

海洋生态在线监测技术研究进展

王宁, 李燕, 杨鹏程, 司惠民, 刘玉

(国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘要:在人类活动和气候变化的双重压力下, 当前我国各类生态灾害多发、典型生态系统普遍退化、海洋生物资源持续衰退, 海洋生态安全形势不容乐观, 海洋生态监测工作面临迫切需求。现有的传统监测技术和手段频率低、数据量小、趋势分析难, 难以满足当前生态监测的需求。海洋生态在线监测技术具有实时性、连续性的特点, 可以实现全时段、全天候、不间断地获取海洋环境监测数据, 及时准确掌握环境质量的变化, 具有传统监测手段无法比拟的优势。本文从综合性在线监测系统、监测平台手段、在线监测传感器/分析仪器不同层次, 深入分析了国内外生态在线监测技术发展现状, 探讨了我国在海洋生态监测领域存在的问题, 并提出了相应的发展建议, 推进我国生态监测业务化工作的开展。

关键词:海洋环境科学; 在线监测; 监测技术; 生态监测设备

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2023.01.020

中图分类号: P76

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2023)01-0178-09

在人类活动和气候变化双重压力下, 当前我国海洋生态安全总体形势不容乐观。海岸带地区受高强度开发干扰显著, 海洋生态问题存量较多, 海洋生态系统退化、生物多样性减少、生境丧失及破碎化问题突出, 入海污染物总量依然很大, 赤潮、绿潮等生态灾害多发, 生态保护任务仍然复杂艰巨, 海洋生态预警监测工作面临迫切需求, 现有的传统监测技术已难以满足当前生态预警需求。海洋生态在线监测具有实时性、连续性的特点, 可以实现全时段、全天候、不间断的获取海洋环境监测数据, 及时准确的掌握环境质量的变化, 可有效服务于海洋防灾减灾和生态系统的预警监测, 具有传统监测手段无法比拟的优势。

海洋生态在线监测是以自动分析仪器或传感器为核心, 结合自动控制技术、计算机应用技术以及专用分析软件和信息通讯网络组成的可以实时自动获取监测数据, 并自动远程传输至应用终端, 通过专用软件可自动实现生态预警和信息产品制作, 服务于海洋生态预警和管理的技术手段。

本文从综合性观监测系统、在线监测平台、在线监测传感器/分析仪器不同层次, 深入分析了国内外生态在线监测技术发展现状, 总结国内生态监测存

在的问题, 并提出了相应的工作建议, 推进生态监测业务化工作的开展。

1 国内外海洋综合观监测系统

1.1 国外综合观监测系统

目前世界各国纷纷建立了区域或全球性的海洋观测系统, 包括海洋站(岸基、平台、海岛)、浮标、船舶、海底观测、卫星遥感等^[1-6]。代表性系统有欧洲海底观测网(European Seafloor Observatory Network, ESONET)^[7-9]、欧盟 FerryBox 计划^[10-16]、挪威罗佛敦-韦斯特海洋观测系统[The Lofoten-Vesteralen (LoVe) Ocean Observatory]^[17-18]、美国综合海洋观测系统(Integrated Ocean Observation System, IOOS)^[19-20]、美国大洋观测计划(Ocean Observatories Initiative, OOI)^[21-22]、加拿大海王星(NEP-TUNE)^[23-24]、澳大利亚综合海洋观测系统(Integrated Marine Observing System, IMOS)^[25-26]、美国夏威夷海缆观测网(ALOHA Cabled Observatory, ACO)^[27]等, 具体信息见表1。其中美国的 IOOS 系统和澳大利亚的 IMOS 系统均属于全球海洋观测系统(GOOS)的区域联盟, 进入业务化运行。综合分析各系统服务功能、技术手段、观测要素、运行维护

方式等,总结如下。

表 1 世界主要海洋观测系统统计表^[6]

Tab. 1 Lists of major ocean observation systems in the world

国家或组织	名称	技术手段	观测要素
欧盟	Europe Seafloor Observatory Network (ESONET)	海底缆式观测、浮标观测	风速、风向、气温、气压、波浪、海流、地震仪、pH、溶解氧、浊度、叶绿素、视频等
欧盟	FerryBox	船载走航监测	风速、风向、气温、气压、波浪、海流、水温、盐度、pH、溶解氧、浊度、叶绿素、营养盐、藻类等
挪威	The LofotenVesteralen (LoVe) Ocean Observatory	海底缆式观测	视频、流速、水温、盐度、水深、叶绿素、浊度等
美国	Integrated Ocean Observation System (IOOS)	岸基台站观测、浮标观测、高频地波雷达、滑翔器	风速、风向、阵风强度、气温、气压、波浪、海流、水温、盐度、水深、电导率、浊度、DO、pH、高频地波雷达等
美国	Ocean Observatories Initiative (OOI)	海底缆式观测、滑翔器、AUV	水温、盐度、水深、海流、视频、荧光计、二氧化碳、浊度、硝酸盐、生物识别、深海溶解气体、深海热泉气体等
加拿大	NEPTUNE	海底缆式观测	水温、盐度、水深、地震、海啸、海流、视频、荧光计、二氧化碳、浊度、硝酸盐、气体张力测量、方向传感器、流式细胞仪、沉积物捕获器
澳大利亚	Integrated Marine Observing System (IMOS)	浮标观测、船舶走航	风速、风向、气温、气压、波浪、海流、水温、盐度、水深、叶绿素、浊度、二氧化碳等
美国(夏威夷)	ALOHA Cabled Observatory (ACO)	海底缆系观测	水温、盐度、水深、海流、视频、电导率、荧光计、浊度、水听器
新西兰	Tasman Coastal Assessment and Monitoring (TASCAM)	浮标观测	风速、风向、气温、气压、波浪、海流、水温、盐度、水深、叶绿素、浊度等

①国外观测系统一般为综合观测系统,涉及物理、化学、生物、地质等多个学科。国外业务化或用于科研的观测系统对生态问题都比较关注,生态传感器主要通过搭载在各观测系统中实现长期监测,独立的生态监测站点或系统相对较少。如加拿大的 NEPTUNE 主要开展 3 个领域的研究:一是板块构造运动研究,主要用于地震预测、海啸预警及其所产生的影响;二是研究海洋对气候的影响,揭示气候变化的反应及其对生物变化的影响;三是深海生态系统研究,主要观察深海中的生物群落、能量和营养物质的循环途径以及生态系统在自然环境发生变化时的响应,通过传感器监测各类生态和动力参数的变化,加强对深海生态学的研究^[24]。美国的 OOI 是一个先进的综合科学平台和传感器系统,可测量大西洋和太平洋沿海及开阔海域从海底到海平面的物理、化学、地质和生物的特性与过程。该设施旨在

解决有关地球-海洋系统的关键问题,包括气候变化、生态系统变化、海洋酸化、板块地震活动和海底火山以及碳循环等。OOI 目前包括 83 个实验平台,共加载 830 多个设备,观测设备涵盖从基础的盐度传感器到复杂的水下滑翔机,用来观测海底至海表的物理、化学、地质和生物过程,其中生态监测参数包括溶解氧、pH、硝酸盐、二氧化碳、生物识别、深海溶解气体、深海热泉气体等^[22]。

②围绕不同典型生态系统和海洋生态问题,国外开展了不同的专题监测,如美国河口生态系统监测、澳大利亚海洋科学研究所大堡礁监测、全球海洋酸化监测等,普遍采用人工监测为主,结合在线监测的方式。美国国家河口研究系统(The National Estuarine Research Reserves System, NERRS)隶属于国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA),负责对全国 29 个河

口生态系统进行长期监测^[28], NERRS 采用的在线监测手段主要为定点水质监测站和生态浮标, 搭载的在线监测设备有 YSI 公司 EXO₂ 和 YSI 6600 V2 多参数仪, 监测要素包括水温、电导率、溶解氧、压力、pH、浊度、叶绿素 a 等, 其他营养盐等参数采用人工监测。澳大利亚海洋科学研究所 (Australian Institute of Marine Science, AIMS) 针对大堡礁海域珊瑚礁生态系统展开了长达 30 余年的连续监测^[29], 以掌握其变化趋势, 在珊瑚礁变化监测中, 对珊瑚礁及其周边生物体监测采用人工潜水调查、视频图像分析和遥感监测方法, 对珊瑚礁底质和水质状况采用人工监测。同时, AIMS 采用浮标搭载哈希 WQM 多参数水质仪实现大堡礁附近海域海水温度、盐度、pH、溶解氧、浊度、叶绿素等生态环境要素的实时监测, 为大堡礁海域水质的长期状况和趋势监测提供基础数据。

1.2 国内观监测系统

近年来, 我国涉海相关部门积极开展了海洋环境在线监测系统建设和业务化运行工作^[30-33]。目前业务化运行的海洋生态在线监测系统主要采用岸基站^[34]和浮标^[35-36]两种手段, 主要针对河流入海污染和有明确污染源入海排污口监测, 部分服务于生态灾害监测或基础环境监测。岸基生态监测站监测要素包括水温、盐度、溶解氧、pH、浊度、叶绿素、磷酸盐、氨氮、总磷、总氮、硝酸盐、亚硝酸盐、COD 等, 部分站点加装了水文、气象观测设备, 主要为流速、流量等水文参数, 个别站点包括风速、风向、降雨量、气温、相对湿度、气压等参数。所有生态监测浮标均为综合浮标, 集成水文、气象、生态参数, 具体参数因监测目标不同, 指标略有不同。主要包括气温、气压、湿度、水温、水深、流速、pH、溶解氧、电导率、盐度、浊度、叶绿素 a、化学需氧量、氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐、磷酸盐、总氮、总磷等。

沿海部分省市也陆续开展了针对海洋生态环境的在线监测工作, 具有代表性的有厦门、深圳、浙江、广西等省市自治区, 均先后建设了近岸海洋生态环境在线监测系统, 主要采用浮标的形式, 在地方海洋环境状况及海洋环境灾害预警预报、应对海洋突发事件中均发挥了作用。另外各海洋机构开展了浮标、岸基站、船载、坐底式等综合性观监测系统的试点, 主要针对赤潮等灾害监测或珊瑚礁等典型生态系统监测, 但仅处于示范应用阶段。因此严格来讲, 我国目前尚未形成完善的综合性观监测系统, 在线监测技术应用尚处于起步阶段。

2 在线监测平台

按照集成平台不同, 海洋生态在线监测系统分为岸基监测系统、船载监测系统、浮标监测系统、海底监测系统和移动监测系统等。上述各监测系统可单独工作, 也可以与水文、气象观测系统进一步集成, 形成综合观测系统。单就集成系统种类看, 我国与发达海洋国家差距不大。

2.1 岸基监测系统

岸基监测系统主要由在线监测传感器/分析仪器、数据采集控制器、水样采集分配、通信、供电和辅助设备组成, 实现对海水的自动采样分配、监测和数据传输。

岸基监测系统相对比较成熟, 国外代表产品有美国水质监测系统 (Smart Water Quality Monitoring System, SWQMS)、德国海洋环境自动监测系统 (Marine Environmental Remote-controlled Measuring and Integrated Detection, MERMAID)、挪威 SEAWATCH 海洋自动监测系统等, 这些系统不仅能测量气象水文参数, 还可同时测量多个水质参数, 同时亦可用于船载测量。

目前国内已经建成多套岸基在线监测系统, 其中部分站点已实现数据入网, 供应商主要有山东深海海洋科技有限公司、青岛卓建海洋装备科技有限公司、深圳市朗诚科技股份有限公司、中兴仪器 (深圳) 有限公司等。岸基监测系统所选仪器设备大部分为进口设备, 系统整体国产化率偏低, 仅少数站点全部采用国产设备, 如国家海洋技术中心建设的天津北塘综合观测站、北海局建设的小麦岛、三沙岸基监测站等。

岸基监测系统是目前应用较为成熟的在线监测手段, 其优势是安全性好、运维方便、监测要素多。缺点是用地问题、配套设施 (水、电) 等协调难度大。

2.2 浮标监测系统

浮标监测系统是一种长期、连续、在线监测目标海域状态的锚泊监测系统, 也是国内外应用最为广泛的集成监测平台。目前有只针对水质参数的水质监测浮标, 也有监测包括水文、气象和水质参数的综合浮标。

经过多年的技术进步与应用, 国外海洋浮标技术已经相当成熟, 浮标种类齐全, 测量项目多, 海上生存能力强, 其功能在商业化应用中不断完善, 伴随着海洋监测需求的发展, 还研制了许多专用化浮标和小型化浮标。美国、英国、法国、澳大利亚、日本等国家都建立了自己的资料浮标监测网, 开展海洋气

象、水文、生态等环境要素的监测。通过对浮标网数据的处理和全球共享,服务海洋环境变化监测、促进海洋经济开发、减少海洋灾害。

我国已基本形成了由大型浮标、中型浮标、小型浮标组成的系列化在线生态环境监测浮标产品,在生态灾害预警监测、典型生态系统监测和生态修复跟踪监测中广泛应用,具备了自主浮标结构设计、传感器集成、安全系统、供电系统、通信系统、锚系和岸站设计的能力,浮标可靠性稳定性水平达到或接近国际先进技术水平,主要集成了水温、盐度、pH、溶解氧、叶绿素、浊度、营养盐、蓝绿藻和有色可溶性有机物(Colored Dissolved Organic Matter, CDOM)等水质参数以及气温、空气湿度、气压、雨量等气象参数和波浪、海流等水文参数,其他生态参数受技术现状限制,在浮标上应用较少,搭载的传感器主要为进口传感器。浮标国内供应商主要有国家海洋技术中心、山东省科学院海洋仪器仪表研究所、青岛卓建海洋装备科技有限公司、青岛华兴海洋工程技术有限公司、深圳市朗诚科技股份有限公司等。

浮标监测系统其优势是观测站位设置灵活、适用观测范围广(近、远海)等,缺点是现场维护难度大(布放、维护需要用船),费用高,可搭载生态参数略少。

2.3 船载在线监测系统

船载在线监测系统与岸基在线监测系统工作模式相似,相比具有体积小、集成度高、便携安装等特点,可安装在调查船和商业船上走航测量,亦可实现便携式测量、岸基或海上平台测量。

欧盟的 FerryBox 系统(德国 4H-JENA 公司生产)是典型的船载在线监测系统,2002 年由欧盟发起,截至 2019 年 11 月,已有近 40 个组织或船舶参与了这一计划,包括货船、客船、调查船、巡逻船等多种船舶,航线遍布英国东岸北海、北大西洋、挪威海、波罗的海和地中海等海域^[37],可走航监测温度、盐度、溶解氧、浊度、pH、叶绿素 a、二氧化碳分压、营养盐及浮游植物等参数。FerryBox 系统获得的数据在欧洲环境监测和科学问题研究中发挥了重要作用,为沿线海域尤其是为北海、英吉利海峡等海域水质模型的建立提供了基础数据,揭示水团性质的变化,并利用模型进行环境预测等。通过连续监测记录波罗的海蓝绿藻灾害的发生或早期预警,建立了营养盐浓度与赤潮的关系,评估了波罗的海中蓝藻的发生与营养盐、盐度和温度的关系,理顺了跨国界营养化和浮游植物生产力的相互关系。在世界上其他国家如美国^[38]、加拿大^[39]、日本和澳大利亚^[40],Ferry-

Box 系统也已经得到广泛应用。

目前国内船载系统的研究和应用也有一些报道。在“十一五”863 项目的支持下,自然资源部东海局和南海局分别在“向阳红 08 号”船和原“海监 47 号”船上建设了船载集成监测系统,用于渤海生态环境的预警监测和东海赤潮灾害的预警监测,系统搭载了多套传感器和分析设备,实现了对温度、盐度、溶解氧、浊度、pH、叶绿素 a、营养盐、COD、BOD、总磷、总氮等参数的走航监测^[41]。国家海洋技术中心研制的船载便携式在线监测系统安装在小型商业船上,对天津海洋生态红线区内大神堂海域开展了多次走航式监测,实现常态化实时的海洋大范围监测,结合浮标定点监测数据,为红线区预警监测和监管提供了数据支撑,同时提升了该区域的应急监测能力^[42]。中国科学院烟台海岸带研究所等科研机构应用 FerryBox 系统开展了渤海海峡表层海水水质及溢油监测,分析了该海区的溢油与水质的时空动态变化^[43-44]。目前国内科考船如“嘉庚号”、“雪龙号”、“向阳红 03 号”等也都有装载 FerryBox 系统。

船载在线监测系统的特点是机动性强、监测范围广、监测参数多,尤其适用于灾害或突发事件的应急监测,缺点是搭载集成系统的船舶的使用及运行协调问题难度较大。该系统可作为岸基站监测和浮标监测手段的补充,提高整体预警监测能力。

2.4 海底监测系统

海底监测系统是采用坐底式有缆/无缆设计,集成水文、生态、视频等设备,实现对各要素的监测、数据传输,水下视频信号的获取、存储、传输等。

国外海底监测系统的应用案例较多,代表有欧洲海底观测网(ESONET)、澳大利亚综合海洋观测系统(IMOS)、加拿大海王星(NEPTUNE)等,均采用海底光缆模式,集成了水文、生态、视频等传感器,主要用于海底地震学、动力学、热液喷发、深海生态学等科学问题的研究。

国内目前已开发多个坐底式监测平台用于珊瑚礁、海上牧场、近岸海域的在线监测。同济大学于 2009 年在东海小衢山建立了国内首个海底观测试验站^[45],2011 年系统进行了升级,增加了浊度计、地震计、水下视频设备、二氧化碳传感器等信息收集设备及传感器;浙江大学 2014 年建成了摘箬山海底观测网实验平台^[46-47];2013 年 5 月,三亚海底观测示范系统开始投入运行;2016 年 9 月,中国科学院声学所牵头的“南海深海海底观测实验系统”建成;2017 年,海底科学观测网项目获得国家发改委支

持,我国海底观测网开启全面集中建设阶段,搭载的传感器主要为进口设备^[48]。国家海洋技术中心研制的坐底式在线监测平台已应用在南海珊瑚礁业务化监测中;技术中心还研发了基于海底环状网络平台的长期在线生态环境监测示范系统^[49-50],在山东蓬莱海域开展了长期示范应用,集成的传感器均为国产自主研发,测量参数包括水温、盐度、pH、溶解氧、叶绿素、浊度、硝酸盐、视频等。中国海洋大学开发的有缆坐底式在线监测系统成功应用于生态环境和 underwater 生物状况在线监测,在山东海洋牧场^[51]和南海珊瑚礁^[52]监测中得到应用。

坐底式监测系统站位部署灵活性强、隐蔽性好,对海底生态系统的研究具有非常重要的意义。缺点是后续运行维护费用高,对传感器的水下长期适用性要求高。

2.5 移动监测系统

移动监测系统主要指在水面上或水下的移动观测系统,主要包括无人遥控潜器(ROV)、自治式水下潜器(AUV)、无人水面艇(USV)、水下滑翔器(Glider)、拖曳式观测平台(ROTV)和载人潜水器(HOV)等。

移动式监测平台可以集成视频设备、水质传感器等,作为上述几种平台的补充测量手段,在岸边或搭载调查船不定期开展大范围的监视监测,也可应用于灾害或突发事件的应急监测,但目前处于探索和示范应用阶段。英国普利茅斯大学研发的“SPRINGER”号双体无人船,可搭载温度、深度、电导率、溶解氧、pH、氯化物、浊度、叶绿素等要素进行水质监测^[53]。比利时佛兰德斯海洋研究所(VLIZ)的“AutoNaut”系列无人水面船可装载不同的传感器和模块,在海洋环境噪声测量、海洋生物监控监测、海洋环境观测和通信中继等不同场景被应用。中国科学院沈阳自动化研究所研制的“鲑鱼”系列无人船,具备环境监控、水体自主采样等功能,已在水灾救援和水质采样等方面进行了应用。珠海云州智能科技有限公司研制了“领航者”号海洋高速无人船、“极行者”号海洋探测无人船、“听风者”号滩浅海探测无人船等多款产品,已在海洋生态保护、海洋调查、安防救援等方面进行了应用。国家海洋技术中心研制的复合能源无人艇,具有复合动力、高速航行、长时巡航、目标巡视等功能,可搭载相关传感器应用于海上目标快速巡视和水质监测等。

目前,海洋生态在线监测技术朝着模块化、集成化、网络化发展,建立多种监测手段融合,实时、连续、长期、全天候、全时段的立体监测系统是发展的

必然方向。

3 在线监测传感器/分析仪器

稳定可靠的在线监测传感器/分析仪器是实现海洋生态环境在线监测的关键。世界先进海洋国家从上世纪70年代开始发展海洋生态在线监测技术装备。目前全球领先的海洋生态监测装备研发和生产机构分布于美国、英国、德国、意大利、加拿大、挪威、日本等国家,出现了一批领先的装备机构(如美国哈希 Hach、海鸟 Sea-Bird 等)和产品类型(如意大利 Systea WIZ 营养盐分析仪,美国 Satalantic SUNA 硝酸盐传感器,美国哈希 Hach、加拿大 RBR、美国 YSI、美国 AML 等大公司的多参数水质仪)。目前国外综合性观测系统采用的在线监测装备主要出自上述机构。

在国家 863 计划、海洋公益项目、国家重大研发计划等的支持下,我国海洋监测技术取得巨大进展,虽然在线监测技术及其核心传感器的发展与国外仍存在一定差距,但已突破了一批国际前沿关键技术,形成了门类相对齐全的监测仪器体系,自主研发的海水 pH、溶解氧、叶绿素、浊度、营养盐、COD 等少数生态化学要素监测设备逐步得到推广应用,但成果的自动化、智能化水平及可靠性、稳定性等尚需提高,制作工艺粗糙,竞争力不强,国产仪器尚未得到有效和充分的利用。国内主要研发和生产机构有:国家海洋技术中心、山东省科学院海洋仪器仪表研究所、河北科技大学、深圳市朗诚科技股份有限公司、杭州腾海科技有限公司、厦门斯坦道科学仪器股份有限公司、上海泽铭环境科技有限公司、苏州禹山传感科技有限公司等。

应用在海洋环境监测中的在线监测设备其原理涉及化学、光学和生物学等不同学科,监测参数包括常规水质参数、营养盐、有机污染物、总磷总氮、油类、重金属、放射性核素和水中 CO_2 和 CH_4 等参数,基本涵盖了海洋水质监测的相关要素。由于测量方法和需求的不同,这些技术的发展和应用于不同的层次和阶段。

①常规水质参数主要包括水温、盐度、pH、溶解氧、电导率、浊度、叶绿素等,这些参数是海洋生态保护的基础测量参数。其传感器技术比较成熟,测量数据准确度较高,目前已广泛应用于浮标、岸基站、及坐底式平台的业务化监测中。该类传感器属于原位传感器,直接布放于海水中应用,受海水污染、生物附着等影响,需定期进行清洗维护,以保证其长期可靠运行;电极法 pH 传感器需定期进行校准以保

证其数据的准确性。

②海水中营养盐物质主要包括海水营养盐和总磷总氮两部分,分析仪器主要采用的湿化学法。其中营养盐监测技术较成熟,测量数据准确度高,其在线监测仪器集成现场自动采样分配装置后已在岸基站或船舶走航监测中得到应用,通过定期进行试剂更换、定标等维护可保障仪器长期可靠运行;湿化学法的营养盐水下原位监测设备,其可靠性尚需进一步提高;紫外法硝酸盐传感器技术发展迅速,测量准确度较高,可应用于浮标、海底、岸基站等进行长期原位监测。总磷总氮在线监测仪器已在部分岸基站得到试点应用,但其长期运行可靠性、测量稳定性等仍需进一步提高。

③TOC、BOD、COD 是评价海水水质有机污染物的综合指标,目前,三个指标均有市场化的自动在线监测仪器,已在部分岸基站得到试点应用,但可靠性、稳定性等尚需进一步优化改进提高。光学法测量有机污染物(COD、TOC 等)的传感器,在海洋现场应用较少,尚需进一步试验研究确定数据的准确性和可靠性。

④原位油类传感器大部分采用的是荧光法,表征的主要是苯系物的浓度,难以得到准确的油类含量值,仅可定性或半定量监测海水中油的含量,提供该区域油类的变化趋势,可用于环境预警和趋势预测;水中的 CO_2 和 CH_4 传感器,在走航监测或原位监测中得到初步应用。

⑤重金属及生物传感器技术尚不成熟,市场上可见的在线监测设备集中在少量仪器厂家,设备的应用案例也较少。海水微塑料、新型有机污染物等的监测也尚处于方法探索阶段,未能形成在线监测设备。

总体上看,目前国内外已形成了门类相对齐全的海洋生态在线监测仪器体系,部分监测设备(水温、盐度、pH、溶解氧、浊度、叶绿素、营养盐等)经过多年的海洋现场验证,其测量准确度、设备可靠性和环境适应性可满足当前生态预警监测的需求;其余监测设备其现场长期运行可靠性、稳定性、数据准确性等仍需进一步提高完善和现场测试验证。

目前,海洋生态在线仪器/传感器均朝着集成化、小型化、低功耗、高防污方向发展,以光学监测技术为基础的多种参数的测量方法研究成为热点。

4 存在问题和 development 建议

综上所述,海洋生态在线监测技术已在全球范围内多个海洋立体观测体系中得应用,所支持的技

术包括岸基站、浮标、水下剖面、海底观测网络和科学考察船等。我国相对起步较晚,各类生态在线监测系统为地方海洋环境保护和管理提供了技术支撑,发挥了积极的作用,为我国海洋生态在线监测系统建设积累了一定的宝贵经验。但总体来说,我国海洋生态在线监测体系的建设尚处于起步阶段,尚未形成综合海洋环境立体监测能力^[54],存在的主要问题如下:

①在线监测代表性站点不足,滨海海洋生态环境观测体系薄弱。基于岸站、浮标等构建的我国海洋环境观测网络,主要对水温、盐度、风速和风向等水文气象要素进行观测,缺乏对其他生态参数的监测,无法满足日益提高的海洋防灾减灾和生态环境保护要求。

②设备缺少必要的测试评估,生态在线监测设备布放于海洋现场后表现良莠不齐,在线监测数据缺少标准支撑,数据应用率低,无法进行业务化应用。

③我国海洋生态环境监测技术创新能力不强,主要设备依赖进口,运维管理难度大,技术成果转化与产业化率不高,尚不能满足当前生态监测业务化工作的需求。

为推进在线监测在海洋生态监测体系中的应用,以“需求导向、立足生态”为原则,综合考虑任务需求和技术现状,在技术层面和运行管理方面建议如下:

①建立高密度海洋立体观测网络。从总体上看,国际海洋观测的目标是建立全球联网的立体观测系统,目前已发展起包括卫星遥感、浮标阵列、海洋观测站、水下剖面、海底有缆网络和科学考察船的全球化观测网络。结合我国海洋生态监测需求,有针对性地在关键海区建立多参数长期、立体、实时监测网,有效、连续地获取和传递海洋长时间序列综合参数。

②加强新技术研发,推进国产设备成果转化。继续加大生态在线监测设备的支持和推广力度,开展海洋在线监测设备的原理创新、方法创新,强化传感器探头、敏感材料、基础工艺等海洋监测设备关键技术研发,从根本上解决“卡脖子”问题,以提高监测设备国产化比例和形成国际研究影响力为重点,推进国产海洋监测设备产业化与应用示范。

③建立和完善海洋生态在线监测技术标准体系。目前海洋生态环境在线监测的技术标准体系还很不完善,应统一海洋生态在线监测设备数据格式、通讯方式、硬件接口等相关标准规范,建立设备选型、运行维护、质量控制、备品备件和日常管理的技

术标准,提高在线监测设备标准化,增加不同站点设备之间的互换性,逐步完善海洋生态在线监测标准体系。

④开展在线监测仪器设备测试检验和质量评估。建立现场测试检验方法,对国内外海洋生态监

测设备进行现场测试评估,考察监测设备的标准符合性、接口规范性、数据准确性,以及装备在海洋现场的稳定性、可靠性、维修性、海洋环境适应性等指标,补齐海洋生态在线监测设备应用的薄弱环节,为在线监测设备业务化运行提供测试评估基础。

参考文献:

- [1] 李潇,许艳,杨璐,等.世界主要国家海洋环境监测情况及对我国的启示[J].海洋环境科学,2017,36(3):474-480.
LI X, XU Y, YANG L, et al. Marine environmental monitoring in major countries of the world and its enlightenment to China[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(3): 474-480.
- [2] 王祎,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 US IOOS for reference [J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(6): 34-39.
- [3] 同济大学海洋科技中心海底观测组.美国的两大海洋观测系统:OOI与IOOS[J].地球科学进展,2011,26(6):650-655.
Sea-Floor Observation Group, Marine Science & Technology Center, Tongji University. Two marine observation systems in USA: OOI and IOOS [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(6): 650-655.
- [4] 陈建军,张云海.海洋监测技术发展探讨[J].水雷战与舰船防护,2009,17(2):47-50.
CHEN J J, ZHANG Y H. Discussion on development of ocean monitoring technology[J]. Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2009, 17(2): 47-50.
- [5] 曹焯,刘岩,曹璐.海洋生态环境监测传感器的应用与发展[J].海洋技术学报,2015,34(3):48-53.
CAO X, LIU Y, CAO L. Application and development of marine ecological environmental monitoring sensor[J]. Journal of Marine Technology, 2015, 34(3): 48-53.
- [6] 罗续业.海洋技术进展2014[M].北京:海洋出版社,2015.
LUO X Y. Advances in marine technology 2014[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015.
- [7] PRIEDE M, SOLAN M. The European Seafloor Observatory Network (ESONET)[J]. Hydro International, 2003, 7(7): 6-9.
- [8] PRIEDE I G, PERSON R, FAVALI P. European Seafloor Observatory Network[J]. Sea Technology, 2004, 46(10): 45-49.
- [9] GILLOOLY M, NOLAN G, O'NEILL N, et al. The European Seafloor Observatory Network Implementation Model: towards a model for European Observatory Implementation[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2007 symposium on underwater technology and workshop on scientific use of submarine cables and related technologies. Tokyo: IEEE, 2007: 698-701.
- [10] 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): 1 729-1 734.
- [11] PETERSEN W. FerryBox systems: state-of-the-art in Europe and future development[J]. Journal of Marine Systems, 2014, 140: 4-12.
- [12] KARLSON B, ANDERSSON L S, KAITALA S, et al. A comparison of FerryBox data vs. monitoring data from research vessels for near surface waters of the Baltic Sea and the Kattegat[J]. Journal of Marine Systems, 2016, 162: 98-111.
- [13] MARREC P, CARIOU T, LATIMIER M, et al. Spatio-temporal dynamics of biogeochemical processes and air-sea CO₂ fluxes in the Western English Channel based on two years of FerryBox deployment[J]. Journal of Marine Systems, 2014, 140: 26-38.
- [14] 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): 1 541-1 554.
- [15] GRAYEK S, STANEVA J, SCHULZ-STELLENFLETH J, et al. Use of FerryBox surface temperature and salinity measurements to improve model based state estimates for the German Bight[J]. Journal of Marine Systems, 2011, 88(1): 45-59.
- [16] HALLER M, JANSSEN F, SIDDORN J, et al. Evaluation of numerical models by FerryBox and fixed platform in situ data in the southern North Sea[J]. Ocean Science, 2015, 11(6): 879-896.
- [17] PEDERSEN G, JOHNSEN E, ØDEGAARD L A, et al. The Lofoten-Vesterålen Ocean Observatory: a cabled infrastructure for operational acoustical oceanography[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 146(4): 2773.
- [18] 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(4): 2627.
- [19] WILLIS Z, GRIESBAUER L. U.S. IOOS: an integrating force for good[J]. Marine Technology Society Journal, 2013, 47(5): 19-25.
- [20] MALONE T C, HEMSLEY M J. Developing the IOOS for improved management and mitigation of coastal inundation[J]. Marine Technology Society Journal, 2006, 40(4): 45-55.
- [21] SMITH L M, BARTH J A, KELLEY D S, et al. The Ocean Observatories Initiative[J]. Oceanography, 2018, 31(1): 16-35.
- [22] 吴自军.美国大型海底观测计划(OOI)正式启动运行[J].海洋地质与第四纪地质,2016,36(6):134.
WU Z J. Ocean Observatories Initiative (OOI) officially launched[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(6): 134.
- [23] BARNES C R, BEST M M R, JOHNSON F R, et al. Challenges, benefits and opportunities in operating cabled ocean observatories: perspectives from NEPTUNE Canada[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2011 IEEE symposium on underwater technology and workshop on scientific use of submarine cables and related technologies. Tokyo: IEEE, 2011: 1-7.

- [24] TAYLOR S M. 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] DUENNEBIER F, HARRIS D, JOLLY J. ALOHA cabled observatory will monitor ocean in real time[J]. Sea Technology, 2008, 49(2): 51-54.
- [28] Office for Coastal Management. About National Estuarine Research Reserves[EB/OL]. [2021-08-24]. <https://coast.noaa.gov/nerrs>.
- [29] Australian Institute of Marine Science. Monitoring water quality[EB/OL]. [2021-08-24]. <https://www.aims.gov.au/monitoring>.
- [30] 王悦静. 我国海洋环境监测技术及系统的研究[J]. 中国新技术新产品, 2019(8): 124-125.
WANG Y J. Research on marine environmental monitoring technology and system in China[J]. New Technology & New Products of China, 2019(8): 124-125.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 王志滨, 李培良, 顾艳镇. 海洋牧场生态环境在线观测平台的研发与应用[J]. 气象水文海洋仪器, 2017, 34(1): 13-17.
WANG Z B, LI P L, GU Y Z. Development and application of the online observation platform for the ecological environment of marine ranching[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2017, 34(1): 13-17.
- [34] 杨颖, 徐彻. 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.
- [35] 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.
- [36] 刘保良, 陈旭阳, 李斌, 等. 基于在线监测浮标的银滩海域水质要素趋势分析[J]. 科学技术创新, 2020(31): 195-196.
LIU B L, CHEN X Y, LI B, et al. Trend analysis of water quality elements in Yintan sea area based on online monitoring buoy[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(31): 195-196.
- [37] 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.
- [38] PAERL H W, ROSSIGNOL K L, GUAJARDO R, et al. FerryMon: ferry-based monitoring and assessment of human and climatically driven environmental change in the Albemarle-Pamlico sound system[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(20): 7609-7613.
- [39] HALVERSON M J, PAWLOWICZ R. High-resolution observations of chlorophyll-a biomass from an instrumented ferry: influence of the Fraser River plume from 2003 to 2006[J]. Continental Shelf Research, 2013, 59: 52-64.
- [40] LEE R S, MANCINI S, MARTINEZ G, et al. Resolving environmental dynamics in Port Phillip Bay, using high repeat sampling off the spirit of Tasmania[C]//Engineers Australia. Proceedings of the 20th Australasian coastal and ocean engineering conference and the 13th Australasian port and harbour conference. Barton: Engineers Australia, 2011: 404-409.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 唐诚, 刘斌, 刘欣, 等. 基于FerryBox系统的渤海海峡表层海水水质及溢油监测[J]. 船海工程, 2018, 47(2): 73-76.
TANG C, LIU B, LIU X, et al. Surface water and oil spill monitoring of Bohai Strait based on Ferrybox system[J]. Ship & Ocean Engineering, 2018, 47(2): 73-76.
- [44] 侯朝伟, 唐诚, 邹涛, 等. 基于FerryBox的渤海海峡水质低成本长期自动监测[J]. 海洋科学, 2017, 41(5): 59-70.
HOU C W, TANG C, ZOU T, et al. Long-term and low-cost automatic monitoring of water quality in the Bohai Strait using FerryBox[J]. Marine Sciences, 2017, 41(5): 59-70.
- [45] 许惠平, 张艳伟, 徐昌伟, 等. 东海海底观测小衢山试验站[J]. 科学通报, 2011, 56(22): 1839-1845.
XU H P, ZHANG Y W, XU C W, et al. Coastal seafloor observatory at Xiaoshan in the East China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(22): 1839-1845.
- [46] CHEN Y H, YANG C J, LI D J, et al. Development of a direct current power system for a multi-node cabled ocean observatory system[J]. Jour-

- nal of Zhejiang University SCIENCE C, 2012, 13(8): 613-623.
- [47] LI D J, WANG J, FENG J S, et al. Study and design of a heat dissipation system in a junction box for Chinese experimental ocean observatory network[J]. Marine Technology Society Journal, 2016, 50(2): 63-74.
- [48] 陈建冬, 张达, 王潇, 等. 海底观测网发展现状及趋势研究[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(6): 95-103.
CHEN J D, ZHANG D, WANG X, et al. Research on the state-of-the-art and trends of seafloor observatory[J]. Journal of Ocean Technology, 2019, 38(6): 95-103.
- [49] 宋雨泽, 刘星, 李彦, 等. 海底观测系统关键技术研究[J]. 海洋湖沼通报, 2019(4): 47-54.
SONG Y Z, LIU X, LI Y, et al. Research on key technology of seabed observation system[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2019(4): 47-54.
- [50] 李超, 李彦, 朱锐, 等. 海底原位在线观测节点电能管理系统设计[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(6): 49-55.
LI C, LI Y, ZHU R, et al. Design of a power management system for *in situ* online seafloor observation nodes[J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(6): 49-55.
- [51] 翟方国, 顾艳镇, 李培良, 等. 山东省海洋牧场观测网的建设与发展[J]. 海洋科学, 2020, 44(12): 93-106.
ZHAI F G, GU Y Z, LI P L, et al. Construction and development of marine ranch observation network in Shandong Province[J]. Marine Sciences, 2020, 44(12): 93-106.
- [52] 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(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(6): 61-66.
- [53] 范聰慧, 于非, 南峰, 等. 基于无人船的大洋中尺度涡观测系统展望[J]. 海洋科学集刊, 2016(1): 49-57.
FAN C H, YU F, NAN F, et al. Prospect of ocean mesoscale vortex observation system based on unmanned ship[J]. Studia Marina Sinica, 2016(1): 49-57.
- [54] 宋宪仓, 杜君峰, 王树青, 等. 海洋科学装备研究进展与发展建议[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 76-83.
SONG X C, DU J F, WANG S Q, et al. Research progress of marine scientific equipment and development recommendations in China[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 76-83.

Advances in marine ecological on-line monitoring technology

WANG Ning, LI Yan, YANG Pengcheng, SI Huimin, LIU Yu

(National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract: Under the dual pressures of anthropogenic activities and climate changes, various ecological disasters degrading generally typical ecosystems of marine living resources occur frequently in China. The situation of marine ecological security is facing with challenges of urgent requirement of marine ecological monitoring as the existing traditional monitoring techniques having disadvantages of low frequency monitoring, limit data storage and inability of trend analysis hardly meeting the needs of ecological monitoring. Marine ecological on-line monitoring technology has the characteristics of real-time, all weather and continuity of data obtaining during the monitoring performance. Thus, it can follow the information changes of environmental quality timely and accurately. It has incomparable advantages over traditional monitoring methods. In this paper, different levels of comprehensive on-line monitoring system, monitoring platform and on-line monitoring sensors/analytical instruments, the status of ecological on-line monitoring technology home and abroad are fully analyzed. At last, the problems of marine ecological monitoring in China are discussed and the corresponding development suggestions are put forward for the development of ecological monitoring in China.

Key words: marine environment science; on-line monitoring; monitoring technology; ecological monitoring equipment

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2023.01.020

(责任编辑:肖 静)