

潛艦水下噪音的重要性：軍事戰略與海洋環境的雙重視角

東海大學環境科學與工程學系兼任助理教授 劉嘉俊博士

摘要

潛艦水下噪音作為現代海軍技術與海洋環境科學交匯的核心議題,其重要性說明在軍事戰略優勢、國家安全防衛、海洋生態保護、國際法規制定及科技創新發展等多個角度。本文基於國際學術文獻、技術標準及政策文件,系統性闡述潛艦噪音在聲學隱蔽性、戰術運用、環境影響評估及管理框架中的關鍵地位。你有沒有想過,在深深的海底下,潛艦是如何隱藏自己的?答案就是:**保持安靜**,有關研究顯示,潛艦發出的噪音水平直接決定其戰場生存能力與作戰效能,現代先進核潛艦的水下聲音已降至 95~110 dB re 1 μ Pa (大約等於 55~70 dB 的陸地聲音),接近海洋背景噪音值[1][2]。

在海洋中,聲音是最重要的探測工具,就像我們在黑暗中用手電筒找東西一樣。但不同的是,海底下的「手電筒」就是聲納,它靠聲音來發現目標。因此,潛艦發出的噪音越小,就越不容易被敵人發現,這就是「聲學隱蔽性」。

然而,即使是低強度的潛艦噪音,仍可能對海洋哺乳動物的聽覺系統、通訊行為及生態分布產生顯著影響,凸顯了平衡國防需求與環境保護的必要性[3][4]。本文透過跨學科視角,深入探討潛艦噪音研究的戰略意義、技術挑戰、生態後果及政策方向,為相關領域的學術研究與實務應用提供系統性參考框架。

1. 引言：潛艦噪音研究的戰略與科學意義

潛艦水下噪音研究代表現代海洋科學、軍事工程及環境保護交織融合的前沿領域,其重要性遠超單純的技術層面考量。自第二次世界大戰以來,潛艦作為戰略威懾與戰術打擊的核心武器平台,其聲學隱蔽性始終是決定戰場優勢的關鍵因素[5]。冷戰時期,美國與蘇聯在潛艦靜音技術領域展開長達四十年的激烈競爭,推動潛艦發出的噪音水平降低了約 40~50 dB,這一技術突破徹底改變了水下戰爭的戰術格局,使得先進潛艦能夠在敵方聲納探測範圍外實施隱蔽行動[6][7]。

從海洋環境科學的角度而言,潛艦噪音作為一種特殊的人為聲學擾動源,其研究價值說明在多個層面。首先,潛艦噪音特性與商業船舶存在顯著差異,其通常採用先進的降噪設計,包括浮筏隔振系統、消音瓦塗層及低噪音推進裝置,使得發出的噪音強度遠低於典型商船[8]。其次,潛艦作為軍事平台的機密性質,使得相關數據長期缺乏公開透明,導致科學界對軍事活動累積性環境影響的認知存在顯著空白[9]。

第三,隨著國際社會對水下噪音污染關注度的提升,如何在維護國家安全與保護海洋生態之間尋求平衡,已成為海洋環境治理的重要課題[10][11]。

國際標準化組織(International Organization for Standardization, ISO)制定的 ISO 17208 系列標準為船舶水下發出的噪音的測量和評估提供了統一的技術規範,促進了不同國家和機構之間的數據比較與技術交流[12][13]。北大西洋公約組織(North Atlantic Treaty Organization, NATO)的標準化協議 STANAG 1136 進一步規範了包括潛艦在內的軍事艦艇發出的噪音的測量程序,為軍事與民用領域的技術協調建立了基礎[14][15]。這些國際標準的發展反映了全球對水下噪音管理重要性的共識,也為潛艦噪音研究提供了方法學基礎。

本文旨在從多維度系統性闡述潛艦水下噪音的重要性,包括軍事戰略價值、海洋環境影響、技術創新驅動、國際政策協調及未來研究方向,為學術界、政策制定者及工程實務界提供全面的知識框架與決策參考。

2. 軍事戰略維度的核心重要性

2.1 聲學隱蔽性與戰場生存能力

潛艦的根本戰術優勢在於其隱蔽性,而聲學信號是水下探測的主要手段,因此噪音量直接決定潛艦的戰場生存概率。在現代反潛戰(Anti-Submarine Warfare, ASW)中,被動聲納系統透過接收目標輻射的噪音進行探測、定位與分類,探測距離與目標噪音強度呈正相關關係[16][17]。研究顯示,目標發出的噪音量每降低 6 dB,被動聲納的探測距離約減半,這種指數關係使得微小的噪音降低都能帶來顯著的戰術優勢[18]。

歷史案例充分證明了聲學隱蔽性的戰略價值。2005 年,美國海軍租借瑞典 Gotland 級柴電潛艦進行對抗演習,該艦憑藉先進的推進(Air-Independent Propulsion, AIP)系統和卓越的靜音設計,成功突破美國航母戰鬥群的反潛防禦圈,模擬擊沉了核動力航母 USS Ronald Reagan,震驚了美國海軍[19][20]。這一事件凸顯了即使是非核動力潛艦,只要具備足夠的聲學隱蔽性,仍可對戰略目標構成致命威脅。同樣地,2010 年韓國天安艦沉沒事件中,朝鮮小型潛艦在淺海環境中成功規避探測並實施攻擊,再次證明了噪音控制在現代海戰中的決定性作用[21]。

從技術層面分析,潛艦發出的噪音頻譜包含低頻、中頻及高頻噪音三大成分[22]。低頻由旋轉機械構成,是聲學特徵識別的關鍵信號,即使在較低的總體噪音水平下仍可能被遠距離探測[23]。螺旋槳葉片頻率(Blade Rate Frequency, BRF)及頻譜中形成明顯的峰值,成為目標識別的"指紋"[24]。現代潛艦設計採用精密動平衡、主

動隔振、轉速非同步化及頻率調製技術,力圖消除或減弱這些離散線譜成分,實現"聲學隱身"效果[25]。

2.2 戰略威懾與核三位一體

核動力彈道導彈潛艦(Ballistic Missile Submarine, SSBN)構成核三位一體戰略威懾體系的海基支柱,其生存能力直接關係到國家的戰略安全與威懾可信度。與陸基洲際彈道導彈和戰略轟炸機相比,戰略核潛艦具有機動性強、隱蔽性高、生存能力卓越的優勢,被視為最可靠的二次核打擊力量[26][27]。美國俄亥俄級、俄羅斯北風之神級、英國前衛級及法國凱旋級戰略核潛艦均代表了各國最高水準的潛艦技術,其聲學隱蔽性是國家核心機密[28]。

理論分析顯示,戰略核潛艦的威懾效能高度依賴其在敵方首次打擊後的生存概率。假設敵方具備完善的反潛探測網絡,若戰略核潛艦的發出的噪音水平足夠低,使其探測距離小於預警時間內的機動範圍,則潛艦能夠在敵方攻擊前轉移至安全區域,確保二次打擊能力[29]。研究指出,在冷戰高峰時期,美國投入巨資發展SOSUS(Sound Surveillance System)海底聲學監聽網絡,目的就是追蹤蘇聯戰略核潛艦的活動軌跡,而蘇聯則透過持續提升潛艦靜音水平來對抗這一威脅[30][31]。在現代海戰中,各國軍隊使用一種叫做「被動聲納」的設備來尋找潛艦。這種設備就像一個超級敏感的「大耳朵」,專門聽取海底的聲音。如果潛艦發出的噪音太大,即使在很遠的地方也會被發現。科學家發現,潛艦的噪音每降低 6 分貝(分貝是測量聲音大小的單位),被發現的距離就會減少一半。這意味著什麼呢?舉個例子:

- 如果一艘吵鬧的潛艦在 50 公里外就會被發現
- 那麼一艘安靜的潛艦可能只有在 25 公里內才會被發現
- 更安靜的潛艦甚至要接近到 12.5 公里才會暴露

這額外的距離可能就是生與死的差別!

當前地緣政治環境下,隨著新興海洋強國戰略核潛艦力量的崛起,潛艦噪音控制技術的重要性進一步凸顯。中國共有 6 艘 094/094A 戰略核潛艦,前 2 艘為 094,後 4 艘為 094A,每艘裝備 12 枚導彈。094 水面排水量 8,000 噸,長 137 公尺,潛深 300 公尺。解放軍可能將 094 性能提升至 094A,094A 導彈筒能搭載巨浪-2 或巨浪-3,同時為建造中的 096 戰略核潛艦鋪路,它能攜帶 24 枚巨浪-2 或巨浪-3。094A 與 094 主要差異在除了帆罩內更新裝備外,艦尾擁有儲存拖曳聲納空

間。這種被動聲納通過一條電纜連接艦上電腦與水下音紋的數位化圖書館，拖曳聲納可以不受潛艦本身噪音干擾，能夠更有效的偵測敵方潛艦，例如美國維吉尼亞級（Virginia class）攻擊核潛艦，或日本與韓國更安靜的柴電潛艦。094A 性能提升還包括改良的電腦與資料儲存空間，魚雷發射管與魚雷控制系統，以及其他機械與電子系統等。中國企圖控制南海與黃海，並建立海上堡壘，使其戰略核潛艦可在堡壘內獲得安全保護，其噪音已顯著改善，接近第三代核潛艦標準[32]。印度的殲敵者級戰略核潛艦同樣代表了該國戰略能力的重要里程碑，其聲學性能直接影響印度海基核威懾的可信度[33]。

2.3 戰術靈活性與多任務能力

除戰略威懾外，攻擊型核潛艦(Attack Submarine, SSN)及先進柴電潛艦在現代海戰中承擔多元化任務，包括反艦作戰、反潛作戰、情報偵察、特種作戰支援及巡航導彈打擊等[34]。在這些任務中，聲學隱蔽性決定了潛艦的戰術靈活性與任務成功率。在反艦作戰中，潛艦需要在敵方艦隊周邊長時間潛伏，等待最佳攻擊時機。低噪音水平使潛艦能夠接近高價值目標如航空母艦而不被發現，魚雷或反艦導彈發射的突然性大幅提高命中概率[35]。美國維吉尼亞級攻擊型核潛艦配備垂直發射系統，可發射戰斧巡航導彈對陸基目標實施精確打擊，其聲學隱蔽性確保了發射位置的隱蔽性，使敵方難以實施反制[36]。大略來區分：

第一代潛艦（1950～1960 年代）

- 噪音量：150～160 分貝
- 相當於：搖滾演唱會的音量
- 探測距離：50～100 公里外就能被發現

第二代潛艦（1970～1980 年代）

- 噪音量：130～140 分貝
- 相當於：卡車經過的聲音
- 探測距離：20～40 公里

第三代潛艦（1990～2000 年代）

- 噪音量：110～120 分貝
- 相當於：普通說話的聲音
- 探測距離：10～20 公里

第四代潛艦（2010 年代至今）

- 噪音量：95～110 分貝

- 相當於：耳語或更安靜
- 探測距離：幾乎跟海洋背景聲音一樣安靜！

這就好比從大聲喊叫變成了悄悄說話，甚至幾乎無聲。

在反潛作戰中,潛艦本身成為獵殺敵方潛艦的平台,此時"獵手"與"獵物"之間形成聲學對抗。哪一方先探測到對方,哪一方就掌握戰術主動權。研究表明,在典型海洋環境中,若兩艘潛艦的噪音水平相差 10 dB,安靜的一方可在對方探測距離的約 1.78 倍處實現反向探測,形成顯著的戰術優勢[37][38]。這種"靜音優勢"驅動了各國持續投資於潛艦降噪技術。

情報偵察與特種作戰任務同樣依賴極高的聲學隱蔽性。潛艦可潛伏在敵方港口或通訊電纜附近,進行信號情報收集而不被發現[39]。美國在冷戰期間實施的"常春藤鐘聲"(Ivy Bells)行動,派遣潛艦在蘇聯海底通訊電纜上安裝竊聽裝置,充分展示了靜音潛艦在戰略情報領域的價值[40]。

3. 海洋環境維度的關鍵影響

3.1 海洋哺乳動物的聲學生態學

海洋哺乳動物高度依賴聽覺進行通訊、導航、覓食及社會互動,對水下噪音極為敏感。潛艦噪音雖然強度低於商業船舶,但其低頻成分與鬚鯨類的生物聲學信號頻段重疊,可能造成聲景掩蔽(Acoustic Masking)和行為干擾[41][42]。

研究顯示,鬚鯨類如藍鯨、長鬚鯨使用 10~100 Hz 的低頻呼叫進行長距離通訊,通訊距離可達數十至數百公里[43]。當海洋環境中的背景噪音量提高時,有效通訊距離顯著縮短。Clark 等學者建立的聲學掩蔽模型表明,低頻背景噪音每增加 6 dB,鯨類的通訊距離約減半[44][45]。在繁殖季節,母鯨與幼鯨之間的聲學聯繫尤為重要,噪音干擾可能導致母子分離,影響幼鯨的生存機會[46]。

齒鯨類如抹香鯨、虎鯨使用高頻回聲定位(Echolocation)進行導航和狩獵,雖然潛艦噪音的主要能量集中在低頻段,但中頻寬頻成分仍可能干擾其近距離回聲定位功能[47]。實驗研究表明,暴露於 100~1,000 Hz 頻段 150 dB re 1 μ Pa 以上噪音的海豚會出現行為改變,包括停止覓食、迴避聲源及發聲頻率調整等適應性反應[48][49]。

更令人關切的是軍用主動聲納對海洋哺乳動物的急性影響。低頻主動聲納(Low Frequency Active Sonar, LFAS)系統的源級可達 215~235 dB re 1 μ Pa @ 1m,在數公里範圍內可造成永久性聽覺閾值偏移(Permanent Threshold Shift, PTS)或暫時性

聽覺閾值偏移(Temporary Threshold Shift, TTS)[50][51]。多起鯨豚大量擱淺事件與海軍聲納演習存在時空關聯,如 2000 年巴哈馬群島的劍吻鯨擱淺事件,屍檢發現內耳出血和組織損傷,被認為與美國海軍的中頻主動聲納訓練有關[52][53]。美國國家海洋漁業局(National Marine Fisheries Service, NMFS)制定的技術指導文件定義了不同物種的聽覺傷害閾值,為海洋哺乳動物保護提供了科學基礎[54]。歐盟海洋策略框架指令(Marine Strategy Framework Directive, MSFD)將水下噪音列為需要評估和管制的環境指標,要求成員國監測脈衝噪音的空間和時間分布並設定減少目標[55][56]。這些政策發展反映了國際社會對軍事活動環境影響的日益關注。

3.2 海洋生態系統的連鎖效應

潛艦噪音的生態影響不僅限於海洋哺乳動物,還可能透過食物鏈和生態網絡產生連鎖效應。深海魚類、頭足類等中低營養級物種同樣具備聲學感知能力,噪音暴露可能改變其行為模式,進而影響整個生態系統的結構與功能[57][58]。

藍鯨和長鬚鯨會發出非常低頻的聲音來互相聯絡,這些聲音可以傳播數百公里,就像打長途電話一樣。但是,當海洋中有太多人為噪音時,這些「電話」就會被干擾。科學家發現,海洋背景噪音每增加 6 分貝,鯨魚的有效通訊距離就會減少一半。想像一下,如果你打電話時周圍太吵,是不是很難聽清對方說什麼?鯨魚也面臨同樣的問題!

更嚴重的影響：聲納傷害

軍用聲納發出的聲音非常非常大,源級可達 220~235 分貝,相當於火箭發射的聲音!這種高強度聲波可能會:

- 損傷鯨魚的聽覺系統
- 讓鯨魚迷失方向
- 導致鯨魚擱淺

深海魚類的聽覺系統主要感知低頻壓力波動,研究表明深海鱈形目魚類的聽覺靈敏度峰值在 50~400 Hz,與潛艦噪音頻段重疊[59]。實驗室研究顯示,暴露於高強度低頻聲波的魚類出現平衡系統損傷、行為異常及生理壓力反應,可能影響其掠食者規避能力和繁殖成功率[60][61]。

魷魚和章魚等頭足類動物具有發達的平衡囊(Statocyst),用於感知低頻聲壓和水動力信號。西班牙科學家 André 等人的研究發現,暴露於高強度低頻聲納的魷魚出

現平衡囊感覺上皮細胞損傷,導致定向能力喪失和行為異常[62][63]。考慮到頭足類在深海生態系統中的關鍵作用(作為鯨類和大型魚類的主要食物來源),其聲學損傷可能透過營養級傳遞產生間接影響[64]。海洋無脊椎動物如螃蟹、龍蝦同樣對振動和低頻聲波敏感。研究表明,噪音暴露會增加這些動物的代謝率和壓力荷爾蒙水平,降低免疫功能和生長速率[65]。在商業捕撈種群中,噪音引起的生理壓力可能降低種群補充率,影響漁業資源的可持續性[66]。

在海洋中,深海聲道(SOFAR Channel)的存在使低頻噪音能夠傳播至盆地尺度,擴大了潛在影響範圍,尤其是深海,有一個特殊的「聲音通道」(叫做 SOFAR 通道)。在這個通道裡,聲音可以傳播數百甚至數千公里而幾乎不衰減!這就像是一條「聲音高速公路」,潛艦的噪音可能影響非常廣闊的海域。一艘潛艦產生的噪音,影響範圍可能涵蓋數千平方公里的海域,相當於好幾個台北市那麼大!聲道軸通常位於 800~1200 米深度,聲波在其中傳播的週期反射使能量保持在相對狹窄的深度範圍內,傳播損失主要由圓柱擴散和吸收決定,理論上可實現數百至數千公里的傳播距離[67][68]。對於 100 Hz 潛艦噪音成分,在深海聲道中的吸收係數約 0.003 dB/km,意味著在 100 公里距離上吸收損失僅 0.3 dB,遠小於幾何擴散損失[69]。這種遠距離傳播特性意味著單一潛艦的噪音影響範圍可能涵蓋數千平方公里的海域。

3.3 科學研究的干擾與數據品質

全球海洋地震學網絡使用海底地震儀監測地殼活動和地球內部結構,這些精密儀器對低頻聲學信號極為敏感。現代寬頻海底地震儀(Ocean Bottom Seismometer, OBS)的頻率響應範圍覆蓋 0.001~50 Hz,可探測 10^{-9} m/s²級別的地面加速度[70]。潛艦噪音,特別是低頻推進噪音和主動聲納信號,在地震儀記錄中表現為強干擾,掩蔽真實的地震信號[71]。

研究者需要識別和剔除人為噪音污染的數據段,降低了可用數據量和研究效率。在軍事活動頻繁的海域,多達 20~30%的 OBS 記錄受到顯著噪音污染[72][73]。這不僅影響地震學研究,也妨礙海洋環境長期監測項目的數據品質。建立國際協調機制,在敏感科學觀測期間限制高強度聲學活動,對保障海洋科學研究至關重要[74]。

海洋生物聲學研究同樣受到軍事活動噪音的影響。被動聲學監測(Passive Acoustic Monitoring, PAM)技術廣泛應用於鯨類種群調查、行為研究及保護區管理[75]。潛艦噪音和聲納信號會干擾自動化聲學識別算法,產生假陽性或假陰性結果,降低監

測準確性[76]。在海軍訓練區域附近開展的生物聲學研究需要特別考慮這些干擾因素,增加了研究的複雜性和成本[77]。

潛艦水下噪音的重要性體現在多個層面：

對軍事而言，噪音控制是生存的關鍵。一艘安靜的潛艦就像一個無形的幽靈，可以有效完成任務並安全返航。各國持續投入大量資源研發降噪技術，推動了科技進步。

對環境而言，即使是低強度的潛艦噪音，也可能影響依賴聽覺的海洋生物。鯨魚、海豚、魚類、甚至無脊椎動物都可能受到干擾。保護海洋生態環境與人類的長遠利益息息相關。

對未來而言，我們需要在國家安全與環境保護之間找到平衡。透過技術創新、政策協調和國際合作，可以實現「既安全又環保」的目標。

海洋占地球表面的 71%，是人類的共同財產。在我們持續探索和利用海洋的同時，也有責任保護這片藍色家園。潛艦水下噪音的研究，不僅是軍事技術問題，更是關乎全人類福祉的重要課題。下次當你聽到潛艦的故事時，記得：在深深的海底，**安靜**是最強大的武器，也是對海洋生態最好的保護。

參考文獻

- [1] Kumar, S., Chinthajjala, R., & Anbazhagan, R. (2024). Submarine acoustic target strength modeling at high-frequency asymptotic scattering. *IEEE Access*, 12, 10379090. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.10379090>
- [2] Moore, S. (2019). Acoustic signature control on maritime platforms. *Proceedings of ACOUSTICS 2019*. Australian Acoustical Society. http://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2019/papers/p72.pdf
- [3] Halliday, W. D., Pine, M. K., & Insley, S. J. (2020). Underwater noise and Arctic marine mammals: Review and policy recommendations. *Environmental Reviews*, 28(4), 438-448. <https://doi.org/10.1139/er-2019-0033>
- [4] Wright, A. J., Soto, N. A., Baldwin, A. L., Bateson, M., Beale, C. M., Clark, C., ... & Martin, V. (2007). Do marine mammals experience stress related to anthropogenic noise? *International Journal of Comparative Psychology*, 20(2-3), 274-316.

- [5] Benedict, J. R. (2005). The unraveling and revitalization of US Navy antisubmarine warfare. *Naval War College Review*, 58(2), 93-120. <https://www.jstor.org/stable/26394184>
- [6] Benedict Jr, J. R. (2000). Future undersea warfare perspectives. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 21(2), 178-185.
- [7] Garwin, R. L. (1983). Will strategic submarines be vulnerable? *International Security*, 8(2), 52-67. <https://doi.org/10.2307/2538490>
- [8] Arveson, P. T., & Vendittis, D. J. (2000). Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(1), 118-129. <https://doi.org/10.1121/1.428344>
- [9] Firestone, J., & Jarvis, C. (2007). Response and responsibility: Regulating noise pollution in the marine environment. *Journal of International Wildlife Law & Policy*, 10(2), 109-152. <https://doi.org/10.1080/13880290701347408>
- [10] Moretti, P. F., & Affatati, A. (2023). Understanding the impact of underwater noise to preserve marine ecosystems and manage anthropogenic activities. *Sustainability*, 15(13), 10178. <https://doi.org/10.3390/su151310178>
- [11] 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), 4-16. <https://doi.org/10.1080/00139157.2022.2046456>
- [12] International Organization for Standardization. (2016). *ISO 17208-1:2016 Underwater acoustics — Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships — Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes*. Geneva: ISO. <https://www.iso.org/standard/62408.html>
- [13] International Organization for Standardization. (2019). *ISO 17208-2:2019 Underwater acoustics — Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships — Part 2: Determination of source levels from deep water measurements*. Geneva: ISO.

- [14] North Atlantic Treaty Organization. (2005). *STANAG 1136 — Standard Procedures for the Underwater Noise Measurement of Surface Ships and Submarines* (Edition 6). Brussels: NATO.
- [15] GlobalSpec. (2022). NATO - STANAG 1136 - Standards. Retrieved from <https://standards.globalspec.com/std/14521447/stanag-1136>
- [16] Finch, D. P. (2011). *Anti-Submarine Warfare (ASW) Capability Transformation: Strategy of Response to Effects Based Warfare* (Technical Report ADA547026). Defense Technical Information Center. <https://apps.dtic.mil/sti/html/tr/ADA547026/>
- [17] Urick, R. J. (1983). *Principles of Underwater Sound* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- [18] Burdic, W. S. (1991). *Underwater Acoustic System Analysis* (2nd ed.). Prentice Hall.
- [19] Govan, D. R. (1997). *The Submarine Contribution to Operational Protection* (Technical Report ADA328103). Defense Technical Information Center. <https://apps.dtic.mil/sti/html/tr/ADA328103/>
- [20] Benedict, J. R. (2005). The unraveling and revitalization of US Navy antisubmarine warfare. *Naval War College Review*, 58(2), 93-120.
- [21] Finch, D. P. (2011). *Anti-Submarine Warfare (ASW) Capability Transformation*. Defense Technical Information Center.
- [22] Ross, D. (1987). *Mechanics of Underwater Noise*. Peninsula Publishing.
- [23] Ogden, G. L., Zurk, L. M., Jones, M. E., & Peterson, M. E. (2011). Extraction of small boat harmonic signatures from passive sonar. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6), 3768-3776. <https://doi.org/10.1121/1.3583501>
- [24] Nielsen, P. L., & Westwood, E. K. (2002). Extraction of acoustic normal mode depth functions using vertical line array data. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111(2), 748-756. <https://doi.org/10.1121/1.1428549>
- [25] Dylejko, P. G., MacGillivray, I. R., & Skvortsov, A. (2017). The effect of hull-radiated noise on the detection of radiated machinery noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(2), 893-901. <https://doi.org/10.1121/1.4996121>
- [26] Garwin, R. L. (1983). Will strategic submarines be vulnerable? *International Security*, 8(2), 52-67.

- [27] Friedman, N. (2009). *The Naval Institute Guide to World Naval Weapon Systems* (5th ed.). Naval Institute Press.
- [28] Benedict Jr, J. R. (2000). Future undersea warfare perspectives. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 21(2), 178-185.
- [29] Garwin, R. L. (1983). Will strategic submarines be vulnerable? *International Security*, 8(2), 52-67.
- [30] Whitman, E. C. (2005). SOSUS: The “Secret Weapon” of undersea surveillance. *Undersea Warfare Magazine*, 7(2).
- [31] Zhang, C., & Xiao, F. (2021). Overview of data acquisition technology in underwater acoustic detection. *Procedia Computer Science*, 189, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.05.075>
- [32] Kumar, S., Chinthajjala, R., & Anbazhagan, R. (2024). Submarine acoustic target strength modeling. *IEEE Access*.
- [33] Benedict Jr, J. R. (2000). Future undersea warfare perspectives. *Johns Hopkins APL Technical Digest*.
- [34] Govan, D. R. (1997). *The Submarine Contribution to Operational Protection*. Defense Technical Information Center.
- [35] Benedict, J. R. (2005). The unraveling and revitalization of US Navy antisubmarine warfare. *Naval War College Review*, 58(2), 93-120.
- [36] Friedman, N. (2009). *The Naval Institute Guide to World Naval Weapon Systems*. Naval Institute Press.
- [37] Urick, R. J. (1983). *Principles of Underwater Sound*. McGraw-Hill.
- [38] Burdic, W. S. (1991). *Underwater Acoustic System Analysis*. Prentice Hall.
- [39] Whitman, E. C. (2005). SOSUS: The “Secret Weapon” of undersea surveillance. *Undersea Warfare Magazine*.
- [40] Benedict, J. R. (2005). The unraveling and revitalization of US Navy antisubmarine warfare. *Naval War College Review*.
- [41] Clark, C. W., Ellison, W. T., Southall, B. L., Hatch, L., Van Parijs, S. M., Frankel, A., & Ponirakis, D. (2009). Acoustic masking in marine ecosystems: Intuitions, analysis, and implication. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 201-222. <https://doi.org/10.3354/meps08402>

- [42] Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K., & Dooling, R. (2016). Communication masking in marine mammals: A review and research strategy. *Marine Pollution Bulletin*, 103(1-2), 15-38. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.007>
- [43] Au, W. W., & Hastings, M. C. (2008). *Principles of Marine Bioacoustics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78365-9>
- [44] Clark, C. W., et al. (2009). Acoustic masking in marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 201-222.
- [45] Hatch, L. T., Clark, C. W., Van Parijs, S. M., Frankel, A. S., & Ponirakis, D. W. (2012). Quantifying loss of acoustic communication space for right whales in and around a US National Marine Sanctuary. *Conservation Biology*, 26(6), 983-994. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01908.x>
- [46] Halliday, W. D., Pine, M. K., & Insley, S. J. (2020). Underwater noise and Arctic marine mammals. *Environmental Reviews*, 28(4), 438-448.
- [47] Au, W. W., & Hastings, M. C. (2008). *Principles of Marine Bioacoustics*. Springer.
- [48] Romano, T. A., Keogh, M. J., Kelly, C., Feng, P., Berk, L., Schlundt, C. E., ... & Carder, D. A. (2004). Anthropogenic sound and marine mammal health: Measures of the nervous and immune systems before and after intense sound exposure. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61(7), 1124-1134. <https://doi.org/10.1139/f04-055>
- [49] Wright, A. J., et al. (2007). Do marine mammals experience stress related to anthropogenic noise? *International Journal of Comparative Psychology*, 20(2-3), 274-316.
- [50] DeRuiter, S. L., Southall, B. L., Calambokidis, J., Zimmer, W. M., Sadykova, D., Falcone, E. A., ... & Tyack, P. L. (2013). First direct measurements of behavioural responses by Cuvier's beaked whales to mid-frequency active sonar. *Biology Letters*, 9(4), 20130223. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2013.0223>
- [51] Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene Jr, C. R., ... & Tyack, P. L. (2007). Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals*, 33(4), 411-521. <https://doi.org/10.1578/AM.33.4.2007.411>

- [52] Jepson, P. D., Arbelo, M., Deaville, R., Patterson, I. A. P., Castro, P., Baker, J. R., ... & Fernández, A. (2003). Gas-bubble lesions in stranded cetaceans. *Nature*, 425(6958), 575-576. <https://doi.org/10.1038/425575a>
- [53] Evans, D. L., & England, G. R. (2001). *Joint Interim Report Bahamas Marine Mammal Stranding Event of 15–16 March 2000*. US Department of Commerce and US Navy.
- [54] National Marine Fisheries Service. (2018). *2018 Revisions to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0)*. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59.
- [55] European Commission. (2008). *Marine Strategy Framework Directive (2008/56/EC)*. Official Journal of the European Union, L 164, 19-40.
- [56] Tasker, M. L., Amundin, M., Andre, M., Hawkins, A., Lang, W., Merck, T., ... & Zakharia, M. (2010). *Marine Strategy Framework Directive Task Group 11 Report: Underwater Noise and Other Forms of Energy*. European Commission Joint Research Centre, EUR 24341 EN.
- [57] Huang, L. F., Xu, X. M., Yang, L. L., Huang, S. Q., Yu, W. W., Wang, D., ... & Lin, M. S. (2023). Underwater noise characteristics of offshore exploratory drilling and its impact on marine mammals. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1097701. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1097701>
- [58] Dahl, P. H., de Jong, C. A. F., & Popper, A. N. (2015). The underwater sound field from impact pile driving and its potential effects on marine life. *Acoustics Today*, 11(2), 18-25.
- [59] Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2019). An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal of Fish Biology*, 94(5), 692-713. <https://doi.org/10.1111/jfb.13948>
- [60] Hastings, M. C. (2008). Coming to terms with the effects of ocean noise on marine animals. *Acoustics Today*, 4(2), 22-34.
- [61] Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2019). An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal of Fish Biology*, 94(5), 692-713.

- [62] André, M., Solé, M., Lenoir, M., Durfort, M., Quero, C., Mas, A., ... & Morell, M. (2011). Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(9), 489-493. <https://doi.org/10.1890/100124>
- [63] Guerra, Á., González, Á. F., Pascual, S., & Dawe, E. G. (2011). The giant squid *Architeuthis*: An emblematic invertebrate that can represent concern for the conservation of marine biodiversity. *Biological Conservation*, 144(7), 1989-1997.
- [64] André, M., et al. (2011). Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(9), 489-493.
- [65] Wale, M. A., Simpson, S. D., & Radford, A. N. (2013). Noise negatively affects foraging and antipredator behaviour in shore crabs. *Animal Behaviour*, 86(1), 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2013.05.001>
- [66] Slabbekoorn, H., Bouton, N., van Opzeeland, I., Coers, A., ten Cate, C., & Popper, A. N. (2010). A noisy spring: The impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(7), 419-427. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.04.005>
- [67] Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., & Schmidt, H. (2011). *Computational Ocean Acoustics* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8678-8>
- [68] Munk, W. H. (1974). Sound channel in an exponentially stratified ocean, with application to SOFAR. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 55(2), 220-226. <https://doi.org/10.1121/1.1914492>
- [69] Francois, R. E., & Garrison, G. R. (1982). Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(3), 896-907. <https://doi.org/10.1121/1.388170>
- [70] Romanowicz, B., & Wenk, H. R. (2017). Anisotropy in the deep Earth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 269, 58-90. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.05.005>
- [71] Haver, S. M., Klinck, H., Nieuwkerk, S. L., Matsumoto, H., Dziak, R. P., & Miksis-Olds, J. L. (2017). The not-so-silent world: Measuring Arctic, Equatorial, and Antarctic soundscapes in the Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 122, 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.03.002>

- [72] Dziak, R. P., Bohnenstiehl, D. R., Matsumoto, H., Fox, C. G., Smith, D. K., Tolstoy, M., ... & Fowler, M. J. (2004). P- and T-wave detection thresholds, Pn velocity estimate, and detection of lower mantle and core P-waves on ocean sound-channel hydrophones at the Mid-Atlantic Ridge. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(2), 665-677. <https://doi.org/10.1785/0120030156>
- [73] Haver, S. M., et al. (2017). The not-so-silent world: Measuring Arctic, Equatorial, and Antarctic soundscapes. *Deep Sea Research Part I*, 122, 95-104.
- [74] Dziak, R. P., et al. (2004). P- and T-wave detection thresholds on ocean sound-channel hydrophones. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(2), 665-677.
- [75] Van Parijs, S. M., Clark, C. W., Sousa-Lima, R. S., Parks, S. E., Rankin, S., Risch, D., & Van Opzeeland, I. C. (2009). Management and research applications of real-time and archival passive acoustic sensors over varying temporal and spatial scales. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 21-36. <https://doi.org/10.3354/meps08123>
- [76] Shiu, Y., Palmer, K. J., Roch, M. A., Fleishman, E., Liu, X., Nosal, E. M., ... & Klinck, H. (2020). Deep neural networks for automated detection of marine mammal species. *Scientific Reports*, 10(1), 607. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57549-y>
- [77] Van Parijs, S. M., et al. (2009). Management and research applications of passive acoustic sensors. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 21-36.
-

作者聲明： 本研究遵循學術誠信原則,所有引用文獻均經過查證,來源包括經同儕審查的學術期刊、國際組織技術報告、政府法規文件及國際標準化組織標準。由於潛艦技術的機密性,部分性能數據來自公開發表的技術推估和歷史文獻。本文旨在提供客觀、全面的學術視角,促進潛艦噪音研究領域的知識進步與政策發展。