

空天光学遥感技术在海洋领域的应用与展望

张函¹, 叶观琼^{1,2}, 林春宇^{1,3}, 尚卫东⁴, 郑永超⁴, 张景豪⁴

(1. 浙江大学海洋学院 舟山 316000; 2. 浙江大学海南研究院 三亚 572000;
3. 浙江大学舟山海洋研究中心 舟山 316000; 4. 北京空间机电研究所 北京 100094)

摘要: 空天光学遥感技术凭借其覆盖范围广、响应速度快、监测成本低等显著优势, 突破了传统海洋观测手段的局限, 实现了对海洋的多维、立体、精准监测。然而, 现有研究多聚焦于单一应用场景, 尚未系统整合该技术在海洋领域的多维应用潜力。基于此, 文章系统地梳理了空天光学遥感技术在海洋渔业资源监测、海洋交通运输管理、海洋可再生能源开发及海洋生态环境保护领域的应用现状, 并通过国内外对比分析揭示了技术应用差距的具体表现。研究发现, 我国空天光学遥感技术在上述应用中面临四维挑战:(1) 高光谱、高空间分辨率遥感技术的研制能力不足;(2) 海洋遥感数据利用率不足;(3) 遥感技术与多源数据融合应用不足;(4) 面向特定需求所提供的定制化服务不足。针对上述挑战, 文章结合实际应用场景, 有针对性地提出优化路径, 明确了目前遥感技术的优化重点, 为构建空天海一体化海洋监测体系提供了切实的理论依据和关键技术路线支撑。

关键词: 空天光学遥感; 海洋观测; 海洋产业应用; 空天海一体化海洋监测体系

中图分类号: TP79; P714

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2026)01-0066-11

Application and Prospects of Aerospace-Based Optical Remote Sensing Technology in the Marine Domain

ZHANG Han¹, YE Guanqiong^{1,2}, LIN Chunyu^{1,3}, SHANG Weidong⁴,
ZHENG Yongchao⁴, ZHANG Jinghao⁴

(1. Ocean College Zhejiang University, Zhoushan 316000, China; 2. Hainan Institute of Zhejiang University, Sanya 572000, China; 3. Ocean Research Center of Zhoushan, Zhejiang University, Zhoushan 316000, China; 4. Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Aerospace-based optical remote sensing technology, characterized by its wide coverage, rapid response capability, and low monitoring cost, has overcome the limitations of traditional marine observation methods and support multi-dimensional, three-dimensional, and high-resolution monitoring of marine environments. However, existing studies have predominantly focused on isolated application scenarios and

收稿日期: 2025-04-19; 修订日期: 2025-11-05

基金项目: 浙江省“尖兵领雁+X”研发攻关计划(2024C03235); 空天光学遥感技术在东海区域的应用发展研究(AIRSE20235); 浙江省博士后科研项目择优资助一等资助(ZJ2024024).

作者简介: 张函, 博士研究生, 研究方向为智慧海洋

通信作者: 叶观琼, 博士, 教授、博士生导师, 研究方向为海洋评估、规划与管理; 海洋生态文明建设、海洋承载力和红线研究; 海洋生态系统时空变化研究; 智慧海洋

have not yet systematically integrated the multi-dimensional application potential of this technology in the marine domain. Based on this background, this paper systematically reviews the application progress of aerospace-based optical remote sensing technology in marine fisheries monitoring, maritime transportation management, marine renewable energy development, and marine ecological environment protection. Through a comparative analysis of domestic and international practices, the specific technological application gaps are identified. The results reveal that the application of this technology in China faces four major challenges: (1) limited capability in the independent development of high-spectral and high-spatial-resolution sensors; (2) low utilization efficiency of acquired marine remote sensing data; (3) insufficient integration of remote sensing outputs with multi-source heterogeneous datasets; (4) a lack of customized, scenario-driven service solutions tailored to specific application needs. In response to these challenges, this paper, grounded in practical application scenarios, proposes a set of targeted optimization pathways and clarifies the current priority areas for improving remote sensing technologies. Furthermore, it provides a solid theoretical basis and key technical guidance for building an integrated “air-space-ocean” remote sensing monitoring system.

Keywords: Aerospace-based optical remote sensing, Marine observation, Marine industry applications, Integrated air-space-ocean marine monitoring system

0 引言

随着全球气候变化加剧及人类活动强度的不断上升,海洋面临生态系统退化、资源约束趋紧与环境风险增高等多重挑战。其中,大规模围填海工程大幅度改变了沿海水体与湿地格局,造成岸线硬化与生态廊道破碎^[1-2],海洋资源的过度开发也使全球 37.7% 的鱼类种群处于不可持续捕捞状态^[3],严重影响海洋生物多样性。这些问题共同降低了生态环境的稳态能力,成为制约沿海可持续发展的关键瓶颈。为实现对海洋变化的及时感知和科学评估,亟须建立高效、连续、覆盖广泛的海洋观测体系,以支撑生态环境管理与资源调控决策。然而,当前传统海洋观测手段,如浮标观测、船基测量等,在

数据时效性、空间覆盖范围和多要素监测能力方面存在明显不足,难以满足现代海洋管理对高精度、多尺度、全天候监测数据的现实需求。相较于传统手段,空天光学遥感技术(以下简称“遥感技术”)通过构建由卫星星座、无人机集群与地面系统组成的立体化“空一天一地”观测网络,具备广覆盖、低成本与快速响应等优势,为现代海洋观测体系的建立提供了核心技术支撑。遥感技术按获取机制可分为被动遥感与主动遥感,本文重点梳理的光学遥感、传统雷达遥感与全球导航卫星系统反射遥感(Global Navigation Satellite System-Reflectometry, GNSS-R)均在现代海洋观测体系中发挥重要的作用,三者成像方式、信息获取能力与典型应用方面各具优势,形成互补协同的观测体系(表 1)。

表 1 主动遥感与被动遥感技术的海洋应用特性对比

Table 1 Comparison of active and passive remote sensing technologies in marine applications

遥感类型	成像原理	空间分辨率	时间分辨率	主要优势	典型应用	局限性
光学遥感	被动接收太阳反射辐射	高(约 0.3 ~ 30 m)	中(约 1 ~ 16 d)	图像直观、空间分辨率高、波段多样	水质监测、岸线提取、赤潮识别、渔场判识	受天气与光照影响,云遮严重
传统雷达遥感(SAR、雷达高度计)	主动发射并接收微波	中(约 1 ~ 10 km)	高(约 1 ~ 12 d)	全天候、全天时成像、穿透性强	海面风浪、油污、船舶与冰区监测	图像噪声较大、几何畸变需校正
GNSS-R 反射遥感	被动接收导航卫星信号的地表反射	低(约 0.5 ~ 25 km)	极高(约 0.01 ~ 3 d)	成本低、数据丰富、可用于广域连续探测	海面粗糙度、潮位动态、水汽与土壤湿度估算	空间分辨率低、受多路径干扰

值得说明的是，本文聚焦光学遥感技术，主要因其在近岸生态监测、水色反演等领域应用广泛，但当前该技术在数据精度和场景适应性方面仍存在明显不足，亟须系统梳理与优化。与此同时，本文将简述合成孔径雷达（SAR）与高度计等其他遥感手段的典型作用，以保持技术视角的完整性。

当前，遥感技术在海洋领域的应用呈现显著的地域特征，逐步形成以北美为代表的雷达监测体系、以欧盟为代表的多参数协同观测体系以及以亚太地区为代表的高光谱成像技术体系等差异化发展格局。其中，美国自 1978 年首颗专用海洋监测卫星（Seasat）成功发射以来^[4]，率先在 SAR 技术方面实现突破，并依托陆地卫星（Landsat）系列构建了较为完善的海岸带生态环境遥感监测体系，在悬浮泥沙和叶绿素 a 浓度方面实现了 90% 左右的反演精度^[5]；加拿大的雷达卫星星座提升了极端海况的监测能力；欧盟“哨兵”系列卫星实现了海洋温度、

盐度等多参数的协同观测^[6]；日本先进陆地观测卫星三号（ALOS-3）卫星搭载了拥有 185 个光谱通道的高光谱成像仪和 5 个波段的多光谱成像仪^[7]，为海洋生态要素反演提供了技术支持。相较于上述国家和地区，我国海洋遥感技术应用起步较晚，但在政策扶持与工程实践的双重驱动下，近年来取得了显著进展，逐步构建起近海污染动态追踪、渔业资源精细化管理、深海矿产勘探评估、海上交通态势感知四大典型应用体系。

尽管我国遥感技术在海洋领域已经取得上述进展，但整体系统能力的提高仍面临重大挑战。为此，本研究基于对国际典型案例的纵向追踪与横向对比，归纳出目前我国遥感技术在海洋领域应用所面临的多维挑战。为系统应对上述挑战，本研究构建了“数据获取—数据处理—系统集成—应用服务”的四维协同解决方案（图 1），为我国空天海一体化海洋监测体系的自主可控发展提供有效的理论范式与技术路线。

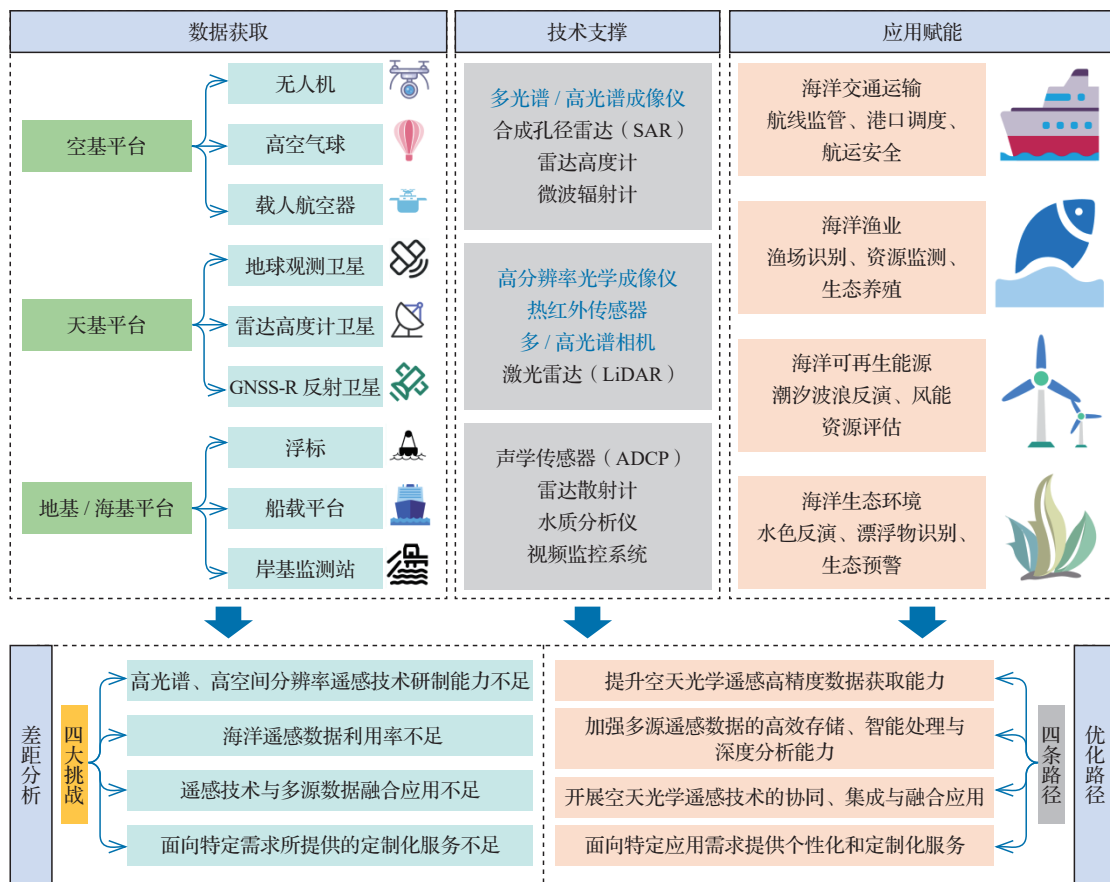


图 1 空天遥感技术支撑下的海洋观测体系构成与优化路径

Fig.1 Architecture and optimization pathways of the marine observation system empowered by aerospace remote sensing

1 国内外遥感技术应用现状

本文从海洋交通运输、渔业资源监测、可再生能源开发和生态环境保护 4 个重点应用领域出发, 对当前遥感技术的海洋应用现状进行分析, 旨在厘清其关键演进方向与业务化转型潜力, 为推动该技术在海洋领域的高效落地提供现实支撑。

1.1 海洋交通运输业

遥感技术通过船舶定位追踪、交通风险评估和航线安全保障三大核心功能支撑海上交通管理。具体为: 基于多光谱图像的算法实现船舶精确定位与轨迹监测; 利用气象卫星数据分析海雾、洋流及溢油污染的时空特征, 完成区域海洋交通的风险评估; 通过建立强对流天气、热带气旋等灾害天气高频监测机制, 实时预警极端气象事件, 优化海上航线。

国际上, 遥感技术在海洋交通运输业的具体应用主要集中于算法优化与系统集成两个方面。在算法优化方面, 孟加拉国和越南等国家合作开展的跨尺度目标识别研究, 通过持续优化算法数据结构与特征提取机制, 有效地解决了复杂海况背景干扰、多尺度目标差异及小型船舶特征模糊等关键难题, 使复杂场景下的船舶检测可靠性提升了 6%~9%^[8]。在系统集成方面, 意大利研发的非法交通监测平台创新性地融合了卫星雷达与光学影像数据, 构建了基于几何—散射特征联合分析的船舶智能识别框架, 实现了重点海域船舶航行路径的精准预测^[9]。这些技术的突破标志着遥感技术在海洋交通领域的应用已从单一技术攻关转向系统性能力建设的新阶段。

在国内, 遥感技术在海洋交通运输业的具体应用集中在目标识别、船舶轨迹分析和区域级应用拓展 3 个方面。第一, 目标识别与提取方法的持续优化。该方向经历了从早期基于矢量构建与无监督分类算法的船舶—海面分离方法^[10], 到近年来依托改进型深度学习模型与特征增强算法, 有效地突破了复杂背景与夜间识别难题^[11]。针对样本数量受限场景, 研究进一步引入小样本学习与生成对抗增强技术, 使小目标检测任务中的识别精度达到 90.8%^[12], 显著提升了低数据质量条件下的目标识别可靠性。

第二, 船舶轨迹分析与数据融合能力的提升, 涵盖基于 3 次样条插值与卡尔曼滤波融合的轨迹优化方法^[13], 以及自主卫星 (HY-2A/B) 数据驱动的海面风场反演技术 (分辨率达到 10 km)^[14], 尤其是夜光遥感与船舶自动识别系统 (AIS) 数据联合反演技术为夜间动态监测提供关键支撑^[15]。第三, 区域级应用场景的体系化拓展, 包括北极航线安全保障中的海冰监测技术^[16], 以及海洋灾害预警方向的东海海温时空演变研究^[17]。

1.2 海洋渔业

遥感技术在海洋渔业中的应用显著提升了鱼类分布预测、资源动态评估与渔情预报的业务化运行效能, 为现代海洋渔业管理提供了重要的技术支撑。在鱼类分布预测方面, 主要通过遥感反演获取海表温度、叶绿素 a 浓度等关键环境参数, 并融合历史渔获数据与目标物种生态响应机制, 构建渔场适宜性指数模型。当前广泛应用的随机森林与支持向量机算法可实现目标鱼种空间分布的可视化预测, 从而提升资源分布预测效率。在资源动态评估方面, 通过遥感参数与 AIS 渔船轨迹数据的空间叠加分析, 识别高强度捕捞热点与潜在资源富集区, 结合旬际尺度的遥感同化数据, 能够动态解析资源量变趋势, 有助于开展区域性渔业开发潜力评估。在渔情预报方面, 通过遥观测的环境参数时序特征与气候模态指数, 如南方涛动 (SOI) 和太平洋年代际振荡 (PDO) 相位变化的耦合分析, 建立中短期渔情预测模型, 有效提高预测的时效性与准确率。

全球主要渔业国家已逐步构建起多维协同的空天光学遥感监测体系。20 世纪 90 年代以来, 印度与加拿大联合研究团队基于对海州湾—对马海域的跨区域海温遥感特征解析, 首次量化了海洋热力学过程对渔汛周期的调控机制^[18]。日本学者通过发展多光谱卫星影像支持下的西北太平洋非法作业识别算法, 显著提升了渔业监管的执法响应速度^[19]。针对孟加拉湾海域的生态管理需求, 研究者创新性地构建了星载多参数水质动态监测技术, 其基于叶绿素浓度与溶解氧的协同反演模型, 为近海养殖区提供了精细化环境评估框架^[20]。整体来看, 国际上逐步实现由单一要素监测向复合生态过程解析的

技术应用转变。

我国遥感技术在海洋渔业领域的应用覆盖基础研究、技术创新和应用研究等多个层面。在基础研究层面,涵盖环境评估、机理分析、理论建模等多个方面。中国台湾学者针对北太平洋渔场,建立了基于多光谱特征的栖息地评估方法,为资源可持续利用提供了理论支撑^[21]。邵连军等^[22]通过耦合多源卫星数据与海洋观测资料,系统地阐释了东海渔场黑潮锋面的季节变化特征。还有部分学者基于机器学习的统计分析模型,成功揭示了多鱼种资源量与SOI、PDO等气候因子的非线性关系^[23]。在技术创新层面,徐文进等^[24]面向多渔具类型的渔情管理需求,构建了多源数据、多任务时空神经网络模型,实现了高精度渔情预测。叶晗等^[25]基于长时间序列中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据,提出一种水体透明度趋势分类方法,系统评估了东海不同区域水质状况及其主导因子。孙月莹等^[26]自主开发的YOLOv5改进模型,通过特征金字塔增强机制实现了养殖区智能识别的重大突破。在应用研究层面,涉及环境评估、空间规划、动态监测等领域^[27],构建了“星—机—船”资源管理协同监测网络^[28],其多源观测手段实现了对海洋水质、气象变化及养殖环境的动态监测,为海洋渔业资源管理与生态保护提供了重要支撑^[29]。

1.3 海洋可再生能源

遥感技术重点用于海洋可再生能源领域的资源潜力评估、选址适宜性分析、运行环境监测等方面。具体而言,利用星载散射计的大尺度观测能力构建海面风速场三维重构模型,能够揭示风能资源的年际变化规律与季节模态特征。通过提取海表温度与悬浮物浓度的梯度特征,可反演潮流动能通量密度的空间分布格局。利用SAR观测数据的高空间分辨率捕捉海面起伏特征,反演出高精度波高、波周期与波向等波浪参数,能够为波浪能装置的布设提供数据基础。

国际上,海洋可再生能源开发正加速融合遥感技术的创新应用。美国航空航天局(NASA)通过系列专用卫星实现技术突破。1997年,海星卫星(SeaStar)开创了海洋水色定量观测的先河。2002年,

Aqua卫星搭载的微波散射计帮助评估太阳能光伏系统的潜在发电效率,优化了太阳能电站的选址和设计。2003年,“克罗里斯”号卫星增强了风场三维观测能力,提升了复杂气象条件下的数据可靠性^[30]。欧洲航天局于2010年部署的冷卫星-2突破了极区观测技术瓶颈,其获取的冰—浪交互数据直接支撑北极圈潮汐电站建设^[31]。德国哥白尼计划(Copernicus)系统化应用哨兵系列卫星(Sentinel)群,通过多时相风速数据建模优化北海风电场集群布局^[32]。英国环境卫星(Envisat)创新应用干涉测量技术,实现潮汐能分布特征的精准解析^[33]。印度与挪威合作开展区域化探索,利用卫星数据有效指导阿拉伯海波浪能装置的布设^[34]。

在国内,遥感技术重点服务于海底测绘、海上风电、潮流能与波浪能的开发利用,在观测技术、算法模型和应用系统等层面取得较好进展。在观测技术层面,依托海洋系列卫星(HY)与机载激光雷达(LiDAR)构建空—天联合探测网络,结合多波束声呐系统,实现海底关键区域垂向精度达厘米级的地形重构^[35]。在算法模型层面,Wu等^[36]基于深度学习方法开发的清洁能源地物智能解译模型,在百万量级样本训练的基础上实现了风力发电设施99.46%的识别准确率^[36]。在应用系统层面,通过构建海面风速场三维重构模型,成功解析了近海风能资源在年际和季节尺度上的演变规律。这些技术对我国海上风电产业发展具有重要支撑作用。截至2023年,累计部署6038台风电机组,占全球装机总量的48.6%^[37]。

1.4 海洋生态环境

遥感技术通过赤潮预警、污染追踪及海洋生态环境动态监测三大核心功能支撑海洋生态环境监测。具体而言,利用多时相遥感数据检测海表叶绿素浓度异常,实现赤潮预测与预警。基于空间纹理特征提取与分类算法,通过高分辨率遥感影像实现污染物的智能识别与扩散路径追踪。通过多源遥感数据融合与叶绿素浓度、悬浮物浓度等生态参数反演技术,分析生境质量参数的年际波动特征与季节性演变规律,构建海洋生态环境动态监测体系。

国际上,主要海洋国家根据各自区域的生态特

征构建了相应的遥感监测技术体系,呈现差异化布局与功能导向并重的趋势。针对墨西哥湾季节性低氧问题,已有研究结合卫星遥感数据与溶解氧观测,利用随机森林等模型实现了对墨西哥湾2014年沿海缺氧区的时空变化预测,揭示了缺氧与表层水体过程之间的时间滞后关系,展示了卫星遥感在精细化、近实时缺氧监测中的巨大潜力^[38]。在应对地中海生物多样性退化方面,欧盟“哥白尼”项目创新性地采用2019—2020年哨兵3号(Sentinel-3)卫星数据,系统评估了有效波高在美国沿海及中太平洋区域的适用性,结果显示其在离岸超过50 km和水深大于500 m的区域有效数据精度可达98%^[39]。针对寒冷地区因全球变暖引发的环境变化问题,加拿大等国家的研究团队对冰、云和陆地高程卫星(ICESat)、风云、加拿大雷达卫星(RADARSAT)和哨兵1号A/B卫星(Sentinel-1 A/B)等卫星进行了综述,对冰川、冰盖、积雪、冻土等关键要素开展遥感监测,为气候变化应对与生态保护提供了重要数据支撑^[40]。

我国遥感技术在海洋生态环境领域的应用不断深化,初步形成了具有一定特色的技术体系。当前在近海环境监测方向,已探索出3类典型技术路径:一是水色动态监测路径,突破了传统观测手段在时间与空间上的局限性,在涉海工程环境影响评估中展现出较强的适用性^[41];二是基于智能识别算法的内波特征提取路径,利用深度学习与图像分析模型,内波识别的准确率已经达到95.7%^[42];三是分辨率海面流场反演路径,依托空基平台开展的高分辨率海面流场观测,在有效波高0.2~1.5 m、主波周期3.8~5.7 s条件下实现了海流反演误差控制^[43]。这些技术路径为我国建立自主化、多维化、智能化的海洋生态遥感监测体系奠定了重要基础。

2 国内外遥感技术发展差距分析

目前,我国已构建由“海洋一号”至“海洋三号”系列卫星组成的空天光学遥感观测体系,各卫星分别承担海水水色监测、动力环境参数反演及海面形变监测等专项功能,初步具备重点海域多要素动态协同监测能力。然而,从整体系统能力和应用

深度来看,我国整体技术体系与国外相比仍存在一定的差距,以下将从具体应用领域展开分析。

2.1 海洋交通运输业

在海洋交通运输领域,欧美已构建起融合多源遥感数据的综合监测体系,集成海况预警、船舶追踪与风险评估等功能,并通过发布标准化遥感数据产品显著提升了全球主要航道管理效率,其安全保障水平已形成国际标杆。我国虽通过提高观测频次和优化卫星载荷性能增强动态监测能力,如HY-2A卫星系统集成主动散射计与被动微波辐射计,实现精密定轨与全时空探测,为远洋航运安全提供技术支撑,但在多源遥感数据融合处理、高精度特征提取、复杂气象目标识别与实时处理方面仍存在显著技术瓶颈。特别是应对突发海洋态势响应时效性与海上军事态势感知能力建设,较国际先进水平仍存在一定的差距。

2.2 海洋渔业

遥感技术在全球渔业领域的应用已形成较为成熟的发展格局,主要海洋渔业国家已建立成熟的卫星数据服务体系。美国和法国通过市场化机制提供海表温度、洋流等要素的定制化信息服务;日本研发的多参数渔场环境分析系统实现了渔情信息的高效获取与发布^[44]。我国则初步构建了集实时数据通信、多平台协同监测与准业务化运行于一体的遥感技术体系^[45]。然而,与国际领先水平相比,我国仍存在一定的差距。在数据质量层面,关键指标参数的反演误差有待降低^[46];在算法能力层面,预报模型智能化程度不足且多源异构数据处理效能偏低;在处理效率层面,渔情响应时效有待提升,制约了遥感技术在渔业精细化管理中的全流程集成应用。

2.3 海洋可再生能源

遥感技术在全球海洋可再生能源领域的应用日益广泛,为海底地形勘测、选址规划与资源开发等活动提供了科学决策支持。目前,主要海洋强国已建立起多源遥感观测体系,通过集成重力、海面高度与洋流等关键参数,显著提升了对潮汐能、波浪能等可再生能源的系统评估能力。例如,美国通过托佩克斯/波塞冬(TOPEX/Poseidon)及贾

森 (Jason) 系列卫星系统, 整合多源遥感观测与高精度数据融合算法, 达到了毫米级测高精度以及 300 m 的分辨率, 显著增强了海平面高度和重力异常数据的获取能力^[47]。我国 HY-2A 卫星系统虽已在区域海域实现海面高度、海水温度及海洋重力场数据的有效获取, 但在全球覆盖能力、复杂海况观测稳定性 (尤其是星载传感器抗干扰算法与多维度数据补偿技术) 以及多源异构数据处理方面仍存在技术短板。

2.4 海洋生态环境

在海洋生态环境监测领域, NASA 和欧洲航天局已构建从数据采集到产品发布的完整技术体系, 其多源数据协同机制显著提升了全球海洋生态监测效能。如 NASA 发布的 MODIS 叶绿素浓度产品, 其光谱波段覆盖 36 个通道, 已成功应用于全球赤潮监测^[48]。我国通过海洋水色与动力环境卫星观测系统建设, 已初步形成重点海域的常态化探测能力, 其中 HY-1C/D 卫星可实现每天两次对全球 98% 海域的可见光探测^[49]。尽管取得一定进展, 但我国在海洋水质数据精度与类型多样性方面仍与国际先进水平存在显著差距。在数据质量方面, 海水透明度与浮游生物密度反演结果在近岸区域存在显著偏差^[50]; 在算法能力方面, 深度学习模型在复杂气象条件下的识别准确率低于国际先进水平; 在处理效率方面, 海洋生态异常事件识别从数据接收到预警发布的周期仍难以满足快速响应的需求^[51]。

3 遥感技术在海洋领域的应用展望

空基光学遥感技术通过卫星、无人机等多源异构观测平台, 构建“空一天一海”立体观测体系, 为海洋生态环境监测、海上交通监管、渔业资源评估及海洋可再生能源开发四大应用方向提供关键技术支撑, 标志着其在海洋领域的应用进入新阶段。然而, 当前技术体系的深化应用还需在数据处理、存储分析、融合应用、定制化服务等方面进一步提升。

3.1 提升空天光学遥感高精度数据获取能力

针对海洋动态监测的高度复杂性, 空天光学遥感技术应重点突破时空分辨率、光谱分辨率与观测

频率的协同优化技术, 着力提升复杂气象条件下近岸高扰动区域的稳定观测能力。具体而言, 需构建以卫星、无人机、海洋浮标为基础的多源异构观测平台, 融合高光谱、热红外、可见光多光谱等多类型遥感传感器, 形成主动与被动协同的观测体系; 结合深度学习算法与多尺度融合模型, 逐步建立覆盖多维关键海洋要素的智能感知与动态识别能力, 构建“空一天一海”一体化的高精度海洋动态监测系统。

3.2 加强多源遥感数据的高效存储、智能处理与深度分析能力

随着人工智能、云计算与大数据技术的高速发展, 遥感技术正加速向智能化、自动化方向转型。在面向海洋复杂场景的实际应用中, 传统的以文件型存储与静态处理为主的遥感数据体系, 已难以满足高频观测与高效处理的实际需求, 亟须突破传统存储架构的约束。在数据容量、访问速度和并行计算方面, 通过提升面向多源遥感数据的高并发、高吞吐数据存储能力, 构建支持海量数据持续接入与动态更新的云端资源池。同时, 重点推动流式处理框架的开发, 攻克复杂海洋场景下的多目标智能识别难题, 形成亚秒级响应的时序变化监测能力。

3.3 开展空天光学遥感技术的协同、集成与融合应用

随着遥感技术在空间分辨率提升、光谱维度拓展与智能处理能力提升方面的持续推进, 构建多源协同观测、数据集成管理以及应用融合体系, 已成为推动海洋遥感观测系统化发展的关键路径。其中, “协同”强调观测手段之间的协同运行, 例如卫星提供大范围覆盖、无人机实现局部精细观测、浮标持续采集定点数据, 实现多空间、多时间分辨率和多要素类型的互补观测。“集成”侧重对不同平台获取的数据进行标准化处理与统一管理, 包括数据格式转换、时空基准统一和质量控制等环节, 构建多尺度、多空间、多时间分辨率的数据集成系统, 提高海洋监测数据的可用性。“融合”在前两者的基础上, 聚焦于多源数据与智能算法的深度融合, 通过边缘云计算协同架构推动观测链条从数据采集向智能分析延伸, 从而提升复杂环境下的数据反演精度与系统协同增效。

3.4 面向特定应用需求提供个性化和定制化服务

为更好地满足海洋管理、生态保护、资源开发等领域不同用户的多样化遥感应用需求, 亟须打造具备高扩展性、场景适配性与智能响应能力的新型遥感监测服务平台。为此, 基于轻量化架构与智能算法调度机制, 通过整合星载、无人机、浮标等多端数据, 配套边缘处理单元, 构建“端—云”协同的闭环处理体系。在功能设计上, 通过提供模块化功能组件与开放式应用程序接口 (API), 支持用户按需选取或组合算法模块, 针对如赤潮快速预警、渔场动态评估、潮汐能资源选址、港口污染溯源等特定应用场景, 实现遥感数据的个性化分析、可视化展示与辅助决策输出。

综上所述, 遥感技术的系统性技术突破, 将推动海洋重点领域的智能化与集成化转型。在海洋交通领域, 高分辨率 SAR 影像与气象数据能够助力极端海况下船舶状态的连续监测, 支撑智能航线规划、航道风险预警与动态调度。通过实时航迹优化算法, 航线规划分辨率将提升至亚米级, 进而实现港口物流效率的优化。在海洋渔业方面, 基于多源遥感数据构建的渔场环境评估与渔情预报系统, 将有效提升渔业资源分布识别与捕捞配额动态配置的精准性。面向海上风电集群化发展需求, 星载雷达与边缘计算的融合应用将大幅度提升海上风电场的选址精度, 并显著提升潮汐能与波浪能等的捕获效率。在生态环境监测方面, 结合多空间、多时间

分辨率遥感数据与生态参数反演计算算法, 可实现污染扩散过程模拟与赤潮、藻华暴发过程推演, 为生态事件预警与修复策略提供科学依据。上述集成能力的实现将推动我国遥感技术从单点监测向全周期、系统化的海洋信息服务体系转变, 为海洋管理与海洋经济高质量发展提供坚实支撑。

4 总结

本文围绕空天遥感技术在海洋交通运输、海洋渔业、海洋可再生能源以及海洋生态环境四大重点领域的应用, 系统梳理了相关技术的发展脉络与典型应用路径。通过中外对比分析, 识别出我国在硬件基础、数据处理、技术集成与服务机制 4 个维度面临的关键“瓶颈”。

基于此, 本文从提升遥感载荷自主研发能力、强化数据智能处理体系建设、推动遥感与多源数据的融合应用, 以及构建面向实际场景的定制化服务体系等方面, 提出了具有针对性的优化路径, 并构建了多源协同观测、数据集成处理与智能融合分析相结合的技术框架。研究结果不仅厘清了当前我国海洋领域遥感技术亟须突破的核心环节, 也为推动空天海一体化海洋监测体系构建提供了理论依据和技术支撑。未来, 研究可进一步结合典型海区实际数据, 开展区域化、场景化的遥感技术适配性评估与系统验证, 以增强研究的应用指导性与政策支撑力。

参考文献

- [1] 邱乐丰, 吕豪豪, 虞舟鲁, 等. 杭州湾围垦耕地土壤生态系统服务变化特征及阈值分析[J]. 中国土地科学, 2023, 37(7): 114-124.
QIU Lefeng, LYU Haohao, YU Zhoulun, et al. Characteristics and threshold analysis of changes in soil-related ecosystem service after long-term coastal reclamation in Hangzhou Bay[J]. China Land Science, 2023, 37(7): 114-124.
- [2] 刘彦随, 璩路路. 近 30 年三峡库区用地格局变化与人地系统演化[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(8): 1664-1676.
LIU Yansui, QU Lulu. The change of land use pattern and the evolution of human-land system in the Three Gorges Reservoir area in the past 30 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2022, 31(8): 1664-1676.
- [3] World Bank Report. Oceans, Fisheries and coastal economies[EB/OL]. (2024-04-03)[2025-04-08]. <https://www.worldbank.org/en/topic/oceans-fisheries-and-coastal-economies>.
- [4] 林明森, 何贤强, 贾永君, 等. 中国海洋卫星遥感技术进展[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 99-112.
LIN Mingsen, HE Xianqiang, JIA Yongjun, et al. Progress of marine satellite remote sensing technology in China[J]. Journal of Oceanography, 2019, 41(10): 99-112.
- [5] 孟凡晓, 陈圣波, 张国亮, 等. 基于 Landsat-8 数据南海近岸悬浮泥沙与叶绿素 a 浓度定量反演[J]. 世界地质, 2017, 36(2): 616-623.

- MENG Fanxiao, CHEN Shengbo, ZHANG Guoliang, et al. Quantitative inversion of nearshore suspended sediment and chlorophyll-a concentration based on Landsat-8 data in South China Sea[J]. *Global Geology*, 2017(2): 616-623.
- [6] THIRUGNANA SAMBANDHAM V, SHANKAR P, MUKHOPADHAYA S. Early onset yellow rust detection guided by remote sensing indices[J]. *Agriculture*, 2022, 12(8): 1206.
- [7] LAUSCH A, ERASMI S, KING J D, et al. Understanding forest health with remote sensing-Part II: a review of approaches and data models[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 129.
- [8] MUHAMMAD Y, LIU Shanwei, XU Mingming, et al. Multi-scale ship target detection using SAR images based on improved Yolov5[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023(9): 1086140.
- [9] REGGIANNINI M, RIGHI M, TAMBUCCI M, et al. Remote sensing for maritime prompt monitoring[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(7): 202.
- [10] 王文光, 王俊, 毛士艺, 等. 基于极化 SAR 图像分类的海上舰船检测[J]. *信号处理*, 2007(5): 676-679.
WANG Wenguang, WANG Jun, MAO Shiyi, et al. Ship detection based on classification of polarimetric SAR images[J]. *Journal of Signal Processing*, 2007(5): 676-679.
- [11] 赵亚威, 孙凯, 种劲松. 基于非极化分量的 SAR 图像海洋锋特征增强方法[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(6): 1440-1447.
ZHAO Yawei, SUN Kai, ZHONG Jinsong. SAR image ocean front feature enhancement method based on non-polarized component[J]. *Optical Precision Engineering*, 2021(6): 1440-1447.
- [12] 陈杰, 杨威, 王亚敏, 等. 高时相星载序贯 SAR 图像运动目标检测方法[J]. *雷达学报*, 2022, 11(6): 1048-1060.
CHEN Jie, YANG Wei, WANG Yamin, et al. Moving target monitoring algorithm based on high-frame-rate SAR images[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(6): 1048-1060.
- [13] XING Bowen, ZHANG Liang, LIU Zhenchong, et al. The study of fishing vessel behavior identification based on AIS data: a case study of the East China Sea[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(5): 1093.
- [14] 林文明, 郎姝燕, 赵晓康, 等. 中法海洋卫星散射计近海岸海面风场反演研究[J]. *海洋学报*, 2021, 43(10): 115-123.
LIN Wenming, LANG Shuyan, ZHAO Xiaokang, et al. Study on the retrieval of offshore sea surface wind field by Sino-French marine satellite scatterometer[J]. *Journal of Oceanography*, 2021, 43(10): 115-123.
- [15] 钟亮, 刘小生. 珞珈一号新型夜间灯光数据应用潜力分析[J]. *测绘通报*, 2019(7): 132-137.
ZHONG Liang, LIU Xiaosheng. Application potential analysis of LJ1-01 new nighttime light data[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(7): 132-137.
- [16] 陈诗怡, 曹云锋, 惠凤鸣, 等. 基于遥感观测的 2010 ~ 2017 年秋季北极东北航道通航能力时空变化[J]. *科学通报*, 2019, 64(14): 1515-1525.
CHEN Shiyi, CAO Yunfeng, HUI Fengming, et al. Observed spatial-temporal changes in the autumn navigability of the Arctic Northeast Route from 2010 to 2017[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(14): 1515-1525.
- [17] 伍玉梅, 徐兆礼, 樊伟, 等. 1985—2005 年东海海表温度时空变化特征分析[J]. *海洋学报 (中文版)*, 2011, 33(6): 9-18.
WU Yumei, XU Zhaoli, FAN Wei, et al. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of sea surface temperature in the East China Sea from 1985 to 2005[J]. *Journal of Oceanography(Chinese version)*, 2011, 33(6): 9-18.
- [18] YANG Jiming, GU Chuancheng, LI Liyun, et al. Satellite remote sensing prediction of Japanese pilchard fishing ground in the Huanghai Sea and the East China Sea[J]. *Science in China. Series B, Chemistry, Life Sciences & Earth Sciences*, 1995, 38(3): 336-344.
- [19] OOEKI Y, INAGAKE D, SAITO T, et al. Reliable estimation of IUU fishing catch amounts in the northwestern Pacific adjacent to the Japanese EEZ: potential for usage of satellite remote sensing images[J]. *Marine Policy*, 2018, 88: 64-74.
- [20] ASHIKUR M R, RUPOM R S, SAZZAD M H. A remote sensing approach to ascertain spatial and temporal variations of seawater quality parameters in the coastal area of Bay of Bengal, Bangladesh[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021, 23: 100593.
- [21] LEE Mingan, WENG Jinnshing, LAN Kuowei, et al. Empirical habitat suitability model for immature albacore tuna in the north Pacific Ocean obtained using multisatellite remote sensing data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(15): 5819-5837.
- [22] 邵连军, 张红雷, 张春华, 等. 基于海温遥感资料的海洋锋检测方法[J]. *海洋测绘*, 2015, 35(2): 42-44.

- SHAO Lianjun, ZHANG Honglei, ZHANG Chunhua, et al. Ocean front detection method based on sea temperature remote sensing data[J]. *Marine Surveying and Mapping*, 2015, 35(2): 42-44.
- [23] 刘彦琳. 基于 GAM 和 MaxEnt 的西北太平洋公海日本鲷渔场形成机制及潜在栖息地分布研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
LIU Yanlin. Based on GAM and MaxEnt theformation mechanism and potentialhabitat distribution of *Scomber japonicus* fisheries in the high seas ofthe Northwest Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [24] 徐文进, 孙允超, 黄海广. 基于海洋遥感与渔船轨迹数据的多任务鱼情预测[J]. *计算机系统应用*, 2022, 31(4): 333-340.
XU Wenjin, SUN Yunchao, HUANG Haiguang. Multi-task fish condition prediction based on ocean remote sensing and fishing vessel trajectory data[J]. *Application of Computer System*, 2022, 31(4): 333-340.
- [25] 叶晗, 王胜强, 孙德勇, 等. 基于透明度的东中国海水水质状况遥感评价[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(4): 523-533.
YE Han, WANG Shengqiang, SUN Deyong, et al. Assessment of water quality in the eastern China seas based on water transparency satellite products[J]. *Marine Environmental Science*, 2023, 42(4): 523-533.
- [26] 孙月莹, 陈俊霖, 张胜茂, 等. 基于改进 YOLOv7 的毛虾捕捞渔船作业目标检测与计数方法[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(10): 151-162.
SUN Yueying, CHEN Junlin, ZHANG Shengmao, et al. Target detection and counting method for *Acetes chinensis* fishing vessels operation based on improved YOLOv7[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(10): 151-162.
- [27] LI Chunlin, LIU Yang, YIN Zixu, et al. Evaluation of the Pacific oyster marine aquaculture suitability in Shandong, China based on GIS and remote sensing[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1402528.
- [28] 石永闯, 樊伟, 张衡, 等. 适用于数据缺乏渔业的资源评估方法研究进展[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(5): 673-691.
SHI Yongchuang, FAN Wei, ZHANG Heng, et al. Research progress on resource assessment methods suitable for data-deficient fisheries[J]. *Fishery Science in China*, 2021, 28(5): 673-691.
- [29] 张佳泽, 王斐, 张胜茂, 等. 基于遥感技术的渔业应用研究综述[J]. *浙江海洋大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(1): 81-90.
ZHANG Jiaze, WANG Fei, ZHANG Shengmao, et al. A review of fishery application research based on remote sensing technology[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science Edition)*, 2022, 41(1): 81-90.
- [30] 汪文杰, 贾东宁, 许佳立, 等. 全球海洋遥感卫星发展综述[J]. *测绘通报*, 2020(5): 1-6.
WANG Wenjie, JIA Dongning, XU Jiali, et al. A review of the development of global ocean remote sensing satellites[J]. *Surveying and Mapping Notification*, 2020(5): 1-6.
- [31] 陈双, 刘韬. 国外海洋卫星发展综述[J]. *国际太空*, 2014(7): 29-36.
CHEN Shuang, LIU Tao. A review of the development of foreign marine satellites[J]. *International Space*, 2014(7): 29-36.
- [32] KALIA A C, FREI M, LEGE T. A Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 234-249.
- [33] BARRETT B, PRATOLA C, GRUBER A, et al. Intercomparison of soil moisture retrievals from in situ, ASAR, and ECV SM data sets over different European sites[M]. Amsterdam: Elsevier, 2016: 209-228.
- [34] HERMES J C, MASUMOTO Y, BEAL L M, et al. A sustained ocean observing system in the Indian Ocean for climate related scientific knowledge and societal needs[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 355.
- [35] 刘智敏, 杨安秀, 阳凡林, 等. 机载 LiDAR 测深在海洋测绘中应用的可行性分析[J]. *海洋测绘*, 2018, 38(4): 43-47.
LIU Zhimin, YANG Anxiu, YANG Fanlin, et al. Feasibility analysis of the application of airborne LiDAR sounding in marine surveying and mapping[J]. *Marine Surveying and Mapping*, 2018, 38(4): 43-47.
- [36] WU Wenxuan, LIU Yongxue, WU Wei, et al. Proliferation of offshore wind farms in the North Sea and surrounding waters revealed by satellite image time series[J]. *Renewable&Sustainable Energy Reviews*, 2020, 133: 110167.
- [37] WANG Kechao, WU Xiao, HE Tingting, et al. Remote sensing unveils the explosive growth of global offshore wind turbines[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 191: 114186.
- [38] LI Yingjie, ROBINSON S V J, NGUYEN L H, et al. Satellite prediction of coastal hypoxia in the northern Gulf of Mexico[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 284: 113346.
- [39] WAN Yong, ZHANG Rongjuan, PAN Xiaodong, et al. Evaluation of the significant wave height data quality for the Sentinel-3 Synthetic Aperture Radar Altimeter[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 3107.
- [40] DU Jinyang, WATTS J D, JIANG Lingmei, et al. Remote sensing of environmental changes in cold regions: methods, achievements

- and challenges[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(16): 1952.
- [41] 赵瀛, 王思荐, 陈皓鋈, 等. 基于卫星遥感的海洋工程环境监测及影响评价方法初探[J]. *海洋信息技术与应用*, 2023, 38(1): 14-20.
ZHAO Ying, WANG Sijian, CHEN Haoyun, et al. Preliminary study on monitoring and impact assessment of ocean engineering environment based on satellite remote sensing[J]. *Journal of Marine Information Technology and Application*, 2023, 38(1): 14-20.
- [42] 孙宏亮, 王怡然, 贾童, 等. 基于 Faster R-CNN 的卫星 SAR 图像南海海洋内波自动检测[J]. *遥感学报*, 2023, 27(4): 905-918.
SUN Hongliang, WANG Yiran, JIA Tong, et al. Faster R-CNN based oceanic internal wave detection from SAR images in the South China Sea[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(4): 905-918.
- [43] 杨静, 陈忠彪, 何宜军, 等. 基于无人机光学图像的海流观测方法研究[J]. *海洋科学*, 2023, 47(11): 79-96.
YANG Jing, CHEN Zhongbiao, HE Yijun, et al. Method to retrieve ocean current from optical images based on UAV[J]. *Marine Sciences*, 2023, 47(11): 79-96.
- [44] BUCK J J H, BAINBRIDGE S J, BURGER E F, et al. Ocean data product integration through innovation-the next level of data interoperability[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 32.
- [45] 中华人民共和国自然资源部. 卫星遥感远洋渔场环境监测产品编目规范[S]. 2024.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Cataloguing specification for environmental monitoring products of deep-sea fishing ground derived by satellite remote sensing[S]. 2024.
- [46] 厉芳婷, 梁思, 田礼乔, 等. 基于神经网络的 ZY-1E 卫星高光谱影像叶绿素 a 遥感反演: 以武汉市东湖为例[J]. *地理空间信息*, 2025, 23(3): 61-65.
LI Fangting, LIANG Si, TIAN Liqiao, et al. Remote sensing retrieval of chlorophyll-a from hyperspectral images of ZY-1E satellite based on neural network: a case study of East Lake in Wuhan City[J]. *Geospatial Information*, 2025, 23(3): 61-65.
- [47] 郭金运, 王建波, 胡志博, 等. 由 TOPEX/Poseidon 和 Jason-1/2 探测的 1993—2012 中国海面平面时空变化[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(9): 3103-3120.
GUO Jinyun, WANG Jianbo, HU Zhibo, et al. Temporal-spatial variations of sea level over China seas derived from altimeter data of TOPEX/Poseidon, Jason-1and Jason-2from 1993to 2012[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(9): 3103-3120.
- [48] 熊文豪, 孟健, 姚驰. 基于 MODIS 荧光基线高度的赤潮监测多源数据对比分析[J]. *现代信息技术*, 2025, 9(1): 139-144.
XIONG Wenhao, MENG Jian, YAO Chi. Comparative analysis of multi-source data for red tide monitoring based on MODIS fluorescence line height[J]. *Modern Information Technology*, 2025, 9(1): 139-144.
- [49] ZENG Tao, SHI Lijian, HUANG Lei, et al. A color matching method for mosaic HY-1 satellite images in Antarctica[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(18): 4399.
- [50] 杨雷, 禹定峰, 高皓, 等. Sentinel-2 的胶州湾水体透明度遥感反演[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(12): 515-521.
YANG Lei, YU Dingfeng, GAO Hao, et al. Remote sensing retrieval of secchi disk depth in Jiaozhou Bay using Sentinel-2 MSI image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 515-521.
- [51] 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 Ning, LI Yan, YANG Pengcheng, et al. Research progress of marine ecological on-line monitoring technology[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2023, 42(1): 178-186.