

数字孪生技术在海洋环境领域的应用进展

吴仕备, 王宜东

国防科技大学气象海洋学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年8月7日; 录用日期: 2025年9月3日; 发布日期: 2025年9月12日

摘要

数字孪生技术作为一种新兴的前沿数字化技术, 在海洋环境领域展现出广阔的应用前景。本文系统阐述了海洋数字孪生技术的基本概念和核心机理, 以及在海洋环境监测和工程实践中的典型应用, 探讨了当前面临的主要挑战, 如高分辨率连续时空数据缺失、多尺度仿真难度大、实时算力不足和缺乏标准规范等。未来发展中需要加强海洋观测数据体系建设、构建多尺度高保真模型与人工智能融合技术、完善数字孪生平台与标准规范, 以克服现有瓶颈。通过持续的技术攻关, 数字孪生有望在海洋环境认知和防灾减灾等领域发挥关键作用, 为海洋科学研究提供重要助力。

关键词

数字孪生, 海洋环境, 智慧海洋, 海洋数字孪生

The Application of Digital Twin Technology in the Marine Environment Field

Shibei Wu, Yidong Wang

College of Ocean and Meteorology, National University of Defense Technology, Changsha Hunan

Received: Aug. 7th, 2025; accepted: Sep. 3rd, 2025; published: Sep. 12th, 2025

Abstract

Digital twin (DT) technology is gaining momentum in the marine environment field due to its potential for real-time monitoring, simulation, and decision support. This paper outlines the core concepts of ocean digital twins, reviews their applications in environmental monitoring and marine engineering, and highlights key challenges, such as limited high-resolution data, complex multi-scale modeling, and the lack of standards. Future development should focus on integrating AI with high-fidelity models, improving data infrastructure, and establishing standardized platforms. DTs are expected to significantly enhance marine environmental research and disaster risk manage-

ment.

Keywords

Digital Twin, Marine Environment, Smart Ocean, Ocean Digital Twin

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为地球生态系统的重要组成部分,海洋在全球气候调节和资源供给方面发挥着不可替代的作用。海洋为全球约 10%~20%的人口提供食物,并为 30 亿人提供海洋蛋白质,通过吸收人类活动产生的 30% 的二氧化碳来调整地球气候,并且为众多动植物提供栖息地。然而,由于长期以来人类的过度开发和海洋污染,海洋生态正在面临严重破坏,如何有效管理和治理海洋,已成为当前人类面临的重大挑战[1]。为了使海洋更加可预测,我们需要密切监测海洋。然而,由于海洋的空间跨度和部分现象的时间跨度,对海洋的持续监测极具挑战性[2]。近年来,伴随人工智能技术和量子计算等新一代信息技术的快速发展,建设“智慧海洋”成为海洋科技发展的重要趋势。智慧海洋旨在将海洋环境和人类活动深度融合,实现海洋数据向人类认知和决策的转化。在此背景下,数字孪生(Digital Twin)技术作为智慧海洋的重要架构,被视为推动海洋信息化和智能化的新路径。

数字孪生(Digital Twin)概念最早由 Grieves 于 2002 年提出[3],它指在虚拟空间中创建一个与物理实体相对应的镜像,用于产品全生命周期的管理和优化,并在 2010 年美国航空航天局(NASA)的技术报告中正式使用,从而推动了数字孪生在工程和工业领域的广泛传播。比如, NASA 利用数字孪生监测航天器状态,空客公司采用“铁鸟”地面试验系统作为飞机的数字双胞胎等。近年来,数字孪生迅速扩展到数字地球、智慧城市等诸多领域。

数字孪生技术虽然已在工业制造、航空航天等领域形成了成熟的应用体系,但其在海洋相关领域的研究和探索才刚刚开始,而海洋应用服务还处于起步阶段[4]。值得关注的是,近年来海洋数字孪生在理论和业务化应用领域取得了系列突破性进展。2023 年 11 月,数字孪生海洋国际峰会(DITTO Summit 2023)在厦门召开,这是全球数字孪生海洋领域首次在亚洲地区举办的高端国际学术会议,推动了全球海洋数字孪生技术的标准互认和协同创新;此前,南方海洋实验室与腾讯及飞渡公司携手合作,成功构建全球首个海洋数字孪生引擎(Ocean-DT Engine),旨在通过数字孪生技术实现对海洋过程的数字化仿真,在海洋灾害预测、防灾减灾方面发挥重要作用。2024 年欧盟首个海洋数字孪生试运行平台正式亮相,该平台具有按需建模能力,并通过设置模拟情景回答相关问题。这些进展标志着海洋数字孪生技术在全球范围内的快速发展和广泛应用。同时国内外研究者也积极探索海洋数字孪生(Ocean Digital Twin)体系架构与相关应用。赵龙飞等[5]提出面向智慧海洋的数字孪生六维模型架构;Hu 等[6]讨论了海洋领域数字孪生技术的发展现状与展望;Vithanage 等[7]对船舶与航运领域的数字孪生研究进行了系统梳理。总体来看,海洋数字孪生尚处于发展初期,与在航空航天、智能制造领域的应用有一定差距,需要进一步的理论完善和技术验证。本文旨在对数字孪生技术在海洋环境领域的应用进行全面综述。首先介绍数字孪生的基本原理和技术框架,然后重点总结其在海洋气象预报、污染监测、生态建模等方面的典型应用,分析存在的挑战并展望未来的发展方向。

2. 海洋数字孪生的定义

2.1. 基本概念

数字孪生是一种集成多源数据和多学科模型的技术, 构建与物理实体高度同步的虚拟映射系统, 形成虚实对应的“孪生体” [2]。其技术架构包含三大要素: 本体物理实体(Physical Entity)、虚拟孪生模型(Digital Twin Model)以及虚实交互接口(Cyber-Physical Interface), 如图 1 所示。

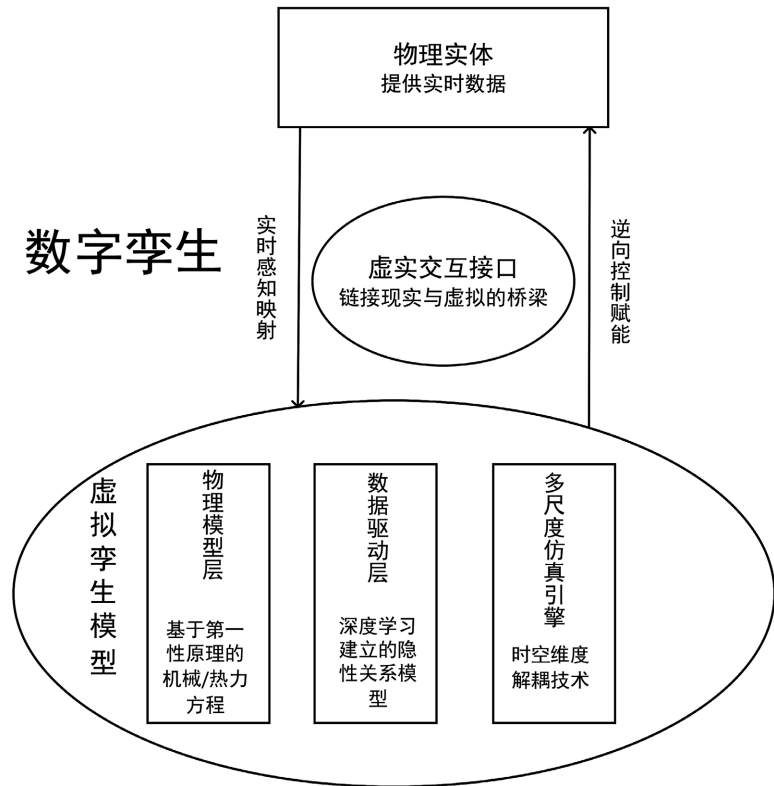


Figure 1. Digital twin technology architecture
图 1. 数字孪生技术架构

海洋数字孪生是数字孪生理念在海洋科学领域的延伸和深化[8], 通过多源观测数据、数值模式和人工智能方法, 在虚拟空间中构建一个与真实海洋高度一致的动态数字化镜像体, 通过实时数据同化、情景模拟和预测推演, 实现对海洋状态的监测、理解、预测和决策支持的一体化系统。它可以准确模拟和反映海洋的物理、化学、生物和地质特征, 通过实时数据的采集、分析和集成, 实现对海洋环境所有要素以及海洋开发、利用和治理管理整个过程的数字制图和智能模拟。海洋数字孪生技术为海洋观测、资源管理和开发、环境保护和灾害响应提供了强有力的支撑。

2.2. 技术框架

海洋数字孪生的核心在于实现海洋过程的数字化仿真, 并通过虚拟模型对现实海洋进行反馈优化。其框架通常包括四部分, 如图 2 所示。(1) 物理空间: 由真实海洋及其环境构成, 是数据和模型的源头;(2) 数据传输与处理: 利用物联网与高性能计算实现观测数据的实时采集、传输和处理, 保证物理空间与虚拟空间的同步;(3) 虚拟空间: 由数字孪生模型与仿真分析系统组成, 在多尺度、多维度上整合几何

建模、物理方程驱动与知识建模，构建高度逼真的数字镜像海洋。(4) 应用服务：基于情景推演开展个性化建模，设置模拟情景进行策略推演，通过可视化输出风险预警与最优策略，形成虚实互动的闭环。学术界针对该框架提出了多维度扩展模型。比如，陶飞等[9]构建了数字孪生的“五维模型”，提出了数字孪生驱动应用的六条基本准则。赵龙飞等[5]提出海洋数字孪生“六维模型”框架，强调以海洋学科知识为驱动，在数字空间中镜像海洋环境与活动全要素，通过交互映射形成数据与知识闭环，并将智能应用反馈于现实，实现对海洋的认知与管控。虽然表述略有不同，但其核心思想一致：通过多源数据融合和模型集成，形成海洋数字孪生系统，支持用户进行实时状态诊断、未来场景模拟与处置预案推演，通过在真实海洋中实施最佳解决方案，将风险降至最低，减少损失，并提高海洋开发和治理效益。

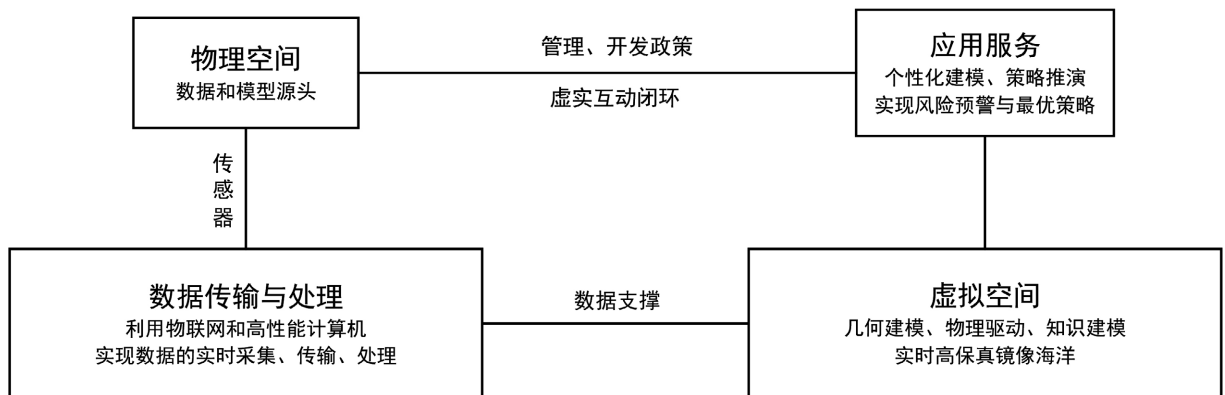


Figure 2. The framework of marine digital twin technology

图 2. 海洋数字孪生技术框架

3. 在海洋环境领域的典型应用

近年来，海洋数字孪生相关的应用案例不断涌现。本节选择海洋环境中的气象预报与灾害预警、环境治理、生态建模管理领域的典型应用，介绍数字孪生技术发挥作用的场景和进展，并就其关键技术和成熟度等进行对比，如表 1 所示。

Table 1. System resulting data of standard experiment

表 1. 海洋数字孪生典型应用场景

应用领域	典型场景	关键技术	成熟度	主要挑战	参考文献
海洋气象 风-浪-流	极端天气影响评估、近岸风浪预报、航运保障	耦合 NWP-海洋模式、资料同化、高性能计算	高 业务化	算力开销大、同化实时性不足、跨模式互操作性弱	[1][10][11]
海洋污染 溢油、赤潮	溢油漂移预报与应急响应、赤潮监测与预报	漂移模型(拉格朗日/欧拉)、多相油膜模型、耦合生化模型、应急预案数模平台	中 区域示范	观测受限、过程复杂、预测不确定性大	[1][12][13]
生态与渔业	渔场评价与配额、栖息地/MPA 健康评估	生化-生态耦合、个体基础模型(IBM)、生态 DT 原型、同化框架	低 快速发展	数据稀疏、不确定性高、跨尺度耦合困难	[1][11]

3.1. 海洋气象预报与灾害预警

传统的海洋气象预报主要依赖数值模式和观测数据, 而数字孪生的引入使预报系统能够实现模式与实时数据的深度融合, 从而显著提升精细度与时效性。通过多层次立体观测网络获取大气、海洋与水文要素的动态数据, 并同化到高分辨率数值模式中, 可构建与现实海洋同步运行的虚拟海洋[1]。数字孪生不仅提高了预报精度和时效性, 还能通过情景推演提前识别灾害演化特征, 并实现灾害响应方案的智能优选。目前相关研究正快速推进, 如我国自然资源部北海预报减灾中心研发的近岸海洋动力灾害数字孪生系统已投入业务应用, 欧盟“数字孪生海洋”计划则聚焦于气候变化背景下的海洋动力过程研究。

3.2. 海洋环境治理

海洋污染对生态环境与沿海经济危害严重, 而传统监测手段受限于时空分辨率和响应滞后。数字孪生通过构建高精度的海洋环境镜像系统, 可实现污染物迁移过程的三维动态重构。该技术结合卫星遥感、现场观测与生态模型, 在水质污染和溢油灾害等场景中展现出卓越监测能力。例如, 我国东南沿海的数字孪生智慧渔场系统实现了提前 72 小时预警, 显著增强了防范处置的主动性。数字孪生不仅能监测已有污染, 还能作为“政策沙盘”, 评估不同排放管控措施和保护区修复方案的效果, 从而为科学高效的海洋环境治理提供支撑。

3.3. 生态系统建模与管理

海洋生态系统涉及生物群落与环境的复杂耦合。通过数字孪生, 可以将生态系统关键组分及相互作用数字化, 再现其结构与功能, 并模拟演化过程及干预效果。在渔业管理中, 数字孪生可用于推演不同政策措施, 帮助防止过度捕捞并促进资源的可持续利用。对于珊瑚礁、海草床等关键栖息地, 数字孪生通过融合生态模型与现场监测, 可评估其健康状况与演变趋势, 并通过干预保障生物多样性。借助数字孪生, 我们能够在“虚拟海洋”中开展生态实验和情景推演, 实现对海洋资源更主动、精准的管理, 促进生态系统的健康与可持续发展。

在不同技术路径的探索中, 数值模式驱动与人工智能驱动的海洋数字孪生各有优势与局限。基于物理机理的数值模式依托于成熟的流体力学方程实现对海洋过程的机理描述, 能够保证模拟结果的可解释性和物理一致性, 适合在大尺度气候变化、海洋环流长期演变等场景中应用, 但其在复杂小尺度过程(如内孤立波、赤潮暴发)的刻画上受限于计算网格分辨率和计算开销。相对而言, 人工智能方法凭借海量观测与算力的支持, 可在局地高分辨率模拟和快速预测中展现出强大非线性数据处理优势, 但其“黑箱”特征和对高质量训练数据的依赖, 限制了在资料匮乏海域的推广。

值得关注的是, 混合型路径(物理约束 + AI)正成为新的趋势, 它在提高预测精度的同时, 也能兼顾可解释性, 但其适用性仍取决于具体任务需求与数据条件。在海洋气象预报中, 物理-AI 混合模式可显著提升极端事件的可预见性, 而在生态建模中, 数据驱动方法在短期评估方面更具效率。由此可见, 不同技术路径并非单一替代关系, 而应在明确边界条件和适用场景的基础上形成互补与协同。

4. 问题与建议

尽管数字孪生技术在海洋环境领域展现出广阔前景, 但在实际推进过程中仍存在诸多挑战, 需要在未来研究与应用中逐步突破。主要问题包括以下几点。

4.1. 海洋数据获取不足

构建海洋数字孪生要求精准刻画海洋环境的连续演变, 对观测数据在空间密度、时间连续性和信息

维度提出了更高要求, 尤其依赖高分辨率观测作为支撑[14]。然而, 目前深远海与海底区域观测手段依旧匮乏, 难以形成实时、立体、连续的三维监测体系, 数据链断层直接制约了孪生系统的实时映射与准确表征。要实现数字海洋建设, 需要进一步提高海洋数据采集和传输技术, 开发高效的数据处理算法, 为海洋数字孪生体的建设提供坚实的数据基础。重点发展智能海洋传感网络技术, 构建基于物联网的海洋立体观测平台, 实现多源数据采集整合。同时, 将传统的浮标探测与卫星遥感、无人机、无人艇、水下滑翔机等新型观测手段融合, 构建“空-天-海-底”一体化监测体系, 以提升海洋环境监测的全面性与实时性。

4.2. 多尺度高保真建模难度大

现有数值模式多针对特定尺度进行优化: 如 FYCOM、NEMO 和 MOM 等全球模式擅长刻画大尺度环流与气候演变, 而中小尺度模式更关注涡旋扰动、潮汐与内孤立波等局地过程。多物理过程耦合虽能提升精度, 但会显著增加计算复杂度。在建模保真度方面, 既存在物理机制不完善导致的不确定性, 也存在同化不足带来的参数不确定性[15]。深化基础理论研究, 重点突破多尺度能量级联机理为参数化提供基本的理论支撑。同时, 紧跟时代潮流充分利用人工智能技术优势, 发展物理机理与数据驱动相融合的混合人工智能, 通过深度学习增强传统数值模式的参数优化和加速计算能力, 为下一代智能海洋预报系统奠定技术基础。

4.3. 实时计算与模拟能力瓶颈

数字孪生要求小时级甚至更高频率的更新, 对计算能力和数据处理提出严苛要求。尽管当前高性能计算技术取得显著进展, 但全球高分辨率多物理场耦合模式的实时运行仍有差距。面对海量异构数据流时, 系统面临双重压力, 一是海量数据的实时存储与高效管理, 二是跨区域数据传输的带宽限制。未来可探索“超级计算 + 云服务 + 边缘计算”的分层架构, 通过在数据采集端部署边缘计算节点, 实现对观测数据的本地化预处理; 在云端实现数据的整合与二次处理分析, 依托云计算平台优化算力资源分配和调度, 实现对算力资源的高效利用。同时, 充分利用国家级超级计算中心的算力资源, 可进一步提升数据处理效率与系统响应能力, 为数字孪生技术的广泛应用提供坚实支撑。此外, 还应该积极向量子计算等非传统邻域进军, 打破传统计算机带来的算力限制。

4.4. 标准规范与平台集成挑战

目前缺乏统一的数据和模型标准, 不同研究团队采用的格式、接口和平台存在显著差异, 导致数据孤岛现象突出, 成果难以共享与复用, 系统集成代价高。为此, 制定统一的数据交换、模型接口及元数据规范十分必要。建立包含数据交换标准、模型接口规范和元数据体系在内的统一标准框架, 并通过开放架构设计和平台化建设实现功能模块的封装与共享。构建“政产学研用”协同推进机制, 采取“双轮驱动”模式建立海洋数字孪生标准体系。依托国际权威学术机构, 通过高端国际会议凝聚全球共识。另一方面由政府宏观协调布局, 联合重点实验室和龙头企业建立行业认证测试中心。

5. 总结

海洋数字孪生作为数字孪生理念在海洋科学领域的延伸, 旨在利用先进计算技术来创建地球的虚拟数字孪生模式, 以实现真实海洋的高精度预报和治理策略推演, 从而解决海洋开发和治理面临的难题。本文综述了海洋数字孪生的基本概念与技术框架, 总结了其在海洋气象预报与灾害预警、海洋环境治理以及生态系统建模与管理等方面的典型应用, 展示了其在海洋研究中广阔的应用前景。同时, 也需要认识到海洋数字孪生的应用目前还处于起步阶段, 全面成熟的应用仍需应对数据、模型、算力和标准等多

方面的挑战。但可以肯定的是, 随着观测技术的完善和立体化观测网络的建立, 数据获取能力将得到显著提升; 同时, 算法模型和建模方式的创新, 以及国际合作也交流的不断加强, 将逐步突破这些瓶颈。

展望未来, 海洋数字孪生将从局部试点走向广泛应用, 逐步构建“数字镜像海洋”。它将加深人类对海洋的理解, 提升环境变化与资源利用的预见性, 并为生态安全和可持续发展提供新机遇。总体而言, 数字孪生将变革海洋科学研究与管理方式, 根本性地改变我们对海洋的观测、模拟与治理。通过产学研各界的共同努力, 海洋数字孪生有望成为促进海洋科学研究、资源可持续利用和防灾减灾的重要支撑工具, 为建设智慧海洋和数字地球提供关键动力。

参考文献

- [1] Tzachor, A., Hendel, O. and Richards, C.E. (2023) Digital Twins: A Stepping Stone to Achieve Ocean Sustainability? *npj Ocean Sustainability*, **2**, Article No. 16. <https://doi.org/10.1038/s44183-023-00023-9>
- [2] Miedtank, A., Schneider, J., Manss, C. and Zielinski, O. (2024) Marine Digital Twins for Enhanced Ocean Understanding. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **36**, Article 101268. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101268>
- [3] Chen, G., Yang, J., Huang, B., Ma, C., Tian, F., Ge, L., *et al.* (2023) Toward Digital Twin of the Ocean: From Digitalization to Cloning. *Intelligent Marine Technology and Systems*, **1**, Article No. 3. <https://doi.org/10.1007/s44295-023-00003-2>
- [4] Li, Y., Yu, D., Yang, L., Zhang, L., Chen, P., Tao, B., *et al.* (2025) A Review of the Applications of Digital Twin Technology in Marine Research. *China Ocean Engineering*, **39**, 383-394. <https://doi.org/10.1007/s13344-025-0030-9>
- [5] 赵龙飞, 姜晓轶, 洪宇, 等. 智慧海洋数字孪生技术及其应用[J]. 科技导报, 2024, 42(4): 91-101.
- [6] Hu, Z., Liu, Y. and Zhang, J. (2025) The Application and Development of Digital Twin in the Marine Domain. *Ocean*, **1**, Article 9470001. <https://doi.org/10.26599/ocean.2025.9470001>
- [7] Madusanka, N.S., Fan, Y., Yang, S. and Xiang, X. (2023) Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Emerging Trends. *Journal of Marine Science and Engineering*, **11**, Article 1021. <https://doi.org/10.3390/jmse11051021>
- [8] Bauer, P., Dueben, P.D., Hoefler, T., Quintino, T., Schulthess, T.C. and Wedi, N.P. (2021) The Digital Twin of Earth for the Green Transition. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **102**, E1851-E1866.
- [9] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
- [10] Bauer, P., Stevens, B. and Hazeleger, W. (2021) A Digital Twin of Earth for the Green Transition. *Nature Climate Change*, **11**, 80-83. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y>
- [11] Frolov, S., Rousseaux, C.S., Auligne, T., Dee, D., Gelaro, R., Heimbach, P., *et al.* (2023) Road Map for the Next Decade of Earth System Reanalysis in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **104**, E706-E714. <https://doi.org/10.1175/bams-d-23-0011.1>
- [12] Miedtank, A., Schneider, J., Manss, C. and Zielinski, O. (2024) Marine Digital Twins for Enhanced Ocean Understanding. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **36**, Article 101268. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101268>
- [13] Yang, Y., Singha, S. and Goldman, R. (2024) A Near Real-Time Automated Oil Spill Detection and Early Warning System Using Sentinel-1 SAR Imagery for the Southeastern Mediterranean Sea. *International Journal of Remote Sensing*, **45**, 1997-2027. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2321468>
- [14] 姜晓轶, 石绥祥, 胡恩和, 等. 我国数字海洋建设中几个问题的思考[J]. 海洋开发与管理, 2013, 30(3): 14-17.
- [15] 杨永增, 孙盟. 集合平均方法的建立及海洋动力系统耦合作用的性质分析[J]. 海洋科学进展, 2021, 39(2): 178-186.