

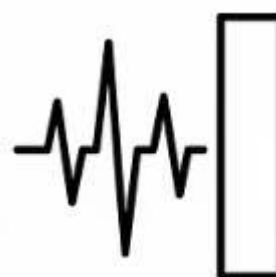
第十章 輪胎噪音與環境影響

Tire Noise and Environmental Impact

摘要 (Abstract)

輪胎噪音作為城市道路交通噪音的主要組成來源，其環境影響已不再僅限於聲學層面的不適感，而是逐步被確認為一項具顯著公共健康、社會經濟與永續發展意涵的環境風險因子。當車速超過約三十至四十公里每小時後，輪胎與路面交互作用所產生的滾動噪音即成為主導聲源，使輪胎噪音控制成為降低整體交通噪音暴露的關鍵環節。本章從系統性視角出發，全面探討輪胎噪音對人類健康、生活品質、城市環境與社會經濟的多層次影響，並整合國際間成熟的評估方法與政策治理框架，建構一套以科學證據為基礎的環境噪音治理論述。

本章首先彙整大量流行病學與環境醫學研究成果，說明長期暴露於道路交通噪音與多項健康不良結局之間的因果關聯，包括心血管疾病、睡眠障礙、兒童認知功能損害與噪音煩擾等。世界衛生組織的疾病負擔評估顯示，交通噪音在歐洲每年造成至少百萬健康生命年的損失，其中輪胎噪音因其暴露範圍廣泛而佔據核心地位。章節



進一步解析噪音透過生理應激反應、睡眠干擾與心理社會途徑影響健康的病理生理機制，凸顯輪胎噪音問題在公共衛生領域的重要性。

在方法論層面，本章系統性介紹現代噪音污染評估體系，涵蓋噪音地圖繪製、暴露評估與健康與社會影響評估等關鍵模組。透過噪音地圖與人口分布資料的整合，可量化不同噪音暴露區間的人口規模，並結合暴露—反應關係函數，進一步估算可歸因的健康損害與經濟成本。章節同時回顧歐盟環境噪音指令、WHO 環境噪音指南及 UNECE 輪胎噪音法規等國際政策框架，說明輪胎噪音如何被納入從產品設計、環境管理到城市治理的多層次法規體系。整體而言，本章旨在將輪胎噪音議題由工程技術問題，提升為結合健康風險管理與永續城市發展的跨領域環境治理課題。

輪胎噪音作為城市交通噪音的主導來源,其影響早已超越單純的聲學問題範疇,深刻地波及公共健康、環境品質、社會經濟以及城市永續發展等多個層面。隨著全球城市化進程加速與機動車保有量持續攀升,交通噪音污染已成為現代社會面臨的重大環境挑戰之一。世界衛生組織(World Health Organization, WHO)在 2011 年發表的疾病負擔評估報告中明確指出,環境噪音在歐洲地區每年造成至少 100 萬健康生命年(Disability-Adjusted Life Years, DALYs)的損失,其中道路交通噪音貢獻了絕大部分負擔[1]。更為值得關注的是,輪胎與路面交互作用產生的噪音在車速超過約 30-40 公里/小時後即成為主要聲源,這意味著在絕大多數城市道路與高速公路場景中,輪胎噪音控制成為降低交通噪音暴露的關鍵環節[2]。

從環境影響的系統性視角審視,輪胎噪音問題涉及聲源特性(輪胎設計、路面材料)、傳播路徑(城市形態、建築布局)以及受體敏感性(人群暴露模式、健康脆弱性)等多個維度的交互作用。現代噪音環境影響評估不再局限於單純的噪音值測量,而是整合了暴露評估(Exposure Assessment)、劑量反應關係(Dose-Response



Relationship)、健康影響量化(Health Impact Quantification)以及經濟價值評估(Economic Valuation)等多學科方法論體系[3]。國際標準化組織(International Organization for Standardization, ISO)、歐盟環境噪音指令(European Union Environmental Noise Directive 2002/49/EC)、美國聯邦公路管理局(Federal Highway Administration, FHWA)等權威機構均已建立了較為完善的噪音評估與管理框架,為各國噪音政策制定提供了科學依據[4]。

本章將系統性地探討輪胎噪音的環境影響議題,從公共健康效應的醫學證據出發,深入分析噪音污染評估的方法學體系,考察噪音控制策略的技術與政策選項,梳理國際主要法規與政策框架,量化經濟與社會成本,並展望未來發展趨勢,特別是電動車時代與自動駕駛技術對城市噪音景觀(Soundscape)的深遠影響。透過對這些議題的綜合論述,本章旨在為輪胎噪音問題的多維度理解與綜合治理提供理論支撐與經驗指引,促進交通系統、城市環境與人類健康之間更為和諧的平衡。

10.1 交通噪音與公共健康 (Traffic Noise and Public Health)

交通噪音對公共健康的影響構成了當代環境醫學與預防醫學領域最為重要的研究主題之一。自 20 世紀中葉起,隨著流行病學方法的成熟與大規模隊列研究的開展,交通噪音暴露與多種健康不良結局之間的因果關聯逐步獲得堅實的科學證據

支持。世界衛生組織歐洲區域辦公室在 2018 年發布的《歐洲環境噪音指南》(WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region)中,基於系統性文獻回顧與證據質量評估,針對道路交通噪音、鐵路噪音、航空噪音等不同聲源提出了明確的健康防護建議值[5]。該指南強調,長期暴露於超過建議值的交通噪音環境中,與心血管疾病、代謝功能紊亂、睡眠障礙、認知功能損害以及生活質量下降等多種健康問題存在顯著的關聯性[6]。

心血管疾病(Cardiovascular Diseases, CVD)是交通噪音健康效應研究中證據最為充分、臨床意義最為重大的領域。大量流行病學研究一致顯示,長期暴露於道路交通噪音與冠心病(Coronary Heart Disease)、心肌梗塞(Myocardial Infarction)、高血壓(Hypertension)以及中風(Stroke)的發病風險增加存



在統計學顯著的關聯[7]。德國學者 Wolfgang Babisch 教授在其長達數十年的系統性研究中,透過薈萃分析(Meta-Analysis)建立了道路交通噪音與冠心病之間的劑量反應關係曲線,發現每增加 10 dB(A)的日夜平均聲級(Lden),冠心病發病風險約增加 8-10%[8]。這一關係在校正了空氣污染、社會經濟地位、生活方式等多種混淆因素後仍然保持穩健,提示噪音暴露本身具有獨立的心血管致病作用[9]。近期的前瞻性隊列研究進一步揭示,夜間噪音暴露(Lnight)對心血管健康的不良影響尤為顯著,這與噪音干擾睡眠、激活自主神經系統、誘發氧化應激(Oxidative Stress)與內皮功能障礙(Endothelial Dysfunction)的病理生理機制密切相關[10]。

睡眠干擾(Sleep Disturbance)是交通噪音最為普遍且直接的健康影響途徑之一。夜間環境噪音可導致睡眠結構改變,包括入睡潛伏期延長、覺醒次數增加、慢波睡眠(Slow-Wave Sleep)與快速眼動睡眠(REM Sleep)比例減少等多維度的睡眠質量惡化[11]。即使個體在主觀上未能察覺噪音干擾,其生理反應如心率變異性(Heart Rate Variability)改變、皮質醇(Cortisol)分泌增加等應激標誌物仍會呈現異常,這種現象被稱為「非有意識的生理覺醒」(Subclinical Physiological Arousal)[12]。長期睡眠剝奪與睡眠質量下降不僅直接影響日間功能表現,更與前述心血管疾病風險、代謝綜合徵(Metabolic Syndrome)、免疫功能低下以及精神健康問題形成複雜的因果網絡[13]。WHO 在 2009 年發布的《歐洲夜間噪音指南》(Night Noise Guidelines for Europe)中建議,為保護公眾健康,夜間室外噪音水平(Lnight,outside)應低於 40 dB(A),而低於 30 dB(A)則被認為是無明顯生物學效應的安全閾值[14]。

兒童與青少年作為噪音暴露的脆弱人群,其健康影響引起了特別關注。英國學者 Stephen Stansfeld 領導的 RANCH 研究(Road traffic and Aircraft Noise exposure and children's Cognition and Health)是這一領域的里程碑式工作,該研究對來自英國、荷蘭與西班牙的 2844 名兒童進行了跨國比較,發現長期暴露於高水平航空噪音與道路交通噪音的兒童,在閱讀理解(Reading Comprehension)與記憶任務(Memory Tasks)中的表現顯著低於對照組,且這種認知功能損害與噪音暴露水平呈現劑量依賴關係[15]。後續的縱向研究進一步證實,噪音暴露對兒童認知發展的不良影響具有持續性,可能透過干擾語言習得關鍵期的信息處理能力、誘發慢性應激反應以及影響睡眠依賴的記憶鞏固過程等多重機制實現[16]。近期在西班牙巴塞隆納開展的隊列研究顯示,學校周邊道路交通噪音每增加 5 dB(A),兒童的工作記憶(Working Memory)發展速度減緩約 11.4%,執行功能(Executive Function)受損風險顯著上升[17]。

噪音煩擾(Noise Annoyance)雖然常被視為主觀心理反應,但其作為健康結局的重要性日益受到重視。煩擾不僅反映了噪音暴露對個體生活質量的直接影響,更可能在噪音致病路徑中扮演關鍵的中介變數角色[18]。大規模的社區調查顯示,當日夜平均聲級(Lden)超過 55 dB(A)時,約有 20-30%的暴露人群報告高度煩擾;而當聲級達到 70 dB(A)以上時,這一比例可能超過 60%[19]。值得注意的是,噪音煩擾的產生受到多種非聲學因素的調節,包括噪音來源的可預測性與可控性、個體人格特質(如噪音敏感性 Noise Sensitivity)、對噪音源的態度評估以及社區整體聲環境的複雜性等[20]。一些研究表明,噪音煩擾本身即與高血壓、焦慮障礙與抑鬱症狀存在關聯,提示心理社會路徑在噪音健康效應中的重要貢獻[21]。



從疾病負擔定量評估的角度,WHO 在 2011 年的報告中估算,歐洲地區每年因道路交通噪音暴露而損失的健康生命年(DALYs)至少達到 100 萬年,其中缺血性心臟病(Ischaemic Heart Disease)佔據最大比重,睡眠障礙與認知功能損害亦貢獻了可觀的負擔[1]。瑞典的研究將這一方法論應用於本國情境,發現道路交通噪音與鐵路噪音共同造成的年度健康負擔約為 5000 DALYs,相當於每 10 萬人口損失約 50 個健康生命年[22]。這些定量化評估不僅揭示了噪音問題的公共衛生重要性,更為成本效益分析(Cost-Benefit Analysis)與政策優先序排定提供了關鍵的決策支持信

息。最近的研究進一步發展了針對環境噪音健康狀態的殘疾權重(Disability Weights)測量方法,使得不同健康結局在疾病負擔評估中的整合更為精確[23]。從病理生理機制的視角理解交通噪音的健康效應,有助於識別干預的關鍵節點。當前主流的理論框架強調,噪音透過兩條主要路徑影響健康:直接路徑(Direct Pathway)涉及噪音誘發的急性生理應激反應,包括下丘腦-垂體-腎上腺軸(Hypothalamic-Pituitary-Adrenal Axis, HPA Axis)與交感神經系統(Sympathetic Nervous System)的激活,導致應激激素釋放、血壓升高、血管收縮等急性反應;間接路徑(Indirect Pathway)則以睡眠干擾為中介,透過長期的睡眠質量惡化引發代謝紊亂、免疫功能低下與心血管調節失衡[24]。近年來,分子流行病學研究揭示,慢性噪音暴露與氧化應激標誌物水平升高、促炎細胞因子(Pro-inflammatory Cytokines)表達增強、內皮細胞功能障礙以及表觀遺傳修飾(Epigenetic Modifications)改變等多層次的生物學變化相關聯,這些發現為噪音致病的分子基礎提供了重要洞見[25]。



綜合上述證據,交通噪音對公共健康的影響涵蓋了從分子水平的生理擾動到人群層面的疾病負擔等多個尺度,其嚴重程度與暴露廣泛性使之成為全球範圍內亟需應對的環境健康挑戰。輪胎噪音作為城市交通噪音的核心組成部分,其控制與管理不僅具有聲學工程意義,更承載著保護公眾健康、促進社會福祉的重大使命。未來的研究需要進一步闡明不同噪音特徵(如頻譜組成、時間模式、與其他環境暴露的聯合效應)與特定健康結局之間的精細關聯,為更具針對性與成本效益的干預策略提供科學依據。

10.2 噪音污染評估 (Noise Pollution Assessment)

噪音污染評估構成了環境噪音管理與健康風險控制的基礎環節,其核心目標在於系統性地量化噪音暴露水平、識別受影響人群、評估健康與社會經濟影響,並為決策提供科學依據。現代噪音污染評估已發展為一個整合了聲學測量、地理信息系統



(Geographic Information System, GIS)、暴露科學(Exposure Science)、流行病學與風險評估等多學科方法的綜合性技術體系[26]。國際標準化組織(ISO)、歐盟環境噪音指令(EU Environmental Noise Directive 2002/49/EC)以及各國環境保護機構均

已建立了相對成熟的評估框架與技術規範,推動噪音評估從定性描述走向定量化、精細化與預測性評估[27]。

噪音污染評估的一般性框架包含三個核心模組:噪音地圖繪製(Noise Mapping)用於空間化表徵噪音分布特徵;暴露評估(Exposure Assessment)用於量化人群層面的噪音暴露劑量與模式;影響評估



(Impact Assessment)用於關聯暴露與健康、社會經濟結局[28]。這三個模組在邏輯上呈現遞進關係,但在實踐中往往需要迭代優化與相互校驗。評估過程需要綜合考慮噪音源特性(聲功率、時間模式、頻譜組成)、傳播環境(地形、建築、氣象)、受體分布(人口密度、土地利用、敏感設施)以及評估目標(合規性檢查、健康風險評估、政策制定支持)等多維度的信息輸入[29]。

10.2.1 噪音地圖 (Noise Mapping)

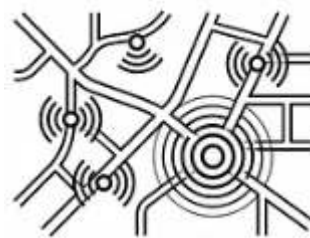
噪音地圖作為噪音污染空間化表徵的核心工具,是將聲學測量、數值模擬與地理信息技術有機結合的產物,為環境噪音的可視化展示、受影響區域識別、暴露人口估算以及



減噪措施規劃提供了不可或缺的決策支持[30]。歐盟環境噪音指令(Directive 2002/49/EC)自2002年頒布以來,強制要求成員國對人口超過10萬的城市聚集區、主要道路(年平均日交通量超過300萬輛次)、主要鐵路線(年通行量超過3萬次)以及主要機場周邊區域定期繪製噪音地圖,並向公眾公開,此舉極大地推動了噪音地圖技術在歐洲乃至全球範圍的標準化應用[31]。

噪音地圖的繪製方法學可分為基於實測的內插法(Measurement-Based Interpolation)與基於模型的預測法(Model-Based Prediction)兩大範疇,而實務中往往採用兩者結合的混合策略[32]。基於實測的方法透過在研究區域內布設有代表性的測量點位,獲取實際噪音水平數據,再利用空間統計方法(如克里金插值 Kriging Interpolation、逆距離加權 Inverse Distance Weighting 等)進行空間外推,生成連續的噪音分布圖。這類方法的優勢在於數據真實性強,能夠捕捉實際環境中的複雜影響因素,但其局限性亦十分明顯:測量成本高昂、時間消耗大、空間覆蓋度依賴於測點密度、難以模擬規劃情境與未來變化[33]。因此,除在小尺度精細化評估或模型驗證場景中應用外,大規模城市噪音地圖繪製更多依賴於數值預測方法。

基於模型的噪音地圖繪製依託專業的聲學模擬軟體(如 CadnaA、SoundPLAN、LIMA 等),這些軟體整合了國際通行的噪音傳播模型,並與 GIS 平台深度耦合,能夠處理複雜的三維城市幾何與多源噪音疊加[34]。歐盟推薦採用的 CNOSSO-EU(Common Noise Assessment Methods in Europe)框架提供了標準化的道路交通噪音、鐵路噪音與航空噪音源項模型以及聲傳播算法,確保不同國家與區域的噪音地圖具有可比性[35]。模型驅動的噪音地圖繪製通常包括以下關鍵步驟:首先,構建高精度的三維數字地形模型(Digital Elevation Model, DEM)與建築模型,這是準確模擬聲傳播路徑、反射與繞射效應的基礎;其次,收集並輸入噪音源數據,對於道路交通噪音而言,這包括交通流量(車輛數/小時)、車速分布、車輛分類(輕型車、重型車比例)、路面類型(密實瀝青、多孔瀝青等)等參數[36];第三,設定計算域與網格分辨率,通常城市尺度噪音地圖採用 10m×10m 或 5m×5m 的網格精度,在關鍵敏感區域可進一步加密至 2m×2m;第四,執行聲傳播計算,考慮幾何擴散、大氣吸收、地面效應、建築反射與屏障繞射等多種物理過程;最後,輸出並視覺化不同噪音指標(如 Lden、Lday、Levening、Lnight)在不同高度(如地面 4m,代表建築一層外牆面)的空間分布[37]。



噪音地圖的精度與可靠性高度依賴於輸入數據的質量與模型參數的校準。交通流數據的準確性是影響道路交通噪音地圖質量的首要因素,實務中常結合交通流動態模擬(如 VISSIM、SUMO 等交通模型)與實地調查獲取時空變化的交通流信息[38]。建築幾何與反射特性的精細表徵對城市峽谷(Urban Canyon)環境中的噪音預測至關重要,激光雷達(LiDAR)技術與建築信息模型(Building Information Modeling, BIM)的整合應用為高保真城市模型構建提供了新的可能性[39]。模型驗證是確保噪音地圖可信度的必要環節,通常要求在代表性點位進行實測,預測值與測量值之間的平均偏差應控制在 ± 2 dB(A)以內,標準差小於 3 dB(A)才被認為符合質量標準[40]。

噪音地圖的應用價值是多方面的。在暴露評估中,噪音地圖與人口分布數據(如人口密度網格、地址點數據)疊加,可快速估算不同噪音水平段的暴露人口數量,為健康風險評估提供基礎數據[41]。在合規性評估中,噪音地圖可識別超過法定限值的「熱點區域」(Noise Hotspots),指導執法與整改行動[42]。在城市規劃中,噪音地圖是土地利用規劃、交通基礎設施設計、噪音敏感建築(如學校、醫院、住宅)選址的重要決策支持工具,透過情境模擬評估不同規劃方案的噪音環境影響,從源頭預

防噪音暴露問題[43]。在公眾溝通與參與方面,公開的噪音地圖提高了環境信息透明度,增強了公眾的環境知情權與監督意識,亦是環境正義(Environmental Justice)議題中關注弱勢社區噪音暴露不平等的重要工具[44]。

近年來,噪音地圖技術的發展呈現若干前沿趨勢。動態噪音地圖(Dynamic Noise Mapping)整合實時交通流數據、氣象數據以及移動式噪音監測網絡,實現噪音分布的時變預測,為智慧城市(Smart City)環境管理提供了新的範式[45]。三維噪音地圖與建築外立面噪音評估的精細化應用,使得逐棟建築、甚至逐層樓板的暴露評估成為可能,為建築隔音性能評估與室內噪音預測奠定基礎[46]。聲景觀地圖(Soundscape Mapping)則超越了單純的噪音值描述,整合聲源識別、音質特徵以及主觀評估,追求更為全面的聲環境品質表徵[47]。機器學習與人工智能技術的引入,使得基於有限測量數據的高分辨率噪音地圖重建、複雜聲環境模式識別以及噪音地圖不確定性量化等方向取得了重要進展[48]。這些技術創新不僅提升了噪音地圖的精度與實用性,更拓展了其在環境健康監測、城市聲環境治理與永續發展評估中的應用潛力,使噪音地圖從靜態的評估工具演進為動態的管理與決策支持系統。

10.2.2 暴露評估 (Exposure Assessment)

暴露評估是噪音污染評估鏈條中連接環境噪音水平與人群健康風險的關鍵環節,其核心任務在於定量描述目標人群在特定時間與空間範圍內接受的噪音暴露劑量、模式



與分布特徵[49]。與簡單的環境噪音水平測量不同,暴露評估強調以人為中心(People-Centered),需要整合噪音空間分布、人口分布、時間活動模式(Time-Activity Pattern)以及建築環境特徵等多維度信息,才能實現對真實暴露情境的精確刻畫[50]。國際上通行的暴露評估框架由美國國家研究委員會(National Research Council)於1983年提出,並經過數十年發展不斷完善,包含暴露情境識別、暴露途徑分析、暴露劑量估算與不確定性表徵等核心模組[51]。

噪音暴露評估的複雜性源於暴露的時空動態性與個體異質性。人群的噪音暴露並非僅發生在住宅地址,而是在日常生活中跨越多個微環境(Microenvironments),包括住宅室內外、工作場所、交通工具內部、公共空間等,每個微環境的噪音水平與停留時間共同決定了總暴露劑量[52]。然而,受制於數據可得性與評估成本,絕大多數大規模流行病學研究與人群健康評估仍採用住宅地址噪音水平作為暴露代理指標(Exposure Proxy),這一簡化假設在方法學上引入了暴露誤分類(Exposure

Misclassification)風險,可能導致健康效應估計的偏倚[53]。近年來,基於個人活動日誌(Activity Diary)的微環境暴露模型、全球定位系統(GPS)追蹤結合噪音地圖的時空暴露重建、以及個人噪音劑量計(Personal Noise Dosimeter)的應用研究,為更精細化的暴露評估提供了新的方法學選項[54]。

住宅外牆噪音水平(Façade Noise Level)是國際上最廣泛採用的長期暴露評估指標,特別是在大規模隊列研究與人群健康風險評估中[55]。其評估通常基於噪音地圖,提取住宅建築最暴露外牆面(Most Exposed Façade)在標準高度(通常為地上 4 米,相當於建築一至二層)的噪音水平作為該地址的暴露值。歐盟環境噪音指令推薦使用的暴露指標為 Lden(晝-黃昏-夜加權平均聲級,Day-Evening-Night Average Sound Level),該指標對夜間(23:00-07:00)噪音賦予+10 dB 的權重懲罰,對黃昏時段(19:00-23:00)賦予+5 dB 權重,以反映不同時段人群對噪音的敏感性差異[56]。世界衛生組織在健康風險評估中則更強調單獨使用 Lnight(夜間平均聲級)指標,因其與睡眠干擾及其相關的心血管健康結局具有更直接的關聯性[57]。

從外牆噪音到室內噪音暴露的轉換是暴露評估精細化的重要步驟。建築外殼的隔音性能、窗戶開啟狀態、通風模式等因素共同決定了室內噪音水平。典型的磚混結構住宅在窗戶關閉狀態下,外牆至室內的隔音量約為 20-30 dB,而窗戶開啟時則降低至 10-15 dB[58]。考慮到多數居民在夏季或溫和季節傾向於開窗睡眠,實際的夜間室內噪音暴露往往顯著高於窗戶緊閉情境下的理論預測值[59]。一些研究結合氣候數據、住宅能源模擬與居民行為調查,建立了概率性的窗戶開啟模型,從而實現更為真實的室內暴露估算[60]。此外,建築物的朝向、樓層高度、周邊遮蔽情況亦會引起同一建築內不同住戶暴露水平的顯著差異,三維暴露評估方法能夠捕捉這種垂直與水平方向上的暴露異質性[61]。

人口暴露分布的估算是支撐公共衛生決策的關鍵信息產出。透過將噪音地圖與高分辨率人口數據(如人口網格、建築內人口分布模型)疊加,可計算不同噪音暴露水平段(如<45 dB, 45-50 dB, 50-55 dB, 55-60 dB, 60-65 dB, >65 dB 等)的暴露人口數量與



比例[62]。歐洲環境署(European Environment Agency, EEA)定期發布的歐洲噪音暴露評估報告顯示,約有 1.13 億歐盟居民(佔總人口的 20%以上)長期暴露於 Lden \geq 55 dB(A)的道路交通噪音環境,其中約 3200 萬人暴露於 Lden \geq 65 dB(A)的高噪音水平[63]。這些數據不僅揭示了問題的嚴重性,更為健康影響量化、成本效益分析以及減噪目標設定提供了基準線信息。脆弱人群的暴露評估受到特別關注,

兒童、老年人、既有心血管疾病患者等高危人群的暴露特徵與健康易感性分析,有助於實施針對性的健康保護措施[64]。

暴露評估的質量控制與不確定性分析是確保評估可信度的重要組成部分。暴露誤差的來源是多方面的:噪音地圖預測誤差、住址地理編碼(Geocoding)誤差、人口數據時空分辨率限制、個體時間活動模式的簡化假設、建築隔音性能的估計不確定性等[65]。敏感性分析(Sensitivity Analysis)與不確定性量化(Uncertainty Quantification)方法的應用,能夠識別關鍵誤差來源並評估其對暴露估計與後續健康風險評估的影響程度[66]。近年來,貝葉斯統計方法與蒙特卡洛模擬(Monte Carlo Simulation)被引入暴露評估,允許在存在不完美信息的情境下進行概率性推斷,並明確傳遞不確定性至風險表徵階段[67]。暴露評估方法的標準化與透明化報告亦是提升研究可重複性與證據質量的關鍵,國際期刊與評估指南越來越強調對暴露評估方法細節的完整描述與方法學限制的坦誠討論[68]。

展望未來,噪音暴露評估正朝向個性化(Personalized)、實時化(Real-Time)與多維化(Multi-Dimensional)方向發展。可穿戴式噪音傳感器與智能手機應用的普及,使得大規模的個人噪音暴露監測成為可能,公民科學(Citizen Science)項目如歐洲的NoiseCapture 與美國的 NoiseTube 已收集了數百萬條地理標記的噪音測量數據,為噪音地圖驗證與暴露模型改進提供了豐富的眾包數據源[69]。物聯網(Internet of Things, IoT)技術支撐的智慧城市噪音監測網絡,實現了城市聲環境的連續動態感知,為交通噪音的實時預警與適應性管理創造了條件[70]。暴露組學(Exposomics)概念的興起強調從全生命週程視角綜合評估包括噪音在內的多種環境暴露,並與基因組、代謝組等生物標誌物整合,追求對健康影響機制的系統性理解[71]。這些前沿進展不僅深化了我們對噪音暴露複雜性的認識,更為精準公共衛生干預與個性化健康管理開闢了新的可能性。

10.2.3 影響評估 (Impact Assessment)

影響評估作為噪音污染評估的最終環節,旨在將噪音暴露數據轉化為可量化的健康、社會與經濟結局指標,從而為政策制定、資源配置與公共溝通提供決策相關的證據[72]。健康影響評估(Health Impact



Assessment, HIA)是影響評估的核心組成部分,其基本邏輯框架包括:基於流行病學證據建立暴露-反應函數(Exposure-Response Function, ERF),描述噪音暴露水平與特定健康結局發生率或風險之間的定量關係;結合目標人群的暴露分布數據,計

算可歸因於噪音暴露的健康結局案例數(Attributable Cases);進一步採用統一的健康度量如殘疾調整生命年(DALYs)或質量調整生命年(Quality-Adjusted Life Years, QALYs)進行不同健康結局的綜合量化;最終可結合經濟評估方法,估算健康損害的貨幣化價值[73]。

暴露-反應函數的建立依賴於高質量的流行病學證據,這通常來源於大規模前瞻性隊列研究、薈萃分析或系統性文獻回顧。世界衛生組織在其 2018 年發布的《歐洲環境噪音指南》中,基於嚴格的證據質量評估(採用 GRADE 方法,Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation),針對道路交通噪音與多種健康結局提供了推薦的暴露-反應函數[74]。以心血管疾病為例,Babisch 等人透過薈萃分析建立的劑量反應關係顯示,道路交通噪音每增加 10 dB(A) Lden,冠心病發病相對風險(Relative Risk, RR)增加約 8%,即 $RR=1.08(95\% \text{ CI: } 1.04-1.13)$ [75]。對於高度煩擾(High Annoyance),Miedema 與 Oudshoorn 基於大量社區調查數據發展的經典曲線預測,當 Lden 為 55 dB(A)時約有 10%人群報告高度煩擾,而在 70 dB(A)時這一比例上升至約 30%[76]。睡眠干擾的暴露-反應關係則更多基於多導睡眠圖(Polysomnography)研究與主觀睡眠質量問卷調查的綜合證據[77]。

可歸因負擔(Attributable Burden)的計算是影響評估的核心技術步驟。其基本公式為:可歸因案例數 = $\sum [PAF(L) \times N(L)]$ 其中 PAF(L)為特定噪音暴露水平 L 下的人群歸因分數(Population Attributable Fraction),N(L)為該暴露水平段的基



線健康結局案例數[78]。人群歸因分數的計算需要已知暴露水平分布 $P(L)$ 與相對風險 $RR(L)$: $PAF = \int [P(L) \times (RR(L) - 1)] / \int [P(L) \times RR(L)] dL$ 這一方法允許在人群異質性暴露情境下,定量估算若降低或消除噪音暴露可避免的健康案例數[79]。實務中,由於連續積分計算的複雜性,常採用分段離散化方法,將暴露水平分為若干區間,每個區間賦予該段的平均相對風險與暴露人口比例進行求和計算[80]。

殘疾調整生命年(DALYs)作為綜合健康度量指標,在噪音健康影響評估中得到廣泛應用。DALY 整合了早逝(Years of Life Lost, YLLs)與非致死性健康損害(Years Lived with Disability, YLDs)兩個維度: $DALY = YLL + YLD$ 對於致命性健康結局(如心肌梗塞導致的過早死亡),YLL 計算為死亡案例數乘以標準預期壽命損失年數;對於非致命性健康結局(如睡眠干擾、煩擾),YLD 計算為患病案例數乘以該健康狀態的殘疾權重(Disability Weight,範圍 0-1,0 代表完全健康,1 代表死亡)與持續

時間[81]。WHO 在 2011 年的歐洲噪音健康負擔評估中,估算道路交通噪音導致的年度 DALYs 損失包括:缺血性心臟病 61,000 DALYs、認知功能損害(兒童)45,000 DALYs、睡眠障礙 903,000 DALYs 以及煩擾 654,000 DALYs,合計約 170 萬 DALYs[1]。需要指出的是,由於不同健康結局的證據質量與因果確定性存在差異,影響評估報告通常區分「核心結局」(證據充分)與「擴展結局」(證據有限但合理),並在結果解釋時明確不確定性範圍[82]。

經濟影響評估將健康損害轉化為貨幣價值,為成本效益分析(Cost-Benefit Analysis)與政策優先序排定提供關鍵信息。常用的經濟評估方法包括:人力資本法(Human Capital Approach)透過估算因疾病導致的生產力損失(工作日損失、早逝導致的終生收入損失)計算間接經濟成本;疾病成本法(Cost of Illness)匯總直接醫療支出(診斷、治療、藥物、住院等)與間接成本;支付意願法(Willingness to Pay, WTP)或條件價值評估法(Contingent Valuation Method)透過調詢或選擇實驗(Choice Experiment)直接詢問公眾對避免噪音暴露或健康損害的貨幣化支付意願;統計生命價值法(Value of Statistical Life, VSL)用於評估致命性風險的經濟價值[83]。不同方法各有優劣,疾病成本法計算相對直觀但往往低估真實的福利損失,因其未涵蓋疼痛、痛苦與生活質量下降等無形成本;支付意願法能夠捕捉個體的主觀福利變化,但受調查設計、假設市場情境與支付能力的影響,存在較大的估計不確定性[84]。

不動產價值折損(Property Value Depreciation)是噪音經濟影響的另一重要維度,大量的特徵價格法(Hedonic Pricing Method)研究顯示,噪音水平的增加與房地產市場價格的下降存在顯著負相關[85]。薈萃分析結果表明,道路交通噪音每增加 1 dB(A),住宅價格平均下降約 0.5-1.0%,這一效應在高噪音水平區段(>65 dB)更為顯著[86]。以一棟市場價值為 30 萬歐元的住宅為例,若其外牆噪音水平從 55 dB 增加至 65 dB,價值折損可能達到 1.5-3 萬歐元。在人口密集的城市地區,噪音暴露引起的不動產總價值損失可達數十億乃至數百億的量級[87]。這種市場化的價值信號不僅反映了居民對噪音的負面評估,也為城市規劃、交通基礎設施投資的社會成本核算提供了重要參考[88]。



社會影響評估(Social Impact Assessment)關注噪音污染對社區凝聚力、環境正義、生活品質與社會公平等更廣泛社會維度的影響。研究顯示,長期暴露於高噪音環境的社區,居民的社會互動頻率降低,鄰里關係疏離,社區歸屬感減弱[89]。環境正

義視角的分析揭示,噪音暴露在不同社會經濟群體間存在顯著的不平等分布,低收入社區、少數族裔聚居區往往承受更高的噪音負擔,這種不平等暴露模式加劇了既有的健康不平等[90]。噪音地圖與社會經濟數據的疊加分析已成為環境正義研究的重要工具,為針對性的政策干預與資源分配提供了證據基礎[91]。此外,噪音對教育環境的影響亦受到關注,學校周邊的交通噪音與學生學業表現、教師教學效能之間的負面關聯,凸顯了噪音控制在教育公平中的重要性[92]。

影響評估的方法學挑戰與前沿發展是持續關注的議題。因果推斷(Causal Inference)的嚴謹性是影響評估可信度的核心,混淆偏倚(Confounding Bias)的控制、反向因果(Reverse Causality)的排除、暴露誤分類(Exposure Misclassification)的矯正等統計學與流行病學議題需要得到妥善處理[93]。多重暴露的聯合效應評估日益受到重視,噪音與空氣污染往往具有共同來源(交通排放),兩者在健康效應上可能存在獨立作用、協同作用或混淆關係,解析這種複雜關聯需要更精細的研究設計與統計模型[94]。情境特異性(Context-Specificity)的考量亦不容忽視,不同地理區域、文化背景、氣候條件下的人群對噪音的敏感性與應對能力存在差異,直接移植他國的暴露-反應函數可能引入偏倚,本土化的健康影響評估研究具有重要價值[95]。未來影響評估的發展方向包括:整合多組學(Multi-Omics)與生物標誌物數據深化機制理解、利用自然實驗(Natural Experiment)與政策評估設計強化因果證據、發展動態微觀模擬(Dynamic Microsimulation)模型預測長期健康影響、以及將聲景觀品質與主觀福祉納入更全面的影響評估框架[96]。

綜合而言,噪音污染評估從噪音地圖繪製、暴露評估到影響評估形成了一個邏輯嚴密、技術複雜的綜合體系,其核心價值在於將環境物理量(噪音噪音值)轉化為與人類健康、福祉與社會經濟直接相關的決策信息。隨著數據技術、計算能力與跨學科整合的進步,噪音評估正從靜態的描述性工具演進為動態的預測性與情境模擬平台,為循證決策、適應性管理與永續城市發展提供越來越強有力的支撐。輪胎噪音作為交通噪音的主體成分,其評估與管理需要這一完整體系的支持,才能實現從問題識別到干預效果評估的閉環管理。

10.3 噪音控制策略 (Noise Control Strategies)

噪音控制策略的制定與實施是將噪音評估結果轉化為環境改善行動的關鍵環節,其基本框架遵循「源頭控制-傳播路徑干預-受體保護」的三級預防邏輯,並強調多層次、多主體與多手段的綜合治理模式[97]。



在城市交通噪音管理情境下,這一框架具體表現為:源頭控制針對車輛噪音排放(包括輪胎噪音、動力系統噪音)與路面聲學特性的優化;傳播路徑干預包括聲屏障建設、城市形態設計與綠化緩衝的應用;受體保護則涵蓋建築隔音改造、土地利用規劃與暴露人群的行為引導[98]。有效的噪音控制策略需要在技術可行性、經濟合理性、社會可接受性以及環境協同效益等多個維度達到平衡,並透過法規標準、經濟激勵、信息披露與公眾參與等政策工具組合推動實施[99]。

源頭控制(Source Control)是最具成本效益的噪音減緩策略,因其在噪音產生環節直接降低排放,避免了後續傳播與受體端的昂貴補救措施[100]。針對輪胎噪音的源頭控制,前文第九章已詳細論述了輪胎設計優化(胎面花紋、結構、材料)與路面降噪技術(多孔瀝青、低噪音路面)等技術手段,此處重點討論其在城市噪音管理策略中的系統性應用。歐盟輪胎標籤法規(EU Tyre Labelling Regulation)與聯合國ECE R117 法規透過設定輪胎滾動噪音限值並強制公開噪音性能信息,推動了低噪音輪胎技術的市場普及[101]。研究顯示,若所有新輪胎均達到當前法規的最低限值(通常較現行平均水平低 2-3 dB),城市交通噪音水平預計可降低 1-2 dB(A),惠及數百萬暴露人口[102]。低噪音路面的推廣應用在荷蘭、瑞典等國家取得了顯著成效,雙層多孔瀝青(DPAC)可實現 3-8 dB(A)的降噪效果,相當於交通流量減少 50-75%的降噪效益[103]。然而,路面降噪性能的長期維持依賴於有效的清潔與養護,孔隙堵塞是限制其使用壽命的主要因素,因此需要將路面聲學性能納入道路資產管理體系的定期監測與維護計劃[104]。

車輛技術的演進亦對噪音控制策略產生深遠影響。電動車(Electric Vehicle, EV)與混合動力車在低速行駛時幾乎無動力系統噪音,使得輪胎噪音成為絕對主導聲源,這一特性既是挑戰也是機遇[105]。從挑戰角度,傳統基於



發動機噪音的降噪策略在電動車時代效果大幅降低,必須將重點轉向輪胎與路面的優化;從機遇角度,電動車提供了實現城市「靜音交通」願景的技術基礎,若結合低噪音輪胎與靜音路面,城市交通噪音水平有望實現革命性降低[106]。為平衡電動車靜音特性帶來的行人安全隱患,多國法規要求電動車在低速時發出人工警示音(Acoustic Vehicle Alerting System, AVAS),這又引入了新的聲環境設計議題,如何在保障安全與控制噪音之間找到最優平衡,成為當前研究熱點[107]。自動駕駛技術的發展可能透過優化駕駛行為(平順加減速、避免急剎車)、車隊協同控制(減

少走走停停模式)以及改善交通流效率(減少擁堵)等途徑間接降低交通噪音,但其長期影響尚需更多實證研究[108]。

傳播路徑干預(Path Intervention)是在噪音源與受體之間插入障礙或吸收介質,透過物理手段衰減聲能傳播[109]。聲屏障(Noise Barrier)是最常見的路徑控制措施,廣泛應用於高速公路與城市快速路沿線的噪音敏感區保護。有效的聲屏障設計需要考慮高度(通常 4-6 米)、長度(覆蓋受保護區段)、聲學性能(吸音與隔音材料選擇)、結構安全與景觀美學等多重因素[110]。在理想條件下,聲屏障可為屏障後方的近距離受體提供 5-15 dB(A)的降噪效果,但其有效範圍有限,對高層建築上層樓板的保護效果顯著弱化[111]。聲屏障的成本較高(通常每延米數百至上千歐元)且存在視覺阻隔、生態廊道切割等負面影響,因此其應用需要在成本效益分析框架下審慎評估[112]。近年來,創新型聲屏障如聲學超材料(Acoustic Metamaterials)屏障、綠色植被牆(Green Wall)結合吸音結構、以及光伏聲屏障(Solar Noise Barrier)等多功能設計,為傳統聲屏障技術注入了新的活力[113]。

城市形態與建築布局規劃是路徑干預的另一重要維度,透過合理的空間配置降低噪音傳播效率並增加自然衰減[114]。街道峽谷(Street Canyon)效應在密集城區顯著影響噪音分布,建築物的多重反射可使街道內噪音水平較開闊地帶高出 3-5 dB[115]。採用非平行建築布局、錯落高度設計、設置聲影區(Acoustic



Shadow Zone)等策略可有效改善局部聲環境[116]。綠化緩衝帶(Green Buffer Zone)雖然降噪效果有限(寬度 100 米的密植林帶僅提供 3-5 dB 衰減),但其在改善視覺景觀、提供生態服務與心理緩衝方面的綜合價值使之成為城市噪音管理的輔助手段[117]。城市規劃層面的噪音分區(Noise Zoning)將不同噪音敏感度的土地利用類型(如住宅、學校、醫院 vs. 工業、商業)進行空間分離,透過源頭避讓實現預防性保護[118]。

受體保護(Receptor Protection)在源頭與路徑控制措施無法充分降低暴露時提供最後一道防線,其核心是提升建築物的隔音性能,確保室內環境達到健康標準[119]。建築外殼隔音改造(Façade Insulation Retrofit)包括更換高性能隔音窗(雙層或三層玻璃、加大空氣層厚度)、外牆加裝隔音層、改善通風口與縫隙密封等措施[120]。在高噪音暴露區(如機場周邊、繁忙道路沿線),政府資助的建築隔音改造計劃已在多國實施,為居民提供經濟補償或技術支持[121]。然而,被動隔音措施存在固有矛

盾:關閉窗戶可有效隔音但影響自然通風與心理舒適感,特別是在無空調設備的家庭,夏季開窗需求與隔音需求存在衝突[122]。主動通風與隔音整合系統(如帶噪音衰減功能的新風系統)提供了一種技術解決方案,但其高昂成本限制了大規模推廣[123]。

交通需求管理(Transportation Demand Management, TDM)與交通流優化是從系統層面降低噪音的策略選項[124]。減少交通總量、優化交通時空分布、鼓勵公共交通與非機動出行,不僅直接降低噪音排放總量,更帶來空氣質量改善、溫室氣體減排與公共健康協同效益[125]。低速限制(Speed Limit Reduction)是成本極低但效果顯著的噪音控制措施,車速從 50 km/h 降低至 30 km/h 可使輪胎噪音降低約 3-4 dB(A),相當於交通流量減半的效果[126]。歐洲多國在住宅區推行的「30 公里區」(30 km/h Zone)政策,不僅有效改善了聲環境,也顯著提升了交通安全與社區宜居性[127]。貨運交通的時間管理(如夜間貨運限制、引導至專用通道)、老舊高噪音車輛的淘汰激勵、以及聲環境質量納入交通影響評估的強制要求,均是交通管理工具箱中的重要選項[128]。

政策工具與激勵機制的創新是推動噪音控制策略實施的關鍵驅動力[129]。除了傳統的命令控制型法規(如噪音限值標準),市場化與信息化工具日益受到重視。噪音收費(Noise Charge)與差異化交通收費(Congestion Pricing with Noise Differentiation)將噪音外部性內部化為經濟成本,引導行為改變[130]。採購標準中的噪音權重提升,如政府與公共交通公司優先採購低噪音輪胎與低噪音車輛,發揮了市場引領作用[131]。噪音地圖的公開與社區參與式噪音監測提升了公眾的環境意識與監督能力,形成自下而上的治理壓力[132]。跨部門協調機制(如交通、環境、城市規劃、公共衛生部門的聯席會議)打破了部門割裂,推動噪音控制從單一領域議題上升為綜合性城市治理議題[133]。

噪音控制策略的成效評估與適應性管理是確保政策目標達成的必要環節[134]。在實施降噪措施後,系統性的事後評估(Ex-Post Evaluation)應涵蓋噪音水平的實測變化、暴露人口的減少、健康影響的改善以及成本效益比的核算[135]。長期監測數據的積累支持趨勢分析與預警,為政策調整提供反饋信息。適應性管理(Adaptive Management)框架強調在不確定性環境下透過「規劃-實施-監測-評估-調整」的迭代循環持續優化策略[136]。氣候變化對噪音傳播特性的影響(如氣溫、風速、降水模式變化)、城市化進程對交通需求的持續推動、以及新興技術(電動



車、自動駕駛、智慧交通系統)帶來的不確定性,均要求噪音控制策略具備前瞻性與靈活性[137]。

綜合而言,噪音控制策略是一個多層次、多領域與多工具整合的複雜系統工程,沒有單一的「銀彈」解決方案,而需要根據具體情境的噪音特徵、受影響人群、經濟社會條件以及其他環境目標進行量體裁衣的策略組合設計[138]。輪胎噪音控制作為城市交通噪音管理的核心環節,其策略不僅涉及輪胎與路面技術本身,更需要與車輛管理、交通規劃、城市設計以及公共健康政策形成協同,才能實現環境質量、經濟發展與社會福祉的多贏局面。

10.4 法規與政策 (Regulations and Policies)

法規與政策框架為噪音控制提供了制度基礎、執行機制與問責體系,是將科學證據與技術方案轉化為社會行動的關鍵橋樑[139]。國際層面,世界衛生組織(WHO)、國際標準化組織(ISO)、經濟合作暨發展組織(OECD)等機構發布的指南與標準為各國政策制定提供了參考框架;區



域層面,歐盟環境噪音指令(EU Environmental Noise Directive 2002/49/EC)建立了成員國間協調一致的評估與管理機制;國家與地方層面,各國根據自身國情制定了噪音排放標準、環境質量標準、規劃控制要求以及執法程序[140]。輪胎噪音相關法規涵蓋了產品排放限值(輪胎滾動噪音型式認證)、環境質量目標(交通噪音暴露限值)、規劃審批要求(環境影響評估中的噪音章節)以及信息披露義務(輪胎標籤法規)等多個層面,形成了從產品設計到使用環境的全鏈條管理[141]。

世界衛生組織在環境噪音管理領域扮演著全球權威的技術指導角色。WHO 於 1999 年首次發布《社區噪音指南》(Guidelines for Community Noise),提出了基於健康保護的噪音暴露建議值,為各國標準制定提供了科學基準[142]。2009 年,WHO 歐洲區域辦公室發布《歐洲夜間噪音指南》(Night Noise Guidelines for Europe),針對睡眠干擾提出了夜間室外噪音水平 L_{night} 應低於 40 dB(A)的中期目標,長期目標為 30 dB(A)以下[143]。2018 年,WHO 發布了更新的《歐洲環境噪音指南》(Environmental Noise Guidelines for the European Region),這是迄今為止最為全面與嚴格的環境噪音健康保護指南[144]。該指南基於系統性證據回顧與健康風險評估,針對道路交通噪音提出了強烈建議: L_{den} 應低於 53 dB(A), L_{night} 應低於 45 dB(A),以保護公眾免受心血管疾病與睡眠干擾的不良影響[145]。這些建議值顯著

嚴格於多數國家現行標準,引發了關於可行性、成本與實施路徑的廣泛討論,但其基於健康優先原則的立場為政策制定者提供了明確的長期目標[146]。

歐盟環境噪音指令(Directive 2002/49/EC)是國際上最具影響力的區域性噪音管理立法,其核心目標是建立評估與管理環境噪音的共同方法,為公眾提供環境噪音信息,並透過行動計劃防止與降低有害暴露[147]。該指令要求成員國對人口超過 10 萬的城市聚集區、年平均日交通量超過 300 萬輛次的主要道路、年通行量超過 3 萬次的主要鐵路以及年起降量超過 5 萬次的主要機場周邊區域,每五年繪製一次噪音地圖,並制定噪音行動計劃(Noise Action Plan)[148]。指令採用的評估指標為 L_{den} 與 L_{night} ,並設定了參考暴露水平(非強制性限值): L_{den} 55-75 dB(A)分段與 L_{night} 50-70 dB(A)分段,用於識別需要重點關注的區域[149]。截至 2020 年,歐盟 27 國已提交了數千份噪音地圖與行動計劃,累計覆蓋超過 4 億人口,形成了歐洲層面的噪音暴露數據庫,為跨國比較與政策評估提供了基礎[150]。

歐盟輪胎標籤法規(EU Tyre Labelling Regulation 1222/2009 及其修訂版 2020/740)是針對輪胎噪音源頭控制的創新性市場化政策工具[151]。該法規要求所有在歐盟市場銷售的輪胎必須標示滾動阻力(燃油效率)、濕地抓地力與外部滾動噪音三項性能指標,噪音指標以分貝值表示,並透過 A、



B、C 三級等級(修訂後為 A-E 五級)進行可視化展示[152]。標籤制度的目標是增加市場透明度,引導消費者與採購者選擇低噪音輪胎,並激勵製造商持續改進產品性能[153]。配合標籤法規,歐盟還制定了強制性的輪胎噪音限值標準(納入聯合國 ECE R117 法規體系),並透過階段性收緊限值推動技術進步,2016 年的第二階段限值較第一階段降低了 1-2 dB,預計未來還將繼續收緊[154]。評估研究顯示,標籤法規實施後,市場上低噪音輪胎的份額顯著提升,但消費者對噪音標籤的認知度與決策影響力仍低於燃油效率標籤,提示需要更強的公眾教育與意識提升工作[155]。

聯合國歐洲經濟委員會(UNECE)制定的 ECE R117 法規《關於輪胎滾動噪音、濕地抓地力與滾動阻力的統一規定》(Regulation No. 117: Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions, wet grip performance and rolling resistance)是國際上最廣泛採用的輪胎噪音型式認證標準[156]。該法規適用於乘用車(C1 類)、輕型商用車(C2 類)與貨車/客車(C3 類)輪胎,規定了按照 ISO 13325 標準進行的滑行法(Coast-By Method)測試程序與限值要求[157]。限值根據輪胎類別、輪輞直徑與標稱斷面寬度進行細分,例如 C1 類寬度

≤185mm 的輪胎限值為 68 dB(A),185-245mm 為 70 dB(A),>245mm 為 71 dB(A)[158]。ECE R117 不僅在歐盟強制實施,也被日本、韓國、澳大利亞等多國採納,並透過 WP.29(世界車輛法規協調論壇)機制推動全球協調[159]。美國雖未直接採用 ECE R117,但其國家公路交通安全管理局(NHTSA)正在制定類似的輪胎噪音標準,預計將進一步推動全球標準的趨同[160]。

美國聯邦公路管理局(Federal Highway Administration, FHWA)頒布的 23 CFR Part 772 《公路交通與施工噪音緩減程序》(Procedures for Abatement of Highway Traffic and Construction Noise)是美國聯邦層面公路噪音管理的核心法規[161]。該法規規定,所有使用聯邦資金的公路新建或重大改建項目必須進行噪音影響評估,當預測噪音水平超過噪



音緩減標準(Noise Abatement Criteria, NAC)或較現有水平顯著增加(通常定義為 10-15 dB)時,需要評估並實施技術可行與經濟合理的降噪措施[162]。NAC 依據土地利用類型設定:A 類(寺廟、公園等寧靜區)為 57 dB(A) Leq(h),B 類(住宅)為 67 dB(A),C 類(商業區)為 72 dB(A)[163]。降噪措施的「合理性」評估綜合考慮降噪效果(通常要求至少 5 dB 降噪)、成本效益(單位受益居民的降噪成本)以及受益者意見(社區投票)[164]。FHWA 於 2022 年啟動了對該法規的全面修訂提案,計劃引入更嚴格的標準、更新的評估方法以及對累積影響與環境正義的更強關注[165]。除上述專門性噪音法規外,環境影響評估(Environmental Impact Assessment, EIA)制度在噪音管理中發揮著重要的預防性功能[166]。多數國家的 EIA 法規要求,交通基礎設施、大型開發項目在審批前必須進行噪音影響預測,評估對周邊敏感受體的影響,並提出可行的緩減措施[167]。噪音評估是 EIA 的常規內容,需要遵循特定的技術導則,包括評估範圍界定、基線噪音測量、情境預測建模、顯著性判據、緩減措施設計以及監測計劃制定等標準化步驟[168]。在一些司法管轄區,EIA 中的噪音評估結論具有否決項目或要求修改設計的法律約束力,成為公眾參與與司法審查的重要依據[169]。

地方層面的噪音條例(Noise Ordinance)與分區規劃(Zoning Regulation)是噪音管理最直接的執法工具[170]。這些地方性法規通常設定不同土地利用分區、不同時段(日間/夜間)的環境噪音限值,並賦予執法部門(如環保局、警察)測量、處罰與責令整改的權力[171]。例如,許多歐洲城市的夜間住宅區噪音限值為 30-40 dB(A),違反者可能面臨罰款甚至刑事責任[172]。地方法規的優勢在於能夠因地制宜,針對本

地噪音問題特徵與社區需求制定更具針對性的管理措施,但其挑戰在於執法資源有限、測量標準化程度不足以及跨區域協調困難[173]。

國際標準化組織(ISO)制定的系列噪音測量與評估標準為法規實施提供了技術規範基礎[174]。ISO 13325《輪胎-滑行法測量輪胎路面聲發射》規定了輪胎噪音型式認證測試的標準方法,被 ECE R117 等法規直接引用[175]。ISO 1996 系列標準《聲學-環境噪音的描述、測量與評估》涵蓋了環境噪音測量的通用要求、噪音源確定方法以及對噪音反應的評估指南,是環境監測與執法的技術依據[176]。ISO 11819 系列標準《路面對交通噪音影響的測量》包括統計滑行法(Statistical Pass-By, SPB)與近場法(Close-Proximity, CPX),為路面聲學性能評估與質量控制提供了標準化工具[177]。ISO 12913 系列標準《聲景觀》則代表了噪音評估範式的前沿轉變,從單純的物理噪音值測量轉向整合聲環境、人的感知與情境語境的綜合評估,為未來政策制定提供了新的視角[178]。

法規與政策的有效性依賴於執法能力、合規監測與問責機制[179]。許多發展中國家雖然制定了噪音標準,但因執法資源不足、監測網絡缺失、罰則威懾力弱以及跨部門協調困難,導致「紙面法規」現象普遍[180]。強化執法的關鍵措施包括:建立常態化的噪音監測網絡並公開數據、配備標準化的測量設備與訓練有素的執法人員、設計合理的罰則體系(罰款水平足以改變



行為)、建立投訴受理與響應機制、以及透過定期評估與報告制度確保法規目標的達成[181]。公眾參與和訴訟權利的保障亦是有效執法的重要補充,環境公益訴訟與集體訴訟在一些國家已成為推動噪音問題解決的重要途徑[182]。

展望未來,噪音法規與政策的發展趨勢包括:標準的持續收緊以追隨 WHO 健康建議值;從單一源頭管制向全生命週期管理(包括使用階段性能衰減控制)的轉變;經濟激勵工具(如噪音收費、差異化稅收)的更廣泛應用;信息披露與透明度要求的強化;環境正義與公平性考量的制度化;以及聲景觀品質目標的政策整合[183]。電動車與自動駕駛技術的興起對現有的法規框架提出了新的挑戰,如何在傳統車輛噪音大幅降低的背景下重新定義噪音問題、如何管理人工警示音的聲學特性與使用情境、如何利用車聯網技術實現動態噪音管理,均是未來法規創新的重要議題[184]。氣候變化緩減與噪音控制的協同政策設計,亦是實現永續交通系統的關鍵,低碳與低噪音目標在多數情境下具有協同效益(如公共交通優先、慢行交通推廣),但在某

些領域可能存在取捨(如電動車靜音特性的安全與環境雙重影響),需要綜合權衡[185]。

綜合而言,法規與政策是噪音控制從技術可能性走向社會實踐的制度保障,其設計需要平衡健康保護的科學依據、技術可行性的工程約束、經濟成本的社會承受力以及不同利益相關者的訴求[186]。輪胎噪音法規作為交通噪音管理法規體系的重要組成部分,其有效性不僅取決於限值的嚴格性,更依賴於與車輛管理、道路建設、城市規劃以及公共健康政策的系統性整合,形成多層次、多工具的綜合治理格局,才能真正實現保護公眾健康、改善環境質量與促進永續發展的政策目標。

10.5 經濟與社會成本 (Economic and Social Costs)

噪音污染的經濟與社會成本量化是將環境外部性內部化、為政策決策提供成本效益分析依據的關鍵環節,其核心挑戰在於如何將健康損害、生活質量下降、不動產價值折損以及生產力損失等無形影響轉化為可比較的貨幣單位[187]。儘管方法學上存在爭議與不確定性,但現有的經濟評估研究一致顯示,交通噪音造成的社會總成本極為可觀,在發達經濟體可達到國內生產總值(GDP)的 0.2-2%之間,每年數百億至數千億歐元或美元的量級[188]。這一巨大的隱性成本長期以來被低估或忽視,導致在交通基礎設施投資決策、車輛與輪胎技術標準制定以及城市規劃中未能充分內化噪音外部性,形成資源配置的次優均衡[189]。



健康損害的經濟成本是噪音社會成本的核心組成部分。從直接醫療支出角度,噪音相關的心血管疾病、睡眠障礙、精神健康問題等產生的診斷、治療、藥物、住院與康復費用構成了可測量的經濟負擔[190]。歐洲環境署(EEA)基於疾病負擔評估估算,道路交通噪音每年在歐盟造成的健康相關直接與間接經濟成本約為 400 億歐元,其中心血管疾病佔據最大份額[191]。更為全面的評估採用「統計生命價值」(Value of Statistical Life, VSL)方法,將早逝導致的生命損失貨幣化。VSL 反映的是社會整體對死亡風險降低的支付意願,OECD 國家的 VSL 估計值通常在 300-500 萬美元/生命之間[192]。考慮到噪音暴露與心血管死亡風險的關聯,這一方法下的生命損失成本可能遠超直接醫療支出。對於非致命性健康影響,殘疾調整生命年(DALY)或質量調整生命年(QALY)的貨幣化估值被廣泛應用,通常採用每 DALY/QALY 3-5 萬歐元的參考值(約等於人均 GDP)[193]。

生產力損失(Productivity Loss)是噪音健康影響的重要經濟後果。因噪音誘發的疾病導致的病假、就醫時間、工作能力下降以及早退休等,直接轉化為勞動力市場的產出損失[194]。睡眠干擾造成的日間疲勞與認知功能下降亦顯著影響工作效率,研究顯示長期睡眠質量差的員工生產力可能降低 5-15%[195]。在知識經濟時代,認知密集型工作對睡眠與注意力的依賴更強,噪音的間接經濟影響可能被低估[196]。兒童認知發展受損的長期經濟後果尤為深遠,噪音暴露影響的教育成就與人力資本積累,將在整個生命週程中產生收入差距,形成世代間的不平等傳遞[197]。人力資本法(Human Capital Approach)透過估算疾病導致的終生收入損失現值,為這類長期影響提供了評估框架[198]。

不動產價值折損(Property Value Depreciation)是市場化顯現的噪音外部成本。特徵價格法(Hedonic Pricing Method)研究表明,噪音每增加 1 dB(A),住宅價格平均下降 0.5-1.0%,在高噪音區段(>65 dB)這一折損比例更高[199]。多國的研究結果呈現高度一致性:荷蘭的研究



顯示 10 dB 噪音增加導致房價下降 9%;美國的研究發現機場噪音每增加 1 dB 房價下降 0.5-0.6%;韓國首爾的研究報告交通噪音導致的地價損失達數十億美元[200]。這種價值折損不僅代表個別業主的財富損失,更反映了社會整體對噪音環境質量的貨幣化評估[201]。在城市尺度上,交通噪音暴露導致的不動產總價值損失可達數百億美元,這一隱性成本在基礎設施投資的成本效益分析中往往被遺漏[202]。值得注意的是,房價折損具有資本化(Capitalization)特性,即未來長期噪音暴露的預期成本在購房時點一次性反映在價格中,因此其經濟意義不能與年度流量成本簡單疊加[203]。

噪音防護與緩減措施的實施成本亦是經濟評估的必要考量。聲屏障建設、建築隔音改造、低噪音路面鋪設、低噪音輪胎研發等降噪技術的投資與維護成本構成了噪音管理的直接經濟投入[204]。聲屏障的單位成本通常在每延米 500-2000 歐元之間,一條 10 公里的高速公路段的聲屏障總投資可能達到數千萬歐元[205]。建築外牆隔音改造的單戶成本約為 5000-15000 歐元,大規模改造計劃需要巨額財政支出[206]。低噪音路面的初期成本通常較傳統密實瀝青高 10-30%,但其生命週期內的降噪效益可能超過增量成本[207]。成本效益分析(Cost-Benefit Analysis, CBA)將降噪措施的實施成本與避免的健康、不動產與生產力損失進行比較,評估投資的經濟合理性[208]。多數研究顯示,針對高暴露人群($L_{den}>65$ dB)的降噪措施通

常具有正的淨效益,效益成本比(Benefit-Cost Ratio)可達 2-5:1,證明降噪投資的經濟可行性[209]。

社會成本的非貨幣化維度同樣重要,儘管難以精確量化,但其對社會福祉的影響不容忽視[210]。噪音暴露引起的煩擾、生活質量下降、社區凝聚力減弱、環境不平等加劇等社會影響,具有顯著的公共政策相關性[211]。環境正義(Environmental Justice)視角的分析揭示,噪音暴露在社會經濟階層間存在系統性不平等分布,低收入社區、少數族裔聚居區、租賃住房集中地往往承受更高的噪音負擔,這種不平等暴露模式加劇了既有的健康不平等與社會排斥[212]。在英國、美國與多個歐洲國家的研究中,噪音暴露的社會梯度(Social Gradient)被一致證實:最低收入五分位人群的平均噪音暴露水平較最高收入五分位高出 3-5 dB,高噪音區(>65 dB)的居民中低收入人群比例顯著偏高[213]。這種環境不公正不僅是倫理關切,更具有經濟後果,因其可能透過健康不平等的放大效應增加社會總成本,並降低人力資本的整體質量[214]。

噪音對教育環境的社會成本亦受到特別關注。學校周邊的交通噪音與學生學業成績、教師教學效能之間的負面關聯,轉化為教育質量的系統性下降[215]。

RANCH 研究顯示,學校噪音每增加 5 dB,學生的閱讀年齡發展延遲約 2 個月,這種認知發展障礙在整個教育階段累積,可能影響最終的教育成就與職業前景[216]。

在社會流動性(Social Mobility)的視角下,噪音對弱勢社區兒童教育的不利影響,可能固化貧困的代際傳遞,構成社會公平的長期挑戰[217]。一些研究嘗試量化教育成就下降的終生收入影響,發現若能改善學校聲環境,其長期經濟回報(透過人力資本提升)可能遠超短期降噪投資[218]。

社區生活質量(Quality of Life)與主觀福祉(Subjective Well-Being)的下降是噪音社會成本的核心但難以貨幣化的維度。長期暴露於高噪音環境的居民報告更低的生活滿意度、更高的壓力水平以及更弱的社區歸屬感[219]。噪音干擾戶外活動(如庭院休憩、開窗通風、社交對話)降低了住宅環境的使用價值,迫使居民採取適應行為(關閉窗戶、避免戶外停留),這種行為為成本雖難以量化但真實存在[220]。生活質量影響的評估方法包括:主觀福祉問卷(如生活滿意度評分)與噪音暴露的關聯分析;時間預算研究(Time-Use Study)評估噪音如何改變居民的日常活動模式;以及條件價值評估法(Contingent Valuation Method)詢問居民對改善聲環境的支付意



願[221]。這些方法的結果顯示,公眾對寧靜環境的主觀評估是可觀的,Lden 從 65 dB 降低至 55 dB 的福祉增益,其貨幣化價值可能達到每戶每年數百至上千歐元 [222]。

經濟評估方法學的挑戰與爭議是理解噪音成本估計不確定性的關鍵。不同評估方法(疾病成本法、人力資本法、支付意願法、統計生命價值法)基於不同的理論假設與數據來源,產生的估計值可能相差數倍 [223]。貼現率 (Discount Rate)的選擇對長期健康影響的現值計算影響巨大,3%與 7%的貼現率差異可導致 30 年期效益現值相



差一倍以上[224]。暴露-反應函數的不確定性(置信區間)在人群歸因負擔計算中被放大,敏感性分析顯示總成本估計的合理範圍可能跨越一個數量級[225]。公平性權重(Equity Weighting)的引入,即對弱勢人群的健康影響賦予更高權重以反映分配正義關切,會顯著改變成本效益分析的結論[226]。方法學透明性與不確定性的明確報告是確保經濟評估可信度與政策適用性的基本要求[227]。

未來經濟評估的發展方向包括:整合多重環境暴露(噪音、空氣污染、熱島效應)的協同與交互作用評估;發展空間明示的成本效益分析模型,識別降噪投資的最優空間配置;將聲景觀品質與主觀福祉更系統地納入評估框架;以及加強發展中國家情境下的本土化評估研究,因現有證據與經濟參數主要來自發達國家[228]。氣候變化緩減政策的協同效益評估亦是前沿議題,低碳交通系統(公共交通、電動車、活力街區)通常同時帶來噪音降低,這種協同效益在政策評估中的明確量化,有助於增強氣候政策的政治支持與實施動力[229]。

綜合而言,噪音污染的經濟與社會成本遠超過往的公眾認知與政策重視程度,其規模與嚴重性使之成為必須納入永續發展議程的重大議題[230]。輪胎噪音作為城市交通噪音的核心貢獻者,其控制不僅具有健康保護價值,更蘊含巨大的經濟效益潛力。將噪音外部成本內部化到交通系統規劃、車輛與輪胎技術投資以及城市發展決策中,是實現環境質量、經濟效率與社會公平多重目標協同的關鍵路徑。

10.6 未來發展趨勢 (Future Development Trends)

輪胎噪音與環境影響領域正處於多重技術變革、政策演進與社會意識轉型交匯的關鍵時期,未來發展趨勢將深刻重塑城市聲環境的特徵、管理模式與政策優先序 [231]。電動車與自動駕駛技術的加速普及、智慧城市與物聯網基礎設施的部署、聲景觀範式的興起、以及氣候變化與永續發展議程的主流化,共同構成了未來噪

音管理的新興圖景[232]。這些趨勢既帶來了前所未有的機遇,也提出了嶄新的挑戰,需要學術界、產業界、政策制定者與公民社會的協同創新與前瞻性應對[233]。電動車(Electric Vehicle, EV)革命對城市交通噪音景觀的影響是最具確定性與變革性的趨勢之一。純電動車在低速行駛(通常 $<30\text{ km/h}$)時幾乎無動力系統噪音,使得輪胎噪音成為絕對主導甚至唯一顯著的聲源[234]。隨著電動車市場滲透率的快速提升(多國設定了 2030-2040 年間停售燃油車的目標),城市交通噪音的總體水平預計將顯著下降,特別是在低速城市道路與頻繁走停的擁堵情境中,降噪效益可達 $3\text{-}5\text{ dB(A)}$ [235]。然而,這種「靜音革命」並非自動實現,而是高度依賴於輪胎與路面技術的同步優化。若電動車僅替代了動力系統噪音而輪胎噪音未得到有效控制,高速道路($>50\text{ km/h}$)的噪音水平改善將十分有限[236]。因此,電動車時代對輪胎噪音控制技術的需求不是降低而是提升,低噪音輪胎與低噪音路面的研發、標準化與市場推廣成為實現電動交通環境效益的關鍵環節[237]。



電動車的靜音特性亦引發了行人與騎行者安全的關切,特別是視障人士依賴聲音線索判斷車輛接近的能力顯著削弱[238]。為此,多國法規強制電動車在低速時啟動聲學車輛警示系統(Acoustic Vehicle Alerting System, AVAS),發出人工合成的警示音[239]。AVAS 的聲學設計面臨複雜的多目標權衡:既要足夠顯著以確保行人察覺,又要避免成為新的噪音污染源;既要在複雜聲環境中具有可識別性,又要與城市聲景觀和諧融合[240]。當前的 AVAS 標準(如 UN R138 法規)規定了最低噪音值要求(56 dB(A)),但對聲音品質、頻譜組成與時間模式的規範仍較寬鬆,未來標準的演進需要整合聲學、心理聲學、交通安全與聲景觀設計等多學科知識[241]。創新性的 AVAS 設計探索包括:定向聲源技術僅向行人方向發聲、自適應音量調節根據背景噪音動態調整、以及利用音樂化或自然聲元素提升聲學品質[242]。



自動駕駛技術(Autonomous Vehicle, AV)的成熟與普及可能透過多重路徑影響交通噪音。從駕駛行為優化角度,自動駕駛系統的平順加減速、精確速度控制、避免急剎車等特性,可降低加速噪音與輪胎摩擦噪音的瞬態峰值[243]。車隊協同控制

(Platooning)與交通流優化可減少走走停停模式,提升整體交通效率並降低平均噪音水平[244]。然而,自動駕駛對噪音的長期系統性影響存在高度不確定性,取決於多種情境變數:若自動駕駛降低了出行成本並誘發總行駛里程大幅增加,噪音總暴露可能不降反升;若自動駕駛促進了共享出行模式,減少了車輛保有量,則可能帶來顯著降噪效益[245]。情境模擬研究顯示,在「高共享-高電動化」情境下,2050年城市交通噪音可能較當前降低 5-10 dB;而在「低共享-高出行需求」情境下,噪音水平可能僅小幅下降甚至持平[246]。這種情境依賴性凸顯了政策引導的重要性,透過共享出行激勵、擁堵收費、以及結合自動駕駛與公共交通的整合規劃,引導向低噪音情境演化[247]。



智慧城市(Smart City)與物聯網(IoT)技術的發展為噪音管理提供了革命性的數據基礎設施與管理工具[248]。低成本噪音傳感器的大規模部署,形成覆蓋全城的實時噪音監測網絡,實現了從週期性評估到連續動態感知的範式轉變[249]。這些數據可用於:實時噪音地圖的自動更新與公眾發布;噪音熱點的快速識別與預警;降噪措施效果的即時評估;以及噪音投訴的智能派單與閉環管理[250]。人工智能與機器學習技術的應用,使得複雜聲環境的自動分類(如交通噪音、施工噪音、娛樂噪音)、異常事件檢測(如違法鳴笛、非法改裝車輛)以及噪音預測建模成為可能[251]。公民科學(Citizen Science)項目如 NoiseCapture、NoiseTube 等,動員公眾利用智能手機進行眾包噪音測量,形成了規模空前的噪音數據集,為研究與政策提供了寶貴的補充數據源[252]。區塊鏈技術的探索應用於噪音數據的可信存證與環境信用體系,為執法與問責提供了新的技術手段[253]。

聲景觀(Soundscape)範式的興起代表了噪音管理哲學的深刻轉變,從單純的「降低噪音值」轉向「提升聲環境品質」的更全面目標[254]。ISO 12913 系列國際標準的發布,標誌著聲景觀概念從學術探索走向工程實踐與政策應用[255]。聲景觀方法強調,聲環境品質不僅取決於物理噪音值,更取決於聲源構成、音質特徵、視覺與其他感官情境以及個體與文化背景[256]。在城市設計中,聲景觀方法倡導:保護與營造「聲學庇護所」(Acoustic Refuges)如安靜公園;引入「聲學遮蔽」(Acoustic Masking)如水聲掩蔽交通噪音;創造「積極聲景觀」(Positive Soundscape)如鳥鳴、音樂表演空間;以及透過視覺綠化與空間設計改善對聲環境的主觀評估[257]。聲景觀思維在輪胎噪音管理中的應用包括:超越單純的降噪目標,追求音質優化(如

頻譜平坦化、減少尖銳成分);在低噪音輪胎與路面設計中整合音質考量;以及在城市街道設計中平衡交通效率與聲景觀品質[258]。

氣候變化緩減(Climate Change Mitigation)與噪音控制的協同政策設計是未來永續交通規劃的重要趨勢[259]。低碳交通策略如電動車推廣、公共交通優先、步行與騎行友好城市、緊湊型城市開發等,通常同時帶來噪音降低的協同效益[260]。明確量化這些協同效益,有助於增強氣候政策的政治支持與實施動力。然而,也存在潛在的權衡情境:例如,某些生物燃料的生命週期碳排放可能較低,但其燃燒噪音特性可能不如傳統燃料;輕量化材料在降低碳排放中的應用,可能影響車輛與輪胎的噪音特性[261]。系統性的生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)整合碳足跡與噪音足跡,為技術選擇與政策設計提供多目標優化的決策支持[262]。聯合國永續發展目標(UN Sustainable Development Goals, SDGs)框架下,噪音控制與 SDG 3(健康與福祉)、SDG 11(永續城市與社區)、SDG 13(氣候行動)的關聯性日益受到重視,噪音議題從邊緣走向永續發展主流議程[263]。

健康影響評估(Health Impact Assessment, HIA)的前瞻性整合到城市規劃與交通決策流程,是實現預防性噪音管理的制度性創新[264]。傳統的事後環境影響評估往往在規劃方案已基本確定後進行,調整空間有限;前瞻性 HIA 則在規劃早期階段即系統評估不同方案情境的健康影響(包括噪音暴露),為方案優選提供健康證據[265]。一些先進城市已將 HIA 納入重大規劃的法定程序,要求量化評估噪音等環境暴露變化對人群健康的影響,並將健康最大化作為規劃目標之一[266]。這種制度創新需要跨部門協作(公共衛生、城市規劃、交通管理)與能力建設(規劃師的健康素養、公共衛生專業人員的規劃知識)[267]。

環境正義(Environmental Justice)與公平性的制度化是噪音政策未來演進的倫理維度[268]。噪音暴露在社會經濟群體間的不平等分布,已從學術發現走向政策議程。一些司法管轄區開始要求噪音影響評估中明確分析不同社會群體的暴露差異,並在降噪資源分配中優先保護弱勢社區[269]。

「環境正義地圖」(Environmental Justice Mapping)整合噪音暴露與社會經濟脆弱性指標,識別需要優先干預的「熱點社區」[270]。公眾參與的深化,特別是確保邊緣化社區的聲音在決策中被聽見,是實現實質性正義的關鍵[271]。氣候正義(Climate Justice)與噪音正義的交集議題,如綠色



交通基礎設施(如電動公交線路)的空間配置是否加劇或緩解既有不平等,需要在規劃中得到明確關注[272]。

國際合作與全球治理在噪音問題上的強化是應對跨國挑戰的必然趨勢[273]。輪胎與車輛的全球貿易性質,要求噪音標準的國際協調以避免「標準競次」(Race to the Bottom)與貿易摩擦[274]。聯合國世界車輛法規協調論壇(WP.29)在推動全球技術法規統一中發揮著關鍵作用,ECE R117 等法規的全球採納進程仍在持續[275]。WHO 作為全球健康權威,其噪音指南的更新與推廣,為各國設定了健康保護的基準線[276]。南南合作(South-South Cooperation)與發展中國家的能力建設,是實現全球噪音治理公平性的重要議題,技術轉移、知識分享與最佳實踐的傳播,有助於縮小全球噪音治理的鴻溝[277]。

研究前沿與知識缺口的填補是支撐未來政策與技術進步的基礎[278]。優先研究領域包括:電動車與自動駕駛情境下的噪音暴露與健康影響長期隊列研究;聲景觀品質與主觀福祉關係的跨文化比較;噪音與其他環境暴露(空氣污染、熱暴露)的聯合與交互效應;噪音暴露的分子流行病學與精準健康影響評估;低收入與中等收入國家的噪音暴露特徵與健康負擔評估;以及氣候變化對噪音傳播特性與暴露模式的影響[279]。方法學創新如因果推斷的高級統計方法、大數據與人工智能在暴露評估中的應用、以及整合多源數據(衛星遙感、移動通信、社交媒體)的新型暴露模型,將持續推動研究能力的提升[280]。

綜合而言,輪胎噪音與環境影響領域正站在變革的十字路口,技術進步、政策創新與社會意識的匯聚,為實現更安靜、更健康與更公平的城市聲環境提供了前所未有的機遇[281]。然而,這些機遇的實現並非自動,而是需要多方利益相關者的協同努力:產業界需要持續投資於低噪



音技術研發並接受更嚴格的標準;政策制定者需要基於證據制定前瞻性法規並確保有效執法;學術界需要提供高質量的科學證據並開發創新性解決方案;公民社會需要提升環境意識並積極參與治理過程[282]。輪胎噪音控制不僅是技術問題,更是涉及公共健康、環境正義、永續發展的綜合性社會議題,其未來發展將深刻影響億萬人的生活質量與健康福祉,值得全社會的持續關注與行動。

結論 (Conclusions)

本章的綜合分析清楚顯示,輪胎噪音已成為現代城市環境中不可忽視的關鍵污染因子,其影響範圍橫跨公共健康、社會福祉、經濟成本與城市永續發展。相較於

其他交通噪音來源，輪胎噪音具有暴露人口廣、持續性高且在電動車時代更加突出的特性，使其控制成效直接決定未來城市聲環境改善的上限。將輪胎噪音納入環境與健康風險治理的核心議題，已是國際間的共識趨勢。

研究證據顯示，長期交通噪音暴露與心血管疾病、睡眠障礙與兒童認知發展受損之間存在穩健的劑量反應關係，噪音不再僅被視為生活品質問題，而是具有明確疾病負擔的環境健康風險。特別是在夜間噪音暴露情境中，輪胎噪音對睡眠結構與自主神經系統的干擾，可能成為多項慢性疾病的關鍵誘發因子。因此，僅依賴傳統環境噪音限值作為管理目標，已難以充分回應公共健康保護的需求，亟需導入以健康為導向的評估與決策架構。

本章同時指出，現代噪音治理的核心挑戰，在於如何將複雜的噪音評估結果有效轉化為政策行動。噪音地圖、暴露評估與健康影響量化，提供了從環境物理量到健康與經濟損失之間的科學連結，使政策制定得以建立在可量化、可比較的證據基礎之上。然而，評估結果亦受到模型不確定性、暴露誤差與情境差異的影響，凸顯在政策應用時需結合敏感性分析與適應性管理思維。

從治理策略角度觀之，輪胎噪音的有效控制必須採取多層次整合策略。源頭控制透過低噪音輪胎設計與低噪音路面技術，具備最高的成本效益；交通管理與城市規劃可從系統層面降低噪音暴露；而建築隔音與受體保護則作為最後防線。國際經驗顯示，單一措施難以達成顯著且持久的降噪成效，唯有結合技術、法規、市場機制與公眾參與，才能形成有效的治理閉環。

展望未來，輪胎噪音與環境影響的研究與政策將面臨新的轉折點。電動車與自動駕駛技術的普及，將進一步放大輪胎噪音在城市聲環境中的相對重要性；智慧城市與即時噪音監測技術，則為動態暴露評估與精準治理提供了新的工具。未來的噪音治理不僅需追求分貝值的降低，更應朝向改善整體聲景品質與提升居民福祉的方向發展。本章所建立的輪胎噪音與環境影響整合框架，為輪胎工程、公共衛生與城市治理之間的跨領域合作，奠定了堅實而前瞻的理論與實務基礎。



參考文獻

- [1] World Health Organization. (2011). Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe. WHO Regional Office for Europe. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/326424/9789289002295-eng.pdf>
- [2] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Tyre/road noise reference book. INFORMEX.
- [3] Passchier-Vermeer, W., & Passchier, W. F. (2000). Noise exposure and public health. *Environmental Health Perspectives*, 108(Suppl 1), 123-131.
- [4] 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*, L 189/12.
- [5] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European Region. WHO Regional Office for Europe. <https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>
- [6] 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.
- [7] Babisch, W. (2014). Updated exposure-response relationship between road traffic noise and coronary heart diseases: A meta-analysis. *Noise and Health*, 16(68), 1-9.
- [8] Babisch, W. (2008). Road traffic noise and cardiovascular risk. *Noise and Health*, 10(38), 27-33.
- [9] Münzel, T., Schmidt, F. P., Steven, S., Herzog, J., Daiber, A., & Sørensen, M. (2018). Environmental noise and the cardiovascular system. *Journal of the American College of Cardiology*, 71(6), 688-697.
- [10] 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.

- [11] Öhrström, E., Hadzibajramovic, E., Holmes, M., & Svensson, H. (2006). Effects of road traffic noise on sleep: Studies on children and adults. *Journal of Environmental Psychology*, 26(2), 116-126.
- [12] 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.
- [13] Medic, G., Wille, M., & Hemels, M. E. (2017). Short-and long-term health consequences of sleep disruption. *Nature and Science of Sleep*, 9, 151-161.
- [14] World Health Organization. (2009). Night noise guidelines for Europe. WHO Regional Office for Europe.
- [15] Stansfeld, S. A., Berglund, B., Clark, C., Lopez-Barrio, I., Fischer, P., Öhrström, E., ... & Berry, B. F. (2005). Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: A cross-national study. *The Lancet*, 365(9475), 1942-1949.
- [16] Clark, C., & Stansfeld, S. A. (2007). The effect of transportation noise on health and cognitive development: A review of recent evidence. *International Journal of Comparative Psychology*, 20(2-3), 145-158.
- [17] Foraster, M., Esnaola, M., López-Vicente, M., Rivas, I., Álvarez-Pedrerol, M., Persavento, C., ... & Sunyer, J. (2022). Exposure to road traffic noise and cognitive development in schoolchildren in Barcelona, Spain: A population-based cohort study. *PLoS Medicine*, 19(6), e1004001.
- [18] Guski, R., Schreckenberg, D., & Schuemer, R. (2017). WHO environmental noise guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1539.
- [19] Miedema, H. M., & Oudshoorn, C. G. (2001). Annoyance from transportation noise: Relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environmental Health Perspectives*, 109(4), 409-416.
- [20] Fields, J. M., De Jong, R. G., Gjestland, T., Flindell, I. H., Job, R. F. S., Kurra, S., ... & Vallet, M. (2001). Standardized general-purpose noise reaction questions

- for community noise surveys: Research and a recommendation. *Journal of Sound and Vibration*, 242(4), 641-679.
- [21] Babisch, W., Pershagen, G., Selander, J., Houthuijs, D., Breugelmans, O., Cadum, E., ... & Hansell, A. L. (2013). Noise annoyance—A modifier of the association between noise level and cardiovascular health? *Science of the Total Environment*, 452, 50-57.
- [22] Eriksson, C., Bodin, T., & Selander, J. (2017). Burden of disease from road traffic and railway noise—A quantification of healthy life years lost in Sweden. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 43(6), 519-525.
- [23] Charalampous, P., Maas, C. C. H. M., Zevgolis, D., van Kamp, I., Houthuijs, D., Swart, W., ... & Toropov, V. (2024). Disability weights for environmental noise-related health states: Results of a disability weights measurement study in Europe. *BMJ Public Health*, 2(1), e000470.
- [24] Babisch, W. (2002). The noise/stress concept, risk assessment and research needs. *Noise and Health*, 4(16), 1-11.
- [25] Hahad, O., Kröller-Schön, S., Daiber, A., & Münzel, T. (2019). The cardiovascular effects of noise. *Deutsches Ärzteblatt International*, 116(14), 245-250.
- [26] Murphy, E., & King, E. A. (2014). *Environmental noise pollution: Noise mapping, public health, and policy*. Elsevier.
- [27] Kephelopoulos, S., Paviotti, M., & Anfosso-Lédée, F. (2012). *Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU)*. Publications Office of the European Union.
- [28] Van Kempen, E., Casas, M., Pershagen, G., & Foraster, M. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and cardiovascular and metabolic effects: A summary. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2), 379.
- [29] Barrigón Morillas, J. M., Montes González, D., & Rey Gozalo, G. (2016). A review of the measurement procedure of the ISO 1996 standard. Relationship with the European Noise Directive. *Science of the Total Environment*, 565, 595-606.

- [30] Dardanelli, G., Maltese, A., & Vinci, A. (2017). Analysis of technical criticalities for GIS modelling an urban noise map. *South African Journal of Geomatics*, 6(3), 357-370.
- [31] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe—2020. EEA Report No 22/2019. Publications Office of the European Union.
- [32] Licitra, G., Fredianelli, L., Petri, D., & Vigotti, M. A. (2016). Annoyance evaluation due to overall railway noise and vibration in Pisa urban areas. *Science of the Total Environment*, 568, 1315-1325.
- [33] Murphy, E., & Douglas, O. (2018). Population exposure to road traffic noise: Experimental results from varying exposure estimation approaches. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 225-233.
- [34] Kluijver, H., & Stoter, J. (2003). Noise mapping and GIS: Optimising quality and efficiency of noise effect studies. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27(1), 85-102.
- [35] European Commission. (2015). Commission Directive (EU) 2015/996 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC. *Official Journal of the European Union*, L 168/1.
- [36] Salomons, E. M., & Pont, M. B. (2012). Urban traffic noise and the relation to urban density, form, and traffic elasticity. *Landscape and Urban Planning*, 108(1), 2-16.
- [37] Gulliver, J., Morley, D., Vienneau, D., Fabbri, F., Bell, M., Goodman, P., ... & Fecht, D. (2015). Development of an open-source road traffic noise model for exposure assessment. *Environmental Modelling & Software*, 74, 183-193.
- [38] Kaddoura, I., Kröger, L., & Nagel, K. (2017). User-specific and dynamic internalization of road traffic noise exposures. *Networks and Spatial Economics*, 17(1), 153-172.
- [39] Stoter, J., De Kluijver, H., & Kurakula, V. (2008). 3D noise mapping in urban areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(8), 907-924.
- [40] Aumond, P., Can, A., De Coensel, B., Botteldooren, D., Ribeiro, C., & Lavandier, C. (2017). Modeling soundscape pleasantness using perceptual assessments and

- acoustic measurements along paths in urban context. *Acta Acustica United with Acustica*, 103(3), 430-443.
- [41] Kempen, E. V., & Babisch, W. (2012). The quantitative relationship between road traffic noise and hypertension: A meta-analysis. *Journal of Hypertension*, 30(6), 1075-1086.
- [42] de Kluijver, H., & Stoter, J. (2015). Noise mapping: Guidance on identifying noise hotspots and priority areas for action. European Environment Agency Technical Report.
- [43] Garau, C., & Pavan, V. M. (2018). Evaluating urban quality: Indicators and assessment tools for smart sustainable cities. *Sustainability*, 10(3), 575.
- [44] 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.
- [45] Wei, W., Van Renterghem, T., De Coensel, B., & Botteldooren, D. (2016). Dynamic noise mapping: A map-based interpolation between noise measurements with high temporal resolution. *Applied Acoustics*, 101, 127-140.
- [46] Kluijver, H., & Stoter, J. (2006). 3D noise mapping in the Netherlands. In *Innovations in 3D Geo Information Systems* (pp. 801-809). Springer.
- [47] 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.
- [48] Aumond, P., Can, A., Rey Gozalo, G., Fortin, N., & Suárez, E. (2020). Kriging-based spatial interpolation from measurements for sound level mapping in urban areas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 148(5), 2836-2846.
- [49] Özkurt, N., Sari, D., Akdag, A., Kutukoglu, M., & Gurarslan, A. (2014). Modeling of noise pollution and estimated human exposure around İstanbul Atatürk Airport in Turkey. *Science of the Total Environment*, 482, 486-492.
- [50] Seto, E., Holt, A., Rivard, T., & Bhatia, R. (2007). Spatial distribution of traffic induced noise exposures in a US city: An analytic tool for assessing the health

- impacts of urban planning decisions. *International Journal of Health Geographics*, 6(1), 24.
- [51] National Research Council. (1991). *Environmental epidemiology, Volume 1: Public health and hazardous wastes*. National Academy Press.
- [52] Ragetti, M. S., Goudreau, S., Plante, C., Fournier, M., Hatzopoulou, M., Perron, S., & Smargiassi, A. (2016). Statistical modeling of the spatial variability of environmental noise levels in Montreal, Canada, using noise measurements and land use characteristics. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 26(6), 597-605.
- [53] Brink, M., Schäffer, B., Vienneau, D., Foraster, M., Pieren, R., Eze, I. C., ... & Röösli, M. (2019). A survey on exposure-response relationships for road, rail, and aircraft noise annoyance: Differences between continuous and intermittent noise. *Environment International*, 125, 277-290.
- [54] Schweizer, C., Edwards, R. D., Bayer-Oglesby, L., Gauderman, W. J., Ilacqua, V., Juhani Jantunen, M., ... & Künzli, N. (2007). Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 17(2), 170-181.
- [55] Vienneau, D., Schindler, C., Perez, L., Probst-Hensch, N., & Röösli, M. (2015). The relationship between transportation noise exposure and ischemic heart disease: A meta-analysis. *Environmental Research*, 138, 372-380.
- [56] European Parliament and Council. (2002). Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise. *Official Journal of the European Communities*, L189, 12-25.
- [57] World Health Organization. (2018). *Environmental noise guidelines for the European Region*. WHO Regional Office for Europe.
- [58] Öhrström, E. (2004). Longitudinal surveys on effects of changes in road traffic noise—annoyance, activity disturbances, and psycho-social well-being. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(2), 719-729.
- [59] Kauko, T., D'Amato, M., & Venezia, F. (2019). The impact of various environmental factors on property values. *International Journal of Housing Markets and Analysis*, 12(4), 675-695.

- [60] Frei, P., Mohler, E., & Rösli, M. (2014). Effect of nocturnal road traffic noise exposure and annoyance on objective and subjective sleep quality. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 217(2-3), 188-195.
- [61] 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.
- [62] Licitra, G., Ascari, E., Fredianelli, L., & Cerchiai, M. (2017). Influence of tyres on the use of the CPX method for evaluating the effectiveness of a noise mitigation action based on low-noise road surfaces. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 217-226.
- [63] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe—2020. EEA Report No 22/2019.
- [64] Skrzypek, M., Kowalska, M., Czech, E. M., Niewiadomska, E., & Zejda, J. E. (2017). Impact of road traffic noise on sleep disturbances and attention disorders amongst school children living in Upper Silesian Industrial Zone, Poland. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 30(3), 511-520.
- [65] Van Kempen, E., Casas, M., Pershagen, G., & Foraster, M. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and cardiovascular and metabolic effects: A summary. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2), 379.
- [66] Boogaard, H., Borgman, F., Kamminga, J., & Hoek, G. (2009). Exposure to ultrafine and fine particles and noise during cycling and driving in 11 Dutch cities. *Atmospheric Environment*, 43(27), 4234-4242.
- [67] Welch, D., Shepherd, D., Dirks, K. N., McBride, D., & Marsh, S. (2013). Road traffic noise and health-related quality of life: A cross-sectional study. *Noise and Health*, 15(65), 224-230.
- [68] Héritier, H., Vienneau, D., Frei, P., Eze, I. C., Brink, M., Probst-Hensch, N., & Rösli, M. (2017). The association between road traffic noise exposure, annoyance and health-related quality of life (HRQOL). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1400.

- [69] Guillaume, G., Aumond, P., Bocher, E., Can, A., Écotière, D., Fortin, N., ... & Picaut, J. (2016). NoiseCapture smartphone application as an open tool for noise mapping: Cases studies. *Proceedings of Euronoise*, 2016, 2113-2118.
- [70] Mydlarz, C., Salamon, J., & Bello, J. P. (2017). The implementation of low-cost urban acoustic monitoring devices. *Applied Acoustics*, 117, 207-218.
- [71] Vrijheid, M., Slama, R., Robinson, O., Chatzi, L., Coen, M., Van den Hazel, P., ... & Nieuwenhuijsen, M. J. (2014). The human early-life exposome (HELIX): Project rationale and design. *Environmental Health Perspectives*, 122(6), 535-544.
- [72] Kempen, E. V., Kruize, H., Boshuizen, H. C., Ameling, C. B., Staatsen, B. A., & de Hollander, A. E. (2002). The association between noise exposure and blood pressure and ischemic heart disease: A meta-analysis. *Environmental Health Perspectives*, 110(3), 307-317.
- [73] Prüss-Üstün, A., Wolf, J., Corvalán, C., Bos, R., & Neira, M. (2016). Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the burden of disease from environmental risks. World Health Organization.
- [74] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European Region. WHO Regional Office for Europe.
- [75] Babisch, W. (2014). Updated exposure-response relationship between road traffic noise and coronary heart diseases: A meta-analysis. *Noise and Health*, 16(68), 1-9.
- [76] Miedema, H. M., & Oudshoorn, C. G. (2001). Annoyance from transportation noise: Relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environmental Health Perspectives*, 109(4), 409-416.
- [77] Basner, M., Müller, U., & Elmenhorst, E. M. (2011). Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. *Sleep*, 34(1), 11-23.
- [78] Steenland, K., & Armstrong, B. (2006). An overview of methods for calculating the burden of disease due to specific risk factors. *Epidemiology*, 17(5), 512-519.
- [79] Rockhill, B., Newman, B., & Weinberg, C. (1998). Use and misuse of population attributable fractions. *American Journal of Public Health*, 88(1), 15-19.
- [80] Newson, R. B. (2013). Attributable and unattributable risks and fractions and other scenario comparisons. *The Stata Journal*, 13(4), 672-698.

- [81] Murray, C. J., & Lopez, A. D. (1996). *The global burden of disease: A comprehensive assessment of mortality and disability from diseases, injuries, and risk factors in 1990 and projected to 2020*. Harvard University Press.
- [82] World Health Organization. (2011). *Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe*. WHO Regional Office for Europe.
- [83] Robinson, L. A., Hammitt, J. K., & O’Keeffe, L. (2019). Valuing mortality risk reductions in global benefit-cost analysis. *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 10(S1), 15-50.
- [84] Navrud, S. (2002). *The state-of-the-art on economic valuation of noise: Final report to European Commission DG Environment*. Department of Economics and Social Sciences, Agricultural University of Norway.
- [85] Kim, K. S., Park, S. J., & Kweon, Y. J. (2007). Highway traffic noise effects on land price in an urban area. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(4), 275-280.
- [86] Nelson, J. P. (2008). Hedonic property value studies of transportation noise: Aircraft and road traffic. In *Hedonic methods in housing markets* (pp. 57-82). Springer.
- [87] Wilhelmsson, M. (2000). The impact of traffic noise on the values of single-family houses. *Journal of Environmental Planning and Management*, 43(6), 799-815.
- [88] Day, B., Bateman, I., & Lake, I. (2007). Beyond implicit prices: Recovering theoretically consistent and transferable values for noise avoidance from a hedonic property price model. *Environmental and Resource Economics*, 37(1), 211-232.
- [89] Lercher, P., Evans, G. W., & Meis, M. (2003). Ambient noise and cognitive processes among primary schoolchildren. *Environment and Behavior*, 35(6), 725-735.
- [90] 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.

- [91] Kruize, H., Driessen, P. P., Glasbergen, P., & van Egmond, K. (2007). Environmental equity and the role of public policy: Experiences in the Rijnmond region. *Environmental Management*, 40(4), 578-595.
- [92] Shield, B. M., & Dockrell, J. E. (2003). The effects of noise on children at school: A review. *Building Acoustics*, 10(2), 97-116.
- [93] Greenland, S., Pearl, J., & Robins, J. M. (1999). Causal diagrams for epidemiologic research. *Epidemiology*, 10(1), 37-48.
- [94] Cai, Y., Hansell, A. L., Blangiardo, M., Burton, P. R., de Hoogh, K., Doiron, D., ... & Hodgson, S. (2017). Long-term exposure to road traffic noise, ambient air pollution, and cardiovascular mortality in a cohort in northern Sweden. *Environmental Health Perspectives*, 125(9), 097012.
- [95] Miedema, H. M., & Vos, H. (2007). Associations between self-reported sleep disturbance and environmental noise based on reanalyses of pooled data from 24 studies. *Behavioral Sleep Medicine*, 5(1), 1-20.
- [96] Nieuwenhuijsen, M. J., & Khreis, H. (2016). Car free cities: Pathway to healthy urban living. *Environment International*, 94, 251-262.
- [97] Bohatkiewicz, J. (2016). Noise control plans in cities—Selected issues and necessary changes in approach to measures and methods of protection. *Transportation Research Procedia*, 14, 2744-2753.
- [98] de Paiva Vianna, K. M., Alves Cardoso, M. R., & Rodrigues, R. M. C. (2015). Noise pollution and annoyance: An urban soundscapes study. *Noise and Health*, 17(76), 125-133.
- [99] 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.
- [100] Sandberg, U. (2003). The multi-coincidence peak around 1000 Hz in tyre/road noise spectra. *Euronoise*, 2003, 1-6.
- [101] European Union. (2009). Regulation (EC) No 1222/2009 on the labelling of tyres with respect to fuel efficiency and other essential parameters. *Official Journal of the European Union*, L 342/46.

- [102] Sandberg, U. (2003). Abatement of traffic, vehicle, and tire/road noise—The global perspective. *Noise Control Engineering Journal*, 51(4), 202-213.
- [103] van Keulen, W., & van Blokland, G. J. (2001). Porous asphalt after 10 years of use. In 2001 CROW/PIARC-International Symposium on Surface Characteristics (pp. 1-10).
- [104] Sandberg, U., & Mioduszewski, P. (2012). The importance for noise reduction of the bottom layer in double-layer porous asphalt. In 41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Vol. 25, pp. 2161-2172).
- [105] Maffei, L., & Masullo, M. (2014). Electric vehicles and urban noise control policies. *Archives of Acoustics*, 39(3), 333-341.
- [106] Pallas, M. A., Berengier, M., Chatagnon, R., Czuka, M., Conti, M., & Muirhead, M. (2016). Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU. *Applied Acoustics*, 113, 89-101.
- [107] Sandberg, U., Goubert, L., & Mioduszewski, P. (2010). Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals? In *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA* (pp. 1-8).
- [108] Patella, S. M., Aletta, F., & Mannini, L. (2019). Assessing the impact of Autonomous Vehicles on urban noise pollution. *Noise Mapping*, 6(1), 72-86.
- [109] Castiñeira-Ibáñez, S., Rubio, C., Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J. V., & García-Raffi, L. M. (2015). Environmental noise control during its transmission phase to protect buildings. Design model for acoustic barriers based on arrays of isolated scatterers. *Building and Environment*, 93, 179-185.
- [110] Kesten, S., Umut, Ö., & Ayva, B. (2020). Acoustic and structural design of a highway noise barrier. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 800(1), 012029.
- [111] Peiró-Torres, M. D. P., Redondo, J., Bravo, J. M., & Peral-Orts, R. (2016). Open noise barriers based on sonic crystals. *Advances in noise control in transport infrastructures. Transportation Research Procedia*, 18, 392-398.
- [112] Watts, G. R. (1996). Acoustic performance of a multiple edge noise barrier profile at motorway sites. *Applied Acoustics*, 47(1), 47-66.

- [113] Yang, M., & Sheng, P. (2017). Sound absorption structures: From porous media to acoustic metamaterials. *Annual Review of Materials Research*, 47, 83-114.
- [114] Yang, F., Bao, Z., & Zhu, Z. J. (2011). An assessment of psychological noise reduction by landscape plants. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(4), 1032-1048.
- [115] Salomons, E. M., & Berghauser Pont, M. (2012). Urban traffic noise and the relation to urban density, form, and traffic elasticity. *Landscape and Urban Planning*, 108(1), 2-16.
- [116] 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.
- [117] 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.
- [118] Peng, J., Bullen, R., & Kean, S. (2014). The effects of vegetation on road traffic noise. Australian Acoustical Society.
- [119] Berglund, B., Lindvall, T., & Schwela, D. H. (1999). Guidelines for community noise. World Health Organization.
- [120] Rasmussen, B., & Rindel, J. H. (2010). Sound insulation between dwellings—Descriptors applied in building regulations in Europe. *Applied Acoustics*, 71(3), 171-180.
- [121] Amundsen, A. H., Klæboe, R., & Fyhri, A. (2013). Annoyance from tramway noise: A survey study after implementation of noise reducing measures. *Acta Acustica united with Acustica*, 99(5), 832-839.
- [122] Miedema, H. M., & Oudshoorn, C. G. (2002). Elements for a position paper on night-time transportation noise and sleep disturbance. TNO Inro.
- [123] Ballesteros, M. J., Fernández, M. D., Quintana, S., Ballesteros, J. A., & González, I. (2010). Noise emission evolution on construction sites. Measurement for controlling and assessing its impact on the people and on the environment. *Building and Environment*, 45(3), 711-717.
- [124] Litman, T. (2013). Transportation demand management. *Transportation*, 23, 8.

- [125] Lindsay, G., Macmillan, A., & Woodward, A. (2011). Moving urban trips from cars to bicycles: Impact on health and emissions. *Australian and New Zealand Journal of Public Health*, 35(1), 54-60.
- [126] Abbott, P. G., & Nelson, P. M. (2002). Converting the UK traffic noise index LA10, 18h to EU noise indices for noise mapping. TRL Limited.
- [127] Bunn, F., Collier, T., Frost, C., Ker, K., Roberts, I., & Wentz, R. (2003). Area-wide traffic calming for preventing traffic related injuries. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 1, CD003110.
- [128] Mouhous-Voyneau, N., & Dejeammes, M. (2007). Integrating noise concerns into vehicle routing and fleet management: The state of the art. *Proceedings of 14th International Congress on Sound and Vibration*, 9-12.
- [129] Brink, M., Schäffer, B., Vienneau, D., Foraster, M., Pieren, R., Eze, I. C., ... & Röösli, M. (2019). A survey on exposure-response relationships for road, rail, and aircraft noise annoyance: Differences between continuous and intermittent noise. *Environment International*, 125, 277-290.
- [130] Eliasson, J. (2009). A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(4), 468-480.
- [131] European Commission. (2014). *Green Public Procurement Criteria for Transport. EU GPP Criteria.*
- [132] Aumond, P., Jacquesson, L., & Can, A. (2018). Probabilistic modeling framework for multisource sound mapping. *Applied Acoustics*, 139, 34-43.
- [133] Gulliver, J., Morley, D., Vienneau, D., Fabbri, F., Bell, M., Goodman, P., ... & Fecht, D. (2015). Development of an open-source road traffic noise model for exposure assessment. *Environmental Modelling & Software*, 74, 183-193.
- [134] Williams, B. K., Szaro, R. C., & Shapiro, C. D. (2009). *Adaptive management: The US Department of the Interior technical guide.* US Department of the Interior.
- [135] King, E. A., Murphy, E., & McNabola, A. (2009). Reducing pedestrian exposure to environmental pollutants: A combined noise exposure and air quality analysis approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(5), 309-316.

- [136] Gregory, R., Ohlson, D., & Arvai, J. (2006). Deconstructing adaptive management: Criteria for applications to environmental management. *Ecological Applications*, 16(6), 2411-2425.
- [137] Banerjee, D., Chakraborty, S. K., Bhattacharyya, S., & Gangopadhyay, A. (2008). Appraisal and mapping the spatial-temporal distribution of urban road traffic noise. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 5(3), 325-335.
- [138] Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA). (2010). Noise policy statement for England. DEFRA, London.
- [139] Murphy, E., & King, E. A. (2010). Strategic environmental noise mapping: Methodological issues concerning the implementation of the EU Environmental Noise Directive and their policy implications. *Environment International*, 36(3), 290-298.
- [140] Muzet, A. (2007). Environmental noise, sleep and health. *Sleep Medicine Reviews*, 11(2), 135-142.
- [141] European Union. (2012). Regulation (EC) No 661/2009 concerning type-approval requirements for the general safety of motor vehicles. *Official Journal of the European Union*.
- [142] Berglund, B., Lindvall, T., & Schwela, D. H. (1999). Guidelines for community noise. World Health Organization.
- [143] World Health Organization. (2009). Night noise guidelines for Europe. WHO Regional Office for Europe.
- [144] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European Region. WHO Regional Office for Europe.
- [145] Guski, R., Schreckenberg, D., & Schuemer, R. (2017). WHO environmental noise guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1539.
- [146] 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.

- [147] European Commission. (2002). Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise. Official Journal of the European Communities, L 189/12.
- [148] Murphy, E., & King, E. A. (2010). Strategic environmental noise mapping: Methodological issues concerning the implementation of the EU Environmental Noise Directive and their policy implications. *Environment International*, 36(3), 290-298.
- [149] European Environment Agency. (2014). Good practice guide on noise exposure and potential health effects. EEA Technical Report No 11/2010.
- [150] European Commission. (2017). Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the implementation of the Environmental Noise Directive. COM(2017) 151 final.
- [151] European Union. (2020). Regulation (EU) 2020/740 on the labelling of tyres with respect to fuel efficiency and other parameters. Official Journal of the European Union, L 177/1.
- [152] Sandberg, U. (2012). Low noise road surfaces—A state-of-the-art review. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 20(1), 1-17.
- [153] Ramos, A., Vieira, M., Silva, J., Gameiro, P., & Simas, T. (2013). The influence of the EU tyre label on consumers' awareness and purchasing behavior. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 49, 49-59.
- [154] United Nations Economic Commission for Europe. (2016). UN Regulation No. 117: Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and to adhesion on wet surfaces and/or to rolling resistance. UNECE.
- [155] Paling, J., Harrington, T., Sorrell, S., & Chitnis, M. (2015). The use of real world driving data to investigate the impact of the EU tyre label on rolling resistance and fuel consumption. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 36, 23-36.
- [156] United Nations Economic Commission for Europe. (2020). UN Regulation No. 117: Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions, wet grip performance and rolling resistance. UNECE.

- [157] International Organization for Standardization. (2019). ISO 13325:2019 Tyres—Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission. ISO.
- [158] Sandberg, U. (2003). Achieving 40 dB(A) in city traffic—Mission impossible? In 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (pp. 1-10).
- [159] United Nations. (1998). Agreement concerning the establishing of global technical regulations for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles (ECE/TRANS/132 and Corr.1). United Nations.
- [160] National Highway Traffic Safety Administration. (2022). Federal motor vehicle safety standards; Quiet car. 49 CFR Part 571. Docket No. NHTSA-2022-0007.
- [161] Federal Highway Administration. (2023). 23 CFR Part 772—Procedures for abatement of highway traffic noise and construction noise. Code of Federal Regulations.
- [162] Federal Highway Administration. (2017). Highway traffic noise: Analysis and abatement guidance. FHWA-HEP-17-046.
- [163] Menge, C. W., Rossano, C. F., Anderson, G. S., & Bajdek, C. J. (1998). FHWA traffic noise model, version 1.0: Technical manual. US Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- [164] Anderson, G. S., Menge, C. W., Rossano, C. F., Armstrong, R. E., Ronning, S. A., Fleming, G. G., & Lee, C. S. (1998). FHWA traffic noise model, version 1.0: User's guide. US Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- [165] Federal Highway Administration. (2024). Procedures for abatement of highway traffic noise and construction noise. Federal Register, 89(202), 84066-84141.
- [166] Glasson, J., Therivel, R., & Chadwick, A. (2013). Introduction to environmental impact assessment. Routledge.
- [167] Directive 2011/92/EU of the European Parliament and of the Council of 13 December 2011 on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment. Official Journal of the European Union, L 26/1.

- [168] International Association for Impact Assessment. (2009). What is impact assessment? IAIA Special Publication Series No. 1.
- [169] Bond, A., Dockerty, T., Lovett, A., Riche, A. B., Haughton, A. J., Bohan, D. A., ... & Karp, A. (2011). Learning how to deal with values, frames and governance in sustainability appraisal. *Regional Studies*, 45(8), 1157-1170.
- [170] Bronzaft, A. L. (2002). Noise pollution: A hazard to physical and mental well-being. In *Handbook of environmental psychology* (pp. 499-510). John Wiley & Sons.
- [171] Muzet, A. (2007). Environmental noise, sleep and health. *Sleep Medicine Reviews*, 11(2), 135-142.
- [172] Brink, M. (2011). Parameters of well-being and subjective health and their relationship with residential traffic noise exposure—A representative evaluation in Switzerland. *Environment International*, 37(4), 723-733.
- [173] Fields, J. M. (1993). Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential areas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93(5), 2753-2763.
- [174] International Organization for Standardization. (2017). ISO 1996-1:2016 Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise—Part 1: Basic quantities and assessment procedures. ISO.
- [175] International Organization for Standardization. (2019). ISO 13325:2019 Tyres—Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission. ISO.
- [176] International Organization for Standardization. (2017). ISO 1996-2:2017 Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise—Part 2: Determination of sound pressure levels. ISO.
- [177] International Organization for Standardization. (2012). ISO 11819-1:1997 Acoustics—Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise—Part 1: Statistical Pass-By method. ISO.
- [178] International Organization for Standardization. (2018). ISO 12913-1:2014 Acoustics—Soundscape—Part 1: Definition and conceptual framework. ISO.

- [179] Sørensen, M., Hvidberg, M., Andersen, Z. J., Nordsborg, R. B., Lillelund, K. G., Jakobsen, J., ... & Raaschou-Nielsen, O. (2011). Road traffic noise and stroke: A prospective cohort study. *European Heart Journal*, 32(6), 737-744.
- [180] Goines, L., & Hagler, L. (2007). Noise pollution: A modern plague. *Southern Medical Journal*, 100(3), 287-294.
- [181] Nijland, H. A., & van Wee, G. P. (2008). Traffic noise in Europe: A comparison of calculation methods, noise indices and noise standards for road and railroad traffic in Europe. *Transport Reviews*, 28(6), 707-721.
- [182] den Boer, L. C., & Schrotten, A. (2007). Traffic noise reduction in Europe. CE Delft, 2057.
- [183] Brown, A. L. (2015). Towards standardization in soundscape preference assessment. *Applied Acoustics*, 72(6), 387-392.
- [184] Hua, X., Thomas, A., & Shultis, K. (2021). Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness. *Science Progress*, 104(1), 00368504211005224.
- [185] Goodwin, P., Dargay, J., & Hanly, M. (2004). Elasticities of road traffic and fuel consumption with respect to price and income: A review. *Transport Reviews*, 24(3), 275-292.
- [186] Lercher, P., & Widmann, U. (2008). Assessing health outcomes related to traffic noise exposure. *Noise & Vibration Worldwide*, 39(10), 17-26.
- [187] Navrud, S. (2002). The state-of-the-art on economic valuation of noise. Final report to European Commission DG Environment, 14.
- [188] den Boer, L. C., & Schrotten, A. (2007). Traffic noise reduction in Europe: Health effects, social costs and technical and policy options to reduce road and rail traffic noise. CE Delft, 2057.
- [189] Wijnen, W., Rietveld, P., & Verhoef, E. T. (2009). Valuing the social costs of greenhouse gas emissions. *Transport Policy*, 16(5), 235-242.
- [190] Getzner, M., & Zak, D. (2012). Health impacts of noise pollution around airports: Economic valuation and transferability. In *Environmental health—Emerging issues and practice*. InTech.

- [191] European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe—2020. EEA Report No 22/2019. Publications Office of the European Union.
- [192] Viscusi, W. K., & Aldy, J. E. (2003). The value of a statistical life: A critical review of market estimates throughout the world. *Journal of Risk and Uncertainty*, 27(1), 5-76.
- [193] Andersson, H., Hammitt, J. K., & Sundström, K. (2015). Willingness to pay and QALYs: What can we learn about valuing health from willingness to pay? *Health Economics*, 24(12), 1594-1607.
- [194] Nwali, E. I., & Agunwamba, J. C. (2005). Analysis of the environmental and socio-economic impact of noise pollution in ELEME petrochemical company limited. *Nigerian Journal of Technology*, 24(1), 52-64.
- [195] Rosekind, M. R., Gregory, K. B., Mallis, M. M., Brandt, S. L., Seal, B., & Lerner, D. (2010). The cost of poor sleep: Workplace productivity loss and associated costs. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 52(1), 91-98.
- [196] Hafner, M., Stepanek, M., Taylor, J., Troxel, W. M., & Van Stolk, C. (2017). Why sleep matters—The economic costs of insufficient sleep: A cross-country comparative analysis. RAND Corporation.
- [197] Clark, C., Crombie, R., Head, J., van Kamp, I., van Kempen, E., & Stansfeld, S. A. (2012). Does traffic-related air pollution explain associations of aircraft and road traffic noise exposure on children's health and cognition? A secondary analysis of the United Kingdom sample from the RANCH project. *American Journal of Epidemiology*, 176(4), 327-337.
- [198] Max, W., Rice, D. P., Sung, H. Y., & Michel, M. (2004). Valuing human life: Estimating the present value of lifetime earnings, 2000. Center for Tobacco Control Research and Education, University of California, San Francisco.
- [199] Nelson, J. P. (2004). Meta-analysis of airport noise and hedonic property values: Problems and prospects. *Journal of Transport Economics and Policy*, 38(1), 1-28.
- [200] Kim, K. S., Park, S. J., & Kweon, Y. J. (2007). Highway traffic noise effects on land price in an urban area. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(4), 275-280.

- [201] Andersson, H., Swärdh, J. E., & Ögren, M. (2015). Traffic noise effects of property prices: Hedonic estimates based on multiple noise indicators. Institutionen för Nationalekonomi med Statistik, Handelshögskolan vid Göteborgs universitet.
- [202] Wilhelmsson, M. (2000). Traffic noise and property values. Department of Infrastructure, Royal Institute of Technology.
- [203] Bravo-Moncayo, L., Mosquera, R., Chiu, M., Garzón, C., & Pavón-García, I. (2023). Traffic noise and property values: An instrumental variable strategy for hedonic valuation. *Journal of Environmental Planning and Management*, 66(7), 1436-1456.
- [204] Federal Highway Administration. (2021). Highway traffic noise barrier cost data. FHWA-HEP-21-047.
- [205] Watts, G. R., Chinn, L., & Godfrey, N. (1999). The effects of vegetation on the perception of traffic noise. *Applied Acoustics*, 56(1), 39-56.
- [206] Öhrström, E., & Skånberg, A. (2004). Sleep disturbances from road traffic and ventilation noise—Laboratory and field experiments. *Journal of Sound and Vibration*, 271(1-2), 279-296.
- [207] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Tyre/road noise reference book. INFORMEX.
- [208] Bekke, D., Debakker, P., & Loon, R. (2013). Tire-road noise: An experimental study of tire and road design parameters. In *9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights & Dimensions* (pp. 1-16).
- [209] Nijland, H. A., & van Kempen, E. E. (2015). Cost and benefits of noise abatement measures. *Transport Policy*, 37, 8-17.
- [210] 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), 14-23.
- [211] Bressane, A., Mochizuki, P. S., Caram, R. M., Roveda, J. A. F., & Martins, A. C. G. (2016). A system for evaluating the impact of noise pollution on the population's health. *Cadernos de Saúde Pública*, 32(5), e00021215.

- [212] Casey, J. A., Morello-Frosch, R., Mennitt, D. J., Frstrup, 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.
- [213] Havard, S., Deguen, S., Zmirou-Navier, D., Schillinger, C., & Bard, D. (2009). Traffic-related air pollution and socioeconomic status: A spatial autocorrelation study to assess environmental equity on a small-area scale. *Epidemiology*, 20(2), 223-230.
- [214] Sze, N. N., & Christensen, K. M. (2017). Access to urban transportation system for individuals with disabilities. *IATSS Research*, 41(2), 66-73.
- [215] Shield, B. M., & Dockrell, J. E. (2008). The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(1), 133-144.
- [216] Stansfeld, S. A., Berglund, B., Clark, C., Lopez-Barrio, I., Fischer, P., Öhrström, E., ... & Berry, B. F. (2005). Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: A cross-national study. *The Lancet*, 365(9475), 1942-1949.
- [217] Flouri, E., Midouhas, E., & Joshi, H. (2014). Family poverty and trajectories of children's emotional and behavioural problems: The moderating roles of self-regulation and verbal cognitive ability. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 42(6), 1043-1056.
- [218] Heckman, J. J. (2006). Skill formation and the economics of investing in disadvantaged children. *Science*, 312(5782), 1900-1902.
- [219] Welch, D., Shepherd, D., Dirks, K. N., McBride, D., & Marsh, S. (2013). Road traffic noise and health-related quality of life: A cross-sectional study. *Noise and Health*, 15(65), 224-230.
- [220] Fyhri, A., & Klæboe, R. (2009). Road traffic noise, sensitivity, annoyance and self-reported health—A structural equation model exercise. *Environment International*, 35(1), 91-97.
- [221] Mouter, N., Cabral, M. O., Dekker, T., & van den Brink, R. (2019). The value of travel time, noise pollution, recreation and biodiversity: A social choice valuation perspective. *Research in Transportation Economics*, 76, 100761.

- [222] Navrud, S. (2004). The economic value of noise within the European Union: A review and analysis of studies. AEA Technology Environment.
- [223] Adamkiewicz, Ł., Badyda, A. J., Gayer, A., & Zieliński, M. (2014). Disability-adjusted life years in the assessment of health effects of traffic-related air pollution. In *Respiratory Regulation—The Molecular Approach* (pp. 165-179). Springer.
- [224] Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2017). *Cost-benefit analysis: Concepts and practice*. Cambridge University Press.
- [225] Flachsbart, P. G. (2000). Human exposure to environmental noise pollution. In *Handbook of Environmental Health* (pp. 559-613).
- [226] Adler, M. D. (2013). Cost-benefit analysis and distributional weights: An overview. *Review of Environmental Economics and Policy*, 7(2), 264-285.
- [227] Husereau, D., Drummond, M., Petrou, S., Carswell, C., Moher, D., Greenberg, D., ... & Loder, E. (2013). Consolidated health economic evaluation reporting standards (CHEERS)—Explanation and elaboration: A report of the ISPOR health economic evaluation publication guidelines good reporting practices task force. *Value in Health*, 16(2), 231-250.
- [228] Robinson, L. A., Hammitt, J. K., & O’Keeffe, L. (2019). Valuing mortality risk reductions in global benefit-cost analysis. *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 10(S1), 15-50.
- [229] Woodcock, J., Edwards, P., Tonne, C., Armstrong, B. G., Ashiru, O., Banister, D., ... & Roberts, I. (2009). Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: Urban land transport. *The Lancet*, 374(9705), 1930-1943.
- [230] 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), 14-23.
- [231] Kang, J., Aletta, F., Margaritis, E., & Yang, M. (2018). A model for implementing soundscape maps in smart cities. *Noise Mapping*, 5(1), 46-59.
- [232] Nieuwenhuijsen, M. J., & Khreis, H. (2016). Car free cities: Pathway to healthy urban living. *Environment International*, 94, 251-262.

- [233] Aletta, F., & Kang, J. (2015). Soundscape approach integrating noise mapping techniques: A case study in Brighton, UK. *Noise Mapping*, 2(1), 1-12.
- [234] Sandberg, U. (2003). The multi-coincidence peak around 1000 Hz in tyre/road noise spectra. *Euronoise*, Naples, Italy.
- [235] Pallas, M. A., Berengier, M., Chatagnon, R., Czuka, M., Conti, M., & Muirhead, M. (2016). Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU. *Applied Acoustics*, 113, 89-101.
- [236] 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.
- [237] Praticò, F. G., & Fedele, R. (2021). Electric vehicles diffusion: Changing pavement acoustic design? *Noise Mapping*, 8(1), 233-251.
- [238] Garay-Vega, L., Hastings, A., Pollard, J. K., Zuschlag, M., & Stearns, M. D. (2010). Quieter cars and the safety of blind pedestrians: Phase I. US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration Report DOT HS 811 304.
- [239] United Nations Economic Commission for Europe. (2017). UN Regulation No. 138: Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility. UNECE.
- [240] Misdariis, N., Grond, F., Levtov, V., Goodwin, J., Schwanen, T., & Kang, J. (2012). Detectability and annoyance of warning sounds for electric vehicles. *Acoustics 2012 Nantes*, France.
- [241] Wogalter, M. S., Ornan, R. N., Lim, R. W., & Chipley, M. R. (2001). On the risk of quiet vehicles to pedestrians and drivers. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 45(23), 1685-1688.
- [242] Emerson, R. W., Naghshineh, K., Hapeman, J., & Wiener, W. (2011). A pilot study of pedestrians with visual impairments detecting traffic gaps and surges containing hybrid vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14(2), 117-127.

- [243] Payre, W., Cestac, J., & Delhomme, P. (2014). Intention to use a fully automated car: Attitudes and a priori acceptability. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 252-263.
- [244] Aria, E., Olstam, J., & Schwietering, C. (2016). Investigation of automated vehicle effects on driver's behavior and traffic performance. *Transportation Research Procedia*, 15, 761-770.
- [245] Wadud, Z., MacKenzie, D., & Leiby, P. (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 86, 1-18.
- [246] Patella, S. M., Aletta, F., & Mannini, L. (2019). Assessing the impact of Autonomous Vehicles on urban noise pollution. *Noise Mapping*, 6(1), 72-86.
- [247] Milakis, D., Van Arem, B., & Van Wee, B. (2017). Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 21(4), 324-348.
- [248] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22-32.
- [249] Mydlarz, C., Salamon, J., & Bello, J. P. (2017). The implementation of low-cost urban acoustic monitoring devices. *Applied Acoustics*, 117, 207-218.
- [250] Alsina-Pagès, R. M., Alías, F., Socoró, J. C., & Orga, F. (2017). Detection of anomalous noise events on low-capacity acoustic nodes for dynamic road traffic noise mapping in real-time. *Sensors*, 17(12), 2813.
- [251] Ntalampiras, S. (2016). Universal background modeling for acoustic surveillance of urban traffic. *Digital Signal Processing*, 49, 129-133.
- [252] Guillaume, G., Aumond, P., Bocher, E., Can, A., Écotière, D., Fortin, N., ... & Picaut, J. (2016). NoiseCapture smartphone application as an open tool for noise mapping: Cases studies. *Proceedings of Euronoise 2016*, 2113-2118.
- [253] Aguilera, U., Peña, O., Belmonte, O., & López-de-Ipiña, D. (2017). Citizen-centric data services for smarter cities. *Future Generation Computer Systems*, 76, 234-247.

- [254] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., ... & Leus, M. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. *Building and Environment*, 108, 284-294.
- [255] International Organization for Standardization. (2018). ISO 12913-2:2018 Acoustics—Soundscape—Part 2: Data collection and reporting requirements. ISO.
- [256] 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.
- [257] Hong, J. Y., Ong, Z. T., Lam, B., Ooi, K., Gan, W. S., Kang, J., ... & Tan, S. T. (2020). Effects of adding natural sounds to urban noises on the perceived loudness of noise and soundscape quality. *Science of the Total Environment*, 711, 134571.
- [258] Schulte-Fortkamp, B., Brooks, B. M., & Bray, W. R. (2007). Soundscape: An approach to rely on human perception and expertise in the post-modern community noise era. *Acoustics Today*, 3(1), 31-33.
- [259] Creutzig, F., Jochem, P., Edelenbosch, O. Y., Mattauch, L., van Vuuren, D. P., McCollum, D., & Minx, J. (2015). Transport: A roadblock to climate change mitigation? *Science*, 350(6263), 911-912.
- [260] Woodcock, J., Edwards, P., Tonne, C., Armstrong, B. G., Ashiru, O., Banister, D., ... & Roberts, I. (2009). Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: Urban land transport. *The Lancet*, 374(9705), 1930-1943.
- [261] Brand, C., Goodman, A., Rutter, H., Song, Y., & Ogilvie, D. (2013). Associations of individual, household and environmental characteristics with carbon dioxide emissions from motorised passenger travel. *Applied Energy*, 104, 158-169.
- [262] Spielmann, M., & Scholz, R. (2005). Life cycle inventories of transport services: Background data for freight transport. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(1), 85-94.
- [263] United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. UN General Assembly Resolution A/RES/70/1.

- [264] Kemm, J. (2013). Health impact assessment: Past achievement, current understanding, and future progress. Oxford University Press.
- [265] Harris-Roxas, B., Vilianni, F., Bond, A., Cave, B., Divall, M., Furu, P., ... & Wernham, A. (2012). Health impact assessment: The state of the art. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 30(1), 43-52.
- [266] Winkler, M. S., Krieger, G. R., Divall, M. J., Cissé, G., Wielga, M., Singer, B. H., ... & Utzinger, J. (2013). Untapped potential of health impact assessment. *Bulletin of the World Health Organization*, 91(4), 298-305.
- [267] Dannenberg, A. L., Bhatia, R., Cole, B. L., Heaton, S. K., Feldman, J. D., & Rutt, C. D. (2008). Use of health impact assessment in the US: 27 case studies, 1999–2007. *American Journal of Preventive Medicine*, 34(3), 241-256.
- [268] Schlosberg, D. (2013). Theorising environmental justice: The expanding sphere of a discourse. *Environmental Politics*, 22(1), 37-55.
- [269] Kruize, H., Driessen, P. P., Glasbergen, P., & van Egmond, K. (2007). Environmental equity and the role of public policy: Experiences in the Rijnmond region. *Environmental Management*, 40(4), 578-595.
- [270] Jerrett, M., Gale, S., & Kontgis, C. (2010). Spatial modeling in environmental and public health research. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(4), 1302-1329.
- [271] Arnstein, S. R. (1969). A ladder of citizen participation. *Journal of the American Institute of Planners*, 35(4), 216-224.
- [272] Sheppard, S. R., Shaw, A., Flanders, D., Burch, S., Wiek, A., Carmichael, J., ... & Cohen, S. (2011). Future visioning of local climate change: A framework for community engagement and planning with scenarios and visualisation. *Futures*, 43(4), 400-412.
- [273] Schipper, E. L. F., & Pelling, M. (2006). Disaster risk, climate change and international development: Scope for, and challenges to, integration. *Disasters*, 30(1), 19-38.
- [274] Vogel, D. (1995). *Trading up: Consumer and environmental regulation in a global economy*. Harvard University Press.

- [275] United Nations. (1998). Agreement concerning the establishing of global technical regulations for wheeled vehicles. ECE/TRANS/132 and Corr.1.
- [276] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European Region. WHO Regional Office for Europe.
- [277] Horton, R. (2013). Offline: Health and the SDGs—leaving no one behind. *The Lancet*, 382(9908), 1719.
- [278] Basner, M., McGuire, S., & Muller, U. (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.
- [279] Van Kempen, E., Casas, M., Pershagen, G., & Foraster, M. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and cardiovascular and metabolic effects: A summary. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2), 379.
- [280] Helbich, M., Yao, Y., Liu, Y., Zhang, J., Liu, P., & Wang, R. (2019). Using deep learning to examine street view green and blue spaces and their associations with geriatric depression in Beijing, China. *Environment International*, 126, 107-117.
- [281] Brown, A. L., Kang, J., & Gjestland, T. (2011). Towards standardization in soundscape preference assessment. *Applied Acoustics*, 72(6), 387-392.
- [282] 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.