

深海环境噪声监测技术发展现状与展望

陆哲哲¹, 朱心科¹, 杜新光², 李家彪^{1*}

1. 自然资源部第二海洋研究所海底科学实验室, 浙江杭州 310012

2. 深海技术科学太湖实验室, 江苏无锡 214028

摘要: 以往关于人类活动对海洋生态系统产生的影响讨论主要聚焦于污染物的排放、过度二氧化碳的排放及过度开发等, 然而人为噪声也是海洋生态系统的重要压力源之一。人为噪声的频率范围与海洋动物发出和感知的声音频率范围存在高度重合, 因此人为噪声的增加会影响海洋动物的行为、生理甚至生存。鉴于海洋声景的快速变化, 迫切需要发展深海环境噪声监测技术, 评估人为噪声对深海生态系统的影响, 从而针对性地减轻人类对海洋声景的影响, 服务于构建健康的海洋。本文立足国内外研究形势, 回顾人类活动影响下的海洋声景及深海噪声监测技术的发展情况, 介绍多个致力于海洋噪声监测和研究的国际大计划, 并呼吁相关机构及部门增强对海洋声景的关注, 鼓励先进技术的研发, 并制定相应的管理框架。

关键词: 海洋声景, 海洋生态系统, 人为噪声, 噪声监测技术

中图分类号: P715

收稿日期: 2023-07-26

Development and Prospect of Deep-Sea Environmental Noise

基金项目: 科技部国家重点研发计划项目“沉浮式智能组网的声学探测关键技术”(No. 2021YFC3101400); 深海技术科学太湖实验室揭榜挂帅项目“深海矿区环境噪声监测关键技术研究”(No. T7004-2022JBGS04001)。

作者简介: 陆哲哲(1994-), 女, 博士后, 主要从事海洋科学、海洋地球物理勘探相关研究工作。ORCID: 0000-0002-6910-9245. E-mail: luzz@sio.org.cn

***通讯作者简介:** 李家彪(1961-), 男, 中国工程院院士, 长期从事海底科学与探测技术研究。E-mail: jbli@sio.org.cn

Monitoring Technology

Lu Zhezhe¹, Zhu Xinke¹, Du Xinguang², Li Jiabiao^{1*}

1. Key Laboratory of Submarine Geosciences & Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 31002, China.
2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214028, China.

Previous discussions on the impact of human activities on the marine ecosystem mainly focused on issues such as pollutant emissions, excessive carbon dioxide emissions, and overexploitation. However, anthropogenic noise is also a significant stressor in the marine ecosystem. The frequency range of anthropogenic noise overlaps with the hearing range of marine animals, which can affect their behavior, physiology, and even survival. Given the rapid changes in the ocean soundscape, there is an urgent need to develop deep-sea environmental noise monitoring technology to assess the impacts of anthropogenic noise on deep-sea ecosystems and take targeted measures to mitigate the human impact on the ocean soundscape, serving the goal of constructing a healthy ocean. This paper is based on the domestic and international research situation, reviewing the development of marine soundscape and deep-sea noise monitoring technology under the influence of human activities, introducing several international initiatives dedicated to marine noise monitoring and research, and calling for increased attention from relevant organizations and departments to the ocean soundscape. It also encourages the development of advanced technologies and the establishment of corresponding management frameworks.

Key words: ocean soundscape; marine ecosystem; anthropogenic noise; noise monitoring technology

引言

提到人类活动对海洋生态系统的影响, 往往讨论的是有机污染物的排放影响海洋的水质和生态环境、过度二氧化碳的排放导致海洋酸化、过度开发导致生态失衡等 (孙松, 2002; Halpern et al., 2007; 焦念志和严威, 2022; 孙军, 2022)。本世纪以来, 学者们开始渐渐关注生态系统中自然声景这一关键要素, 而直到近十年

学者们才意识到声景在海洋生态系统中的作用 (Nystuen and Miksis-Olds, 2010; Boyd et al., 2011; 莫庄非, 2022)。海洋声景 (Ocean Soundscape) 指的是根据不同空间、时间、频率属性及声源类型定义的海洋环境声音 (Duarte et al., 2021)。

声音是海洋动物传播最远的感官线索, 从无脊椎动物到大型鲸鱼, 都利用声音来探索海洋环境, 并在物种内部和物种之间进行互动交流 (Winn, 1964; Kasumyan, 2009; Duarte et al., 2021)。随着海洋技术的发展, 人类海洋活动的增加导致了海洋声景发生显著的变化 (图 1)。自工业革命以来, 海洋生物及地质现象等产生的自然声音占比减少, 而航道开发及航运、地震勘探等科学调查、深海采矿等人为活动产生的声音占比大幅度增加。从生物学意义上讲, 大多数人为活动产生的声音都是“噪音”, 因为它非自然、非预期的信号, 会改变所有海域的声景, 严重破坏海洋生物使用声音作为工具的能力, 对其产生不利影响 (Ladich, 2008; Kunc et al., 2016; Simpson et al., 2016)。因此在评估海洋生态系统的累积压力时, 应该包括人为噪声这一要素 (Halpern et al., 2007)。为了构建健康的海洋, 迫切需要增强对海洋声景的关注, 鼓励监测技术、低噪技术的研发, 并制定相应管理框架。此外, 声波是水下传播信息的最佳途径, 能够远距离传播, 实现水下测距、目标定位、目标识别等探测 (周建波, 2018)。水声设备及相关监测技术可以为海上作战和军事行动提供重要支撑, 在海洋斗争和海洋防御中有着不可替代的作用 (郭杨阳, 2016)。

海洋环境噪声既是海洋的背景声场, 可以反演得到海洋环境参数; 也会对监测或测量造成信号的干扰, 限制着声纳系统的工作性能 (刘璐等, 2017; 周建波, 2018)。海洋环境噪声时空特性非常复杂, 需要进行长时间、大范围地测量才足以分析其时间域、频率域和空间域等特性 (肖鹏, 2017; 周建波, 2018; 尹云龙等, 2019; 韩梅等, 2020)。目前的海洋声学观测多集中于浅海, 缺乏深海特定区域 (如矿区、热液区等) 大范围、长周期、近实时的环境噪声监测数据 (杨绍琼等, 2022)。发展深海环境噪声监测技术可以帮助我们洞悉海洋声景, 评估人为噪声对深海生态系统的影响, 从而针对性地减轻人类对海洋声景的影响。同时, 相关监测技术的发展可以提高我国海洋开发能力, 维护国家海洋权益, 建设海洋强国。

1 人类活动影响下的海洋声景

了解海洋声景中不同声源的背景和相对贡献, 有助于深入了解人类活动如何

影响海洋声景以及海洋生物和海洋生态系统的整体健康。工业革命以前，海洋声景主要由不同海洋生物发出的声音、地震及海底火山喷发等天然地质过程产生的声音、风暴及冰雹等气候现象产生的自然声为主 (Wenz, 1962; Howe et al., 2019)。其中，海洋生物通过发出声音和探测声音来探索海洋，并达到一系列目的，包括导航、觅食、交流、吸引配偶和繁殖等 (Winn, 1964; Kasumyan, 2009)。图 1 为人类活动影响下的海洋声景，主要声源包括不同海洋生物发出的声音、地质及气候过程发出的天然声和人类活动产生的噪音 (图 1)。



图 1. 人类活动影响下的海洋声景 (修改自 Duarte et al., 2021)

Fig. 1 Ocean soundscapes influenced by human activities (modified after Duarte et al., 2021)

会对海洋声景造成影响的人类活动主要包括沿海的娱乐活动、渔民捕鱼、航道开发及航运、科学考察、军事活动、钻井平台等基础设施建设、矿区开采等 (图 1, 如 Erbe et al., 2013; Newhall et al., 2016; Pangerc et al., 2016; Erbe and McPherson, 2017)。研究表明，这些人为活动产生的噪声频率范围与海洋动物发出和感知的声音频率范围存在高度重合，主要介于 0.01kHz 至 10kHz (如 Slabbekoorn et al., 2010; Boyd et al., 2011; Simpson et al., 2016; Duarte et al., 2021)，因此人为噪声会干扰海洋生物对听觉信号的处理，可能导致其迁移错位、繁殖受阻、食物链中断等问题 (Erbe et al., 2016; Kunc et al., 2016; Erisman and Rowell, 2017; Howe et al., 2019; Lin et al., 2022)。渔民通过声纳探鱼器实现高效捕鱼，海军使用频率范围内的主动声纳来探测潜艇和其他目标。科学考察则包括地震勘探、多波束测深仪及侧扫声纳等多种声学技术，前者通过人工激发高能、低频、短时的地震波来研究洋壳结构，后者则通过发射较高频的声脉冲来刻画海底地形地貌 (Hildebrand, 2009; Fewtrell and McCauley, 2012; 孟祥羽, 2021)。此外，深海蕴

藏着地球上远未认知和开发的宝藏，当前国际深海采矿正处在勘探向开发过渡的关键时期，深海采矿的时代即将到来（Lodge and Verlaan, 2018；刘颖等, 2021），若不注重深海矿产资源开采过程中对海洋声景的影响，采矿车、运输装置等设备的运行必将对深海声景造成更大的压力（Levin et al., 2020）。

为了保护海洋生态系统和生物多样性，迫切需要减少人类活动对海洋声景的影响（Staaterman, 2017）。与其他污染源不同，人为噪声是典型的点源污染物，即一旦源头被移除，其影响就会迅速下降（Malakoff, 2010；Boyd et al., 2011；Parsons et al., 2020；Duarte et al., 2021）。因此，增强噪声监测和研究、制定相关政策和规范以减少噪声源、限制噪声排放、采取噪声隔离和缓冲等措施是保护海洋声景的重要举措，可以产生立竿见影的积极效果（Duarte et al., 2021）。其中，海洋噪声监测技术是开展海洋声景相关工作的基础和重要前提。

2 国内外海洋环境噪声监测技术发展现状

海洋环境噪声监测技术正在不断发展，并且得到越来越多的关注（沈新蕊等, 2018）。常用的传统声学背景场观测方式有基于测量船的测量方法，基于浮标、潜标的测量方法，基于岸基声呐的测量方法等（魏永星等, 2014），然而这些方法无法有效实现对深海环境噪声进行长时间、大范围、移动式的连续观测（尹云龙等, 2019）。学者们尝试了在各种监测平台搭载水听器（图 2）。

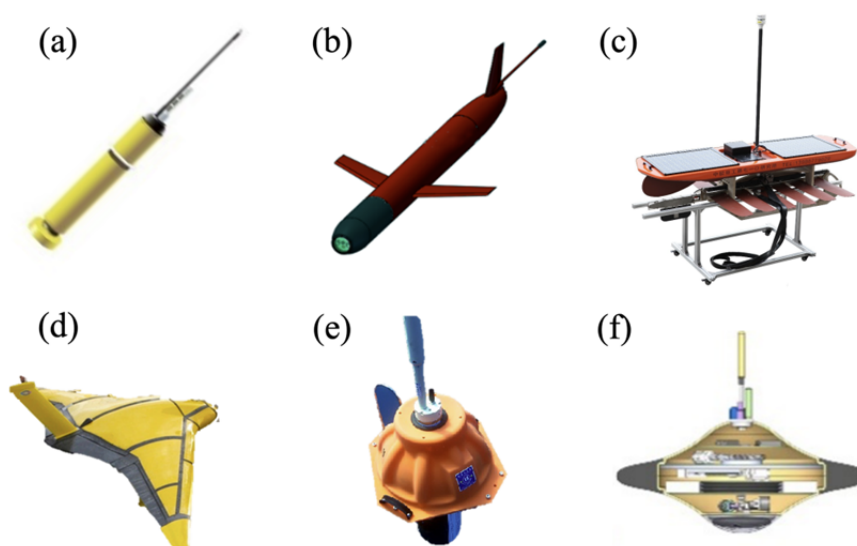


图 2. 可搭载水听器的监测平台

Fig. 2 Monitoring platform with hydrophone

(a) 浮标，如 Argo、Apex 浮标等；(b) 水下滑翔机，如 Slocum、Spray、Seaglider、海翼、海燕等；(c) 波浪滑翔机，如 Red Flash、海鳐等；(d) “飞翼”声学滑翔

机,如 X-Ray、Z-Ray 等;(e)球形声学仪,如海豚移动式海洋地震仪、MERMAID 等;(f)蝶形浮标。

Argo 计划是由法国国家海洋研究所 (IFREMER) 和美国国家海洋和大气的管理局 (NOAA) 于 20 世纪末提出的全球海洋观测计划,该项目推出后迅速得到了多个国家和地区的响应、支持和参与,目前提供了全球海洋 95% 的温度和盐度观测数据 (Roemmich et al., 2004)。学者们尝试了在 Argo 浮标上加载一系列微型、低功耗的传感器来加强对海洋生物地球化学的观测 (Johnson et al., 2009; 刘家林等, 2019)。近年来,有学者将矢量水听器 and Argo 浮标相结合,构建了一种新型水下声学浮标平台,对水中目标进行信号采集和预警探测,但是其在海洋声学方面的应用仍在适应性验证阶段 (刘璐等, 2017; 王超等, 2021)。Argo 浮标具有容易投放、体积小重量轻、工作周期长、成本低的优点 (图 2a),但是 Argo 浮标作业的重点在升沉剖面而不是在水平潜航,一般仅能实时观测海洋上层 2000m。此外,这种形式的水下声学浮标不具备自主航行控制能力,随洋流运动,难以实现对深海区域某一固定目标的连续追踪 (王超等, 2021)。

水下滑翔机能下潜至 6000 米甚至 8000 米并完成海洋环境和资源调查任务。目前国际上有“Slocum、Spray、Seaglider”等主流的水下滑翔机 (图 2b, 沈新蕊等, 2018),国外学者在这些平台基础上搭载声学测量系统,在研制与应用方面进行了大量尝试。美国成功研发了搭载矢量水听器阵列的 X-ray、Z-ray、Slucum 等典型样机 (图 2d)。与传统海洋环境噪声监测手段相比,搭载声学测量系统的水下滑翔机具有明显的优势,自噪声非常低、功耗低、对母船依赖小且机动灵活 (Alvarez et al., 2009; Van Uffelen et al., 2013)。国内对于水下滑翔机的研制工作主要集中于近十年,目前有中国科学院沈阳自动化研究所研制的“海翼”及天津大学研制的“海燕”等系列产品。相比于国外相对成熟的水下滑翔机,国产的滑翔机正在克服任务传感器搭载能力弱、数据难以实时回传、计算能力弱、续航能力有待提升等问题 (杨绍琼等, 2022)。国内学者们也尝试了在这些水下滑翔机搭载矢量水听器 (刘璐等, 2017; Liu et al., 2018; 王文龙等, 2019),但与国际水平相比,我们在水下无人平台和声学系统集成应用方面的研究较少,起步也相对较晚 (王超等, 2021)。值得提出的是,水下滑翔机虽然在锯齿形剖面观测中具有优势,但在长期深海水平潜航观测上并不具备优势。目前的海洋观测仍缺乏大范围、移动式、长周期、近实时的深海环境噪声监测数据。自然资源部第二海洋研究所在国

家重点研发计划和深海技术科学太湖实验室的支持下，正在研制可动态调节姿态、实现单剖面较大范围水平调节能力（ ≥ 5 km）的碟形浮标（图 2f），建立“滑翔下潜-定深漂移-垂直上浮”的工作模式，实现定向运动、定深悬浮和背景噪声信号稳定监测。目前，该碟形浮标已经完成了机械结构的设计，正在进行控制系统的设计工作。

3 海洋环境噪声监测国内外相关大计划及成果

海洋是全球性的系统，人类活动对海洋声景造成的噪声污染及对海洋生态系统产生的影响并不会局限于特定地区，而是涉及到整个海洋（Boyd et al., 2011; Duarte et al., 2021）。因此，增强对海洋环境噪声的监测和研究，管理海洋声景以确保海洋的可持续利用往往需要多个国际组织、研究机构和相关利益方的支持和参与（Lewandowski and Staaterman, 2020; Duarte et al., 2021）。近十年来，有多个重要的国际大计划致力于海洋噪声的监测和研究，如：

（1）全球海洋观测系统（Global Ocean Observing System, GOOS）：成立于 1991 年，由联合国教科文组织（UNESCO）、世界气象组织（WMO）、国际海洋科学委员会（SCOR）和国际海洋联合会（IAPSO）等国际组织合作发起（<https://www.goosocean.org>），旨在建立全球海洋综合观测网络，提供时空变化的海洋数据和信息。GOOS 于 2023 年提出了海洋声音基本变量实施计划（Ocean Sound Essential Ocean Variables Implementation Plan），致力于将“海洋噪声”作为基本海洋变量进行监测和评估，以积极响应联合国海洋科学促进可持续发展十年（2021-2030 年）。

（2）国际宁静海洋实验计划（International Quiet Ocean Experiment, IQOE）：成立于 2015 年，由联合国教科文组织（UNESCO）和国际海洋科学委员会（SCOR）发起，特别关注深海地区，旨在推动海洋噪声研究和监测，协调国际研究界量化海洋声景，并研究声音与关键海洋生物生存能力之间的功能关系以了解噪声对深海生态系统的影响，为减少人为噪声对海洋环境的影响提供科学依据（Boyd et al., 2011）。IQOE 发起了成立“世界海洋被动声学监测日（World Ocean Passive Acoustics Monitoring (WOPAM) Day）”的倡议，并将 2023 年 6 月 8 日定为首个世界海洋被动声学监测日（<https://www.iqoe.org>）。

（3）海洋声环境十年研究计划（Ocean Decade Research Programme on the

Maritime Acoustic Environment, OD-MAE): 联合国“海洋十年”大科学计划, 实施于 2022 年 1 月至 2031 年 12 月, 旨在监测和客观地描述区域到全球范围内的海洋声学景观 (<https://oceandecade.org/actions/ocean-decade-research-programme-on-the-maritime-acoustic-environment-un-mae/>)。

这些大计划致力于通过国际合作以创新海洋噪声监测技术、建立全球海洋噪声监测网络、共享海洋声学数据库、推动科学研究、建立合理的噪声评估方法和预警系统、制定保护海洋声景的政策和法规, 从而加强对海洋噪声问题的认识, 推动海洋声景保护和生态系统的可持续发展 (Lewandowski and Staaterman, 2020; Duarte et al., 2021)。我国积极参与 IQOE、GOOS 等国际大计划, 推动建立全球海洋噪声监测网络。相关科研机构 and 大学也开展了许多自主的海洋声学研究 (如刘璐等, 2017; 周建波, 2018; 王文龙等, 2019; 王超等, 2021; Dong et al., 2023), 涉及海洋噪声的监测技术、数据处理和分析、建模仿真、生态影响评估等方面。

中国科学院声学研究所作为中国海洋声学领域的重要力量之一, 在水声物理与水声探测技术、环境声学及噪声控制技术、声学及数字系统集成技术等方面开展了大量研究 (如李家亮等, 2015; Yan et al., 2020)。近年来, 声学所产出了一系列从浅海到深海的声学技术成果, 如自主研制了“奋斗者”号声学系统, 实现了万米深度下的高速数字水声通信; 减振降噪技术成功应用于高速动车组和大飞机的噪声监测与控制。中国科学院深海科学与工程研究所开展了深海信息可视化观测及大数据融合技术、海洋哺乳动物生物声学的相关研究 (如 Lin et al., 2022; Parsons et al., 2022; Dong et al., 2023)。建立了国际上首个南海海洋哺乳动物物种数据库, 揭示物种多样性, 填补了国际上南海深潜及远海鲸类认知的空白 (Liu et al., 2022a, 2022b; Parsons et al., 2022); 实现了海洋复杂噪声环境中鲸类声信号精确识别技术, 在南海地区构建了鲸类声学观测和保护的理论及技术框架; 成功实施了广阔空间和长时间尺度的鲸类声学观测应用, 同时运用船舶航速和距离管理的声学保护方法, 提出了“当地生态认知-目视-声学”相结合的整合式鲸类生态研究新范式。哈尔滨工程大学水声工程学院也在海洋环境声学特性、水中目标特性测试与控制技术、水深定位与目标探测、水声通信及网络技术、极地声学及仿真技术等方面开展了大量研究 (杨德森等, 2013)。南方科技大学海洋科学与工程系

在海洋地震学领域开展了大量研究,利用密集地震台阵揭示地球壳幔结构。分别在西南印度洋和南海主持了大规模海底地震台阵观测试验(Jian et al., 2016; Yu et al., 2023),并在2018年发起了南太平洋超地幔柱探测国际合作计划(South Pacific Plume Imaging and Modeling, SPPIM)。另外,南科大团队研发出了新一代分体式、宽频带地震仪——磐鲲,数据记录续航达15个月,最大安全回收续航达2年,已进入产业化应用阶段,相关的技术指标达到了国际领先水平。

4 深海噪声监测技术发展展望

海洋环境中存在丰富的低频(小于0.01kHz)和低频(大于10kHz)声学信号(Miksis-Oldsa and Nichols, 2015; Duarte et al., 2021)。为了采集更全面的“声音指纹”,形成标准样品库,构建更好的海洋声景,促进海洋生态系统的可持续发展,深海噪声监测技术的未来发展需要在海洋噪声监测平台和网络建设、新兴技术的引入及国际合作等多个维度持续努力,进行突破(Erbe et al., 2017; Sertlek et al., 2019; Parsons et al., 2022)。

监测平台是深海噪声监测系统的重要组成部分,应具有较高的可靠性和稳定性,能够在复杂的海洋环境中长期运行(张伙带等, 2015; 郭杨阳, 2016)。此外,监测平台还应该具有适应性和可扩展性、较高的数据采集精度和实时性,满足不同深度、不同位置和不同环境的监测需求,并实时采集和传输深海噪声监测数据(罗亮等, 2019; 耿铭晨等, 2021)。比如,在深海中布设水听器阵列是一项复杂的任务。优化水听器的布设和排列方式,考虑水深、地形、声源分布和信号传播特性等因素,可以提高监测的效率和精度(Wang et al., 2014; Najeem et al., 2017)。另外,结合不同类型的监测平台和手段形成观测网络,如短期目标探测和长期巡航监测相结合,静态坐底观测和利用浮标移动监测相结合等,多平台协同探测可以提供多维度的数据,增加海洋噪声监测的空间和时间分辨率(张伙带等, 2015)。

其次,随着科技的不断发展和进步,深海噪声监测技术的发展也需要引入新兴技术,如新型传感器技术、建模验证仿真技术、人工智能技术及云计算和大数据技术等(如王凤华, 2015; Shaikh et al., 2019; 姜涛, 2020; 解静等, 2020; 李爽, 2021)。传统的深海声学传感器大多是基于压电传感器和磁电传感器的,而近年来微型化、智能化和多功能化的新型传感器技术快速发展,如光纤传感器、MEMS传感器、无线传感器网络等(王静, 2009; 周琳, 2011; 张小磊, 2019; 耿铭晨等,

2021), 这些技术可以提高传感器的灵敏度、分辨率和可靠性, 扩展传感器的监测范围和深度, 从而提高深海噪声监测的准确度和实时性。深海噪声源时空分布复杂, 形成了极其复杂的海洋环境噪声场(吴静, 2007; 贾生平和雷志雄, 2018), 发展前沿、针对性的噪声建模及验证、并进行仿真实验, 有助于更好地了解海洋环境噪声场的时空特性(Duda et al., 2019; 黄益旺, 2019), 并获取声信号中所包含的海洋环境、物种多样性等生态信息、地震及热液活动等地质过程信息及人为活动信息(如刘勋, 2015; Zhang et al., 2015; Butler et al., 2017; 周建波, 2018)。同时, 在监测过程中引入深度学习、机器学习和神经网络等人工智能技术可以帮助监测人员对大量复杂的监测数据进行分析 and 处理(解静等, 2020), 自动识别和分类海洋动物的声音, 分析和预测海洋噪声的分布规律和变化趋势(沈新蕊等, 2018)。此外, 云计算和大数据技术的引入, 可以实现海量数据的存储、管理和处理, 提高数据的处理效率和准确性(Shaikh et al., 2019; 钟琳, 2019; 刘帅等, 2020), 同时可以对数据进行多维度的分析和可视化展示, 帮助科研人员更好地理解 and 利用数据, 从而更好地研究海洋噪声的影响及其对海洋生态系统的影响(陈林琳, 2018; 华彦宁, 2018)。

最后, 跨国界性的合作是实现深海环境噪声监测和海洋声景保护的必要手段(Boyd et al., 2011; Lewandowski and Staaterman, 2020; Duarte et al., 2021)。各国应该建立相应的国际合作管理机制和框架, 加强政策和法律法规的协调、技术交流和资源共享、人才联合培养及学术交流(Lewandowski and Staaterman, 2020)。各个国家的大学和研究机构间的“民间”合作可以促进资源共享和优势互补, 发挥各自的优势和特长推动技术的不断创新, 提高海洋噪声数据的质量和精度。国际组织则可以为各国共同合作及解决全球性问题提供平台及机会, 协调全球性的海洋环境噪声观测网络, 促进数据共享和标准化, 确保海洋噪声数据的全面覆盖和有效整合(Boyd et al., 2011)。

综上所述, 深海环境噪声监测应该向“全球化、无人化、网络化、低成本、低功耗”方向发展, 最终构建全球智能实时水声监测网络(Boyd et al., 2011; 张伙带等, 2015; 罗亮等, 2019; Duarte et al., 2021)。例如李家彪等近年倡导推动的“深音工程”大计划, 该项目计划以海底天然地震作为主要声源, 兼顾海洋中的其他声源, 通过移动和固定结合的智能探测系统记录各类声波, 通过卫星传输数

据，照亮地球深部和水圈。“深音工程”致力于构建海洋深部探测智能网，获取全球海洋声场时空分布及变化规律，将海洋动力观测时代发展到海洋声学观测时代。

5 结论

人类活动正迅速改变着海洋声景，影响海洋生物的多样性及海洋生态系统的健康。越来越多的组织呼吁将“人为噪声”作为海洋生态系统的压力源之一，并鼓励减轻噪音污染。发展深海环境噪声监测技术是开展海洋声景及减轻人为噪声污染相关工作的基础和重要前提。该技术正在高速发展，并且得到越来越多的关注，学者们尝试了在各种监测平台搭载水听器。目前，已有多个国际大计划致力于海洋噪声的监测和研究，我国相关单位也开展了大量研究。为了更好地监测海洋声景，促进海洋生态系统的可持续发展，应在海洋噪声监测平台和网络建设、新兴技术的引入及国际合作等多个维度进行突破。深海环境噪声监测应该向“全球化、无人化、网络化、低成本、低功耗”方向发展，最终构建全球智能实时水声监测网络。

References

- Alvarez, A., Caffaz, A., Caiti, A., et al., 2009. Fòlaga: A Low-cost Autonomous Underwater Vehicle Combining Glider and AUV Capabilities. *Ocean Engineering*, 36(1): 24–38.
- Boyd, I. L., Frisk, G., Urban, E., 2011. An International Quiet Ocean Experiment. *Oceanography*, 24(2): 174–181.
- Butler, J., Butler IV, M. J., Gaff, I. V. H., 2017. Snap, crackle, and pop: Acoustic-based model estimation of snapping shrimp populations in healthy and degraded hard-bottom habitats. *Ecol. Indic.*, 77: 377–385.
- Chen, L. L., 2018. Optimization and management of large scale marine data based on cloud platform. *Ship Science and Technology*, 40 (24): 163-165 (in Chinese with English abstract).
- Dong, L. J., Liu, M. M., Lin, W. Z., et al., 2023. Acoustic evidence of Cuvier's beaked whales (*Ziphius cavirostris*) in the northern South China Sea. *Marine Mammal Science*, 1-11.
- Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., et al., 2021. The soundscape of the Anthropocene ocean. *Science*, 371(6529): eaba4658.
- Duda, T. F., Lin, Y. T., Newhall, A. E., et al., 2019. Multiscale multiphysics data-informed modeling for three-dimensional ocean acoustic simulation and prediction. *J. Acoust. Soc. Am.*, 146(3): 1996-2015.
- Erbe, C., McCauley, R., McPherson, C., et al., 2013. Underwater noise from offshore oil production vessels. *J. Acoust. Soc. Am.*, 133: 465–470.
- Erbe, C., McPherson, C., 2017. Underwater noise from geotechnical drilling and standard penetration testing. *J. Acoust. Soc. Am.*, 142: 281-285.
- Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., et al., 2016. Dooling, Communication Masking in Marine Mammals: A Review and Research Strategy. *Mar. Pollut. Bull.*, 103: 15–38.
- Erisman, B. E., Rowell, T. J., 2017. A Sound Worth Saving: Acoustic Characteristics of a Massive Fish Spawning Aggregation. *Biol. Lett.*, 13: 20170656.

- Fewtrell, J. L., McCauley, R. D., 2012. Impact of Air Gun Noise on the Behaviour of Marine Fish and Squid. *Mar. Pollut. Bull.*, 64: 984–993.
- Geng, C. M., Shi, X. T., Liu, R., et al., 2021. Research on marine environment monitoring system based on Wireless Sensor Network. *Electronic Test*, 05: 93-94+124 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Y. Y., 2016. Portable Underwater Acoustic Buoy Monitoring System. *Shanghai Jiao Tong University* (in Chinese with English abstract).
- Halpern, B. S., Selkoe, K. A., Micheli, F., et al., 2007. Evaluating and Ranking the Vulnerability of Global Marine Ecosystems to Anthropogenic Threats. *Conserv. Biol.*, 21: 1301–1315.
- Han, M., Wang, C., Sun, Q. D., et al., 2020. Measurement and Analysis of Ambient Noise in the South China Sea Based on Underwater Acoustic Buoy. *Journal of Applied Acoustics.*, 39(4): 536-542 (in Chinese with English abstract).
- Hildebrand, J. A., 2009. Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 395: 5–20.
- Howe, B. M., Miksis-Olds, J., Rehm, E., et al., 2019. Observing the Oceans Acoustically. *Front. Mar. Sci.*, 6: 426.
- Hua, Y. N., Zhou, X., Chen, Y. Y., 2018. Application of cloud computing for marine environmental information. *Science & Technology Review*, 36(14): 42-56 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y. D., 2019. Review of the spatial correlation modeling of ocean ambient noise. *Journal of Applied Acoustics*, 38(4): 729-733 (in Chinese with English abstract).
- Jia, P. S., Lei, Z. X., 2018. Representation of Non - Gaussian Ocean Background Field Based on Hierarchical Mixture Model. *Audio engineering*, 42(2): 41-50 (in Chinese with English abstract).
- Jian, H. C., Singh, S. C., Chen, Y. J., et al., 2016. Evidence of an axial magma chamber beneath the ultraslow- spreading Southwest Indian Ridge. *Geology*, 45(2): 143-146.
- Jiao, N. Z., Yan, W., 2022. How to Achieve Carbon Neutrality through Ocean

- Negative Carbon Emissions? *Earth Science*, 47(10): 3922-3923 (in Chinese).
- Jiang, T., 2020. Research and application of dynamic monitoring system of Marine ecological environment based on Internet of Things. *Information&Communications*, 07: 128-129 (in Chinese).
- Johnson, K. S., Berelson, W. M., Boss, E., et al., 2009. Observing Biogeochemical Cycles at Global Scales with Profiling Floats and Gliders Prospects for a Global Array. *Oceanography*, 22(3): 216-225.
- Kasumyan, A. O., 2009. Acoustic Signaling in Fish. *J. Ichthyol.*, 49: 963–1020.
- Kunc, H. P., McLaughlin, K. E., Schmidt, R., 2016. Aquatic Noise Pollution: Implications for Individuals, Populations, and Ecosystems. *Proc. Biol. Sci.*, 283: 20160839.
- Ladich, F., 2008. Sound Communication in Fishes and the Influence of Ambient and Anthropogenic Noise. *Bioacoustics*, 17: 34–38.
- Levin, L. A., Amon, D. J., Lily, H., 2020. Challenges to the Sustainability of Deep-Seabed Mining. *Nature Sustainability*, 3: 784–794.
- Lewandowski, J., Staaterman, E., 2020. International Management of Underwater Noise: Transforming Conflict into Effective Action. *J. Acoust. Soc. Am.*, 147: 3160–3168.
- Li, J. L., Lin, J. H., Guo, S. M., et al., 2015. Effects of shallow water waveguide interface on the particle velocity direction from point sources. *Journal of Applied Acoustics*, 34(3): 249-254 (in Chinese with English abstract).
- Li, S., 2021. Research on Frequency Hopping Underwater Acoustic Communication for Marine Environmental Monitoring. *Xiamen University* (in Chinese with English abstract).
- Lin, M. L., Turvey, S., Liu, M. M., et al., 2022. Lessons from extinctions of dugong populations. *Science*. 378.
- Liu, J. L., Li, X. F., Yang, S. B., et al., 2019. Research Status and Progress of the "FUXING" Autonomous Profiling Float. *Journal of Ocean Technology*, 38(6): 17-23 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., Lan, S. Q., Xiao, L., et al., 2017. Measurement System of Ambient Sea Noise

- Based on the Underwater Glider. *Journal of Applied Acoustics*, 36(4): 370-376 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., Xiao, L., Lan, S., et al., 2018. Using petrel II Glider to Analyze Underwater Noise Spectrogram in the South China Sea. *Acoustics Australia*, 46(2): 151–158.
- Liu, S., Liu, F. C., Liu, J. M., 2020. Review on the Research of Cloud Internet of Things Marine Monitoring System. *The China Automation congress, CAC2020*: 111-115 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X., 2015. Modeling and directivity analysis of ship density noise in deep sea noise field. *Acoustics and Electronics Engineering*, 03: 5-7 (in Chinese).
- Liu, M. M., Lin, M. L., Li, S. H., 2022a. Species diversity and spatiotemporal patterns based on cetacean stranding records in China. *Science of The Total Environment*. 1950-2018.
- Liu, M. M., Lin, M. L., Dong, L. J., et al., 2022b. An integrated strategy for monitoring cetaceans in data-poor regions. *Biological Conservation*, 272: 109648.
- Liu, Y., Li, J. B., Wang, Y. J., et al., 2021. Development and Prospect of Exploration and Research on Seafloor Polymetallic Sulfides of China, *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 31(10): 2624-2637 (in Chinese with English abstract).
- Lodge, M. W., Verlaan, P. A., 2018. Deep-Sea Mining: International Regulatory Challenges and Responses. *Elements*, 14(5): 331-336.
- Luo, L., Peng, C., Leng, J. X., 2019. Design and implementation of recyclable underwater acoustic network monitoring node. *Ship Science and Technology*. 41(01): 116-120 (in Chinese with English abstract).
- Malakoff, D., 2010. A push for Quieter Ships. *Science*, 328: 1502–1503.
- Meng, X. Y., 2021. Research on Reflection Seismic Data's Response and Related Processing Methods in Complicated Ocean Acoustic Environment. *Jilin University* (in Chinese with English abstract).
- Miksis-Oldsa, J. L., Nichols, S. M., 2015. Is low frequency ocean sound increasing globally? *J. Acoust. Soc. Am.*, 139: 501–511.
- Mo, Z. F., 2022. The Oceans isn't Just Warming, the Underwater Soundscape is

- Changing. *World Science*, 07: 29-30 (in Chinese).
- Najeem, S., Kiran, K., Malarkodi, A., et al., 2017. Open Lake Experiment for Direction of Arrival Estimation Using Acoustic Vector Sensor Array. *Applied Acoustics*, 119: 94–100.
- Newhall, A. E., Lin, Y. T., Miller, J. H., et al., 2016. Monitoring the Acoustic Effects of Pile Driving for the First Offshore Wind Farm in the United States. *J. Acoust. Soc. Am.*, 139: 2181.
- Nystuen, J., Miksis-Olds, J., 2010. Soundscapes under sea ice: Can we listen for open water? *J. Acoust. Soc. Am.*, 127, 1728.
- Pangerc, T., Theobald, P. D., Wang, L. S., et al., 2016. Measurement and characterisation of radiated underwater sound from a 3.6 MW monopile wind turbine. *J. Acoust. Soc. Am.*, 140: 2913–2922.
- Parsons, M. J. G., Duncan, A. J., Parsons, S. K., et al., 2020. Reducing vessel noise: An example of a solar-electric passenger ferry. *J. Acoust. Soc. Am.*, 147: 3575–3583.
- Parsons, M. J. G., Lin, T. H., Mooney, T. A., et al., 2022. Sounding the Call for a Global Library of Underwater Biological Sounds. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10: 810156.
- Roemmich, D., Riser, S., Davis, R., et al., 2004. Autonomous Profiling Floats: Workhorse for Broad-scale Ocean Observations. *Marine Technology Society Journal*, 38(2): 21-29.
- Sertlek, H. O., Slabbekoorn, H., Cate, C. T., 2019. Source Specific Sound Mapping: Spatial, Temporal and Spectral Distribution of Sound in the Dutch North Sea. *Environ. Pollut.*, 247: 1143-1157.
- Shaikh, S. F., Hussain, M. M., 2019. Marine IoT: non-invasive wearable multisensory platform for oceanic environment monitoring. IEEE 5th World Forum on Internet of Things. *Piscataway, NJ: IEEE Press*, 309-312.
- Shen, X. R., Wang, Y. H., Yang, S. Q., et al., 2018. Development of Underwater Gliders: An Overview and Prospect. *Journal of Unmanned Undersea Systems*,

- 26(2): 89-106 (in Chinese with English abstract).
- Simpson, S. D., Radford, A. N., Nedelec, S. L., 2016. Anthropogenic Noise Increases Fish Mortality by Predation. *Nat. Commun.*, 7: 10544.
- Slabbekoorn, H., Bouton, N., van Opzeeland, I., et al., 2010. A Noisy Spring: The Impact of Globally Rising Underwater Sound Levels on Fish. *Trends in Ecology & Evolution*, 25: 419–427.
- Staaterman, E., 2017. Do bioacoustic conditions reflect species diversity? A case study from four tropical marine habitats. *J. Acoust. Soc. Am.*, 141: 3937–3938.
- Sun, J., 2022. How Many Pathways We Have for the Marine Carbon Neutrality? *Earth Science*, 47(10): 3927-3928 (in Chinese).
- Sun, S., 2002. Impacts of Human Activities on Marine Ecosystems. *Impact of Science on Society*, 1: 1-5 (in Chinese).
- Van Uffelen, L. J., Nosal, E. M., Howe, B. M., et al., 2013. Estimating Uncertainty in Subsurface Glider Position Using Transmissions from Fixed Acoustic Tomography Sources. *J. Acoust. Soc. Am.*, 134(4): 3260–3271.
- Wang, C., Han, M., Sun, Q. D., et al., 2021. Application of a New Type of Underwater Acoustic Buoy in Target Detection. *Journal of Tropical Oceanography*, 40 (2): 130-138 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. H., 2015. Design and implementation of synchronous monitoring system of marine sound field and dynamic environment based DDS. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 34(12): 77-81 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Chen, J. F., Zhang, L. J., 2009. Underwater sensor networks. *Technical Acoustics*, 28(01): 89-95 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. L., Wang, C., Han, M., et al., 2019. Research on Application of Vector Hydrophone onboard an Underwater Glider. *Acta Armamentarii*, 40(12): 2580-2586 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. H., Chen, J. F., Han, J., et al., 2014. Optimization for the Direction of Arrival Estimation Based on Single Acoustic Pressure Gradient Vector Sensor. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(1): 74–86.

- Wei, Y. X., Yu, J. H., Chang, Z., et al., 2014. Signal Processing and Temporal-Spatial Characteristic Analysis of Ocean Ambient Noise Data. *Electronic Design Engineering*, 22(14): 28-30 (in Chinese with English abstract).
- Wenz, G. M., 1962. Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and sources. *J. Acoust. Soc. Am.*, 34, 1936–1956.
- Winn, H. E., 1964. The Biological Significance of Fish Sounds. *Mar. Bio-Acoustics*, 2: 213–231.
- Wu, J., 2007. Research on Ocean Ambient Noise Modeling. *Harbin Engineering University* (in Chinese with English abstract).
- Xie, J., Chang, J., Sun, J. W., et al., 2020. Key technologies and applications of hydro-observation real-time sharing. *Marine Environmental Science*, 39(02): 302-308 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J., Su, X. J., Xu, D., et al., 2020. Sound transmission from air into shallow water through rough sea surfaces by small slope approximation. *Chinese Journal of Acoustics*, 39(1): 53-63.
- Yang, D. S., Гордиенко, B. A., Hong, L. J., 2013. Theory and application of underwater vector sound field. *Science Press* (in Chinese).
- Yang, S. Q., Cheng, D., Chen, G. Y., et al., 2022. Review on the Application of Underwater Gliders for Observing Typical Ocean Phenomena. *Journal of Tropical Oceanography*, 41(3): 54-74 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y. L., Yang, M., Yang, S. Q., et al., 2019. Research on Observation Technology of Oceanic Acoustic Background Field Based on Underwater Glider. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 27(5): 555-561 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Y., Chen, Y. J., Guo, Z., et al., 2023. Long-term seismic network in South China Sea by floating MERMAIDS. *Science China Earth Sciences*, 66.
- Zhang, H. D., Zhang, J. P., Zhu, B. Y., 2015. Progress in the construction of submarine observation networks at home and abroad. *Marine Geology Frontiers*, 31(11): 64-70 (in Chinese).
- Zhang, X. L., Guan, W. C., Jiang, T., 2019. Research on Marine environment

monitoring based on Internet of Things. *Practical Electronics*, 19: 46-47+26 (in Chinese).

Zhang, Y., Shi, F., Song, J., et al., 2015. Hearing characteristics of cephalopods: Modeling and environmental impact study. *Integr. Zool.*, 10: 141–151.

Zhong, L., 2019. Software development of marine telecommunication design in cloud computing environment. *Ship Science and Technology*, 41(18): 118-120 (in Chinese with English abstract).

Zhou, J. B., 2018. Research About Modeling and Application Vertical Direction Characteristics of Ocean Ambient Noise. *Harbin Engineering University* (in Chinese with English abstract).

Zhou, L., 2011. Study on Underwater Acoustic Communication Simulation Technique and Channels Estimation Algorithm for Environmental Monitoring in Far-reaching Sea. *Ocean University of China* (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈林琳. 2018. 基于云平台的大规模海洋数据优化与管理. *舰船科学技术*, 40(24): 163-165.

耿铭晨, 石学涛, 刘儒, 等, 2021. 基于无线传感器网络的海洋环境监测系统研究. *电子测试*, 05: 93-94+124.

郭杨阳. 2016. 便携型水声浮标监测系统 (硕士学位论文). 上海交通大学.

韩梅, 王超, 孙芹东, 等, 2020. 水下声学浮标南中国海海洋环境噪声实测分析. *应用声学*, 39(4): 536-542.

华彦宁, 周雪, 陈艳云, 等, 2018. 海洋环境信息云计算应用研究. *科技导报*, 36(14): 42-56.

黄益旺. 2019. 海洋环境噪声空间相关特性建模综述. *应用声学*, 38(04): 729-733.

贾平生, 雷志雄. 2018. 基于多层混合模型的非高斯海洋背景场表示. *电声技术*, 42(02): 41-50.

焦念志, 严威, 2022. 如何通过海洋负排放实现碳中和? *地球科学*, 47(10): 3922-3923.

姜涛. 2020. 基于物联网的海洋生态环境动态监测系统研究与应用. *信息通信*, 07:

128-129.

- 李家亮, 林建恒, 郭圣明, 等, 2015. 浅海波导界面对点源振速方向的影响. 应用声学, 34(03): 249-254.
- 李爽. 2021. 面向海洋环境监测的跳频水声通信研究(硕士学位论文). 厦门大学.
- 刘璐, 兰世泉, 肖灵, 等, 2017. 基于水下滑翔机的海洋环境噪声测量系统. 应用声学, 36(4): 370-376.
- 刘勋. 2015. 深海噪声场航船密度噪声建模与指向性分析. 声学与电子工程, 03: 5-7.
- 刘颖, 李家彪, 王叶剑, 等, 2021. 中国大洋硫化物勘探研究的发展与展望. 中国有色金属学报, 31(10): 2624-2637.
- 刘家林, 李醒飞, 杨少波, 等, 2019. "浮星"自持式剖面浮标研究现状及进展. 海洋技术学报, 38(6): 17-23.
- 刘帅, 刘福才, 刘剑鸣. 2020. 云物联网海洋监测系统研究综述. 中国自动化学会. 中国自动化大会(CAC2020)论文集. 111-115.
- 罗亮, 彭晨, 冷建兴, 2019. 可回收式水下声学网络监测节点的设计与实现. 舰船科学技术, 41(01): 116-120.
- 孟祥羽. 2021. 复杂海洋声学环境下的反射地震响应及相关处理方法研究(博士学位论文). 吉林大学.
- 莫庄非. 2022. 海洋不只是在变暖, 水下声景正在发生变化. 世界科学, 07: 29-30.
- 沈新蕊, 王延辉, 杨绍琼, 等, 2018. 水下滑翔机技术发展现状与展望. 水下无人系统学报, 26(2): 89-106.
- 孙军. 2022. 海洋碳中和途径知多少? 地球科学, 47(10): 3927-3928.
- 孙松. 2002. 人类活动对海洋生态系统的影响. 科学对社会的影响, 1: 1-5.
- 王超, 韩梅, 孙芹东, 等, 2021. 一种新型水下声学浮标在目标探测中的应用. 热带海洋学报, 40(2): 130-138.
- 王凤华. 2015. 基于DDS的海洋声场-动力环境同步监测系统的设计与实现. 国外电子测量技术, 34(12): 77-81.
- 王静, 陈建峰, 张立杰, 等, 2009. 水下无线传感器网络. 声学技术, 28(01): 89-95.

- 王文龙, 王超, 韩梅, 等, 2019. 矢量水听器在水下滑翔机上的应用研究. 兵工学报, 40(12): 2580-2586.
- 吴静. 2007. 海洋环境噪声建模研究 (硕士学位论文). 哈尔滨工程大学.
- 魏永星, 于金花, 常哲, 等, 2014. 海洋环境噪声数据处理及时空特性研究. 电子设计工程, 22(14): 28-30.
- 解静, 常江, 孙家文, 等, 2020. 海洋水文观测实时共享技术与应用研究. 海洋环境科学, 39(02): 302-308.
- 杨德森, В.А.Гордиенко, 洪连进, 2013. 水下矢量声场理论与应用. 科学出版社.
- 杨绍琼, 成丹, 陈光耀, 等, 2022. 面向典型海洋现象观测的水下滑翔机应用综述. 热带海洋学报, 41(3): 54-74
- 尹云龙, 杨明, 杨绍琼, 等, 2019. 基于水下滑翔机的海洋声学背景场观测技术. 水下无人系统学报, 27(5): 555-561.
- 张伙带, 张金鹏, 朱本铎. 2015. 国内外海底观测网络的建设进展. 海洋地质前沿, 31(11): 64-70.
- 张小磊, 管万春, 姜涛, 等, 2019. 基于物联网的海洋环境监测研究. 电子制作. 19: 46-47+26.
- 钟琳. 2019. 云计算环境下海洋远程通信设计的软件开发. 舰船科学技术. 41(18): 118-120.
- 周建波. 2018. 海洋环境噪声场垂直方向空间特性建模及应用研究 (博士学位论文). 哈尔滨工程大学.
- 周琳. 2011. 深远海环境监测水声通信仿真方法与信道估计研究(博士学位论文). 中国海洋大学.