



我国海洋生态观测系统现状综述

杨嘉钰^{1*}, 刘涛², 卢楚谦¹, 包锐³, 余威¹, 彭晓鹃¹

1. 自然资源部南海生态中心, 广州 510300;

2. 中海石油(中国)有限公司研究总院, 北京 100027;

3. 中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266100

* 通信作者, E-mail: love_ariel0915@126.com

2024-09-11 收稿; 2025-02-27 修回; 2025-03-07 接受

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2022B1515130001); 自然资源部南海局科技发展基金项目(23YD02)

中图分类号: X145

文章编号: 2096-8523(2025)05-0257-15

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240516

摘要: 海洋生态观测是海洋探索、生态保护修复、灾害预警预报、防灾减灾的重要手段和途径。21 世纪以来, 为进一步开展海洋生态观测, 应对在人类活动和全球气候变化影响下各类生态灾害预警、典型生态系统面临退化等威胁, 海洋生态观测技术已逐步迈入自动化、智能化、实时反映动态结果的时代, 对生态文明建设下海洋生态观测系统研究提出了更高的要求。讨论了国际近岸海域、深海、海底海洋生态观测系统发展和研究现状, 对现有观测系统进行了总结, 分析了我国改革开放以来海洋生态观测系统技术的发展趋势、海洋生态观测系统发展的必要性, 以及目前我国以近岸生态浮标为主的生态观测系统在我国沿海省市发展现状, 并对此类观测系统在应对脆弱典型生态系统、新型生态灾害等预警研究中存在的局限性。提出我国生态观测应由简单的生态浮标向立体观测网发展, 并且针对不同的典型生态系统建立有针对性的“岸-海-空-天”立体观测网络。

关键词: 海洋生态观测系统; 海洋生态灾害; 生态预警; 立体观测网

随着 21 世纪以来全球气候变暖趋势加剧, 导致灾害频发、人居环境恶化。保护地球环境, 特别是占据地球表面 70.8% 面积的海洋环境, 成为人类迫切需要解决的重大课题。海洋观测是了解海洋环境、预测预警海洋环境变化的基础, 对保护海洋生态环境变化、防灾减灾具有重要意义。

近年来我国近岸海域受人类活动影响, 海水水体富营养化现象频发, 引起了赤潮、绿潮等海洋生态灾害, 造成了极大的损失。王初升等^[1]研究表明, 我国因受赤潮灾害影响, 年均经济损失可达 3.15 亿元, 由生态系统服务功能引起的间接经济损失可达 276.85 亿元。据统计, 2023 年我国赤潮灾害共发生了 46 次, 累计面积 1466 km²^[2]。海洋生态系统具有净化水质、调节气候变化等全球变化、提供优良动物蛋白质等重要功能^[3], 然而受人类活动、自然灾

害等影响, 我国近海海洋生态系统, 如河口、海湾、珊瑚礁、海草床、红树林、牡蛎礁等稳定性较为脆弱, 尤其是珊瑚礁和红树林等典型生态系统受损和破坏较为严重^[4]。部分珊瑚礁、海草床等海洋典型生态系统处于亚健康状态, 面积减少^[2]。因此, 海洋生态环境状况面临着巨大的挑战^[5]。

进行海洋生态环境保护的基础和前提是进行海洋生态环境观测, 以全面了解海洋生态环境现状及动态变化趋势, 并能够对海洋突发事件进行预警预测, 进而为制定保护政策及应急措施提供依据。观测数据的实时性是目前海洋观测的目标^[6], 可及时反映所观测海域水质的动态变化情况, 尤其是极端天气条件下也能及时捕捉数据, 掌握目标海域环境要素变化情况, 实现将环境观测的实验室搬迁到海域原位在线实验的目的。国际上, 发达海洋国家的海

著录信息: 杨嘉钰, 刘涛, 卢楚谦, 等. 我国海洋生态观测系统现状综述 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(5): 257-271.

YANG Jiayu, LIU Tao, LU Chuqian, et al. A review of progress in ocean ecological observing system in China [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(5): 257-271.

洋生态在线观测技术已发展到较高水平,可对海洋生态基础状况进行自动监测,对海洋生态灾害、海流影响等进行研究^[7-12]。我国目前的海洋观测仍以传统的船载海洋调查为主导,传统的取样和室内分析方法受到样品采集、预处理、运输、保存等过程的人为及客观因素影响,难以迅速及时地反映我国海洋生态实时状况;而海洋生态在线观测系统可以满足获得自动、连续、长期的同步观测数据的需求^[13]。因此,海洋生态观测及预警观测更显迫切。

同时,海洋生态文明建设的目标也要求我国加大国家海洋生态环境观测工作建设步伐,进一步完善国家与地方的海洋生态与环境观测网建设,发展海洋环境观测高新技术,为改善我国近海环境质量,修复受损生态系统,保障沿海社会经济可持续发展的政府决策提供科学、合理的技术依据。为此,了解国际先进生态观测技术,总结我国生态观测技术现状,是进一步发展我国生态观测技术的前提,也是我国建立生态观测局域网的基础。

随着数据的长期积累,海洋生态在线观测也将为今后海洋环境大尺度的时空变化研究^[14]提供更丰富的原位基础资料,还可以加入全国立体海洋观测网,为进一步完善海洋环境保护、海洋灾害应急管理工作提供数据基础,提升海洋防灾减灾应变能力,减少海洋生态灾害造成的社会和经济损失^[15]。

本研究通过梳理总结国内外海洋观测领域的技

术现状和应用实例,了结目前开展海洋生态观测的发展方向,同时分析我国目前生态观测存在的局限性,提出我国海洋生态观测及预警观测进一步高质量发展的几点建议。

1 国际海洋观测技术概述

为提升对海洋探索的深度和广度,并通过海洋观测加强对海洋防灾减灾、海洋资源利用等,20 世纪 80 年代以来,海洋发达国家均开始研制多参数、多功能、广泛覆盖的实时立体观测技术以获取海量海洋资料,对海洋环境进行高效率、立体化、数字化的全面观测。

1.1 海洋观测技术现状分析

目前,海洋立体观测技术主要有浮标和潜标、岸基台站观测、船基观测、海洋遥感、海床基观测及水下自航式海洋观测平台 6 种,详情见表 1^[16-21]。海洋立体观测系统可根据不同的经济性、实用性需求^[19],灵活选取不同的观测技术进行平台集成,共同组成综合观测网。如通过剖面浮标网络形成的全球海洋实时观测网计划(ARGO 计划)^[22-23],通过船载式生态在线观测系统、生态在线浮标以及岸基站集合形成的近岸生态观测及藻类水华等生态灾害预警观测^[24]以及通过海底电缆、海床基和水下观测平台集成的深海综合观测系统等。

表 1 海洋观测技术概况^[16-21]

Table 1 Introduction of ocean observing technologies

观测技术	主要观测参数	优(缺)点
浮标/潜标	锚系浮标主要用于水文气象、水质等;潜标主要用于水下观测	布放回收方便,同时可通过通信系统实现数据的实时传输,实现在受控条件下全天候全天时多参数、多功能的立体观测
岸基站	水文气象、环境质量	需要在观测海域沿岸或者石油平台上设立基站
船基	温盐深、海流、水声探测等	需要使用船舶作为移动平台
海洋遥感	海洋表面环境观测,如海岸带环境和资源观测、赤潮及溢油应急观测等	可实现用宏观大尺度、快速、同步、高频度动态的海洋表面观测
海床基	主要用于海底沉积观测、剖面参数测量、水下长期生态系统环境变化观测、近海动力要素观测等	实现长期、同步、自动的海底观测
水下自航式观测平台	主要用于大范围、无人的长期水下环境观测,包括载人潜水器(HOV)、遥控无人遥控潜水器(ROV)、无人自主潜水器(AUV)及混合型深潜器(HROV),包括海洋物理学、海洋地质学、地球物理等参数	可用于多层次分层观测,与浮标(潜标)、卫星观测结合可集成形成海洋立体观测系统

1.2 近岸生态立体观测网

海岸带地区由于对近岸海域的开发程度较高、人口密度高、人类活动频繁,受到的海洋灾害影响更为明显,海洋受污染情况也更为严重,面临着生态系统退化、海洋生态灾害频发和海洋生物多样性减少等问题。近岸海域海洋生态状况直接影响沿海城市

人民的生活,因此,通过对近岸海域进行生态观测对于海洋防灾减灾、海洋预警、海洋生态保护修复等具有重要的意义。

对于近岸海洋观测,美国现已建成综合集成 58 个自动观测站、71 个浮标和 30 个观测站的沿海海洋自动观测网(C-MAN)^[25]。此外,美国的海洋综合

观测系统(Integrated Ocean Observing System, 简称 IOOS)和海洋立体观测网集成系统(Ocean Observatories Initiative, 简称 OOI)^[26]。其中, IOOS 目前由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)负责日常维护和运行, 是美国参与全球海洋观测系统(Global Ocean Observing System, 简称 GOOS)的部分^[27], 旨在对海水上层进行观测, 大多分布在沿海近岸海域, 主要观测方向为赤潮、生态、海平面及表层流 4 个方向^[28]。因此 IOOS 主要面向业务化观测工作, 整合美国各地的近海观测系统, 如缅因湾海洋观测系统(Gulf of Maine Ocean Observing System, 简称 GoMOOS)、切萨皮克观测系统(Chesapeake Bay Observation System, 简称 CBOS)、墨西哥湾沿岸海洋观测系统(Gulf Coast Ocean Observing System, 简称 GCOOS)、五大湖观测系统(Great Lakes Observation System, 简称 GLOS)、东北近海区域观测系统(Northeastern Regional Association of Coastal Ocean Observing System, 简称 NREACOOS)等区域性海洋环境观测系统^[29]。目前 IOOS 基本覆盖全美近海区域, 可形成完整的、数据共享的全国化业务服务平台, 已基本掌握近岸海域海洋生态环境的实施状况, 实现对人类密度较高的近岸海域进行海洋防灾减灾、灾害预警预报的目标, 减少因海洋灾害带来的经济损失, 并为受到生态损害、自然灾害损害的区域进行保护修复奠定了基础。

以美国缅因湾海洋观测系统(GoMOOS)为例, 该系统始建于 2001 年, 由多家机构共同合作建设完成, 总共 13 个浮标及 5 个岸基站^[30]。观测参数包括

水文气象、环境质量(海水浊度、透明度、营养盐、溶解氧)、藻类生物量、初级生产力及生物群落结构^[31], 可以实现对海洋风暴潮灾害、海浪灾害、生态灾害的统一系统化预警观测。美国还建立了由 Rutgers 大学创立的目前世界上为数不多的近海海洋观测实验室(Coastal Ocean Observing Lab, 简称 COOL), 包括一个长期生态观测站(LEO-15)、滑翔机观测队、岸基海洋动力环境观测雷达及卫星遥感观测 4 个部分, 可实现对近海及海岸带地区的水下环境、赤潮、涡流等海洋灾害事件、海洋动力环境及海洋表面信息进行长期连续的海洋观测研究^[32-33]。

针对海洋的业务化观测, 由表 2^[34-40]可见, 澳大利亚建立了综合海洋观测系统(Integrated Marine Observing System, 简称 IMOS)^[33-34]。欧洲建立了区域性海洋观测系统, 如新西兰的综合海洋观测系统(New Zealand Ocean Observing System, 简称 NZ-OOS)^[35]等, 可为各承建国的海洋环境观测, 防灾减灾、科学研究等提供可靠的数据支撑^[36]。日本则建立了无线浮标海洋观测系统, 其近海观测网涵盖 120 个观测站, 16 个大型资料浮标^[37]。除海洋观测网外, 船载式海洋观测也是近岸海洋观测中重要的组成部分。如欧盟资助的船载海洋生态在线监测系统(FerryBox), 依托于志愿船、商船以及渡轮等船载观测平台运行, 为欧洲全球海洋观测系统(Euro-GOOS)提供包括水温、盐度、溶解氧、浊度、叶绿素、营养盐、pH 等欧洲海洋生态监测数据^[40-43]。

1.3 深海生态观测系统

由于近岸海域的海洋生态状况也会受到深远海

表 2 近岸海洋观测系统概况^[34-40]
Table 2 Introduction of near-shore observing systems

观测网系统	观测系统组成	观测目标
美国沿海海洋自动观测网	自动观测站、浮标和地面观测站	近岸海区的水文、物理、化学、生物的多参数多时空实时观测
美国海洋综合观测系统	浮标、岸基站等	赤潮、生态、海平面及表层流
美国近海海洋观测实验室	生态观测站、滑翔机观测队、岸基海洋动力环境观测雷达及卫星遥感	近海及海岸带地区的水下环境、赤潮、涡流等海洋灾害事件、海洋动力环境及海洋表面信息
英国全国海洋观测系统	近海观测站、生态观测浮标	英国海岸区域的水文、物理、化学、生物的多参数多时空实时观测
希腊爱琴海观测预报系统	浮标、航运观测船	海洋物理、化学、生物参数
新西兰近岸海洋观测网	浮标	海洋物理、水文气象、化学参数
爱尔兰海观测系统	近岸观测站、锚系浮标等	沿岸海域的水文、物理、化学变化
地中海业务化海洋观测网	该观测网是一个集合系统, 整合了地中海区域 9 个浮标、遥感观测系统	地中海区域的水文、物理、化学、生物的多参数多时空实时观测
澳大利亚综合海洋观测系统	包括调查船、深水锚设备、卫星、海洋雷达、ARGO 浮标、水下滑翔机、自助式水下航行器等	沿海至公海海域的海洋生态状况
日本无线浮标海洋观测系统	浮标、近海观测站	海洋物理、化学、生物参数

的生态环境、水文情况等影响,现代海洋观测的目标逐步从近岸走向深远海,为进一步加强范围更广、情况更为复杂的深远海区域进行探索与观测,深海生态观测系统的建立也逐步实施。如表 3^[44-50]所示,美国建立的 OOI 相较于 IOOS,研究区域更广,其全球观测网包括 4 个海域(智利西南的南大洋观测网、格陵兰东南的伊尔明厄湾观测网、南大西洋阿根廷盆地观测网和阿拉斯加湾观测网)。除全球观测网外,OOI 还囊括了区域性海洋观测站及近海观测站。

OOI 观测系统由锚系浮标、水下锚系组合及水下滑翔机组成,研究范围兼顾海水上层、海水深部及海底,可实现物理、化学、生物多参数多尺度立体综合观测^[44]。OOI 主要面向于前端科研需求,专注于研究海洋科学问题,研发海洋观测所需的科学技术手段;而且 OOI 研究出的高新技术手段也可应用到 IOOS 中更好地获取观测数据。此外,美国还建立了用于热带海洋大气观测(tropical atmosphere ocean,简称 TAO)浮标网,由大约 70 个锚系浮标组成^[45]。

表 3 深海海洋观测系统概况^[44-50]
Table 3 Introduction of deep sea observing systems

观测网系统	主要观测目标
美国海洋立体观测网集成系统(OOI)	兼顾海水上层、海水深部及海底,可实现物理、化学、生物多参数多尺度立体综合观测
加拿大“海王星”	海水物理化学变化,洋流变化,海底板块动力学、板块活动,海洋气候动力学及对海洋生态系统的影响,矿物、金属、碳氢化合物等能源,渔业资源及海洋哺乳动物探索等科学问题
欧洲海洋观测系统	从海面到海底的多学科观测
欧洲深海观测站整合项目(EuroSITES)	从海面到海底的多学科观测

加拿大建立了世界首座海洋观测网——加拿大海洋观测网(Ocean Networks Canada,简称 ONC)。该系统包括目前全球最大的深海观测网“海王星”观测系统(North-East Pacific Time-Series Undersea Networked Experiments,简称 NEPTUNE),可实现对不同深度的海洋物理、化学、生物、地质、声学及其相互关系的长期、实时、连续的综合观测研究^[46-50]。

欧洲除建立了全球海洋观测系统欧洲区域联盟(EuroGOOS)、欧洲多学科海底和水体观测网(EMSO-ERIC)^[51]外,还建立了深海观测站整合项目(Euro-

SITES),其中包括拥有 4 个锚系观测站的大西洋观测网(Atlantic Netsork of Interdisciplinary Moorings and Time-series for Europe,简称 ANIMATE)^[44]。此外,欧洲也在计划建立大西洋深海现场观测系统^[52]。

1.4 海底观测网

除常规的环境要素外,海底的热液等也对海洋生态环境产生潜在重要影响。如表 4 所示,为更好地对海底进行观测研究,美国建立了“火星”海底观测网系统(Monterey Accelerated Research System,简称 MARS)^[44],可进行区域性的海底综合观测。

表 4 海底观测系统概况
Table 4 Introduction of seafloor observing systems

观测网系统	主要观测目标
美国“火星”	生物物理海洋、海水、海洋二氧化碳等
加拿大“海王星”	陆架/陆坡系统的营养状况和海底峡谷沉积物搬运、海底地震和滑坡、海底天然气水合物的活动情况和板块构造、洋中脊、热液喷口及生态系统等
加拿大“金星”	河口、浮游动物、海洋哺乳动物、潮汐、海流、鱼类、沉积物搬运及海底形态动力雪、底栖生态学等
欧洲海底综合观测系统	海洋生物多样性、海流、热液喷口、海啸、地震等
日本DONET1&DONET2	地震及海啸等灾害实时观测和预警
日本海沟地震海啸观测网	地震及海啸等灾害实时观测和预警

加拿大 NEPTUNE 除作为深海观测网进行生态在线观测外,也是深海海底观测网,是世界上第一个区域性海底观测网^[46]。“海王星”设置了 6 个观测节点,可对深度约 2 600 m 的陆架/陆坡系统的营养状

况和海底峡谷沉积物搬运、海底地震和滑坡、海底天然气水合物的活动情况和板块构造、洋中脊、热液喷口及生态系统等进行观测。而对于大约 300 m 中等深度海域的近海海底观测,加拿大建立了“金星”

观测系统(Victoria Experimental Network Under the Sea, 简称 VENUS)^[44, 47-49]。

欧洲建立了欧洲海底综合观测系统 (European Multidisciplinary Seafloor Observatory, 简称 EMSO)、欧洲可联网传感器海洋观测系统(Multifunctional Web Enable Ocean Sensor System for the Monitoring of a Changing Ocean, 简称 NEXOS)、挪威海底观测网等^[52-54]。ESONET-EMSO 海底观测网由欧洲 13 个成员国共同建立, 观测网由 15 个区域性观测子网组成, 其范围可覆盖整个欧洲主要水域, 从北冰洋穿过大西洋、地中海到达黑海, 共有 11 个深海节点及 4 个浅海节点^[52]。观测范围包括海底、底栖动物、水柱和海洋表面, 可实现对海洋进行多学科、多时空尺度的立体实时观测。

由于板块运动频繁, 日本建立了主要针对地震及海啸等灾害预警的地震及海啸海底观测密集网络系统(Dense Ocean-floor Network System for Earthquakes and Tsunamis, 简称 DONET)和日本海沟海底地震海啸观测网(Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench, 简称 S-net)。其中 DONET 观测系统包括 DONET1 和 DONET2 两部分观测网系统。DONET 观测网系

统观测设备布置密集, 仅 DONET1 就布置了 5 个节、21 个观测站和 1 个岸基站; DONET2 又布置了 7 个节点、29 个观测站和 2 个岸基站, 可实现高密度、高精度、宽频的海洋观测^[54]。与 DONET 系统设置节点式观测不同, 日本于 2015 年建立的日本海沟海底地震海啸观测网(S-net), 直接用海底电缆连接到地震仪和海啸仪, 为日本海啸、地震的预警观测提供了大量的数据支撑^[17]。

2 国内海洋环境观测现状

相较于欧美等发达国家, 我国对海洋生态观测起步较晚。1978 年, 我国建立“渤海、黄海污染观测网”, 开展了第一次海洋污染观测。1984 年, 我国成立了包括渤海区网、黄海区网、东海区网和南海区网 4 个区域海洋观测网的“全国海洋污染观测网”, 至此, 我国拉开了海洋生态观测的序幕。

2.1 改革开放以来我国观测现状演变

我国在近岸海域环境观测起步较晚, 相较于西方发达国家已建成规模化的海洋立体观测网系统^[55-56], 如表 5 所示, 我国海洋观测发展大致分为 3 个阶段。

表 5 国内海洋观测技术发展^[57-58]
Table 5 Progress of ocean observing technologies in China

发展阶段	时期	重点目标
起步阶段	“九五”	设立海洋技术领域, 并成立海洋探测与监视主题。开始建立以上海、珠江口作为第一批海洋观测技术发展示范区
模仿学习阶段	“十五”	重点发展固定式海洋环境通用观测平台, 启动实施台海海洋环境立体观测、渤海生态环境观测、海洋赤潮观测预警等集成示范系统的建设和研发
	“十一五”	围绕200海里专属经济区开展业务化近浅海生态环境观测示范系统建设, 开展移动平台观测系统及海底观测网技术研发, 启动“台湾海峡海洋动力环境立体监测示范系统”
重点发展阶段	“十二五”	启动实施深远海海洋动力环境观测系统、海底观测网试验系统、深海潜水器技术与装备等技术研发。完成相关海洋环境观测技术的下海试验
	“十三五”	统筹国家海洋观测网布局, 推进国家海洋环境实时在线监控系统和海外观测点建设, 逐步形成全球海洋立体观测系统, 加强对海洋生态环境的观测研究
	“十四五”	重点针对近岸海域海洋生态环境观测, 以海湾为突破口, 推进海洋生态系统预警观测研究

自“十一五”开始, 我国不断加大海洋环境监测技术研究的力度, 逐步建立起由多参数观测浮标、调查船、岸基站、遥感卫星等组成的全方位的实时立体观测系统, 表 6 展示了目前我国已有的近岸生态立体观测系统。

2.2 生态浮标近岸生态观测系统

近年来, 随着技术的发展, 海洋生态环境立体观测逐渐从研究示范走向业务化运行阶段, 沿海各省市陆续投放生态浮标, 以获取实时海洋水质数据。

据不完全统计, 目前全国共建成 109 套以生态浮标为基础的海洋观测系统, 可基本覆盖沿海各省市的重要经济发展区, 详情见表 7^[60-66]。我国台湾省的立体观测系统包括 26 个观测站及 8 个大型资料浮标^[42], 也建立了针对地震及海啸等灾害预警观测的“台湾东部海底电缆观测网”。

2.3 船载生态观测系统

相较于生态浮标, 我国基于船载的生态观测系统研究和应用较少。表 8 简述了我国目前基于船载

表 6 我国已有的生态环境立体观测系统^[36, 57-59]

Table 6 Existing ecological environment stereoscopic observing system in China

名称	建成时间	系统组成	观测目标
“海洋环境立体监测和信息服务系统” 上海示范区	2000年	岸站、海床基、地波雷达、卫星遥感等	第一套自行研发的海洋环境立体观测系统，可为上海区域提供海洋环境信息服务，对东海进行赤潮预警等
台湾海峡海洋动力环境立体监测示范系统	2005年	卫星遥感、船基等	第一套离岸区域性海洋动力环境立体综合观测系统，可实现对台湾海峡附近海域的风暴潮预警
渤海海洋生态环境海空准实时综合监测示范系统	2005年	船基、卫星遥感、水下观测平台、浮标等	主要针对生态环境观测，可实现对所在海域生态环境数据实时连续的获取、对赤潮、溢油等海洋灾害进行预警观测
中国近海海洋观测系统	2008年	沿岸观测站、近岸浮标及观测船	实现对黄海、东海和南海进行生态环境连续实时观测，也可进行预警观测

表 7 国内沿海地区海洋观测浮标投放概况^[60-66]

Table 7 General situation of buoys placed of ocean obsering in domestic coastal region

省市	数量/个	地点	浮标类型	观测目标
山东	17	沿海港湾、青岛、烟台、鸡鸣岛	气象浮标站、水质浮标、海-气界面浮标	水文、气象、营养盐、常规水质、海表二氧化碳分压
福建	10	厦门、青山岛、台湾海峡、福鼎、霞浦、连江、平潭等海域	气象浮标站、水质生态浮标	水文、气象、常规水质
江苏	1	南通洋口港	水文气象观测浮标	水文、气象、常规水质
浙江	20	舟山、温州、台州、宁波、嘉兴、象山港等近岸生态敏感区	气象浮标、生态浮标、海滨浮标、专项浮标	气象、常规参数、营养盐、γ射线、碳氢化合物
河北	5	北戴河、金山嘴、洋河口	水文气象观测浮标、水质浮标	常规水质、水文、气象、营养盐
上海	2	东海	气象浮标	常规水质、气象、营养盐水文、石油、波浪
广西	32	北海海域、钦州海域、防城港海域、廉州湾	海上自动观测浮标	常规水质、水文、气象、营养盐、石油
广东	17	大亚湾、大鹏湾、深圳湾、珠江口、茂名、汕头、南海区	气象浮标、水质浮标、海啸浮标	气象、常规水质、水中油、光合有效辐射、总溶解性固体、蓝绿藻、 ⁶⁰ Co、 ¹³⁴ Cs、 ¹³⁷ Cs、 ⁸⁹ Sr、营养盐
辽宁	1	獐子岛	ADCP组合潜标	水文、气象、水质
海南	4	博鳌附近海域、文昌、海口湾、澄迈湾	水质浮标、气象浮标	常规水质、蓝绿藻、营养盐、气象
合计	109			

表 8 国内船载生态观测系统研究概况

Table 8 General situation of shipborne marine ecological obsering systems in China

研究单位	搭载船体	观测目标
自然资源部北海局	向阳红08	常规水质、叶绿素、营养盐、总有机碳、重金属等
自然资源部东海局	海监47	常规水质、叶绿素、营养盐、赤潮生物等
国家海洋技术中心	商业船	常规水质、营养盐等

生态观测系统的研究概况。在“十一五”863 项目的支持下，自然资源部北海局和东海局分别在向阳红 08 号船和原海监 47 号船^[67]上建设了船载集成监测系统，通过对常规水质等生态参数的走航监测，可实现生态预警监测和赤潮等生态灾害的预警监测。国家海洋技术中心研制的船载在线监测系统已完成多次走航式监测，可实现业务化的海洋生态实时观测，为红线生态预警监测和监管提供数据支撑^[68]。

3 讨 论

3.1 我国海洋生态观测技术

3.1.1 我国海洋生态观测的技术创新

目前我国海洋观测正在从单点观测向观测网络方向发展。单点观测海洋只能够获得局部的、时空不连续的海洋数据，对海洋规律的认识不够全面，难以深入。而由多种移动观测平台与固定观测平台集合的海洋综合立体观测网能长期、实时、连续地获取所观测海区海洋环境信息，为认识海洋变化规律、提高对海洋环境和气候变化的预测能力提供实测数据支撑，进而对生态灾害预警观测进行示警作用。

海洋观测网是服务海洋防灾减灾、海洋资源开发、海洋科学研究等的重要基础设施。经过多年的发展，我国已初步建立了由海洋站、雷达站、浮标、潜标、海床基、卫星等多手段组成的“岸-海-空-天”

海洋立体观测网^[69]。以海洋站为例,根据观测区域及归属的不同,我国现有观测站分为国家站、地方站(省市级野外站)^[70]等;根据站内人员值守情况,也可分为有人值守的具备实验室功能,可进行简单化学、生物实验的观测要素较为全面的海洋综合观测站和观测方式以传感器、探头为主的以观测水文气象为主的无人值守自动在线海洋观测站。而根据观测要素的不同,也可分为海洋常规生态观测站、海洋防灾减灾/生态灾害预警观测站等。

3.1.2 我国海洋生态观测的成功实践

为实现智能化海洋立体观测,我国研发了“智能敏捷海洋立体观测系统(ISOOS)”,通过无人机、无人艇和自主水下潜器,成功实现了无人智能立体化海洋观测^[71]应用于以“珠海云”为母船的载体。针对海洋牧场、海上风电、海上油气开发区等领域的业务化生态观测以及预防海上溢油等灾害预警观测,我国研究了海底有缆在线观测系统。以海洋牧场为例,海洋牧场作为我国海洋生态文明建设的重要载体,其生态环境监测对于保障海洋牧场的可持续发展具有重要意义。山东省于2015年底启动了“海洋牧场观测网”建设项目^[72-74],成功实现了对海洋牧场的海洋生态观测,该系统通过布设多个浮标,实时监测水温、盐度、溶解氧、叶绿素等关键参数,为海洋牧场管理提供了数据支撑。

针对珊瑚礁生态系统的生态环境及水下生物状况观测,我国研制的海底电缆-海床基-岸基站生态观测系统已在南海完成业务化示范应用^[75],实现了对生态系统海洋环境要素(水温、盐度、浊度、溶解氧、营养盐、叶绿素和pH等)的实时、连续、长期监测,获取的针对珊瑚生长群落的高清视频有助于观察珊瑚群落的健康程度,并作出白化预警等综合评估;针对牡蛎礁生态系统,我国研制的生态观测平台也在天津完成了示范性应用^[76]。

我国现有近岸海域生态观测多布设生态浮标进行观测^[77-78],避免了传统的采样-实验室分析方法因耗时长、人力物力成本较高,无法进行长期连续观测,往往在生态灾害现象发生后才能进行采样、分析,具有无法及时应对突发的生态灾害现象、无法在早期扼制生态灾害迅速发展的缺陷。

党的十八大以来,全国近岸海域环境质量总体得到改善,2023年近岸海域优良水质面积比例达85.0%,但仍受到陆源污染排放影响,劣四类水质区仍占7.9%^[79]。同时,海洋生态环境脆弱,部分海洋典型生态系统如红树林、珊瑚礁、海草床等仍处于

亚健康状态,海洋赤潮浒苔等生态灾害也处于多发期。2023年我国主要生态问题统计见表9^[2],典型生态系统健康程度见文献[79]。

表9 2023年我国主要生态问题统计^[2]

Table 9 Statistical survey of main ecological problems in China in 2023

发生海区	赤潮发现次数/次	局地性生物暴发事件/次
渤海	9	3
黄海	6	1
东海	24	1
南海	7	0

以赤潮等局地性生物暴发现象为例,受环境变化影响,优势藻类短期内在富营养化条件下可迅速发展,形成生态灾害,对沿海区域造成重大经济损失。而传统观测手段往往采取月度或季度的观测频率,需要先发现早期赤潮现象再开展针对性采样-分析,往往此时赤潮已经进入发展的阶段,错失在早期赤潮还未形成的起始阶段扼制其发展的时机。采用海洋生态浮标在线观测系统,可以满足获取实时、连续的观测数据的需求,在赤潮还没发生的早期起始阶段观测到环境要素中对赤潮起指示性作用的中营养盐要素的细微变化,从而作出风险预估,及时作出预警应对,避免生态灾害现象发展扩大造成损害。同时,长期、连续的观测数据也可为海洋典型生态系统的修复与保护提供数据支撑。以敏感化学指标营养盐要素为例,传统观测方法与海洋生态观测系统的对比分析见表10。

3.2 现阶段海洋生态观测系统面临的挑战

我国以生态浮标作为海洋生态观测系统的重要组成部分,在近岸海域生态环境监测中发挥着关键作用。目前,我国已在沿海各省市布设了多套以生态浮标为基础的海洋观测系统,基本覆盖了重要经济发展区。然而,与国际先进水平相比,我国生态浮标观测技术仍面临如下挑战:

(1)观测参数有限,难以全面反映海洋牧场生态状况

现有生态浮标主要观测水文、气象和常规水质参数,对于营养盐、底栖生物、浮游生物等生态系统关键组分的观测能力有限,精度不足,从而限制了对海洋生态系统整体健康状况的评估。以营养盐观测为例,目前浮标上搭载的营养盐传感器多采用湿化学分析原理,受外界环境影响大,精密度和稳定性不足。

表 10 营养盐要素传统观测与海洋观测系统对比分析

Table 10 Comparison between traditional observing and ocean observing systems in nutrients parameters

要素	观测方法	氨氮	亚硝酸盐-氮	硝酸盐-氮	活性磷酸盐
监测方法	传统监测	分光光度法	流动分析法	流动分析法	流动分析法
	海洋观测系统	OPA 荧光法	盐酸萘乙二胺分光光度法	紫外还原-分光光度法	磷钼蓝分光光度法
监测频率	传统监测	月度(季度)/次			
	海洋观测系统	4 h/次			
分析精度/(mg·L ⁻¹)	传统监测	0.004 4	0.000 5	0.003 0	0.000 8
	海洋观测系统	0.005	0.002	0.010	0.003

注: 传统分析方法数据采用美国哈希流动注射分析仪测得, 海洋观测系统采用广州和时通电子科技有限公司的原位水质营养盐分析仪测得

(2) 续航能力不足, 维护成本高

由于受到能源供给、试剂消耗等因素限制, 目前生态浮标的连续工作时间普遍较短, 需要频繁进行维护。这不仅增加了运行成本, 也影响了数据的连续性。

(3) 观测立体化网络化程度不足, 空间分辨率低

目前我国生态观测多为近岸区域性观测, 近岸海域现有生态浮标大多为潮位站、岸/岛基站、水质浮标或气象浮标^[80-82], 且多为单点布设, 未形成业务化综合观测网, 缺乏系统性的网络化布局。观测点位数量有限, 难以满足大面积海洋生态状况的监测需求; 观测网络的空间分辨率不足, 无法准确捕捉海洋生态状况的环境梯度变化。相比之下, 美国的综合海洋观测系统 (IOOS) 已实现了全美近海区域的覆盖, 形成了完整的、数据共享的全美化业务服务平台。

(4) 针对性生态预警观测系统存在空白

针对典型生态系统、滨海核电、风电^[83]、海洋牧场等需要进行生态环境观测及生态预警观测的区域我国尚未形成成熟的生态观测网络, 且现有生态预警观测多为预警赤潮生态灾害的生态浮标^[84-88]。而根据近年统计, 新型生态灾害如局地生物暴发和入侵等, 也对滨海核电厂取水系统造成了极大的危害, 严重时导致反应堆停堆事件^[89-93]。而局地生物暴发, 如尖笔帽螺、毛虾、球形棕囊藻等致灾生物往往具有繁殖快、密度高、影响面积大的特点, 现有的巡航调查成本高, 耗时长, 无法及时对此类现象进行预警。

(5) 观测系统的业务化及标准化不足, 数据集成与分析能力不足

目前全国各沿海区域所布置在线观测系统尚未形成统一的标准规范, 因此各观测系统间的数据整合程度不高, 缺乏统一的数据标准和共享平台。

3.3 下一步海洋生态观测的发展趋势

(1) 提高观测精度, 拓展观测参数, 构建多维度观测网络

未来需要进一步探索低能耗、低试剂消耗的传

感技术, 延长浮标的续航时间。考虑到海洋水体受水动力、径流等因素影响, 同一海域在不同季节、一天中不同时段的水质要素如营养盐等浓度可能存在较大波动, 提高观测精度和灵敏度对准确把握海域生态状况具有重要意义。此外, 在现有水质监测的基础上, 进一步拓展生物参数的观测能力。例如, 开发水下声学探测系统, 实现鱼类资源的实时监测; 利用光学成像技术, 对底栖生物群落进行原位观测。通过多维度观测, 全面把握海洋生态状况的动态变化。

(2) 提高观测系统网络化、立体化程度, 实现精细化监测

加强近岸生态浮标观测网络的顶层设计, 实现多站位协同观测。为满足海洋立体在线观测综合分析需要, 近岸海域生态浮标观测下一步可结合波潮仪、船载生态观测系统等形成集合网络化观测系统, 增加观测点位数量, 优化布局策略, 提高观测网络的空间分辨率, 结合无人船、水下滑翔机等移动平台, 实现海洋生态环境的高密度、动态观测。从近岸走向近海, 更精准服务于灾害预警、防灾减灾, 对风暴潮灾害、海浪灾害、生态灾害进行统一的风险评估。

(3) 加强针对生态预警观测的观测系统建设

在重点区域建立集岸基观测塔、生态气象水动力浮标、海底电缆观测网、海船载巡航、卫星遥感和无人机巡航于一体的“岸-海-空-天”协同组网立体生态在线观测系统具有十分重要的意义(图 1)。而面对脆弱典型生态系统如珊瑚礁、海草床、红树林^[92]等, 也应进一步加强多元化生态观测及生态预警在线观测网的研究与建设, 如针对珊瑚白化预警的实时水温长序列监测、水下影像监控等, 针对海草床退化预警的区域性海洋污染监测, 针对红树林退化的海洋垃圾、海洋侵蚀预警观测, 针对水体本身的主要水质参数(溶解氧、营养盐、pH、叶绿素等)的监测、针对生态指标(如岸线长度、生物多样性、湿地

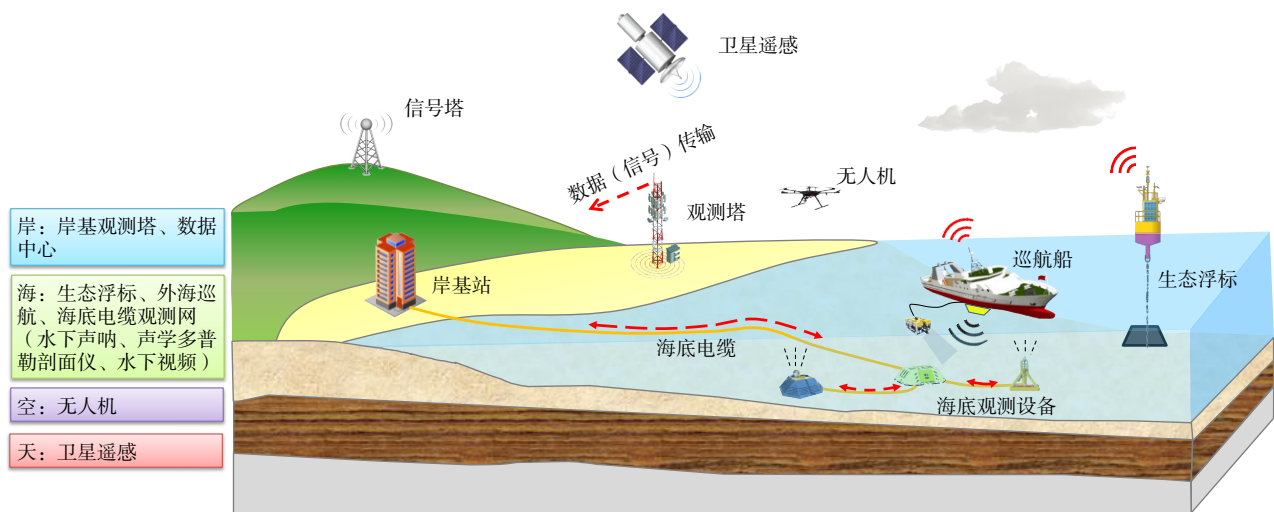


图1 “岸-海-空-天”协同组网立体生态在线观测系统整体示意图

Fig. 1 Integrated diagram of the "shore-sea-air-space" collaborative networked stereoscopic ecological online observing system

面积变化等)的监测。以及针对目前海上油田二氧化碳封存技术^[93-94]的生态预警监测等。所获取的长序列数据可以为我国海洋生态状况公报、海洋资源环境承载力、海洋生态预警以及探究生态系统演变^[95]等提供具有强时效性的数据支撑。

(4)推进观测技术标准化和业务化

随着进一步推进生态在线观测网的建设,数据及系统管理也应向规范化发展,为下一步推动多站位、高密度的观测系统布设提供准则,保证数据的标准化和规范化,为搭建全国海洋观测数据共享提供平台支撑。通过统一海洋生态观测技术的规范和标准,推动观测系统的规模化应用,进而开发海洋生态状况健康评估模型和预警系统,建立长期、稳定的观测机制,可为海洋生态系统演变研究和管理决策提供持续的数据支持,也为海洋生态的可持续发展、保障海洋生态安全提供更有力的科技支撑。

4 结论与建议

(1)世界各海洋发达国家的国内立体观测网及全球立体观测网体系已经在20世纪就完成了建设,这些立体观测网体系大大推动了海洋科学的发展。因此,随着我国海洋强国战略的推进以及生态文明建设的需要,建立高密度、多站位的综合性全天时连续监测的立体观测网具有重要的现实意义。海洋生态综合观测系统具有长时间、连续观测、不受恶劣海况环境影响等特点,在生态灾害风险预估预警观测方面更具优势,特别是对一些短时间尺度变化的环境要素观测,如赤潮、绿潮等生态灾害现象,具有

更好的分辨率和观测能力,具备及时捕捉海域环境细微变化的优势,有助于早期海洋灾害的风险评估及预警观测。

(2)建议在脆弱典型生态系统、滨海核电等重点海域设立由具有区域代表性的观测站点组成协同在线生态观测网,开展长期定点连续观测,建立多参数长期、立体、实时观测网,有助于有效、连续地获取和传递海洋长时间序列综合参数,为进一步生态灾害预警、服务地方、保护和修复脆弱的典型生态系统工作提供数据支撑。如针对典型脆弱生态系统珊瑚礁,受全球气候变化及人类活动影响,近年来白化趋势明显,应结合水下监测监控平台,实时长序列获取珊瑚群落生长状况等数据,重点监测水温、pH等白化敏感要素;针对河口生态系统,应重点关注水体的水质参数(溶解氧、营养盐、pH、叶绿素等)、沉积物质量(硫化物、有机碳等)、海洋生态群落结构(浮游生物、底栖生物等)以及湿地面积和自然岸线变化。通过组建针对性的立体生态观测系统,逐渐建立实时长序列生态观测网,加强实时连续、长时间序列的海洋观测,建设高水平的海洋生态观测系统并进入国家野外科学观测研究台站体系,从近岸区域性观测走向近海大范围多节点观测,形成海洋立体观测网。形成海洋生态在线观测系统相应的标准规范,提高目前及未来所建的各系统数据的统一性与规范化。在适当的时候进入国际海洋观测项目,建立全球海洋观测网,以提升我国应对全球海洋环境问题的国际话语权。

所有作者声明无利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献:

- [1] 王初升,唐森铭,宋普庆.我国赤潮灾害的经济损失评估[J].海洋环境科学,2011,30(3):428-431.
WANG C S, TANG S M, SONG P Q. Assessment on economic losses caused by red tide disasters in China seas[J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(3): 428-431. (in Chinese with English abstract)
- [2] 中华人民共和国自然资源部.2023 年中国海洋生态预警监测公报[R].北京:中华人民共和国自然资源部,2024.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Bulletin of China's marine ecological early warning and monitoring in 2023[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2024. (in Chinese)
- [3] 苏纪兰,唐启升.我国海洋生态系统基础研究的发展:国际趋势和国内需求[J].地球科学进展,2005,20(2):139-143.
SU J L, TANG Q S. A new direction for China's research on marine ecosystems: International trend and national needs[J]. Advance in Earth Sciences, 2005, 20(2): 139-143. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李永祺,唐学玺,张鑫鑫,等.退化海洋生态系统修复相关概念与修复模式的探讨[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2024,54(11):1-9.
LI Y Q, TANG X X, ZHANG X X, et al. Discussion on related concepts and rehabilitation of degraded marine ecosystem[J]. Periodical of Ocean University of China, 2024, 54(11): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [5] BORJA A, ANDERSEN J H, ARVANITIDIS C D, et al. Past and future grand challenges in marine ecosystem ecology[J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 362.
- [6] TANHUA T, MCCURDY A, FISCHER A, et al. What we have learned from the framework for ocean observing: Evolution of the global ocean observing system[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 471.
- [7] VUILLEMIN R, SANFILIPPO L, MOSCETTA P, et al. Continuous nutrient automated monitoring on the Mediterranean sea using in situ flow analyzer[C]//Anon. OCEAN 2009, MTS/IEEE Biloxi. Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges. [S. l.]: [s. n.], 2009: 1-8.
- [8] JOHNSON K S, COLETTI L J, CHAVEZ F P. Diel nitrate cycles observed with in situ sensors predict monthly and annual new production[J]. Deep Sea Research Part I (Oceanographic Research Papers), 2006, 53(3): 561-573.
- [9] JOHNSON K S. Simultaneous measurements of nitrate, oxygen, and carbon dioxide on oceanographic moorings: Observing the Redfield ratio in real time[J]. Limnology and Oceanography, 2010, 55(2): 615-627.
- [10] SANDFORD R C, EXENBERGER A, WORSFOLD P J. Nitrogen cycling in natural waters using in situ, reagentless UV spectrophotometry with simultaneous determination of nitrate and nitrite[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(24): 8420-8425.
- [11] MOORE T S, MULLAUGH K M, HOLYOKE R R, et al. Marine chemical technology and sensors for marine waters: Potentials and limits[J]. Annual Review of Marine Science, 2009, 1: 91-115.
- [12] GLENN S, DICKEY T, PARKER B, et al. Long-term real-time coastal ocean observation networks[J]. Oceanography, 2000, 13(1): 24-34.
- [13] 陈鹰.海洋观测方法之研究[J].海洋学报,2019,41(10):182-188.
CHEN Y. On the ocean observing methodology[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(10): 182-188. (in Chinese with English abstract)
- [14] 林涛.近岸海域水质在线自动监测系统的营养盐数据质量控制方法研究[J].环境科学与管理,2013,38(7):109-113.
LIN T. Nutrients data quality control methods of water quality automatic online monitoring system in Xiamen coastal waters[J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(7): 109-113. (in Chinese with English abstract)
- [15] MACKENZIE B, CELLIER L, DE FREITAS ASSAD L P, et al. The role of stakeholders in creating societal value from coastal and ocean observations[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 137.
- [16] 蔡树群,张文静,王盛安.海洋环境观测技术研究进展[J].热带海洋学报,2007,26(3):76-81.
CAI S Q, ZHANG W J, WANG S A. An advance in marine environment observation technology[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2007, 26(3): 76-81. (in Chinese with English abstract)
- [17] UMEDA A, SHIMIZU E. A wireless based ocean observation buoy system and legal status of underwater radio wave communication in Japan[C]//Anon. OCEANS: MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). Kobe: [s. n.], 2018: 1-6.
- [18] 王宁,李燕,杨鹏程,等.海洋生态在线监测技术研究进展[J].应用海洋学学报,2023,42(1):178-186.
WANG N, LI Y, YANG P C, et al. Advances in marine ecological on-line monitoring technology[J]. Journal of Applied Oceanography, 2023, 42(1): 178-186. (in Chinese with English abstract)
- [19] 赵吉浩,高艳波,朱光文,等.海洋观测技术进展[J].海洋技术,2008,27(4):1-4.
ZHAO J H, GAO Y B, ZHU G W, et al. Progress in marine observation technology[J]. Ocean Technology, 2008, 27(4): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [20] MOORE C, BARNARD A, FIETZEK P, et al. Optical tools for ocean monitoring and research[J]. Ocean Science, 2009, 5(4): 661-684.
- [21] 孙思萍.海床基自动监测平台技术的研究应用[J].海洋技术,2003,22(3):81-84.
SUN S P. The development and application of automatic seabed-based monitoring platform technology[J]. Ocean Technology, 2003, 22(3): 81-84. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘方,丁页,李俊龙,等.近岸海域水质自动监测规范化研究[J].中国环境监测,2016,32(2):121-126.
LIU F, DING Y, LI J L, et al. Research for standardized and normalization coastal waters automatic monitoring[J]. Environmental Monitoring in China, 2016, 32(2): 121-126. (in Chinese with English abstract)
- [23] FREELAND H J, ROEMMICH D, GARZOLI S L, et al. ARGO: A decade of progress[C]//HALL J, HARRISON D E, STAMMER D, et al. Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society. [S. l.]: ESA Publication, 2009.
- [24] 于宇,黄孝鹏,崔威威,等.国外海洋环境观测系统和技术发展趋势[J].舰船科学技术,2017,39(23):179-183.

- YU Y, HUANG X P, CUI W W, et al. Development trends of foreign marine environment observing systems and technologies[J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(23): 179-183. (in Chinese with English abstract)
- [25] RANTAJARVI E. Effect of sampling frequency on detection of natural variability in phytoplankton: Unattended high-frequency measurements on board ferries in the Baltic Sea[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1998, 55(4): 697-704.
- [26] SMITH L, BARTH J, KELLEY D, et al. The ocean observatories initiative[J]. *Oceanography*, 2018, 31(1): 16-35.
- [27] STAMEY B, CAREY K, SMITH W, et al. An integrated coastal observation and flood warning system: Rapid prototype development[C]//Anon. OCEANS 2006. Boston, MA, USA: IEEE, 2006: 1-6.
- [28] MOLTSMANN T, TURTON J, ZHANG H-M, et al. A global ocean observing system (GOOS), delivered through enhanced collaboration across regions, communities, and new technologies[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 291.
- [29] 王春谊, 李芝凤, 吴迪, 等. 美国海洋观测系统分析[J]. *海洋技术*, 2012, 31(3): 90-92.
WANG C Y, LI Z F, WU D, et al. Analysis of US ocean observing system[J]. *Ocean Technology*, 2012, 31(3): 90-92. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王伟, 高艳波, 齐连明, 等. 我国业务化海洋观测发展研究: 借鉴美国综合海洋观测系统[J]. *海洋技术学报*, 2014, 33(6): 34-39.
WANG Y, GAO Y B, QI L M, et al. Research on the development of operational ocean observation in China by using the U. S. IOOS for reference[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2014, 33(6): 34-39. (in Chinese with English abstract)
- [31] PETTIGREW N R, WALLINGA J P, NEVILLE F P, et al. Gulf of maine ocean observing system (GoMOOS): Current measurement approaches in a prototype integrated ocean observing system[C]//Anon. Proceedings of the IEEE/OES Eighth Working Conference on Current Measurement Technology. Southampton, UK: IEEE, 2005: 127-131.
- [32] PETTIGREW N R, FIKES C P, BEARD M K. Advances in the ocean observing system in the gulf of Maine: Technical capabilities and scientific results[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2011, 45(1): 85-97.
- [33] 陈令新, 王巧宁, 孙西艳, 等. 海洋环境分析监测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 375-377.
CHEN L X, WANG Q N, SUN X Y, et al. Marine environment analysis and monitoring technology[M]. Beijing: Science Press, 2017: 375-377. (in Chinese)
- [34] 李慧青, 朱光文, 李燕, 等. 欧洲国家的海洋观测系统及其对我国的启示[J]. *海洋开发与管理*, 2011, 28(1): 1-5.
LI H Q, ZHU G W, LI Y, et al. Ocean observation system of European countries and its enlightenment to China[J]. *Ocean Development and Management*, 2011, 28(1): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [35] JAMES C, COLLOPY M, WYATT L R, et al. Suitability of the southern Australia integrated marine observing system's (SA-IMOS) HF-radar for operational forecasting[J]. *Journal of Operational Oceanography*, 2019, 12(2): 73-85.
- [36] HIDAS M G, PROCTOR R, ATKINS N, et al. Information infrastructure for Australia's integrated marine observing system[J]. *Earth Science Informatics*, 2016, 9(4): 525-534.
- [37] O'CALLAGHAN J, STEVENS C, ROUGHAN M, et al. Developing an integrated ocean observing system for New Zealand[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 143.
- [38] MARTÍN MÍGUEZ B, NOVELLINO A, VINCI M, et al. The European marine observation and data network (EMODnet): Visions and roles of the gateway to marine data in Europe[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 313.
- [39] 马毅. 我国海洋观测预报系统概述[J]. *海洋预报*, 2008, 25(1): 31-40.
MA Y. Overview of marine observation and forecast system for China[J]. *Marine Forecasts*, 2008, 25(1): 31-40. (in Chinese with English abstract)
- [40] PETERSEN W. FerryBox systems: State-of-the-art in Europe and future development[J]. *Journal of Marine Systems*, 2014, 140: 4-12.
- [41] PETERSEN W, SCHROEDER F, BOCKELMANN F D. FerryBox: Application of continuous water quality observations along transects in the North Sea[J]. *Ocean Dynamics*, 2011, 61(10): 1541-1554.
- [42] PETERSEN W, REINKE S, BREITBACH G, et al. FerryBox data in the north sea from 2002 to 2005[J]. *Earth System Science Data*, 2018, 10(3): 1729-1734.
- [43] 王宁, 程长阔, 杨鹏程, 等. 船载海洋生态在线监测技术研究与应用进展[J]. *海洋科学*, 2021, 45(10): 133-140.
WANG N, CHENG C K, YANG P C, et al. Research and application progress of shipborne marine ecological online monitoring technology[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(10): 133-140. (in Chinese with English abstract)
- [44] 张伙带, 韩冰, 刘丽强, 等. 海底观测新技术[M]. 北京: 海洋出版社, 2019: 37-111.
ZHANG H D, HAN B, LIU L G, et al. New technologies for seabed observation[M]. Beijing: Ocean Press, 2019: 37-111. (in Chinese)
- [45] 王波, 李民, 刘世萱, 等. 海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11): 2401-2414.
WANG B, LI M, LIU S X, et al. Current status and trend of ocean data buoy observation technology applications[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(11): 2401-2414. (in Chinese with English abstract)
- [46] MARTIN TAYLOR S. Transformative ocean science through the VENUS and NEPTUNE Canada ocean observing systems[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)*, 2009, 602(1): 63-67.
- [47] 吴自军, 周怀阳. 加拿大海底科学长期观测网的研究进展[J]. *工程研究(跨学科视野中的工程)*, 2016, 8(2): 131-138.
WU Z J, ZHOU H Y. Research advances of ocean networks of Canada[J]. *Journal of Engineering Studies*, 2016, 8(2): 131-138. (in Chinese with English abstract)
- [48] 姬再良, 董树文. 世界首座海洋观测网体系: 加拿大“海王星”海底观测技术[J]. *地球学报*, 2012, 33(1): 13-22.
JI Z L, DONG S W. The first marine observation network system:

- Neptune Canada submarine observation technology[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(1): 13-22. (in Chinese with English abstract)
- [49] 陈绍艳, 张多, 麻常雷. 加拿大 VENUS 海底观测网 [J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(11): 17-19.
CHEN S Y, ZHANG D, MA C L. VENUS undersea observation network of Canada[J]. Ocean Development and Management, 2015, 32(11): 17-19. (in Chinese with English abstract)
- [50] 李健, 陈荣裕, 王盛安, 等. 国际海洋观测技术发展趋势与中国深海台站建设实践 [J]. 热带海洋学报, 2012, 31(2): 123-133.
LI J, CHEN R Y, WANG S A, et al. Development of international marine observation system and construction of deep-sea station in China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(2): 123-133. (in Chinese with English abstract)
- [51] 蒋成竹, 张涛, 吴林强, 等. 欧盟海洋探测和观测体系构建现状与发展趋势 [J]. 自然资源情报, 2023, 42(6): 29-34.
JIANG C Z, ZHANG T, WU L Q, et al. Current situation and development trend of the European Union marine exploration and observation system[J]. Natural Resources Information, 2023, 42(6): 29-34. (in Chinese with English abstract)
- [52] GASPARIN F, GUINEHUT S, MAO C Y, et al. Requirements for an integrated in situ Atlantic Ocean observing system from co-ordinated observing system simulation experiments[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 83.
- [53] 李风华, 路艳国, 王海斌, 等. 海底观测网的研究进展与发展趋势 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 321-330.
LI F H, LU Y G, WANG H B, et al. Research progress and development trend of seafloor observation network[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 321-330. (in Chinese with English abstract)
- [54] PEDERSEN G, ZHANG G S, ANICETO S, et al. Long term acoustic time series of the Lofoten Vesterålen ocean observatory[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 148(4S): 2627.
- [55] 钱洪宝, 徐文, 张杰, 等. 我国海洋监测高技术发展的回顾与思考 [J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3): 59-63.
QIAN H B, XU W, ZHANG J, et al. Review and deliberation on the development of marine monitoring high technology in China[J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(3): 59-63. (in Chinese with English abstract)
- [56] 国家发展改革委国家海洋局. 全国海洋经济发展“十三五”规划 [R]. 北京: 国家发展改革委国家海洋局, 2017.
State Oceanic Administration, National Development and Reform Commission. The "13th Five-Year" plan for the development of the national marine economy[R]. Beijing: State Oceanic Administration, National Development and Reform Commission, 2017. (in Chinese)
- [57] 王瑞文, 叶冬. 中国近海现场海洋观测系统设计评估 [J]. 海洋通报, 2012, 31(2): 121-130.
WANG R W, YE D. Assessment on the design of in situ ocean observing system in Chinese marginal seas[J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(2): 121-130. (in Chinese with English abstract)
- [58] 庞仁松, 周凯, 冷科明, 等. 深圳市海域浮标监测网的站位设计和数据应用 [J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(2): 49-53.
PANG R S, ZHOU K, LENG K M, et al. The station design and data application of buoy monitoring network in Shenzhen sea area[J]. Ocean Development and Management, 2018, 35(2): 49-53. (in Chinese with English abstract)
- [59] 戴洪磊, 牟乃夏, 王春玉, 等. 我国海洋浮标发展现状及趋势 [J]. 气象水文海洋仪器, 2014, 31(2): 118-121.
DAI H L, MOU N X, WANG C Y, et al. Development status and trend of ocean buoy in China[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2014, 31(2): 118-121. (in Chinese with English abstract)
- [60] 李斌, 刘保良, 魏春雷. 广西海洋水质监测浮标设计与建设 [J]. 科技资讯, 2018, 16(21): 66-68.
LI B, LIU B L, WEI C L. Design and construction of marine water quality monitoring buoy in Guangxi[J]. Science & Technology Information, 2018, 16(21): 66-68. (in Chinese with English abstract)
- [61] 赵聪蛟, 冯辉强, 祝翔宇, 等. 象山港海洋监测浮标在强台风“海葵”影响期间的可靠性分析 [J]. 热带海洋学报, 2015, 34(2): 8-14.
ZHAO C J, FENG H Q, ZHU X Y, et al. Reliability analysis of marine monitoring buoy in the Xiangshan Harbor during Typhoon Haikui (1211)[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2015, 34(2): 8-14. (in Chinese with English abstract)
- [62] 赵聪蛟, 孔梅, 孙笑笑, 等. 浙江省海洋水质浮标在线监测系统构建及应用 [J]. 海洋环境科学, 2016, 35(2): 288-294.
ZHAO C J, KONG M, SUN X X, et al. Construction and application of the marine online monitoring buoy system in Zhejiang Province[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(2): 288-294. (in Chinese with English abstract)
- [63] 罗金福, 李天深, 蓝文陆. 近岸海域自动监测网络在广西环境管理服务中的应用 [J]. 广西科学院学报, 2019, 35(2): 109-112.
LUO J F, LI T S, LAN W L. Application of automatic monitoring system in offshore area in the environmental management service of Guangxi[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2019, 35(2): 109-112. (in Chinese with English abstract)
- [64] 周学杭, 张洪海, 马昕, 等. 基于浮标观测的春季青岛近岸海水 $p\text{CO}_2$ 变化及海-气 CO_2 通量研究 [J]. 海洋学研究, 2023, 41(3): 14-21.
ZHOU X H, ZHANG H H, MA X, et al. Variations of $p\text{CO}_2$ and sea-air CO_2 flux in Qingdao coastal seawater in spring based on buoy observations[J]. Journal of Marine Sciences, 2023, 41(3): 14-21. (in Chinese with English abstract)
- [65] 于灏, 吕海良, 关一, 等. 船载海洋生态环境监测系统集成平台设计研究 [J]. 船舶工程, 2013, 35(3): 108-111.
YU H, LÜ H L, GUAN Y, et al. Design and study of integrated system of onboard marine ecological environmental monitoring system[J]. Ship Engineering, 2013, 35(3): 108-111. (in Chinese with English abstract)
- [66] 李晖, 杜军兰, 哈谦, 等. 船载海洋水质自动监测系统研制和应用 [J]. 环境影响评价, 2018, 40(6): 67-70.
LI H, DU J L, HA Q, et al. Research and application of shipboard automatic monitoring system for marine water quality[J]. Environmental Impact Assessment, 2018, 40(6): 67-70. (in Chinese with English abstract)
- [67] 吴亚楠, 王祎, 姜民, 等. 《2019 年美国 NOAA 科学报告》对我国

- 海洋观测网建设与发展的启示[J]. 海洋技术学报, 2021, 40(3): 84-89.
- WU Y N, WANG Y, JIANG M, et al. Enlightenment on building and developing ocean observation network of China from 2019 NOAA Science Report[J]. Journal of Ocean Technology, 2021, 40(3): 84-89. (in Chinese with English abstract)
- [68] 张增健, 李程, 徐珊珊, 等. 国外海洋观测系统对我国的启示[J]. 海洋技术学报, 2023, 42(6): 95-104.
- ZHANG Z J, LI C, XU S S, et al. The enlightenment of foreign ocean observation systems on China[J]. Journal of Ocean Technology, 2023, 42(6): 95-104. (in Chinese with English abstract)
- [69] DONG C, CHEN D K, WANG D X, et al. Intelligent swift ocean observing system[J]. Ocean-Land-Atmosphere Research, 2023, 2: 22.
- [70] 翟方国, 李培良, 顾艳镇, 等. 海底有缆在线观测系统研究与应用综述[J]. 海洋科学, 2020, 44(8): 14-28.
- ZHAI F G, LI P L, GU Y Z, et al. Review of the research and application of the submarine cable online observation system[J]. Marine Sciences, 2020, 44(8): 14-28. (in Chinese with English abstract)
- [71] 付龙文, 杜志强, 高歌, 等. 海洋牧场多水层溶解氧在线监测系统的构建及应用[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(6): 909-917.
- FU L W, DU Z Q, GAO G, et al. Construction and application of on-line monitoring system for dissolved oxygen in multi-water layer of marine ranching[J]. Marine Environmental Science, 2020, 39(6): 909-917. (in Chinese with English abstract)
- [72] 贾文娟, 张孝薇, 闫晨阳, 等. 海洋牧场生态环境在线监测物联网技术研究[J]. 海洋科学, 2022, 46(1): 83-89.
- JIA W J, ZHANG X W, YAN C Y, et al. Internet of things technology for online monitoring of marine ranch ecological environments[J]. Marine Sciences, 2022, 46(1): 83-89. (in Chinese with English abstract)
- [73] 熊小飞, 吴加欣, 陈栋, 等. 珊瑚礁生态环境在线监测系统的设计研究[J]. 海洋湖沼通报, 2017, 39(6): 61-66.
- XIONG X F, WU J X, CHEN D, et al. Design of an online monitoring system for coral reef ecological environments[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2017, 39(6): 61-66. (in Chinese with English abstract)
- [74] 刘春琳, 陈亮, 乔延龙, 等. 天津大神堂牡蛎礁海洋特别保护区监视监控平台应用探讨[J]. 科技资讯, 2016, 14(1): 16-17.
- LIU C L, CHEN L, QIAO Y L, et al. Discussion on the application of monitoring platform in Tianjin Dashentang oyster reef marine special reserve[J]. Science & Technology Information, 2016, 14(1): 16-17. (in Chinese with English abstract)
- [75] 伯云台, 王岚, 姜源庆, 等. 海洋在线水质生态观测系统研究进展[J]. 环境影响评价, 2018, 40(2): 81-85.
- BO Y T, WANG L, JIANG Y Q, et al. Advances in study of automatic monitoring system for seawater quality[J]. Environmental Impact Assessment, 2018, 40(2): 81-85. (in Chinese with English abstract)
- [76] 李鹏, 许啸春, 潘灵芝. 东海海洋环境监测网浮标观测站布设及其科学意义[J]. 上海国土资源, 2014, 35(1): 71-76.
- LI P, XU X C, PAN L Z. The distribution and scientific significance of marine environmental-monitoring buoys in the East China Sea[J]. Shanghai Land & Resources, 2014, 35(1): 71-76. (in Chinese with English abstract)
- [77] 中华人民共和国生态环境部. 2023 中国海洋生态环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2024.
- Ministry of Ecology and Environment of People's Republic of China. Bulletin on the status of China's marine ecological environment[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of People's Republic of China, 2014. (in Chinese)
- [78] 杨颖, 徐韧. 岸/岛基站海洋生态环境在线监测系统建设选址调查方案探讨[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(3): 25-29.
- YANG Y, XU R. Research and discussion on the site selection survey plan for marine eco-environment online monitoring system built in shore-site stations and island stations[J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(3): 25-29. (in Chinese with English abstract)
- [79] 赵聪蛟, 赵斌, 周燕. 基于海洋生态文明及绿色发展的海洋环境实时监测[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(5): 91-97.
- ZHAO C J, ZHAO B, ZHOU Y. Marine ecological civilization, green development and real-time monitoring of marine environment[J]. Ocean Development and Management, 2017, 34(5): 91-97. (in Chinese with English abstract)
- [80] 陈旭阳, 刘保良. 海洋在线监测浮标在赤潮监测中的应用研究[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(5): 20-24.
- CHEN X Y, LIU B L. Application of real-time monitoring buoy in monitoring red tide[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(5): 20-24. (in Chinese with English abstract)
- [81] 彭模, 周超凡, 郑江鹏, 等. 江苏省离岸式海洋生态环境在线监测系统建设浅析[C]//佚名. 2020 年全国海洋生态环境保护及监测技术研讨会论文集. [出版地不详]: [出版社不详], 2020: 33-37.
- PENG M, ZHOU C F, ZHENG J P, et al. A brief analysis of the construction of offshore marine ecological environment online monitoring system in Jiangsu Province[C]//Anon. Proceedings of the 2020 national symposium on marine ecological environment protection and Monitoring technology. [S. l]: [s. n.], 2020: 33-37. (in Chinese)
- [82] 李斌, 刘保良, 陈旭阳, 等. 基于海洋生态在线监测浮标数据的钦州湾藻华过程研究[J]. 广西科学, 2021, 28(1): 30-36.
- LI B, LIU B L, CHEN X Y, et al. Analysis of algal bloom in Qinzhou Bay based on marine ecology online monitoring buoy data[J]. Guangxi Sciences, 2021, 28(1): 30-36. (in Chinese with English abstract)
- [83] 赵聪蛟, 刘希真, 付声景, 等. 基于水质浮标在线监测的米氏凯伦藻赤潮过程及环境因子变化特征分析[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(2): 88-97.
- ZHAO C J, LIU X Z, FU S J, et al. Variation characteristics of the evolution of Karenia Mikimotoi bloom and environmental factors based on online monitoring buoy data[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2020, 39(2): 88-97. (in Chinese with English abstract)
- [84] 李天深, 蓝文陆, 卢印思, 等. 近岸海域自动监测浮标在赤潮预警中的应用及其缺陷[J]. 海洋预报, 2015, 32(1): 70-78.
- LI T S, LAN W L, LU Y S, et al. Application of automatic monitoring buoy in early warning for algal blooms in offshore area[J]. Marine Forecasts, 2015, 32(1): 70-78. (in Chinese with English abstract)

abstract)

- [85] 李天深, 李远强, 赖春苗, 等. 廉州湾赤潮自动监测结果与分析[J]. 中国环境监测, 2011, 27(4): 32-35.
LI T S, LI Y Q, LAI C M, et al. Analyze red tide with automatic monitoring system of water quality in Lianzhou Gulf[J]. Environmental Monitoring in China, 2011, 27(4): 32-35. (in Chinese with English abstract)
- [86] 庄宏儒. 水质自动监测系统 in 厦门同安湾赤潮短期预报中的应用[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(2): 58-61.
ZHUANG H R. Application of automatic monitoring system of water quality on short-term prediction of red tide in Tongan Bay, Xiamen[J]. Marine Environmental Science, 2006, 25(2): 58-61. (in Chinese with English abstract)
- [87] 张文斌, 孙伟, 许歆, 等. 某核电站附近海域生态环境特征及潜在致灾生物研究[J]. 海洋科学, 2022, 46(7): 32-43.
ZHANG W B, SUN W, XU X, et al. Ecological environment and the potential hazard-causing organisms in the sea area near the nuclear power plant[J]. Marine Sciences, 2022, 46(7): 32-43. (in Chinese with English abstract)
- [88] 於凡, 许波涛, 吴昕, 等. 基于核电冷源安全的海洋生物调查及筛选评价方法研究[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(1): 139-143.
YU F, XU B T, WU X, et al. Study on the method of marine organisms investigation, screening and evaluation based on nuclear power plant cold source safety[J]. Marine Environmental Science, 2021, 40(1): 139-143. (in Chinese with English abstract)
- [89] 贺立燕, 宋秀贤, 於凡, 等. 潜在影响防城港核电冷源系统的藻类暴发特点及其监测防控技术[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(3): 700-706.
HE L Y, SONG X X, YU F, et al. Potential risk and prevention of phytoplankton outbreak to water-cooling system in nuclear power plant in Fangchenggang, Guangxi[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2019, 50(3): 700-706. (in Chinese with English abstract)
- [90] 齐占会, 史荣君, 戴明, 等. 尖笔帽螺(*Creseis acicula*)研究进展及其在大亚湾暴发机制初探[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(5): 147-152.
QI Z H, SHI R J, DAI M, et al. A review on ecological characteristics of *Creseis acicula* and preliminary analysis on its outbreak triggers in Daya Bay[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2021, 40(5): 147-152. (in Chinese with English abstract)
- [91] 於凡, 许波涛, 李勇, 等. 海生物暴发对核电厂冷源系统的影响分析及对策探讨[J]. 给水排水, 2018, 54(2): 61-64.
YU F, XU B T, LI Y, et al. Analysis of the influence of marine organism outbreak on cold source system of nuclear power plant and its countermeasures[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(2): 61-64. (in Chinese with English abstract)
- [92] 朱鹏光, 甘义群, 赖咏毅, 等. 海南东寨港红树林湿地沉积物氮形态空间分布特征及影响因素[J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 369-377.
ZHU P G, GAN Y Q, LAI Y Y, et al. Spatial distribution and controlling factors of sediment nitrogen forms in the mangrove wetland at Dongzhai Port, Hainan Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(1): 369-377. (in Chinese with English abstract)
- [93] 江汝锋, 曹立成, 邓孝亮, 等. 琼东南盆地宝岛 21-1 区陵水组沉积特征及其油气地质意义[J]. 地质科技通报, 2024, 43(5): 31-44.
JIANG R F, CAO L C, DENG X L, et al. Sedimentary characteristics of the Lingshui Formation in the Baodao 21-1 area of the Qiongdongnan Basin and their significance in hydrocarbon exploration[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(5): 31-44. (in Chinese with English abstract)
- [94] 王延欣. 枯竭油气藏储集库储热供暖耦合 CO₂ 封存性能分析[J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 12-21.
WANG Y X. Performance analysis of thermal energy storage for space heating and CO₂ sequestration in depleted oil and gas reservoirs[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 12-21. (in Chinese with English abstract)
- [95] 杨泽森, 林晶晶, 常启昕, 等. 地下水与湖泊交互作用的研究趋势与前沿[J]. 地质科技通报, 2024, 43(6): 306-317.
YANG Z S, LIN J J, CHANG Q X, et al. Research trends and frontiers of groundwater-lake interaction[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(6): 306-317. (in Chinese with English abstract)

Summary for “我国海洋生态观测系统现状综述”

A review of progress in ocean ecological observing system in China

YANG Jiayu^{1*}, LIU Tao², LU Chuqian¹, BAO Rui³, YU Wei¹, PENG Xiaojuan¹

1. South China Sea Ecological Center, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China;

2. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China;

3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100, China

* Corresponding author, E-mail: love_ariel0915@126.com

Abstract: [Objective and Significance] Marine ecological observation has become one of the essential approaches to supporting ocean exploration, ecological protection and restoration, disaster prevention and reduction, and early warning of ecological hazards. With the intensification of human activities and the accelerating impacts of global

climate change, typical marine ecosystems are increasingly facing severe degradation and fragility. These threats include frequent red tides, eutrophication, and biodiversity loss in coastal waters, all of which impose significant economic and ecological costs. Against this backdrop, there is an urgent demand to establish advanced real-time, automated, and intelligent ecological observing systems. Such systems are expected to capture dynamic variations of marine environmental parameters and provide a scientific basis for sustainable marine management and the construction of ecological civilization. **[Analysis, Discussion and Progress]** This paper provides an overview of international progress in marine ecological observation technologies, focusing on nearshore, deep-sea, and seafloor monitoring systems. Developed marine countries have built integrated observation networks composed of buoys, coastal stations, underwater platforms, and satellite remote sensing, which together achieve long-term, continuous, and real-time monitoring of multiple environmental and ecological parameters. Typical examples include the United States Integrated Ocean Observing System (IOOS), the Ocean Observatories Initiative (OOI), Canada's NEPTUNE seafloor network, and Europe's EMSO project. These networks have demonstrated the capability to monitor not only hydrological and meteorological variables but also ecological indicators critical for predicting and preventing ecological disasters. By comparison, China's ocean ecological observation systems started relatively late and have mainly relied on coastal eco-buoys since the reform and opening-up period. Although more than 100 buoy-based monitoring stations have been deployed across major coastal provinces, these systems are still limited in scope, parameter diversity, and integration capacity. Current observation remains dominated by localized, single-point monitoring, with insufficient network connectivity and poor spatial resolution. Moreover, the existing systems are constrained by limited endurance, high maintenance costs, and weak data-sharing mechanisms, making it difficult to fully meet the requirements of ecological disaster early warning and ecosystem protection in the new era. **[Conclusions and Prospects]** To overcome these limitations, this paper proposes that China's ecological observation should shift from simple buoy-based approaches toward the construction of collaborative, stereoscopic observation networks. Such networks should integrate multiple platforms: Shore-based towers, eco-buoys, underwater cabled observatories, shipborne systems, unmanned aerial vehicles, and satellite remote sensing: Forming a comprehensive "shore-sea-air-space" observation framework. With enhanced accuracy, extended parameters, and improved spatial and temporal coverage, these networks would enable dynamic, multi-dimensional monitoring of marine ecological processes. The establishment of such integrated networks is expected to play a crucial role in early warning of ecological disasters such as harmful algal blooms, coral bleaching, and ecosystem degradation. Furthermore, the accumulation of long-term, continuous datasets will provide essential support for assessing ecosystem health, guiding ecological restoration projects, and improving the resilience of coastal socio-economic systems. On a broader scale, advancing China's marine ecological observation capacity will also contribute to international collaboration in global ocean observing, strengthen data-sharing, and enhance China's role in addressing global marine environmental challenges. In summary, the paper highlights both the progress and the limitations of China's current ecological observation efforts and argues for a transformation toward advanced, stereoscopic, and multi-platform ecological observing systems. This transition is vital for improving marine ecological protection, supporting disaster prevention and mitigation, and achieving the long-term goal of sustainable ocean development under ecological civilization.

Key words: ocean ecological observing system; marine ecological disaster; ecological warning monitoring; stereoscopic observing network

Received: 2024-09-11; Revised: 2025-02-27; Accepted: 2025-03-07

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240516