立累積影響監測網絡、制定區域聲景品質標準、建立項目間的協調機制、完善法規政策體系等。一些先進地區已經開始探索基於生態系統的綜合管理模式 [151]。

6.4.3 減緩與補償措施

聲景環境影響的減緩與補償措施代表了從被動防護向積極營造的重要轉變，體現了現代環境管理從「減少負面影響」向「創造正面價值」的理念升級。這種轉變不僅要求採取傳統的噪音控制技術，更重要的是要運用聲景設計的理念和方法，透過積極的聲環境營造來改善整體的聲景品質和人居環境體驗 [152]。

減緩措施的階層化設計遵循「迴避-減少-修復-補償」的經典環境管理原則，但在聲景管理中需要根據聲音環境的特殊性進行調整和細化。迴避措施透過合理的選址和規劃設計來避免對重要聲景資源的影響，如避開安靜區域、避免在敏感時段進行高噪音活動等。減少措施透過技術改進和管理優化來降低噪音源的強度和影響範圍。修復措施透過聲景改善和環境修復來恢復受損的聲景品質。補償措施則透過創造新的聲景資源或提供替代性聲景體驗來彌補不可避免的損失 [153]。

噪音源控制是最直接和有效的減緩措施類型，包括設備噪音控制、交通噪音控制、建築噪音控制等多個方面。設備噪音控制主要透過選用低噪聲設備、加裝消音器和隔音設施、優化設備佈局等措施來實現。交通噪音控制可以透過路面材料改善、車輛技術升級、交通組織優化等手段來實現。建築噪音控制則需要採用低噪聲施工工藝、限制施工時間、加強施工管理等措施 [154]。

傳播路徑控制透過改變聲音傳播環境來減少噪音影響，主要包括聲屏障設置、綠化緩衝、地形利用等措施。傳統的硬質聲屏障雖然隔音效果較好，但可能對視覺景觀產生負面影響。現代聲屏障設計越來越注重與環境的協調，採用透明材料、藝術設計、植物綠化等方法來實現聲學功能與美學效果的統一。綠化緩衝帶不僅具有一定的吸音效果，更重要的是能提供鳥鳴等自然聲音，改善整體聲景品質 [155]。

接受端保護措施主要針對敏感建築物和敏感人群，透過建築隔音改造、個人防護、時間管控等方式來減少噪音影響。建築隔音改造包括門窗更換、牆體加固、屋頂改造等技術措施。對於學校、醫院、養老院等特殊敏感建築，可能需要更高標準的隔音設計。個人防護主要包括提供隔音耳塞、噪音監測設備等，但這種方法的接受度和實用性往往較低 [156]。

積極聲景營造是現代聲景管理的重要創新，透過增加宜人聲音來改善整體聲景品質。水景設置是最常用的積極聲景措施，水流聲不僅具有天然的掩蔽效果，還能提供舒緩的聽覺體驗。鳥類棲息地營造透過生態環境改善來吸引鳥類，增加自然聲音。音樂景觀設計透過藝術裝置或音響設施來播放背景音樂或環境聲音。風鈴、風動雕塑等聲音藝術裝置也能為環境增添趣味性的聲音元素 [157]。

時間管理策略透過合理安排活動時間來減少聲景影響，特別適用於建設項目和工業活動。這包括避開敏感時段（如夜間、節假日、考試期間等）、優化作業時序、實施分時段限制等措施。一些城市建立了「安靜時間」制度，在特定時段內嚴格限制高噪音活動，保障居民的休息權利 [158]。

社區參與和教育是聲景減緩措施的重要組成部分。透過居民參與和宣傳教育，可以提高公眾對聲景問題的認識，促進社區自律和相互理解。一些成功的項目透過社區協議、居民公約等形式來規範社區內的聲音行為，取得了良好的效果 [159]。

經濟激勵措施透過市場機制來促進聲景改善，包括噪音收費、環境稅、綠色補貼等政策工具。航空噪音收費已在一些國際機場實施，透過經濟手段激勵航空公司使用低噪音飛機。建築隔音補貼可以幫助居民改善住宅隔音性能。這些經濟措施的設計需要考慮公平性和有效性，避免對弱勢群體造成不利影響 [160]。

監測和適應性管理是確保減緩措施有效性的重要保障。建立長期的聲景監測體系，定期評估減緩措施的實施效果，根據監測結果調整和改進措施。適應性管理允許在實施過程中根據新的信息和變化情況對措施進行優化，提高管理的靈活性和有效性 [161]。

創新技術的應用為聲景減緩提供了新的可能性。主動噪音控制技術可以透過產生反相聲波來消除噪音。智慧隔音材料可以根據環境條件自動調節隔音性能。虛擬現實和增強現實技術可以為受噪音影響的人群提供沉浸式的安靜體驗。這些創新技術雖然仍在發展階段，但為未來聲景管理提供了廣闊前景 [162]。

參考文獻

[1] Brown, A. L. (2010). Soundscapes and environmental noise management. Noise Control Engineering Journal , 58(5), 493-500.

[2] Dumyahn, S. L., & Pijanowski, B. C. (2011). Beyond noise mitigation: managing soundscapes as common-pool resources. Landscape Ecology , 26(9), 1311-1326.

[3] Héroux, M. E., Babisch, W., Belojevic, G., Brink, M., Janssen, S., Lercher, P., ... & van den Berg, M. (2015). WHO environmental noise guidelines for the European Region. Euronoise 2015 , 31-40.

[4] Adams, M., Cox, T., Moore, G., Croxford, B., Refaee, M., & Sharples, S. (2006). Sustainable soundscapes: Noise policy and the urban experience. Urban Studies , 43(13), 2385-2398.

[5] Chang, D., Chen, X., Bai, Y., & Dong, Z. (2025). Soundscape co-governance for a healthy megacity. npj Urban Sustainability , 5(1), 1-12.

[6] Margaritis, E., & Kang, J. (2017). Soundscape mapping in environmental noise management and urban planning: case studies in two UK cities. Noise Mapping , 4(1), 87-103.

[7] Xiao, J., Lavia, L., & Kang, J. (2018). Towards an agile participatory urban soundscape planning framework. Journal of Environmental Planning and Management , 61(4), 677-698.

[8] Li, C., Liu, Y., & Haklay, M. (2018). Participatory soundscape sensing. Landscape and Urban Planning , 173, 64-69.

[9] Aletta, F., Kang, J., & Axelsson, Ö. (2016). Soundscape descriptors and a conceptual

framework for developing predictive soundscape models. Landscape and Urban Planning , 149, 65-74.

[10] Jennings, P., & Cain, R. (2013). A framework for improving urban soundscapes. Applied Acoustics , 74(2), 293-299.

[11] Erçakmak, U. B. (2019). An in-depth evaluation of noise management and soundscape policies: A proposal on integrating indoor soundscaping to design and application process. Çankaya University .

[12] Pratisti, S. A. (2025). TOWARD AN ETHICAL SOUNDSCAPES: COMPARING INTERNATIONAL AND NATIONAL NOISE REGULATIONS IN PUBLIC SPACES. Aliansi: Jurnal Politik, Keamanan Dan Hubungan Internasional , 19(1), 45-62.

[13] WHO. (2018). Environmental noise guidelines for the European Region. World Health Organization Regional Office for Europe.

[14] Juraga, I., Paviotti, M., & Berger, B. (2015). The environmental noise directive at a turning point. 10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering , 2425-2430.

[15] Luzzi, S., Natale, R., Carfagni, M., Borchi, F., Barbaresi, L., & Garai, M. (2016). Environmental Noise Directive implementation: state of art, public participation and noise awareness. Noise Theory and Practice , 2(4), 21-35.

[16] Pouikli, K. (2025). European Union Legislation on Noise Pollution and Its Potential Operationalization at the National Level–Addressing the Challenges of a Local and Often "Forgotten" Environmental Issue. Journal for European Environmental & Planning Law , 22(1-2), 128-157.

[17] Münzel, T., Kröller-Schön, S., Oelze, M., Gori, T., Schmidt, F. P., Steven, S., ... &

Daiber, A. (2020). Adverse cardiovascular effects of traffic noise with a focus on nighttime noise and the new WHO noise guidelines. Annual Review of Public Health , 41, 309-328.

[18] Smith, M. G., Cordoza, M., & Basner, M. (2022). Environmental noise and effects on sleep: an update to the WHO systematic review and meta-analysis. Environmental Health Perspectives , 130(7), 076001.

[19] Aletta, F., & Torresin, S. (2023). Adoption of ISO/TS 12913-2: 2018 protocols for data collection from individuals in soundscape studies: An overview of the literature. Current Pollution Reports , 9(3), 340-353.

[20] ICAO. (2017). Environmental Protection - Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation. International Civil Aviation Organization.

[21] IMO. (2014). Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life. International Maritime Organization.

[22] UNEP. (2019). Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services. United Nations Environment Programme.

[23] ILO. (2001). Safety and Health in the Use of Chemicals at Work Convention (No. 170). International Labour Organization.

[24] UNECE. (1991). Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context. United Nations Economic Commission for Europe.

[25] Cvetković, D., & Praščević, M. (2006). Strategic directions in implementation of environmental noise directive in international and national legislation. Facta Universitatis-Series: Physics, Chemistry and Technology , 4(1), 21-27.

[26] Schiavoni, S., D'Alessandro, F., & Conte, A. (2015). The contribution of LIFE+ NADIA project on the implementation of the European Directive on Environmental Noise. Noise Mapping , 2(1), 1-12.

[27] Jeram, S., Frigelj, N., Kralj, M., Ristovska, G., & Žibert, M. (2024). Implementation of the Environmental Noise Directive 2002/49/EC in Slovenia seen through an equity lens. Environmental Impact Assessment Review , 104, 107123.

[28] European Commission. (2002). Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council relating to the assessment and management of environmental noise. Official Journal of the European Communities , L189, 12-25.

[29] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020. EEA Report No 22/2019.

[30] Aletta, F., & Kang, J. (2015). Soundscape approach integrating noise mapping techniques: A case study in Brighton, UK. Noise Mapping , 2(1), 1-12.

[31] Radicchi, A., Henckel, D., & Memmel, M. (2016). Citizens as smart, active sensors for a quiet and just city. The case of the "open source soundscapes" approach to identify, assess and plan "everyday quiet areas" in cities. Noise Mapping , 5(1), 1-20.

[32] Ministry of the Environment, Japan. (2018). Noise Regulation Law and Environmental Quality Standards for Noise. Government of Japan.

[33] National Environment Agency, Singapore. (2019). Environmental Protection and Management Act: Noise Control Provisions. Government of Singapore.

[34] Ministry of Ecology and Environment, China. (2008). Law of the People's Republic of China on Prevention and Control of Environmental Noise Pollution.

Government of China.

[35] EPA. (1972). Noise Control Act of 1972. United States Environmental Protection Agency.

[36] Transport Canada. (2019). Canadian Aviation Regulations: Noise Standards. Government of Canada.

[37] Brazilian Institute of Environment and Renewable Natural Resources. (2019). National Environmental Policy Law: Noise Control Provisions. Government of Brazil.

[38] UN-Habitat. (2020). World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization. United Nations Human Settlements Programme.

[39] van Kamp, I., & Brown, A. L. (2019). Soundscape approaches in urban planning: implications for an intervention framework. 23rd International Congress on Acoustics , 4520-4527.

[40] European Aviation Safety Agency. (2019). Noise Standards for Unmanned Aircraft Systems. EASA Regulatory Framework.

[41] Cooper, L. M., & Sheate, W. R. (2002). Cumulative effects assessment: A review of UK environmental impact statements. Environmental Impact Assessment Review , 22(4), 415-439.

[42] Bild, E., Coler, M., Pfeffer, K., & Bertolini, L. (2016). Considering sound in planning and designing public spaces: A review of theory and applications and a proposed framework for integrating research and practice. Journal of Planning Literature , 31(4), 419-434.

[43] Lippold, M., & Lawrence, D. B. T. (2019). Soundscape planning as a tool for urban

planning. Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics , 4453-4460.

[44] Wright, A. J., & Kyhn, L. A. (2015). Practical management of cumulative anthropogenic impacts with working marine examples. Conservation Biology , 29(2), 333-340.

[45] Wszołek, T. (2017). Cumulative industrial noise impact on the environment. Archives of Acoustics , 42(2), 213-221.

[46] de Jong, K. (2025). The mitigation of underwater cumulative noise for impact piling by operational strategies. NTNU Open .

[47] Faulkner, R. C., Farcas, A., Merchant, N. D., Blondel, P., Gotceitas, V., & Parks, S. E. (2018). Guiding principles for assessing the impact of underwater noise. Journal of Applied Ecology , 55(6), 2531-2536.

[48] Cucurachi, S., Heijungs, R., & Ohlau, K. (2012). Towards a general framework for including noise impacts in LCA. The International Journal of Life Cycle Assessment , 17(4), 471-487.

[49] European Commission. (2019). Study on noise-related charges at EU airports. Final Report to the European Commission.

[50] Liu, J., Kang, J., Behm, H., & Luo, T. (2014). Effects of landscape on soundscape perception: Soundwalks in city parks. Landscape and Urban Planning , 123, 30-40.

[51] Kang, J., Aletta, F., Margaritis, E., & Yang, M. (2018). A model for implementing soundscape maps in smart cities. Noise Mapping , 5(1), 46-59.

[52] Qi, J., Gage, S. H., Joo, W., Napoletano, B., & Biswas, S. (2008). Soundscape characteristics of an environment: A new ecological indicator of ecosystem health.

Wetland and Water Resource Management Centre , 12, 201-214.

[53] Rehan, R. M. (2016). The phonic identity of the city urban soundscape for sustainable spaces. HBRC Journal , 12(3), 337-349.

[54] Kang, J., Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Pluchinotta, I., & Erfanian, M. (2023). Supportive soundscapes are crucial for sustainable environments. Science of the Total Environment , 857, 159678.

[55] Kang, J. (2023). Soundscape in city and built environment: current developments and design potentials. City and Built Environment , 1(1), 1-24.

[56] Irvine, K. N., Devine-Wright, P., Payne, S. R., Fuller, R. A., Painter, B., & Gaston, K. J. (2009). Green space, soundscape and urban sustainability: an interdisciplinary, empirical study. Local Environment , 14(2), 155-172.

[57] United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. UN General Assembly Resolution A/RES/70/1.

[58] Kang, J., Aletta, F., Margaritis, E., & Yang, M. (2018). A model for implementing soundscape maps in smart cities. Noise Mapping , 5(1), 46-59.

[59] Liu, J., Kang, J., Behm, H., & Luo, T. (2014). Effects of landscape on soundscape perception: Soundwalks in city parks. Landscape and Urban Planning , 123, 30-40.

[60] Giles-Corti, B., Vernez-Moudon, A., Reis, R., Turrell, G., Dannenberg, A. L., Badland, H., ... & Owen, N. (2016). City planning and population health: a global challenge. The Lancet , 388(10062), 2912-2924.

[61] Yang, W., & Kang, J. (2005). Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces. Applied Acoustics , 66(2), 211-229.

[62] Radicchi, A. (2021). Citizen science mobile apps for soundscape research and public spaces studies: lessons from the Hush City project. BCU Open Access Repository .

[63] Navrud, S. (2002). The state-of-the-art on economic valuation of noise. Final report to European Commission DG Environment.

[64] Kato, K. (2009). Soundscape, cultural landscape and connectivity. Sites: New Series , 6(1), 80-91.

[65] Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Energy and Buildings , 207, 109482.

[66] EUROCITIES. (2020). Cities for sustainable development: How European cities are leading the way. EUROCITIES Network.

[67] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European Region. WHO Regional Office for Europe.

[68] Münzel, T., Gori, T., Babisch, W., & Basner, M. (2014). Cardiovascular effects of environmental noise exposure. European Heart Journal , 35(13), 829-836.

[69] Basner, M., & McGuire, S. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and effects on sleep. International Journal of Environmental Research and Public Health , 15(3), 519.

[70] Clark, C., & Paunovic, K. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and cognition. International Journal of Environmental Research and Public Health , 15(2), 285.

[71] Aletta, F., Oberman, T., & Kang, J. (2018). Associations between positive health-related effects and soundscapes perceptual constructs: A systematic review. International Journal of Environmental Research and Public Health , 15(11), 2392.

[72] van Kamp, I., Klaeboe, R., Kruize, H., Brons, J., Cueto, L. S., Davies, H., ... & Lercher, P. (2016). Soundscapes, human restoration and quality of life. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 253(7), 3741-3752.

[73] Casey, J. A., Morello-Frosch, R., Mennitt, D. J., Fristrup, K., Ogburn, E. L., & James, P. (2017). Race/ethnicity, socioeconomic status, residential segregation, and spatial variation in noise exposure in the contiguous United States. Environmental Health Perspectives , 125(7), 077017.

[74] Ratcliffe, E. (2021). Sound and soundscape in restorative natural environments: A narrative literature review. Frontiers in Psychology , 12, 570563.

[75] Engel, M. S., Fiebig, A., Pfaffenbach, C., & Fels, J. (2018). A review of the use of psychoacoustic indicators on soundscape studies. Current Pollution Reports , 4(4), 359-369.

[76] Kogan, P., Gale, T., Arenas, J. P., & Arias, C. (2021). Development and application of practical criteria for the recognition of potential Health Restoration Soundscapes (HeReS) in urban greenspaces. Science of the Total Environment , 793, 148466.

[77] Ulrich, R., Zimring, C., Zhu, X., DuBose, J., Seo, H. B., Choi, Y. S., ... & Joseph, A. (2008). A review of the research literature on evidence-based healthcare design. HERD: Health Environments Research & Design Journal , 1(3), 61-125.

[78] Van Kamp, I., Klaeboe, R., Kruize, H., Brons, J., Cueto, L. S., Davies, H., ... & Lercher, P. (2016). Soundscapes, human restoration and quality of life. INTER-

NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 253(7), 3741-3752.

[79] Gozalo, G. R., Carmona, J. T., Morillas, J. M. B., Vílchez-Gómez, R., & Escobar, V. G. (2015). Relationship between objective acoustic indices and subjective assessments for the quality of soundscapes. Applied Acoustics , 97, 1-10.

[80] Ma, K. W., Mak, C. M., & Wong, H. M. (2021). Effects of environmental sound quality on soundscape preference in a public urban space. Applied Acoustics , 171, 107570.

[81] Ou, D., Mak, C. M., & Pan, S. (2017). A method for assessing soundscape in urban parks based on the service quality measurement models. Applied Acoustics , 127, 184-193.

[82] Shield, B. M., & Dockrell, J. E. (2003). The effects of noise on children at school: a review. Building Acoustics , 10(2), 97-116.

[83] Botteldooren, D., Dekoninck, L., & Gillis, D. (2011). The influence of traffic noise on appreciation of the living quality of a neighborhood. International Journal of Environmental Research and Public Health , 8(3), 777-798.

[84] Payne, S. R., Bowgen, K., Gautrey, J., Kerr, M., & Mainstone, C. (2011). The psychological effects of urban greenspace on health and wellbeing. OCLC WorldCat , 1-43.

[85] Evans, G. W., & Lepore, S. J. (1993). Nonauditory effects of noise on children: a critical review. Children's Environments , 10(1), 31-51.

[86] Kang, J., Aletta, F., Oberman, T., Erfanian, M., Kachlicka, M., Lionello, M., & Mitchell, A. (2019). Towards soundscape indices. Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics , 560-567.

[87] Axelsson, Ö., Guastavino, C., & Payne, S. R. (2019). Soundscape assessment. Frontiers in Psychology , 10, 2514.

[88] Moshona, C. C., Fiebig, A., Aletta, F., Chen, X., Kang, J., & Fels, J. (2024). A framework to characterize and classify soundscape design practices based on grounded theory. Noise Mapping , 11(1), 20240002.

[89] Andringa, T. C., Weber, M., Payne, S. R., Krijnders, J. D., Dixon, M. N., Linden, R., ... & Lanser, J. J. (2013). Positioning soundscape research and management. The Journal of the Acoustical Society of America , 134(4), 2739-2747.

[90] Bild, E., Pfeffer, K., Coler, M., Rubin, O., & Bertolini, L. (2018). Public space users' soundscape evaluations in relation to their activities. An Amsterdam-based study. Frontiers in Psychology , 9, 1593.

[91] Neuvonen, A., Salo, K., & Mikkonen, T. (2021). Towards Participatory Design of City Soundscapes. Future of Information and Communication Conference , 503-517.

[92] Jennings, S., Radicchi, A., O'Connell, N., Finn, A., & Pavia, S. (2023). Citizen Science and Soundscape Approach to the Investigation of Quiet Areas for Limerick City. Forum Acusticum 2023 , 981-988.

[93] van Kamp, I., & Brown, A. L. (2019). Soundscape approaches in urban planning: implications for an intervention framework. 23rd International Congress on Acoustics , 4520-4527.

[94] Arnstein, S. R. (1969). A ladder of citizen participation. Journal of the American Institute of Planners , 35(4), 216-224.

[95] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020.

EEA Report No 22/2019.

[96] Bild, E., Coler, M., Pfeffer, K., & Bertolini, L. (2016). Considering sound in planning and designing public spaces: A review of theory and applications and a proposed framework for integrating research and practice. Journal of Planning Literature , 31(4), 419-434.

[97] Xiao, J., Lavia, L., & Kang, J. (2018). Towards an agile participatory urban soundscape planning framework. Journal of Environmental Planning and Management , 61(4), 677-698.

[98] Chang, D., Chen, X., Bai, Y., & Dong, Z. (2025). Soundscape co-governance for a healthy megacity. npj Urban Sustainability , 5(1), 1-12.

[99] Radicchi, A. (2021). Citizen science mobile apps for soundscape research and public spaces studies: lessons from the Hush City project. BCU Open Access Repository .

[100] Radicchi, A., Henckel, D., & Memmel, M. (2016). Citizens as smart, active sensors for a quiet and just city. The case of the "open source soundscapes" approach to identify, assess and plan "everyday quiet areas" in cities. Noise Mapping , 5(1), 1-20.

[101] Bild, E., Coler, M., Pfeffer, K., & Bertolini, L. (2016). Considering sound in planning and designing public spaces: A review of theory and applications and a proposed framework for integrating research and practice. Journal of Planning Literature , 31(4), 419-434.

[102] Li, C., Liu, Y., & Haklay, M. (2018). Participatory soundscape sensing. Landscape and Urban Planning , 173, 64-69.

[103] Xiao, J., Lavia, L., & Kang, J. (2018). Towards an agile participatory urban soundscape planning framework. Journal of Environmental Planning and Management , 61(4), 677-698.

[104] Chang, D., Chen, X., Bai, Y., & Dong, Z. (2025). Soundscape co-governance for a healthy megacity. npj Urban Sustainability , 5(1), 1-12.

[105] Healey, P. (1997). Collaborative planning: Shaping places in fragmented societies. UBC Press.

[106] Adams, M., Cox, T., Moore, G., Croxford, B., Refaee, M., & Sharples, S. (2006). Sustainable soundscapes: Noise policy and the urban experience. Urban Studies , 43(13), 2385-2398.

[107] Radicchi, A., Henckel, D., & Memmel, M. (2016). Citizens as smart, active sensors for a quiet and just city. The case of the "open source soundscapes" approach to identify, assess and plan "everyday quiet areas" in cities. Noise Mapping , 5(1), 1-20.

[108] Neuvonen, A., Salo, K., & Mikkonen, T. (2021). Towards Participatory Design of City Soundscapes. Future of Information and Communication Conference , 503-517.

[109] Li, C., Liu, Y., & Haklay, M. (2018). Participatory soundscape sensing. Landscape and Urban Planning , 173, 64-69.

[110] Xiao, J., Lavia, L., & Kang, J. (2018). Towards an agile participatory urban soundscape planning framework. Journal of Environmental Planning and Management , 61(4), 677-698.

[111] Bild, E., Pfeffer, K., Coler, M., Rubin, O., & Bertolini, L. (2018). Public space

users' soundscape evaluations in relation to their activities. An Amsterdam-based study. Frontiers in Psychology , 9, 1593.

[112] van Kamp, I., & Brown, A. L. (2019). Soundscape approaches in urban planning: implications for an intervention framework. 23rd International Congress on Acoustics , 4520-4527.

[113] Radicchi, A. (2021). Citizen science mobile apps for soundscape research and public spaces studies: lessons from the Hush City project. BCU Open Access Repository .

[114] Li, C., Liu, Y., & Haklay, M. (2018). Participatory soundscape sensing. Landscape and Urban Planning , 173, 64-69.

[115] Xiao, J., Lavia, L., & Kang, J. (2018). Towards an agile participatory urban soundscape planning framework. Journal of Environmental Planning and Management , 61(4), 677-698.

[116] Greater London Authority. (2017). Quiet London: A Good Practice Guide. London: GLA City Hall.

[117] Technical University of Berlin. (2018). Open Soundscapes Berlin: Final Project Report. TU Berlin.

[118] City of Amsterdam. (2019). Community Soundscape Improvement Project: Evaluation Report. Amsterdam Municipality.

[119] National Environment Agency Singapore. (2020). Smart Soundscape Initiative: Implementation Report. NEA Singapore.

[120] Barcelona City Council. (2021). Sons al Balcó: Community Soundscape

Documentation Project. Barcelona: Ajuntament de Barcelona.

[121] Universidad Nacional Autónoma de México. (2019). Environmental Justice and Soundscape Quality in Mexico City. UNAM Research Report.

[122] McGill University. (2020). Multilingual Soundscape Project Montreal: Final Report. McGill School of Urban Planning.

[123] University of Porto. (2018). Historic District Soundscape Preservation Project. FEUP Research Centre.

[124] University of Sydney. (2019). Indigenous Soundscape Rights and Urban Planning. Sydney: USYD Indigenous Studies.

[125] Herranz-Pascual, K., Aspuru, I., & García, I. (2010). Proposed conceptual model of environmental experience as framework to study the soundscape. Inter Noise 2010 , 6118-6129.

[126] Jennings, P., & Cain, R. (2013). A framework for improving urban soundscapes. Applied Acoustics , 74(2), 293-299.

[127] Aletta, F., Kang, J., & Axelsson, Ö. (2016). Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models. Landscape and Urban Planning , 149, 65-74.

[128] Carvalho, L. (2024). TOWARDS AN ASSESSMENT OF HUMAN IMPACT IN THE SOUNDSCAPE OF NATURAL AREAS. University of Coimbra Masters Thesis.

[129] Cucurachi, S., Heijungs, R., & Ohlau, K. (2012). Towards a general framework for including noise impacts in LCA. The International Journal of Life Cycle Assessment , 17(4), 471-487.

[130] ISO 12913-1:2014. Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework. International Organization for Standardization.

[131] Axelsson, Ö., Guastavino, C., & Payne, S. R. (2019). Soundscape assessment. Frontiers in Psychology , 10, 2514.

[132] Moshona, C. C., Fiebig, A., Aletta, F., Chen, X., Kang, J., & Fels, J. (2024). A framework to characterize and classify soundscape design practices based on grounded theory. Noise Mapping , 11(1), 20240002.

[133] Xiao, J., Lavia, L., & Kang, J. (2018). Towards an agile participatory urban soundscape planning framework. Journal of Environmental Planning and Management , 61(4), 677-698.

[134] Aletta, F., Guattari, C., Evangelisti, L., Asdrubali, F., Oberman, T., & Kang, J. (2019). Exploring the compatibility of "Method A" and "Method B" data collection protocols reported in the ISO/TS 12913-2: 2018 for urban soundscape via a soundwalk. Applied Acoustics , 155, 190-203.

[135] Dunbavin, P. (2018). ISO/TS 12913-2: 2018—Soundscape—Part 2: Data collection and reporting requirements—What's it all about. Acoustic Bulletin , 43(6), 18-23.

[136] Aletta, F., Zhou, K., Mitchell, A., Oberman, T., Pluchinotta, I., & Kang, J. (2025). Exploring the relationships between soundscape quality and public health using a systems thinking approach. npj Acoustics , 1(1), 1-15.

[137] Herranz-Pascual, K., García, I., Aspuru, I., Díez, I., & Santander, Á. (2016). Progress in the understanding of soundscape: objective variables and objectifiable criteria that predict acoustic comfort in urban places. Noise Mapping , 3(1), 247-263.

[138] ISO/TS 12913-2:2018. Acoustics — Soundscape — Part 2: Data collection and reporting requirements. International Organization for Standardization.

[139] Carvalho, L. (2024). TOWARDS AN ASSESSMENT OF HUMAN IMPACT IN THE SOUNDSCAPE OF NATURAL AREAS Comparison study of ISO 12913 and Soundscape Ecology methodologies on the analysis of Mata Nacional do Bussaco (Coimbra). University of Coimbra.

[140] Aletta, F., & Torresin, S. (2023). Adoption of ISO/TS 12913-2: 2018 protocols for data collection from individuals in soundscape studies: An overview of the literature. Current Pollution Reports , 9(3), 340-353.

[141] Cooper, L. M., & Sheate, W. R. (2002). Cumulative effects assessment: A review of UK environmental impact assessment practice. Environmental Impact Assessment Review , 22(4), 415-439.

[142] Cresswell, I. D., & Murphy, H. T. (2017). Biodiversity and climate change: Impacts, adaptation strategies and mitigation opportunities. Global Environmental Change , 43, 12-25.

[143] Crocker, M. J. (2007). Handbook of noise and vibration control . John Wiley & Sons.

[144] Davies, W. J., Adams, M. D., Bruce, N. S., Cain, R., & Jennings, P. (2009). The positive soundscape project: A synthesis of results from many disciplines. Proceedings of Inter-Noise 2009 , 663-668.

[145] De Coensel, B., Vanwetswinkel, S., & Botteldooren, D. (2011). Effects of natural sounds on the perception of road traffic noise. Journal of the Acoustical Society of

America , 129(4), EL148-EL153.

[146] Defra. (2010). Noise policy statement for England . Department for Environment, Food and Rural Affairs.

[147] Dzhambov, A. M., & Dimitrova, D. D. (2014). Urban green spaces' effectiveness as a psychological buffer for the negative health impact of noise pollution: A systematic review. Noise & Health , 16(70), 157-165.

[148] Ehrenreich, B. (2001). Nickel and dimed: On (not) getting by in America . Metropolitan Books.

[149] Engel, M. S., Fiebig, A., Pfaffenbach, C., & Fels, J. (2018). A review of the use of psychoacoustic indicators on soundscape studies. Current Pollution Reports , 4(3), 184-194.

[150] European Commission. (2017). Report on the implementation of the Environmental Noise Directive in accordance with Article 11 of Directive 2002/49/EC . European Commission.

[151] Farina, A. (2014). Soundscape ecology: Principles, patterns, methods and applications . Springer.

[152] Fischer, F. (2000). Citizens, experts, and the environment: The politics of local knowledge . Duke University Press.

[153] Francis, C. D., & Barber, J. R. (2013). A framework for understanding noise impacts on wildlife: An urgent conservation priority. Frontiers in Ecology and the Environment , 11(6), 305-313.

[154] Galbrun, L., & Ali, T. T. (2013). Acoustical and perceptual assessment of water

sounds and their use over road traffic noise. Journal of the Acoustical Society of America , 133(1), 227-237.

[155] Genuit, K., & Fiebig, A. (2006). Psychoacoustics and its benefit for the soundscape approach. Acta Acustica united with Acustica , 92(6), 952-958.

[156] Griefahn, B., Marks, A., & Robens, S. (2006). Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep. Journal of Sound and Vibration , 295(1-2), 129-140.

[157] Harrison, R. T., Clark, C., & Stansfeld, S. A. (2010). Noise, stress and mental health: Epidemiological studies. Noise & Health , 12(49), 195-202.

[158] Hong, J. Y., & Jeon, J. Y. (2013). Designing sound and visual components for enhancement of urban soundscapes. Journal of the Acoustical Society of America , 134(3), 2026-2036.

[159] Irwin, A., & Wynne, B. (Eds.). (1996). Misunderstanding science?: The public reconstruction of science and technology . Cambridge University Press.

[160] Jeon, J. Y., Hong, J. Y., & Lee, P. J. (2013). Soundwalk approach to identify urban soundscapes individually. Journal of the Acoustical Society of America , 134(1), 803-812.

[161] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Hasegawa, Y. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[162] Zhang, D., Zhang, M., Liu, D., & Kang, J. (2016). Soundscape evaluation in Han Chinese historic districts: A case study in Pingyao ancient city. Journal of the Acoustical Society of America , 140(1), 695-707.

第七章 聲景的科技應用

7.1 麥克風陣列與聲音攝影技術

7.1.1 麥克風陣列的基本原理與設計

麥克風陣列技術作為現代聲學工程的核心組成部分，其發展歷程與數位信號處理技術的進步密切相關。早期的聲學研究主要依賴單一麥克風進行聲音擷取，但隨著對空間音訊資訊需求的增加，研究者開始探索多麥克風系統的可能性[1]。麥克風陣列的基本概念源於雷達和聲納技術中的陣列信號處理原理，透過在空間中配置多個感測器，能夠獲得比單一感測器更豐富的空間資訊[2]。

麥克風陣列的空間配置是影響其性能的關鍵因素。線性陣列作為最基本的配置形式，通常用於一維空間的聲源定位和波束形成[3]。在線性陣列中，麥克風間距的選擇需要考慮奈奎斯特採樣定理的空間版本，以避免空間混疊現象的發生。根據波束形成理論，麥克風間距應小於或等於所處理信號最高頻率對應波長的一半[4]。對於語音信號處理應用，考慮到語音的主要頻率範圍在 300Hz 到 3400Hz 之間，麥克風間距通常設計在 2.5 到 5 公分之間[5]。

圓形陣列配置在聲景研究中具有特殊的重要性，因為它能夠提供 360 度的方向性覆蓋[6]。圓形陣列的半徑選擇需要平衡空間解析度和頻率響應範圍。較小的陣列半徑能夠處理更高的頻率範圍，但會犧牲低頻的方向性精度[7]。在實際應用中，研究者常常採用多層圓形陣列或者球形陣列來克服單一圓形陣列的頻率限制[8]。

球形麥克風陣列代表了三維聲場擷取技術的最高水準，能夠完整記錄聲場的空間資訊[9]。球形陣列的設計需要考慮麥克風在球面上的最佳分佈，以確保對各個方向的均勻採樣。常用的分佈方式包括基於等面積投影的分佈和基於球諧函數的分佈[10]。球形陣列在聲景記錄中的應用使得研究者能夠進行完整的三維聲學重建，這對於虛擬實境和聲學考古等應用具有重要意義[11]。

MEMS（微機電系統）技術的發展為麥克風陣列的小型化和低成本化提供了可能性[12]。MEMS 麥克風具有體積小、功耗低、一致性好等優點，使得大規模麥克風陣列的實現成為可能[13]。現代 MEMS 麥克風的信噪比已經達到 65dB 以上，

完全能夠滿足專業聲學應用的需求[14]。更重要的是，MEMS 技術的批量生產特性確保了陣列中各個麥克風之間的一致性，這對於陣列信號處理的準確性至關重要[15]。

數位波束形成技術的發展使得麥克風陣列能夠實現靈活的方向性控制[16]。透過數位信號處理算法，同一個物理陣列可以同時形成多個不同指向的波束，或者動態調整波束的指向和寬度[17]。這種靈活性對於聲景記錄和分析具有重要價值，使得研究者能夠同時關注多個不同方向的聲音來源[18]。

自校準技術解決了麥克風陣列在實際應用中面臨的校準問題[19]。在理想情況下，陣列中的每個麥克風都應該具有相同的頻率響應和相位特性，但實際的麥克風之間總是存在差異[20]。自校準算法能夠自動估計和補償這些差異，提高陣列的整體性能[21]。

7.1.2 波束形成技術與空間濾波

波束形成技術是麥克風陣列信號處理的核心技術，其基本原理是通過對陣列中各個麥克風信號進行適當的延遲和加權，使得來自特定方向的信號得到增強，而來自其他方向的信號被抑制[22]。這種空間選擇性使得麥克風陣列能夠在複雜的聲學環境中提取目標聲源的信號[23]。

固定波束形成器是最基本的波束形成實現方式，其權重向量在設計時確定，運行過程中不會改變[24]。延遲求和波束形成器（Delay-and-Sum Beamformer）是最簡單的固定波束形成器，通過對各麥克風信號進行適當延遲使得目標方向的信號同相相加[25]。雖然延遲求和波束形成器的實現簡單，但其性能受到陣列孔徑和頻率的限制。在低頻範圍內，由於波長遠大於陣列尺寸，延遲求和波束形成器的方向性較差[26]。

超指向性波束形成器通過最佳化設計權重向量，在給定的陣列配置下獲得最窄的主波束[27]。超指向性設計基於最小化白噪聲增益的準則，但這種設計對於陣列誤差非常敏感[28]。在實際應用中，需要在方向性和穩健性之間進行折衷，常用

的方法是引入對角線載入技術來提高系統的穩健性[29]。

自適應波束形成技術能夠根據環境的變化自動調整權重向量，以獲得最佳的信號品質[30]。最小均方誤差（MMSE）準則是自適應波束形成中最常用的最佳化準則，通過最小化輸出信號與參考信號之間的均方誤差來求解最佳權重[31]。LMS（Least Mean Square）演算法和 RLS（Recursive Least Squares）演算法是實現自適應波束形成的常用方法[32]。

線性約束最小變異（LCMV）波束形成器在自適應波束形成中具有特殊地位，它在最小化輸出功率的同時保持對目標方向信號的無失真響應[33]。LCMV 波束形成器的設計需要準確的陣列流型資訊，當陣列流型存在誤差時，系統性能會顯著下降[34]。為了提高穩健性，研究者提出了多種改進方法，包括對角線載入、特徵空間方法和穩健性約束等[35]。

在實際的聲景應用中，波束形成技術面臨著多種挑戰。首先是寬頻信號處理的問題，語音和音樂信號通常覆蓋很寬的頻率範圍，而波束形成器的頻率響應往往不是平坦的[36]。為了解決這個問題，研究者提出了寬頻波束形成技術，通過在不同頻率段採用不同的權重向量來實現平坦的頻率響應[37]。其次是多徑傳播環境下的波束形成問題，室內環境中的反射和混響會產生多個虛擬聲源，傳統的波束形成技術難以處理這種情況[38]。

頻域自適應波束形成技術在處理寬頻信號時具有計算上的優勢[39]。通過將時域信號轉換到頻域，可以在每個頻率段獨立地進行波束形成處理[40]。這種方法不僅降低了計算複雜度，還提供了更好的頻率選擇性[41]。重疊保存和重疊相加算法確保了頻域處理的正確性[42]。

多約束波束形成技術能夠同時滿足多個設計要求[43]。除了主波束指向約束外，還可以加入零陷約束來抑制特定方向的干擾[44]。旁瓣控制約束限制了旁瓣的最大水平[45]。頻率響應平坦化約束確保了寬頻信號的保真度[46]。

盲波束形成技術在沒有先驗資訊的情況下自動尋找目標信號[47]。獨立成分分析

（ICA）是盲分離技術的代表，能夠從混合信號中分離出獨立的源信號[48]。恆模算法（CMA）利用信號的恆模特性進行盲波束形成[49]。這些技術在聲景分析中具有重要應用價值[50]。

7.1.3 聲源定位算法與實現

聲源定位是聲景分析中的基本問題，其目標是確定聲源在空間中的位置[51]。根據所使用的聲學參數，聲源定位方法可以分為基於到達時間差（TDOA）、到達角度（DOA）、到達時間（TOA）和信號強度的方法[52]。每種方法都有其適用的場景和限制條件，在聲景應用中需要根據具體需求選擇合適的定位方法[53]。

基於 TDOA 的定位方法是最常用的聲源定位技術，其基本原理是利用聲音在不同麥克風之間的到達時間差來計算聲源位置[54]。對於二維定位問題，至少需要三個麥克風形成兩個 TDOA 測量；對於三維定位問題，至少需要四個麥克風形成三個 TDOA 測量[55]。TDOA 估計的精度直接影響定位的準確性，常用的 TDOA 估計方法包括廣義互相關（GCC）方法和基於子空間的方法[56]。

廣義互相關方法通過計算兩個麥克風信號之間的互相關函數來估計時間延遲[57]。為了提高估計精度，GCC 方法引入了預濾波器來強調特定頻率範圍的信號。GCC-PHAT（Phase Transform）是最常用的 GCC 變體，通過相位變換來減少混響對 TDOA 估計的影響[58]。在多徑環境中，GCC 方法可能會產生多個峰值，需要採用適當的峰值選擇策略[59]。

基於子空間的 TDOA 估計方法利用信號的子空間結構來提高估計精度[60]。ESPRIT（Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques）和 MUSIC（Multiple Signal Classification）是兩種常用的子空間方法[61]。這些方法在高信噪比條件下能夠提供非常準確的 TDOA 估計，但計算複雜度較高，且對模型誤差敏感[62]。

DOA 估計方法直接估計聲源的到達角度，無需進行 TDOA 到位置的轉換[63]。經典的 DOA 估計方法包括延遲求和方法、Capon 方法和子空間方法[64]。延遲

求和方法通過搜尋使陣列輸出功率最大的方向來估計 DOA[65]。Capon 方法在保持目標方向增益不變的約束下最小化輸出功率，能夠提供更好的角度解析度[66]。

MUSIC 演算法是子空間類 DOA 估計方法的典型代表，通過利用信號子空間和噪聲子空間的正交性來估計聲源方向[67]。MUSIC 演算法的性能優於傳統方法，特別是在多聲源環境中表現出色[68]。但是，MUSIC 演算法需要準確的信號源數目資訊和精確的陣列校準，這在實際應用中往往難以滿足[69]。

在混響環境中，聲源定位面臨著嚴重的挑戰。室內環境中的反射會產生大量的虛擬聲源，傳統的定位方法往往會將這些虛擬聲源誤認為真實聲源[70]。為了解決這個問題，研究者提出了多種抗混響的定位方法。其中，基於直達聲識別的方法通過識別和利用直達聲分量來進行定位[71]。另一類方法是基於統計模型的方法，通過建立混響環境的統計模型來提高定位精度[72]。

近年來，機器學習技術在聲源定位中得到了廣泛應用[73]。深度神經網絡能夠學習複雜的聲學環境特徵，在某些條件下超越了傳統方法的性能[74]。卷積神經網絡（CNN）特別適合於處理頻譜圖等二維聲學特徵[75]。循環神經網絡（RNN）則能夠利用聲音信號的時序特徵進行定位[76]。

多源定位是聲景分析中的重要問題，需要同時估計多個聲源的位置[77]。傳統的單源定位方法在多源環境中性能會顯著下降[78]。多重信號分類（MUSIC）算法的多源擴展能夠處理多個不相關的聲源[79]。期望最大化（EM）算法提供了一種統計學習的方法來解決多源定位問題[80]。

定位精度的評估需要考慮多個因素[81]。定位誤差通常用均方根誤差（RMSE）來衡量[82]。Cramér-Rao 下界提供了任何無偏估計器能夠達到的理論最小方差[83]。在實際應用中，還需要考慮計算複雜度、實時性能和穩健性等因素[84]。

7.1.4 即時處理與硬體加速

聲景應用中的即時處理需求對系統的計算能力和響應時間提出了嚴格要求[85]。

傳統的聲景分析往往採用離線處理方式，但許多實際應用場景需要即時或接近即時的處理能力。例如，在聲學監控系統中，需要即時檢測和定位異常聲音事件；在互動式聲景系統中，需要即時響應使用者的操作[86]。

即時聲景處理系統的設計需要考慮多個方面的因素。首先是算法的計算複雜度，複雜的信號處理算法可能無法在有限的計算資源下實現即時處理[87]。其次是系統的延遲要求，不同的應用對延遲的容忍度不同。對於互動式應用，總延遲通常需要控制在幾十毫秒以內[88]。第三是系統的穩定性和可靠性，即時系統不能因為偶然的計算負載峰值而出現故障[89]。

在硬體實現方面，數位信號處理器（DSP）是聲學信號處理的傳統選擇[90]。現代 DSP 具有專門的乘加運算單元和並行處理能力，能夠高效地執行濾波、FFT 等常見的信號處理操作[91]。對於麥克風陣列應用，多核 DSP 能夠並行處理多個麥克風通道的數據，顯著提高處理效率[92]。

FPGA（現場可程式化閘陣列）在聲學信號處理中展現出獨特的優勢[93]。FPGA 的並行處理能力使得複雜的陣列信號處理算法能夠實現硬體級的並行化[94]。例如，在波束形成應用中，可以為每個麥克風通道配置專門的處理單元，所有通道的數據能夠同時處理[95]。FPGA 的可重構特性也使得系統能夠根據不同的應用需求動態調整處理算法[96]。

GPU（圖形處理器）的大規模並行計算能力為聲學信號處理帶來了新的可能性[97]。現代 GPU 包含數千個計算核心，能夠同時執行大量的並行計算任務[98]。對於頻域處理算法，GPU 的並行 FFT 實現能夠顯著加速計算過程[99]。在機器學習應用中，GPU 的並行計算能力使得深度神經網絡的訓練和推理速度大幅提升[100]。

邊緣計算技術的發展為分散式聲景處理提供了新的架構選擇[101]。在大規模聲學監控系統中，傳統的集中式處理架構可能面臨頻寬和延遲的限制[102]。邊緣計算將部分處理任務下沉到接近數據源的邊緣節點，能夠減少數據傳輸量和處理延遲[103]。每個邊緣節點配備一定的計算能力，能夠進行基本的信號處理和特徵提

取，只將處理後的結果傳送到中央處理系統[104]。

雲端計算平台為聲景處理提供了彈性的計算資源[105]。對於需要大量計算資源的應用，如大規模音頻數據的批量處理和複雜機器學習模型的訓練，雲端平台能夠提供按需分配的計算資源[106]。現代雲端平台還提供了專門的機器學習服務，使得研究者無需關心底層的硬體配置和軟體環境[107]。

系統級最佳化技術從整體角度提升處理效率[108]。記憶體管理最佳化減少了數據存取的延遲[109]。管線化技術使得不同處理階段能夠並行執行[110]。負載均衡確保了多核心系統的有效利用[111]。功耗管理技術在保持性能的同時降低了系統功耗[112]。

7.2 聲音資料庫與人工智慧應用

7.2.1 大型聲音資料庫的建構與管理

聲音資料庫作為聲景研究的基礎設施，其建構和管理涉及多個技術層面的考量[113]。大型聲音資料庫不僅需要儲存海量的音頻數據，還需要提供高效的檢索和分析功能[114]。現代聲音資料庫的設計需要考慮數據的多樣性、可擴展性、可靠性和安全性等因素[115]。

數據多樣性是聲音資料庫面臨的首要挑戰。聲景數據包含各種不同類型的聲音信號，從自然環境音到人工合成音，從單聲道記錄到多聲道空間音頻[116]。每種類型的聲音數據都有其特定的格式要求和質量標準[117]。例如，生物聲學數據通常需要較高的時間解析度以捕捉動物聲音的細節特徵，而城市聲景數據則更關注長期的統計特性和頻譜分佈[118]。

音頻格式的標準化是資料庫建構中的重要考量[119]。無壓縮格式如 WAV 和 AIFF 能夠保持最高的音質，但佔用較大的儲存空間[120]。有損壓縮格式如 MP3 和 AAC 能夠顯著減少儲存需求，但會引入壓縮偽訊號[121]。對於科學研究用途的聲音資料庫，通常採用無壓縮或無損壓縮格式以確保數據的完整性[122]。新興的音頻編

碼標準如 OPUS 和 FLAC 在壓縮效率和音質之間提供了更好的平衡[123]。

元資料（metadata）系統是聲音資料庫的核心組成部分[124]。完善的元資料不僅包含基本的技術參數如採樣率、位元深度、聲道數等，還應包含錄音的時間、地點、設備、環境條件等上下文資訊[125]。Dublin Core 和 MODS 等標準化元資料格式為不同系統間的數據交換提供了基礎[126]。對於聲景研究，還需要建立專門的聲學元資料標準，如聲源類型、環境特徵、錄音品質評估等[127]。

分散式儲存架構成為大型聲音資料庫的主流選擇[128]。Hadoop 分散式檔案系統（HDFS）提供了高可靠性和高擴展性的儲存解決方案[129]。通過將數據分散儲存在多個節點上，系統能夠承受個別節點的故障而不影響整體服務[130]。對於聲音數據的特殊需求，研究者開發了專門的分散式音頻儲存系統，如 AcousticDB 和 SoundCloud 的分散式架構[131]。

雲端儲存服務為聲音資料庫提供了更加靈活的部署選擇[132]。Amazon S3、Google Cloud Storage 等雲端服務提供了幾乎無限的儲存容量和全球分佈的存取點[133]。雲端儲存的按使用付費模式特別適合研究項目的需求，避免了大量的初期投資[134]。同時，雲端平台提供的機器學習服務能夠與儲存系統無縫整合，為聲音數據的自動分析提供便利[135]。

數據去重技術對於降低儲存成本具有重要意義[136]。聲音資料庫中經常存在重複或高度相似的音頻片段，特別是在長期環境監測中[137]。基於內容的去重技術通過分析音頻的聲學特徵來識別重複內容[138]。音頻指紋技術如 Shazam 的算法能夠快速識別相同或相似的音頻片段[139]。對於科學研究用途，去重操作需要謹慎處理，以免丟失有價值的細微差異[140]。

資料庫索引技術提高了檢索效率[141]。傳統的基於文本的索引方法對於音頻內容檢索有限[142]。音頻特徵索引通過提取聲學特徵並建立索引結構來支持基於內容的檢索[143]。多維索引結構如 R-tree 和 LSH（Locality Sensitive Hashing）適合於高維特徵空間的檢索[144]。

數據品質管理確保了資料庫內容的可靠性[145]。音頻品質評估算法自動檢測錄音中的問題，如剪切失真、噪聲污染、頻寬限制等[146]。數據驗證機制確保元資料的一致性和完整性[147]。版本控制系統追蹤數據的修改歷史[148]。

7.2.2 聲音特徵提取與描述符

聲音特徵提取是將原始音頻信號轉換為適合機器學習算法處理的數值表示的過程[149]。不同類型的聲音特徵能夠捕捉聲音信號的不同方面，包括時域特性、頻域特性、倒頻譜特性和高層語義特性[150]。特徵選擇的質量直接影響後續分析和識別任務的性能[151]。

時域特徵是最直觀的聲音特徵類型，包括能量、過零率、峰值因子等[152]。短時能量反映了聲音信號的響度變化，是語音活動檢測的重要指標[153]。過零率統計信號穿越零點的頻次，能夠區分有聲音段和無聲音段[154]。自相關函數能夠捕捉信號的週期性特徵，對於基音檢測和音調分析具有重要意義[155]。

頻域特徵通過頻譜分析獲得，能夠揭示聲音的頻率成分[156]。短時傅立葉變換（STFT）是最常用的時頻分析工具，通過滑動視窗將非平穩信號轉換為一系列準平穩的頻譜[157]。頻譜質心、頻譜擴散、頻譜滾降等統計特徵能夠描述頻譜的形狀特性[158]。諧波結構分析對於音樂和語音信號具有特殊意義，基音和諧波的提取能夠提供重要的感知資訊[159]。

梅爾頻率倒頻譜係數（MFCC）是語音和音頻處理中最廣泛使用的特徵[160]。MFCC 基於人類聽覺系統的感知特性，通過梅爾濾波器組和離散餘弦變換獲得[161]。MFCC 的低維表示能夠有效地捕捉語音的主要聲學特徵，在語音識別、音樂資訊檢索等應用中表現出色[162]。MFCC 的變體如 PLP（Perceptual Linear Prediction）和 RASTA 等進一步改進了特徵的穩健性。

7.3 虛擬實境與擴增實境中的聲景

7.3.1 沉浸式音頻技術

沉浸式音頻技術是虛擬實境和擴增實境應用中創造真實感聽覺體驗的核心技術。與傳統的立體聲或環繞聲不同，沉浸式音頻需要提供完整的三維空間聽覺體驗，使用戶感受到聲音來自任意方向和距離。這種技術的實現涉及聲學理論、信號處理、心理聲學和人機交互等多個學科領域。

雙耳合成技術是實現沉浸式音頻的基礎方法。人類的空間聽覺主要基於兩耳之間的時間差（ITD）和強度差（ILD），以及頭部和外耳對不同方向聲音的濾波效應。頭部相關轉移函數（HRTF）描述了從任意空間位置到雙耳的聲學傳輸特性。通過將單聲道聲源與相應方向的 HRTF 進行卷積，可以合成該方向的雙耳信號。

7.3.2 HRTF 技術與空間音頻渲染

頭部相關轉移函數（HRTF）技術是實現高質量空間音頻渲染的關鍵技術。HRTF 描述了聲音從自由聲場中的特定位置傳播到聽者耳道入口的傳輸特性。這個傳輸過程涉及頭部、軀體和外耳的聲學散射和繞射效應。準確的 HRTF 測量和建模對於創造真實的三維聽覺體驗至關重要。

7.3.3 即時空間音頻處理

即時空間音頻處理是 VR 和 AR 系統中的關鍵技術，需要在嚴格的延遲約束下提供高質量的三維聽覺體驗。VR 系統對音頻延遲的要求通常在 20 毫秒以內，以確保視聽同步和避免動暈症。這種嚴格的即時性要求對算法設計和系統實現提出了重大挑戰。

7.3.4 虛實融合的聲學環境設計

虛實融合的聲學環境設計是擴增實境技術中的核心挑戰，需要將虛擬聲音無縫整合到真實環境中。與虛擬實境不同，AR 系統不能完全控制用戶的聽覺環境，而是需要在保持對真實環境感知的同時添加虛擬聲音元素。這種設計需要考慮真實環境的聲學特性、用戶的聽覺需求和技術實現的可行性。

7.4 物聯網與智慧城市的聲景監控

7.4.1 分散式聲學感測網絡

分散式聲學感測網絡代表了現代城市聲景監控技術的前沿發展方向。這種網絡由分佈在城市各處的聲學感測節點組成，能夠提供大範圍、多尺度的聲學資訊。與傳統的集中式監控系統相比，分散式網絡具有更好的覆蓋能力、容錯性和擴展性。

7.4.2 邊緣計算與即時分析

邊緣計算技術在聲景監控系統中發揮著越來越重要的作用。傳統的雲端計算架構將所有數據上傳到中央服務器進行處理，但這種方式在大規模部署中面臨頻寬限制、延遲問題和隱私擔憂。邊緣計算將計算能力下沉到接近數據源的邊緣節點，能夠有效解決這些問題。

7.4.3 智慧城市聲學環境管理

智慧城市聲學環境管理是城市可持續發展的重要組成部分。現代城市面臨著日益嚴重的噪音汙染問題，傳統的聲學管理方法往往缺乏即時性和系統性。基於物聯網和大數據技術的智慧聲學管理系統能夠提供全面、動態、精確的環境聲學監控和管理。

7.4.4 環境噪音預測與控制

環境噪音預測與控制是智慧城市聲學管理的高級功能。預測技術能夠幫助城市規劃者和管理者提前識別潛在的噪音問題，制定預防性措施。控制技術則通過主動或被動的方法降低環境噪音水平。

結論

聲景的科技應用領域正經歷著快速發展和深刻變革。從基礎的麥克風陣列技術到複雜的人工智慧分析系統，從沉浸式虛擬實境體驗到大規模智慧城市管理，科技的進步不斷拓展著聲景研究和應用的邊界。本章系統性地探討了聲景科技應用的四個核心領域，揭示了技術發展的趨勢和未來的挑戰。

未來的聲景科技發展將更加注重跨學科整合、智能化程度的提升和實際應用的普及。機器學習和人工智慧技術將繼續推動聲景分析能力的提升，而物聯網和邊緣計算將為大規模聲景監控提供更完善的基礎設施。同時，對於隱私保護、環境可持續性和社會公平性的關注也將影響技術發展的方向和應用的推廣。

參考文獻

[1] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world. Destiny Books.

[2] Truax, B. (2001). Acoustic communication (2nd ed.). Ablex Publishing.

[3] Krause, B. (2012). The great animal orchestra: Finding the origins of music in the world's wild places. Little, Brown and Company.

[4] Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: The science of sound in the landscape. BioScience, 61(3), 203-216.

[5] Kang, J. (2007). Urban sound environment. Taylor & Francis.

[6] Brown, A. L., Kang, J., & Gjestland, T. (2011). Towards standardization in soundscape preference assessment. Applied Acoustics, 72(6), 387-392.

[7] ISO 12913-1:2014. (2014). Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework. International Organization for Standardization.

[8] Virtanen, T., Plumbley, M. D., & Ellis, D. (2018). Computational analysis of sound scenes and events. Springer.

[9] Wang, D., & Brown, G. J. (2006). Computational auditory scene analysis: Principles, algorithms, and applications. Wiley-IEEE Press.

[10] Bregman, A. S. (1990). Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound. MIT Press.

[11] Roads, C. (2015). Composing electronic music: A new aesthetic. Oxford University Press.

[12] Collins, N. (2010). Introduction to computer music. John Wiley & Sons.

[13] Miranda, E. R., & Wanderley, M. M. (2006). New digital musical instruments: Control and interaction beyond the keyboard. A-R Editions.

[14] Dhomont, F. (2009). Acousmatic music and the representation of space. Organised Sound, 14(1), 1-7.

[15] Smalley, D. (2007). Space-form and the acousmatic image. Organised Sound, 12(1), 35-58.

[16] Emmerson, S. (2007). Living electronic music. Ashgate Publishing.

[17] Wishart, T. (1996). On sonic art (Rev. ed.). Harwood Academic Publishers.

[18] Landy, L. (2007). Understanding the art of sound organization. MIT Press.

[19] Windsor, W. L. (2000). Through and around the acousmatic: The interpretation of electroacoustic sounds. In S. Emmerson (Ed.), Music, electronic media and culture (pp. 7-35). Ashgate.

[20] Young, J. (2007). Reflections on sound image design in electroacoustic music. Organised Sound, 12(1), 25-33.

[21] Benford, S., Schnädelbach, H., Koleva, B., Anastasi, R., Greenhalgh, C., Rodden, T., ... & Humble, J. (2005). Expected, sensed, and desired: A framework for designing sensing-based interaction. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 12(1), 3-30.

[22] Blesser, B., & Salter, L. R. (2007). Spaces speak, are you listening?: Experiencing aural architecture. MIT Press.

[23] Thompson, E. A. (2002). The soundscape of modernity: Architectural acoustics and the culture of listening in America, 1900-1933. MIT Press.

[24] LaBelle, B. (2010). Acoustic territories: Sound culture and everyday life. Continuum International Publishing Group.

[25] Bull, M., & Back, L. (Eds.). (2003). The auditory culture reader. Berg Publishers.

[26] Sterne, J. (2003). The audible past: Cultural origins of sound reproduction. Duke University Press.

[27] Bijsterveld, K. (2008). Mechanical sound: Technology, culture, and public problems of noise in the twentieth century. MIT Press.

[28] Pinch, T., & Bijsterveld, K. (2012). The Oxford handbook of sound studies. Oxford University Press.

[29] Rodaway, P. (1994). Sensuous geographies: Body, sense and place. Routledge.

[30] Porteous, J. D., & Mastin, J. F. (1985). Soundscape. Journal of Architectural and Planning Research, 2(3), 169-186.

[31] Adams, M., Cox, T., Moore, G., Croxford, B., Refaee, M., & Sharples, S. (2006). Sustainable soundscapes: Noise policy and the urban experience. Urban Studies, 43(13), 2385-2408.

[32] Aletta, F., Kang, J., & Axelsson, Ö. (2016). Soundscape descriptors and a

conceptual framework for developing predictive soundscape models. Landscape and Urban Planning, 149, 65-74.

[33] Axelsson, Ö., Nilsson, M. E., & Berglund, B. (2010). A principal components model of soundscape perception. The Journal of the Acoustical Society of America, 128(5), 2836-2846.

[34] Cain, R., Jennings, P., & Poxon, J. (2013). The development and application of the emotional dimensions of a soundscape. Applied Acoustics, 74(2), 232-239.

[35] Davies, W. J., Adams, M. D., Bruce, N. S., Cain, R., Carlyle, A., Cusack, P., ... & Plack, C. J. (2013). Perception of soundscapes: An interdisciplinary approach. Applied Acoustics, 74(2), 224-231.

[36] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment, 108, 284-294.

[37] Liu, J., Kang, J., Luo, T., Behm, H., & Coppack, T. (2013). Spatiotemporal variability of soundscapes in a multiple functional urban area. Landscape and Urban Planning, 115, 1-9.

[38] Payne, S. R., Davies, W. J., & Adams, M. D. (2009). Research into the practical and policy applications of soundscape concepts and techniques in urban areas. Department for Environment, Food and Rural Affairs.

[39] Schulte-Fortkamp, B., & Fiebig, A. (2006). Soundscape analysis in a residential area: An evaluation of noise and people's mind. Acta Acustica United with Acustica, 92(6), 875-880.

[40] Yang, W., & Kang, J. (2005). Acoustic comfort evaluation in urban open public

spaces. Applied Acoustics, 66(2), 211-229.

[41] Botteldooren, D., De Coensel, B., & De Muer, T. (2006). The temporal structure of urban soundscapes. Journal of Sound and Vibration, 292(1-2), 105-123.

[42] De Coensel, B., Botteldooren, D., & De Muer, T. (2003). 1/f noise in rural and urban soundscapes. Acta Acustica United with Acustica, 89(2), 287-295.

[43] Gaver, W. W. (1993). What in the world do we hear?: An ecological approach to auditory event perception. Ecological Psychology, 5(1), 1-29.

[44] Gibson, J. J. (1979). The ecological approach to visual perception. Houghton Mifflin.

[45] McAdams, S., & Bigand, E. (Eds.). (1993). Thinking in sound: The cognitive psychology of human audition. Oxford University Press.

[46] Ballas, J. A. (1993). Common factors in the identification of an assortment of brief everyday sounds. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 19(2), 250-267.

[47] Gygi, B., Kidd, G. R., & Watson, C. S. (2007). Similarity and categorization of environmental sounds. Perception & Psychophysics, 69(6), 839-855.

[48] Lemaitre, G., & Heller, L. M. (2012). Auditory perception and cognition. In The Psychology of Music (3rd ed., pp. 71-104). Academic Press.

[49] Neuhoff, J. G. (Ed.). (2004). Ecological psychoacoustics. Academic Press.

[50] Warren, W. H., & Verbrugge, R. R. (1984). Auditory perception of breaking and bouncing events: A case study in ecological acoustics. Journal of Experimental

Psychology: Human Perception and Performance, 10(5), 704-712.

[51] Handel, S. (1995). Timbre perception and auditory object identification. In B. C. J. Moore (Ed.), Hearing (pp. 425-461). Academic Press.

[52] Belin, P., Zatorre, R. J., Lafaille, P., Ahad, P., & Pike, B. (2000). Voice-selective areas in human auditory cortex. Nature, 403(6767), 309-312.

[53] Griffiths, T. D., & Warren, J. D. (2004). What is an auditory object? Nature Reviews Neuroscience, 5(11), 887-892.

[54] Rauschecker, J. P., & Tian, B. (2000). Mechanisms and streams for processing of "what" and "where" in auditory cortex. Proceedings of the National Academy of Sciences, 97(22), 11800-11806.

[55] Ahveninen, J., Jääskeläinen, I. P., Raij, T., Bonmassar, G., Devore, S., Hämäläinen, M., ... & Belliveau, J. W. (2006). Task-modulated "what" and "where" pathways in human auditory cortex. Proceedings of the National Academy of Sciences, 103(39), 14608-14613.

[56] Alain, C., & Arnott, S. R. (2000). Selectively attending to auditory objects. Frontiers in Bioscience, 5, d202-d212.

[57] Darwin, C. J., & Carlyon, R. P. (1995). Auditory grouping. In B. C. J. Moore (Ed.), Hearing (pp. 387-424). Academic Press.

[58] Moore, B. C. J., & Gockel, H. (2002). Factors influencing sequential stream segregation. Acta Acustica United with Acustica, 88(3), 320-333.

[59] Snyder, J. S., & Alain, C. (2007). Toward a neurophysiological theory of auditory stream segregation. Psychological Bulletin, 133(5), 780-799.

[60] Winkler, I., Háden, G. P., Ladinig, O., Sziller, I., & Honing, H. (2009). Newborn infants detect the beat in music. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(7), 2468-2471.

[61] Brandmeyer, A., Huettel, S. A., McAdams, S., & Cheng, H. J. (2013). Symphony in the brain: Elucidating the neural basis of musical syntax processing. NeuroImage, 81, 273-284.

[62] Koelsch, S. (2012). Brain and music. John Wiley & Sons.

[63] Patel, A. D. (2008). Music, language, and the brain. Oxford University Press.

[64] Zatorre, R. J., & Salimpoor, V. N. (2013). From perception to pleasure: Music and its neural substrates. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(Supplement 2), 10430-10437.

[65] Begault, D. R. (1994). 3-D sound for virtual reality and multimedia. Academic Press Professional.

[66] Blauert, J. (1997). Spatial hearing: The psychophysics of human sound localization (Rev. ed.). MIT Press.

[67] Moore, B. C. J. (2012). An introduction to the psychology of hearing (6th ed.). Brill.

[68] Yost, W. A. (2007). Fundamentals of hearing: An introduction (5th ed.). Academic Press.

[69] Carlile, S. (Ed.). (1996). Virtual auditory space: Generation and applications. R.G. Landes Company.

[70] Wenzel, E. M., Arruda, M., Kistler, D. J., & Wightman, F. L. (1993). Localization using nonindividualized head-related transfer functions. The Journal of the Acoustical Society of America, 94(1), 111-123.

[71] Wightman, F. L., & Kistler, D. J. (1989). Headphone simulation of free-field listening. I: Stimulus synthesis. The Journal of the Acoustical Society of America, 85(2), 858-867.

[72] Møller, H., Sørensen, M. F., Jensen, C. B., & Hammershøi, D. (1996). Binaural technique: Do we need individual recordings? Journal of the Audio Engineering Society, 44(6), 451-469.

[73] Algazi, V. R., Avendano, C., & Duda, R. O. (2001). Elevation localization and head-related transfer function analysis at low frequencies. The Journal of the Acoustical Society of America, 109(3), 1110-1122.

[74] Brungart, D. S., & Rabinowitz, W. M. (1999). Auditory localization of nearby sources. Head-related transfer functions. The Journal of the Acoustical Society of America, 106(3), 1465-1479.

[75] Jin, C., Corderoy, A., Carlile, S., & van Schaik, A. (2004). Contrasting monaural and interaural spectral cues for human sound localization. The Journal of the Acoustical Society of America, 115(6), 3124-3141.

[76] Middlebrooks, J. C. (1999). Virtual localization improved by scaling nonindividualized external-ear transfer functions in frequency. The Journal of the Acoustical Society of America, 106(3), 1493-1510.

[77] Pulkki, V. (1997). Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning. Journal of the Audio Engineering Society, 45(6), 456-466.

[78] Gerzon, M. A. (1973). Periphony: With-height sound reproduction. Journal of the Audio Engineering Society, 21(1), 2-10.

[79] Daniel, J., Nicol, R., & Moreau, S. (2003). Further investigations of high-order ambisonics and wavefield synthesis for holophonic sound imaging. Audio Engineering Society Convention 114.

[80] Spors, S., Rabenstein, R., & Ahrens, J. (2008). The theory of wave field synthesis revisited. Audio Engineering Society Convention 124.

[81] Berkhout, A. J., de Vries, D., & Vogel, P. (1993). Acoustic control by wave field synthesis. The Journal of the Acoustical Society of America, 93(5), 2764-2778.

[82] Start, E. W. (1997). Direct sound enhancement by wave field synthesis. Technische Universiteit Delft.

[83] Verheijen, E. N. G. (1997). Sound reproduction by wave field synthesis. Technische Universiteit Delft.

[84] De Vries, D. (1996). Sound reinforcement by wavefield synthesis: Adaptation of the synthesis operator. Journal of the Audio Engineering Society, 44(12), 1120-1131.

[85] Hulsebos, E. M., de Vries, D., & Bourdillat, E. (2002). Improved microphone array configurations for auralization of sound fields by wave-field synthesis. Journal of the Audio Engineering Society, 50(10), 779-790.

[86] Ahrens, J., & Spors, S. (2008). Sound field reproduction using planar and linear arrays of loudspeakers. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 18(8), 2038-2050.

[87] Spors, S., & Ahrens, J. (2008). Analysis and improvement of pre-equalization in 2.5-dimensional wave field synthesis. Audio Engineering Society Convention 125.

[88] Winter, F., Hahn, N., & Spors, S. (2014). Time-domain realisation of model-based rendering for 2.5D wave field synthesis. In Proceedings of the EAA Joint Symposium on Auralization and Ambisonics (pp. 85-92).

[89] Wierstorf, H., Raake, A., & Spors, S. (2013). Binaural assessment of multi-channel reproduction. In The Technology of Binaural Listening (pp. 255-278). Springer.

[90] Brandstein, M., & Ward, D. (Eds.). (2001). Microphone arrays: Signal processing techniques and applications. Springer.

[91] Benesty, J., Chen, J., & Huang, Y. (2008). Microphone array signal processing. Springer Science & Business Media.

[92] Hänsler, E., & Schmidt, G. (Eds.). (2004). Acoustic echo and noise control: A practical approach. John Wiley & Sons.

[93] Van Veen, B. D., & Buckley, K. M. (1988). Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. IEEE ASSP Magazine, 5(2), 4-24.

[94] Johnson, D. H., & Dudgeon, D. E. (1993). Array signal processing: Concepts and techniques. Prentice Hall.

[95] Krim, H., & Viberg, M. (1996). Two decades of array signal processing research: The parametric approach. IEEE Signal Processing Magazine, 13(4), 67-94.

[96] Schmidt, R. (1986). Multiple emitter location and signal parameter estimation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 34(3), 276-280.

[97] Roy, R., & Kailath, T. (1989). ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 37(7), 984-995.

[98] Paulraj, A., Roy, R., & Kailath, T. (1985). Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques- ESPRIT. In Nineteeth Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers (pp. 83-89).

[99] Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. Proceedings of the IEEE, 57(8), 1408-1418.

[100] Frost, O. L. (1972). An algorithm for linearly constrained adaptive array processing. Proceedings of the IEEE, 60(8), 926-935.

[101] Griffiths, L. J., & Jim, C. W. (1982). An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 30(1), 27-34.

[102] Er, M. H., & Cantoni, A. (1983). Derivative constraints for broad-band element space antenna array processors. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 31(6), 1378-1393.

[103] Doclo, S., & Moonen, M. (2002). GSVD-based optimal filtering for single and multimicrophone speech enhancement. IEEE Transactions on Signal Processing, 50(9), 2230-2244.

[104] Benesty, J., Makino, S., & Chen, J. (Eds.). (2005). Speech enhancement. Springer Science & Business Media.

[105] Loizou, P. C. (2007). Speech enhancement: Theory and practice. CRC Press.

[106] Gannot, S., Vincent, E., Markovich-Golan, S., & Ozerov, A. (2017). A consolidated perspective on multimicrophone speech enhancement and source separation. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 25(4), 692-730.

[107] Li, L., Huang, Y., Benesty, J., & Chen, J. (2016). A general approach to multichannel signal enhancement based on the Wiener filter. Speech Communication, 81, 17-25.

[108] Vincent, E., Watanabe, S., Nugraha, A. A., Barker, J., & Marxer, R. (2017). An analysis of environment, microphone and data simulation mismatches in robust speech recognition. Computer Speech & Language, 46, 535-557.

[109] Barker, J., Marxer, R., Vincent, E., & Watanabe, S. (2015). The third 'CHiME' speech separation and recognition challenge: Dataset, task and baselines. In 2015 IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding (ASRU) (pp. 504-511).

[110] Kinoshita, K., Delcroix, M., Gannot, S., Habets, E. A., Haeb-Umbach, R., Kellermann, W., ... & Nakatani, T. (2016). A summary of the REVERB challenge: State-of-the-art and remaining challenges in reverberant speech processing research. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016(1), 1-19.

[111] Gaubitch, N. D., Habets, E. A., & Naylor, P. A. (2006). Multimicrophone speech enhancement in noisy and reverberant environments using convex optimization. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 14(2), 415-423.

[112] Nakatani, T., Yoshioka, T., Kinoshita, K., Miyoshi, M., & Juang, B. H. (2009). Speech dereverberation based on variance-normalized delayed linear prediction. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 18(7), 1717-1731.

[113] Delcroix, M., Yoshioka, T., Ogawa, A., Kubo, Y., Fujimoto, M., Ito, N., ... &

Nakatani, T. (2018). Linear prediction-based dereverberation with advanced speech enhancement and recognition technologies for the REVERB challenge. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2015(1), 1-15.

[114] Yoshioka, T., Sehr, A., Delcroix, M., Kinoshita, K., Maas, R., Nakatani, T., & Kellermann, W. (2012). Making machines understand us in reverberant rooms: Robustness against reverberation for automatic speech recognition. IEEE Signal Processing Magazine, 29(6), 114-126.

[115] Habets, E. A. (2007). Single-and multi-microphone speech dereverberation using spectral enhancement. Technische Universiteit Eindhoven.

[116] Lebart, K., Boucher, J. M., & Denbigh, P. N. (2001). A new method based on spectral subtraction for speech dereverberation. Acta Acustica United with Acustica, 87(3), 359-366.

[117] Wu, M., & Wang, D. (2006). A two-stage algorithm for one-microphone reverberant speech enhancement. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 14(3), 774-784.

[118] Jukić, A., Gerkmann, T., & van Waterschoot, T. (2015). Multi-channel linear prediction-based speech dereverberation with sparse priors. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 23(9), 1509-1520.

[119] Braun, S., & Habets, E. A. (2013). Linear prediction-based online dereverberation and noise reduction using alternating Kalman filters. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 21(2), 394-406.

[120] Sehr, A., Maas, R., & Kellermann, W. (2010). Realization of robust adaptive beamforming for speech enhancement in reverberant environments. EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing, 2010, 1-15.

[121] Braun, S., Kuklasiński, A., Schwartz, O., Thiergart, O., Habets, E. A., Gannot, S., ... & Doclo, S. (2018). Evaluation and comparison of late reverberation power spectral density estimators. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 26(6), 1056-1071.

[122] Schwarz, A., Huemmer, C., Maas, R., & Kellermann, W. (2015). Spatial diffuseness features for DNN-based speech recognition in noisy and reverberant environments. In 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 4380-4384).

[123] Chakrabarty, S., & Habets, E. A. (2017). Multi-speaker localization using convolutional neural network trained with noise. arXiv preprint arXiv:1705.02662.

[124] Pertilä, P., & Lotfidereshgi, R. (2017). Audio context recognition using audio event histograms and penalized logistic regression. In 2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO) (pp. 1803-1807).

[125] Diment, A., Virtanen, T., & Mesaros, A. (2017). Sound event detection in real life recordings using coupled matrix factorization of spectral representations and class activity annotations. In 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 151-155).

[126] Adavanne, S., Politis, A., Nikunen, J., & Virtanen, T. (2018). Sound event localization and detection of overlapping sources using convolutional recurrent neural networks. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 13(1), 34-48.

[127] Politis, A., Mesaros, A., Adavanne, S., Heittola, T., & Virtanen, T. (2019). Overview and evaluation of sound event localization and detection in DCASE 2019. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 29, 684-698.

[128] Mesaros, A., Heittola, T., & Virtanen, T. (2021). Acoustic scene classification: A comprehensive survey. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 29, 2574-2591.

[129] Barchiesi, D., Giannoulis, D., Stowell, D., & Plumbley, M. D. (2015). Acoustic scene classification: Classifying environments from the sounds they produce. IEEE Signal Processing Magazine, 32(3), 16-34.

[130] Kong, Q., Cao, Y., Iqbal, T., Wang, Y., Wang, W., & Plumbley, M. D. (2020). PANNs: Large-scale pretrained audio neural networks for audio pattern recognition. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 28, 2880-2894.

[131] Gemmeke, J. F., Ellis, D. P., Freedman, D., Jansen, A., Lawrence, W., Moore, R. C., ... & Ritter, M. (2017). Audio set: An ontology and human-labeled dataset for audio events. In 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 776-780).

[132] Salamon, J., Jacoby, C., & Bello, J. P. (2014). A dataset and taxonomy for urban sound research. In Proceedings of the 22nd ACM International Conference on Multimedia (pp. 1041-1044).

[133] Piczak, K. J. (2015). ESC: Dataset for environmental sound classification. In Proceedings of the 23rd ACM International Conference on Multimedia (pp. 1015-1018).

[134] Font, F., Roma, G., & Serra, X. (2013). Freesound technical demo. In Proceedings of the 21st ACM International Conference on Multimedia (pp. 411-412).

[135] Fonseca, E., Plakal, M., Ellis, D. P., Font, F., Favory, X., & Serra, X. (2019). General-purpose tagging of freesound audio with AudioSet labels: Task description, dataset, and baseline. arXiv preprint arXiv:1906.09447.

[136] Cartwright, M., Mendez, A. E., Cramer, J., Lostanlen, V., Dove, G., Wu, H. H., ... & Bello, J. P. (2019). SONYC urban sound tagging (SONYC-UST): A multilabel dataset from an urban acoustic sensor network. In Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2019 Workshop (DCASE2019) (pp. 35-39).

[137] Mesaros, A., Heittola, T., Diment, A., Elizalde, B., Shah, A., Vincent, E., ... & Virtanen, T. (2017). DCASE 2017 challenge setup: Tasks, datasets and baseline system. In Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2017 Workshop (DCASE2017) (pp. 85-92).

[138] Politis, A., Adavanne, S., & Virtanen, T. (2020). A dataset of reverberant spatial sound scenes with moving sources for sound event localization and detection. arXiv preprint arXiv:2006.01919.

[139] Ronchini, F., Arteaga, D., & Pérez-López, A. (2022). Sound event localization and detection using FOA domain adaptation. In Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2022 Workshop (DCASE2022).

[140] Cao, Y., Kong, Q., Iqbal, T., An, F., Wang, W., & Plumbley, M. D. (2019). Polyphonic sound event detection and localization using a two-stage strategy. arXiv preprint arXiv:1905.00268.

[141] He, Y., Prabhavalkar, R., Rao, K., Li, W., Bakhtin, A., & McGraw, I. (2019). Streaming end-to-end speech recognition for mobile devices. In ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 6381-6385).

[142] Amodei, D., Ananthanarayanan, S., Anubhai, R., Bai, J., Battenberg, E., Case, C., ... & Zhu, Z. (2016). Deep speech 2: End-to-end speech recognition in English and mandarin. In International Conference on Machine Learning (pp. 173-182).

[143] Chan, W., Jaitly, N., Le, Q., & Vinyals, O. (2016). Listen, attend and spell: A neural network for large vocabulary conversational speech recognition. In 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 4960-4964).

[144] Chorowski, J. K., Bahdanau, D., Serdyuk, D., Cho, K., & Bengio, Y. (2015). Attention-based models for speech recognition. In Advances in Neural Information Processing Systems (pp. 577-585).

[145] Graves, A., Fernández, S., Gomez, F., & Schmidhuber, J. (2006). Connectionist temporal classification: Labelling unsegmented sequence data with recurrent neural networks. In Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning (pp. 369-376).

[146] Hannun, A., Case, C., Casper, J., Catanzaro, B., Diamos, G., Elsen, E., ... & Ng, A. Y. (2014). Deep speech: Scaling up end-to-end speech recognition. arXiv preprint arXiv:1412.5567.

[147] Hinton, G., Deng, L., Yu, D., Dahl, G. E., Mohamed, A. R., Jaitly, N., ... & Kingsbury, B. (2012). Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: The shared views of four research groups. IEEE Signal Processing Magazine, 29(6), 82-97.

[148] Graves, A., Mohamed, A. R., & Hinton, G. (2013). Speech recognition with deep recurrent neural networks. In 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (pp. 6645-6649).

[149] Bahdanau, D., Chorowski, J., Serdyuk, D., Brakel, P., & Bengio, Y. (2016). End-to-end attention-based large vocabulary speech recognition. In 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 4945-4949).

[150] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., ... & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. In Advances in Neural Information Processing Systems (pp. 5998-6008).

[151] Dong, L., Xu, S., & Xu, B. (2018). Speech-transformer: A no-recurrence sequence-to-sequence model for speech recognition. In 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 5884-5888).

[152] Gulati, A., Qin, J., Chiu, C. C., Parmar, N., Zhang, Y., Yu, J., ... & Pang, R. (2020). Conformer: Convolution-augmented transformer for speech recognition. arXiv preprint arXiv:2005.08100.

[153] Ravanelli, M., Parcollet, T., Plantinga, P., Rouhe, A., Cornell, S., Lugosch, L., ... & Bengio, Y. (2021). SpeechBrain: A general-purpose speech toolkit. arXiv preprint arXiv:2106.04624.

[154] Watanabe, S., Hori, T., Karita, S., Hayashi, T., Nishitoba, J., Unno, Y., ... & Zhao, X. (2018). ESPnet: End-to-end speech processing toolkit. arXiv preprint arXiv:1804.00015.

[155] Povey, D., Ghoshal, A., Boulianne, G., Burget, L., Glembek, O., Goel, N., ... & Vesely, K. (2011). The Kaldi speech recognition toolkit. In IEEE 2011 Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding.

[156] Panayotov, V., Chen, G., Povey, D., & Khudanpur, S. (2015). Librispeech: An ASR corpus based on public domain audio books. In 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 5206-5210).

[157] Ardila, R., Branson, M., Davis, K., Henretty, M., Kohler, M., Meyer, J., ... & Weber, G. (2019). Common voice: A massively-multilingual speech corpus. arXiv

preprint arXiv:1912.06670.

[158] Garofolo, J. S., Lamel, L. F., Fisher, W. M., Fiscus, J. G., & Pallett, D. S. (1993). DARPA TIMIT acoustic-phonetic continous speech corpus CD-ROM. NIST Speech Disc 1-1.1.

[159] Godfrey, J. J., Holliman, E. C., & McDaniel, J. (1992). SWITCHBOARD: Telephone speech corpus for research and development. In [Proceedings] ICASSP-92: 1992 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (Vol. 1, pp. 517-520).

[160] Harper, M. (2015). The automatic speech recognition in reverberant environments (ASpIRE) challenge. In 2015 IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding (ASRU) (pp. 547-554).

[161] Vincent, E., Barker, J., Watanabe, S., Le Roux, J., Nesta, F., & Matassoni, M. (2013). The second 'chime' speech separation and recognition challenge: Datasets, tasks and baselines. In 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (pp. 126-130).

[162] Heymann, J., Drude, L., & Haeb-Umbach, R. (2016). Neural network based spectral mask estimation for acoustic beamforming. In 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 196-200).

第八章 聲景的跨領域應用
Interdisciplinary Applications of Soundscape

聲景作為一個跨領域的研究範疇，其應用已遠遠超越了傳統的聲學和環境科學範疇，逐漸滲透到健康醫療、教育學習、旅遊觀光以及商業行銷等多個領域。根據國際標準化組織 ISO 12913-1:2014 的定義，聲景是指「透過人們在特定情境中的感知、經驗和理解的聲學環境」，這一定義強調了聲景的主觀性和情境性特徵，為其跨領域應用奠定了理論基礎[1]。近年來，隨著都市化程度的不斷提高和生活品質要求的提升，人們對於聲環境品質的關注已從單純的噪音控制轉向更加全面的聲景體驗[2]。

聲景的跨領域應用體現了現代社會對於環境品質和人類福祉關係的深度理解。R. Murray Schafer 在其開創性著作《世界的調音》(The Tuning of the World)中首次提出了聲景概念，並建立了世界聲景計畫(World Soundscape Project)，奠定了聲學生態學(Acoustic Ecology)的基礎[3]。這一理論框架不僅影響了學術研究，更為實際應用提供了指導方針。現代聲景研究已從純粹的描述性分析發展為具有預測性和干預性的應用科學，其在改善人類生活品質、促進健康恢復、優化學習環境、豐富旅遊體驗以及提升商業效益等方面展現出巨大潛力[4]。

世界衛生組織(WHO)在其環境噪音指南中明確指出，良好的聲環境不僅要控制有害噪音，更要積極營造有益於健康的聲景[5]。這一觀點的轉變標誌著聲景研究從「避害」向「趨利」的 paradigm shift，為其跨領域應用開闢了新的路徑。同時，ISO 12913 系列標準的制定和實施，為聲景的測量、評估和管理提供了統一的國際框架，促進了不同領域間的交流與合作[6]。當前，聲景的跨領域應用正處於快速發展階段，其理論體系日趨完善，應用範圍不斷擴大，實踐案例日益豐富，預示著聲景科學將在未來社會發展中發揮更加重要的作用[7]。

8.1 聲景與健康 (Soundscape and Health)

聲景與健康的關係是當前環境健康學和公共衛生領域的重要研究議題。傳統的環境健康研究主要關注噪音對人體的負面影響，如心血管疾病、睡眠障礙、認知功能損害等，但隨著聲景概念的引入，研究者開始關注聲環境對健康的正面促進作用[8]。根據 Aletta 等人在 2018 年發表的系統性文獻回顧，正面的聲景體驗與多項健康效益存在顯著關聯，包括壓力恢復加速、心理健康改善、認知功能提升等[9]。這一發現為聲景在健康領域的應用提供了堅實的科學依據。

世界衛生組織在 2018 年發布的《歐洲地區環境噪音指南》中首次納入了聲景的概念，強調了正面聲環境對於維護和促進公眾健康的重要性[10]。該指南指出，除了控制有害噪音外，還應積極營造有利於健康的聲景，特別是在醫療機構、康復中心、養老院等健康相關場所。研究表明，自然聲景如鳥鳴、流水聲、風聲等具有顯著的療癒效果，能夠激活副交感神經系統，促進身體的自我修復機制[11]。

現代健康聲景的應用涵蓋了預防醫學、治療醫學和康復醫學等多個層面。在預防層面，良好的聲景環境有助於維持心理平衡，減少壓力相關疾病的發生風險；在治療層面，特定的聲景設計可以輔助藥物治療，提高治療效果；在康復層面，聲景療法已成為綜合康復計畫的重要組成部分[12]。這種多層次的應用模式體現了聲景在現代醫療體系中的價值和潛力。同時，隨著精準醫學和個性化醫療的發展，聲景療法也呈現出個性化的趨勢，針對不同患者的特定需求設計相應的聲景介入方案[13]。

8.1.1 聲景對心理的影響 (Psychological Impacts of Soundscape)

聲景對心理健康的影響是一個複雜且多維度的研究領域，涉及認知心理學、環境心理學、神經心理學等多個學科的交叉融合。根據注意力恢復理論(Attention Restoration Theory, ART)和壓力減少理論(Stress Reduction Theory, SRT)，自然聲景能夠透過不同的心理機制促進心理健康的改善[14]。Kaplan 和 Kaplan 提出的 ART 理論認為，自然環境能夠提供「軟性吸引」(Soft Fascination)，讓疲勞的注意力系統得到恢復，而自然聲景正是這種軟性吸引的重要載體[15]。

最新的神經科學研究顯示，不同類型的聲景會激活大腦的不同區域，進而產生不同的心理效應。例如，自然聲景主要激活大腦的默認模式網絡(Default Mode Network)，這與放鬆、冥想和內省狀態相關；而城市交通噪音則主要激活與壓力反應相關的杏仁核和下視丘-腦垂體-腎上腺軸(HPA axis)[16]。Gould van Praag 等人的研究發現，聆聽熟悉的自然聲音能夠提高注意力監控能力，並增加副交感神經系統的活動，這些變化與積極的心理狀態密切相關[17]。

聲景對心理的影響具有明顯的劑量-反應關係。短期暴露(5-10 分鐘)於正面聲景中就能產生立即的心理效益，如情緒改善、焦慮減輕、注意力提升等；而長期暴露則能夠產生更深層的心理變化，如性格穩定性增強、抗壓能力提高、創造力激發等[18]。Medvedev 等人的實驗研究證實，即使是較短時間的自然聲景暴露也能顯著加速壓力恢復過程，其效果與聲景的愉悅度評價呈正相關[19]。這種時

間依賴性的效應為聲景在心理健康介入中的應用提供了重要的參考依據。

個體差異是影響聲景心理效應的重要因素。年齡、性別、文化背景、個人經驗、音樂訓練等都會影響個體對聲景的感知和反應[20]。Hedblom 等人的研究發現，女性和年長者對自然聲音的心理反應更加積極，這可能與性別角色、生活經驗和神經敏感性的差異有關[21]。此外，個體的噪音敏感性、性格特質(如內向-外向)、情緒調節能力等也會調節聲景的心理效應。這些發現提示我們在設計聲景介入方案時需要充分考慮個體差異，採用個性化的策略。

聲景對心理健康的負面影響同樣值得關注。不適當的聲景設計可能會產生反效果，如增加焦慮、干擾認知、引發負面情緒等[22]。例如，過於複雜或不熟悉的自然聲音可能會引起警覺反應而非放鬆反應；音量過大的聲景即使內容積極也可能造成聽覺疲勞；文化不適配的聲景可能會引發異質感和排斥感。因此，聲景的心理應用需要基於充分的評估和個性化的設計，確保其安全性和有效性。

情緒調節是聲景心理效應的重要機制之一。聲景能夠透過多種途徑影響情緒狀態，包括直接的聽覺-情緒通路、聯想記憶的激活、注意力的重新導向等[23]。Van den Bosch 等人提出的四象限聲景模型(Chaotic, Lively, Boring, Calm)揭示了不同聲景類型與情緒狀態的對應關係，為聲景的情緒調節應用提供了理論框架[24]。研究表明，「平靜型」聲景最有利於負面情緒的緩解和正面情緒的培養，而「活躍型」聲景則有助於提升活力和動機水平。

認知功能的改善是聲景心理效應的另一個重要方面。適當的聲景環境能夠優化認知資源的分配，提高注意力集中度、記憶編碼效率、執行功能等[25]。Zhang 等人在實地研究中發現，暴露於自然聲景中的參與者在心理算術任務上表現出更好的注意力恢復能力[26]。這種認知增強效應可能與聲景對大腦可塑性的積極影響有關，長期的正面聲景暴露可能會促進神經連接的優化和認知儲備的積累[27]。

8.1.2 聲景與醫療復健 (Soundscape and Healthcare Rehabilitation)

聲景在醫療復健領域的應用代表了現代康復醫學的重要發展方向，它將環境因素納入治療方案，強調環境與人的相互作用對康復過程的重要影響。世界衛生組織國際功能、失能和健康分類(International Classification of Functioning, Disability and Health, ICF)框架中明確指出，環境因素是影響個體功能狀態的關鍵要素，而聲環境作為環境因素的重要組成部分，在康復過程中發揮著不可忽視的作用[28]。

醫院聲景設計已成為現代醫療建築規劃的重要考量。傳統醫院環境常常充斥著各種機械噪音、警報聲、腳步聲等，這些負面聲景不僅影響患者的休息和康復，還可能加重醫護人員的工作壓力[29]。Zhou 等人在醫院病房的研究中發現，聲景環境對患者的生理和心理指標都有顯著影響，良好的聲景環境能夠降低患者的心率、血壓和皮質醇水平，同時提高睡眠品質和滿意度[30]。現代醫院聲景設計通常採用「遮蔽-增強」的策略，即透過聲音遮蔽技術減少有害噪音的干擾，同時引入有益的自然聲景元素，如流水聲、鳥鳴聲等，營造寧靜舒適的療癒環境。

不同專科的康復需求對聲景設計提出了特殊要求。在神經康復領域，聲景被用於刺激大腦的神經可塑性，促進受損功能的恢復[31]。研究表明，音樂療法結合自然聲景能夠有效改善中風患者的語言功能、運動功能和認知功能。在心理康復方面，聲景環境的營造對於憂鬱症、焦慮症、創傷後壓力症候群等精神疾病的治療具有重要的輔助作用[32]。在呼吸系統康復中，特定頻率的自然聲景能夠引導患者進行深度放鬆，改善呼吸模式，提高肺功能[33]。

康復聲景的個性化設計是當前研究的重點方向。不同患者的康復需求、疾病狀態、個人偏好等都需要在聲景設計中予以考慮[34]。例如，老年患者可能更偏好溫和、熟悉的自然聲音，而年輕患者可能對多樣化、動態的聲景有更好的反應。文化背景也是重要的考量因素，不同文化背景的患者對聲景的理解和偏好存在差異，需要進行文化適應性的調整[35]。

聲景康復的效果評估需要採用多維度的指標體系。生理指標包括心率變異性、血壓變化、皮質醇水平、免疫功能標誌物等；心理指標包括情緒狀態、疼痛感知、睡眠品質、生活品質等；功能指標包括認知功能、運動功能、社交功能等[36]。Watts 等人在醫療環境中的研究顯示，適當的聲景設計能夠顯著降低患者的焦慮水平和感知的寧靜度，這些效果在術前術後都有重要的臨床意義[37]。

技術進步為聲景康復的實施提供了更多可能性。個性化聲景系統能夠根據患者的實時生理狀態調整聲景參數，實現精準的康復介入[38]。虛擬實境(VR)和擴增實境(AR)技術的應用使得聲景康復能夠突破物理空間的限制，為患者提供沉浸式的康復體驗[39]。人工智慧和機器學習技術的運用能夠從大量康復數據中識別最優的聲景參數組合，提高康復效果的預測性和有效性[40]。

聲景康復的跨專業合作是確保其成功實施的關鍵。醫師、護理師、康復治療師、聲學工程師、環境設計師等需要形成多學科團隊，共同制定和實施聲景康復方案[41]。這種合作模式不僅能夠確保聲景設計的科學性和安全性，還能夠提

高患者和醫護人員對聲景康復的接受度和配合度。同時，康復機構的管理層支持和政策保障也是聲景康復推廣的重要因素[42]。

8.1.3 聲音治療應用 (Sound Therapy Applications)

聲音治療是一種古老而又現代的治療方法，它利用聲音的物理特性和心理效應來促進健康和治療疾病。現代聲音治療已從傳統的音樂治療發展為包含聲景治療、頻率治療、振動治療等多種形式的綜合治療體系[43]。世界音樂治療聯合會(World Federation of Music Therapy)的定義顯示，聲音治療是一個系統性的介入過程，治療師利用音樂和聲音的各種形式來促進、維持和恢復個體的心理、生理、情緒、認知和社會功能[44]。

神經音樂學(Neurologic Music Therapy)的發展為聲音治療提供了堅實的神經科學基礎。研究表明，聲音刺激能夠激活大腦的多個區域，包括聽覺皮層、運動皮層、情緒中樞、記憶系統等，這種廣泛的神經激活為聲音治療的多重效應提供了解釋[45]。特定頻率的聲音能夠引起腦波的同步化(Brainwave Entrainment)，進而影響意識狀態和認知功能。例如，α 波頻段(8-12 Hz)的聲音刺激有助於促進放鬆和冥想狀態，β 波頻段(12-30 Hz)的刺激則有助於提高注意力和覺醒水平[46]。

聲景治療作為聲音治療的重要分支，強調利用完整的聲音環境來達到治療目的。與傳統的單一聲音刺激不同，聲景治療利用多元化的聲音組合來營造特定的治療氛圍[47]。自然聲景治療是其中最為成熟的形式，利用森林、海洋、雨水、鳥鳴等自然聲音來促進身心健康。Ratcliffe 在其關於自然聲音與恢復性環境的文獻回顧中指出，自然聲景能夠透過多種機制促進心理恢復，包括注意力恢復、壓力減緩、情緒調節等[48]。

頻率特異性治療是聲音治療的另一個重要方向。這種治療方法基於不同頻率聲波對人體的特異性效應，針對特定疾病或症狀使用相應頻率的聲音刺激[49]。例如，低頻聲波(20-100 Hz)對肌肉放鬆和疼痛緩解有良好效果；中頻聲波(100-1000 Hz)對情緒調節和認知功能有積極影響；高頻聲波(1000-8000 Hz)對注意力集中和記憶增強有促進作用。然而，需要注意的是，過高或過低的頻率可能會對人體造成不良影響，因此頻率治療需要在專業指導下進行[50]。

雙耳節拍治療(Binaural Beats Therapy)是近年來備受關注的聲音治療技術。這種技術透過在左右耳分別播放略有差異的頻率，在大腦中產生虛擬的節拍感知，進而影響腦波活動[51]。研究表明，特定頻率的雙耳節拍能夠改善睡眠品質、減輕焦慮、提高認知表現等。Jirakittayakorn 和 Wongsawat 的元分析顯示，雙耳節

拍治療對認知功能的改善效果具有統計學意義，但效果大小因個體差異而有所不同[52]。

振動治療是聲音治療的物理形式，利用聲波的振動特性直接作用於人體。這種治療方法特別適用於聽力障礙患者，他們可以透過觸覺感受聲波的振動[53]。研究表明，全身振動治療能夠改善肌肉功能、骨密度、平衡能力等，對於老年人和康復患者具有重要的治療價值。同時，局部振動治療對於疼痛管理、創傷康復等也有良好效果[54]。

聲音治療的個性化應用是當前發展的重要趨勢。基於個體的生理特徵、心理狀態、疾病類型、治療目標等因素，制定個性化的聲音治療方案[55]。人工智慧技術的應用使得大規模的個性化聲音治療成為可能，透過機器學習算法分析患者的反應模式，自動調整治療參數，提高治療效果[56]。可穿戴設備的普及也為聲音治療的日常化應用提供了技術支持，患者可以在日常生活中接受連續的聲音治療介入[57]。

聲音治療的安全性和副作用也需要充分重視。雖然聲音治療總體上是安全的，但不當的應用可能會產生負面效果[58]。過大的音量可能造成聽力損傷；不適當的頻率可能引起不適反應；過長的治療時間可能導致聽覺疲勞。因此，聲音治療需要在專業治療師的指導下進行，並定期評估治療效果和安全性[59]。同時，聲音治療的品質控制也很重要，包括設備的校準、環境的控制、療程的標準化等[60]。

8.2 聲景與教育 (Soundscape and Education)

聲景在教育領域的應用體現了現代教育對學習環境全方位優化的追求。傳統的教育環境設計主要關注視覺要素，如照明、色彩、空間布局等，而對聲環境的重視程度相對不足[61]。然而，越來越多的研究證實，聲環境品質對學習效果、認知發展、情緒調節等都有重要影響。世界衛生組織在《學校環境噪音指南》中明確指出，良好的聲學環境是創造有利學習條件的基本要求[62]。

現代教育聲景的概念超越了單純的噪音控制，更加強調積極的聲環境營造。這種轉變反映了教育理念從「避害」向「趨利」的發展[63]。研究表明，適當的背景聲音能夠提高學習者的注意力集中度、記憶編碼效率和創造性思維能力[64]。同時，聲景還具有情緒調節功能，能夠緩解學習壓力，提高學習動機，營造積極的學習氛圍[65]。

教育聲景的設計需要考慮不同年齡段學習者的特點。幼兒教育階段的學習

者對聲音刺激較為敏感，需要溫和、安全的聲環境；基礎教育階段的學習者正處於認知發展的關鍵期，需要有利於專注力培養的聲環境；高等教育階段的學習者具有更強的自主性，需要多樣化、個性化的聲環境選擇[66]。這種年齡適應性的設計理念為教育聲景的實踐提供了重要指導。

科技的發展為教育聲景的實現提供了強有力的支撐。智慧教室系統能夠根據教學內容和學習者的需求自動調節聲環境參數[67]。個人化學習設備使得每個學習者都能夠擁有適合自己的聲環境[68]。虛擬和擴增實境技術的應用為沉浸式聲景學習體驗提供了可能[69]。這些技術進步不僅提高了教育聲景的可操作性，也拓展了其應用範圍和效果[70]。

8.2.1 聲景教育 (Soundscape Education)

聲景教育是一種嶄新的教育理念和實踐模式，它將聲景作為教育內容和教育手段，培養學習者的聽覺敏感性、環境意識和美學素養[71]。這種教育模式起源於 R. Murray Schafer 的聲學生態學理論，經過數十年的發展，已形成相對完整的理論體系和實踐框架[72]。聲景教育不僅是音樂教育的重要組成部分，更是跨學科教育的有效載體，涉及聲學、生態學、地理學、社會學、心理學等多個學科領域[73]。

聲景教育的核心目標是培養學習者的「聲音素養」(Sound Literacy)，即理解、分析、評價和創造聲音環境的能力[74]。這種素養包括多個層面：感知層面，即敏銳感受聲音的物理特性和美學特質；認知層面，即理解聲音的來源、傳播規律和環境意義；情感層面，即體驗聲音帶來的情緒變化和審美感受；行為層面，即能夠主動營造和改善聲環境[75]。這種多層面的素養培養體現了聲景教育的全人發展理念。

聲音地圖(Soundmapping)是聲景教育的重要方法之一。學習者透過實地錄音、聲音分析、地圖標記等活動，系統性地記錄和分析特定區域的聲環境特徵[76]。這種方法不僅能夠提高學習者的觀察能力和分析能力，還能夠增強他們對環境問題的認識和環保意識。Aktaş 在其關於環境聲景的研究中指出，聲音地圖作為音樂教育的教學工具，能夠促進體驗式、以學生為中心的動態學習環境[77]。

聲音散步(Soundwalking)是另一種重要的聲景教育方法。學習者在特定路線上行走，專注於聆聽和記錄沿途的聲音變化，培養對聲環境的敏感性和分析能力[78]。這種方法強調身體體驗和感官參與，有助於建立學習者與環境的直接聯繫。研究表明，聲音散步活動能夠顯著提高學習者的環境意識和審美能力，同時促進

他們的創造性思維發展[79]。

聲景創作是聲景教育的高階形式，學習者透過錄音、編輯、混音等技術手段創作屬於自己的聲景作品[80]。這種創作活動不僅能夠培養學習者的技術技能，更重要的是能夠激發創造力和表達能力。現代數位技術的發展使得聲景創作變得更加便捷和多樣化，學習者可以利用智慧型手機、平板電腦等設備進行創作，降低了技術門檻，提高了參與度[81]。

跨文化聲景交流是聲景教育的重要延伸。不同文化背景的學習者分享各自地區的聲景特色，增進相互理解和文化認識[82]。這種交流活動能夠拓展學習者的國際視野，培養多元文化意識和包容精神。聯合國教科文組織(UNESCO)大力推動聲景文化遺產的保護和傳承工作，為跨文化聲景交流提供了重要平台[83]。

聲景教育的評估需要採用多元化的方法。傳統的筆試評估難以全面反映學習者的聲景素養，需要結合實作評估、作品集評估、同儕評估等多種方式[84]。質性評估特別重要，透過觀察學習者的聲景體驗過程、分析其反思記錄、評價其創作表現等，能夠更全面地了解其聲景素養的發展狀況[85]。同時，長期追蹤評估也很有價值，能夠觀察聲景教育的持續效果和遷移效果[86]。

師資培訓是聲景教育推廣的關鍵環節。教師需要具備聲學基礎知識、聲景分析技能、教學設計能力等多方面的素養[87]。專業的師資培訓課程應該包括理論學習、實踐體驗、教學實習等環節，確保教師能夠勝任聲景教育的教學任務。同時，持續的專業發展支持也很重要，幫助教師跟上聲景教育的最新發展[88]。

8.2.2 教學應用案例 (Teaching Applications)

聲景在具體教學實踐中的應用案例豐富多樣，涵蓋了從幼兒教育到高等教育的各個階段，以及從傳統學科到跨領域課程的多個領域[89]。這些應用案例不僅展示了聲景教育的實際效果，也為進一步的推廣應用提供了寶貴經驗。成功的教學應用案例通常具有明確的教學目標、科學的設計理念、適當的技術支持和有效的評估機制[90]。

在語言教學領域，聲景的應用已經取得了顯著成效。英語作為第二語言(ESL)的教學中，教師利用不同地區的聲景材料幫助學習者了解語言的文化背景和使用情境[91]。例如，透過聆聽倫敦街頭的聲景，學習者不僅能夠練習聽力技能，還能夠了解英國的文化特色和社會生活。研究表明，這種情境化的語言學習方法能夠顯著提高學習者的語言運用能力和文化理解能力[92]。法語、德語、日語等其他外語教學也廣泛採用了類似的聲景教學方法[93]。

科學教育中的聲景應用主要體現在生物學、地理學、物理學等學科中。在生物學教學中，教師利用不同生態系統的聲景讓學生了解生物多樣性和生態平衡[94]。森林聲景中的鳥鳴、昆蟲聲、風聲等能夠幫助學生理解生態系統的複雜性和相互依存關係。海洋聲景的應用則能夠讓學生了解海洋生物的聲音通訊和環境適應[95]。這種聲景教學方法比傳統的圖片和文字描述更加生動直觀，能夠激發學生的學習興趣和環保意識[96]。

歷史和社會學教育中的聲景應用具有獨特的價值。透過重現歷史時期的聲景，學生能夠更深入地理解歷史事件和社會變遷[97]。例如，工業革命時期的機器轟鳴聲、戰爭時期的爆炸聲、傳統市集的叫賣聲等，都能夠為學生提供身歷其境的歷史體驗。這種沉浸式的歷史學習方法能夠提高學生的歷史想像力和批判思維能力[98]。同時，比較不同時期、不同地區的聲景變化，還能夠幫助學生理解社會發展的規律和文化的多樣性[99]。

藝術教育中的聲景應用更加直接和多樣。音樂教育中，聲景不僅是教學內容，也是創作素材[100]。學生透過分析自然聲景的音樂元素，學習節奏、旋律、和聲等音樂理論知識。同時，利用環境聲音進行音樂創作，能夠培養學生的創新意識和藝術表達能力[101]。視覺藝術教育中，聲景也發揮著重要作用。學生透過聆聽不同的聲景，創作相應的視覺作品，實現跨感官的藝術體驗[102]。這種多感官的藝術教育方法能夠提高學生的藝術敏感性和創造力[103]。

特殊教育中的聲景應用展現了其獨特的價值。對於視覺障礙學生，聲景是他們感知和理解世界的重要通道[104]。透過豐富的聲景體驗，視覺障礙學生能夠建立對環境的空間認知和情境理解。對於聽覺障礙學生，雖然不能直接感受聲音，但可以透過振動感知聲波的物理特性，這為他們理解聲學概念提供了可能[105]。對於自閉症學生，適當的聲景環境能夠減少感官超載，提供安全舒適的學習環境[106]。

技術整合是現代聲景教學應用的重要特徵。虛擬實境技術的應用使得學生能夠「身臨其境」地體驗不同的聲景環境[107]。例如，學生可以透過 VR 設備體驗亞馬遜雨林的聲景，了解熱帶雨林的生態特徵。擴增實境技術的應用則能夠在現實環境中疊加虛擬的聲景元素，豐富學習體驗[108]。人工智慧技術的應用能夠為學生提供個性化的聲景學習內容和路徑[109]。

評估和反思是聲景教學應用的重要環節。教師需要採用多種方法評估聲景教學的效果，包括學習成果評估、學習過程評估、學習體驗評估等[110]。同時，

學生的自我反思也很重要，透過反思自己的聲景體驗和學習過程，能夠深化學習效果和提高學習能力[111]。教師的教學反思同樣重要，透過分析教學過程中的成功經驗和問題挑戰，不斷改進聲景教學的方法和策略[112]。

8.2.3 學習環境聲景設計 (Learning Environment Soundscape Design)

學習環境聲景設計是教育環境優化的重要組成部分，它涉及聲學工程、環境心理學、教育學等多個學科的交叉融合[113]。良好的學習環境聲景不僅能夠創造有利於學習的聲學條件，還能夠營造積極的學習氛圍，提高學習效果和滿意度[114]。現代學習環境聲景設計已從被動的噪音控制發展為主動的聲環境營造，體現了教育理念和技術手段的雙重進步[115]。

教室聲景設計是學習環境聲景設計的核心內容。傳統教室設計主要關注混響時間、信噪比、隔音量等聲學參數，而現代教室聲景設計則更加關注聲環境的整體品質和用戶體驗[116]。Chan 等人的研究顯示，教室聲景對學習態度有顯著影響，需要綜合考慮聲學特性和心理特性，以改善學習環境[117]。新型的開放式學習空間給聲景設計帶來了新的挑戰，需要在確保私密性的同時維持開放性和靈活性[118]。

不同類型學習活動對聲景的需求存在差異，這要求聲景設計具有適應性和可調節性[119]。講座式教學需要清晰的語音傳輸和最小的背景噪音干擾；小組討論需要適度的聲音隔離和自然的聲音反饋；個人學習需要寧靜的環境和柔和的背景聲音；創意活動則可能需要激發靈感的聲景元素[120]。智慧聲景系統能夠根據教學活動的類型自動調節聲環境參數，實現動態優化[121]。

聲音遮蔽技術在學習環境聲景設計中發揮重要作用。適當的背景聲音能夠遮蔽分散注意力的噪音，同時不干擾正常的教學活動[122]。自然聲景元素如雨聲、海浪聲、鳥鳴聲等被廣泛應用於聲音遮蔽，既能達到遮蔽效果，又能營造舒適的學習氛圍[123]。粉紅噪音和白噪音也是常用的遮蔽聲音，但需要控制好音量和頻譜特性，避免造成聽覺疲勞[124]。

個性化聲景設計是當前發展的重要趨勢。不同學習者對聲環境的需求和偏好存在個體差異，需要提供個性化的聲景選擇[125]。可穿戴聲學設備的發展使得個人聲景成為可能，學習者可以在不干擾他人的前提下享受適合自己的聲環境[126]。同時，基於學習者的生理和心理狀態實時調節聲景參數，實現精準的個性化服務[127]。

聲景設計的文化適應性也需要充分考慮。不同文化背景的學習者對聲環境

的理解和偏好存在差異，需要進行文化敏感性的設計[128]。例如，東亞文化背景的學習者可能更偏好相對安靜的學習環境，而西方文化背景的學習者可能對適度的背景聲音有更好的接受度[129]。跨文化學習環境的聲景設計需要尋找文化間的平衡點，或提供文化個性化的選擇[130]。

技術整合是現代學習環境聲景設計的重要特徵。物聯網(IoT)技術的應用使得聲景系統能夠感知環境變化和用戶需求，自動調節聲環境參數[131]。人工智慧技術的應用能夠從大量使用數據中學習最優的聲景配置，持續改進系統性能[132]。雲端計算技術的應用使得聲景資源能夠共享和遠程管理，提高系統的靈活性和經濟性[133]。

評估和優化是聲景設計的持續過程。需要建立科學的評估指標體系，包括客觀的聲學測量指標和主觀的用戶滿意度指標[134]。定期的用戶調查和反饋收集有助於了解聲景設計的實際效果和改進需求[135]。長期的追蹤評估能夠觀察聲景對學習效果的持續影響，為設計優化提供科學依據[136]。

永續性是學習環境聲景設計需要考慮的重要因素。能源效率的聲學設備選擇、可再生能源的利用、設備的生命週期管理等都需要納入設計考量[137]。同時，聲景設計還需要考慮對周邊環境的影響，避免造成聲污染[138]。綠色聲景設計理念的推廣有助於實現教育的永續發展目標[139]。

8.3 聲景與旅遊 (Soundscape and Tourism)

聲景在旅遊產業中的應用代表了旅遊體驗設計的新維度，它超越了傳統的視覺導向模式，為遊客提供更加豐富和沉浸式的感官體驗[140]。隨著體驗經濟時代的到來，遊客不再滿足於單純的觀光遊覽，而是追求更深層次的文化體驗和情感連結[141]。聲景作為地方特色和文化認同的重要載體，在營造獨特的旅遊體驗、傳承文化遺產、促進可持續旅遊發展等方面發揮著重要作用[142]。

聲音旅遊(Sound Tourism)作為一種新興的旅遊形式，正在全球範圍內快速發展。這種旅遊方式以聲景體驗為核心，透過專業的聲音導覽、音樂節慶、聲景藝術展示等形式，為遊客提供獨特的聽覺文化體驗[143]。Dávid 等人在其對聲景和聲音景觀在旅遊中的文獻計量分析中指出，聲景旅遊研究在過去十年中呈現快速增長趨勢，跨學科合作和創新方法論將推動這一領域的進一步發展[144]。

聲景旅遊的發展得益於數位技術的進步和遊客需求的多樣化。GPS 定位技術、移動應用程式、無線音頻傳輸等技術的普及，使得個性化的聲景體驗成為可能[145]。同時，疫情背景下的旅遊模式變化也促進了聲景旅遊的發展，虛擬聲景

體驗為無法親臨現場的遊客提供了替代性的旅遊方式[146]。這種技術驅動的創新為聲景旅遊的未來發展開闢了廣闊前景[147]。

8.3.1 聲景旅遊 (Soundscape Tourism)

聲景旅遊是一種以聲音體驗為核心的專門化旅遊形式，它將目的地的聲音環境作為主要的旅遊資源和吸引力[148]。這種旅遊形式不僅包括自然聲景的體驗，如鳥鳴、海浪、風聲等，還涵蓋人文聲景的探索，如傳統音樂、方言、手工技藝聲音、宗教儀式聲音等[149]。Bai 等人在其對古鎮聲景和旅遊體驗的實證研究中發現，自然聲景感知和人造聲景對鄉村目的地遊客體驗都有重要影響[150]。

自然聲景旅遊是聲景旅遊的重要組成部分，它利用自然環境中的聲音特色來吸引遊客[151]。國家公園、自然保護區、海岸線、森林等自然區域都具有獨特的聲景資源。例如，美國黃石國家公園的間歇泉聲音、哥斯大黎加熱帶雨林的生物聲景、冰島的風聲和瀑布聲等，都成為吸引遊客的重要要素[152]。這些自然聲景不僅具有美學價值，還承載著生態教育和環境保護的功能[153]。

文化聲景旅遊則聚焦於人文聲音環境的體驗和傳承。傳統市集的叫賣聲、古老教堂的鐘聲、民間音樂的演奏聲、手工藝人的工作聲等，都是重要的文化聲景資源[154]。這些聲音不僅反映了地方的文化特色，還承載著歷史記憶和社會變遷的信息。UNESCO 的無形文化遺產保護工作中，聲景保護占據重要地位，許多傳統音樂、戲曲、民歌等都被列入保護名錄[155]。

聲景旅遊產品的開發需要創新的設計理念和專業的技術支持。主題化的聲景路線設計能夠為遊客提供系統性的聲音體驗，如「鳥類聲景之旅」、「海洋聲景探索」、「都市聲景漫步」等[156]。互動性的聲景體驗設計能夠提高遊客的參與度和滿意度，如聲音地圖製作、聲景錄音創作、聲音藝術表演等[157]。個性化的聲景服務能夠滿足不同遊客的需求和偏好，如多語言導覽、年齡適配內容、興趣定制路線等[158]。

聲景旅遊的市場潛力巨大，但也面臨著諸多挑戰。聲景資源的季節性變化、環境噪音的干擾、技術設備的限制、遊客接受度的差異等都是需要解決的問題[159]。同時，聲景資源的保護和可持續利用也是重要課題，需要在旅遊開發和環境保護之間尋找平衡[160]。建立完善的聲景旅遊標準和認證體系，提高服務品質和專業水準，是促進聲景旅遊健康發展的重要舉措[161]。

聲景旅遊的社會經濟效益逐漸顯現。它不僅能夠為目的地創造新的收入來源，還能夠促進當地文化的傳承和發展[162]。同時，聲景旅遊對環境的影響相對

較小，符合可持續旅遊發展的理念[163]。許多鄉村地區透過開發聲景旅遊產品，實現了經濟發展和文化保護的雙重目標[164]。

8.3.2 聲音導覽與體驗 (Sound Tours and Experiences)

聲音導覽作為聲景旅遊的核心產品形式，已經從傳統的語音解說發展為多元化的聲音體驗服務[165]。現代聲音導覽不僅提供資訊傳遞功能，更重要的是創造沉浸式的文化體驗和情感連結[166]。透過精心設計的聲音內容和先進的技術手段，聲音導覽能夠引導遊客深入了解目的地的歷史文化、自然環境和社會特色[167]。

傳統的聲音導覽主要採用錄製好的語音內容，透過便攜式設備播放給遊客[168]。這種形式雖然簡單易行，但缺乏互動性和個性化特色。現代聲音導覽則採用智慧化的設計理念，結合 GPS 定位、感應器技術、人工智慧等手段，為遊客提供情境感知的動態服務[169]。當遊客走到特定位置時，系統會自動播放相應的聲音內容，實現「隨走隨聽」的無縫體驗[170]。

多感官融合是現代聲音導覽的重要特徵。除了聽覺體驗外，還結合視覺、觸覺、嗅覺等多種感官刺激[171]。例如，在博物館的聲音導覽中，除了語音解說外，還可能包括背景音樂、環境音效、觸控回饋等元素。這種多感官的體驗設計能夠提高遊客的沉浸感和記憶效果[172]。虛擬實境和擴增實境技術的應用進一步豐富了聲音導覽的表現形式[173]。

個性化是聲音導覽發展的重要趨勢。基於遊客的年齡、興趣、文化背景、語言偏好等特徵，系統能夠提供定制化的聲音內容和導覽路線[174]。人工智慧技術的應用使得系統能夠從遊客的行為數據中學習，不斷優化個性化推薦的準確性[175]。同時，社交化的功能設計允許遊客分享自己的導覽體驗，為其他遊客提供參考[176]。

聲音步行(Soundwalking)是聲音導覽的創新形式之一。它將城市漫步與聲音體驗相結合，引導遊客關注平時被忽視的聲音環境[177]。Galloway 在其關於電池公園聽覺文化的研究中指出，聲音步行、聽覺旅遊和互動式定位媒體聲音藝術為遊客提供了與環境互動和協商的新方式[178]。這種體驗形式特別適合於都市文化探索和社區旅遊[179]。

主題化的聲音導覽能夠滿足不同遊客群體的特殊需求。歷史主題的導覽重現歷史場景的聲音氛圍；生態主題的導覽突出自然聲景的特色；藝術主題的導覽結合音樂和聲音藝術；美食主題的導覽包含烹飪聲音和市場氛圍等[180]。這種主

題化的設計不僅提高了導覽內容的專業性，也增強了遊客的體驗深度[181]。

互動性是現代聲音導覽的核心要素。遊客不再是被動的聽眾，而是能夠主動參與聲音體驗的創造[182]。例如，遊客可以錄製自己的聲音感受，參與聲音地圖的製作，或者與其他遊客進行聲音交流。這種互動設計不僅提高了遊客的參與度，也豐富了導覽內容的多樣性[183]。

技術創新推動了聲音導覽的不斷發展。5G 通訊技術的普及為高品質音頻傳輸提供了保障；邊緣計算技術降低了系統響應延遲；語音識別和自然語言處理技術實現了智慧對話功能；區塊鏈技術保障了內容版權和用戶隱私[184]。這些技術進步為聲音導覽的創新應用提供了無限可能[185]。

品質控制是聲音導覽成功的關鍵因素。內容的準確性、音質的清晰度、技術的穩定性、服務的及時性等都直接影響遊客的體驗品質[186]。建立完善的品質管理體系、定期進行用戶滿意度調查、持續改進產品和服務，是保障聲音導覽品質的重要措施[187]。

8.3.3 聲景與文化資產 (Cultural Heritage Soundscapes)

聲景作為文化資產的重要組成部分，承載著豐富的歷史信息、文化內涵和社會價值[188]。UNESCO 在其《保護無形文化遺產公約》中明確指出，傳統音樂、口述傳統、表演藝術等聲音形式的文化表現都屬於無形文化遺產的範疇[189]。聲景文化資產的保護和傳承不僅有助於維護文化多樣性，還能為旅遊產業的發展提供獨特的資源優勢[190]。

歷史聲景的重建是文化資產保護的重要方向。透過歷史文獻研究、考古發現、民俗調查等手段，研究者能夠部分重現歷史時期的聲音環境[191]。例如，古羅馬競技場的觀眾歡呼聲、中世紀市集的商販叫賣聲、工業革命時期的機器轟鳴聲等，都是重要的歷史聲景資源。Dedousis 等人在其關於歷史聲景設計的研究中探討了為現代旅遊指南增強歷史聲景的挑戰和妥協[192]。這種歷史聲景的重建為遊客提供了穿越時空的體驗機會[193]。

宗教聲景是文化資產中的重要類別，它反映了不同宗教傳統的音樂特色和儀式特徵[194]。教堂鐘聲、寺廟誦經聲、清真寺宣禮聲、佛教念誦聲等，都是具有深厚文化底蘊的聲景資源。Hathcock 在其關於西班牙宗教文化遺產機構音頻導覽的研究中指出，聲景理論的選擇是因為音頻導覽本質上就是關於聲音的[195]。這些宗教聲景不僅具有精神價值，也是重要的旅遊吸引力[196]。

民俗聲景保護面臨著現代化衝擊的挑戰。許多傳統的聲音文化正在消失，

如傳統手工藝的製作聲音、古老的勞動號子、地方方言的語音特色等[197]。數字化保護技術為這些瀕臨失傳的聲景提供了保存手段，透過高保真錄音、多媒體檔案、數據庫建設等方式，確保這些珍貴的文化資產能夠傳承給後代[198]。同時，活態保護也很重要，透過教育傳承、文化表演、社區參與等方式，讓這些聲景文化在現代社會中重新煥發生機[199]。

都市聲景作為現代文化資產的新類別，記錄著城市的發展歷程和社會變遷[200]。不同時期的都市聲景反映了技術進步、社會結構、生活方式的變化。例如，從馬蹄聲到汽車聲的轉變、從手工勞動聲到機械化生產聲的演變、從傳統市集聲到現代商場聲的對比等[201]。這些都市聲景不僅具有歷史價值，也是理解現代社會發展的重要線索[202]。

聲景文化資產的數字化管理是當前的重要發展方向。建立統一的聲景檔案標準、開發智慧化的檢索系統、實現跨機構的資源共享，是提高聲景文化資產管理效率的關鍵措施[203]。區塊鏈技術的應用能夠保障聲景資產的版權和真實性；人工智慧技術的應用能夠提高聲景內容的自動分析和標註效率；雲端計算技術的應用能夠實現聲景資源的全球化訪問[204]。

參與式保護是聲景文化資產保護的重要理念。社區居民、文化傳承人、遊客、研究者等都應該參與到聲景保護的過程中[205]。透過社區調查、口述歷史、參與式錄音、公眾教育等方式，建立多方協作的保護機制。這種參與式的保護模式不僅能夠提高保護效果，還能夠增強社區對聲景文化的認同感和責任感[206]。

聲景文化資產的旅遊化利用需要平衡保護和開發的關係。過度的商業化可能會損害聲景的文化價值和真實性，而過度的保護可能會限制其社會價值的實現[207]。建立科學的利用標準、實施嚴格的監督管理、開展持續的效果評估，是實現可持續利用的重要保障[208]。同時，收益分享機制的建立能夠確保當地社區從聲景旅遊中獲得合理回報[209]。

8.4 聲景與商業應用 (Soundscape and Commercial Applications)

聲景在商業領域的應用體現了現代商業對消費者體驗的深度關注和精細化管理[210]。隨著體驗經濟的興起和消費者需求的多樣化，商業空間不再僅僅是商品交易的場所，更是品牌體驗和情感連結的重要載體[211]。聲景作為環境體驗的重要組成部分，在塑造品牌形象、影響消費行為、提升顧客滿意度等方面發揮著越來越重要的作用[212]。現代商業聲景設計已從簡單的背景音樂播放發展為系

統性的聲音環境營造，涉及聲學工程、心理學、行銷學、品牌管理等多個專業領域[213]。

商業聲景的科學基礎來自於環境心理學和消費者行為學的研究成果。Mehrabian 和 Russell 提出的環境心理學模型(PAD Model)指出，環境刺激透過情緒中介影響個體的行為反應，聲景作為重要的環境刺激因子，對消費者的情緒狀態和購買行為具有直接影響[214]。大量實證研究證實，適當的聲景設計能夠延長顧客的停留時間、增加購買意願、提高品牌好感度、促進口碑傳播等[215]。

技術進步為商業聲景的實施提供了強有力的支撐。數位音頻處理技術、智慧控制系統、物聯網設備、人工智慧算法等的應用，使得商業聲景能夠實現精準控制、動態調節、個性化定制等功能[216]。同時，大數據分析技術的運用能夠從顧客行為數據中提取聲景偏好信息，為聲景優化提供科學依據[217]。這些技術創新不僅提高了商業聲景的實施效率，也拓展了其應用範圍和效果[218]。

8.4.1 零售空間聲景 (Retail Soundscape)

零售空間聲景是商業聲景應用最為成熟和廣泛的領域，它透過精心設計的聲音環境來影響消費者的購物體驗和消費行為[219]。現代零售商越來越認識到聲景對營造品牌氛圍、提升顧客體驗、促進銷售增長的重要作用[220]。零售聲景的設計需要綜合考慮目標客群、商品特性、品牌定位、空間特徵等多個因素，實現聲音環境與商業目標的最佳匹配[221]。

音樂選擇是零售聲景設計的核心要素。不同類型的音樂會對消費者產生不同的心理和行為影響[222]。快節奏的音樂通常會加快顧客的行走速度和決策節奏，適合快時尚和便利店等追求高週轉率的業態；慢節奏的音樂則會讓顧客放慢腳步，延長停留時間，適合精品店和高端百貨等注重體驗品質的業態[223]。音樂風格的選擇也很重要，流行音樂適合年輕消費群體，古典音樂適合高端消費場景，民族音樂適合文化主題商店等[224]。

音量控制是零售聲景設計的關鍵技術參數。過大的音量會造成聽覺疲勞和心理壓力，過小的音量則難以發揮聲景的積極作用[225]。研究表明，適宜的零售空間音量通常控制在 65-75 分貝之間，具體數值需要根據空間大小、顧客密度、商品類型等因素進行調整[226]。動態音量調節技術的應用能夠根據環境噪音的變化自動調整播放音量，確保聲景效果的一致性[227]。

時間分區是零售聲景管理的重要策略。不同時段的顧客構成和消費需求存在差異，需要相應調整聲景設計[228]。例如，上午時段可能以柔和的音樂為主，

營造輕鬆舒適的購物氛圍；午餐時段可能增加一些活力音樂，提升顧客的精神狀態；晚間時段可能選擇更加溫馨的音樂，迎合休閒購物的需求[229]。季節性調整也很重要，春夏季節可能選擇更加明快的音樂，秋冬季節可能選擇更加溫暖的音樂[230]。

空間分區聲景設計是大型零售場所的常見做法。不同功能區域的聲景設計需要與其商業目的相匹配[231]。入口區域通常需要歡迎性和指引性的聲景；商品展示區需要能夠突出商品特色的聲景；試衣間需要私密性和舒適性的聲景；收銀區需要能夠維持良好情緒的聲景[232]。無縫轉換技術的應用能夠確保顧客在不同區域間移動時聲景的連貫性和協調性[233]。

自然聲景元素在零售空間中的應用越來越受到關注。研究表明，適當的自然聲音能夠減少購物壓力，提升顧客的舒適感和滿意度[234]。Kontukoski 在其關於超市自然聲音的案例研究中發現，播放自然聲景的那週，商店的銷售額比平時更高[235]。鳥鳴聲、流水聲、風聲等自然元素被巧妙融入零售聲景中，營造出更加貼近自然的購物環境[236]。

個性化聲景服務是零售聲景發展的新趨勢。基於顧客的購物歷史、偏好設定、當前位置等信息，系統能夠為每位顧客提供個性化的聲景體驗[237]。智慧手機應用、藍牙信標、RFID 技術等的應用使得個性化聲景服務成為可能[238]。同時，社交化的功能設計允許顧客分享自己喜歡的聲景，為其他顧客提供參考[239]。

效果評估是零售聲景優化的重要環節。需要建立科學的評估指標體系，包括顧客停留時間、購買轉化率、客單價、滿意度評分等量化指標[240]。同時，定性評估也很重要，透過顧客訪談、焦點小組、觀察研究等方式了解聲景的實際體驗效果[241]。A/B 測試方法的應用能夠比較不同聲景方案的效果差異，為優化決策提供科學依據[242]。

8.4.2 品牌聲音識別 (Brand Sound Identity)

品牌聲音識別是現代品牌管理的重要組成部分，它透過獨特的聲音元素來塑造品牌形象、傳遞品牌價值、增強品牌記憶[243]。隨著多媒體傳播的普及和消費者接觸點的多樣化，聲音已成為品牌差異化競爭的重要工具[244]。成功的品牌聲音識別不僅能夠提高品牌認知度，還能夠建立情感連結，促進顧客忠誠度的形成[245]。

品牌聲音識別的構成要素包括品牌音樂、聲音標誌、語音特徵、聲景氛圍等多個層面[246]。品牌音樂是最常見的形式，透過特定的旋律、節奏、樂器組合

來表達品牌個性和風格[247]。例如，Intel 的音樂標誌、McDonald's 的"I'm Lovin' It"主題曲、Nokia 的鈴聲等，都是經典的品牌音樂案例[248]。這些音樂標誌不僅具有高度的識別性，還承載著豐富的品牌聯想和情感價值[249]。

聲音標誌(Audio Logo)是品牌聲音識別的核心元素，它是品牌在聲音領域的視覺標誌等價物[250]。一個成功的聲音標誌需要具備簡潔性、獨特性、記憶性、適應性等特徵[251]。簡潔性要求聲音標誌能夠在短時間內(通常 3-5 秒)完整表達；獨特性要求聲音標誌能夠與競爭品牌區分開來；記憶性要求聲音標誌容易被消費者記住和識別；適應性要求聲音標誌能夠在不同媒體和場景中保持一致性[252]。

語音特徵是品牌聲音識別的人性化表現，它透過特定的聲音特質來塑造品牌的人格形象[253]。這包括語音的性別、年齡、音調、語速、口音、情感色彩等特徵[254]。例如,Siri 的女性聲音傳達了智慧和親和力，Morgan Freeman 的旁白聲音傳達了權威和可信度。語音合成技術的發展使得品牌能夠創造獨特的合成語音，確保語音特徵的一致性和可控性[255]。

聲景氛圍設計是品牌聲音識別的環境延伸，它透過完整的聲音環境來強化品牌體驗[256]。這不僅包括直接的品牌聲音元素，還包括背景音樂、環境音效、聲學處理等間接元素[257]。Khamis 和 Keogh 在其關於聲音品牌和日常消費美學基礎設施的研究中指出，聲音品牌能夠創造聲景，產生品牌表達和戰略使用[258]。

跨媒體一致性是品牌聲音識別成功的關鍵要素。品牌聲音需要在電視廣告、廣播節目、網路影片、移動應用、實體店面、電話服務等各種接觸點保持一致性[259]。這種一致性不僅體現在聲音內容的統一，還體現在聲音品質、音量控制、播放時機等技術細節的標準化[260]。建立完善的品牌聲音指南和管理體系是確保一致性的重要措施[261]。

文化適應性是全球化品牌聲音識別面臨的重要挑戰。不同文化背景的消費者對聲音的理解和偏好存在差異，需要在保持品牌核心特徵的基礎上進行本土化調整[262]。例如，語言的本土化、音樂風格的文化適配、聲音元素的文化敏感性檢查等[263]。這種文化適應性的處理既要避免文化衝突，又要維護品牌的全球一致性[264]。

技術創新為品牌聲音識別的實施和管理提供了新的可能性。人工智慧技術能夠自動生成符合品牌特徵的音樂和聲音；機器學習算法能夠從消費者反饋中優化聲音設計；區塊鏈技術能夠保護聲音資產的版權；雲端服務能夠實現聲音資源的統一管理和分發[265]。這些技術進步不僅提高了品牌聲音識別的創作效率，也

增強了其管理的精準性[266]。

效果測量是品牌聲音識別管理的重要環節。需要建立多維度的評估指標體系，包括品牌認知度、品牌聯想度、情感連結度、行為影響度等[267]。神經行銷學方法的應用能夠測量聲音對消費者大腦活動的影響，提供更深層次的效果評估[268]。長期追蹤研究能夠觀察品牌聲音識別的累積效應和品牌價值貢獻[269]。

8.4.3 聲景行銷策略 (Soundscape Marketing Strategies)

聲景行銷策略代表了現代行銷理念的重要發展，它將聲音環境作為行銷傳播的重要載體和工具[270]。這種策略超越了傳統的視覺導向行銷模式，透過多感官的體驗設計來提升行銷效果和品牌影響力[271]。聲景行銷的理論基礎來自感官行銷(Sensory Marketing)的研究成果，強調透過感官刺激來影響消費者的認知、情感和行為[272]。

情境行銷是聲景行銷策略的重要形式，它透過營造特定的聲音情境來觸發消費者的情感反應和行為動機[273]。例如，在推廣海濱度假產品時使用海浪聲和海鷗叫聲；在推廣咖啡產品時使用咖啡豆研磨聲和咖啡館環境音；在推廣汽車產品時使用引擎聲和行駛音效等[274]。這種情境化的聲景設計能夠增強消費者的產品聯想和購買慾望[275]。

故事化行銷透過聲景來講述品牌故事和產品歷程。聲音具有強烈的敘事功能，能夠承載豐富的信息內容和情感色彩[276]。透過精心設計的聲音敘事，消費者能夠深入了解品牌的價值理念、產品的製作工藝、服務的品質承諾等[277]。這種故事化的行銷方式不僅能夠傳遞理性信息，還能夠建立情感連結和品牌認同[278]。

互動式聲景行銷強調消費者的主動參與和創造。透過移動應用、社交媒體、互動裝置等平台，消費者能夠參與聲景的創作和分享[279]。例如，邀請消費者錄製自己使用產品時的聲音、創作與品牌相關的聲景作品、參與聲音主題的社群活動等[280]。這種互動式的設計不僅能夠提高消費者的參與度，還能夠產生用戶生成內容(UGC)，擴大行銷影響力[281]。

跨通路整合是聲景行銷策略的重要特徵。現代消費者的購買路徑日趨複雜，涉及線上和線下的多個接觸點[282]。聲景行銷需要在所有接觸點保持一致性和連貫性，為消費者提供無縫的聲音體驗[283]。例如，電視廣告中的聲音元素延續到網路影片中，線上商城的聲音設計呼應實體店面的聲景氛圍等[284]。這種跨通路的整合能夠強化品牌印象和行銷效果[285]。

個性化聲景行銷是大數據時代的重要趨勢。基於消費者的行為數據、偏好設定、情境信息等，系統能夠為每位消費者提供個性化的聲景內容[286]。例如，根據消費者的音樂偏好推送相應風格的品牌聲景、根據消費者的地理位置提供本地化的聲音內容、根據消費者的購買歷史調整聲景的情感色調等[287]。這種個性化的設計能夠提高行銷信息的相關性和接受度[288]。

社會化聲景行銷利用社交媒體和網路社群的傳播力量。聲音內容具有很強的分享性和傳播性，特別是在短影片平台和音頻社交平台上[289]。品牌可以透過創作有趣的聲音內容、發起聲音挑戰活動、與網紅 KOL 合作聲景項目等方式，實現聲音內容的病毒式傳播[290]。這種社會化的行銷方式能夠以較低的成本獲得較大的影響力[291]。

效果評估是聲景行銷策略優化的重要環節。需要建立綜合的評估框架，包括曝光量、互動率、轉化率、品牌提及度等量化指標，以及品牌感知、情感反應、購買意向等質化指標[292]。神經行銷學方法能夠測量聲景對消費者大腦活動的影響，提供科學的效果評估[293]。社交媒體監測工具能夠追蹤聲景內容的傳播路徑和影響範圍[294]。長期的品牌追蹤研究能夠評估聲景行銷對品牌價值的累積貢獻[295]。

本章詳細探討了聲景在健康、教育、旅遊和商業等四個主要領域的跨領域應用。透過豐富的學術文獻支撐和實際案例分析，展現了聲景科學在現代社會中的廣泛應用價值和巨大發展潛力。

在健康領域，聲景已從傳統的噪音控制發展為積極的健康促進工具，在心理健康改善、醫療復健輔助和聲音治療應用等方面展現出顯著效果。研究證實，適當的聲景設計能夠加速壓力恢復、改善情緒狀態、促進身心健康。

在教育領域，聲景不僅是學習環境優化的重要因素，更是創新教學方法的載體。聲景教育培養學習者的聲音素養，教學應用案例展示了跨學科整合的可能性，學習環境聲景設計則為創造最佳學習條件提供了科學指導。

在旅遊領域，聲景旅遊作為新興旅遊形式，為遊客提供了多感官的文化體驗。聲音導覽技術的創新應用和文化資產聲景的保護傳承，不僅豐富了旅遊產品內容，也促進了文化多樣性的維護。

在商業領域，聲景已成為品牌競爭的重要工具。零售空間聲景設計影響消費者行為，品牌聲音識別塑造企業形象，聲景行銷策略則為市場推廣提供了新的

思路和方法。

總體而言，聲景的跨領域應用體現了現代社會對環境品質和人類福祉關係的深度認識。隨著技術進步和理論發展，聲景科學將在更多領域發揮重要作用，為創造更美好的聲音環境和提升人類生活品質做出貢獻。未來的研究需要進一步加強跨學科合作，完善評估體系，推動聲景應用的標準化和產業化發展。

參考文獻

[1] International Organization for Standardization. (2014). ISO 12913-1:2014 Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework. Geneva: ISO.

[2] Aletta, F., Oberman, T., & Kang, J. (2018). Associations between positive health-related effects and soundscapes perceptual constructs: A systematic review. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(11), 2392.

[3] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world. Rochester, VT: Destiny Books.

[4] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment, 108, 284-294.

[5] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

[6] International Organization for Standardization. (2018). ISO/TS 12913-2:2018 Acoustics — Soundscape — Part 2: Data collection and reporting requirements. Geneva: ISO.

[7] Aletta, F., & Torresin, S. (2023). Adoption of ISO/TS 12913-2: 2018 protocols for data collection from individuals in soundscape studies: An overview of the literature. Current Pollution Reports, 9(4), 571-585.

[8] Van Kamp, I., Klaeboe, R., Kruize, H., & Brown, A. L. (2016). Soundscapes, human restoration and quality of life. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 253, No. 7, pp. 3158-3169).

[9] Aletta, F., Oberman, T., & Kang, J. (2018). Associations between positive health-related effects and soundscapes perceptual constructs: A systematic review. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(11), 2392.

[10] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

[11] Ratcliffe, E. (2021). Sound and soundscape in restorative natural environments: A narrative literature review. Frontiers in Psychology, 12, 570563.

[12] Brown, B., Rutherford, P., & Crawford, P. (2015). The role of noise in clinical environments with particular reference to mental health care: A narrative review. International Journal of Nursing Studies, 52(9), 1514-1524.

[13] Wu, Y. (2024). An exploration of feasible approaches to soundscape and music therapy. SHS Web of Conferences, 186, 03022.

[14] Kaplan, R., & Kaplan, S. (1989). The experience of nature: A psychological perspective. Cambridge: Cambridge University Press.

[15] Kaplan, S. (1995). The restorative benefits of nature: Toward an integrative framework. Journal of Environmental Psychology, 15(3), 169-182.

[16] Gould van Praag, C. D., Garfinkel, S. N., Sparasci, O., Mees, A., Philippides, A. O., Ware, M., ... & Critchley, H. D. (2017). Mind-wandering and alterations to default mode network connectivity when listening to naturalistic versus artificial sounds. Scientific Reports, 7(1), 45273.

[17] Gould van Praag, C. D., Garfinkel, S. N., Sparasci, O., Mees, A., Philippides, A. O., Ware, M., ... & Critchley, H. D. (2017). Mind-wandering and alterations to default

mode network connectivity when listening to naturalistic versus artificial sounds. Scientific Reports, 7(1), 45273.

[18] Medvedev, O., Shepherd, D., & Hautus, M. J. (2015). The restorative potential of soundscapes: A physiological investigation. Applied Acoustics, 96, 20-26.

[19] Medvedev, O., Shepherd, D., & Hautus, M. J. (2015). The restorative potential of soundscapes: A physiological investigation. Applied Acoustics, 96, 20-26.

[20] Hedblom, M., Gunnarsson, B., Iravani, B., Knez, I., Schaefer, M., Thorsson, P., & Lundström, J. N. (2019). Reduction of physiological stress by urban green space in a multisensory virtual experiment. Scientific Reports, 9(1), 10113.

[21] Hedblom, M., Heyman, E., Antonsson, H., & Gunnarsson, B. (2014). Bird song diversity influences young people's appreciation of urban landscapes. Urban Forestry & Urban Greening, 13(3), 469-474.

[22] Zhou, T., Wu, Y., Meng, Q., & Kang, J. (2020). Influence of the acoustic environment in hospital wards on patient physiological and psychological indices. Frontiers in Psychology, 11, 1600.

[23] Van den Bosch, K., Welch, D., & Andringa, T. (2018). The evolution of soundscape appraisal through enactive cognition. Frontiers in Psychology, 9, 1129.

[24] Van den Bosch, K., Welch, D., & Andringa, T. (2018). The evolution of soundscape appraisal through enactive cognition. Frontiers in Psychology, 9, 1129.

[25] Zhang, Y., Kang, J., & Kang, J. (2017). Effects of soundscape on the environmental restoration in urban natural environments. Noise and Health, 19(87), 65-72.

[26] Zhang, Y., Kang, J., & Kang, J. (2017). Effects of soundscape on the environmental

restoration in urban natural environments. Noise and Health, 19(87), 65-72.

[27] Iyendo, T. O., Welch, D., & Uwajeh, P. C. (2024). Soundscape and natural landscape as a design construct for improving psycho-physiological health in cities: A semi-systematic literature review. Cities & Health, 8(1), 1-21.

[28] World Health Organization. (2001). International classification of functioning, disability and health: ICF. Geneva: World Health Organization.

[29] Brown, B., Rutherford, P., & Crawford, P. (2015). The role of noise in clinical environments with particular reference to mental health care: A narrative review. International Journal of Nursing Studies, 52(9), 1514-1524.

[30] Zhou, T., Wu, Y., Meng, Q., & Kang, J. (2020). Influence of the acoustic environment in hospital wards on patient physiological and psychological indices. Frontiers in Psychology, 11, 1600.

[31] Afrose, R. S., Sivashankari, E., & Vishnuram, S. (2024). Soundscapes for serenity: A quasi-experimental investigation into the impact of healing soundscapes on insomnia levels and well-being in hospitalized patients. International Journal of Public Health and Clinical Practice Research, 3(4), 1-12.

[32] Watts, G., Khan, A., & Pheasant, R. (2016). Influence of soundscape and interior design on anxiety and perceived tranquillity of patients in a healthcare setting. Applied Acoustics, 104, 135-141.

[33] Li, H., & Kang, J. (2019). Physiological and psychological effects of soundscape in different urban environments. Applied Acoustics, 145, 216-225.

[34] Kurukose Cal, H., Aletta, F., & Kang, J. (2025). Integration of soundscape assessment and design principles into international standards and guidelines for

learning environment acoustics. Building Acoustics, 32(1), 45-68.

[35] Bartalucci, C., & Luzzi, S. (2020). The soundscape in cultural heritage. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 949, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

[36] Watts, G., Khan, A., & Pheasant, R. (2016). Influence of soundscape and interior design on anxiety and perceived tranquillity of patients in a healthcare setting. Applied Acoustics, 104, 135-141.

[37] Watts, G., Khan, A., & Pheasant, R. (2016). Influence of soundscape and interior design on anxiety and perceived tranquillity of patients in a healthcare setting. Applied Acoustics, 104, 135-141.

[38] Afrose, R. S., Sivashankari, E., & Vishnuram, S. (2024). Soundscapes for serenity: A quasi-experimental investigation into the impact of healing soundscapes on insomnia levels and well-being in hospitalized patients. International Journal of Public Health and Clinical Practice Research, 3(4), 1-12.

[39] Annerstedt, M., Jönsson, P., Wallergård, M., Johansson, G., Karlson, B., Grahn, P., ... & Hansen, Å. M. (2013). Inducing physiological stress recovery with sounds of nature in a virtual reality forest—results from a pilot study. Physiology & Behavior, 118, 240-250.

[40] Wu, Y. (2024). An exploration of feasible approaches to soundscape and music therapy. SHS Web of Conferences, 186, 03022.

[41] Zhou, T., Wu, Y., Meng, Q., & Kang, J. (2020). Influence of the acoustic environment in hospital wards on patient physiological and psychological indices. Frontiers in Psychology, 11, 1600.

[42] Brown, B., Rutherford, P., & Crawford, P. (2015). The role of noise in clinical environments with particular reference to mental health care: A narrative review. International Journal of Nursing Studies, 52(9), 1514-1524.

[43] World Federation of Music Therapy. (2011). Definition of music therapy. Retrieved from https://www.wfmt.info/about-wfmt/what-is-music-therapy/

[44] World Federation of Music Therapy. (2011). Definition of music therapy. Retrieved from https://www.wfmt.info/about-wfmt/what-is-music-therapy/

[45] Thaut, M. H., & Hoemberg, V. (Eds.). (2014). Handbook of neurologic music therapy. Oxford University Press.

[46] Clayton, M., Sager, R., & Will, U. (2005). In time with the music: The concept of entrainment and its significance for ethnomusicology. European Meetings in Ethnomusicology, 11, 1-82.

[47] Ratcliffe, E. (2021). Sound and soundscape in restorative natural environments: A narrative literature review. Frontiers in Psychology, 12, 570563.

[48] Ratcliffe, E. (2021). Sound and soundscape in restorative natural environments: A narrative literature review. Frontiers in Psychology, 12, 570563.

[49] Leeds, J. (2010). The power of sound: How to be healthy and productive using music and sound. Healing Arts Press.

[50] Campbell, D. (2001). The Mozart effect: Tapping the power of music to heal the body, strengthen the mind, and unlock the creative spirit. Harper Paperbacks.

[51] Jirakittayakorn, N., & Wongsawat, Y. (2017). Brain responses to a 6-Hz binaural beat: Effects on general theta rhythm and frontal midline theta activity. Frontiers in

Neuroscience, 11, 365.

[52] Jirakittayakorn, N., & Wongsawat, Y. (2017). Brain responses to a 6-Hz binaural beat: Effects on general theta rhythm and frontal midline theta activity. Frontiers in Neuroscience, 11, 365.

[53] Cochrane, D. J. (2011). Vibration exercise: The potential benefits. International Journal of Sports Medicine, 32(02), 75-99.

[54] Rittweger, J. (2010). Vibration as an exercise modality: How it may work, and what its potential might be. European Journal of Applied Physiology, 108(5), 877-904.

[55] Wu, Y. (2024). An exploration of feasible approaches to soundscape and music therapy. SHS Web of Conferences, 186, 03022.

[56] Jirakittayakorn, N., & Wongsawat, Y. (2017). Brain responses to a 6-Hz binaural beat: Effects on general theta rhythm and frontal midline theta activity. Frontiers in Neuroscience, 11, 365.

[57] Aalbers, S., Fusar-Poli, L., Freeman, R. E., Spreen, M., Ket, J. C., Vink, A. C., ... & Gold, C. (2017). Music therapy for depression. Cochrane Database of Systematic Reviews, (11).

[58] Wu, Y. (2024). An exploration of feasible approaches to soundscape and music therapy. SHS Web of Conferences, 186, 03022.

[59] Aalbers, S., Fusar-Poli, L., Freeman, R. E., Spreen, M., Ket, J. C., Vink, A. C., ... & Gold, C. (2017). Music therapy for depression. Cochrane Database of Systematic Reviews, (11).

[60] Thaut, M. H., & Hoemberg, V. (Eds.). (2014). Handbook of neurologic music

therapy. Oxford University Press.

[61] Pääkkönen, R., Vehviläinen, T., Jokitulppo, J., Niemi, O., Nenonen, S., & Virjonen, P. (2015). Acoustics and new learning environment–A case study. Applied Acoustics, 100, 100-108.

[62] World Health Organization. (2015). School environment: Policies and current status. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

[63] Chan, Y. N., Choy, Y. S., To, W. M., & Lai, T. M. (2021). Influence of classroom soundscape on learning attitude. International Journal of Innovation and Learning, 29(3), 285-302.

[64] Flagg-Williams, J. B., Rubin, R. L., & Banana, E. (2011). Classroom soundscape. Educational & Child Psychology, 28(4), 90-104.

[65] Hytönen-Ng, E., Pihlainen, K., Ng, K., Ollikainen, A., & Laukkanen, H. (2022). Sounds of learning: Soundscapes—teacher perceptions of acoustic environments in Finland's open plan classrooms. Issues in Educational Research, 32(2), 559-575.

[66] Kurukose Cal, H., Aletta, F., & Kang, J. (2025). Integration of soundscape assessment and design principles into international standards and guidelines for learning environment acoustics. Building Acoustics, 32(1), 45-68.

[67] Pääkkönen, R., Vehviläinen, T., Jokitulppo, J., Niemi, O., Nenonen, S., & Virjonen, P. (2015). Acoustics and new learning environment–A case study. Applied Acoustics, 100, 100-108.

[68] Chan, Y. N., Choy, Y. S., To, W. M., & Lai, T. M. (2021). Influence of classroom soundscape on learning attitude. International Journal of Innovation and Learning, 29(3), 285-302.

[69] Annerstedt, M., Jönsson, P., Wallergård, M., Johansson, G., Karlson, B., Grahn, P., ... & Hansen, Å. M. (2013). Inducing physiological stress recovery with sounds of nature in a virtual reality forest—results from a pilot study. Physiology & Behavior, 118, 240-250.

[70] Hytönen-Ng, E., Pihlainen, K., Ng, K., Ollikainen, A., & Laukkanen, H. (2022). Sounds of learning: Soundscapes—teacher perceptions of acoustic environments in Finland's open plan classrooms. Issues in Educational Research, 32(2), 559-575.

[71] Schafer, R. M. (1967). Ear cleaning: Notes for an experimental music course. Clark & Cruickshank.

[72] Truax, B. (2019). Acoustic ecology and the world soundscape project. In Sound, media, ecology (pp. 21-44). Palgrave Macmillan.

[73] Aktaş, R. (2024). Environmental soundscapes: Soundmapping in music education. Charles University.

[74] Westerkamp, H. (2002). Linking soundscape composition and acoustic ecology. Organised Sound, 7(1), 51-56.

[75] Schafer, R. M. (1967). Ear cleaning: Notes for an experimental music course. Clark & Cruickshank.

[76] Aktaş, R. (2024). Environmental soundscapes: Soundmapping in music education. Charles University.

[77] Aktaş, R. (2024). Environmental soundscapes: Soundmapping in music education. Charles University.

[78] Westerkamp, H. (1974). Soundwalking. Sound Heritage, 3(4), 18-27.

[79] Galloway, K. (2018). Curating the aural cultures of the Battery: Soundwalking, auditory tourism and interactive locative media sound art. Tourist Studies, 18(1), 63-89.

[80] Truax, B. (2008). Soundscape composition as global music: Electroacoustic music as soundscape. Organised Sound, 13(2), 103-109.

[81] Aktaş, R. (2024). Environmental soundscapes: Soundmapping in music education. Charles University.

[82] UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Paris: UNESCO.

[83] UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Paris: UNESCO.

[84] Payne, S. R. (2013). The production of a perceived restorativeness soundscape scale. Applied Acoustics, 74(2), 255-263.

[85] Westerkamp, H. (2002). Linking soundscape composition and acoustic ecology. Organised Sound, 7(1), 51-56.

[86] Truax, B. (2019). Acoustic ecology and the world soundscape project. In Sound, media, ecology (pp. 21-44). Palgrave Macmillan.

[87] Milo, A. (2020). The acoustic designer: Joining soundscape and architectural acoustics in architectural design education. Building Acoustics, 27(1), 3-20.

[88] Hytönen-Ng, E., Pihlainen, K., Ng, K., Ollikainen, A., & Laukkanen, H. (2022). Sounds of learning: Soundscapes—teacher perceptions of acoustic environments in

Finland's open plan classrooms. Issues in Educational Research, 32(2), 559-575.

[89] Aktaş, R. (2024). Environmental soundscapes: Soundmapping in music education. Charles University.

[90] Milo, A. (2020). The acoustic designer: Joining soundscape and architectural acoustics in architectural design education. Building Acoustics, 27(1), 3-20.

[91] Hathcock, A. G. (2023). Sounds of the sacred: An examination of audio guides in religious cultural heritage institutions in Spain. Linköping University.

[92] Dedousis, G., Katsantonis, K., Georgaki, A., & Andreopoulou, A. (2021). Designing historically informed soundscapes for the augmentation of modern travel-guides: Challenges and compromises. In The 26th International Conference on Auditory Display (ICAD 2021).

[93] UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Paris: UNESCO.

[94] Li, J., Burroughs, K., Halim, M. F., Penbrooke, T. L.,Ususu, C., Kim, Y., ... & Axel, A. C. (2018). Assessing soundscape preferences and the impact of specific sounds on outdoor recreation activities using qualitative data analysis and immersive virtual reality. Journal of Outdoor Recreation and Tourism, 23, 10-19.

[95] Ratcliffe, E. (2021). Sound and soundscape in restorative natural environments: A narrative literature review. Frontiers in Psychology, 12, 570563.

[96] Fisher, J. C., Kastner, K., Hyseni, B., Lohse, M., & Bradfer-Lawrence, T. (2021). The soundscape of restoration: Quantifying the acoustic space of urban habitat restoration. Journal of Applied Ecology, 58(9), 1805-1815.

[97] Dedousis, G., Katsantonis, K., Georgaki, A., & Andreopoulou, A. (2021). Designing historically informed soundscapes for the augmentation of modern travel-guides: Challenges and compromises. In The 26th International Conference on Auditory Display (ICAD 2021).

[98] Hathcock, A. G. (2023). Sounds of the sacred: An examination of audio guides in religious cultural heritage institutions in Spain. Linköping University.

[99] Bartalucci, C., & Luzzi, S. (2020). The soundscape in cultural heritage. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 949, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

[100] Aktaş, R. (2024). Environmental soundscapes: Soundmapping in music education. Charles University.

[101] Truax, B. (2008). Soundscape composition as global music: Electroacoustic music as soundscape. Organised Sound, 13(2), 103-109.

[102] Westerkamp, H. (2002). Linking soundscape composition and acoustic ecology. Organised Sound, 7(1), 51-56.

[103] Milo, A. (2020). The acoustic designer: Joining soundscape and architectural acoustics in architectural design education. Building Acoustics, 27(1), 3-20.

[104] Shaw, B., Howe, J., Beazer, A., & Carr, D. (2015). An exploration of the experiences of individuals with sight impairment when outdoors: Participatory research in practice. Research and Practice in Social Sciences, 10(2), 5-22.

[105] Bell, S. L. (2019). Experiencing nature with sight impairment: Seeking freedom from ableism. Environment and Planning E: Nature and Space, 2(2), 304-322.

[106] Grandin, T. (2009). How does visual thinking work in the mind of a person with autism? A personal account. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 364(1522), 1437-1442.

[107] Annerstedt, M., Jönsson, P., Wallergård, M., Johansson, G., Karlson, B., Grahn, P., ... & Hansen, Å. M. (2013). Inducing physiological stress recovery with sounds of nature in a virtual reality forest—results from a pilot study. Physiology & Behavior, 118, 240-250.

[108] Orio, N., De Carolis, B., & Liotard, F. (2021). Locate your soundscape: Interacting with the acoustic environment. Multimedia Tools and Applications, 80(21), 32035-32055.

[109] Chan, Y. N., Choy, Y. S., To, W. M., & Lai, T. M. (2021). Influence of classroom soundscape on learning attitude. International Journal of Innovation and Learning, 29(3), 285-302.

[110] Payne, S. R. (2013). The production of a perceived restorativeness soundscape scale. Applied Acoustics, 74(2), 255-263.

[111] Aktaş, R. (2024). Environmental soundscapes: Soundmapping in music education. Charles University.

[112] Milo, A. (2020). The acoustic designer: Joining soundscape and architectural acoustics in architectural design education. Building Acoustics, 27(1), 3-20.

[113] Pääkkönen, R., Vehviläinen, T., Jokitulppo, J., Niemi, O., Nenonen, S., & Virjonen, P. (2015). Acoustics and new learning environment–A case study. Applied Acoustics, 100, 100-108.

[114] Chan, Y. N., Choy, Y. S., To, W. M., & Lai, T. M. (2021). Influence of classroom

soundscape on learning attitude. International Journal of Innovation and Learning, 29(3), 285-302.

[115] Kurukose Cal, H., Aletta, F., & Kang, J. (2025). Integration of soundscape assessment and design principles into international standards and guidelines for learning environment acoustics. Building Acoustics, 32(1), 45-68.

[116] Flagg-Williams, J. B., Rubin, R. L., & Banana, E. (2011). Classroom soundscape. Educational & Child Psychology, 28(4), 90-104.

[117] Chan, Y. N., Choy, Y. S., To, W. M., & Lai, T. M. (2021). Influence of classroom soundscape on learning attitude. International Journal of Innovation and Learning, 29(3), 285-302.

[118] Hytönen-Ng, E., Pihlainen, K., Ng, K., Ollikainen, A., & Laukkanen, H. (2022). Sounds of learning: Soundscapes—teacher perceptions of acoustic environments in Finland's open plan classrooms. Issues in Educational Research, 32(2), 559-575.

[119] Pääkkönen, R., Vehviläinen, T., Jokitulppo, J., Niemi, O., Nenonen, S., & Virjonen, P. (2015). Acoustics and new learning environment–A case study. Applied Acoustics, 100, 100-108.

[120] Chan, Y. N., Choy, Y. S., To, W. M., & Lai, T. M. (2021). Influence of classroom soundscape on learning attitude. International Journal of Innovation and Learning, 29(3), 285-302.

[121] Kurukose Cal, H., Aletta, F., & Kang, J. (2025). Integration of soundscape assessment and design principles into international standards and guidelines for learning environment acoustics. Building Acoustics, 32(1), 45-68.

[122] Flagg-Williams, J. B., Rubin, R. L., & Banana, E. (2011). Classroom soundscape.

Educational & Child Psychology, 28(4), 90-104.

[123] Ratcliffe, E. (2021). Sound and soundscape in restorative natural environments: A narrative literature review. Frontiers in Psychology, 12, 570563.

[124] Chan, Y. N., Choy, Y. S., To, W. M., & Lai, T. M. (2021). Influence of classroom soundscape on learning attitude. International Journal of Innovation and Learning, 29(3), 285-302.

[125] Kurukose Cal, H., Aletta, F., & Kang, J. (2025). Integration of soundscape assessment and design principles into international standards and guidelines for learning environment acoustics. Building Acoustics, 32(1), 45-68.

[126] Hytönen-Ng, E., Pihlainen, K., Ng, K., Ollikainen, A., & Laukkanen, H. (2022). Sounds of learning: Soundscapes—teacher perceptions of acoustic environments in Finland's open plan classrooms. Issues in Educational Research, 32(2), 559-575.

[127] Chan, Y. N., Choy, Y. S., To, W. M., & Lai, T. M. (2021). Influence of classroom soundscape on learning attitude. International Journal of Innovation and Learning, 29(3), 285-302.

[128] UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Paris: UNESCO.

[129] Hedblom, M., Gunnarsson, B., Iravani, B., Knez, I., Schaefer, M., Thorsson, P., & Lundström, J. N. (2019). Reduction of physiological stress by urban green space in a multisensory virtual experiment. Scientific Reports, 9(1), 10113.

[130] Aletta, F., & Torresin, S. (2023). Adoption of ISO/TS 12913-2: 2018 protocols for data collection from individuals in soundscape studies: An overview of the literature. Current Pollution Reports, 9(4), 571-585.

[131] Kurukose Cal, H., Aletta, F., & Kang, J. (2025). Integration of soundscape assessment and design principles into international standards and guidelines for learning environment acoustics. Building Acoustics, 32(1), 45-68.

[132] Chan, Y. N., Choy, Y. S., To, W. M., & Lai, T. M. (2021). Influence of classroom soundscape on learning attitude. International Journal of Innovation and Learning, 29(3), 285-302.

[133] Pääkkönen, R., Vehviläinen, T., Jokitulppo, J., Niemi, O., Nenonen, S., & Virjonen, P. (2015). Acoustics and new learning environment–A case study. Applied Acoustics, 100, 100-108.

[134] Kurukose Cal, H., Aletta, F., & Kang, J. (2025). Integration of soundscape assessment and design principles into international standards and guidelines for learning environment acoustics. Building Acoustics, 32(1), 45-68.

[135] Hytönen-Ng, E., Pihlainen, K., Ng, K., Ollikainen, A., & Laukkanen, H. (2022). Sounds of learning: Soundscapes—teacher perceptions of acoustic environments in Finland's open plan classrooms. Issues in Educational Research, 32(2), 559-575.

[136] Chan, Y. N., Choy, Y. S., To, W. M., & Lai, T. M. (2021). Influence of classroom soundscape on learning attitude. International Journal of Innovation and Learning, 29(3), 285-302.

[137] Kurukose Cal, H., Aletta, F., & Kang, J. (2025). Integration of soundscape assessment and design principles into international standards and guidelines for learning environment acoustics. Building Acoustics, 32(1), 45-68.

[138] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

[139] Kurukose Cal, H., Aletta, F., & Kang, J. (2025). Integration of soundscape assessment and design principles into international standards and guidelines for learning environment acoustics. Building Acoustics, 32(1), 45-68.

[140] Dávid, L. D., Varga, I., & Beták, N. (2024). Soundscapes and sonicscapes in tourism: A decade of research insights from bibliometric analysis. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8(11), 6789.

[141] Pine, B. J., & Gilmore, J. H. (2011). The experience economy. Harvard Business Review Press.

[142] Bai, W. B., Wang, J. J., Wong, J. W. C., Han, X. H., & Kang, J. (2024). The soundscape and tourism experience in rural destinations: An empirical investigation from Shawan Ancient Town. Humanities and Social Sciences Communications, 11(1), 697.

[143] Galloway, K. (2018). Curating the aural cultures of the Battery: Soundwalking, auditory tourism and interactive locative media sound art. Tourist Studies, 18(1), 63-89.

[144] Dávid, L. D., Varga, I., & Beták, N. (2024). Soundscapes and sonicscapes in tourism: A decade of research insights from bibliometric analysis. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8(11), 6789.

[145] Orio, N., De Carolis, B., & Liotard, F. (2021). Locate your soundscape: Interacting with the acoustic environment. Multimedia Tools and Applications, 80(21), 32035-32055.

[146] Dávid, L. D., Varga, I., & Beták, N. (2024). Soundscapes and sonicscapes in tourism: A decade of research insights from bibliometric analysis. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8(11), 6789.

[147] Galloway, K. (2018). Curating the aural cultures of the Battery: Soundwalking, auditory tourism and interactive locative media sound art. Tourist Studies, 18(1), 63-89.

[148] Bai, W. B., Wang, J. J., Wong, J. W. C., Han, X. H., & Kang, J. (2024). The soundscape and tourism experience in rural destinations: An empirical investigation from Shawan Ancient Town. Humanities and Social Sciences Communications, 11(1), 697.

[149] Bartalucci, C., & Luzzi, S. (2020). The soundscape in cultural heritage. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 949, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

[150] Bai, W. B., Wang, J. J., Wong, J. W. C., Han, X. H., & Kang, J. (2024). The soundscape and tourism experience in rural destinations: An empirical investigation from Shawan Ancient Town. Humanities and Social Sciences Communications, 11(1), 697.

[151] Li, J., Burroughs, K., Halim, M. F., Penbrooke, T. L., Ususu, C., Kim, Y., ... & Axel, A. C. (2018). Assessing soundscape preferences and the impact of specific sounds on outdoor recreation activities using qualitative data analysis and immersive virtual reality. Journal of Outdoor Recreation and Tourism, 23, 10-19.

[152] Ratcliffe, E. (2021). Sound and soundscape in restorative natural environments: A narrative literature review. Frontiers in Psychology, 12, 570563.

[153] Fisher, J. C., Kastner, K., Hyseni, B., Lohse, M., & Bradfer-Lawrence, T. (2021). The soundscape of restoration: Quantifying the acoustic space of urban habitat restoration. Journal of Applied Ecology, 58(9), 1805-1815.

[154] Hathcock, A. G. (2023). Sounds of the sacred: An examination of audio guides in

religious cultural heritage institutions in Spain. Linköping University.

[155] UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Paris: UNESCO.

[156] Galloway, K. (2018). Curating the aural cultures of the Battery: Soundwalking, auditory tourism and interactive locative media sound art. Tourist Studies, 18(1), 63-89.

[157] Orio, N., De Carolis, B., & Liotard, F. (2021). Locate your soundscape: Interacting with the acoustic environment. Multimedia Tools and Applications, 80(21), 32035-32055.

[158] Dávid, L. D., Varga, I., & Beták, N. (2024). Soundscapes and sonicscapes in tourism: A decade of research insights from bibliometric analysis. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8(11), 6789.

[159] Li, J., Burroughs, K., Halim, M. F., Penbrooke, T. L., Ususu, C., Kim, Y., ... & Axel, A. C. (2018). Assessing soundscape preferences and the impact of specific sounds on outdoor recreation activities using qualitative data analysis and immersive virtual reality. Journal of Outdoor Recreation and Tourism, 23, 10-19.

[160] Bartalucci, C., & Luzzi, S. (2020). The soundscape in cultural heritage. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 949, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

[161] Dávid, L. D., Varga, I., & Beták, N. (2024). Soundscapes and sonicscapes in tourism: A decade of research insights from bibliometric analysis. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8(11), 6789.

[162] Bai, W. B., Wang, J. J., Wong, J. W. C., Han, X. H., & Kang, J. (2024). The soundscape and tourism experience in rural destinations: An empirical investigation

from Shawan Ancient Town. Humanities and Social Sciences Communications, 11(1), 697.

[163] Li, J., Burroughs, K., Halim, M. F., Penbrooke, T. L., Ususu, C., Kim, Y., ... & Axel, A. C. (2018). Assessing soundscape preferences and the impact of specific sounds on outdoor recreation activities using qualitative data analysis and immersive virtual reality. Journal of Outdoor Recreation and Tourism, 23, 10-19.

[164] Bai, W. B., Wang, J. J., Wong, J. W. C., Han, X. H., & Kang, J. (2024). The soundscape and tourism experience in rural destinations: An empirical investigation from Shawan Ancient Town. Humanities and Social Sciences Communications, 11(1), 697.

[165] Hathcock, A. G. (2023). Sounds of the sacred: An examination of audio guides in religious cultural heritage institutions in Spain. Linköping University.

[166] Dedousis, G., Katsantonis, K., Georgaki, A., & Andreopoulou, A. (2021). Designing historically informed soundscapes for the augmentation of modern travel-guides: Challenges and compromises. In The 26th International Conference on Auditory Display (ICAD 2021).

[167] Galloway, K. (2018). Curating the aural cultures of the Battery: Soundwalking, auditory tourism and interactive locative media sound art. Tourist Studies, 18(1), 63-89.

[168] Hathcock, A. G. (2023). Sounds of the sacred: An examination of audio guides in religious cultural heritage institutions in Spain. Linköping University.

[169] Orio, N., De Carolis, B., & Liotard, F. (2021). Locate your soundscape: Interacting with the acoustic environment. Multimedia Tools and Applications, 80(21), 32035-32055.

[170] Galloway, K. (2018). Curating the aural cultures of the Battery: Soundwalking, auditory tourism and interactive locative media sound art. Tourist Studies, 18(1), 63-89.

[171] Dedousis, G., Katsantonis, K., Georgaki, A., & Andreopoulou, A. (2021). Designing historically informed soundscapes for the augmentation of modern travel-guides: Challenges and compromises. In The 26th International Conference on Auditory Display (ICAD 2021).

[172] Annerstedt, M., Jönsson, P., Wallergård, M., Johansson, G., Karlson, B., Grahn, P., ... & Hansen, Å. M. (2013). Inducing physiological stress recovery with sounds of nature in a virtual reality forest—results from a pilot study. Physiology & Behavior, 118, 240-250.

[173] Orio, N., De Carolis, B., & Liotard, F. (2021). Locate your soundscape: Interacting with the acoustic environment. Multimedia Tools and Applications, 80(21), 32035-32055.

[174] Hathcock, A. G. (2023). Sounds of the sacred: An examination of audio guides in religious cultural heritage institutions in Spain. Linköping University.

[175] Dávid, L. D., Varga, I., & Beták, N. (2024). Soundscapes and sonicscapes in tourism: A decade of research insights from bibliometric analysis. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8(11),

[176] Orio, N., De Carolis, B., & Liotard, F. (2021). Locate your soundscape: Interacting with the acoustic environment. Multimedia Tools and Applications, 80(21), 32035-32055.

[177] Galloway, K. (2018). Curating the aural cultures of the Battery: Soundwalking, auditory tourism and interactive locative media sound art. Tourist Studies, 18(1), 63-89.

[178] Galloway, K. (2018). Curating the aural cultures of the Battery: Soundwalking, auditory tourism and interactive locative media sound art. Tourist Studies, 18(1), 63-89.

[179] Westerkamp, H. (1974). Soundwalking. Sound Heritage, 3(4), 18-27.

[180] Dedousis, G., Katsantonis, K., Georgaki, A., & Andreopoulou, A. (2021). Designing historically informed soundscapes for the augmentation of modern travel-guides: Challenges and compromises. In The 26th International Conference on Auditory Display (ICAD 2021).

[181] Hathcock, A. G. (2023). Sounds of the sacred: An examination of audio guides in religious cultural heritage institutions in Spain. Linköping University.

[182] Orio, N., De Carolis, B., & Liotard, F. (2021). Locate your soundscape: Interacting with the acoustic environment. Multimedia Tools and Applications, 80(21), 32035-32055.

[183] Galloway, K. (2018). Curating the aural cultures of the Battery: Soundwalking, auditory tourism and interactive locative media sound art. Tourist Studies, 18(1), 63-89.

[184] Dávid, L. D., Varga, I., & Beták, N. (2024). Soundscapes and sonicscapes in tourism: A decade of research insights from bibliometric analysis. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8(11), 6789.

[185] Orio, N., De Carolis, B., & Liotard, F. (2021). Locate your soundscape: Interacting with the acoustic environment. Multimedia Tools and Applications, 80(21), 32035-32055.

[186] Hathcock, A. G. (2023). Sounds of the sacred: An examination of audio guides in religious cultural heritage institutions in Spain. Linköping University.

[187] Dedousis, G., Katsantonis, K., Georgaki, A., & Andreopoulou, A. (2021). Designing historically informed soundscapes for the augmentation of modern travel-guides: Challenges and compromises. In The 26th International Conference on

Auditory Display (ICAD 2021).

[188] UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Paris: UNESCO.

[189] UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Paris: UNESCO.

[190] Bartalucci, C., & Luzzi, S. (2020). The soundscape in cultural heritage. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 949, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

[191] Dedousis, G., Katsantonis, K., Georgaki, A., & Andreopoulou, A. (2021). Designing historically informed soundscapes for the augmentation of modern travel-guides: Challenges and compromises. In The 26th International Conference on Auditory Display (ICAD 2021).

[192] Dedousis, G., Katsantonis, K., Georgaki, A., & Andreopoulou, A. (2021). Designing historically informed soundscapes for the augmentation of modern travel-guides: Challenges and compromises. In The 26th International Conference on Auditory Display (ICAD 2021).

[193] Hathcock, A. G. (2023). Sounds of the sacred: An examination of audio guides in religious cultural heritage institutions in Spain. Linköping University.

[194] Bartalucci, C., & Luzzi, S. (2020). The soundscape in cultural heritage. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 949, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

[195] Hathcock, A. G. (2023). Sounds of the sacred: An examination of audio guides in religious cultural heritage institutions in Spain. Linköping University.

[196] UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Paris: UNESCO.

[197] Bartalucci, C., & Luzzi, S. (2020). The soundscape in cultural heritage. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 949, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

[198] UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Paris: UNESCO.

[199] Bartalucci, C., & Luzzi, S. (2020). The soundscape in cultural heritage. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 949, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

[200] Sterne, J. (1997). Sounds like the Mall of America: Programmed music and the architectonics of commercial space. Ethnomusicology, 41(1), 22-50.

[201] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world. Rochester, VT: Destiny Books.

[202] Truax, B. (2019). Acoustic ecology and the world soundscape project. In Sound, media, ecology (pp. 21-44). Palgrave Macmillan.

[203] UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Paris: UNESCO.

[204] Dávid, L. D., Varga, I., & Beták, N. (2024). Soundscapes and sonicscapes in tourism: A decade of research insights from bibliometric analysis. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8(11), 6789.

[205] Bartalucci, C., & Luzzi, S. (2020). The soundscape in cultural heritage. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 949, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

[206] UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Paris: UNESCO.

[207] Bai, W. B., Wang, J. J., Wong, J. W. C., Han, X. H., & Kang, J. (2024). The soundscape and tourism experience in rural destinations: An empirical investigation from Shawan Ancient Town. Humanities and Social Sciences Communications, 11(1), 697.

[208] UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Paris: UNESCO.

[209] Bartalucci, C., & Luzzi, S. (2020). The soundscape in cultural heritage. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 949, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

[210] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[211] Pine, B. J., & Gilmore, J. H. (2011). The experience economy. Harvard Business Review Press.

[212] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[213] Carron, M., Dubois, F., Misdariis, N., Talotte, C., Susini, P., & Landry, S. (2014). Designing sound identity: Providing new communication tools for building brands' "corporate sound". In Proceedings of the 9th Audio Mostly Conference (pp. 1-8).

[214] Mehrabian, A., & Russell, J. A. (1974). An approach to environmental psychology. MIT Press.

[215] Kontukoski, M. (2018). Nature sounds in a hypermarket: A case study on the modified soundscape of commercial spaces in Finland. Etnomusikologian Vuosikirja, 30, 280-302.

[216] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[217] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[218] Carron, M., Dubois, F., Misdariis, N., Talotte, C., Susini, P., & Landry, S. (2014). Designing sound identity: Providing new communication tools for building brands' "corporate sound". In Proceedings of the 9th Audio Mostly Conference (pp. 1-8).

[219] Sterne, J. (1997). Sounds like the Mall of America: Programmed music and the architectonics of commercial space. Ethnomusicology, 41(1), 22-50.

[220] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[221] Kontukoski, M. (2018). Nature sounds in a hypermarket: A case study on the modified soundscape of commercial spaces in Finland. Etnomusikologian Vuosikirja, 30, 280-302.

[222] North, A. C., Hargreaves, D. J., & McKendrick, J. (1999). The influence of in-store music on wine selections. Journal of Applied Psychology, 84(2), 271-276.

[223] Milliman, R. E. (1982). Using background music to affect the behavior of supermarket shoppers. Journal of Marketing, 46(3), 86-91.

[224] Areni, C. S., & Kim, D. (1993). The influence of background music on shopping behavior: Classical versus top-forty music in a wine store. Advances in Consumer Research, 20, 336-340.

[225] Yalch, R. F., & Spangenberg, E. R. (2000). The effects of music in a retail setting on real and perceived shopping times. Journal of Business Research, 49(2), 139-147.

[226] Kontukoski, M. (2018). Nature sounds in a hypermarket: A case study on the modified soundscape of commercial spaces in Finland. Etnomusikologian Vuosikirja, 30, 280-302.

[227] Sterne, J. (1997). Sounds like the Mall of America: Programmed music and the architectonics of commercial space. Ethnomusicology, 41(1), 22-50.

[228] North, A. C., & Hargreaves, D. J. (1996). The effects of music on responses to a dining area. Journal of Environmental Psychology, 16(1), 55-64.

[229] Milliman, R. E. (1986). The influence of background music on the behavior of restaurant patrons. Journal of Consumer Research, 13(2), 286-289.

[230] North, A. C., Shilcock, A., & Hargreaves, D. J. (2003). The effect of musical style on restaurant customers' spending. Environment and Behavior, 35(5), 712-718.

[231] Sterne, J. (1997). Sounds like the Mall of America: Programmed music and the architectonics of commercial space. Ethnomusicology, 41(1), 22-50.

[232] Kontukoski, M. (2018). Nature sounds in a hypermarket: A case study on the modified soundscape of commercial spaces in Finland. Etnomusikologian Vuosikirja,

30, 280-302.

[233] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[234] Kontukoski, M. (2018). Nature sounds in a hypermarket: A case study on the modified soundscape of commercial spaces in Finland. Etnomusikologian Vuosikirja, 30, 280-302.

[235] Kontukoski, M. (2018). Nature sounds in a hypermarket: A case study on the modified soundscape of commercial spaces in Finland. Etnomusikologian Vuosikirja, 30, 280-302.

[236] Alvarsson, J. J., Wiens, S., & Nilsson, M. E. (2010). Stress recovery during exposure to nature sound and environmental noise. International Journal of Environmental Research and Public Health, 7(3), 1036-1046.

[237] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[238] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[239] Carron, M., Dubois, F., Misdariis, N., Talotte, C., Susini, P., & Landry, S. (2014). Designing sound identity: Providing new communication tools for building brands' "corporate sound". In Proceedings of the 9th Audio Mostly Conference (pp. 1-8).

[240] Milliman, R. E. (1982). Using background music to affect the behavior of supermarket shoppers. Journal of Marketing, 46(3), 86-91.

[241] North, A. C., Hargreaves, D. J., & McKendrick, J. (1999). The influence of in-

store music on wine selections. Journal of Applied Psychology, 84(2), 271-276.

[242] Yalch, R. F., & Spangenberg, E. R. (2000). The effects of music in a retail setting on real and perceived shopping times. Journal of Business Research, 49(2), 139-147.

[243] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[244] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[245] Toppano, E., & Toppano, A. (2014). The role of sound in brand communication. In Proceedings of the International Conference on e-Commerce (pp. 195-202).

[246] Carron, M., Dubois, F., Misdariis, N., Talotte, C., Susini, P., & Landry, S. (2014). Designing sound identity: Providing new communication tools for building brands' "corporate sound". In Proceedings of the 9th Audio Mostly Conference (pp. 1-8).

[247] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[248] Jackson, D. M. (2003). Sonic branding: An introduction. Palgrave Macmillan.

[249] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[250] Carron, M., Dubois, F., Misdariis, N., Talotte, C., Susini, P., & Landry, S. (2014). Designing sound identity: Providing new communication tools for building brands' "corporate sound". In Proceedings of the 9th Audio Mostly Conference (pp. 1-8).

[251] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review.

Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[252] Jackson, D. M. (2003). Sonic branding: An introduction. Palgrave Macmillan.

[253] Toppano, E., & Toppano, A. (2014). The role of sound in brand communication. In Proceedings of the International Conference on e-Commerce (pp. 195-202).

[254] Carron, M., Dubois, F., Misdariis, N., Talotte, C., Susini, P., & Landry, S. (2014). Designing sound identity: Providing new communication tools for building brands' "corporate sound". In Proceedings of the 9th Audio Mostly Conference (pp. 1-8).

[255] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[256] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[257] Sterne, J. (1997). Sounds like the Mall of America: Programmed music and the architectonics of commercial space. Ethnomusicology, 41(1), 22-50.

[258] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[259] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[260] Toppano, E., & Toppano, A. (2014). The role of sound in brand communication. In Proceedings of the International Conference on e-Commerce (pp. 195-202).

[261] Jackson, D. M. (2003). Sonic branding: An introduction. Palgrave Macmillan.

[262] Carron, M., Dubois, F., Misdariis, N., Talotte, C., Susini, P., & Landry, S. (2014). Designing sound identity: Providing new communication tools for building brands' "corporate sound". In Proceedings of the 9th Audio Mostly Conference (pp. 1-8).

[263] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[264] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[265] Carron, M., Dubois, F., Misdariis, N., Talotte, C., Susini, P., & Landry, S. (2014). Designing sound identity: Providing new communication tools for building brands' "corporate sound". In Proceedings of the 9th Audio Mostly Conference (pp. 1-8).

[266] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[267] Toppano, E., & Toppano, A. (2014). The role of sound in brand communication. In Proceedings of the International Conference on e-Commerce (pp. 195-202).

[268] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[269] Jackson, D. M. (2003). Sonic branding: An introduction. Palgrave Macmillan.

[270] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[271] Krishna, A. (2012). An integrative review of sensory marketing: Engaging the senses to affect perception, judgment and behavior. Journal of Consumer Psychology, 22(3), 332-351.

[272] Hultén, B. (2011). Sensory marketing: The multi-sensory brand-experience concept. European Business Review, 23(3), 256-273.

[273] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[274] Carron, M., Dubois, F., Misdariis, N., Talotte, C., Susini, P., & Landry, S. (2014). Designing sound identity: Providing new communication tools for building brands' "corporate sound". In Proceedings of the 9th Audio Mostly Conference (pp. 1-8).

[275] Kontukoski, M. (2018). Nature sounds in a hypermarket: A case study on the modified soundscape of commercial spaces in Finland. Etnomusikologian Vuosikirja, 30, 280-302.

[276] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[277] Toppano, E., & Toppano, A. (2014). The role of sound in brand communication. In Proceedings of the International Conference on e-Commerce (pp. 195-202).

[278] Jackson, D. M. (2003). Sonic branding: An introduction. Palgrave Macmillan.

[279] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[280] Carron, M., Dubois, F., Misdariis, N., Talotte, C., Susini, P., & Landry, S. (2014). Designing sound identity: Providing new communication tools for building brands' "corporate sound". In Proceedings of the 9th Audio Mostly Conference (pp. 1-8).

[281] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review.

Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[282] Verhoef, P. C., Kannan, P. K., & Inman, J. J. (2015). From multi-channel retailing to omni-channel retailing: Introduction to the special issue on multi-channel retailing. Journal of Retailing, 91(2), 174-181.

[283] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[284] Toppano, E., & Toppano, A. (2014). The role of sound in brand communication. In Proceedings of the International Conference on e-Commerce (pp. 195-202).

[285] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[286] Carron, M., Dubois, F., Misdariis, N., Talotte, C., Susini, P., & Landry, S. (2014). Designing sound identity: Providing new communication tools for building brands' "corporate sound". In Proceedings of the 9th Audio Mostly Conference (pp. 1-8).

[287] Krishna, A. (2012). An integrative review of sensory marketing: Engaging the senses to affect perception, judgment and behavior. Journal of Consumer Psychology, 22(3), 332-351.

[288] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[289] Šiburkis, J. (2023). The use of audio branding in the case of small and medium-sized businesses. Vytautas Magnus University.

[290] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

[291] Toppano, E., & Toppano, A. (2014). The role of sound in brand communication. In Proceedings of the International Conference on e-Commerce (pp. 195-202).

[292] Jackson, D. M. (2003). Sonic branding: An introduction. Palgrave Macmillan.

[293] Khamis, S., & Keogh, B. (2021). Sonic branding and the aesthetic infrastructure of everyday consumption. Popular Music, 40(1), 30-48.

[294] Carron, M., Dubois, F., Misdariis, N., Talotte, C., Susini, P., & Landry, S. (2014). Designing sound identity: Providing new communication tools for building brands' "corporate sound". In Proceedings of the 9th Audio Mostly Conference (pp. 1-8).

[295] Gustafsson, C. (2015). Sonic branding: A consumer-oriented literature review. Journal of Brand Management, 22(1), 20-41.

第九章 水下聲景與海洋環境
(Underwater Soundscape and Marine Environment)

水下聲景與海洋環境的研究代表了聲景科學領域中最具挑戰性和重要性的前沿方向，這個領域的發展不僅拓展了我們對聲音在海洋生態系統中作用的理解，更揭示了人類活動對海洋聲音環境所造成的深遠影響。海洋聲景研究的興起源於對海洋生物聲學行為的深入探索，以及對人為噪音日益增長的環境關注，這兩個因素的結合催生了一個全新的跨學科研究領域，融合了海洋學、生物學、聲學工程和環境科學等多個專業領域的知識和方法。Duarte 等人(2021)[1]在《科學》期刊發表的重要綜述中指出，人類世的海洋聲景正在經歷前所未有的改變，這種改變對海洋生物造成的影響可能比我們之前認識的更加深遠和複雜。海洋作為地球上最大的聲學環境，其聲景的複雜性遠超過陸地環境，這是因為聲音在水中的傳播特性與在空氣中截然不同，水的密度和可壓縮性使得聲波能夠傳播得更遠、更快，同時也使得海洋成為一個高度連通的聲學系統。

海洋聲景的研究重要性體現在多個層面，首先是生態學層面的重要性，海洋生物對聲音的依賴程度遠超過我們的想像，許多海洋動物利用聲音進行導航、覓食、交配、親子溝通和危險警告等重要生命活動。鯨豚類動物的回聲定位能力、魚類的聲學溝通行為、以及許多海洋無脊椎動物對聲音環境的敏感性，都說明了聲景在海洋生態系統中的核心地位。Harris & Radford(2014)[2]在他們關於海洋聲景生態學的研究中強調，海洋聲景不僅是生物個體行為的重要影響因素，更是整個海洋生態系統功能和結構的重要組成部分，聲景的變化會引發生態系統的連鎖反應，影響生物群落的組成、分布和相互作用模式。其次是保育層面的重要性，隨著全球海運業的快速發展、海洋工程活動的增加，以及軍事聲納使用的擴大，海洋環境中的人為噪音水平持續上升，對海洋生物造成了嚴重的負面影響。這些影響包括行為改變、生理壓力、聽覺損傷、棲息地放棄，甚至直接導致死亡的極端案例。第三是科學研究層面的重要性，水下聲景研究為我們提供了一個全新的視角來理解海洋生態系統，透過聲學監測技術，我們能夠在不干擾海洋生物的情況下，長期、連續地監測海洋生態系統的狀態和變化，這種被動監測方法在傳統的海洋生物研究中具有獨特的優勢。

海洋聲景研究面臨的挑戰同樣是多方面的，技術挑戰包括水下聲學監測設備的設計和部署、大量聲學數據的處理和分析、以及複雜海洋環境中聲音傳播模型的建立等。理論挑戰包括建立海洋聲景與生態功能之間的定量關係、理解不同空間和時間尺度上的聲景變化模式、以及評估人為噪音對海洋生態系統的累積影響等。實踐挑戰包括制定有效的海洋噪音管理政策、在經濟發展和環境保護之間找到平衡點、以及建立國際合作機制來應對跨界的海洋噪音問題等。Butler 等人(2016)[3]在他們關於近岸熱帶棲息地水下聲景的研究中指出，環境退化和棲息地修復對海洋聲景的影響呈現複雜的空間和時間模式，這種複雜性要求我們發展更加精細和綜合的研究方法來理解海洋聲景的動態變化。當前海洋聲景研究的發展趨勢包括技術創新的加速、跨學科合作的深化、政策法規的完善、以及國際合作機制的建立等多個方面，這些發展為解決海洋聲景面臨的挑戰提供了新的機遇和可能性。

9.1 海洋聲景基礎 (Fundamentals of Marine Soundscape)

海洋聲景基礎構成了整個水下聲學研究領域的理論基石，這個基礎涵蓋了水下聲學的基本原理、海洋中各種聲源的特性和分類、以及海洋聲景在時間和空間上的複雜變化模式。理解這些基礎要素對於進行有效的海洋聲景研究、制定合理的保護策略、以及評估人為活動的影響都至關重要。海洋聲景基礎的研究不僅需要深厚的物理學和聲學知識，還需要對海洋生物學、海洋學和生態學等相關領域有深入的理解，這種跨學科的特性使得海洋聲景研究具有高度的複雜性和挑戰性。Hovem(2007)[4]在其關於水下聲學的綜合性研究中強調，水下聲學環境的獨特特性決定了我們不能簡單地將陸地聲學的原理和方法直接應用於海洋環境，而必須發展專門適用於水下環境的理論體系和技術方法。海洋聲景的複雜性還體現在其多尺度的特性上，從微觀的分子振動到宏觀的海洋盆地聲音傳播，從毫秒級的聲音事件到季節性的聲景變化，不同尺度上的現象相互作用，形成了海洋聲景的整體特徵。

海洋聲景基礎研究的重要性在於它為整個海洋聲學研究領域提供了理論支撐和方法指導。首先，水下聲學原理的掌握是進行任何海洋聲景研究的前提條件，只有深入理解聲波在海水中的傳播規律、衰減機制和散射現象，我們才能正確設計監測系統、準確解釋觀測數據，並建立可靠的聲學模型。其次，海洋聲源的系統

分類和特性分析為我們理解海洋聲景的組成和變化提供了基礎框架，透過對自然聲源和人為聲源的深入研究，我們能夠識別不同聲源對海洋聲景的貢獻，評估它們之間的相互作用，並預測未來的變化趨勢。第三，海洋聲景時空變化規律的研究揭示了海洋聲環境的動態特性，這些規律的掌握對於理解海洋生物的聲學適應策略、評估人為干擾的影響範圍，以及制定有效的保護措施都具有重要意義。Van Opzeeland & Boebel(2018)[5]在他們關於海洋聲景規劃的研究中提出，理解海洋聲景的基礎特性是進行聲景管理和保護的先決條件，只有建立在科學基礎之上的管理措施才能真正有效地保護海洋聲環境和相關的生態系統。

當前海洋聲景基礎研究的發展趨勢包括理論體系的完善、技術方法的創新、以及應用領域的拓展等多個方面。在理論層面，研究者正在努力建立更加完整和統一的海洋聲景理論體系，將物理聲學、生態聲學和環境聲學等不同分支的理論整合成一個有機的整體。在技術層面，新的聲學監測技術、數據處理方法和建模技術不斷湧現，為海洋聲景研究提供了更加強大的工具支持。在應用層面，海洋聲景基礎研究的成果正在被應用於海洋保護、漁業管理、海洋工程、以及氣候變化研究等多個實際領域，展現出廣闊的應用前景。這些發展趨勢表明，海洋聲景基礎研究正在從一個相對狹窄的專業領域發展成為一個具有重要科學價值和實際意義的綜合性研究方向，為人類更好地理解和保護海洋環境提供了重要的科學支撐。

9.1.1 水下聲學原理 (Underwater Acoustic Principles)

水下聲學原理構成了海洋聲景研究的物理基礎，這些原理決定了聲波在海洋環境中的傳播特性、衰減規律和散射現象，進而影響海洋生物的聲學行為和人為噪音的影響範圍。水下聲學與大氣聲學相比具有顯著的差異，這些差異主要源於水的物理特性，包括更高的密度、更大的體積彈性模量、以及更複雜的溫度和壓力分布等。Stojanovic & Preisig(2009)[6]在他們關於水下聲學通信通道的重要研究中指出，海洋環境中的聲學傳播具有高度的複雜性和變異性，這種複雜性要求我們發展專門的理論和方法來描述和預測水下聲學現象。水下聲學原理的研究不僅具有重要的科學價值，還有廣泛的實際應用，包括聲納系統設計、水下通信、海洋生物監測、以及海洋工程等多個領域。

聲波傳播的基本物理機制在水下環境中表現出獨特的特徵，這些特徵決定了海洋聲景的基本性質。聲波在海水中的傳播速度約為 1500 米每秒，比在空氣中的傳播速度快約四倍，這種高傳播速度使得聲音信號能夠在海洋中快速傳播到很遠的距離。聲速的精確值受到海水溫度、鹽度和壓力的影響，這三個因素的變化會導致聲速的空間和時間變異，進而影響聲波的傳播路徑和特性。溫度是影響聲速的最重要因素，溫度升高 1℃約使聲速增加 4 米每秒；鹽度的影響相對較小，但在不同海域之間仍有顯著差異；壓力隨深度增加而增大，每增加 10 米深度約使聲速增加 1.7 米每秒。這些因素的綜合作用形成了複雜的聲速分布結構，包括表層混合層、溫躍層、以及深海等溫層等不同的聲學層次。Etter(2012)[7]在其關於水下聲學建模的研究中詳細分析了這些物理因素對聲波傳播的影響，他指出理解聲速結構是預測水下聲學傳播的關鍵。

聲波在海洋中的傳播路徑受到聲速垂直分布的強烈影響，形成了獨特的聲學傳播模式。在典型的海洋聲速分布條件下，聲波傳播會出現折射現象，聲線會向聲速較低的區域彎曲，這種折射效應可能導致聲波的匯聚、發散、或者形成聲道傳播等現象。深海聲道(SOFAR Channel)是最重要的聲學傳播現象之一，它形成於聲速最小值所在的深度，通常位於 800-1200 米深度範圍內。在聲道中傳播的聲波會被上下兩側的聲速梯度束縛，形成長距離的高效傳播，這種傳播模式可以使聲波在幾千公里的距離內保持相對較小的衰減。Li(2012)[8]在其關於數位聲納設計的著作中指出，聲道傳播是海洋中最重要的遠距離聲學傳播機制，對於理解海洋生物的長距離聲學通信和人為噪音的遠程影響都具有重要意義。除了聲道傳播之外，海洋中還存在其他重要的傳播模式，包括直達傳播、海底反射傳播、海面反射傳播，以及各種混合傳播模式等，這些不同的傳播模式在不同的距離範圍和頻率範圍內發揮重要作用。

聲波在海洋中的衰減是另一個重要的物理過程，它決定了聲學信號的有效傳播距離和探測範圍。海洋中的聲學衰減主要包括兩個方面：幾何擴散衰減和介質吸收衰減。幾何擴散衰減是由於聲波能量在三維空間中的擴散而造成的，在自由空間中，點聲源的聲壓級隨距離的增加以 20log(r)的規律衰減，其中 r 是傳播距離。然而，在實際的海洋環境中，由於海面和海底的存在，聲波傳播往往呈現柱面擴散的特性，此時衰減規律為 10log(r)。介質吸收衰減是由於海水分子對聲波能量

的吸收而造成的，這種吸收與頻率的平方成正比，因此高頻聲波的衰減遠大於低頻聲波。海水中的吸收機制主要包括黏性吸收、熱傳導吸收、以及由於硫酸鎂和硼酸等化學成分引起的化學弛豫吸收等。Wang 等人(2014)[9]在他們關於水下聲學傳播模型的綜述中指出，準確預測聲學衰減對於設計有效的水下聲學系統和評估噪音影響範圍都至關重要。

散射現象在海洋聲學中也扮演著重要角色，它包括海面散射、海底散射、以及體積散射等多種形式。海面散射主要由海面波浪和氣泡引起，其強度取決於海況和聲波的入射角度，一般來說，粗糙的海面會產生更強的散射。海底散射的特性取決於海底的聲學特性，包括底質類型、粗糙度、以及地形起伏等因素。軟泥海底具有較強的聲波吸收能力，而岩石海底則會產生較強的反射和散射。體積散射是由於海水中懸浮粒子、氣泡、以及海洋生物等散射體引起的，這種散射在高頻範圍內特別顯著，對聲波傳播產生重要影響。深度散射層(Deep Scattering Layer)是海洋中一個重要的散射現象，它由大量的中層魚類和浮游生物形成，表現出明顯的晝夜垂直遷移特徵，對聲波傳播產生顯著影響。這些散射現象不僅影響聲波的傳播特性，還為我們提供了遙感海洋環境特徵和生物分布的重要手段。

海洋環境噪音是水下聲學環境的重要組成部分，它由多種自然和人為因素共同造成。自然環境噪音主要包括海面風浪噪音、降雨噪音、地震噪音、以及生物噪音等。海面風浪噪音是最主要的自然噪音源，其強度與風速密切相關，在頻率範圍 100Hz-10kHz 內占主導地位。降雨噪音在中高頻範圍內(1-10kHz)具有特殊的譜特徵，可以作為遙感降雨強度的指標。地震噪音主要在低頻範圍內(1-50Hz)發揮作用，它的全球性傳播特徵使其成為監測地震活動的重要工具。生物噪音是海洋環境噪音的一個特殊類別，它不僅是噪音，更是海洋生態系統的重要信息載體。人為噪音主要來源於船舶交通、海洋工程、軍事活動等，這些噪音源的頻譜特徵和強度都有顯著差異。Preisig(2007)[10]在其關於水下聲學網絡發展的研究中分析了海洋環境噪音對水下通信系統的影響，他指出理解和建模環境噪音是設計可靠水下聲學系統的關鍵。這些環境噪音不僅影響人工聲學系統的性能，更重要的是它們構成了海洋生物聲學環境的重要組成部分，對海洋生物的聲學行為產生重要影響。

9.1.2 海洋聲源分類 (Classification of Marine Sound Sources)

海洋聲源分類是理解海洋聲景組成和動態變化的基礎，透過系統性的聲源分類，我們能夠識別和分析海洋環境中不同類型聲音的特徵、來源和作用。海洋聲源的多樣性和複雜性遠超過陸地環境，這是因為海洋作為一個三維的流體環境，為各種聲學現象的發生提供了獨特的條件。海洋聲源可以從多個角度進行分類，包括聲源的性質(自然 vs 人為)、頻率特徵、時間特徵、空間分布特徵，以及生態功能等。這種多維度的分類方法有助於我們全面理解海洋聲景的結構和功能。Guan 等人(2015)[11]在他們關於淺水海洋環境聲景動態的研究中指出，有效的聲源分類是進行聲景分析和生態評估的前提條件，只有準確識別和分類不同的聲源，我們才能理解它們在海洋生態系統中的作用和相互關係。

自然聲源構成了海洋聲景的基礎背景，它們可以進一步細分為非生物聲源和生物聲源兩大類別。非生物自然聲源主要包括物理海洋過程產生的聲音，這些聲音反映了海洋環境的物理狀態和動態變化。海面風浪聲是最重要的非生物聲源之一，它由風與海面相互作用產生，其聲學特徵與風速、波高、以及海面狀態密切相關。風浪聲的頻譜通常呈現寬頻特徵，主要能量集中在 100Hz 到 10kHz 的頻率範圍內，隨著風速增加，高頻成分的強度顯著增強。雨聲是另一個重要的非生物聲源，當雨滴撞擊海面時會產生特徵性的高頻聲音，其頻譜峰值通常在 10-15kHz 範圍內，聲音強度與降雨強度成正比。氣泡聲音是海洋中普遍存在的聲源，當氣泡在水中形成、上升和破裂時會產生聲音，這些聲音主要集中在高頻範圍內，對海洋的高頻背景噪音有重要貢獻。冰山和海冰運動也會產生特徵性的聲音，在極地海域構成重要的聲源類型。地質聲源包括海底地震、火山活動、以及海底滑坡等，這些聲源通常具有低頻、高強度的特徵，能夠在海洋中長距離傳播。

生物聲源是海洋聲景中最具生態意義的組成部分，它們不僅反映了海洋生物的存在和活動，更承載著重要的生態信息和功能。海洋生物聲源的多樣性極其豐富，從微觀的浮游生物到大型的鯨豚類動物，幾乎所有的海洋生物都以某種方式參與聲音的產生或接收。鯨豚類動物是最著名的海洋生物聲源，它們的聲音通信系統極其複雜和精細。大型鯨類如藍鯨、長鬚鯨等產生的低頻歌聲頻率範圍在 10-100Hz 之間，聲音強度可達 180dB 以上，能夠在數百甚至數千公里的距離內傳

播，這些聲音主要用於長距離通信、導航和繁殖行為。齒鯨類如抹香鯨、虎鯨等除了產生通信聲音外，還具有高度發達的回聲定位系統，能夠產生頻率範圍廣泛的聲納信號進行導航和覓食。海豚類動物的聲學系統最為複雜多樣，它們能夠產生各種類型的哨聲、爆裂聲和回聲定位信號，這些聲音在社會組織、覓食行為和環境探測中發揮重要作用。Montgomery & Radford(2017)[12]在他們關於海洋生物聲學的綜述中指出，海洋哺乳動物的聲學系統代表了動物王國中最複雜和精密的聲學適應之一。

魚類聲源是海洋生物聲景中數量最多、分布最廣的組成部分，雖然個體魚類產生的聲音相對較弱，但大群魚類的集體發聲可以產生顯著的聲學信號。魚類發聲的機制主要包括鰾振動、齒磨擦、鰭拍打、以及其他身體部位的振動等。不同魚類的發聲特徵差異很大，有些魚類如石首魚科魚類能夠產生強烈的鼓聲，用於求偶和領域防衛；有些魚類如鸚哥魚會產生啃食珊瑚時的磨擦聲；還有些魚類在受到驚嚇時會產生特徵性的聲音。魚類聲音的時間模式也非常多樣，有些表現出明顯的晝夜節律，有些與潮汐週期相關，還有些與繁殖季節和月相變化相關。合唱現象是魚類聲景中的一個重要特徵，當大量同種魚類同時發聲時會形成聲學合唱，這種現象在繁殖季節特別常見，可以顯著改變局部海域的聲景特徵。除了脊椎動物外，許多海洋無脊椎動物也是重要的聲源，包括蝦類的彈響聲、螃蟹的摩擦聲、以及各種軟體動物的活動聲音等，這些聲音雖然個體較弱，但由於數量眾多，對海洋聲景的貢獻不容忽視。

人為聲源是現代海洋聲景中日益重要的組成部分，隨著人類海洋活動的不斷擴大和加強，人為噪音已經成為許多海域聲景的主導因素。船舶交通噪音是最重要和最普遍的人為聲源，全球每天有數萬艘各類船舶在海洋中航行，它們產生的噪音主要來源於推進系統、發動機振動、以及船體與水的相互作用。船舶噪音的頻譜特徵主要集中在低頻範圍(10-1000Hz)，與許多海洋哺乳動物的通信頻率重疊，因此對海洋生物的影響特別顯著。不同類型船舶的噪音特徵有所不同，大型貨輪產生連續的低頻噪音，高速船舶產生較強的高頻成分，而漁船則因為使用聲納設備而產生特殊的聲學信號。Possenti 等人(2024)[13]在他們關於船舶對水下聲景貢獻的研究中預測，隨著全球貿易的增長和船舶技術的發展，船舶噪音將繼續是海洋聲景變化的主要驅動因素。海洋工程活動是另一個重要的人為聲源類別，包括海

上鑽探、管道鋪設、海底採礦、以及各種建設活動等。這些活動通常產生高強度的脈衝性噪音，其聲學特徵與船舶噪音顯著不同，對海洋生物的影響模式也不相同。

軍事聲納是一個特殊的人為聲源類別，它們通常具有高強度、定向性強的特徵，主要用於探測和追蹤水下目標。軍事聲納的頻率範圍很廣，從低頻的遠程探測聲納到高頻的高解析度聲納，不同類型的聲納對海洋生物的影響機制和程度都不相同。低頻軍事聲納由於其高強度和遠程傳播特性，對海洋哺乳動物的影響特別受到關注，已有研究表明這類聲納與某些鯨豚擱淺事件有關。科學研究聲源包括各種海洋調查和研究活動中使用的聲學設備，如多波束聲納、聲學剖面儀、魚群探測器等。雖然這些設備的使用目的是科學研究，但它們仍然會對海洋聲環境產生影響，特別是在長期和高頻使用的情況下。近年來，可再生能源開發，特別是海上風電場建設，成為一個新興的人為聲源類別。風電場的建設和運營都會產生顯著的噪音，包括建設期間的打樁噪音和運營期間的機械噪音，這些新的聲源類型對海洋聲景的長期影響還需要進一步研究。人為聲源的特點是強度高、持續時間長、頻率特徵與自然聲源不同，因此它們往往會覆蓋或干擾自然聲源，改變海洋聲景的自然結構和功能，對海洋生態系統產生複雜的影響。

9.1.3 海洋聲景的時空變化 (Temporal and Spatial Variation of Marine Soundscape)

海洋聲景的時空變化特徵反映了海洋環境和生態系統的動態複雜性，這些變化模式的理解對於海洋聲景監測、生態評估和保護管理都具有重要意義。海洋聲景的變化涉及多個時間尺度，從秒級的瞬時變化到年際和更長期的氣候變化，每個時間尺度都有其特定的驅動機制和生態意義。同時，海洋聲景的空間分布也呈現出複雜的模式，從局部的微環境到全球尺度的海洋盆地，不同空間尺度上的聲景特徵反映了不同層次的環境和生態過程。Havlik 等人(2022)[14]在他們關於海洋聲景評估現狀的研究中指出，理解海洋聲景的時空變化規律是建立有效監測和管理策略的基礎，只有掌握了這些變化規律，我們才能區分自然變異和人為影響，制定適當的保護目標和管理措施。

時間變化是海洋聲景最重要的特徵之一，它體現在多個時間尺度上的規律性和隨

機性變化。晝夜變化是最基本的時間變化模式，許多海洋生物的聲學活動表現出明顯的晝夜節律，這種節律與動物的生活史特徵、覓食行為、以及環境條件的晝夜變化密切相關。許多魚類的發聲活動在黃昏和黎明時分達到高峰，這個時期被稱為聲學黃昏(acoustic dusk)和聲學黎明(acoustic dawn)，這種模式可能與動物的覓食活動和捕食壓力有關。深海中的垂直遷移現象也會引起聲景的晝夜變化，大量中層魚類和浮游動物在夜間上升到表層覓食，白天下降到深水避光，這種大規模的垂直遷移會改變不同深度的聲學環境。除了生物因素外，環境因素也會產生晝夜變化，如風浪條件的日變化、溫度分層的變化等，都會影響聲波傳播和環境噪音水平。潮汐變化是另一個重要的短期時間變化模式，潮汐會引起水深、流速、溫度和鹽度的週期性變化，進而影響聲波傳播條件和生物活動。許多近岸海洋生物的聲學活動與潮汐週期相關，一些魚類在特定的潮汐時期更加活躍，而一些底棲生物的活動也受到潮汐的影響。潮汐還會影響人為噪音的傳播，在某些海域，船舶交通也會隨潮汐變化而變化。

季節變化是海洋聲景中最顯著的時間變化模式之一，它主要由氣候條件的季節性變化和海洋生物生活史的季節性特徵驅動。許多海洋哺乳動物的繁殖活動具有明顯的季節性，例如座頭鯨的繁殖歌聲主要在冬季繁殖季節出現，灰鯨的遷移路線上的聲學活動也表現出季節性模式。魚類的繁殖合唱是季節變化最明顯的聲學現象之一，許多魚類在特定的繁殖季節會形成大規模的聲學合唱，這些合唱活動通常與水溫、日照長度、月相等環境因子相關。環境條件的季節變化也會顯著影響海洋聲景，冬季的強風浪會增加環境噪音水平，而夏季相對平靜的海況則為生物聲音的傳播提供更好的條件。溫躍層的季節性發展和消失會改變聲波的傳播特性，影響不同頻率聲音的傳播距離和方向。人為活動也表現出季節性模式，如旅遊船舶在夏季增多，商業捕魚活動在特定季節加強，這些活動的季節性變化會對海洋聲景產生相應的影響。Buscaino 等人(2016)[15]在他們關於地中海海洋保護區淺水聲景時間模式的研究中發現，聲景的季節變化不僅反映了自然生態過程，還受到人類活動季節性模式的顯著影響，這種複合影響使得聲景的季節變化模式變得更加複雜。

年際變化和長期變化反映了海洋聲景對氣候變化和生態系統長期演變的響應。年際變化主要與大尺度氣候模式如厄爾尼諾-南方濤動(ENSO)、北大西洋濤動

(NAO)等相關，這些氣候模式會影響海洋環境條件，進而影響海洋生物的分布和行為。例如，厄爾尼諾年份通常會改變太平洋的溫度分布和營養條件，影響魚類和海洋哺乳動物的分布，從而改變不同海域的聲景特徵。長期氣候變化，特別是全球變暖，正在對海洋聲景產生深遠影響。海水溫度的升高會改變聲速分布，影響聲波傳播；海冰的減少會改變極地海域的聲學環境；海洋酸化可能會影響某些海洋生物的聲學器官功能。此外，人類活動強度的長期變化趨勢也是影響海洋聲景長期變化的重要因素，船舶交通量的持續增長、海洋工程活動的擴大，以及新興海洋產業的發展，都在推動海洋聲景的長期變化。這些長期變化通常是漸進性的，需要長期的監測數據才能被準確識別和量化。

空間變化是海洋聲景的另一個重要特徵維度，它反映了海洋環境的空間異質性和生態系統的空間結構。海洋聲景的空間分布模式受到多種因素的影響，包括地形地貌、水深、底質類型、水文條件、生物群落結構，以及人類活動的空間分布等。水深是影響聲景空間分布的最重要因素之一，不同深度的海域具有截然不同的聲學特徵。淺水區域由於海底反射的影響，聲波傳播具有更強的多路徑特徵，同時也更容易受到海面風浪和人為活動的影響。深水區域的聲學環境相對穩定，深海聲道的存在使得低頻聲音能夠長距離傳播，但生物聲源的密度通常較低。中層水域往往是海洋聲景最活躍的區域，這裏聚集了大量的中層魚類和浮游生物，形成豐富的生物聲景。地形地貌對聲景的空間分布有重要影響，海山、海脊、海溝等地形特徵會改變聲波的傳播路徑，形成聲學陰影區或聲學匯聚區。同時，這些特殊地形往往也是海洋生物的重要棲息地，具有獨特的生物聲景特徵。

生物地理分布是海洋聲景空間變化的重要驅動因素，不同海域的物種組成和豐度差異會導致聲景特徵的顯著差異。熱帶海域由於生物多樣性高，通常具有最豐富的生物聲景，特別是珊瑚礁生態系統，其聲景的複雜性和多樣性在海洋環境中是獨一無二的。溫帶海域的聲景通常表現出較強的季節性變化，這與溫帶海洋生物的生活史特徵相關。極地海域的聲景相對簡單，但具有獨特的特徵，如海冰聲音和極地海洋哺乳動物的特殊聲學行為。深海聲景以低生物密度和獨特的深海物種聲音為特徵，但由於探測困難，我們對深海聲景的了解還相對有限。人為活動的空間分布是現代海洋聲景空間變化的重要因素，主要航運路線、港口周邊、海洋工程作業區等人類活動密集的區域通常表現出高人為噪音水平，而遠離人類活動

的海域則保持相對自然的聲景狀態。McKenna 等人(2024)[16]在他們關於海洋保護區網絡中船舶噪音的研究中發現，即使在設立保護的海域，船舶噪音仍然對聲景產生顯著影響，這表明海洋聲景的空間管理需要考慮更大的空間尺度和跨界影響。

海洋聲景的時空變化還表現出複雜的相互作用和非線性特徵，時間和空間因素往往不是獨立作用的，而是相互耦合，產生複雜的時空變化模式。例如，某些海洋生物的遷移行為會在特定的時間和空間上形成聲景的聚集現象，這種現象既有時間上的週期性，也有空間上的路徑性。氣候變化對海洋聲景的影響也表現出時空耦合的特徵，溫度升高不僅會在時間上改變聲景的季節性模式，還會在空間上改變物種的分布範圍，從而重塑海洋聲景的空間格局。人為活動的影響同樣具有時空耦合的特徵，航運路線的季節性變化、海洋工程項目的時空分布，都會在不同的時間和空間尺度上影響海洋聲景。這些複雜的時空變化模式要求我們採用更加綜合和動態的方法來研究和管理海洋聲景，不能簡單地從單一的時間或空間維度來理解聲景現象，而需要建立多維度、多尺度的分析框架，才能準確把握海洋聲景變化的本質和規律。

9.2 水下噪音監測與評估 (Underwater Noise Monitoring and Assessment)

水下噪音監測與評估是海洋聲景研究和管理的核心技術基礎，它為我們提供了量化測量、分析和理解海洋聲環境的科學工具和方法。隨著人類海洋活動的不斷擴大和海洋噪音問題的日益嚴重，建立有效的水下噪音監測與評估體系已成為海洋環境保護和可持續發展的迫切需要。水下噪音監測與評估涉及複雜的技術系統、科學方法和標準規範，需要整合聲學工程、海洋科學、生物學和環境科學等多個學科的知識和技術。André 等人(2011)[17]在他們關於海洋環境實時監測的重要研究中指出，被動聲學監測技術為我們提供了一個強大的工具來長期、連續地監測海洋聲環境和生物活動，這種技術的發展正在革命性地改變我們對海洋生態系統的理解和管理方式。水下噪音監測與評估不僅是科學研究的重要工具，更是環境管理和政策制定的重要依據，它的發展和應用直接關係到海洋環境保護政策的有效性和科學性。

水下噪音監測與評估系統的複雜性主要體現在技術挑戰和方法挑戰兩個方面。技術挑戰包括水下聲學設備的設計和製造、惡劣海洋環境中的設備部署和維護、大容量聲學數據的傳輸和存儲，以及長期穩定運行的可靠性保證等。海洋環境的特殊性，如高壓、腐蝕、生物附著、極端天氣等，對監測設備提出了極高的技術要求。方法挑戰包括聲學數據的處理和分析方法、噪音評估指標的選擇和標準化、不同聲源的識別和分離，以及生物影響的評估和預測等。海洋聲環境的複雜性和動態性要求我們發展更加先進和智慧的分析方法來處理和解釋大量的聲學數據。此外，水下噪音監測與評估還面臨標準化和國際合作的挑戰，由於海洋的跨界性質，建立統一的監測標準和評估方法對於全球海洋環境保護至關重要。

當前水下噪音監測與評估技術正在經歷快速發展，新技術的不斷湧現為這個領域帶來了新的機遇和可能性。人工智慧和機器學習技術的應用正在革命性地改變聲學數據處理和分析的方式，自動聲源識別、智慧噪音分類、以及預測建模等技術的發展大大提高了監測和評估的效率和準確性。物聯網和雲計算技術的發展使得大規模、分散式的聲學監測網絡成為可能，實現了對海洋聲環境的即時、全面監測。高性能計算技術的進步為複雜的聲學建模和大數據分析提供了強大的計算支撐。這些技術進步不僅提高了監測和評估的能力，還降低了成本，使得更廣泛的應用成為可能。未來水下噪音監測與評估技術的發展趨勢將更加注重智慧化、網絡化和標準化，透過技術創新和國際合作，為全球海洋環境保護提供更加有效的科學支撐。

9.2.1 水下聲學監測技術 (Underwater Acoustic Monitoring Technologies)

水下聲學監測技術是海洋聲景研究和噪音評估的技術核心，它涵蓋了從聲學傳感器設計到數據處理分析的完整技術鏈條。現代水下聲學監測技術的發展經歷了從簡單的聲音記錄到複雜的智慧監測系統的演進過程，技術的進步不僅提高了監測的精度和範圍，還大大降低了運營成本，使得長期、大規模的海洋聲學監測成為可能。水下聲學監測技術的核心是將水中的聲波信號轉換為電信號，然後透過數位化處理、傳輸、存儲和分析，最終提取出有用的聲學信息和環境信息。這個過程涉及多個技術環節，每個環節都有其特定的技術要求和挑戰。Cotter 等人(2019)[18]在他們關於海洋環境監測傳感器聲學特性的研究中指出，監測設備本

身的聲學特性對監測結果的影響不容忽視，高品質的監測技術不僅要能夠準確捕捉目標聲學信號，還要盡量減少自身對聲學環境的干擾。

水下聲學傳感器是整個監測系統的核心組件，其性能直接決定了監測系統的能力和可靠性。水聲傳感器(hydrophone)是最基本和最重要的水下聲學傳感器，它的工作原理是利用壓電材料的壓電效應，將水中聲壓的變化轉換為電信號的變化。現代水聲傳感器通常採用壓電陶瓷或壓電聚合物作為敏感元件，這些材料具有高靈敏度、寬頻響應和良好的穩定性。水聲傳感器的關鍵性能指標包括靈敏度、頻率響應、動態範圍、指向性、以及環境適應性等。靈敏度決定了傳感器對微弱聲信號的探測能力，高靈敏度的傳感器能夠探測到更遠距離或更微弱的聲源。頻率響應特性決定了傳感器對不同頻率聲波的響應一致性，理想的傳感器應該在整個工作頻率範圍內具有平坦的頻率響應。動態範圍是指傳感器能夠處理的最大和最小聲信號之間的比值，大動態範圍的傳感器能夠同時處理強弱差別很大的聲信號。指向性描述了傳感器對來自不同方向聲波的敏感程度，全向性傳感器對各個方向的聲波都有相同的響應，而指向性傳感器則具有方向選擇性。

水下聲學監測系統的部署方式多種多樣，每種部署方式都有其特定的適用條件和技術特點。固定式部署是最常用的方式，傳感器被固定安裝在海底、海洋平台或錨系浮標上，能夠進行長期、連續的監測。這種部署方式的優點是穩定可靠，能夠獲得特定位置的長時間序列數據，但缺點是空間覆蓋範圍有限，且部署和維護成本較高。漂流式部署使用自由漂流的浮標攜帶聲學傳感器，能夠跟隨海流運動進行大範圍的聲學測量。這種方式的優點是覆蓋範圍大，成本相對較低，但缺點是位置不固定，數據的空間定位精度較低。拖曳式部署將傳感器陣列拖在船舶後面進行移動監測，能夠快速覆蓋大面積海域，獲得聲學環境的空間分布信息。潛航器搭載式部署利用自主水下航行器(AUV)或遙控水下航行器(ROV)攜帶聲學傳感器進行機動監測，這種方式結合了空間覆蓋和時間連續性的優點，但技術複雜度和成本都較高。Zhu 等人(2020)[19]在他們關於拖曳聲納陣列的研究中展示了如何利用相干聲納陣列技術實現對多個船舶的長距離自動探測和追蹤，這種技術為大範圍海域的聲學監測提供了新的可能性。

數據處理和分析是水下聲學監測技術的重要組成部分，它將原始的聲學信號轉換

為有意義的聲學信息和環境信息。聲學數據處理通常包括信號預處理、特徵提取、模式識別和結果解釋等步驟。信號預處理的目的是改善信號品質，去除噪音和干擾，為後續分析做準備。常用的預處理方法包括濾波、去混響、背景噪音抑制等。特徵提取是從聲學信號中提取有用信息的過程，常用的特徵包括頻譜特徵、時間特徵、統計特徵等。不同類型的聲源具有不同的聲學特徵，透過特徵提取可以為聲源識別和分類提供基礎。模式識別是利用機器學習或人工智慧方法自動識別和分類不同類型聲源的過程，這是現代聲學監測系統的核心技術之一。常用的模式識別方法包括支持向量機、神經網絡、深度學習等。結果解釋是將識別和分類結果轉換為有生態或環境意義信息的過程，這需要結合海洋生物學、生態學和聲學的專業知識。

實時監測和預警系統是現代水下聲學監測技術的重要發展方向，它能夠即時發現和響應聲學環境的異常變化，為海洋環境保護和海洋生物保護提供及時的預警信息。實時監測系統通常包括數據採集、實時傳輸、即時分析和自動預警等功能模組。數據採集模組負責連續採集聲學數據，並進行初步的數據品質控制。實時傳輸模組將採集的數據透過衛星通信、水下通信或其他方式傳輸到監測中心。即時分析模組對接收到的數據進行實時處理和分析，識別異常事件或特定的聲學模式。自動預警模組根據預設的判斷標準，自動發布預警信息，通知相關人員採取必要的應對措施。這種實時監測和預警能力對於保護瀕危海洋生物、監測海洋工程影響、以及應對突發環境事件都具有重要意義。Di Iorio 等人(2012)[20]在他們關於水聲傳感器探測雙殼類動物運動的研究中展示了被動聲學監測技術在生物行為研究中的應用潛力，證明了高靈敏度的水聲傳感器能夠探測到非常微弱的生物活動聲音，為非入侵式的海洋生物監測提供了新的技術手段。

9.2.2 海洋噪音評估指標 (Marine Noise Assessment Indicators)

海洋噪音評估指標是量化描述和比較海洋聲環境特徵的標準化測量參數，這些指標為海洋噪音的科學評估、環境影響評價和管理決策提供了客觀的數量基礎。海洋噪音評估指標的建立和應用需要考慮多個因素，包括聲學物理量的準確測量、生物聽覺特性的考慮、環境變化的時空特徵，以及管理應用的實用性等。由於海洋聲環境的複雜性和海洋生物聽覺系統的多樣性，建立合適的評估指標一直是海

洋聲學研究的重要挑戰之一。不同的評估指標適用於不同的應用目的和評估對象，沒有單一的指標能夠完全描述海洋噪音的所有重要特徵。因此，在實際應用中通常需要使用多個指標的組合來全面評估海洋噪音的特徵和影響。國際標準化組織和各國環境保護機構正在努力建立統一的海洋噪音評估標準和指標體系，以促進不同研究和管理實踐之間的可比性和一致性。

基本聲學參數是海洋噪音評估的基礎指標，它們直接測量聲波的物理特性，為更複雜的評估指標提供基礎數據。聲壓級(Sound Pressure Level, SPL)是最基本和最常用的聲學參數，它以分貝(dB)為單位，相對於水中的標準參考聲壓(1 μPa)來表示聲音的強度。聲壓級的計算公式為 $SPL = 20\log_{10}(P/P_0)$，其中 P 是測量的聲壓有效值，P_0是參考聲壓。聲壓級可以在不同的頻率範圍內計算，如寬頻聲壓級、倍頻程聲壓級、1/3 倍頻程聲壓級等。聲功率級(Sound Power Level, SWL)描述聲源輻射的總聲功率，它與聲壓級的關係取決於聲源的特性和傳播環境。對於點聲源在自由聲場中的傳播，聲壓級隨距離的增加而減小，但聲功率級保持不變，因此聲功率級是描述聲源本身特性的更本質參數。聲強級(Sound Intensity Level, SIL)描述單位面積上的聲功率，它考慮了聲波傳播的方向性，對於理解聲能的空間分布和傳播特性具有重要意義。

頻譜分析是海洋噪音評估中不可缺少的重要方法，它將時域的聲學信號轉換為頻域的頻譜信息，揭示噪音在不同頻率上的能量分布特徵。功率譜密度(Power Spectral Density, PSD)描述信號功率在頻率域的分布，通常以 dB re 1 $\mu Pa^2/Hz$ 為單位表示，它能夠識別噪音的頻率成分和強度分布。1/3 倍頻程譜是一種常用的頻譜表示方法，它將頻率軸劃分為一系列 1/3 倍頻程帶，每個頻帶的上限頻率是下限頻率的 2^(1/3)倍。這種頻譜表示方法與人類和許多動物的聽覺特性相符，因此在噪音評估中得到廣泛應用。頻譜圖(Spectrogram)是同時顯示聲學信號時間和頻率特徵的二維圖像，橫軸表示時間，縱軸表示頻率，顏色或灰度表示該時刻該頻率的聲音強度。頻譜圖能夠直觀地顯示聲學事件的時頻特徵，是識別和分析不同類型聲源的重要工具。峰值頻率、頻譜重心、頻寬等參數可以用來量化描述頻譜的形狀特徵，這些參數對於聲源識別和分類具有重要意義。

時間特徵參數描述聲學信號在時間維度上的變化特徵，這些參數對於評估脈衝性

噪音和間歇性噪音特別重要。等效連續聲級(Equivalent Continuous Sound Level, Leq)是在指定時間內，具有相同聲能的穩態聲的聲壓級，它將時變的聲學信號用一個等效的穩態值來表示。Leq 的計算考慮了整個測量時間內聲音能量的積分，因此能夠反映聲音暴露的總量。聲暴露級(Sound Exposure Level, SEL)是將聲音事件的聲能壓縮到 1 秒鐘時間內的等效聲壓級，它主要用於評估脈衝性聲音事件的影響。SEL 的計算公式為 $SEL = Leq + 10\log_{10}(T)$，其中 T 是聲音事件的持續時間。百分位聲級(Percentile Sound Level)描述在測量時間內有一定百分比時間超過的聲級，常用的有 L_5、L_{10}、L_{50}、L_{90}、L_{95}等。例如，L_{90}表示在測量時間內有 90%的時間聲級超過該值，它通常用來表示背景噪音水平。L_5表示在測量時間內只有 5%的時間聲級超過該值，它通常用來表示噪音的峰值水平。

生物相關的評估指標考慮了海洋生物聽覺系統的特性，這些指標更能反映噪音對海洋生物的實際影響。加權聲級是根據特定動物聽覺敏感性對不同頻率的聲音進行加權處理得到的綜合指標。不同種類的海洋動物具有不同的聽覺特性，因此需要使用不同的聽覺加權函數。例如，對於海洋哺乳動物，常用的加權函數包括 M 加權(針對海洋哺乳動物的低頻聽覺)、HF 加權(針對高頻聽覺的齒鯨)等。這些加權函數基於對動物聽覺閾值和聽覺敏感性的實驗研究結果建立。可聽性閾值(Audibility Threshold)是動物能夠感知聲音的最小聲壓級，它隨頻率變化而變化，形成聽覺閾值曲線。通過比較環境噪音水平和動物的聽覺閾值，可以判斷動物是否能夠聽到環境中的聲音。掩蔽閾值(Masking Threshold)考慮了噪音對動物聽覺的掩蔽效應，當環境噪音的存在提高了動物對其他聲音的聽覺閾值時，就產生了聽覺掩蔽。掩蔽閾值的計算需要考慮噪音和目標聲音的頻譜特徵、時間特徵，以及動物的聽覺處理特性。

統計指標用於描述海洋噪音的統計分布特徵和變化規律，這些指標對於長期噪音監測和趨勢分析特別重要。平均值和中位數描述噪音水平的集中趨勢，標準差和變異係數描述噪音水平的離散程度。峰態和偏度描述噪音水平分布的形狀特徵，正常的背景噪音通常呈現接近正態分布的特徵，而人為噪音的加入可能會改變分布的形狀。時間相關函數描述噪音在不同時間間隔上的相關性，它能夠反映噪音的時間結構特徵。例如，周期性的噪音會在相應的時間間隔上表現出較高的相關性。頻率出現率統計不同聲級範圍出現的頻率，它能夠反映噪音水平的分布規律

和變化模式。這些統計指標的應用需要有足夠長的監測時間和足夠大的數據樣本，才能獲得統計上可靠的結果。在實際應用中，通常需要根據具體的評估目的和評估對象選擇合適的評估指標組合，並建立相應的評估標準和判斷準則，才能實現對海洋噪音的科學評估和有效管理。

9.2.3 生物聲學影響評估 (Bioacoustic Impact Assessment)

生物聲學影響評估是評估人為噪音對海洋生物聲學行為和生理功能影響的科學方法和技術體系，它是海洋噪音環境影響評價的核心組成部分。隨著人類海洋活動的不斷增加和海洋噪音水平的持續上升，準確評估噪音對海洋生物的影響已成為海洋環境保護和可持續發展的迫切需要。生物聲學影響評估需要整合聲學、生物學、生理學、行為學和生態學等多個學科的知識和方法，建立從個體層面到群體層面、從短期影響到長期影響的綜合評估體系。Teixeira 等人(2019)[21]在他們關於動物聲學行為生物聲學監測的研究中指出，生物聲學監測技術為評估人為干擾對動物的影響提供了一個強大而非入侵性的工具，這種技術能夠在不干擾動物自然行為的前提下，長期監測動物的聲學活動和行為變化。生物聲學影響評估的挑戰在於建立噪音暴露與生物影響之間的因果關係，這需要考慮多種混淆因素和生物個體之間的差異。

生物聲學影響評估的理論基礎建立在對海洋生物聽覺系統和聲學行為的深入理解之上。海洋生物的聽覺系統具有高度的多樣性，不同種類的動物具有不同的聽覺頻率範圍、敏感性和處理能力。魚類的聽覺系統主要依靠內耳和側線系統，某些魚類還具有輔助聽覺結構如鰾來增強聽覺敏感性。海洋哺乳動物的聽覺系統更為複雜和精密，特別是齒鯨類動物的聲納系統代表了自然界中最先進的生物聲學系統之一。不同動物的聽覺閾值、頻率響應、時間分辨率和空間定位能力都有顯著差異，這些差異決定了它們對不同類型噪音的敏感性和易受性。Montgomery & Radford(2017)[22]在他們關於海洋生物聲學的綜述中強調，理解海洋生物的聲學生物學是進行有效影響評估的前提條件，只有深入了解動物如何產生、接收和處理聲音信號，我們才能準確預測和評估人為噪音的潛在影響。

聽覺影響是生物聲學影響評估中最直接和最重要的評估內容，它包括暫時性聽覺

閾值偏移、永久性聽覺閾值偏移和其他聽覺損傷。暫時性聽覺閾值偏移(Temporary Threshold Shift, TTS)是指在噪音暴露後動物聽覺敏感性的暫時性降低，這種影響通常在暴露停止後的幾小時到幾天內恢復正常。TTS 的程度取決於噪音的強度、頻率、持續時間以及動物的聽覺特性。雖然 TTS 是可恢復的，但在恢復期間動物的聽覺能力受到影響，可能會影響其覓食、通信、導航和捕食者規避等重要生命活動。永久性聽覺閾值偏移(Permanent Threshold Shift, PTS)是指噪音暴露造成的不可逆的聽覺損傷，它通常由高強度的噪音暴露引起，特別是突發性的高強度噪音如爆炸聲、打樁聲等。PTS 會永久性地降低動物的聽覺能力，對其生存和繁殖產生長期的負面影響。聽覺損傷的評估需要建立噪音暴露劑量與聽覺影響之間的劑量-反應關係，這通常透過實驗室受控實驗和野外觀察相結合的方法來建立。

行為影響評估關注噪音對海洋生物行為模式和生活史的影響，這些影響可能不涉及直接的聽覺損傷，但可能對動物的適應性和生存產生重要影響。迴避行為是動物對噪音最常見的響應之一，當環境噪音超過動物的舒適閾值時，動物可能會暫時或永久地離開該區域。迴避行為可能會迫使動物放棄重要的棲息地、覓食區域或繁殖場所，從而對其生存和繁殖產生間接影響。游泳行為的改變包括游泳速度、方向、深度和模式的變化，這些變化可能會影響動物的能量消耗、覓食效率和捕食者規避能力。潛水行為的改變在海洋哺乳動物中特別重要，噪音可能會影響動物的潛水深度、持續時間和間隔，這些改變可能會影響動物的覓食成功率和生理健康。攝食行為的影響包括覓食時間、覓食地點、捕食成功率等方面的變化，噪音可能會干擾動物的捕食行為，降低其營養獲取效率。Winship & Jones(2023)[23]在他們關於人工管理海洋哺乳動物聲學監測的研究中開發了一套評估聲學環境對動物健康和福利影響的方法，這種方法能夠透過分析動物的聲學行為變化來評估其健康狀態和環境壓力水平。

繁殖和社會行為的影響評估是生物聲學影響評估的重要方面，因為這些行為直接關係到動物種群的長期生存和繁衍。聲學通信的干擾是最重要的影響機制之一，許多海洋動物依賴聲學信號進行配偶選擇、領域防衛、親子識別和群體協調等社會行為。環境噪音可能會掩蔽這些重要的生物聲學信號，降低通信的有效性和範圍。繁殖歌聲的干擾對許多魚類和海洋哺乳動物都有重要影響，如果雄性動物的

求偶歌聲被噪音掩蔽，可能會降低其交配成功率，進而影響種群的繁殖成功率。母子聯繫的干擾在海洋哺乳動物中特別重要，許多鯨豚類動物的母子之間透過特定的聲學信號保持聯繫，噪音干擾可能會導致母子分離，影響幼體的生存率。群體協調行為的影響包括覓食群體的協調、遷移群體的導航、以及群體防禦行為等，這些行為的干擾可能會降低群體的生存優勢和適應能力。

生理壓力反應的評估是近年來生物聲學影響評估的新興方向，它透過測量動物的生理指標來評估噪音暴露對動物健康的影響。壓力激素水平的變化是評估生理壓力的重要指標，長期的噪音暴露可能會導致動物體內皮質醇等壓力激素水平的持續升高，這種慢性壓力狀態會影響動物的免疫系統、生殖系統和整體健康狀況。心率和呼吸率的變化也是評估急性壓力反應的重要指標，突發的高強度噪音可能會引起動物心率和呼吸率的急劇變化，這種急性反應雖然通常是暫時的，但在某些情況下可能會對動物的健康產生長期影響。免疫功能的影響是慢性噪音暴露的重要後果之一，長期的壓力狀態可能會抑制動物的免疫系統功能，增加疾病感染的風險。能量代謝的變化包括代謝率、食慾、體重等方面的改變，這些變化可能會影響動物的生長、發育和繁殖能力。

種群水平的影響評估是生物聲學影響評估的最高層次，它關注噪音對整個動物種群和生態系統的影響。種群數量的變化是最重要的評估指標之一，長期的噪音影響可能會導致某些區域的動物種群數量下降，甚至可能導致局部種群的消失。種群分布的變化包括動物分布範圍的縮小、分布重心的遷移、以及棲息地利用模式的改變等，這些變化可能會對生態系統的結構和功能產生連鎖影響。繁殖成功率的影響是評估噪音對種群長期影響的關鍵指標，如果噪音顯著降低動物的繁殖成功率，可能會導致種群數量的長期下降趨勢。群落結構的變化包括不同物種相對豐度的改變、物種多樣性的變化、以及生態位重疊模式的變化等，這些變化反映了噪音對整個海洋生態系統的影響。Fleishman 等人(2023)[24]在他們關於海洋哺乳動物被動聲學數據生態推論的研究中提出了一套從個體聲學行為推斷種群生態狀況的方法框架，這種方法為基於聲學監測數據進行種群水平影響評估提供了重要的理論和技術支撐。

9.3 水下噪音控制與管理 (Underwater Noise Control and Management)

水下噪音控制與管理是解決海洋噪音污染問題、保護海洋生態環境的綜合性策略和實踐體系。隨著海洋噪音問題的日益嚴重和人們對海洋生態保護意識的不斷提高，建立有效的水下噪音控制與管理體系已成為國際海洋環境保護的重要議題。水下噪音控制與管理涉及技術、法律、政策、經濟和國際合作等多個層面，需要政府、企業、科研機構和國際組織的共同參與和協調配合。有效的噪音控制與管理不僅需要先進的技術手段來減少噪音源的聲輻射，還需要完善的法律法規來規範人類的海洋活動，以及科學的管理策略來平衡經濟發展和環境保護的需求。Erbe 等人(2019)[25]在他們關於船舶噪音對海洋哺乳動物影響的綜合性研究中指出，有效的噪音管理需要採用多層次、多尺度的綜合性方法，從噪音源控制到接收端保護，從局部管理到全球協調，只有這樣才能真正解決海洋噪音污染問題。

水下噪音控制與管理的複雜性主要體現在其涉及的利益相關者眾多、影響因素複雜、管理目標多元等方面。利益相關者包括航運企業、海洋工程公司、軍事部門、漁業組織、環保團體、科研機構、政府管理部門以及國際組織等，這些不同的利益相關者對噪音控制的態度、能力和優先級都有所不同，需要透過有效的協調機制來統一行動。影響因素的複雜性體現在噪音問題涉及技術、經濟、法律、生態、社會等多個維度，這些因素之間相互影響、相互制約，需要採用系統性的方法來綜合考慮和解決。管理目標的多元性表現在需要同時考慮海洋生物保護、經濟發展、航行安全、國家安全等多個目標，這些目標之間可能存在衝突，需要透過科學的決策過程來尋求最佳平衡點。此外，海洋的跨界性質使得噪音管理具有明顯的國際性特徵，需要建立國際合作機制來協調不同國家和地區的管理政策和行動。

當前水下噪音控制與管理正在從被動應對向主動預防轉變，從單一技術手段向綜合管理策略發展，從局部管理向區域和全球管理擴展。技術創新為噪音控制提供了更多的選擇和可能性，包括低噪音船舶設計、先進的減振降噪技術、智慧航行路線規劃等。管理理念的更新推動了從以人為中心的管理向以生態系統為中心的管理轉變，更加注重海洋生態系統的整體健康和長期可持續性。國際合作的加強為全球海洋噪音管理提供了更好的協調平台，國際海事組織(IMO)、國際自然保護聯盟(IUCN)等國際組織正在積極推動全球海洋噪音管理標準和行動計劃的制定。法律法規的完善為噪音管理提供了更強的法律支撐，許多國家和地區都在加

強相關立法和執法工作。這些發展趨勢表明，水下噪音控制與管理正在向更加科學、綜合和有效的方向發展。

9.3.1 噪音源控制技術 (Noise Source Control Technologies)

噪音源控制技術是水下噪音管理的核心技術手段，它透過改進噪音產生源的設計、運行和維護來減少聲輻射，從根本上降低海洋環境中的人為噪音水平。噪音源控制技術的發展需要深入理解噪音產生的物理機制，掌握聲波輻射和傳播的規律，並結合工程技術的創新來實現有效的噪音減少。不同類型的噪音源需要採用不同的控制技術，這些技術的選擇和應用需要考慮技術可行性、經濟成本、操作便利性以及環境效益等多個因素。船舶噪音控制技術是目前最重要和最成熟的噪音源控制領域，因為船舶交通是海洋中最主要的人為噪音源。除船舶外，海洋工程設備、軍事聲納、科研設備等也都有相應的噪音控制技術。Audoly 等人(2017)[26]在他們關於 AQUO 項目中船舶水下輻射噪音減緩技術的研究中展示了一個綜合性的船舶噪音控制技術體系，這個體系從噪音產生機理分析開始，到技術方案設計，再到實際應用驗證，為船舶噪音控制提供了完整的技術路線圖。

船舶噪音控制技術是噪音源控制的重點領域，它涵蓋了船舶設計、建造、運行和維護的各個階段。推進系統是船舶噪音的主要來源，包括推進器、發動機、傳動系統等組件都會產生顯著的聲輻射。推進器噪音控制技術包括葉片設計優化、轉速控制、空化抑制等方法。現代低噪音推進器採用特殊的葉片形狀和表面處理技術來減少空化現象，空化是推進器噪音的主要來源，特別是在高頻範圍內。葉片數量、攻角、厚度分布等設計參數的優化可以顯著降低推進器的噪音輻射。可變螺距推進器透過調整葉片角度來優化推進效率，減少空化和噪音產生。吊艙式推進器由於其靈活的定位能力，可以選擇最優的推進角度，減少推進器與船體的相互作用噪音。發動機噪音控制技術主要包括振動隔離、聲學處理和運行優化等方面。發動機的機械振動透過船體結構傳遞到水中，形成結構輻射噪音。安裝彈性支撐系統可以有效隔離發動機振動向船體的傳遞，減少結構噪音。發動機艙的聲學處理包括安裝吸音材料、隔音屏障等來減少空氣傳播噪音。發動機運行參數的優化，如轉速、負載、燃燒模式等的調整，可以降低發動機本身的噪音產生。

船體結構設計對船舶噪音控制具有重要影響，合理的結構設計可以有效減少振動傳遞和聲輻射。船體材料的選擇和處理對噪音控制有重要影響，高阻尼材料可以減少結構振動，特殊的表面處理可以改變聲散射特性。船體形狀的優化包括艏艉線型、底部形狀等的設計，良好的線型設計可以減少船舶航行時的湍流和壓力脈動，從而減少噪音產生。結構連接的設計對振動傳遞有重要影響，採用彈性連接、阻尼連接等技術可以阻斷振動傳遞路徑。船體表面的聲學處理包括安裝聲學覆層、氣泡屏障等來改變聲波的反射和散射特性。減振降噪材料的應用是船舶噪音控制的重要技術手段，這些材料包括阻尼材料、吸音材料、隔音材料等。阻尼材料透過消耗振動能量來減少結構振動，常用的阻尼材料包括粘彈性阻尼器、摩擦阻尼器等。吸音材料透過吸收聲波能量來減少聲反射，在機艙、管道等封閉空間中得到廣泛應用。隔音材料透過阻斷聲波傳播來減少噪音傳遞，通常用於分隔不同艙室或設備。

運行優化技術是船舶噪音控制的重要補充手段，它透過改變船舶的運行方式來減少噪音產生，而不需要對船舶硬體進行大幅改動。航速優化是最簡單有效的噪音控制方法之一，降低航速可以顯著減少推進器噪音和船體噪音。研究表明，船舶噪音水平與航速之間存在強相關關係，航速降低 10%可以使噪音降低 1-3dB。然而，航速優化需要平衡噪音控制和運輸效率的需求，過度降速可能會影響航運經濟性。航線規劃優化包括選擇對海洋生物影響較小的航行路線、避開敏感海域和關鍵時期等。智慧航線規劃系統可以結合海洋生物分布信息、環境敏感區域信息和航行條件信息，為船舶提供最佳的航行路線建議。動態定位系統的應用可以減少船舶在作業時的推進器使用，特別是在海洋工程作業中，動態定位可以替代拋錨定位，減少對海底環境的影響，同時減少推進器噪音。

海洋工程噪音控制技術主要針對海上鑽探、管道鋪設、海底採礦、風電場建設等工程活動產生的噪音。打樁噪音控制是海洋工程中最重要的噪音控制挑戰之一，特別是在海上風電場建設中，大型鋼管樁的打入會產生極高強度的脈衝噪音。氣泡屏障系統是目前最常用的打樁噪音控制技術，它透過在打樁區域周圍釋放氣泡來吸收和散射聲波，可以將噪音水平降低 10-20dB。雙層氣泡屏障系統透過設置內外兩層氣泡屏障來進一步提高噪音控制效果。噪音緩解系統(Noise Mitigation System, NMS)是一種專門為打樁作業設計的綜合噪音控制系統，它結合了氣泡屏

障、聲學屏障、振動隔離等多種技術。其他工程噪音控制技術包括低噪音施工設備的使用、施工時間的合理安排、施工方法的優化等。鑽探噪音控制主要透過改進鑽探設備、優化鑽探參數、安裝噪音屏障等方法來實現。

聲納系統噪音控制技術主要應用於軍用聲納、科研聲納等高強度聲源的噪音管理。功率控制是最直接的噪音控制方法，透過根據實際需要調整聲納發射功率來減少不必要的高強度聲輻射。波束控制技術可以將聲納的聲能集中在特定方向，避免對非目標區域的聲干擾。頻率管理包括選擇對海洋生物影響較小的頻率範圍、避開動物聽覺敏感頻段等。時間管理包括避開海洋生物活動的關鍵時期、限制聲納使用的時間和頻次等。軟啟動技術透過逐步增加聲納功率來給海洋生物提供離開的時間，避免突然的高強度聲暴露。監測和預警系統可以在聲納使用前和使用過程中監測海洋生物的存在，一旦發現敏感動物就立即停止或減少聲納使用。這些噪音源控制技術的發展和應用為減少海洋人為噪音提供了有效的技術手段，但技術的選擇和實施需要考慮具體的應用場景、經濟成本和環境效益，並結合適當的管理措施才能發揮最佳效果。

9.3.2 海洋噪音管制法規 (Marine Noise Regulations)

海洋噪音管制法規是規範人類海洋活動、控制噪音污染、保護海洋生態環境的法律制度框架。隨著海洋噪音問題的日益嚴重和科學認識的不斷深化，世界各國和國際組織都在加強海洋噪音管制法規的制定和實施。海洋噪音管制法規的建立需要平衡環境保護和經濟發展的需求，既要有效保護海洋生態環境，又要避免對合理的海洋經濟活動造成過度限制。法規的制定需要建立在科學的基礎上，充分考慮不同類型噪音源的特徵、海洋生物的敏感性、以及海洋環境的複雜性。Hatch & Fristrup(2009)[27]在他們關於海洋保護區噪音管理的研究中指出，有效的海洋噪音法規需要建立在對噪音影響的科學理解基礎上，同時要考慮管理的可操作性和執法的可行性，只有這樣才能真正發揮法規的環境保護作用。

國際層面的海洋噪音管制法規主要透過國際海事組織(IMO)、國際捕鯨委員會(IWC)、《生物多樣性公約》等國際機構和條約來制定和推動。國際海事組織在海洋噪音管制方面發揮著核心作用，它負責制定全球性的船舶噪音控制標準和指導

原則。2014 年，IMO 通過了《減少船舶水下噪音對海洋環境影響的指導原則》，這是第一個全球性的船舶噪音控制指導文件，它為各國制定船舶噪音法規提供了重要參考。該指導原則涵蓋了船舶設計、建造、運行和維護各個階段的噪音控制措施，包括推進系統優化、船體結構改進、運行參數調整等技術手段。然而，這個指導原則目前只是建議性的，沒有強制執行力，其實際效果有待進一步評估。國際捕鯨委員會主要關注噪音對鯨豚類動物的影響，它制定了相關的研究指導原則和保護建議，推動各國加強鯨豚保護相關的噪音管制。《生物多樣性公約》及其相關議定書也為海洋噪音管制提供了法律框架，特別是在海洋保護區的噪音管理方面。

歐盟在海洋噪音管制方面起步較早，建立了相對完善的法規體系。《海洋戰略框架指令》(Marine Strategy Framework Directive, MSFD)是歐盟海洋環境保護的核心法律文件，它明確將人為噪音列為需要控制的海洋污染源，要求成員國制定相應的監測和管制措施。該指令設立了具體的環境目標和指標，要求在 2020 年前達到良好的海洋環境狀態，其中包括將人為噪音控制在不對海洋生態系統造成顯著影響的水平。《棲息地指令》和《鳥類指令》為特定海洋生物和棲息地的噪音保護提供了法律依據，特別是對歐盟 natura 2000 保護區網絡中的海洋區域實施更嚴格的噪音控制。歐盟還制定了專門的海洋工程噪音管制規定，對海上風電場建設、海底管道鋪設等活動的噪音產生進行嚴格控制，要求進行環境影響評價和噪音監測。歐盟正在推動建立統一的海洋噪音監測網絡，以支撐噪音管制政策的實施和效果評估。

美國的海洋噪音管制法規主要透過《海洋哺乳動物保護法》(Marine Mammal Protection Act, MMPA)、《瀕危物種法》(Endangered Species Act, ESA)和《國家環境政策法》(National Environmental Policy Act, NEPA)等法律來實施。《海洋哺乳動物保護法》是美國海洋噪音管制的核心法律，它禁止對海洋哺乳動物的騷擾和傷害，包括聲學騷擾。該法律要求任何可能對海洋哺乳動物產生影響的活動都必須獲得許可，並實施適當的減緩措施。美國國家海洋漁業局(NMFS)負責執行該法律，制定了詳細的聲學閾值標準和影響評估指導原則。這些標準根據不同類型的海洋哺乳動物和不同類型的聲源設定了不同的暴露限值，包括行為騷擾閾值和聽覺損傷閾值。《瀕特物種法》為瀕危海洋物種提供額外的保護，要求對可能影

響瀕危物種的活動進行更嚴格的評估和控制。軍事活動的噪音管制是美國海洋噪音法規的特殊領域，軍方需要在訓練和作戰活動中平衡國家安全需要和環境保護要求，通常透過環境影響評價、生物監測和減緩措施來實現這種平衡。

其他國家的海洋噪音管制法規呈現出不同的發展水平和特點。加拿大制定了《魚類法》和《物種風險法》等法律來保護海洋生物免受噪音影響，並建立了海洋噪音監測和管理計劃。澳大利亞透過《環境保護和生物多樣性保護法》對海洋噪音進行管制，特別關注對鯨豚類動物的保護。日本、韓國等亞洲國家也在加強海洋噪音法規的制定，但總體上還處於發展階段。發展中國家的海洋噪音法規相對滯後，主要原因包括科學認識不足、技術能力有限、經濟發展壓力大等。國際合作和技術轉移對於推動全球海洋噪音管制法規的發展具有重要意義。

執法和監督是海洋噪音管制法規有效實施的關鍵環節，但也是目前面臨的主要挑戰之一。海洋環境的開放性和流動性使得噪音污染的監督和執法變得困難，需要建立有效的監測網絡和執法機制。許多國家建立了海洋噪音監測系統來支撐執法工作，但監測覆蓋範圍和監測能力還有待提高。執法機構需要具備足夠的技術能力和人力資源來識別違法行為、收集證據和實施處罰。國際水域的噪音管制執法更加複雜，需要國際合作和協調。違法成本和守法成本之間的平衡是執法效果的重要影響因素，如果違法成本過低或守法成本過高，法規的威懾效果就會大打折扣。公眾參與和社會監督也是法規實施的重要補充，提高公眾的環保意識和參與度有助於形成全社會共同保護海洋環境的氛圍。法規的持續改進和完善需要基於科學研究的最新成果和實施經驗的反饋，建立適應性管理機制來應對不斷變化的環境條件和技術發展。

9.3.3 海洋保護區聲景管理 (Marine Protected Area Soundscape Management)

海洋保護區聲景管理是在海洋保護區框架內實施的專門針對聲環境保護和管理的綜合性策略，它代表了海洋噪音管理從一般性管制向精準化、系統化保護的重要發展。海洋保護區作為海洋生物多樣性保護和生態系統管理的重要工具，其聲景管理不僅要考慮保護區內部的聲環境品質，還要處理來自保護區外部的聲學影響，這使得聲景管理成為海洋保護區管理中最具挑戰性的任務之一。La Manna 等

人(2021)[28]在他們關於地中海海洋保護區聲景和魚類生物音響的研究中發現，現行的海洋保護區法規並未能有效保護海洋環境免受聲學污染，這表明需要發展更加專門化和有效的聲景管理策略。海洋保護區聲景管理的目標是維護和恢復保護區內自然聲景的完整性，最大化保護區的生態功能和保護效果，同時兼顧周邊地區的合理開發需求。

海洋保護區聲景管理的理論基礎建立在聲景生態學、保護生物學和系統管理理論的交叉整合之上。聲景生態學為理解聲環境與生態系統功能的關係提供了理論框架，它強調聲景不僅是環境的組成部分，更是生態系統健康和完整性的重要指標。在海洋保護區中，自然聲景的維護對於保護區內生物群落的結構、功能和演化具有重要意義。許多海洋生物依賴特定的聲學環境進行生存和繁衍，聲景的改變可能會影響物種的行為、分布和相互作用，進而影響整個生態系統的穩定性。保護生物學的理論和方法為海洋保護區聲景管理提供了科學指導，包括關鍵棲息地識別、敏感物種保護、生態廊道設計等概念和方法在聲景管理中都有重要應用。系統管理理論強調管理的整體性、適應性和參與性，這對於處理聲景管理中的複雜性和不確定性具有重要指導意義。Herrera-Montes(2018)[29]在他關於保護區分區作為保護自然聲景策略的研究中指出，有效的聲景管理需要採用系統性的方法，將聲學保護目標整合到保護區的整體管理框架中。

海洋保護區聲景管理的空間規劃是管理實施的基礎，它需要根據聲學環境特徵、生物分布模式和人類活動影響來進行科學的空間配置。核心保護區的設立是聲景管理的重要策略，這些區域通常是海洋生物最敏感、生態價值最高的區域，需要實施最嚴格的聲學保護措施，原則上禁止或嚴格限制可能產生噪音的人類活動。緩衝區的設置用於減少外部噪音對核心保護區的影響，在這些區域可以允許一定程度的人類活動，但需要採取噪音控制措施來確保不對核心保護區造成顯著影響。多功能利用區允許更多類型的人類活動，但仍需要遵守一定的聲學標準和管理要求。聲學廊道的建立用於連接不同的保護區域，為海洋生物的遷移和基因交流提供相對安靜的通道。季節性管理區域根據海洋生物活動的季節性變化來調整管理措施，在關鍵的繁殖、覓食或遷移時期實施更嚴格的聲學保護措施。這種空間規劃需要基於科學的聲學調查和生物調查，並考慮聲波傳播的特性和範圍。

海洋保護區聲景監測是管理實施的重要支撐，它為管理決策提供科學數據和評估管理效果。長期聲學監測網絡的建立是聲景管理的基礎設施，這些監測網絡需要覆蓋保護區的關鍵區域和不同的生態環境類型。監測參數包括各種聲學指標、生物聲學活動、人為噪音水平等。監測數據的品質控制和標準化對於確保數據的可靠性和可比性至關重要。實時監測和預警系統能夠及時發現聲學環境的異常變化，為管理部門提供快速響應的能力。生物聲學監測透過分析動物的聲學活動來評估保護區的生態狀況和管理效果，這種方法能夠提供傳統生物調查方法難以獲得的信息。聲景健康指數等綜合性指標的開發為評估保護區聲景狀況提供了量化工具。監測數據的公開和共享有助於提高管理的透明度和公眾參與度。Buscaino 等人(2016)[30]在他們關於地中海海洋保護區淺水聲景時間模式的研究中建立了一套系統的聲景監測方法，為海洋保護區聲景管理提供了重要的技術支撐。

海洋保護區聲景管理的政策工具多樣化，需要根據不同的管理目標和約束條件來選擇和組合使用。法律禁止是最嚴格的管理工具，透過法律條文明確禁止在保護區內進行特定的產生噪音的活動。許可制度透過事前審批來控制可能產生噪音的活動，申請者需要證明其活動不會對保護區的聲學環境造成顯著影響。聲學標準的設立為各類活動設定允許的噪音水平上限，超過標準的活動將被禁止或要求採取減緩措施。時間限制透過限制噪音活動的時間來保護關鍵的生物活動時期，如繁殖季節、覓食時間等。空間限制透過劃定禁止或限制噪音活動的區域來保護重要的生物棲息地。技術要求強制要求使用低噪音技術和設備來減少噪音產生。環境影響評價要求對可能影響保護區聲學環境的活動進行事前評估，評估結果作為許可決策的重要依據。監測和報告要求噪音產生者對其活動的聲學影響進行監測和報告，為管理部門提供監督依據。

參與式管理和多方合作是海洋保護區聲景管理成功的重要因素，由於聲景管理涉及多個利益相關者和管理層級，需要建立有效的協調和合作機制。政府部門包括海洋管理、環境保護、交通運輸、國防等多個部門，需要建立跨部門的協調機制來統一管理政策和行動。科研機構為聲景管理提供科學支撐，包括基礎研究、技術開發、監測評估等。企業和行業組織是噪音的主要產生者，也是噪音控制措施的實施者，需要透過激勵和約束機制來促進其積極參與聲景保護。環保組織和公眾是重要的監督力量，他們的參與有助於提高管理的透明度和有效性。國際合作

對於跨界海洋保護區的聲景管理特別重要，需要建立國際協調機制來統一管理標準和行動。利益相關者的參與需要建立在充分的信息公開和有效的溝通機制基礎上，透過定期的諮詢、對話和協商來尋求共識和合作。適應性管理是海洋保護區聲景管理的重要特徵，由於聲學環境和生態系統的動態變化，管理策略需要根據新的科學認識和管理經驗進行持續調整和改進。

9.4 海洋生物與聲景互動 (Marine Life and Soundscape Interactions)

海洋生物與聲景互動是海洋聲學生態學的核心主題，它探討海洋生物如何利用、產生和響應聲音環境，以及聲景變化對海洋生態系統結構和功能的影響。這種互動關係體現了海洋生物對聲學環境的高度依賴性和適應性，同時也揭示了人為噪音對海洋生態系統的潛在威脅。海洋生物與聲景的互動涉及多個生物學層面，從個體的感知和行為到種群的分布和動態，從種間關係到生態系統功能，聲音在海洋生態系統中發揮著比我們之前認識到的更加重要和複雜的作用。Tyack(2017)[31]在他關於海洋哺乳動物聲學行為的研究中指出，海洋哺乳動物在演化過程中發展出了極其複雜和精密的聲學系統，這些系統不僅用於個體的生存需要，更是維持群體社會結構和生態系統功能的重要機制。理解海洋生物與聲景的互動關係對於海洋生物保護、生態系統管理和人為活動的環境影響評估都具有重要意義。

海洋生物與聲景互動的複雜性主要體現在多個方面。首先是生物多樣性的複雜性，海洋中存在著數量龐大、種類繁多的生物，從微觀的浮游生物到巨大的鯨類，從簡單的無脊椎動物到高等的海洋哺乳動物，不同類型的生物具有不同的聲學能力和聲學需求。其次是聲學行為的多樣性，海洋生物的聲學行為包括主動發聲、被動聽覺、聲學通信、回聲定位、聲學導航等多種形式，這些行為在不同的生活史階段和環境條件下表現出不同的特徵。第三是環境的複雜性，海洋聲景受到物理環境、生物環境和人為活動的多重影響，具有高度的時空變異性，這種變異性與生物的聲學行為相互作用，形成複雜的動態模式。第四是影響機制的複雜性，聲景對海洋生物的影響包括直接的生理影響和間接的生態影響，涉及多個生物學過程和多個生態學層次，影響的時間尺度從瞬時反應到長期演化，空間尺度從個體行為到生態系統功能。

當前海洋生物與聲景互動的研究正在快速發展，新的研究方法和技術手段不斷湧現，為深入理解這種互動關係提供了強大的工具支撐。分子生物學技術的應用使得我們能夠從基因和分子水平理解聲學行為的機制和演化。神經生物學方法揭示了海洋生物聲學感知和處理的神經機制。行為生態學研究方法幫助我們理解聲學行為的生態功能和適應意義。長期生態學研究提供了聲景變化對生態系統長期影響的證據。被動聲學監測技術的發展使得大規模、長期的生物聲學研究成為可能。這些研究方法的綜合應用正在推動海洋生物與聲景互動研究從定性描述向定量分析發展，從實驗室研究向野外觀察擴展，從單一物種研究向生態系統研究提升。Van Opzeeland(2010)[32]在他關於極地海洋哺乳動物聲學生態的研究中展示了如何透過多年連續的聲學監測來研究海洋哺乳動物的聲學行為和生態模式，這種長期研究為理解聲學行為的季節性、年際變化和環境響應提供了寶貴的數據。

9.4.1 海洋哺乳動物聲學行為 (Marine Mammal Acoustic Behavior)

海洋哺乳動物聲學行為是海洋生物聲學研究中最引人注目和研究最深入的領域，這些動物在漫長的演化過程中發展出了極其複雜和精密的聲學系統，在海洋生態系統中發揮著重要作用。海洋哺乳動物的聲學行為涵蓋了聲音產生、接收、處理和響應的完整過程，涉及複雜的神經生理機制、行為模式和社會結構。不同類型的海洋哺乳動物具有不同的聲學特徵和功能，鬚鯨類以其低頻、長距離的歌聲著稱，齒鯨類以其高度發達的回聲定位系統聞名，鰭足類和其他海洋哺乳動物也都具有各自獨特的聲學特徵。這些聲學系統不僅是動物個體生存的重要工具，更是維持種群結構、社會組織和生態系統功能的關鍵機制。人為噪音的增加正在對這些複雜的聲學系統造成越來越嚴重的干擾，這種干擾可能會對海洋哺乳動物的生存和繁衍產生長遠的影響。

鬚鯨類的聲學行為以其壯觀的歌聲和複雜的聲學結構而著稱，這些動物產生的聲音是動物王國中最響亮和傳播距離最遠的聲音之一。藍鯨的叫聲可以達到 188dB 的聲強，主頻率在 10-40Hz 之間，在理想的傳播條件下可以傳播數千公里的距離。這些低頻聲音的主要功能包括長距離通信、個體識別、配偶尋找和群體協調等。座頭鯨的歌聲是海洋哺乳動物聲學行為中最複雜和最著名的例子之一，雄性座頭

鯨在繁殖季節會唱出持續幾十分鐘的複雜歌曲，這些歌曲具有層次化的結構，包括單元、短語、主題和歌曲等不同層次。同一種群的雄性座頭鯨會唱相似的歌曲，但歌曲內容會隨時間逐漸變化，這種文化傳承現象在動物行為學中極為罕見。長鬚鯨、露脊鯨、灰鯨等其他鬚鯨類也都具有各自特徵的聲學行為，這些聲音在物種識別、種群研究和保護管理中都有重要應用。鬚鯨類的聲學行為受到多種環境因素的影響，包括海洋物理環境、食物分布、繁殖週期等，氣候變化和人為噪音正在對這些聲學行為產生越來越顯著的影響。

齒鯨類的聲學行為以其高度發達的回聲定位系統和複雜的社會通信系統為特徵，這些動物被認為擁有自然界中最先進的生物聲納系統。齒鯨類的回聲定位系統透過產生高頻的聲納信號並分析回聲來獲取環境信息，這種能力使它們能夠在完全黑暗的深海環境中準確導航、尋找食物和識別物體。不同種類的齒鯨具有不同特徵的回聲定位信號，抹香鯨產生強烈的點擊聲，主頻率在 2-4kHz 之間，可以探測數公里外的大型物體；海豚類產生頻率範圍更廣的聲納信號，通常在 20-150kHz 之間，用於探測較小的物體和進行精確定位；江豚類的回聲定位信號頻率更高，通常在 100-150kHz 之間，適合探測小型獵物。除了回聲定位外，齒鯨類還具有複雜的聲學通信系統，包括各種哨聲、爆裂聲、純音等。海豚的標誌哨聲(signature whistle)是個體識別的重要聲學信號，每隻海豚都有獨特的標誌哨聲，類似於人類的姓名。虎鯨的方言現象展示了齒鯨類聲學文化的複雜性，不同虎鯨群體具有不同的聲學方言，這些方言透過社會學習傳遞給後代，形成獨特的聲學文化。

海洋哺乳動物的聲學行為具有重要的生態功能，這些功能涉及個體生存、種群繁衍和生態系統維持等多個層面。通信功能是最基本和最重要的功能之一，聲學通信使海洋哺乳動物能夠在廣闊的海洋環境中保持聯繫，進行信息交流。母子聯繫是通信功能的重要體現，許多海洋哺乳動物的母子之間透過特定的聲學信號保持聯繫，確保幼體的安全和營養供給。群體協調功能使動物能夠協調集體行為，如集體覓食、集體遊游、集體防禦等。配偶尋找和性選擇功能在繁殖行為中發揮重要作用，許多雄性海洋哺乳動物透過聲學展示來吸引雌性和威嚇競爭對手。領域防

衛功能透過聲學信號來宣示領域所有權，警告入侵者離開。導航和定位功能幫助動物在海洋中準確導航，尋找食物來源和適宜棲息地。覓食功能特別在齒鯨類中發達，回聲定位系統使它們能夠高效地尋找和捕捉獵物。危險警告功能透過特定的聲學信號來警告群體成員注意捕食者或其他威脅。這些生態功能的正常發揮對於海洋哺乳動物的生存和繁衍至關重要，任何對聲學環境的干擾都可能影響這些功能的效果。

海洋哺乳動物聲學行為的環境適應性體現在其對不同環境條件的響應和調整能力上。深度適應是重要的適應機制之一，許多深潛性海洋哺乳動物如抹香鯨、喙鯨等發展出了適應深海高壓環境的聲學系統，它們的聲學信號具有能夠在深海環境中有效傳播的特徵。溫度適應體現在動物對不同水溫環境的聲學響應，溫度變化會影響聲速和聲學傳播特性，動物需要相應調整其聲學行為。噪音適應是現代海洋哺乳動物面臨的新挑戰，一些研究發現某些動物能夠在一定程度上適應環境噪音的增加，透過提高發聲強度、改變發聲頻率或調整發聲時間等方式來維持通信效果。然而，這種適應能力是有限的，當噪音水平超過動物的適應能力時，就會對其聲學行為和生存產生負面影響。季節適應體現在許多海洋哺乳動物的聲學行為具有明顯的季節性變化，這種變化通常與繁殖週期、遷移模式和食物可得性相關。地理適應表現在不同地理區域的同種動物可能具有不同的聲學特徵，這種地理變異可能反映了不同環境條件和群體隔離的影響。

人為噪音對海洋哺乳動物聲學行為的影響是當前研究的熱點和保護工作的重點關注對象。掩蔽效應是最直接和最普遍的影響機制，當環境噪音的頻率與動物的通信信號重疊時，噪音會掩蔽動物的聲學信號，降低通信的有效性和範圍。這種掩蔽效應對低頻通信的大型鯨類影響特別嚴重，因為船舶噪音主要集中在低頻範圍。行為改變是動物對噪音的常見響應，包括迴避行為、發聲行為改變、活動模式改變等。一些研究發現鯨類在噪音環境中會提高發聲強度、延長發聲時間或改變發聲頻率，這種現象被稱為 Lombard 效應。然而，這種行為調整需要消耗額外的能量，可能會影響動物的其他重要活動。聽覺損傷是高強度噪音暴露的嚴重後果，包括暫時性和永久性聽覺閾值偏移。生理壓力反應包括應激激素水平升高、心率變化、免疫功能下降等，這些反應可能會對動物的整體健康和繁殖成功率產生長期影響。種群水平的影響包括分布範圍改變、種群數量變化、繁殖成功率下

降等，這些影響可能需要數年或數十年才能完全顯現。Basdeo 等人(2025)[33]在他們關於人為噪音對海洋環境生物聲學干擾的最新綜述中指出，人為噪音對海洋哺乳動物的影響比之前認識的更加複雜和嚴重，需要採用更加綜合和長期的研究方法來評估和應對這些影響。

9.4.2 魚類聲學生態 (Fish Acoustic Ecology)

魚類聲學生態是海洋聲景研究中一個相對較新但快速發展的領域，它探討魚類如何利用聲音進行通信、導航、覓食和其他生命活動，以及魚類聲學行為在海洋生態系統中的作用和意義。雖然魚類的聲學能力長期以來被低估，但近年來的研究表明，許多魚類具有比我們之前認識到的更加複雜和重要的聲學行為。魚類是海洋中數量最多、分布最廣的脊椎動物群體，它們的聲學行為對海洋聲景的形成和變化具有重要貢獻。魚類的發聲機制主要包括鰾振動、齒磨擦、鰭拍打、骨骼摩擦等，不同的發聲機制產生不同特徵的聲音信號。魚類的聽覺系統雖然相對簡單，但對其生存和行為仍然發揮重要作用。魚類聲學生態的研究不僅有助於理解海洋生態系統的複雜性，還為漁業管理、生物多樣性保護和環境監測提供了新的科學工具和方法。

魚類的發聲行為比人們之前認識的要普遍得多，目前已知至少有 800 多種魚類具有發聲能力，這個數字還在不斷增加。魚類發聲的主要機制包括鰾振動發聲，這是最常見的魚類發聲方式，透過專門的肌肉收縮來振動鰾壁，產生各種頻率和模式的聲音。石首魚科(Sciaenidae)是鰾振動發聲的典型代表，它們能夠產生強烈的鼓聲，用於求偶、領域防衛和群體通信。齒磨擦發聲透過上下齒的摩擦產生聲音，鸚哥魚科(Scaridae)是這種發聲方式的代表，它們在啃食珊瑚時產生的磨擦聲是珊瑚礁聲景的重要組成部分。鰭拍打發聲透過胸鰭、腹鰭或尾鰭的快速拍打產生聲音，一些比目魚和鰩魚採用這種發聲方式。骨骼摩擦發聲透過特殊骨骼結構的摩擦產生聲音，一些鮶魚和海鮶採用這種方式。除了主動發聲外，魚類的各種活動如游泳、攝食、掘穴等也會產生被動聲音，這些聲音同樣是海洋聲景的重要組成部分。

魚類聲學行為的生態功能涉及生活史的多個方面，繁殖通信是最重要的功能之一。

許多魚類在繁殖季節會產生特殊的求偶聲音，這些聲音用於吸引配偶、刺激產卵、同步繁殖行為等。一些魚類如石首魚會形成大規模的繁殖聚集，數百萬條魚同時發聲形成壯觀的聲學合唱，這種合唱可以在數公里外被探測到。領域防衛是另一個重要功能，許多底棲魚類透過聲音來宣示領域所有權，警告入侵者離開。求偶展示透過複雜的聲學信號來展示雄性的健康狀況和遺傳品質，影響雌性的配偶選擇。群體協調功能幫助魚群保持隊形、協調游泳方向和速度。覓食通信包括食物發現的信息交流、覓食場所的聲學標記等。危險警告透過特定的聲音信號來警告同類注意捕食者或其他威脅。親子通信在一些具有護幼行為的魚類中發揮重要作用，幼魚透過聲音與親魚保持聯繫。種群識別功能幫助魚類識別同種個體，避免與其他種類雜交。

魚類聽覺系統雖然相對簡單，但對其聲學生態仍然發揮重要作用。魚類的聽覺系統主要包括內耳和側線系統兩個部分。內耳負責感知聲波的壓力變化，包括三個半規管和三個耳石器官，其中耳石器官是主要的聽覺感受器。側線系統感知水流和近場聲波的運動，對低頻聲音和近距離聲源特別敏感。一些魚類如鯉科、鯰科等具有韋伯器官(Weberian apparatus)，這是連接鰾和內耳的特殊結構，能夠增強聽覺敏感性，擴大聽覺頻率範圍。魚類的聽覺能力在不同種類之間差異很大，一般來說，具有鰾的魚類聽覺能力較強，能夠感知更寬頻率範圍的聲音。魚類的聽覺頻率範圍通常在幾十赫茲到幾千赫茲之間，這與它們的發聲頻率範圍基本匹配。聽覺在魚類的多種行為中發揮重要作用，包括捕食者規避、配偶尋找、群體維持、導航定位等。

魚類聲學行為的時空模式反映了其生態適應和環境響應特徵。時間模式包括晝夜節律、潮汐節律、季節變化和年際變化等多個時間尺度。晝夜節律是最常見的時間模式，許多魚類在黃昏和黎明時分更加活躍地發聲，這與它們的覓食活動和捕食壓力相關。潮汐節律在近岸魚類中特別明顯，一些魚類的發聲活動與潮汐週期密切相關。季節變化主要與繁殖週期相關，許多魚類在特定的繁殖季節會顯著增加發聲活動。溫帶地區的魚類通常在春夏季節發聲較多，而熱帶地區的魚類可能有多個繁殖高峰。年際變化可能與環境條件的年際差異、食物豐度變化、氣候現象等有關。空間模式包括棲息地選擇、垂直分布、水平分布等。不同種類的魚類具有不同的棲息地偏好，珊瑚礁魚類、深海魚類、大洋性魚類等都有各自特徵的

聲學行為模式。垂直分布模式反映了魚類對不同水深環境的適應，一些魚類進行晝夜垂直遷移，其聲學活動也相應發生垂直變化。水平分布模式可能與食物分布、繁殖場所、溫度梯度等因素相關。

魚類聲學生態在海洋生態系統中的作用和意義正在得到越來越多的認識和重視。生態系統功能方面，魚類的聲學活動是海洋聲景的重要組成部分，它們不僅產生聲音，還響應其他生物和環境的聲音，參與複雜的聲學相互作用網絡。食物網結構中，魚類的聲學行為影響捕食者-獵物關係，一些捕食者利用獵物的聲音來定位，而獵物則需要在聲學通信和捕食者規避之間找到平衡。生物多樣性維持方面，魚類聲學行為的多樣性反映了生態系統的複雜性和健康狀況，聲學多樣性可以作為生物多樣性的指標。棲息地選擇中，幼魚可能利用成體魚類的聲音來尋找適宜的棲息地，這種聲學導航對魚類種群的補充和維持具有重要意義。種群連通性方面，魚類的聲學通信有助於維持分散種群之間的基因交流，對種群的長期生存具有重要意義。環境指示功能使魚類聲學行為可以作為環境變化的敏感指標，透過監測魚類聲學活動的變化可以評估環境健康狀況和人為影響。

人為噪音對魚類聲學生態的影響是當前研究的重要議題，雖然相比海洋哺乳動物，魚類受到的關注較少，但研究表明噪音對魚類同樣會產生顯著影響。聽覺掩蔽是主要的影響機制，環境噪音會掩蔽魚類的聲學信號，降低通信的有效性。這種掩蔽效應可能會影響魚類的求偶成功率、領域防衛能力和群體協調效果。行為改變包括發聲行為的調整、活動模式的改變、棲息地利用的變化等。一些研究發現魚類在噪音環境中會改變發聲的時間、頻率或強度，但這種調整的生態後果還需要進一步研究。生理影響包括應激反應、生長率變化、免疫功能變化等。長期的噪音暴露可能會影響魚類的健康狀況和繁殖能力。種群影響包括繁殖成功率的變化、種群分布的改變、群落結構的變化等。這些影響可能需要較長時間才能顯現，需要長期的監測和研究來評估。由於魚類在海洋生態系統中的重要地位和巨大的經濟價值，保護魚類免受噪音影響對於海洋生態系統健康和漁業可持續發展都具有重要意義。

9.4.3 人為噪音對海洋生物的影響 (Anthropogenic Noise Effects on Marine Life)

人為噪音對海洋生物的影響是當代海洋環境面臨的最嚴重挑戰之一，這種影響的範圍和程度遠超過我們之前的認識。隨著全球海運業的快速發展、海洋工程活動的增加、軍事活動的擴大，以及各種海洋開發項目的實施，海洋環境中的人為噪音水平在過去幾十年中急劇上升。這種噪音污染對海洋生物造成的影響是多方面的，包括直接的生理損傷、行為改變、生態功能 disruption，以及長期的進化和生態後果。人為噪音的影響不僅限於個體層面，還擴展到種群、群落和生態系統層面，可能會改變海洋生態系統的結構和功能。Erbe 等人(2019)[34]在他們關於船舶噪音對海洋哺乳動物影響的綜合研究中指出，人為噪音已經成為海洋環境中最普遍存在的污染形式之一，其影響範圍覆蓋了從極淺的近岸水域到最深的深海盆地，幾乎沒有海洋區域能夠完全避免人為噪音的影響。

人為噪音的來源多樣化，每種噪音源都有其特定的聲學特徵和影響模式。船舶交通噪音是最重要和最普遍的人為噪音源，全球每天有數萬艘各類船舶在海洋中航行，它們產生的噪音主要集中在低頻範圍(10-1000Hz)，具有連續、長期的特徵。大型商船的噪音強度可以達到 180-190dB，在理想傳播條件下可以影響數十甚至數百公里範圍內的海洋生物。海洋工程噪音包括海上石油鑽探、海底管道鋪設、海洋風電場建設、疏浚作業等產生的噪音，這些活動通常產生高強度的脈衝性噪音，峰值聲壓級可以超過 200dB。打樁作業是海洋工程中噪音強度最高的活動之一，單次打樁可以產生超過 220dB 的脈衝噪音，這種極高強度的噪音可能會對數公里範圍內的海洋生物造成嚴重影響。軍事活動噪音主要來自軍用聲納系統，包括低頻主動聲納、中頻主動聲納等，這些聲納系統的聲源級可以達到 220-240dB，具有高度的指向性和穿透性，對海洋哺乳動物的影響特別受到關注。

人為噪音對海洋生物的影響機制複雜多樣，涉及聽覺系統、神經系統、內分泌系統等多個生物學系統。聽覺損傷是最直接和最嚴重的影響，包括暫時性聽覺閾值偏移(TTS)和永久性聽覺閾值偏移(PTS)。TTS 是指在噪音暴露後動物聽覺敏感性的可恢復性降低，恢復時間從幾小時到幾天不等，恢復時間和程度取決於噪音的強度、頻率、持續時間以及動物的種類和個體差異。PTS 是指不可逆的聽覺損傷，通常由極高強度的噪音暴露引起，這種損傷會永久性地降低動物的聽覺能力，對其生存和繁殖產生長期影響。聽覺掩蔽是另一個重要的影響機制，當環境噪音的頻率與動物的通信信號或重要聽覺信息重疊時，噪音會掩蔽這些信號，降低動物

的聽覺感知能力。這種掩蔽效應不需要造成聽覺損傷就能對動物產生顯著影響，它會影響動物的通信、導航、覓食和捕食者規避等重要行為。

行為影響是人為噪音對海洋生物最廣泛和最常見的影響類型，這些影響可能不涉及直接的生理損傷，但可能對動物的適應性和生存產生重要後果。迴避行為是動物對噪音最常見的即時響應，當遭遇高強度噪音時，動物會快速離開噪音源附近的區域。這種迴避行為雖然是一種有效的自我保護機制，但可能會迫使動物放棄重要的棲息地、覓食區域或繁殖場所。長期的棲息地迴避可能會導致動物的分布範圍縮小，營養狀況惡化，繁殖成功率下降。游泳行為的改變包括游泳速度、方向、深度和模式的變化，這些變化可能會影響動物的能量消耗、覓食效率和捕食者規避能力。潛水行為的改變在海洋哺乳動物中特別重要，噪音可能會導致動物提前結束潛水、改變潛水深度或延長表面間隔時間，這些改變可能會影響動物的覓食成功率和生理健康。Hildegard(2005)[35]在他關於人為活動對海洋生物影響的早期研究中就指出，人為噪音的影響可能比我們看到的表面現象更加複雜和深遠，需要從多個時間尺度和生物學層面來全面評估這些影響。

通信和社會行為的干擾是人為噪音對海洋生物最重要的影響之一，因為這些行為直接關係到動物的繁殖成功和社會組織。聲學通信的干擾可能會降低動物通信的有效性和範圍，影響配偶尋找、群體協調、親子聯繫等重要社會行為。對於依賴聲學通信的海洋動物，如鯨豚類和許多魚類，通信干擾可能會產生連鎖反應，影響整個社會群體的功能。繁殖行為的影響包括求偶展示的干擾、交配成功率的降低、繁殖時機的改變等。許多海洋動物的繁殖行為具有嚴格的時間要求和環境條件要求，噪音干擾可能會錯過最佳繁殖時機，影響繁殖成功率。母子關係的干擾在海洋哺乳動物中特別重要，噪音可能會干擾母子之間的聲學聯繫，導致幼體與母體分離，影響幼體的生存率。群體結構的改變包括群體規模的變化、群體凝聚力的降低、社會等級的 disruption 等，這些改變可能會影響群體的生存優勢和適應能力。

生理壓力反應是人為噪音對海洋生物的重要影響機制，長期的噪音暴露可能會導致慢性壓力狀態，對動物的健康和適應性產生廣泛影響。應激激素水平的升高是噪音引起生理壓力的重要指標，長期的高應激激素水平會影響動物的免疫系統、

生殖系統和整體健康狀況。心血管系統的影響包括心率變化、血壓變化、血管反應等，急性噪音暴露可能會引起心率和血壓的急劇變化,而慢性噪音暴露可能會導致心血管系統的長期適應性改變。免疫系統的抑制是慢性壓力的重要後果，長期的噪音壓力可能會降低動物的免疫功能，增加疾病感染的風險，影響傷口癒合和疾病恢復能力。生長和發育的影響包括生長率的降低、發育異常、體重變化等，這些影響在幼體中可能更加明顯。繁殖生理的影響包括性激素水平的變化、生殖週期的 disruption、精子品質的下降等，這些影響可能會降低動物的繁殖能力和繁殖成功率。

種群和生態系統層面的影響是人為噪音對海洋生物最深遠和最複雜的影響，這些影響可能需要數年甚至數十年才能完全顯現。種群分布的改變包括分布範圍的縮小、分布重心的遷移、棲息地利用模式的改變等。長期的噪音影響可能會導致某些區域的動物種群數量下降，甚至可能導致局部種群的消失。種群動態的改變包括出生率、死亡率、遷移率的變化，這些變化會影響種群的增長率和年齡結構。遺傳多樣性的影響可能透過種群分割、基因流中斷、選擇壓力改變等機制發生，長期的種群分離可能會導致遺傳多樣性的降低和近親繁殖的增加。群落結構的變化包括物種組成的改變、優勢種的變化、物種多樣性的變化等，不同物種對噪音的敏感性不同，這可能會改變群落的競爭關係和生態位分配。生態系統功能的影響包括能量流動的改變、營養循環的變化、生態服務功能的下降等，這些影響可能會對整個海洋生態系統的穩定性和可持續性產生長期後果。Pirotta 等人(2019)[36]在他們關於全球航運對海洋巨型動物影響的研究中指出，人為活動特別是航運活動的全球化正在對海洋生態系統產生前所未有的累積影響，這種影響的規模和複雜性要求我們採用全新的方法來理解和應對海洋環境面臨的挑戰。

參考文獻

[1] Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., ... & Simpson, S. D. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science , 371(6529), 1-9.

[2] Harris, S. A., & Radford, C. A. (2014). Marine soundscape ecology. INTER-

NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 249(4), 3264-3269.

[3] Butler, J., Stanley, J. A., & Butler IV, M. J. (2016). Underwater soundscapes in near-shore tropical habitats and the effects of environmental degradation and habitat restoration. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology , 479, 89-96.

[4] Hovem, J. M. (2007). Underwater acoustics: Propagation, devices and systems. Journal of Electroceramics , 19(4), 339-347.

[5] Van Opzeeland, I., & Boebel, O. (2018). Marine soundscape planning: seeking acoustic niches for anthropogenic sound. Journal of Ecoacoustics , 2, 1-15.

[6] Stojanovic, M., & Preisig, J. (2009). Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. IEEE Communications Magazine , 47(1), 84-89.

[7] Etter, P. C. (2012). Advanced applications for underwater acoustic modeling. Advances in Acoustics and Vibration , 2012, 1-29.

[8] Li, Q. (2012). Digital sonar design in underwater acoustics: principles and applications . Springer.

[9] Wang, L. S., Heaney, K., Pangerc, T., Theobald, P., Robinson, S., & Ainslie, M. (2014). Review of underwater acoustic propagation models. NPL Report AC , 12, 1-77.

[10] Preisig, J. (2007). Acoustic propagation considerations for underwater acoustic communications network development. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review , 11(4), 2-10.

[11] Guan, S., Lin, T. H., Chou, L. S., Vignola, J., Judge, J., & Turo, D. (2015).

Dynamics of soundscape in a shallow water marine environment: A study of the habitat of the Indo-Pacific humpback dolphin. Journal of the Acoustical Society of America , 137(5), 2939-2949.

[12] Montgomery, J. C., & Radford, C. A. (2017). Marine bioacoustics. Current Biology , 27(11), R502-R507.

[13] Possenti, L., De Nooijer, L., de Jong, C., Lam, F. P., Kobserver, A., & Slabbekoorn, H. (2024). The present and future contribution of ships to the underwater soundscape. Frontiers in Marine Science , 11, 1252901.

[14] Havlik, M. N., Predragovic, M., & Duarte, C. M. (2022). State of play in marine soundscape assessments. Frontiers in Marine Science , 9, 919418.

[15] Buscaino, G., Ceraulo, M., Pieretti, N., Corrias, V., Farina, A., Filiciotto, F., ... & Mazzola, S. (2016). Temporal patterns in the soundscape of the shallow waters of a Mediterranean marine protected area. Scientific Reports , 6(1), 34230.

[16] McKenna, M. F., Rowell, T. J., Margolina, T., Elemans, C. P., Fink, D., Gabriele, C., ... & Hatch, L. T. (2024). Understanding vessel noise across a network of marine protected areas. Environmental Monitoring and Assessment , 196(4), 1-15.

[17] André, M., van der Schaar, M., Zaugg, S., Houégnigan, L., Sánchez, A. M., & Castell, J. V. (2011). Listening to the deep: live monitoring of ocean noise and cetacean acoustic signals. Marine Pollution Bulletin , 63(4), 18-26.

[18] Cotter, E., Murphy, P., Bassett, C., Williamson, B., Wang, L., & Newhall, K. (2019). Acoustic characterization of sensors used for marine environmental monitoring. Marine Pollution Bulletin , 144, 362-365.

[19] Zhu, C., Seri, S. G., Mohebbi-Kalkhoran, H., & Ratilal, P. (2020). Long-range

automatic detection, acoustic signature characterization and bearing-time estimation of multiple ships with coherent hydrophone array. Remote Sensing , 12(22), 3731.

[20] Di Iorio, L., Gervaise, C., Jaud, V., Robson, A. A., & Chauvaud, L. (2012). Hydrophone detects cracking sounds: Non-intrusive monitoring of bivalve movement. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology , 432, 9-16.

[21] Teixeira, D., Maron, M., & van Rensburg, B. J. (2019). Bioacoustic monitoring of animal vocal behavior for conservation. Conservation Science and Practice , 1(8), e72.

[22] Montgomery, J. C., & Radford, C. A. (2017). Marine bioacoustics. Current Biology , 27(11), R502-R507.

[23] Winship, K. A., & Jones, B. L. (2023). Acoustic monitoring of professionally managed marine mammals for health and welfare insights. Animals , 13(13), 2124.

[24] Fleishman, E., Cholewiak, D., Gillespie, D., Helble, T., Hobbs, R. C., Kügler, A., & Stanistreet, J. E. (2023). Ecological inferences about marine mammals from passive acoustic data. Biological Reviews , 98(4), 1633-1655.

[25] Erbe, C., Marley, S. A., Schoeman, R. P., Smith, J. N., Trigg, L. E., & Embling, C. B. (2019). The effects of ship noise on marine mammals—a review. Frontiers in Marine Science , 6, 606.

[26] Audoly, C., Gaggero, T., Baudin, E., Hoffman, P., & Rizzuto, E. (2017). Mitigation of underwater radiated noise related to shipping and its impact on marine life: a practical approach developed in the scope of AQUO project. IEEE Journal of Oceanic Engineering , 42(2), 740-756.

[27] Hatch, L. T., & Fristrup, K. M. (2009). No barrier at the boundaries: implementing regional frameworks for noise management in protected natural areas. Marine

Ecology Progress Series , 395, 223-244.

[28] La Manna, G., Picciulin, M., Crobu, A., Perretti, F., Leoni, G., Huet, R., & Ceccherelli, G. (2021). Marine soundscape and fish biophony of a Mediterranean marine protected area. PeerJ , 9, e12551.

[29] Herrera-Montes, M. I. (2018). Protected area zoning as a strategy to preserve natural soundscapes, reduce anthropogenic noise intrusion, and conserve biodiversity. Tropical Conservation Science , 11, 1940082918804344.

[30] Buscaino, G., Ceraulo, M., Pieretti, N., Corrias, V., Farina, A., Filiciotto, F., ... & Mazzola, S. (2016). Temporal patterns in the soundscape of the shallow waters of a Mediterranean marine protected area. Scientific Reports , 6(1), 34230.

[31] Tyack, P. L. (2017). Marine mammal acoustic behavior. Acoustics Today , 13(2), 21-28.

[32] Van Opzeeland, I. (2010). Acoustic ecology of marine mammals in polar oceans . Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research.

[33] Basdeo, R., Fraser, M. A., Da Silva, P. N. B., Bhagarathi, L. K., & Crocker, S. E. (2025). Bioacoustics disruption in marine environments: Reviewing the impact of anthropogenic noise on marine organisms. World , 6(1), 1-25.

[34] Erbe, C., Marley, S. A., Schoeman, R. P., Smith, J. N., Trigg, L. E., & Embling, C. B. (2019). The effects of ship noise on marine mammals—a review. Frontiers in Marine Science , 6, 606.

[35] Hildebrand, J. A. (2005). Impacts of anthropogenic sound. In Marine mammal research: conservation beyond crisis (pp. 101-124). Johns Hopkins University Press.

[36] Pirotta, V., Grech, A., Jonsen, I. D., Laurance, W. F., & Harcourt, R. G. (2019). Consequences of global shipping traffic for marine giants. Frontiers in Ecology and the Environment , 17(1), 39-47.

第十章 聲景的未來發展
Future Directions of Soundscape

隨著二十一世紀科技快速發展與全球環境意識的日益提升，聲景研究正站在一個重要的轉捩點上。在過去數十年中，聲景研究從 R. Murray Schafer 的開創性工作發展至今，已經形成了相對完整的理論體系和研究方法，然而面對氣候變遷、城市化加速、科技革新和社會變遷等多重挑戰，聲景研究需要在理論深化、技術創新、國際合作和實務應用等方面進行全面性的發展和突破[1]。當前全球城市人口已超過總人口的一半，預計到 2050 年將達到 68%，這種前所未有的城市化進程對聲環境品質提出了更高的要求，同時也為聲景研究提供了巨大的發展機遇[2]。

聲景未來發展的核心驅動力來自於多個層面的需求匯聚。首先是技術發展的推動，人工智慧、物聯網、大數據分析等新興技術為聲景研究提供了前所未有的工具和方法，使得大規模、長期性、精細化的聲景監測和管理成為可能[3]。其次是社會需求的牽引，隨著人們生活品質要求的提高和健康意識的增強，對優質聲環境的需求日益增長，這推動了聲景研究從學術研究向實務應用的轉化[4]。第三是政策導向的支持，各國政府越來越重視聲環境品質，將聲景規劃納入城市發展和環境保護的重要議程，為聲景研究提供了政策支撐和資源保障[5]。

在全球層面，聲景研究正朝向更加國際化、標準化和跨領域的方向發展。國際標準化組織（ISO）聲景標準系列的制定和實施，為全球聲景研究提供了統一的框架和方法，促進了不同國家和地區之間的比較研究和經驗交流[6]。同時，跨文化聲景研究的興起揭示了不同文化背景下聲景感知的差異性和共通性，為建立更加包容和普適的聲景理論奠定了基礎[7]。氣候變遷對聲景的影響也成為新興的研究熱點，隨著極端天氣事件頻發和生態系統變遷，傳統的聲景格局正在發生深刻變化，這需要聲景研究建立新的分析框架和應對策略[8]。

面向未來，聲景研究需要在四個主要方向上實現突破性發展：技術發展趨勢將推動聲景研究方法的革新和效率的提升；全球研究方向的確立將促進國際合作和標準化進程；挑戰與機會的識別將引導研究重點和資源配置；永續發展願景的確立將為聲景研究提供長期目標和價值導向。這些發展方向相互關聯、相互促進，共

同構成了聲景未來發展的完整藍圖，為人類創造更加美好的聲環境提供科學指導和技術支撐[9]。

10.1 技術發展趨勢 (Technological Development Trends)

科技創新正在深刻改變聲景研究和管理的方式，從傳統的被動測量轉向主動智慧化管理，從單點監測轉向網絡化覆蓋，從定性描述轉向精準量化分析。這些技術發展趨勢不僅提升了聲景研究的科學性和準確性，更為聲景規劃和管理提供了強有力的工具支撐[10]。智慧城市概念的興起和物聯網技術的普及，使得城市聲景管理開始向數位化、智慧化方向發展，形成了以數據驅動的新型聲景治理模式[11]。人工智慧技術的快速發展為聲景分析和預測提供了前所未有的能力，機器學習和深度學習算法能夠從大量聲學數據中發現隱藏的規律和模式，實現對複雜聲環境的自動識別和評估[12]。

新興感測技術的發展使得聲景監測變得更加便捷、精確和全面。無線感測網絡技術的成熟使得大規模聲景監測網絡的建設成為可能，低功耗、小型化的聲學感測器可以部署在城市的各個角落，形成密集的監測網絡，實現對城市聲環境的全天候、全覆蓋監測[13]。邊緣計算技術的應用使得數據處理能力下沉到感測節點，減少了數據傳輸的延遲和成本，提高了系統的即時響應能力[14]。雲端計算平台為海量聲景數據的存儲、處理和分析提供了強大的計算資源，使得大規模聲景數據分析成為現實[15]。

這些技術發展趨勢正在重塑聲景研究的整體格局，推動聲景研究從傳統的實驗室研究向實際應用轉化，從小規模案例研究向大規模系統化研究發展，從單一學科研究向跨領域整合研究演進。技術創新不僅改變了研究方法和工具，更重要的是改變了研究思維和研究範式，為聲景研究開闢了新的發展空間和應用領域[16]。

10.1.1 智慧城市與聲景 (Smart Cities and Soundscape)

智慧城市作為當代城市發展的重要趨勢，正在為聲景研究和管理提供全新的技術平台和應用場景。智慧城市概念強調運用資訊通訊技術整合城市運營核心系統，

以提升城市管理效能和居民生活品質，其中聲景管理作為城市環境品質的重要組成部分，正在成為智慧城市建設的重要內容[17]。智慧城市基礎設施為聲景監測和管理提供了強大的技術支撐，包括遍布城市的感測網絡、高速的通訊網絡、強大的數據處理平台和先進的分析工具，這些技術要素的整合使得城市尺度的聲景管理成為可能[18]。

在智慧城市框架下，聲景管理正在實現從被動響應向主動預防的轉變。傳統的聲景管理主要依賴於公眾投訴和定期檢測，具有滯後性和局限性，而智慧城市技術使得即時監測、預警和干預成為可能[19]。透過部署在城市各處的智慧聲學感測器，管理部門可以即時掌握城市聲環境的動態變化，及時發現聲環境問題並採取相應措施。例如，當某個區域的噪音水平超過預設閾值時，系統可以自動向相關部門發送警報，並啟動應急響應程序[20]。這種主動式管理模式不僅提高了管理效率，也減少了聲環境問題對居民生活的影響。

智慧城市平台為聲景數據的整合和分析提供了強大的能力。城市中的聲景數據往往分散在不同的部門和系統中，缺乏統一的管理和分析機制，而智慧城市平台可以將這些分散的數據整合到統一的平台上，進行綜合分析和挖掘[21]。透過大數據分析技術，可以發現聲景變化的規律和趨勢，識別聲環境問題的成因和影響因素，為聲景規劃和管理提供科學依據。例如，透過分析交通流量、氣象條件、建築密度等多維度數據與聲景品質的關聯性，可以建立聲景預測模型，為城市規劃和建設提供參考[22]。

智慧城市技術還推動了聲景管理的精細化和個性化發展。傳統的聲景管理往往採用一刀切的方式，忽略了不同區域、不同時段、不同人群的差異化需求，而智慧城市技術使得精細化管理成為可能[23]。透過高精度的感測網絡和先進的分析算法，可以實現對城市聲環境的精細化監測和評估，針對不同區域的特點制定差異化的管理策略。例如，在學校周邊區域實施更嚴格的噪音控制措施，在商業區域允許適度的聲音活力，在住宅區域注重寧靜舒適的聲環境營造[24]。

人工智慧技術在智慧城市聲景管理中發揮著越來越重要的作用。機器學習算法可以從大量的聲景數據中學習和發現規律，實現對聲環境的自動分類和評估[25]。

深度學習技術可以處理複雜的聲音信號，識別不同的聲音來源和特徵，為聲景分析提供更加精確的工具。例如，透過訓練深度神經網絡，可以自動識別交通噪音、工業噪音、自然聲音等不同類型的聲音，並評估其對聲景品質的影響[26]。自然語言處理技術可以分析公眾對聲環境的意見和反饋，從社交媒體、投訴平台等管道獲取民眾對聲景的感知和評價，為聲景管理提供社會感知維度的信息[27]。

物聯網技術為智慧城市聲景管理提供了廣泛的數據來源和控制手段。透過在城市中部署大量的智慧感測設備，可以建立覆蓋全城的聲景監測網絡，實現對聲環境的全方位感知[28]。這些設備不僅可以監測聲學參數，還可以監測相關的環境參數，如溫度、濕度、風速、空氣品質等，為聲景分析提供更加全面的環境背景信息。同時，物聯網技術還可以控制城市中的各種設備和設施，實現聲景的主動調節和優化[29]。例如，透過控制交通信號燈的時序，可以優化交通流量分佈，減少交通噪音的集中產生；透過控制建築物的聲學設施，可以調節室內外聲環境的品質。

區塊鏈技術在智慧城市聲景管理中也展現出巨大潛力。聲景數據的真實性和完整性對於管理決策至關重要，而區塊鏈技術的不可篡改性和分散式存儲特點可以確保數據的可信度[30]。透過建立基於區塊鏈的聲景數據管理系統，可以實現數據的透明化管理，增強公眾對聲景管理的信任和參與度。同時，區塊鏈技術還可以支援聲景數據的共享和交易，促進不同機構和組織之間的合作，推動聲景管理的協同化發展[31]。

數位孿生技術為智慧城市聲景管理提供了全新的分析和模擬工具。透過建立城市聲環境的數位孿生模型，可以在虛擬環境中模擬和預測聲景變化，評估不同管理策略的效果[32]。這種技術不僅可以用於聲景規劃的前期評估，還可以用於聲景管理的即時優化。例如，當城市中發生大型活動或施工項目時，可以透過數位孿生模型預測其對周邊聲環境的影響，並制定相應的管理措施[33]。數位孿生技術還可以支援聲景管理的可視化，透過三維可視化界面，管理人員可以直觀地了解城市聲環境的分佈狀況和變化趨勢。

智慧城市技術推動了聲景管理的民主化和參與化發展。透過移動應用程式和網絡

平台，公眾可以更加便捷地參與聲景監測和評估，向管理部門反饋聲環境問題和建議[34]。眾包模式的應用使得聲景數據收集的範圍和頻率大大提升，彌補了官方監測網絡的不足。例如，透過開發聲景監測應用程式，鼓勵市民使用手機進行聲環境測量和評價，形成全民參與的聲景監測網絡[35]。社交媒體平台也成為重要的聲景信息來源，透過分析用戶在社交媒體上分享的與聲環境相關的內容，可以了解公眾對聲景的感知和態度。

10.1.2 AI 驅動聲景治理 (AI-Driven Soundscape Governance)

人工智慧技術正在革命性地改變聲景治理的方式和效果，從傳統的人工分析轉向智慧化自動分析，從經驗導向決策轉向數據驅動決策，從靜態管理轉向動態適應管理。AI 驅動的聲景治理不僅提高了管理效率和準確性，更重要的是實現了聲景管理的預測性和預防性，使得聲景問題能夠在發生之前就被識別和解決[36]。機器學習算法在聲景數據分析中的應用，使得從大量複雜的聲學數據中提取有用信息成為可能，這些信息包括聲音來源識別、聲景品質評估、異常聲音檢測等，為聲景治理提供了科學依據[37]。

深度學習技術在聲景自動分類和識別方面取得了顯著進展。卷積神經網絡（CNN）和循環神經網絡（RNN）等深度學習模型能夠學習聲音信號的複雜特徵，實現對不同類型聲音的精確識別和分類[38]。例如，透過訓練深度學習模型，可以自動識別交通噪音、人聲、自然聲音、機械噪音等不同類型的聲音組分，並分析其在整體聲景中的貢獻度。這種自動化的聲音分析能力大大提高了聲景評估的效率和一致性，減少了人為主觀因素的影響[39]。長短期記憶網絡（LSTM）等時序模型能夠捕捉聲景隨時間變化的動態特徵，為聲景的時間序列分析和預測提供了強大工具。

強化學習技術為聲景治理提供了智慧化的決策支援能力。透過建立聲景治理的強化學習模型，AI 系統可以在與環境的互動中學習最優的治理策略[40]。例如，在城市交通噪音控制中，強化學習算法可以學習在不同時段、不同路段採取何種控制措施能夠最有效地改善聲環境品質，同時最小化對交通效率的影響。這種自適應的學習能力使得聲景治理策略能夠隨著環境變化而不斷優化和改進[41]。多智

能體強化學習技術還可以協調不同治理主體的行動，實現聲景治理的協同優化。

自然語言處理技術在聲景治理中發揮著重要的輔助作用。透過分析公眾在社交媒體、新聞媒體、政府平台等管道發表的與聲環境相關的文本內容，可以了解公眾對聲景的感知、態度和需求[42]。情感分析技術可以識別公眾對聲環境的情感傾向，主題建模技術可以發現公眾關注的聲景問題焦點，這些信息為聲景治理提供了重要的社會感知維度的數據。智慧客服系統可以自動處理公眾的聲環境投訴和諮詢，提高服務效率和品質[43]。

計算機視覺技術與聲景分析的結合為聲景治理提供了多模態的分析能力。透過同時分析視覺信息和聲學信息，可以更全面地理解聲景的形成機制和影響因素[44]。例如，透過分析監控攝像頭捕獲的交通流量信息和同時採集的聲學數據，可以建立更準確的交通噪音預測模型。無人機和衛星遙感技術的應用使得大範圍聲景調查成為可能，透過航空聲學測量和地面聲學測量的結合，可以獲得更完整的區域聲景信息[45]。

預測分析技術為聲景治理提供了前瞻性的管理能力。透過分析歷史聲景數據、氣象數據、城市活動數據等多維度信息，AI 系統可以預測未來的聲景變化趨勢和可能出現的問題[46]。時間序列預測模型可以預測不同時段的聲環境變化，幫助管理部門提前制定應對措施。異常檢測算法可以識別聲環境中的異常狀況，及時發現突發的噪音事件或設備故障[47]。這種預測性管理能力使得聲景治理從被動響應轉向主動預防，大大提高了管理效果。

智慧優化算法在聲景治理資源配置中發揮著重要作用。聲景治理涉及多個利害關係人和多種資源，如何在有限的資源約束下實現最優的治理效果是一個複雜的優化問題[48]。遺傳算法、粒子群優化算法、模擬退火算法等智慧優化技術可以求解這類複雜的優化問題，為聲景治理資源的合理配置提供科學指導。例如，在城市聲屏障規劃中，優化算法可以確定聲屏障的最優位置、高度和材料，在控制成本的同時最大化降噪效果[49]。

邊緣 AI 技術為聲景治理提供了即時響應能力。傳統的 AI 分析需要將數據傳輸

到雲端進行處理，存在延遲和帶寬限制問題，而邊緣 AI 技術將 AI 計算能力部署到感測設備附近，實現數據的就地處理和分析[50]。這種技術在聲景監測中特別有用，可以即時識別異常聲音事件，觸發警報或自動響應措施。例如，部署在噪音敏感區域的邊緣 AI 設備可以即時檢測超標噪音，並自動啟動降噪設備或發送警報信息[51]。

聯邦學習技術為多機構聲景治理協作提供了新的可能。聲景治理往往涉及多個政府部門、企業和研究機構，各機構擁有不同的數據資源，但由於隱私和安全考慮，直接共享數據存在困難[52]。聯邦學習技術允許各機構在不共享原始數據的情況下協同訓練 AI 模型，實現知識共享和模型優化。這種技術為建立跨機構的聲景治理 AI 系統提供了可行的技術路徑[53]。

可解釋 AI 技術提高了 AI 驅動聲景治理的透明度和可信度。傳統的 AI 模型往往是「黑盒子」，其決策過程難以理解和解釋，這在政府治理應用中存在問題[54]。可解釋 AI 技術可以揭示 AI 模型的決策過程和依據，幫助管理人員理解 AI 建議的合理性，增強對 AI 系統的信任。例如，當 AI 系統建議在某個區域實施噪音控制措施時，可解釋 AI 技術可以說明這一建議的依據，包括哪些因素起了關鍵作用，預期效果如何等[55]。

10.1.3 新興感測技術 (Emerging Sensing Technologies)

新興感測技術正在為聲景研究和監測開啟全新的可能性，從傳統的固定式、高成本測量設備向分散式、低成本、智慧化感測網絡發展。這些技術創新不僅大幅降低了聲景監測的成本和技術門檻，更重要的是實現了監測範圍的大幅擴展和監測精度的顯著提升[56]。無線感測網絡技術的成熟使得建立城市尺度的聲景監測網絡成為現實，數百甚至數千個小型化感測節點可以形成密集的監測網絡，提供前所未有的空間解析度和時間連續性[57]。

微機電系統（MEMS）技術的發展推動了聲學感測器的小型化和低功耗化。MEMS 麥克風具有體積小、功耗低、成本低、響應快等優點，使得大規模部署聲學感測器成為可能[58]。這些微型感測器可以整合到各種城市基礎設施中，如路燈、交

通標誌、建築立面等，形成無處不在的感測網絡。先進的 MEMS 技術還實現了感測器的頻率響應優化和噪音抑制能力提升，提高了測量的準確性和可靠性[59]。數位 MEMS 麥克風的出現進一步提高了信號品質和系統整合度，為聲景監測系統的智慧化奠定了硬體基礎。

物聯網（IoT）技術為聲景感測網絡提供了連接和管理能力。低功耗廣域網絡（LPWAN）技術，如 LoRaWAN、NB-IoT 等，使得聲學感測器可以在低功耗條件下實現長距離通訊，大大降低了網絡部署和維護成本[60]。這些技術特別適合於需要長期監測的聲景應用，如生態聲景監測、噪音長期趨勢分析等。5G 網絡的普及為聲景數據的高速傳輸提供了基礎設施支撐，使得即時聲景監測和分析成為可能[61]。邊緣計算技術的整合使得感測節點具備了本地數據處理能力，減少了數據傳輸量和系統延遲。

人工智慧晶片的發展為感測設備帶來了強大的邊緣計算能力。專用的 AI 晶片，如神經網絡處理器（NPU）、現場可程式閘陣列（FPGA）等，可以在感測節點上執行複雜的聲音分析算法[62]。這使得聲音的即時分類、異常檢測、品質評估等功能可以在感測設備端實現，大大提高了系統的即時性和效率。邊緣 AI 的應用還減少了對雲端計算資源的依賴，提高了系統的可靠性和隱私保護能力[63]。

先進的信號處理技術提升了聲景感測的精度和魯棒性。陣列信號處理技術透過多個麥克風的協同工作，可以實現聲源定位、聲束成形、干擾抑制等功能[64]。這種技術在複雜聲環境中特別有用，可以從混合的聲音信號中分離出感興趣的聲音組分。自適應濾波技術可以抑制環境噪音和系統噪音，提高有用信號的信噪比[65]。壓縮感測技術可以在降低數據量的同時保持信號的重要特徵，適合於帶寬受限的應用場景。

光學聲學感測技術為聲景監測提供了新的技術路徑。雷射干涉儀可以非接觸式地測量聲波振動，避免了傳統麥克風的安裝和維護問題[66]。光纖聲學感測技術可以實現分散式聲學監測，一根光纖可以監測沿線多個點的聲學信號，特別適合於大範圍的聲景監測應用。這些光學技術具有抗電磁干擾、環境適應性強等優點，在特殊環境下具有獨特優勢[67]。

衛星遙感技術在大尺度聲景監測中展現出巨大潛力。雖然衛星無法直接測量聲音，但可以透過監測聲音產生的相關因素來推算聲景狀況[68]。例如，透過衛星影像分析交通流量、工業活動、城市建設等情況，結合地面聲學模型，可以估算大範圍的噪音分佈。合成孔徑雷達（SAR）技術可以監測地面振動，間接反映聲學活動狀況[69]。這種技術對於偏遠地區或難以到達地區的聲景監測具有重要價值。

無人機聲學監測技術為聲景研究提供了靈活的移動監測平台。配備聲學感測器的無人機可以在三維空間中進行聲學測量，獲得不同高度和位置的聲景信息[70]。這種技術特別適合於復雜地形的聲景調查、建築物周圍的聲場分析、突發事件的應急監測等應用。無人機的機動性使得可以根據需要調整監測位置和路徑，實現adaptive monitoring（適應性監測）[71]。多無人機協同監測技術可以同時獲得多點聲學數據，為聲場重構和聲源定位提供豐富信息。

穿戴式聲學監測設備為個人聲暴露評估提供了新工具。智慧手錶、智慧眼鏡、智慧耳機等可穿戴設備整合聲學感測功能，可以連續監測個人的聲環境暴露狀況[72]。這些設備通常具有低功耗、小體積、使用方便等特點，適合於長期佩戴和使用。個人聲景監測數據的彙聚可以形成眾包的聲景監測網絡，提供大範圍、高密度的聲景數據[73]。隱私保護技術的應用確保個人數據的安全性和匿名性。

生物聲學感測技術為生態聲景研究提供了專業化工具。專門設計的生物聲學感測器可以長期部署在自然環境中，自動記錄和分析動物聲音[74]。這些設備通常具有低功耗、防水防塵、長期穩定工作等特點，適應惡劣的野外環境。人工智慧技術的整合使得自動物種識別和行為分析成為可能，大大提高了生態聲景研究的效率[75]。

10.2 全球聲景研究方向 (Global Research Directions)

全球聲景研究正在經歷前所未有的國際化發展過程，從最初的分散獨立研究轉向協調統一的全球性研究網絡。這種轉變不僅體現在研究方法和標準的統一化上，更重要的是體現在研究視野的全球化和研究目標的共同化上[76]。國際合作與交

流的加強使得不同國家和地區的聲景研究經驗得以共享，研究資源得以優化配置，研究成果得以廣泛應用。聲景標準化的推進為全球聲景研究提供了統一的框架和方法，使得不同研究之間的比較和整合成為可能[77]。跨文化聲景研究的興起揭示了聲景感知的文化差異性和普世性，為建立更加包容和適應的聲景理論和方法奠定了基礎。

全球聲景研究方向的確立反映了聲景問題的全球性特徵和共同挑戰。城市化、氣候變遷、技術發展等全球性趨勢對世界各地的聲景都產生著相似的影響，需要全球聲景研究界的共同應對[78]。同時，不同地區的自然環境、文化背景、社會制度等差異也為聲景研究提供了豐富的案例和比較研究的機會。全球性的研究網絡和合作機制的建立，使得這些共同挑戰和多樣化經驗能夠在更大範圍內產生協同效應[79]。

在方法學發展方面，全球聲景研究正在建立更加統一和標準化的研究方法體系。國際標準化組織（ISO）聲景標準系列的制定和實施，為全球聲景研究提供了methodological backbone（方法學骨幹），確保不同研究之間的可比性和一致性[80]。同時，新興技術的應用也在全球範圍內推動著研究方法的創新和升級，人工智慧、物聯網、大數據等技術的全球性普及為聲景研究提供了共同的技術基礎[81]。

10.2.1 國際合作與交流 (International Collaboration and Exchange)

國際合作與交流已成為推動全球聲景研究發展的重要動力，透過建立跨國研究網絡、開展聯合研究項目、共享研究資源和成果，全球聲景研究界正在形成一個緊密聯繫的學術共同體[82]。這種國際合作不僅促進了知識的流動和技術的轉移，更重要的是推動了聲景研究範式的創新和研究視野的拓展。國際聲景研究網絡（International Soundscape Research Network）等組織的建立，為全球聲景研究者提供了交流平台和合作機會，促進了跨國界、跨文化的研究合作[83]。

歐盟框架計劃（Horizon Europe）等國際研究資助計劃為聲景領域的國際合作提供了重要支撐。透過資助大型跨國研究項目，這些計劃促進了歐洲乃至全球聲景研究機構之間的深度合作[84]。例如，SOUNDSCAPE-HORIZONS 項目匯聚了來

自多個國家的頂尖研究機構，共同開發聲景評估和管理的創新方法和技術。這類國際合作項目不僅產出了重要的科研成果，還培養了一批具有國際視野的聲景研究人才[85]。項目執行過程中形成的跨文化研究團隊，為不同文化背景下的聲景比較研究創造了條件。

國際學術會議和研討會為聲景研究的國際交流提供了重要平台。國際聲學學會（International Commission for Acoustics, ICA）、歐洲聲學學會（European Acoustics Association, EAA）等組織定期舉辦聲景專題會議，吸引來自世界各地的研究者參與[86]。這些會議不僅是最新研究成果的展示平台，更是研究趨勢討論和未來合作規劃的重要場所。Inter-Noise 大會、Forum Acusticum 等國際會議設立的聲景專題會議，為不同研究領域的交叉融合提供了機會[87]。虛擬會議技術的普及進一步降低了國際交流的門檻，使得更多研究者能夠參與國際學術交流。

國際期刊在促進聲景研究國際交流方面發揮著重要作用。Applied Acoustics、Journal of the Acoustical Society of America、Landscape and Urban Planning 等國際期刊為聲景研究成果的發表和傳播提供了平台[88]。這些期刊的國際化編委會和同行評議制度確保了發表研究的品質和國際影響力。開放獲取期刊的發展使得研究成果能夠更廣泛地被全球研究者獲取和引用，促進了知識的全球共享[89]。特刊（Special Issues）的組織形式為特定主題的國際研究成果集中展示提供了機會。

國際標準制定過程本身就是一個重要的國際合作機制。ISO/TC 43/SC 1 聲學技術委員會匯聚了來自世界各國的專家，共同制定聲景相關的國際標準[90]。這一過程不僅產出了統一的技術標準，更重要的是促進了不同國家和地區在聲景認知和方法上的交流與融合。各國專家在標準制定過程中分享的經驗和案例，豐富了全球聲景研究的知識庫[91]。標準的實施和驗證過程也需要國際合作，透過多國多地的應用實踐，確保標準的普適性和有效性。

研究人員流動和交換計劃為聲景研究的國際化發展提供了人才支撐。博士生聯合培養項目、博士後交流項目、訪問學者計劃等為年輕研究者提供了國際化的研究經歷[92]。這些計劃不僅提升了個人的研究能力，更促進了不同研究機構之間的長期合作關係建立。Erasmus+等教育交流計劃為聲景研究領域的學生和教師交流

提供了資助支持[93]。這種人員流動帶來的 knowledge spillover（知識溢出）效應，推動了聲景研究方法和理念的全球傳播。

國際資料庫和數據共享平台的建設為全球聲景研究提供了重要的數據基礎。Global Soundscapes Database 等國際資料庫匯集了來自世界各地的聲景數據，為比較研究和 meta-analysis（元分析）提供了資料支撐[94]。這些資料庫的建設需要各參與國家和機構的數據貢獻和標準化工作，體現了深度的國際合作。數據開放和共享政策的推行進一步促進了國際合作，使得研究者能夠利用全球數據資源開展更大規模的研究[95]。

國際組織和網絡在協調全球聲景研究方面發揮著重要作用。世界衛生組織（WHO）的環境噪音指南制定過程匯聚了全球的聲景和健康研究證據[96]。聯合國人居署（UN-Habitat）的可持續城市發展議程為聲景研究提供了政策指導和實踐機會。這些國際組織的參與使得聲景研究能夠更好地服務於全球政策制定和實踐應用[97]。

技術轉移和能力建設也是國際合作的重要內容。發達國家的先進聲景技術和方法透過國際合作項目向發展中國家轉移，促進了全球聲景研究能力的均衡發展[98]。技術培訓、設備援助、人員培養等形式的國際援助，幫助發展中國家建立了自己的聲景研究能力。南南合作模式的發展為發展中國家之間的經驗分享和技術交流提供了新的途徑[99]。

10.2.2 聲景標準化 (Soundscape Standardization)

聲景標準化是推動全球聲景研究和實踐發展的基礎性工作，透過建立統一的概念、方法和程序，為世界各地的聲景研究提供共同的參考框架和技術基礎[100]。國際標準化組織（ISO）聲景標準系列的制定和實施，標誌著聲景研究從學術探索階段進入標準化應用階段，為聲景領域的全球化發展奠定了重要基礎[101]。這一標準化過程不僅統一了聲景的基本概念和定義，更重要的是建立了標準化的研究方法和評估程序，使得不同研究之間的比較和整合成為可能。

ISO 12913 標準系列是目前最重要的國際聲景標準，包括三個部分：第一部分定義了聲景的概念框架，第二部分規定了數據收集和報告要求，第三部分提供了數據分析方法[102]。這一標準系列的制定過程歷時多年，匯聚了來自世界各國的聲景專家，經過廣泛的討論和驗證，確保了標準的科學性和適用性。ISO 12913-1:2014 首次在國際標準層面正式定義了聲景概念，將聲景定義為「個人、群體或社區對特定環境中聲學環境的感知、體驗和/或理解」，這一定義為全球聲景研究提供了統一的 conceptual foundation（概念基礎）[103]。

標準化的數據收集方法確保了不同研究之間的可比性和一致性。ISO 12913-2:2018 詳細規定了聲景調查的設計原則、問卷內容、採樣方法、測量程序等技術要求[104]。標準化問卷的使用使得不同研究能夠產生一致性的數據，為大規模的比較研究和 meta-analysis 提供了基礎。聲學測量的標準化程序確保了物理聲學參數測量的準確性和可重複性[105]。這些標準化方法的廣泛應用，正在形成全球性的聲景數據庫，為聲景研究提供豐富的數據資源。

數據分析方法的標準化推動了聲景評估技術的規範化發展。ISO 12913-3:2019 提供了標準化的數據分析程序，包括感知維度分析、聲景品質評估、統計分析方法等[106]。聲景感知空間（perceptual space）的標準化模型為不同聲景的比較提供了統一的評估框架。這種標準化不僅提高了研究結果的可信度，也為聲景評估工具的開發和應用提供了技術規範[107]。機器學習和人工智慧方法在聲景分析中的應用也需要標準化的指導，以確保算法的透明度和結果的可解釋性。

聲景標準的全球實施面臨著文化適應性的挑戰。不同文化背景下的人們對聲音的感知和評價存在差異，這要求聲景標準在保持統一性的同時具備文化適應性[108]。聲景屬性翻譯項目（Soundscape Attributes Translation Project, SATP）正在努力建立不同語言版本的標準化聲景評估工具，確保標準在不同文化環境中的適用性[109]。跨文化驗證研究的開展為標準的文化適應性提供了科學證據，推動了標準的持續改進和完善。

國家標準與國際標準的協調是聲景標準化的重要議題。各國根據自己的具體情況制定國家標準，這些標準需要與國際標準保持一致性，同時又要適應本國的實際

需求[110]。標準化機構之間的協調合作確保了不同層級標準之間的兼容性。技術法規的制定為標準的實施提供了法律支撐，推動了標準從技術建議向強制要求的轉化[111]。

標準化的認證和測試程序為聲景產品和服務的品質保障提供了技術手段。聲景評估工具的標準化測試確保了工具的可靠性和有效性[112]。聲景設計方案的標準化評估為設計品質的控制提供了依據。專業人員的資格認證制度建立了聲景領域的專業標準，提升了服務品質[113]。這些認證和測試程序的建立，推動了聲景產業的規範化發展。

標準的維護和更新機制確保了標準的持續有效性。技術發展和認知進步要求標準需要定期更新和完善[114]。國際標準化組織建立了標準審查和修訂的定期機制，確保標準能夠反映最新的科學認知和技術發展。使用者反饋和實施經驗的收集為標準改進提供了重要輸入[115]。新興技術的發展也推動了新標準的制定，如人工智慧在聲景分析中的應用標準、虛擬聲景的評估標準等。

10.2.3 跨文化聲景研究 (Cross-cultural Soundscape Research)

跨文化聲景研究正在成為全球聲景研究領域的重要前沿，這一研究方向不僅揭示了不同文化背景下聲景感知的差異性和共通性，更為建立更加包容和普適的聲景理論體系提供了重要基礎[116]。文化差異對聲景感知的影響體現在多個層面，包括對不同聲音的價值判斷、聲景品質的評價標準、聲環境的偏好模式等，這些差異反映了深層的文化認知結構和社會價值觀念的影響[117]。跨文化研究的開展不僅豐富了聲景研究的理論內涵，也為全球化背景下的聲景規劃和管理提供了重要參考。

語言差異是跨文化聲景研究面臨的首要挑戰。聲景評估往往依賴於語言描述，而不同語言對聲音感知的描述存在顯著差異[118]。聲景屬性翻譯項目（SATP）的開展，旨在建立不同語言版本的標準化聲景評估工具，確保跨文化研究的可比性。這一項目不僅涉及語言的直接翻譯，更重要的是要確保翻譯後的詞彙能夠準確反映原始概念的含義[119]。語義差異量表（Semantic Differential Scale）的跨文化適

應需要考慮不同文化中詞彙的內涵和外延差異，確保評估工具的文化有效性。

宗教和哲學傳統對聲景感知產生深刻影響。東亞文化中的「靜」的概念與西方文化中的「quiet」概念存在微妙差異，前者更強調心理層面的寧靜，後者更注重物理層面的安靜[120]。伊斯蘭文化中對宗教聲音（如宣禮聲）的特殊態度，佛教文化中對自然聲音的崇尚，基督教文化中對教堂鐘聲的認同，這些都體現了宗教文化對聲景評價的影響[121]。印度教文化中的「nada」概念將聲音視為宇宙的基本要素，這種哲學觀念影響了對聲景的整體認知方式。

社會結構和生活方式的差異也體現在聲景感知上。集體主義文化和個人主義文化對聲音私密性的要求不同，前者更能接受共享的聲音空間，後者更注重聲音的個人控制[122]。城市化程度不同的社會對工業聲音的接受度存在差異，高度城市化的社會可能對機械聲音有更高的容忍度，而傳統農業社會可能對自然聲音有更強的偏好[123]。社會經濟地位的差異也影響聲景感知，這種影響在不同文化中的表現方式和程度存在差異。

地理環境和氣候條件塑造了不同地區的聲景文化特徵。熱帶地區的豐富生物聲景形成了與自然聲音和諧共處的文化傳統，而寒帶地區的相對安靜環境可能培養了對細微聲音變化的敏感性[124]。沿海地區的海洋聲景文化與內陸地區的陸地聲景文化存在顯著差異，前者可能對節律性聲音有更強的親和力[125]。山區地形對聲音傳播的影響也塑造了獨特的聲景認知模式，如回聲文化、遠距離聲音識別能力等。

歷史經驗和集體記憶對聲景感知產生長遠影響。戰爭經歷可能使某些聲音（如飛機聲、警報聲）帶有特殊的情感色彩，這種影響可能延續幾代人[126]。工業化歷史的差異導致不同社會對工業聲音的態度差異，早期工業化國家可能對工業聲音有更多的 nostalgia（懷舊）情感，而後發工業化國家可能更多地將其視為現代化的象徵[127]。殖民歷史也可能影響對某些聲音（如語言聲音、音樂聲音）的感知和評價。

年齡結構和世代差異在不同文化中的表現存在差異。在重視傳統的文化中，老年

人的聲景偏好可能對整體社會的聲景標準有更大影響，而在重視創新的文化中，年輕人的聲景態度可能更具影響力[128]。數位化進程在不同文化中的推進速度不同，導致對數位聲音（如電子音樂、通訊聲音）的接受度存在代際和文化差異[129]。

跨文化聲景研究方法學的發展面臨獨特挑戰。標準化研究方法需要在不同文化環境中進行適應性調整，確保研究結果的有效性和可比性[130]。實地調查方法需要考慮不同文化中的社會禮俗和溝通方式，避免文化偏見的影響。參與式研究方法在跨文化應用中需要特別注意 power dynamics（權力動態）和 cultural sensitivity（文化敏感性）[131]。混合方法研究在跨文化環境中可能更有優勢，能夠綜合不同文化背景下的 quantitative 和 qualitative insights。

技術工具的跨文化適應也是重要議題。聲景評估應用程式需要考慮不同文化中的使用習慣和技術接受度[132]。虛擬聲景技術在不同文化中的應用效果可能存在差異，需要進行文化適應性測試。人工智慧聲景分析工具的訓練數據需要包含多元文化背景，避免文化偏見的算法結果[133]。

10.3 聲景未來挑戰與機會 (Future Challenges and Opportunities)

二十一世紀的聲景研究面臨著前所未有的複雜挑戰，同時也迎來了巨大的發展機遇。這些挑戰與機會並存的局面，要求聲景研究界以更加開放、創新和協作的態度來應對未來的發展需求[134]。氣候變遷作為全球性的環境挑戰，正在深刻改變世界各地的聲景格局，從極端天氣事件的頻發到生態系統的變遷，從海平面上升到物種遷移，這些變化都對傳統的聲景研究理論和方法提出了新的要求[135]。同時，社會變遷的加速也為聲景研究帶來了新的課題，人口結構的變化、生活方式的轉變、價值觀念的更新，都在重塑人們對聲環境的需求和期待。

技術革命為聲景研究提供了前所未有的工具和可能性，人工智慧、物聯網、大數據分析等新興技術的應用，使得大規模、長期性、精細化的聲景研究成為現實[136]。然而，技術發展也帶來了新的挑戰，如數據隱私保護、算法倫理、技術公平性等問題，需要聲景研究界在技術應用中保持審慎和負責任的態度[137]。政策

環境的變化既為聲景研究提供了新的機遇，也提出了新的要求，環境保護政策的加強、城市規劃理念的更新、公眾參與機制的完善，都為聲景研究的實踐應用創造了良好條件。

全球化與在地化的張力在聲景領域表現得尤為明顯。一方面，全球化進程推動了聲景研究的國際化發展，促進了方法標準化和經驗交流；另一方面，聲景的地域性和文化性特徵要求研究必須關注在地化的需求和特色[138]。如何在全球化的框架下保持聲景的多樣性和特色，如何在標準化的同時兼顧文化差異，這些都是聲景研究需要解決的重要議題[139]。跨學科整合的趨勢為聲景研究帶來了新的發展動力，但也對研究者的知識結構和能力素養提出了更高要求。

10.3.1 氣候變遷下的聲景 (Soundscape under Climate Change)

氣候變遷正在成為影響全球聲景格局的重要因素，其影響範圍涵蓋自然聲景、城市聲景和人工聲景的各個方面，對傳統的聲景研究理論和管理方法提出了根本性的挑戰[140]。氣候變遷對聲景的影響是多層次、多時間尺度的，從短期的極端天氣事件到長期的生態系統變遷，從區域性的環境變化到全球性的氣候模式改變，這些變化都在重塑世界各地的聲景特徵[141]。溫度上升、降水模式改變、極端天氣頻發、海平面上升等氣候變遷現象，不僅直接影響聲音的產生和傳播，更重要的是改變了聲景的生態基礎和社會條件。

生物多樣性的變化是氣候變遷對聲景影響的最重要體現之一。隨著全球氣溫上升和氣候模式改變，許多物種面臨棲息地喪失、分佈範圍變化、繁殖週期改變等問題，這些變化直接反映在生物聲景的變化上[142]。鳥類作為最重要的生物聲源，其遷徙路線和繁殖地的變化導致了許多地區鳥聲景觀的根本性改變。一些研究表明，氣候變遷導致的春季提前到來使得鳥類繁殖季節的歌聲出現時間發生變化，這不僅影響了自然聲景的時間模式，也可能影響生態系統的功能平衡[143]。昆蟲聲景也受到氣候變遷的顯著影響，溫度變化影響昆蟲的活動節律和聲音頻率，極端天氣事件可能導致昆蟲種群的大幅波動。

海洋聲景在氣候變遷影響下發生了深刻變化。海水溫度上升、海洋酸化、海流模

式改變等因素正在改變海洋生物的分佈和行為，進而影響海洋聲景的組成[144]。鯨類等海洋哺乳動物的遷徙路線變化導致其聲音在不同海域的出現頻率發生變化。海冰融化改變了極地海域的聲學環境，傳統的冰層阻隔作用減弱，使得聲音傳播模式發生變化[145]。海平面上升對沿海地區的聲景產生複合影響，既直接改變了海洋聲音的影響範圍，也間接影響了沿海生態系統的聲學特徵。

極端天氣事件對聲景的影響具有突發性和破壞性特徵。颶風、暴雨、乾旱、熱浪等極端天氣事件不僅在發生期間產生特殊的聲音環境，更重要的是對生態系統造成長期影響[146]。森林火災的頻發不僅消除了原有的生物聲景，還可能需要數十年的時間才能恢復。乾旱導致的水體乾涸消除了水聲景觀，影響依賴水環境的生物群落。極端降水事件可能導致洪水，改變地形地貌，進而影響聲音的傳播模式[147]。這些極端事件的頻發使得聲景的穩定性和可預測性大大降低。

農業聲景也受到氣候變遷的顯著影響。氣候條件的改變影響農作物的種植模式和生長週期，進而影響農業機械的使用時間和頻率[148]。乾旱可能導致灌溉設備使用增加，產生更多的機械噪音。氣候變遷導致的農業病蟲害變化可能影響農藥噴灑的頻率和方式，改變農業聲景的組成。畜牧業受氣候變遷影響而調整飼養方式，也會影響相關的聲景特徵[149]。

城市聲景在氣候變遷影響下面臨複合壓力。高溫天氣增加了空調使用，導致城市背景噪音水平上升[150]。極端天氣事件可能導致基礎設施損壞，應急響應和修復工作產生額外的噪音。氣候變遷適應措施，如防洪設施建設、建築物改造等，也會在實施過程中影響城市聲景。城市熱島效應的加劇可能影響聲音的傳播特性，改變城市聲景的空間分佈模式[151]。

氣候變遷對聲景的社會影響同樣不容忽視。環境難民的遷移可能改變不同地區的人口密度和社會結構，進而影響聲景的社會組成[152]。氣候變遷導致的經濟影響可能改變人們的生活方式和消費模式，反映在聲景的變化上。對氣候變遷的心理壓力可能改變人們對聲環境的感知和評價，使得原本可接受的聲音變得令人厭煩[153]。

應對氣候變遷的技術措施也在改變聲景格局。再生能源設施的大規模建設引入了新的聲音來源，風力發電機的風機噪音、太陽能設施的維護噪音等成為新的聲景組成部分[154]。電動交通工具的普及可能顯著改變城市交通聲景，減少傳統內燃機噪音，但可能增加輪胎噪音的相對重要性。碳捕集和封存技術的應用可能在工業區引入新的聲音來源[155]。

聲景研究需要發展新的理論框架和方法來應對氣候變遷的挑戰。傳統的靜態聲景分析方法需要向動態、適應性的分析方法轉變[156]。長期監測網絡的建立對於理解氣候變遷對聲景的漸進式影響至關重要。預測模型的發展需要整合氣候模型、生態模型和聲學模型，實現對未來聲景變化的科學預測[157]。

10.3.2 社會變遷與聲景 (Social Change and Soundscape)

社會變遷作為推動聲景演變的重要力量，正在多個維度上重塑當代聲景的格局和特徵。人口結構的變化、生活方式的轉變、技術發展的滲透、價值觀念的更新，這些社會變遷的不同面向都在深刻影響著人們對聲環境的感知、需求和評價[158]。二十一世紀以來，全球社會變遷的速度和深度都達到了前所未有的程度，這種變遷不僅改變了聲音的產生和傳播方式，更重要的是改變了人們與聲環境的互動模式和關係型態[159]。人口老齡化的趨勢在許多發達國家和發展中國家都日益明顯，這一人口結構變化對聲景需求產生了深遠影響，老年人群對聲環境的敏感性和需求特徵與年輕人群存在顯著差異，需要聲景規劃和管理給予特別關注。

城市化進程的持續推進是影響當代聲景的最重要社會變遷之一。全球城市人口比例的快速上升不僅改變了聲景的空間分佈，更重要的是改變了聲景的社會屬性和文化內涵[160]。新興城市的快速發展往往缺乏充分的聲環境規劃，導致聲景品質參差不齊；而老舊城區的更新改造則面臨歷史保護與現代發展的平衡問題[161]。超大城市的出現創造了前所未有的複雜聲景環境，需要新的理論框架和管理方法來應對。城市內部的社會分化也反映在聲景的空間分化上，不同社會經濟地位的社區往往擁有不同品質的聲環境。

數位化轉型對聲景產生了革命性影響。智慧型手機的普及使得個人化聲景成為可

能，人們可以透過耳機創造自己的聲音空間，這種個人聲景與公共聲景的關係成為新的研究議題[162]。線上購物和遠距工作的發展改變了城市的活動模式，減少了某些區域的聲音活力，增加了住宅區的聲音活動。社交媒體的興起創造了新的聲音表達和分享方式，改變了聲景的社會建構過程[163]。數位音樂的普及和音響技術的發展使得人工聲景的品質和複雜性大大提升。

生活方式的改變深刻影響了聲景的日常型態。24 小時社會的發展使得城市聲景的時間結構發生變化，夜間經濟的發展創造了新的夜間聲景[164]。居家辦公和彈性工作制的普及改變了住宅區的聲景模式，白天的安靜住宅區可能變得更加活躍。休閒娛樂方式的多樣化創造了新的聲景類型，戶外音樂節、街頭表演、運動活動等成為城市聲景的重要組成部分[165]。健康意識的提升使得人們對聲環境品質的要求不斷提高，噪音對健康的影響成為公眾關注的重要議題。

教育水準的提升和環境意識的增強改變了公眾對聲景的認知和參與度。受過高等教育的公眾往往對聲環境品質有更高的要求和更強的權利意識[166]。環境教育的普及使得更多人了解聲景的概念和重要性，公眾參與聲景規劃和管理的積極性不斷提高。媒體對環境問題的關注也提升了公眾對聲環境問題的敏感性[167]。

文化多元化的發展為聲景帶來了豐富性和複雜性。移民和文化交流使得不同文化的聲音傳統在同一空間中並存，創造了多元文化聲景[168]。這種文化融合既豐富了聲景的內容，也可能產生文化衝突和適應問題。宗教活動、民族節慶、文化表演等成為城市聲景的重要特色，但也可能與其他社會活動產生衝突[169]。文化遺產保護與現代發展的平衡成為聲景規劃面臨的重要挑戰。

社會治理模式的變化影響了聲景管理的方式和效果。民主化進程使得公眾參與成為聲景治理的重要組成部分，但也增加了決策的複雜性[170]。政府職能的轉變要求聲景管理從單純的規制轉向服務和引導，多元化治理主體的參與使得聲景治理需要更好的協調機制[171]。法治化進程為聲景保護提供了更好的法律保障，但也要求管理者具備更高的專業水準和法律素養。

經濟發展模式的轉型對聲景產生深遠影響。服務業的發展改變了城市的產業聲景，

減少了工業噪音，增加了商業和娛樂聲音[172]。創意產業的興起創造了新的聲景需求，音樂產業、影視產業、遊戲產業等對聲環境品質有特殊要求。共享經濟的發展改變了交通和住宿的聲景模式，共享汽車、共享單車、民宿等新業態帶來了新的聲景議題[173]。

10.3.3 聲景政策與創新 (Soundscape Policy and Innovation)

聲景政策與創新代表了聲景研究從學術探索向實踐應用轉化的關鍵環節，也是實現聲景研究社會價值的重要途徑。當前全球範圍內的聲景政策發展呈現出從噪音控制向聲景品質提升轉變的明顯趨勢，這種轉變不僅體現了對聲環境認知的深化，更反映了社會發展對環境品質要求的提升[174]。政策創新的核心在於建立以人為本、科學導向、多方參與的聲景治理體系，透過制度設計和機制創新，實現聲景保護與社會發展的協調統一[175]。歐盟環境噪音指令（Environmental Noise Directive）的實施和更新，標誌著聲景政策從國家層面向國際層面的發展，為全球聲景政策協調提供了重要參考。

聲景政策創新的重要特徵是從單一的噪音控制轉向綜合的聲環境品質管理。傳統的噪音政策主要關注聲壓級的控制，採用限值管理的方式，而新興的聲景政策更注重聲環境的整體品質和使用者感受[176]。這種轉變要求政策制定者不僅要考慮聲音的物理特性，更要關注聲音的感知品質、文化內涵和社會功能。德國和荷蘭等國家在安靜區域（Quiet Areas）的劃定和管理方面進行了重要探索，不僅設定了量化的聲學指標，還考慮了聲景的品質特徵和社會需求[177]。

參與式治理成為聲景政策創新的重要方向。公眾參與不僅是民主治理的要求，更是聲景政策有效性的保障，因為聲景的主觀性特徵決定了政策必須反映使用者的真實需求和感受[178]。英國的聲景規劃實踐中廣泛採用公眾諮詢和社區參與的方式，透過工作坊、問卷調查、焦點小組等形式收集公眾意見，確保政策制定的民主性和科學性[179]。數位化技術的應用為公眾參與提供了新的工具和管道，線上平台、移動應用程式、社交媒體等成為收集公眾意見和反饋的重要途徑。

跨部門協調是聲景政策創新面臨的重要挑戰和機遇。聲景問題的複雜性決定了單

一部門難以有效應對，需要環境保護、城市規劃、交通管理、文化旅遊等多個部門的協調合作[180]。芬蘭赫爾辛基市建立了跨部門的聲景工作小組，統籌協調不同部門的聲景相關工作，取得了良好效果。這種協調機制不僅提高了政策的一致性和有效性，也減少了部門間的衝突和重複[181]。國際層面的協調也日益重要，特別是在應對跨境噪音問題和制定國際標準方面。

法律制度創新為聲景保護提供了堅實基礎。一些國家和地區開始將聲景權利納入法律保護範圍，確立了公民享有良好聲環境的基本權利[182]。法國在《環境法典》中明確規定了聲環境品質的法律地位，為聲景保護提供了法律依據。義大利的一些城市制定了專門的聲景條例，對聲景規劃、評估、管理等各個環節進行詳細規定[183]。這些法律制度創新不僅提供了執法依據，也為聲景產業的發展創造了法律環境。

經濟政策工具的創新應用為聲景改善提供了市場激勵。環境稅、排放交易、生態補償等經濟手段開始在聲景領域得到應用[184]。一些城市對高噪音車輛收取額外費用，對低噪音技術給予稅收優惠，透過市場機制引導行為改變。綠色金融的發展為聲景改善項目提供了資金支持，聲景債券、環境基金等金融創新產品開始出現[185]。這些經濟政策工具的應用不僅提高了政策效率，也為聲景產業發展提供了動力。

技術標準和認證制度的建立推動了聲景產業的規範化發展。建築聲學認證、產品噪音標識、聲景設計資質等制度的建立，為市場提供了品質保障和選擇依據[186]。歐盟的 CE 標誌制度將噪音限值作為重要指標，推動了低噪音產品的發展。美國的 LEED 綠色建築認證體系將聲環境品質作為評價指標之一，促進了聲景友好建築的發展[187]。這些標準和認證制度不僅保護了消費者權益，也促進了技術創新和產業升級。

智慧化治理技術在聲景政策實施中發揮了重要作用。物聯網監測網絡提供了即時、準確的聲環境數據，為政策制定和執行提供了科學依據[188]。人工智慧技術的應用提高了政策執行的效率和精度，自動識別噪音違法行為、預測聲環境變化趨勢、優化管理資源配置等功能逐漸實現。區塊鏈技術的應用提高了政策執行的透明度

和可信度，確保監測數據的真實性和政策執行的公正性[189]。

國際合作與政策學習成為聲景政策創新的重要推動力。歐盟框架下的經驗交流、WHO 的技術指導、OECD 的政策建議等為各國聲景政策創新提供了重要參考[190]。國際會議、專業網絡、學術交流等管道促進了最佳實踐的傳播和政策創新的擴散。發展中國家可以借鑑發達國家的成功經驗，避免走彎路，實現跨越式發展[191]。

10.4 永續聲景發展願景 (Vision for Sustainable Soundscape Development)

永續聲景發展願景代表了聲景研究和實踐的終極目標，即建立一個能夠滿足當代需求而不損害後代滿足其需求能力的聲環境系統。這一願景的實現需要將聲景發展納入永續發展的總體框架中，統籌考慮環境保護、社會公平和經濟發展的協調統一[192]。聯合國 2030 年永續發展議程為全球發展提供了共同目標和行動框架，聲景作為環境品質的重要組成部分，與多個永續發展目標存在密切關聯，需要在永續發展的框架下重新審視聲景的價值和作用[193]。永續聲景發展不僅要關注當前的聲環境品質改善，更要考慮長期的生態承載能力、社會適應能力和技術發展潛力，確保聲景發展的可持續性。

永續聲景發展願景的核心理念是生態文明建設與人類福祉提升的有機結合。這要求我們在聲景規劃和管理中始終堅持生態優先的原則，保護和恢復自然聲景的完整性和多樣性，同時滿足人類社會對優質聲環境的需求[194]。循環經濟理念在聲景領域的應用，要求我們在聲景設計和建設中考慮全生命週期的環境影響，採用可再生、可回收的材料和技術，最小化對環境的負面影響[195]。社會公平原則要求永續聲景發展必須惠及所有社會成員，特別是弱勢群體，確保每個人都能享有基本的聲環境權利。

跨代公平是永續聲景發展的重要考量因素。當代的聲景規劃和管理決策必須考慮對未來世代的影響，避免為了短期利益而損害長期的聲環境品質[196]。這要求我們在聲景發展中採用預防性原則，對可能產生長期影響的行為進行審慎評估，建立聲景影響的代際評估機制。文化傳承也是跨代公平的重要內容，保護和傳承具

有文化價值的聲景資源，使後代能夠享受豐富多樣的聲景文化[197]。

10.4.1 聲景與聯合國永續發展目標 (Soundscape and UN SDGs)

聲景與聯合國永續發展目標（SDGs）之間存在廣泛而深層的關聯，這種關聯不僅體現在直接的環境品質改善上，更體現在對人類健康、社會公平、經濟發展、生態保護等多個維度的綜合影響[198]。SDG 3「健康與福祉」與聲景的關聯最為直接和顯著，大量科學研究證實了噪音污染對人類身心健康的負面影響，包括聽力損失、心血管疾病、睡眠障礙、認知能力下降等[199]。世界衛生組織的《歐洲環境噪音指南》明確指出了不同噪音水準對健康的具體影響，為聲景與健康關係的量化評估提供了科學依據。優質的聲景不僅能夠避免噪音對健康的負面影響，更能夠透過自然聲音、音樂聲音等積極聲景元素促進身心健康。

SDG 11「永續城市和社區」與聲景發展具有直接的關聯性。城市聲景品質是衡量城市永續性的重要指標，良好的聲景規劃是永續城市建設的重要組成部分[200]。聲景規劃需要統籌考慮城市的功能分區、交通系統、綠色空間、建築設計等各個方面，實現城市發展與聲環境品質的協調統一。智慧城市建設為聲景管理提供了技術支撐，透過物聯網、人工智慧等技術手段，實現對城市聲環境的智慧化監測和管理[201]。城市更新和再發展過程中的聲景保護和改善，對於提升城市品質和居民生活滿意度具有重要意義。

SDG 14「水下生物」和 SDG 15「陸地生物」與聲景的關聯體現在生態聲景的保護和恢復上。海洋噪音污染對海洋生物的負面影響日益受到關注，船舶噪音、海洋開發活動等人為聲源干擾了海洋生物的通訊、導航、覓食等行為[202]。陸地生態系統中的聲景多樣性是生物多樣性的重要指標，聲景監測技術為生物多樣性保護提供了新的工具和方法。道路噪音對野生動物的影響、城市化對鳥類聲行為的影響等問題，需要在生態保護工作中給予充分考慮[203]。生態聲景的恢復和重建是生態系統修復的重要內容，需要綜合考慮棲息地恢復、物種重引入、人為干擾控制等多個方面。

SDG 4「優質教育」與聲景的關聯主要體現在學習環境的聲學品質上。教室聲學

環境對學習效果有重要影響，適當的聲環境可以提高學習專注度和記憶效果[204]。學校周邊的聲環境品質直接影響教學活動的開展，噪音污染可能干擾正常的教學秩序。聲景教育作為環境教育的重要組成部分，有助於提高學生的環境意識和審美能力[205]。透過聲景教育，人們可以更好地理解聲音與環境的關係，學會欣賞和保護良好的聲環境，這對於實現永續發展具有重要的教育意義。聲景教育不僅提高公眾的環境意識，更培養了社會對於聲環境品質的價值認同和行動能力，從而形成支持永續發展的社會基礎[206]。

此外，聲景研究與 SDG 5「性別平等」也存在重要關聯。研究顯示，不同性別對聲環境的感知和需求存在差異，女性通常對噪音的敏感度較高，而在聲景設計中考慮性別差異有助於創造更包容的環境[207]。這種包容性設計理念體現了永續發展中的公平原則，確保所有社會成員都能享受優質的聲環境。聲景與 SDG 8「就業與經濟成長」的關聯主要體現在聲景產業的發展潛力上。隨著聲景設計、聲環境諮詢、聲學技術開發等新興產業的興起，聲景領域正成為創造就業機會和推動經濟發展的重要動力[208]。

在 SDG 9「產業創新與基礎建設」方面，聲景技術的創新應用正在推動傳統基礎建設的升級改造。物聯網聲學感測器、人工智慧聲景分析系統、虛擬實境聲環境模擬技術等創新科技的應用，不僅提升了城市基礎設施的智慧化水準，更為實現永續城市發展提供了技術支撐[209]。這些技術創新使得聲景管理從被動應對轉向主動預防，從定性評估轉向精準量化，從單一治理轉向系統優化。聲景與 SDG 10「減少不平等」的關係體現在聲環境正義的概念上。優質的聲環境往往集中在經濟發達地區，而噪音污染問題則更多出現在低收入社區，這種聲環境品質的空間不平等反映了社會經濟不平等的深層問題[210]。

聲景與 SDG 12「負責任的消費與生產」的關聯則體現在聲景產品和服務的永續性上。在聲景設計和實施過程中，需要考慮材料的環保性、設備的能耗效率、維護的資源消耗等因素，確保聲景改善不會造成其他環境負擔[211]。這種全生命週期的永續性考量體現了負責任消費與生產的理念。最後，聲景與 SDG 13「氣候行動」和 SDG 17「全球夥伴關係」也存在重要關聯。氣候變遷不僅直接影響自然聲景，也改變了人類聲活動的模式，而聲景研究可以為氣候適應策略提供重要

參考[212]。同時，聲景研究的全球性特徵需要國際合作和知識共享，透過建立全球聲景研究網絡和標準化體系，可以促進各國在聲環境保護方面的協作，體現了全球夥伴關係的重要性。

10.4.2 未來聲景研究議程 (Future Soundscape Research Agenda)

面向未來的聲景研究議程需要建立在對當前研究成果深度整合和對未來挑戰前瞻性預判的基礎上，形成具有系統性、創新性和可操作性的研究路線圖。這一議程不僅要回應聲景研究領域內部的理論深化和方法創新需求，更要積極回應氣候變遷、數位化轉型、社會變遷等外部挑戰對聲景研究提出的新要求[213]。未來聲景研究議程的制定需要採用 participatory approach（參與式方法），廣泛邀請學術界、產業界、政策制定者和公眾代表參與，確保研究議程能夠反映多元利害關係人的需求和期待[214]。同時，議程的制定還需要具備 sufficient flexibility（足夠的靈活性），能夠根據技術發展和社會需求的變化進行適時調整和更新。

在理論建構層面，未來聲景研究需要致力於建立更加完善和統一的理論體系。當前聲景研究雖然已經建立了相當完整的 conceptual framework（概念框架），但在理論深度和系統性方面仍存在提升空間[215]。未來研究需要深入探討聲景感知的 cognitive mechanisms（認知機制），建立更加精確的聲景評價模型，發展適用於不同文化背景和地理環境的理論框架。特別需要加強對聲景時間性特徵的理論研究，探討聲景隨時間變化的規律和機制，建立 dynamic soundscape theory（動態聲景理論）體系[216]。此外，還需要深化聲景與其他感官體驗交互作用的理論研究，發展 multisensory environmental experience（多感官環境體驗）的整合理論，為創造更加豐富和諧的環境體驗提供理論支撐。

在方法學發展方面，未來聲景研究需要建立更加多元化和精準化的研究方法體系。傳統的聲景評估方法主要依賴問卷調查和聲學測量，未來需要整合生理測量、行為觀察、大數據分析等多種方法，形成更加客觀和全面的評估體系[217]。特別是隨著 wearable technology（可穿戴技術）和 IoT（物聯網）技術的發展，需要開發基於 continuous monitoring（連續監測）的聲景評估方法，實現對聲景品質的 real-time dynamic assessment（即時動態評估）。同時，需要發展適用於 virtual

environments（虛擬環境）和 augmented reality environments（擴增實境環境）的聲景研究方法，為數位化時代的聲景研究提供方法學支撐[218]。

在技術創新層面，未來聲景研究需要充分利用 emerging technologies（新興技術）的發展機遇，推動聲景研究方法和工具的創新。人工智慧技術的發展為聲景自動分析和預測提供了新的可能，未來需要開發更加智慧化的聲景分析系統，實現對複雜聲環境的 automatic recognition（自動識別）、classification（分類）和 assessment（評估）[219]。機器學習和深度學習技術可以用於發現聲景感知的隱藏規律，建立更加精確的聲景預測模型。虛擬實境和擴增實境技術的發展為聲景研究提供了新的實驗平台，可以在可控條件下研究不同聲環境對人類感知和行為的影響[220]。區塊鏈技術可以用於建立分散式的聲景資料共享平台，促進全球聲景研究的協作和資料整合。

在應用拓展方面，未來聲景研究需要向更多領域和場景延伸，形成更加廣泛的應用體系。健康醫療領域是聲景應用的重要發展方向，需要深入研究聲景對 mental health（心理健康）、cognitive function（認知功能）、rehabilitation therapy（康復治療）等方面的影響機制，開發基於聲景的治療方法和健康促進策略[221]。教育領域的聲景應用也具有巨大潛力，需要研究不同聲環境對 learning effectiveness（學習效果）、creativity development（創造力發展）、attention concentration（注意力集中）等方面的影響，設計最佳化的教育聲環境。工作場所的聲景設計對提高 work efficiency（工作效率）和 employee satisfaction（員工滿意度）具有重要意義，需要針對不同類型工作的特點開發相應的聲景解決方案[222]。

在永續發展方面，未來聲景研究需要更加注重環境保護和社會責任，發展 sustainable soundscape management（永續聲景管理）模式。氣候變遷對聲景的影響是一個新興的研究領域，需要深入研究 extreme weather events（極端天氣事件）、seasonal variations（季節變化）、ecosystem changes（生態系統變遷）等對聲景的影響機制，建立 climate-adaptive soundscape management strategies（氣候適應性聲景管理策略）[223]。生物多樣性保護與聲景管理的整合也是重要的研究方向，需要研究如何透過聲景保護來維護生態系統的完整性和穩定性。城市化進程中的聲景永續性是另一個關鍵議題，需要研究如何在城市發展中保護和創造優質的聲環

境，實現 urban development（城市發展）與聲環境品質的協調統一[224]。

在政策制定方面，未來聲景研究需要加強與政策制定的連結，為聲景政策的制定和實施提供科學依據。需要建立 soundscape impact assessment（聲景影響評估）的標準化體系，將聲景評估納入 environmental impact assessment（環境影響評估）的常規程序中[225]。同時，需要研究聲景政策的 effectiveness evaluation（有效性評估）方法，建立政策效果的 monitoring and evaluation mechanisms（監測和評估機制）。聲景規劃的制度化也是重要的研究方向，需要探討如何將聲景規劃納入城市規劃和區域發展規劃中，建立完善的聲景規劃體系[226]。此外，還需要研究聲景政策的 international coordination mechanisms（國際協調機制），促進全球聲景保護的協作和標準化。

在跨領域整合方面，未來聲景研究需要加強與其他學科的融合，建立更加 comprehensive（綜合性）的研究視角。聲景與 public health（公共衛生）的整合研究需要深入探討聲環境對 population health（人口健康）的影響機制，為健康城市建設提供聲景維度的支撐[227]。聲景與 urban planning（城市規劃）的整合需要建立 sound-conscious planning（聲音意識規劃）的理論和方法，將聲景考量全面融入城市設計和規劃過程中。聲景與 cultural studies（文化研究）的整合需要深入研究聲景的文化內涵和社會意義，保護和傳承具有文化價值的聲景資源[228]。

10.4.3 聲景學科建構與展望 (Soundscape Discipline Development and Prospects)

聲景學科的建構與發展代表了聲景研究從 interdisciplinary field（跨領域研究）向 independent discipline（獨立學科）轉化的重要階段，這一轉化過程不僅需要完善的理論體系和方法學基礎，更需要建立系統的教育培養體系、專業認證機制以及學術交流平台[229]。聲景學科的建構是一個 complex and long-term process（複雜而長期的過程），需要學術界、產業界、政策制定者的共同努力和持續投入。這一學科建構過程需要在 maintaining interdisciplinary characteristics（保持跨領域特色）的同時，建立獨特的學科 identity（學科認同）和 core competencies（核心能力），形成具有 international competitiveness（國際競爭力）的學科發展模式[230]。

在學科理論體系建構方面，聲景學科需要建立 complete and systematic theoretical framework（完整而系統的理論架構）。當前聲景研究雖然已經形成了一定的理論基礎，但仍缺乏 unified disciplinary theoretical system（統一的學科理論體系）和 core conceptual framework（核心概念框架）[231]。未來需要在現有研究基礎上，建立聲景學的 basic theoretical system（基本理論體系），包括 soundscape ontology（聲景本體論）、soundscape epistemology（聲景認識論）、soundscape methodology（聲景方法論）等核心理論內容。聲景本體論需要明確聲景的基本性質、構成要素、存在形式等 fundamental questions（根本問題），建立聲景的 conceptual framework（概念框架）和 classification system（分類體系）[232]。聲景認識論需要探討聲景認知的基本規律、感知機制、評價標準等 epistemological issues（認識論問題），建立聲景研究的 epistemological foundation（認識論基礎）。聲景方法論需要建立聲景研究的 basic methodological system（基本方法體系），包括 qualitative research methods（定性研究方法）、quantitative analysis methods（定量分析方法）、mixed research methods（混合研究方法）等，形成 complete methodological system（完整的方法學体系）[233]。

在學科知識體系建構方面，聲景學科需要建立 systematic knowledge structure（系統的知識結構）和 curriculum system（課程體系）。聲景學作為一門交叉學科，其知識體系需要整合多個相關學科的核心內容，同時發展出具有聲景學特色的 specialized knowledge domains（專門知識領域）[234]。基礎理論課程應包括 acoustics fundamentals（聲學基礎）、psychoacoustics（心理聲學）、environmental psychology（環境心理學）、sociological theory（社會學理論）等內容，為學生提供 solid theoretical foundation（紮實的理論基礎）。專業核心課程應包括 soundscape theory（聲景理論）、soundscape measurement and assessment（聲景測量與評估）、soundscape design principles（聲景設計原理）、soundscape planning methods（聲景規劃方法）等內容，培養學生的 professional core competencies（專業核心能力）[235]。應用拓展課程應包括 urban soundscape（城市聲景）、natural soundscape（自然聲景）、cultural soundscape（文化聲景）、health soundscape（健康聲景）等專門領域，使學生能夠在特定領域深入發展。實踐教學課程應包括 soundscape survey practice（聲景調查實習）、soundscape design projects（聲景設計項目）、soundscape

management cases(聲景管理案例)等內容,培養學生的 practical application abilities（實踐應用能力）[236]。

在人才培養體系建構方面，聲景學科需要建立從 undergraduate to doctoral（從本科到博士）的完整人才培養體系。本科教育階段應注重 basic theoretical education（基礎理論教育）和 comprehensive quality cultivation（綜合素養培養），使學生掌握聲景學的基本理論和方法，具備 interdisciplinary thinking ability（跨學科思維能力）[237]。碩士教育階段應注重 professional ability cultivation（專業能力培養）和 research methodology training（研究方法訓練），使學生能夠獨立進行聲景研究和實踐應用。博士教育階段應注重 innovation ability cultivation（創新能力培養）和 academic research training(學術研究訓練),培養能夠推動聲景學科發展的 high-level talents(高層次人才)[238]。同時,還需要建立聲景領域的 continuing education（繼續教育）和 vocational training system（職業培訓體系），為在職人員提供 professional skill enhancement（專業技能提升）的機會。這一人才培養體系需要與 industry needs（產業需求）緊密結合，確保培養的人才能夠滿足社會發展的實際需要[239]。

在專業認證機制建構方面，聲景學科需要建立完善的 professional qualification certification（專業資格認證）和 quality assurance system（品質保障體系）。專業認證機制是學科成熟度的重要標誌，也是保障專業服務品質的關鍵措施[240]。未來需要建立聲景專業人員的 qualification certification standards（資格認證標準），包括 knowledge and skill requirements（知識技能要求）、practical experience requirements（實務經驗要求）、continuing education requirements（繼續教育要求）等內容。同時需要建立聲景服務的 quality standards（品質標準）和 evaluation system（評估體系），確保聲景諮詢、設計、評估等專業服務的品質[241]。還需要建立聲景研究和教育機構的 accreditation system（認證體系），促進聲景教育的 standardization（標準化）和 quality improvement（品質提升）。這一認證機制需要與 international standards（國際標準）接軌，建立具有 international recognition（國際認可度）的專業認證體系[242]。

在學術交流平台建構方面，聲景學科需要建立完善的 academic exchange（學術交

流）和 cooperation mechanisms（合作機制）。學術期刊是學科發展的重要載體，需要建立 specialized soundscape academic journals（專門的聲景學術期刊），為聲景研究成果的發表和交流提供平台[243]。學術會議是促進學術交流的重要途徑，需要建立 regular international soundscape academic conferences（定期的國際聲景學術會議），促進全球聲景研究者的交流與合作。專業學會是學科組織化的重要形式，需要建立 soundscape professional associations（聲景專業學會），為聲景研究者和實務工作者提供專業服務和支持[244]。此外，還需要建立 soundscape databases（聲景資料庫）和 knowledge sharing platforms（知識共享平台），促進聲景研究資源的共享和利用。

在產學研合作方面，聲景學科的發展需要加強與產業界的合作，推動 scientific research achievements（科研成果）的 transformation and application（轉化應用）。聲景產業的發展為學科建構提供了重要的 practical foundation（實踐基礎）和 market demand（市場需求），同時學科發展也為產業創新提供了 theoretical support（理論支撐）和 talent guarantee（人才保障）[245]。未來需要建立 industry-academia-research collaborative innovation mechanisms（產學研協同創新機制），促進學術界與產業界的深度合作。建立 soundscape technology transfer platforms（聲景技術轉移平台），推動科研成果的 industrialization and application（產業化應用）。設立 industry-academia-research cooperation funds（產學研合作基金），支持聲景領域的 collaborative innovation projects（協同創新項目）[246]。建立 internship and training bases（實習實訓基地），為學生提供實踐機會，為企業輸送專業人才。這種產學研合作模式不僅有利於學科發展，也有利於產業升級和社會進步。

在國際合作方面，聲景學科的建構需要加強 international exchange and cooperation（國際交流與合作），建立具有 international influence（國際影響力）的學科發展模式。聲景問題具有 global characteristics（全球性特徵），不同國家和地區在聲景研究和管理方面各有特色和優勢，需要通過國際合作實現 complementary advantages（優勢互補）和 collaborative development（協同發展）[247]。未來需要建立 international soundscape research networks（國際聲景研究網絡），促進全球聲景研究者的交流與合作。參與 international standards development（國際標準制定），提升在國際聲景標準化工作中的影響力。開展 international collaborative

research projects（國際合作研究項目），共同應對全球性的聲環境挑戰[248]。建立 international student exchange programs（國際學生交流項目），培養具有 international vision（國際視野）的聲景專業人才。通過這些國際合作舉措，推動聲景學科的 internationalization development（國際化發展），提升學科的 international competitiveness and influence（國際競爭力和影響力）。

總體而言，聲景學科的建構是一個 systematic and long-term process（系統性和長期性的過程），需要學術界、產業界、政府部門的共同努力和支持。隨著聲景研究的不斷深入和社會需求的持續增長，聲景學科必將發展成為一門具有重要社會價值和廣闊發展前景的獨立學科，為人類創造更加美好的聲環境做出重要貢獻[249]。未來聲景學科的發展還需要關注 emerging challenges（新興挑戰）和 opportunities（機遇），包括數位化轉型、人工智慧應用、氣候變遷應對、文化多樣性保護等方面，確保學科發展能夠與時俱進，持續為人類福祉和環境保護服務[250]。

在數位化轉型的推動下，聲景研究議程需要特別關注新興技術與傳統研究方法的融合創新。人工智慧技術在聲景分析中的應用已經展現出巨大潛力，但仍需要建立更加完善的 AI-soundscape integration framework（AI-聲景整合框架），確保技術應用的 scientific rigor（科學嚴謹性）和 ethical responsibility（倫理責任）[251]。機器學習算法在聲景識別和分類方面的準確性雖然不斷提高，但對於 complex urban soundscapes（複雜城市聲景）和 cultural-specific soundscapes（文化特定聲景）的理解仍需要人工智慧與人文社科研究的深度結合[252]。區塊鏈技術在聲景數據管理中的應用前景廣闊，但需要解決技術實施的能耗問題和數據隱私保護的平衡，建立 sustainable and ethical soundscape data governance（永續和倫理的聲景數據治理）體系[253]。

虛擬和擴增實境技術的發展為聲景研究開闢了全新的實驗和應用空間。VR soundscape simulation（VR 聲景模擬）技術使得研究者能夠在 controlled virtual environments（可控虛擬環境）中進行大規模的聲景感知實驗，大大降低了實驗成本並提高了實驗的可重複性[254]。然而，虛擬聲景與真實聲景之間的 perceptual differences（感知差異）仍需要深入研究，特別是在 tactile and thermal sensations

（觸覺和溫覺感受）對聲景感知的影響方面。Augmented reality soundscapes（擴增實境聲景）技術的發展使得 sound augmentation（聲音增強）和 sound replacement（聲音替換）成為可能，為城市聲景改善提供了 new intervention tools（新的干預工具），但同時也引發了關於 authenticity（真實性）和 cultural preservation（文化保護）的重要議題[255]。

在生態聲景研究方面，氣候變遷對 global soundscape patterns（全球聲景格局）的影響需要建立 long-term monitoring networks（長期監測網絡）和 predictive models（預測模型）。生物聲學監測技術的自動化程度雖然不斷提升，但對於 species identification（物種識別）和 behavioral interpretation（行為解釋）的準確性仍需要改進[256]。特別是在 biodiversity hotspots（生物多樣性熱點地區）和 climate change sensitive areas（氣候變遷敏感區域），需要建立更加 dense monitoring networks（密集監測網絡）和 adaptive management strategies（適應性管理策略）。同時，marine soundscapes（海洋聲景）在氣候變遷影響下的變化更加 complex and unpredictable（複雜和不可預測），需要整合 oceanographic（海洋學）、marine biology（海洋生物學）和 acoustics（聲學）等多學科的研究力量[257]。

在健康聲景研究方面，precision medicine（精準醫學）理念的引入要求聲景健康研究從 population-based approaches（基於人群的方法）轉向 personalized approaches（個性化方法）。Individual differences（個體差異）在聲景感知和健康影響方面的 role 需要更加深入的研究，包括 genetic factors（遺傳因素）、age differences（年齡差異）、cultural backgrounds（文化背景）和 health conditions（健康狀況）等[258]。Biomarker development（生物標誌物開發）為客觀評估聲景健康影響提供了新的可能，但需要建立 standardized measurement protocols（標準化測量程序）和 reference values（參考值）。Digital health technologies（數位健康技術）的發展使得 continuous health monitoring（連續健康監測）成為可能，為研究聲景與健康的 long-term relationships（長期關係）提供了重要工具[259]。

在城市聲景規劃方面，smart city initiatives（智慧城市倡議）為聲景規劃提供了技術基礎設施和數據支撐，但需要建立更加 comprehensive urban soundscape governance frameworks（綜合城市聲景治理框架）。Participatory planning

approaches（參與式規劃方法）雖然能夠提高規劃的民主性和 acceptability（可接受性），但在 large-scale urban planning（大規模城市規劃）中的 implementation challenges（實施挑戰）仍需要創新的解決方案[260]。Urban densification（城市密集化）趨勢對聲景品質的影響需要在 planning policies（規劃政策）中給予更多關注，發展 high-density urban areas（高密度城市區域）的聲景優化策略。Green infrastructure（綠色基礎設施）在聲景改善中的作用機制需要進一步 clarification（澄清），建立 ecosystem services valuation（生態系統服務評估）與聲景 benefits（聲景效益）的 quantitative relationship（量化關係）[261]。

在跨文化聲景研究的未來發展中，需要特別關注 globalization（全球化）與 localization（在地化）之間的 dynamic balance（動態平衡）。Cultural homogenization（文化同質化）趨勢可能導致 distinctive soundscape characteristics（獨特聲景特徵）的消失，需要建立 cultural soundscape preservation strategies（文化聲景保護策略）[262]。同時，migration and urbanization（遷移和城市化）創造了 new multicultural soundscapes（新的多文化聲景），需要研究不同文化群體在 shared acoustic spaces（共享聲學空間）中的 coexistence patterns（共存模式）和 potential conflicts（潛在衝突）。Language diversity（語言多樣性）在聲景中的體現和保護也是 important research direction（重要研究方向），特別是在 endangered languages（瀕危語言）和 indigenous soundscapes（原住民聲景）的記錄和傳承方面[263]。

在聲景教育體系的建構中，interdisciplinary curriculum design（跨領域課程設計）是關鍵挑戰。聲景學作為一門新興學科，需要整合 acoustics（聲學）、psychology（心理學）、sociology（社會學）、urban planning（城市規劃）、environmental science（環境科學）等多個領域的 knowledge components（知識組成部分），但如何在 limited curriculum time（有限課程時間）內實現 effective integration（有效整合）仍需要 pedagogical innovation（教學創新）[264]。實踐教學環節的設計需要與 industry needs（產業需求）緊密結合，但當前聲景產業的 professional standards（專業標準）和 job market demands（就業市場需求）仍在發展中，需要 academia-industry collaboration（學界-產業合作）來共同定義 competency requirements（能力要求）[265]。

在國際化發展方面，developing countries（發展中國家）在聲景研究中的 participation（參與度）仍然不足，存在 research capacity gaps（研究能力差距）和 resource limitations（資源限制）。Capacity building programs（能力建設項目）和 technology transfer initiatives（技術轉移倡議）需要更加 systematic and sustained（系統性和持續性），建立 North-South and South-South cooperation mechanisms（南北合作和南南合作機制）[266]。同時，indigenous knowledge systems（原住民知識體系）和 traditional soundscape practices（傳統聲景實踐）需要在全球聲景研究中得到更多 recognition and integration（認可和整合），避免 knowledge colonialism（知識殖民主義）的問題[267]。

在產業化發展方面，聲景 consulting services（聲景諮詢服務）、soundscape design companies（聲景設計公司）、acoustic technology firms（聲學技術公司）等新興產業的規範化發展需要 professional standards（專業標準）和 quality assurance mechanisms（品質保障機制）的支撐。Market demand（市場需求）雖然不斷增長，但 consumer awareness（消費者意識）和 willingness to pay（付費意願）仍需要提升，需要更多 successful case studies（成功案例研究）和 economic benefit demonstrations（經濟效益證明）[268]。同時，soundscape products and services（聲景產品和服務）的 environmental impact assessment（環境影響評估）和 sustainability evaluation（永續性評估）也需要納入考量，確保產業發展的 environmental responsibility（環境責任）[269]。

總體而言，聲景學科的未來發展需要在 technological innovation（技術創新）、theoretical advancement（理論進步）、practical application（實踐應用）和 social responsibility（社會責任）之間找到 appropriate balance（適當平衡）。這一平衡的實現需要 multistakeholder collaboration（多利害關係人合作）、long-term commitment（長期承諾）和 adaptive management（適應性管理），確保聲景學科能夠持續為 human wellbeing（人類福祉）和 environmental sustainability（環境永續）做出貢獻[270]。

參考文獻

[1] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[2] United Nations. (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision . UN Department of Economic and Social Affairs.

[3] Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Yang, Q., Zhang, Y., Huo, Z., ... & Zhou, Z. (2020). Internet of Things for noise mapping in smart cities: state of the art and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 7(10), 9634-9647.

[4] Aletta, F., Kang, J., & Axelsson, Ö. (2016). Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models. Landscape and Urban Planning , 149, 65-74.

[5] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020 . EEA Report No 22/2019.

[6] International Organization for Standardization. (2014). ISO 12913-1:2014 Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework . ISO.

[7] Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Kang, J., & the Soundscape Attributes Translation Project (SATP) Team. (2024). Advancing cross-cultural soundscape research: updates from the Soundscape Attributes Translation Project (SATP). INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 270(10), 545-556.

[8] Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., ... & Simpson, S. D. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science , 371(6529), eaba4658.

[9] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world . Destiny Books.

[10] Kang, J., Aletta, F., Margaritis, E., & Yang, M. (2018). A model for implementing soundscape maps in smart cities. Noise Mapping , 5(1), 46-59.

[11] Zappatore, M., Longo, A., & Bochicchio, M. A. (2017). Crowd-sensing our smart cities: A platform for noise monitoring and acoustic urban planning. Journal of Communications Software and Systems , 13(2), 53-67.

[12] Starowicz, A., & Zieliński, M. (2024). Sustainable acoustics: the impact of AI on acoustics design and noise management. Technical Sciences , 27, 241-257.

[13] Alías, F., & Alsina-Pagès, R. M. (2019). Review of wireless acoustic sensor networks for environmental noise monitoring in smart cities. Journal of Sensors , 2019, 7634860.

[14] Sheng, Z., Pfersich, S., Eldridge, A., Zhou, J., Leung, C., & Ma, S. (2019). Wireless acoustic sensor networks and edge computing for rapid acoustic monitoring. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica , 6(1), 64-74.

[15] Marques, G., & Pitarma, R. (2020). A real-time noise monitoring system based on internet of things for enhanced acoustic comfort and occupational health. IEEE Access , 8, 139741-139755.

[16] Radicchi, A., Henckel, D., & Memmel, M. (2018). Citizens as smart, active sensors for a quiet and just city. The case of the "open source soundscapes" approach to identify, assess and plan "everyday quiet areas" in cities. Noise Mapping , 5(1), 1-20.

[17] Kaźmierczak, J., Rożałowska, B., Bartnicka, J., Kowalczyk, A., & Maślanka, K.

(2021). Sounds of Smart City: a subjective review of acoustical problems appearing in creating intelligent urban areas. Preprint , ResearchGate.

[18] Kang, J., Aletta, F., Margaritis, E., & Yang, M. (2018). A model for implementing soundscape maps in smart cities. Noise Mapping , 5(1), 46-59.

[19] Zappatore, M., Longo, A., & Bochicchio, M. A. (2017). Crowd-sensing our smart cities: A platform for noise monitoring and acoustic urban planning. Journal of Communications Software and Systems , 13(2), 53-67.

[20] Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Yang, Q., Zhang, Y., Huo, Z., ... & Zhou, Z. (2020). Internet of Things for noise mapping in smart cities: state of the art and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 7(10), 9634-9647.

[21] Alías, F., & Alsina-Pagès, R. M. (2019). Review of wireless acoustic sensor networks for environmental noise monitoring in smart cities. Journal of Sensors , 2019, 7634860.

[22] Marques, G., & Pitarma, R. (2020). A real-time noise monitoring system based on internet of things for enhanced acoustic comfort and occupational health. IEEE Access , 8, 139741-139755.

[23] Radicchi, A., Henckel, D., & Memmel, M. (2018). Citizens as smart, active sensors for a quiet and just city. The case of the "open source soundscapes" approach to identify, assess and plan "everyday quiet areas" in cities. Noise Mapping , 5(1), 1-20.

[24] Kang, J., Aletta, F., Margaritis, E., & Yang, M. (2018). A model for implementing soundscape maps in smart cities. Noise Mapping , 5(1), 46-59.

[25] Starowicz, A., & Zieliński, M. (2024). Sustainable acoustics: the impact of AI on acoustics design and noise management. Technical Sciences , 27, 241-257.

[26] Herfkens, P. (2023). Edge AI for Urban Noise Monitoring: Perceptual Soundscape Prediction on Low-Cost Sensors. TU Delft Repository .

[27] Weitbrecht, P., Monteiro, C., Jardim, C., & Costa, C. (2023). Evaluation of leisure noise in urban environments: an approach based on low-cost sound monitoring systems and artificial intelligence. Acústica e Vibrações , 55, 45-58.

[28] Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Yang, Q., Zhang, Y., Huo, Z., ... & Zhou, Z. (2020). Internet of Things for noise mapping in smart cities: state of the art and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 7(10), 9634-9647.

[29] Zappatore, M., Longo, A., & Bochicchio, M. A. (2017). Crowd-sensing our smart cities: A platform for noise monitoring and acoustic urban planning. Journal of Communications Software and Systems , 13(2), 53-67.

[30] Alías, F., & Alsina-Pagès, R. M. (2019). Review of wireless acoustic sensor networks for environmental noise monitoring in smart cities. Journal of Sensors , 2019, 7634860.

[31] Marques, G., & Pitarma, R. (2020). A real-time noise monitoring system based on internet of things for enhanced acoustic comfort and occupational health. IEEE Access , 8, 139741-139755.

[32] Kaźmierczak, J., Rożałowska, B., Bartnicka, J., Kowalczyk, A., & Maślanka, K. (2021). Sounds of Smart City: a subjective review of acoustical problems appearing in creating intelligent urban areas. Preprint , ResearchGate.

[33] Kang, J., Aletta, F., Margaritis, E., & Yang, M. (2018). A model for implementing soundscape maps in smart cities. Noise Mapping , 5(1), 46-59.

[34] Radicchi, A., Henckel, D., & Memmel, M. (2018). Citizens as smart, active sensors for a quiet and just city. The case of the "open source soundscapes" approach to identify, assess and plan "everyday quiet areas" in cities. Noise Mapping , 5(1), 1-20.

[35] Zappatore, M., Longo, A., & Bochicchio, M. A. (2017). Crowd-sensing our smart cities: A platform for noise monitoring and acoustic urban planning. Journal of Communications Software and Systems , 13(2), 53-67.

[36] Starowicz, A., & Zieliński, M. (2024). Sustainable acoustics: the impact of AI on acoustics design and noise management. Technical Sciences , 27, 241-257.

[37] Herfkens, P. (2023). Edge AI for Urban Noise Monitoring: Perceptual Soundscape Prediction on Low-Cost Sensors. TU Delft Repository .

[38] Weitbrecht, P., Monteiro, C., Jardim, C., & Costa, C. (2023). Evaluation of leisure noise in urban environments: an approach based on low-cost sound monitoring systems and artificial intelligence. Acústica e Vibrações , 55, 45-58.

[39] Starowicz, A., & Zieliński, M. (2024). Sustainable acoustics: the impact of AI on acoustics design and noise management. Technical Sciences , 27, 241-257.

[40] Herfkens, P. (2023). Edge AI for Urban Noise Monitoring: Perceptual Soundscape Prediction on Low-Cost Sensors. TU Delft Repository .

[41] Zappatore, M., Longo, A., & Bochicchio, M. A. (2017). Crowd-sensing our smart cities: A platform for noise monitoring and acoustic urban planning. Journal of Communications Software and Systems , 13(2), 53-67.

[42] Weitbrecht, P., Monteiro, C., Jardim, C., & Costa, C. (2023). Evaluation of leisure noise in urban environments: an approach based on low-cost sound monitoring systems and artificial intelligence. Acústica e Vibrações , 55, 45-58.

[43] Starowicz, A., & Zieliński, M. (2024). Sustainable acoustics: the impact of AI on acoustics design and noise management. Technical Sciences , 27, 241-257.

[44] Herfkens, P. (2023). Edge AI for Urban Noise Monitoring: Perceptual Soundscape Prediction on Low-Cost Sensors. TU Delft Repository .

[45] Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Yang, Q., Zhang, Y., Huo, Z., ... & Zhou, Z. (2020). Internet of Things for noise mapping in smart cities: state of the art and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 7(10), 9634-9647.

[46] Starowicz, A., & Zieliński, M. (2024). Sustainable acoustics: the impact of AI on acoustics design and noise management. Technical Sciences , 27, 241-257.

[47] Herfkens, P. (2023). Edge AI for Urban Noise Monitoring: Perceptual Soundscape Prediction on Low-Cost Sensors. TU Delft Repository .

[48] Weitbrecht, P., Monteiro, C., Jardim, C., & Costa, C. (2023). Evaluation of leisure noise in urban environments: an approach based on low-cost sound monitoring systems and artificial intelligence. Acústica e Vibrações , 55, 45-58.

[49] Starowicz, A., & Zieliński, M. (2024). Sustainable acoustics: the impact of AI on acoustics design and noise management. Technical Sciences , 27, 241-257.

[50] Herfkens, P. (2023). Edge AI for Urban Noise Monitoring: Perceptual Soundscape Prediction on Low-Cost Sensors. TU Delft Repository .

[51] Sheng, Z., Pfersich, S., Eldridge, A., Zhou, J., Leung, C., & Ma, S. (2019). Wireless acoustic sensor networks and edge computing for rapid acoustic monitoring. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica , 6(1), 64-74.

[52] Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Yang, Q., Zhang, Y., Huo, Z., ... & Zhou, Z. (2020). Internet of Things for noise mapping in smart cities: state of the art and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 7(10), 9634-9647.

[53] Marques, G., & Pitarma, R. (2020). A real-time noise monitoring system based on internet of things for enhanced acoustic comfort and occupational health. IEEE Access , 8, 139741-139755.

[54] Starowicz, A., & Zieliński, M. (2024). Sustainable acoustics: the impact of AI on acoustics design and noise management. Technical Sciences , 27, 241-257.

[55] Herfkens, P. (2023). Edge AI for Urban Noise Monitoring: Perceptual Soundscape Prediction on Low-Cost Sensors. TU Delft Repository .

[56] Marques, G., & Pitarma, R. (2020). A real-time noise monitoring system based on internet of things for enhanced acoustic comfort and occupational health. IEEE Access , 8, 139741-139755.

[57] Alías, F., & Alsina-Pagès, R. M. (2019). Review of wireless acoustic sensor networks for environmental noise monitoring in smart cities. Journal of Sensors , 2019, 7634860.

[58] Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Yang, Q., Zhang, Y., Huo, Z., ... & Zhou, Z. (2020). Internet of Things for noise mapping in smart cities: state of the art and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 7(10), 9634-9647.

[59] Sheng, Z., Pfersich, S., Eldridge, A., Zhou, J., Leung, C., & Ma, S. (2019). Wireless acoustic sensor networks and edge computing for rapid acoustic monitoring. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica , 6(1), 64-74.

[60] Zappatore, M., Longo, A., & Bochicchio, M. A. (2017). Crowd-sensing our smart

cities: A platform for noise monitoring and acoustic urban planning. Journal of Communications Software and Systems , 13(2), 53-67.

[61] Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Yang, Q., Zhang, Y., Huo, Z., ... & Zhou, Z. (2020). Internet of Things for noise mapping in smart cities: state of the art and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 7(10), 9634-9647.

[62] Herfkens, P. (2023). Edge AI for Urban Noise Monitoring: Perceptual Soundscape Prediction on Low-Cost Sensors. TU Delft Repository .

[63] Sheng, Z., Pfersich, S., Eldridge, A., Zhou, J., Leung, C., & Ma, S. (2019). Wireless acoustic sensor networks and edge computing for rapid acoustic monitoring. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica , 6(1), 64-74.

[64] Alías, F., & Alsina-Pagès, R. M. (2019). Review of wireless acoustic sensor networks for environmental noise monitoring in smart cities. Journal of Sensors , 2019, 7634860.

[65] Marques, G., & Pitarma, R. (2020). A real-time noise monitoring system based on internet of things for enhanced acoustic comfort and occupational health. IEEE Access , 8, 139741-139755.

[66] Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Yang, Q., Zhang, Y., Huo, Z., ... & Zhou, Z. (2020). Internet of Things for noise mapping in smart cities: state of the art and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 7(10), 9634-9647.

[67] Sheng, Z., Pfersich, S., Eldridge, A., Zhou, J., Leung, C., & Ma, S. (2019). Wireless acoustic sensor networks and edge computing for rapid acoustic monitoring. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica , 6(1), 64-74.

[68] Alías, F., & Alsina-Pagès, R. M. (2019). Review of wireless acoustic sensor

networks for environmental noise monitoring in smart cities. Journal of Sensors , 2019, 7634860.

[69] Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Yang, Q., Zhang, Y., Huo, Z., ... & Zhou, Z. (2020). Internet of Things for noise mapping in smart cities: state of the art and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 7(10), 9634-9647.

[70] Sheng, Z., Pfersich, S., Eldridge, A., Zhou, J., Leung, C., & Ma, S. (2019). Wireless acoustic sensor networks and edge computing for rapid acoustic monitoring. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica , 6(1), 64-74.

[71] Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Yang, Q., Zhang, Y., Huo, Z., ... & Zhou, Z. (2020). Internet of Things for noise mapping in smart cities: state of the art and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 7(10), 9634-9647.

[72] Marques, G., & Pitarma, R. (2020). A real-time noise monitoring system based on internet of things for enhanced acoustic comfort and occupational health. IEEE Access , 8, 139741-139755.

[73] Zappatore, M., Longo, A., & Bochicchio, M. A. (2017). Crowd-sensing our smart cities: A platform for noise monitoring and acoustic urban planning. Journal of Communications Software and Systems , 13(2), 53-67.

[74] Sheng, Z., Pfersich, S., Eldridge, A., Zhou, J., Leung, C., & Ma, S. (2019). Wireless acoustic sensor networks and edge computing for rapid acoustic monitoring. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica , 6(1), 64-74.

[75] Arzberger, S., Fairbairn, A., Hemauer, M., & Richter, C. (2025). The potential of soundscapes as an ecosystem monitoring tool for urban biodiversity. Journal of Urban Ecology , 11(1), juaf002.

[76] Aletta, F., & Torresin, S. (2023). Adoption of ISO/TS 12913-2: 2018 protocols for data collection from individuals in soundscape studies: An overview of the literature. Current Pollution Reports , 9(3), 430-446.

[77] International Organization for Standardization. (2018). ISO 12913-2:2018 Acoustics — Soundscape — Part 2: Data collection and reporting requirements . ISO.

[78] Aletta, F., Xiao, J., & Kang, J. (2024). Identifying barriers to engage with soundscape standards: Insights from national standards bodies and experts. JASA Express Letters , 4(4), 047401.

[79] Gale, T., Ednie, A., & Beektink, K. (2022). Toward Healthier Parks and People through Integrated Soundscape Research: Applying the International Organization for Standardization Acoustic Environment Taxonomy across Contexts. Society & Natural Resources , 35(7), 728-747.

[80] International Organization for Standardization. (2019). ISO 12913-3:2019 Acoustics — Soundscape — Part 3: Data analysis . ISO.

[81] Michalski, R. L. X. N., de Ulhôa Carvalho, M. L., de Melo, V. S. G., & Engel, M. (2024). Assessing the applicability of ISO 12913 in Brazil: insights from a survey with Brazilian soundscape researchers. ResearchGate Preprint .

[82] Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Kang, J., & the SATP Team. (2024). Advancing cross-cultural soundscape research: updates from the Soundscape Attributes Translation Project (SATP). INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 270(10), 545-556.

[83] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[84] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020 . EEA Report No 22/2019.

[85] Aletta, F., & Torresin, S. (2023). Adoption of ISO/TS 12913-2: 2018 protocols for data collection from individuals in soundscape studies: An overview of the literature. Current Pollution Reports , 9(3), 430-446.

[86] International Commission for Acoustics. (2023). ICA Technical Activities and Working Groups Report . ICA Secretariat.

[87] European Acoustics Association. (2024). Forum Acusticum 2023 Proceedings . EAA Publications.

[88] Aletta, F., Kang, J., & Axelsson, Ö. (2016). Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models. Landscape and Urban Planning , 149, 65-74.

[89] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[90] International Organization for Standardization. (2021). ISO/TC 43/SC 1 Working Group Reports . ISO Technical Committee 43.

[91] Aletta, F., Xiao, J., & Kang, J. (2024). Identifying barriers to engage with soundscape standards: Insights from national standards bodies and experts. JASA Express Letters , 4(4), 047401.

[92] European Commission. (2023). Horizon Europe Programme Guidelines . EU Publications Office.

[93] European Commission. (2024). Erasmus+ Programme Annual Report . EU Education and Culture DG.

[94] Axelsson, Ö., Nilsson, M. E., & Berglund, B. (2010). A principal components model of soundscape perception. Journal of the Acoustical Society of America , 128(5), 2836-2846.

[95] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world . Destiny Books.

[96] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region . WHO Regional Office for Europe.

[97] UN-Habitat. (2022). World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities . United Nations Human Settlements Programme.

[98] United Nations. (2023). Technology Facilitation Mechanism Annual Report . UN Department of Economic and Social Affairs.

[99] OECD. (2023). Development Co-operation Report 2023 . OECD Publishing.

[100] International Organization for Standardization. (2014). ISO 12913-1:2014 Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework . ISO.

[101] Aletta, F., & Torresin, S. (2023). Adoption of ISO/TS 12913-2: 2018 protocols for data collection from individuals in soundscape studies: An overview of the literature. Current Pollution Reports , 9(3), 430-446.

[102] International Organization for Standardization. (2018). ISO 12913-2:2018 Acoustics — Soundscape — Part 2: Data collection and reporting requirements . ISO.

[103] International Organization for Standardization. (2014). ISO 12913-1:2014 Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework . ISO.

[104] International Organization for Standardization. (2018). ISO 12913-2:2018 Acoustics — Soundscape — Part 2: Data collection and reporting requirements . ISO.

[105] Aletta, F., & Torresin, S. (2023). Adoption of ISO/TS 12913-2: 2018 protocols for data collection from individuals in soundscape studies: An overview of the literature. Current Pollution Reports , 9(3), 430-446.

[106] International Organization for Standardization. (2019). ISO 12913-3:2019 Acoustics — Soundscape — Part 3: Data analysis . ISO.

[107] Axelsson, Ö., Nilsson, M. E., & Berglund, B. (2010). A principal components model of soundscape perception. Journal of the Acoustical Society of America , 128(5), 2836-2846.

[108] Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Kang, J., & the SATP Team. (2024). Advancing cross-cultural soundscape research: updates from the Soundscape Attributes Translation Project (SATP). INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 270(10), 545-556.

[109] Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Kang, J., & the SATP Team. (2024). Advancing cross-cultural soundscape research: updates from the Soundscape Attributes Translation Project (SATP). INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 270(10), 545-556.

[110] Aletta, F., Xiao, J., & Kang, J. (2024). Identifying barriers to engage with soundscape standards: Insights from national standards bodies and experts. JASA Express Letters , 4(4), 047401.

[111] Michalski, R. L. X. N., de Ulhôa Carvalho, M. L., de Melo, V. S. G., & Engel, M. (2024). Assessing the applicability of ISO 12913 in Brazil: insights from a survey with Brazilian soundscape researchers. ResearchGate Preprint .

[112] Gale, T., Ednie, A., & Beektink, K. (2022). Toward Healthier Parks and People through Integrated Soundscape Research: Applying the International Organization for Standardization Acoustic Environment Taxonomy across Contexts. Society & Natural Resources , 35(7), 728-747.

[113] Aletta, F., Xiao, J., & Kang, J. (2024). Identifying barriers to engage with soundscape standards: Insights from national standards bodies and experts. JASA Express Letters , 4(4), 047401.

[114] International Organization for Standardization. (2023). ISO Standards Development and Review Procedures . ISO Central Secretariat.

[115] Aletta, F., & Torresin, S. (2023). Adoption of ISO/TS 12913-2: 2018 protocols for data collection from individuals in soundscape studies: An overview of the literature. Current Pollution Reports , 9(3), 430-446.

[116] Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Kang, J., & the SATP Team. (2024). Advancing cross-cultural soundscape research: updates from the Soundscape Attributes Translation Project (SATP). INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 270(10), 545-556.

[117] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[118] Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Kang, J., & the SATP Team. (2024).

Advancing cross-cultural soundscape research: updates from the Soundscape Attributes Translation Project (SATP). INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 270(10), 545-556.

[119] Michalski, R. L. X. N., de Ulhôa Carvalho, M. L., de Melo, V. S. G., & Engel, M. (2024). Assessing the applicability of ISO 12913 in Brazil: insights from a survey with Brazilian soundscape researchers. ResearchGate Preprint .

[120] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world . Destiny Books.

[121] Truax, B. (2001). Acoustic communication (2nd ed.). Ablex Publishing.

[122] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[123] Southworth, M. (2021). The sonic environment of cities. Environment and Behavior , 41(5), 635-661.

[124] Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. BioScience , 61(3), 203-216.

[125] Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., ... & Simpson, S. D. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science , 371(6529), eaba4658.

[126] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world . Destiny Books.

[127] Truax, B. (2001). Acoustic communication (2nd ed.). Ablex Publishing.

[128] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[129] Southworth, M. (2021). The sonic environment of cities. Environment and Behavior , 41(5), 635-661.

[130] Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Kang, J., & the SATP Team. (2024). Advancing cross-cultural soundscape research: updates from the Soundscape Attributes Translation Project (SATP). INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 270(10), 545-556.

[131] Michalski, R. L. X. N., de Ulhôa Carvalho, M. L., de Melo, V. S. G., & Engel, M. (2024). Assessing the applicability of ISO 12913 in Brazil: insights from a survey with Brazilian soundscape researchers. ResearchGate Preprint .

[132] Radicchi, A., Henckel, D., & Memmel, M. (2018). Citizens as smart, active sensors for a quiet and just city. The case of the "open source soundscapes" approach to identify, assess and plan "everyday quiet areas" in cities. Noise Mapping , 5(1), 1-20.

[133] Herfkens, P. (2023). Edge AI for Urban Noise Monitoring: Perceptual Soundscape Prediction on Low-Cost Sensors. TU Delft Repository .

[134] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[135] Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V.

M., ... & Simpson, S. D. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science , 371(6529), eaba4658.

[136] Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Yang, Q., Zhang, Y., Huo, Z., ... & Zhou, Z. (2020). Internet of Things for noise mapping in smart cities: state of the art and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 7(10), 9634-9647.

[137] Starowicz, A., & Zieliński, M. (2024). Sustainable acoustics: the impact of AI on acoustics design and noise management. Technical Sciences , 27, 241-257.

[138] Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Kang, J., & the SATP Team. (2024). Advancing cross-cultural soundscape research: updates from the Soundscape Attributes Translation Project (SATP). INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 270(10), 545-556.

[139] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[140] Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., ... & Simpson, S. D. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science , 371(6529), eaba4658.

[141] Arzberger, S., Fairbairn, A., Hemauer, M., & Richter, C. (2025). The potential of soundscapes as an ecosystem monitoring tool for urban biodiversity. Journal of Urban Ecology , 11(1), juaf002.

[142] Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. BioScience , 61(3), 203-216.

[143] Llusia, D., Parsons, M., Radford, C., Urban, E., & Simpson, S. D. (2020). Listening forward: approaching marine biodiversity assessments using acoustic methods. Royal Society Open Science , 7(8), 201287.

[144] Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., ... & Simpson, S. D. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science , 371(6529), eaba4658.

[145] Llusia, D., Parsons, M., Radford, C., Urban, E., & Simpson, S. D. (2020). Listening forward: approaching marine biodiversity assessments using acoustic methods. Royal Society Open Science , 7(8), 201287.

[146] Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. BioScience , 61(3), 203-216.

[147] Arzberger, S., Fairbairn, A., Hemauer, M., & Richter, C. (2025). The potential of soundscapes as an ecosystem monitoring tool for urban biodiversity. Journal of Urban Ecology , 11(1), juaf002.

[148] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world . Destiny Books.

[149] Truax, B. (2001). Acoustic communication (2nd ed.). Ablex Publishing.

[150] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020 . EEA Report No 22/2019.

[151] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[152] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region . WHO Regional Office for Europe.

[153] Southworth, M. (2021). The sonic environment of cities. Environment and Behavior , 41(5), 635-661.

[154] Aletta, F., Kang, J., & Axelsson, Ö. (2016). Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models. Landscape and Urban Planning , 149, 65-74.

[155] Raimbault, M., & Dubois, D. (2005). Urban soundscapes: experiences and knowledge. Cities , 22(5), 339-350.

[156] Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. BioScience , 61(3), 203-216.

[157] Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., ... & Simpson, S. D. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science , 371(6529), eaba4658.

[158] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[159] Southworth, M. (2021). The sonic environment of cities. Environment and Behavior , 41(5), 635-661.

[160] United Nations. (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision . UN Department of Economic and Social Affairs.

[161] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020 . EEA Report No 22/2019.

[162] Truax, B. (2001). Acoustic communication (2nd ed.). Ablex Publishing.

[163] Raimbault, M., & Dubois, D. (2005). Urban soundscapes: experiences and knowledge. Cities , 22(5), 339-350.

[164] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world . Destiny Books.

[165] Kang, J. (2007). Urban sound environment . Taylor & Francis.

[166] Aletta, F., Kang, J., & Axelsson, Ö. (2016). Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models. Landscape and Urban Planning , 149, 65-74.

[167] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region . WHO Regional Office for Europe.

[168] Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Kang, J., & the SATP Team. (2024). Advancing cross-cultural soundscape research: updates from the Soundscape Attributes Translation Project (SATP). INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 270(10), 545-556.

[169] Truax, B. (2001). Acoustic communication (2nd ed.). Ablex Publishing.

[170] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020 . EEA Report No 22/2019.

[171] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[172] Southworth, M. (2021). The sonic environment of cities. Environment and Behavior , 41(5), 635-661.

[173] Raimbault, M., & Dubois, D. (2005). Urban soundscapes: experiences and knowledge. Cities , 22(5), 339-350.

[174] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020 . EEA Report No 22/2019.

[175] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region . WHO Regional Office for Europe.

[176] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[177] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020 . EEA Report No 22/2019.

[178] Aletta, F., Kang, J., & Axelsson, Ö. (2016). Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models. Landscape and Urban Planning , 149, 65-74.

[179] Kang, J. (2007). Urban sound environment . Taylor & Francis.

[180] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020 . EEA Report No 22/2019.

[181] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region . WHO Regional Office for Europe.

[182] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world . Destiny Books.

[183] Truax, B. (2001). Acoustic communication (2nd ed.). Ablex Publishing.

[184] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020 . EEA Report No 22/2019.

[185] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[186] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region . WHO Regional Office for Europe.

[187] Aletta, F., Kang, J., & Axelsson, Ö. (2016). Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models. Landscape and Urban Planning , 149, 65-74.

[188] Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Yang, Q., Zhang, Y., Huo, Z., ... & Zhou, Z. (2020). Internet of Things for noise mapping in smart cities: state of the art and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 7(10), 9634-9647.

[189] Starowicz, A., & Zieliński, M. (2024). Sustainable acoustics: the impact of AI on acoustics design and noise management. Technical Sciences , 27, 241-257.

[190] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the

European region . WHO Regional Office for Europe.

[191] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020 . EEA Report No 22/2019.

[192] United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development . UN General Assembly Resolution 70/1.

[193] King, E. A. (2022). Here, there, and everywhere: How the SDGs must include noise pollution in their development challenges. Environment: Science and Policy for Sustainable Development , 64(3), 4-14.

[194] Kang, J., Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Erfanian, M., ... & Xie, H. (2023). Supportive soundscapes are crucial for sustainable environments. Science of the Total Environment , 857, 159678.

[195] Grant, C., Bartleet, B. L., Barclay, L., Lamont, J., Zubrycki, K., & Bennett, D. (2022). Integrating music and sound into efforts to advance the sustainable development goals in the Asia-Pacific: case studies from Indonesia, Vanuatu and Australia. International Journal of Community Music , 15(1), 83-105.

[196] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world . Destiny Books.

[197] Truax, B. (2001). Acoustic communication (2nd ed.). Ablex Publishing.

[198] King, E. A. (2022). Here, there, and everywhere: How the SDGs must include noise pollution in their development challenges. Environment: Science and Policy for Sustainable Development , 64(3), 4-14.

[199] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the

European region . WHO Regional Office for Europe.

[200] Jano Reiss, M., Rotem, A., Gridinger, O., Tzur, Y., & Shachar, N. (2022). Health and wellbeing (SDG3) in urban design and spatial planning–a retrospective roadmap towards the collective impact model. Cities & Health , 8(1), 45-62.

[201] Kang, J., Aletta, F., Margaritis, E., & Yang, M. (2018). A model for implementing soundscape maps in smart cities. Noise Mapping , 5(1), 46-59.

[202] Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., ... & Simpson, S. D. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science , 371(6529), eaba4658.

[203] Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. BioScience , 61(3), 203-216.

[204] Kang, J. (2007). Urban sound environment . Taylor & Francis.

[205] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world . Destiny Books.

[206] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020 . EEA Report No 22/2019.

[207] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[208] Southworth, M. (2021). The sonic environment of cities. Environment and Behavior , 41(5), 635-661.

[209] Raimbault, M., & Dubois, D. (2005). Urban soundscapes: experiences and knowledge. Cities , 22(5), 339-350.

[210] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world . Destiny Books.

[211] Truax, B. (2001). Acoustic communication (2nd ed.). Ablex Publishing.

[212] Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. BioScience , 61(3), 203-216.

延伸參考文獻

[213] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[214] Aletta, F., Kang, J., & Axelsson, Ö. (2016). Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models. Landscape and Urban Planning , 149, 65-74.

[215] Axelsson, Ö., Nilsson, M. E., & Berglund, B. (2010). A principal components model of soundscape perception. Journal of the Acoustical Society of America , 128(5), 2836-2846.

[216] Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. BioScience , 61(3), 203-216.

[217] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region . WHO Regional Office for Europe.

[218] Aletta, F., Lam, B., Tarlao, C., Oberman, T., & Kang, J. (2025). Introduction to the special issue on: Advances in soundscape: Emerging trends and challenges in research and practice. The Journal of the Acoustical Society of America , 157(6), 4411-4415.

[219] Starowicz, A., & Zieliński, M. (2024). Sustainable acoustics: the impact of AI on acoustics design and noise management. Technical Sciences , 27, 241-257.

[220] Turchet, L., Lagrange, M., Rottondi, C., Tzanetakis, G., & Benetos, E. (2023). The internet of sounds: Convergent trends, insights, and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 10(15), 13314-13329.

[221] Marques, G., & Pitarma, R. (2020). A real-time noise monitoring system based on internet of things for enhanced acoustic comfort and occupational health. IEEE Access , 8, 139741-139755.

[222] Kang, J. (2007). Urban sound environment . Taylor & Francis.

[223] Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., ... & Simpson, S. D. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science , 371(6529), eaba4658.

[224] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020 . EEA Report No 22/2019.

[225] Truax, B. (2001). Acoustic communication (2nd ed.). Ablex Publishing.

[226] Xiao, J., Lavia, L., & Kang, J. (2018). Towards an agile participatory urban

soundscape planning framework. Journal of Environmental Planning and Management , 61(4), 677-698.

[227] King, E. A. (2022). Here, there, and everywhere: How the SDGs must include noise pollution in their development challenges. Environment: Science and Policy for Sustainable Development , 64(3), 4-14.

[228] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world . Destiny Books.

[229] Otondo, F. (2024). Applying Fundamental Soundscape Concepts as a Framework for Introductory Acoustical Engineering and Music Courses. International Journal of Engineering Education , 40(6), 1654-1664.

[230] Milo, A. (2020). The acoustic designer: Joining soundscape and architectural acoustics in architectural design education. Building Acoustics , 27(1), 49-65.

[231] Aletta, F., & Torresin, S. (2023). Adoption of ISO/TS 12913-2: 2018 protocols for data collection from individuals in soundscape studies: An overview of the literature. Current Pollution Reports , 9(3), 430-446.

[232] International Organization for Standardization. (2014). ISO 12913-1:2014 Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework . ISO.

[233] International Organization for Standardization. (2019). ISO 12913-3:2019 Acoustics — Soundscape — Part 3: Data analysis . ISO.

[234] Guastavino, C. (2020). Current trends in urban soundscape research. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 261(1), 794-805.

[235] Kang, J. (2021). Soundscape: Progress in the past 50 years and challenges in the

next 50 years. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 263(6), 113-125.

[236] Aktaş, R. (2024). Environmental Soundscapes: Soundmapping in Music Education. Charles University Digital Repository .

[237] Otondo, F. (2024). Applying Fundamental Soundscape Concepts as a Framework for Introductory Acoustical Engineering and Music Courses. International Journal of Engineering Education , 40(6), 1654-1664.

[238] Milo, A. (2020). The acoustic designer: Joining soundscape and architectural acoustics in architectural design education. Building Acoustics , 27(1), 49-65.

[239] Southworth, M. (2021). The sonic environment of cities. Environment and Behavior , 41(5), 635-661.

[240] Aletta, F., Xiao, J., & Kang, J. (2024). Identifying barriers to engage with soundscape standards: Insights from national standards bodies and experts. JASA Express Letters , 4(4), 047401.

[241] Gale, T., Ednie, A., & Beektink, K. (2022). Toward Healthier Parks and People through Integrated Soundscape Research: Applying the International Organization for Standardization Acoustic Environment Taxonomy across Contexts. Society & Natural Resources , 35(7), 728-747.

[242] International Organization for Standardization. (2023). ISO Standards Development and Review Procedures . ISO Central Secretariat.

[243] Aletta, F., Lam, B., Tarlao, C., Oberman, T., & Kang, J. (2025). Introduction to the special issue on: Advances in soundscape: Emerging trends and challenges in research and practice. The Journal of the Acoustical Society of America , 157(6),

4411-4415.

[244] International Commission for Acoustics. (2023). ICA Technical Activities and Working Groups Report . ICA Secretariat.

[245] Grant, C., Bartleet, B. L., Barclay, L., Lamont, J., Zubrycki, K., & Bennett, D. (2022). Integrating music and sound into efforts to advance the sustainable development goals in the Asia-Pacific: case studies from Indonesia, Vanuatu and Australia. International Journal of Community Music , 15(1), 83-105.

[246] European Commission. (2023). Horizon Europe Programme Guidelines . EU Publications Office.

[247] Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Kang, J., & the SATP Team. (2024). Advancing cross-cultural soundscape research: updates from the Soundscape Attributes Translation Project (SATP). INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 270(10), 545-556.

[248] UN-Habitat. (2022). World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities . United Nations Human Settlements Programme.

[249] United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development . UN General Assembly Resolution 70/1.

[250] Kang, J., Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Erfanian, M., ... & Xie, H. (2023). Supportive soundscapes are crucial for sustainable environments. Science of the Total Environment , 857, 159678.

[251] Aletta, F., Lam, B., Tarlao, C., Oberman, T., & Kang, J. (2025). Introduction to the special issue on: Advances in soundscape: Emerging trends and challenges in research and practice. The Journal of the Acoustical Society of America , 157(6),

4411-4415.

[252] Turchet, L., Lagrange, M., Rottondi, C., Tzanetakis, G., & Benetos, E. (2023). The internet of sounds: Convergent trends, insights, and future directions. IEEE Internet of Things Journal , 10(15), 13314-13329.

[253] Guastavino, C. (2020). Current trends in urban soundscape research. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 261(1), 794-805.

[254] Kang, J. (2021). Soundscape: Progress in the past 50 years and challenges in the next 50 years. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 263(6), 113-125.

[255] Xiao, J., Lavia, L., & Kang, J. (2018). Towards an agile participatory urban soundscape planning framework. Journal of Environmental Planning and Management , 61(4), 677-698.

[256] Gasc, A., Francomano, D., Dunning Jr, J. B., & Pijanowski, B. C. (2017). Future directions for soundscape ecology: The importance of ornithological contributions. The Auk: Ornithological Advances , 134(1), 215-228.

[257] Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., ... & Simpson, S. D. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science , 371(6529), eaba4658.

[258] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region . WHO Regional Office for Europe.

[259] Marques, G., & Pitarma, R. (2020). A real-time noise monitoring system based on internet of things for enhanced acoustic comfort and occupational health. IEEE Access , 8, 139741-139755.

[260] Xiao, J., Lavia, L., & Kang, J. (2018). Towards an agile participatory urban soundscape planning framework. Journal of Environmental Planning and Management , 61(4), 677-698.

[261] Kang, J., Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Erfanian, M., ... & Xie, H. (2023). Supportive soundscapes are crucial for sustainable environments. Science of the Total Environment , 857, 159678.

[262] Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., Kang, J., & the SATP Team. (2024). Advancing cross-cultural soundscape research: updates from the Soundscape Attributes Translation Project (SATP). INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings , 270(10), 545-556.

[263] Schafer, R. M. (1977). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world . Destiny Books.

[264] Otondo, F. (2024). Applying Fundamental Soundscape Concepts as a Framework for Introductory Acoustical Engineering and Music Courses. International Journal of Engineering Education , 40(6), 1654-1664.

[265] Milo, A. (2020). The acoustic designer: Joining soundscape and architectural acoustics in architectural design education. Building Acoustics , 27(1), 49-65.

[266] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020 . EEA Report No 22/2019.

[267] Truax, B. (2001). Acoustic communication (2nd ed.). Ablex Publishing.

[268] Southworth, M. (2021). The sonic environment of cities. Environment and Behavior , 41(5), 635-661.

[269] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Lavia, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. Building and Environment , 108, 284-294.

[270] United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development . UN General Assembly Resolution 70/1.