

基于人工智能的滩涂埋栖贝类智能采收技术研究进展

鲍祉澄¹, 都冰冰², 王英旭¹, 邓雅杰³, 刘新宇²

¹大连海洋大学机械与动力工程学院, 辽宁 大连

²大连海洋大学经济管理学院, 辽宁 大连

³大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年5月3日; 录用日期: 2026年6月3日; 发布日期: 2026年6月16日

摘要

滩涂埋栖贝类是我国重要的海水养殖对象, 其采收技术水平对养殖效益、资源利用和产业现代化具有重要影响。围绕埋栖贝类智能采收需求, 综述了传统采收装备、机器视觉、多传感器融合、数字孪生、水下机器人及系统集成等方面的研究进展, 并对国内外典型技术路线进行了比较分析。结果表明, 传统采收装备虽能提升作业效率, 但仍存在环境扰动大、智能化程度低和复杂工况适应性不足等问题; 人工智能与自动控制等技术的引入, 为实现高效、精准、绿色采收提供了新路径。未来应加强关键感知技术、智能控制方法、协同装备及标准体系研究, 推动埋栖贝类采收向智能化方向发展。

关键词

埋栖贝类, 智能采收, 智慧渔业

Research Progress on Intelligent Harvesting Technology of Buried Shellfish in Tidal Flat Based on Artificial Intelligence

Zhicheng Bao¹, Bingbing Du², Yingxu Wang¹, Yajie Deng³, Xinyu Liu²

¹School of Mechanical and Power Engineering, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

²School of Economics and Management, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

³Aquatic Products and Life College, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

Received: May 3, 2026; accepted: June 3, 2026; published: June 16, 2026

文章引用: 鲍祉澄, 都冰冰, 王英旭, 邓雅杰, 刘新宇. 基于人工智能的滩涂埋栖贝类智能采收技术研究进展[J]. 海洋科学前沿, 2026, 13(2): 125-131. DOI: 10.12677/ams.2026.132017

Abstract

Benthic burrowing shellfish inhabiting tidal flats are important mariculture species in China, and the level of harvesting technology has a significant impact on farming efficiency, resource utilization, and industrial modernization. Focusing on the demand for intelligent harvesting of benthic burrowing shellfish, this paper reviews the research progress in traditional harvesting equipment, machine vision, multi-sensor fusion, digital twin technology, underwater robots, and system integration, and compares typical domestic and international technical routes. The results show that, although traditional harvesting equipment can improve operational efficiency, it still suffers from such limitations as substantial environmental disturbance, low intelligence level, and poor adaptability to complex working conditions. The introduction of artificial intelligence and automatic control technologies provides new pathways for achieving efficient, precise, and environmentally friendly harvesting. Future research should strengthen key sensing technologies, intelligent control methods, collaborative equipment, and standard systems, so as to promote the intelligent development of benthic burrowing shellfish harvesting.

Keywords

Benthic Burrowing Shellfish, Intelligent Harvesting, Smart Aquaculture

Copyright © 2026 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

埋栖贝类利用发达的足生活在滩涂泥沙中,是我国重要的养殖物种[1]。随着我国养殖规模不断扩大,2024年我国贝类养殖面积和产量分别达140万公顷和1760万吨,埋栖贝类养殖业已成为沿海地区的支柱产业。然而,目前我国埋栖贝类的采收仍以人工为主,劳动强度大、效率低,并伴随较高的资源浪费和环境扰动。与国外早在20世纪中叶就开始的拖耙、旋齿等采收技术相比,我国此类技术起步较晚,存在明显差距。因此,加快推进贝类采收智能化是实现渔业机械化和现代化的重要任务,有助于提高养殖效益和资源利用效率。

近年来,以多传感器融合、物联网、大数据与人工智能为代表的新技术在渔业领域不断涌现[2]。智慧渔业理念强调通过数据驱动的生产管理和装备升级来提升渔业生产效率[3][4]。在这一背景下,智能化贝类采收技术获得关注,包括利用机器视觉识别贝类位置、自动驾驶控制采收机器人、运用数字孪生建模优化作业方案等技术路径。本文将全面梳理滩涂埋栖贝类智能采收技术的研究进展,剖析关键技术和典型案例,并提出未来发展方向,以期为相关装备研发提供参考。

2. 埋栖贝类采收技术现状

2.1. 传统采收装备

埋栖贝类采收装备主要依据工作原理可分为多种类型。拖耙采收机是国外最早发展起来的典型装备。该装置由渔船拖曳,耙齿挖掘底部泥沙,将贝类收集进网袋。这类采收效率高,但对海底扰动大,设备动力需求高。另一类是旋齿采收机,通过旋转耙齿挖掘泥土并筛除杂质后输送贝类,如美国和意

大利曾用的阶梯式旋齿机和滚筒旋齿机，效率高且减小捕捞阻力。国内也逐步开发了履带式与刷式相结合的采收机具，如福建农林大学设计的缢蛭采收机，将采收、分选和收集一体化，筛孔直径 10 mm~12 mm 以减少漏采。但是，这些传统装备大多机械化程度一般，需要拖曳动力或人力辅助，智能化水平有限。

2.2. 智能化发展趋势

随着 AI 和自动化技术的发展，国内外开始尝试将智能技术引入贝类采收领域。在发达国家，智能化采收装备和监管系统应用较早。例如，美国纳拉甘西特湾早在 20 世纪 80 年代就开始使用带有电视监控的拖耙采捕机，监测贝类资源。近年来，智能传感器和电子监控系统(Electronic Monitoring, EM)在渔业中被广泛推广，以减少副渔和提高合规性。相比之下，国内在高智能装备领域起步较晚，需要引进新技术补齐短板。

3. 智能采收关键技术

3.1. 机器视觉与目标检测

机器视觉是智能采收的核心技术之一，可实现对贝类或障碍物等水下目标的实时识别和定位[5]。传统图像方法难以应对水下光照衰减与浑浊度，深度学习已成为主流解决方案。最新研究表明，通过改进的 YOLO 算法可在水下环境中高效检测贝类[6]-[9]。例如 Jiang 等针对复杂海底环境优化了 YOLOv8 网络，设计全局上下文 3D 感知模块和通道下采样块，使模型对噪声不敏感，检测精度显著提高。此外，国内学者对 YOLOv5 模型进行参数调优，提升了水下目标检测鲁棒性[10]。总之，基于深度学习的视觉识别技术可帮助采收机实时定位并识别贝类，大幅降低人工观察误差[11]-[13]。

3.2. 多传感器融合与数字孪生

现代智能采收注重利用多源信息融合。典型方案是结合光学、声学和环境传感器构建全方位感知。例如，可配备多波束声纳用于勘测底质形态、声呐测速仪监测水流速度，再结合高分辨率相机进行视觉辨识。这种多传感器融合能提高识别准确度，并实时监控作业状态。

数字孪生技术亦日益成为智慧养殖和采收的热点。通过建立滩涂贝类生态系统的虚拟模型，可在数字空间模拟贝类生长、采收作业以及环境变化，用于优化采收方案而无需频繁进行实地试验。研究指出，数字孪生可以动态映射鱼类或贝类养殖场景，实现预测和优化控制。将数字孪生集成到采收系统中，可实现仿真实训与决策支持，在不影响实际生态的前提下测试不同采收参数，提高经济和生态效益[14] [15]。

3.3. 自动控制与水下机器人

自动化装备的发展为智能采收提供了坚实基础。近年来，水下机器人和无人舰艇在渔业监测与作业中得到应用。与有缆水下航行器相比，无人自主水下航行器不受线缆限制，可预先规划航线进行扫测。例如，一些无人自主水下航行器已被用于鱼场环境巡检和鱼类养殖围网检查。在采收场景中，哈尔滨工程大学的“海底法拉利”无人自主水下航行器可在强流环境下自主识别并抓取扇贝。该机器人配备多目摄像头，通过智能算法完成目标跟踪与手眼协调，成功实现了自主贝类采收任务。此外，美国和欧洲的智能采收系统也开始集成多传感与无线控制，用于辅助捕捞船作业[16]-[23]。

3.4. 数据分析与系统集成

集成化的数据分析平台是智能采收系统的“大脑”。将实时采收数据、环境监测数据与历史信息结

合, 利用大数据和 AI 算法进行趋势分析和优化决策。比如, 美国海洋管理中心利用无人机、声纳和监测摄像头数据, 预测鱼群分布并优化拖网航线。在贝类采收中, 可通过数据驱动控制采收船速度、耙齿倾角等参数, 使作业更加精准。国内外研究均强调, 通过人工智能 + 物联网平台实现鱼场全流程智能化管理, 是提高资源利用和降低成本的关键[24]-[26]。

4. 典型案例与技术路线

4.1. 国内案例

(1) “海底法拉利”水下采收机器人

“海底法拉利”水下采收机器人采用多目视觉、目标识别算法与机械臂协同控制, 可在复杂水流环境下完成扇贝识别、定位与自主抓取, 体现了水下机器人在非结构化环境中的自主感知和精确作业能力。虽然该系统主要面向海底裸露型贝类, 其机械臂直接抓取方式不能完全适用于缢蛭、文蛤等埋栖贝类, 但其“感知 - 决策 - 执行 - 反馈”的闭环控制模式具有重要借鉴意义。对于埋栖贝类采收, 可将其视觉识别与空间定位思想转化为泥面特征识别、贝类埋藏区域推断和挖掘深度控制; 将机械臂协同控制思想转化为挖掘、筛分、输送等机构的联动控制。综上所述, 该案例的核心价值不在于直接复制抓取方式, 而在于为埋栖贝类智能采收装备提供了自主感知、精准决策和协同执行的系统架构参考。

(2) BCJ-2 型滩涂贝类采收机

BCJ-2 型滩涂贝类采收机采用履带行走与筛刷式采收结构, 能够在滩涂软底质环境下完成贝类起捕、泥沙分离和初步收集, 体现了埋栖贝类采收装备由人工采挖向机械化连续作业转变的技术方向。该设备的借鉴意义主要体现在三个方面: 一是履带式行走机构提高了装备在软泥滩涂中的通过性和稳定性; 二是筛刷式分离机构为泥贝混合物的连续分离提供了结构参考; 三是采收、分选和收集一体化设计, 为后续智能采收装备集成路径规划、定深挖掘、筛分控制和作业反馈提供了基础平台。其不足在于智能感知和自适应调控能力仍较弱, 未来可进一步引入底质传感、埋深估计和作业参数闭环控制, 以提高采收精度并降低漏采率和破损率。

4.2. 国外案例

(1) 美国扇贝拖网监控系统

美国扇贝拖网电子监控系统在传统拖网装备上集成摄像头、GPS 和作业记录设备, 可对采收过程、作业轨迹和捕获对象进行实时记录, 并通过视频分析辅助识别目标贝类和兼捕物种。该案例对埋栖贝类采收的直接启示不在于拖网结构本身, 而在于其构建了“作业过程可视化 - 轨迹记录 - 捕获结果分析 - 管理决策优化”的数据闭环。对于滩涂埋栖贝类采收, 可借鉴其电子监控思路, 在采收机上布置定位、视觉、牵引阻力和采收量监测模块, 实时记录采收路径、漏采区域、泥沙扰动和设备运行状态, 从而为路径优化、作业质量评价和资源保护提供数据支撑。

(2) 欧盟智能养殖平台

欧盟智能养殖平台主要利用无人自主水下航行器、有缆水下机器人、侧扫声呐和水质传感器, 对贻贝养殖设施及其周边环境进行自主巡检和空间测绘。该案例虽然偏向养殖监测而非直接采收, 但其“无人平台 + 声学探测 + 环境感知 + 精细检查”的技术路线, 对埋栖贝类采收具有重要参考价值。埋栖贝类常处于泥沙内部, 单纯依靠视觉难以直接识别目标, 因此可借鉴该平台的多源感知方式, 将声呐探测、底质信息、水动力参数和视觉图像结合起来, 构建贝类分布图和作业环境图。同时, 无人平台的大范围巡检能力可用于采前资源评估和采后效果复核, 与采收装备形成“采前探测 - 采中控制 - 采后评估”的闭环作业体系。表 1 对比了部分国内外典型案例的技术路线和成果:

Table 1. Comparison of intelligent harvesting cases of buried shellfish at home and abroad
表 1. 国内外埋栖贝类智能采收案例对比

指标	国内现状	国外现状
代表技术	履带筛刷式采捕机 三目视觉水下机器人	拖网 + 电子监控 侧扫声呐 + 有缆水下航行器
感知技术	机器视觉识别、水声定位	多波束声呐、机载或卫星遥感、AI 视频分析
智能化水平	部分流程自动化，需人工配合	无人化监测 + 远程控制
应用示例	哈工大“海底法拉利”水下采收机器人 BCJ-2 履带式采收机	美国扇贝拖耙电子监控系统 欧盟水下自主航行器贻贝养殖监测系统
效果	降低劳动强度、提高效率	提高数据覆盖率和合规性
挑战	环境适应性和成本	设备投入和复杂性高

结合上述案例可以看出，埋栖贝类智能采收并非单一机械机构的简单升级，而是由环境感知、目标识别与定位、路径规划、挖掘与分离、分选与收集以及数据反馈优化共同构成的闭环作业系统。基于此，构建了 AI 驱动的滩涂埋栖贝类智能采收闭环系统框图，如图 1 所示。

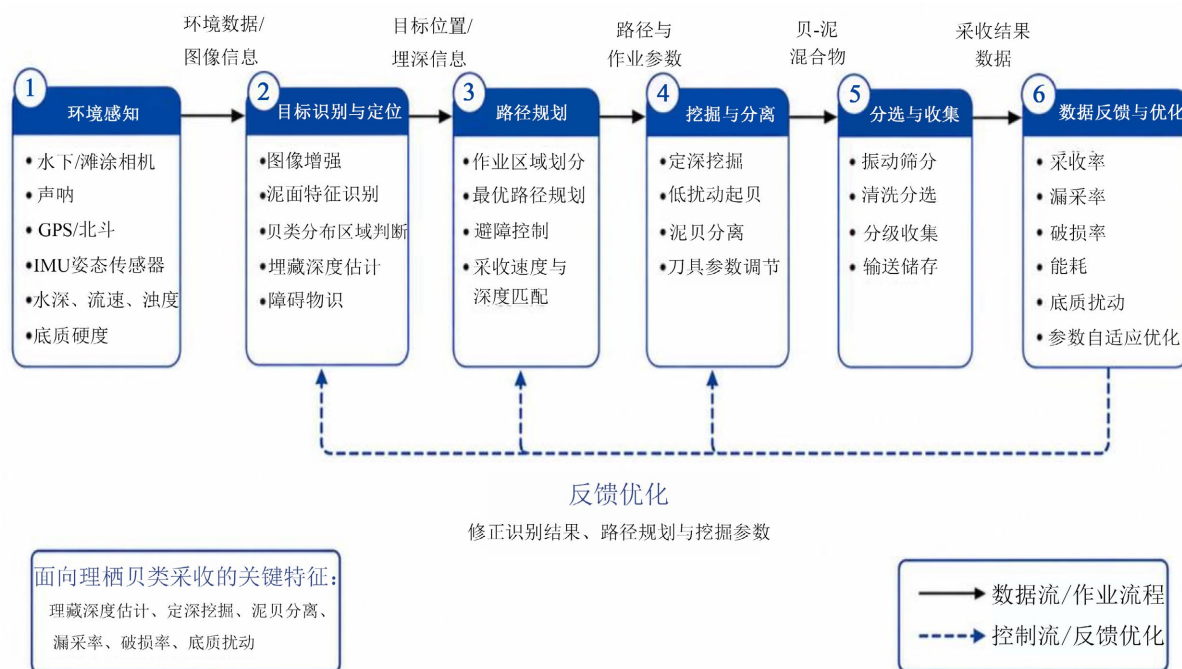


Figure 1. Frame diagram of AI-driven closed-loop intelligent harvesting system for buried shellfish in tidal flat
图 1. AI 驱动的滩涂埋栖贝类智能采收闭环系统框架图

5. 未来展望与建议

面对资源限制和环境压力，埋栖贝类养殖与采收必须向高效、绿色、智能方向转型。未来研究和应用应重点考虑以下几方面：

(1) 提升感知与识别能力

结合 AI 视觉与多谱传感，例如引入低照度摄像头、激光扫描及机械手力觉，以提高在复杂水下环境中对目标的准确检测。

(2) 构建数字孪生平台

通过实测数据驱动的数字孪生模型，可虚拟仿真不同采收场景和作业参数，优化采收过程，减少实际试错成本。政府和科研机构应支持数字孪生平台与数据库建设，为研发和决策提供基础设施。

(3) 发展智能装备和系统集成

继续推进无人船艇和无人机在贝类采收中的应用，例如配备水下机器人和无人拖网系统，实现远程遥控或自主采收。要推动自主水下机器人与渔船协同，形成“岸-船-潜水器”多层次联动体系。

(4) 政策与产业支持

政府应出台激励政策，引导企业和合作社引进高新技术，开展智能采收示范；同时加大培训力度，培养懂技术的渔业人才。完善相关标准和法规，如智能采收设备安全规范、电子监控数据认证制度，确保新技术健康发展。

(5) 循环与环保

在智能采收中应兼顾生态保护，例如优化耙齿设计减少对底质搅扰，利用无人监控减少非法捕捞。倡导信息公开和可追溯体系，将电子监控与溯源系统集成，确保产品质量和生态可持续。

综上所述，融合人工智能、物联网、大数据等技术的智能采收装备将成为解决滩涂埋栖贝类高效采收的关键。虽然当前国内起步较晚，但通过技术创新和跨学科合作，可快速缩小差距，实现贝类养殖自动化、信息化和生态化发展。未来工作需继续探索适应复杂滩涂环境的传感与控制算法，同时推动试点示范，加快研究成果向产业化应用转化。

6. 结论

本文系统回顾了滩涂埋栖贝类采收的技术进展与典型案例。在传统机械化采收技术基础上，AI视觉识别、数字孪生仿真和水下机器人等智能技术正在逐步应用于贝类采收领域。国内外实践表明，多源传感、智能决策和自动装备的集成，可显著提升采收效率和资源利用率。为实现智能化采收，应加强以下方面工作：完善多模态传感网络和深度学习识别算法；建立贝类养殖-采收的数字孪生平台；发展无人化协作装备，并推动行业政策和标准建设。通过这些努力，我国滩涂埋栖贝类采收技术有望实现由“追赶”到“并跑”，为渔业产业升级和可持续发展提供支撑。

参考文献

- [1] 母刚, 段富海, 杨津宇, 等. 埋栖贝类采捕机研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(1): 19-30.
- [2] 张问采, 张翔. 缢蛭采收机采收清洗装置设计[J]. 渔业现代化, 2018, 45(1): 49-52.
- [3] 于宁, 徐涛, 王庆龙, 等. 智慧渔业发展现状与对策研究[J]. 中国渔业经济, 2021, 39(1): 13-21.
- [4] 刘晃, 刘世晶. 智慧渔业技术发展现状与展望[J]. 大连海洋大学学报, 2025, 40(4): 541-551.
- [5] Bao, J., Li, D., Qiao, X. and Rauschenbach, T. (2020) Integrated Navigation for Autonomous Underwater Vehicles in Aquaculture: A Review. *Information Processing in Agriculture*, 7, 139-151. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.04.003>
- [6] Huy, D.Q., Sadjoli, N., Azam, A.B., Elhadidi, B., Cai, Y. and Seet, G. (2023) Object Perception in Underwater Environments: A Survey on Sensors and Sensing Methodologies. *Ocean Engineering*, 267, Article ID: 113202. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113202>
- [7] Wang, Y., Guo, J., He, W., Gao, H., Yue, H., Zhang, Z., et al. (2024) Is Underwater Image Enhancement All Object Detectors Need? *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 49, 606-621. <https://doi.org/10.1109/joe.2023.3302888>
- [8] Lucas, E., Awad, A., Geglio, A., Saleem, A., Moradi, S., Havens, T.C., et al. (2025) Underwater Image Enhancement and Object Detection: Are Poor Object Detection Results on Enhanced Images Due to Missing Human Labels? *2025 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision Workshops (WACVW)*, Tucson, 28 February-4 March 2025, 1520-1525. <https://doi.org/10.1109/wacvw65960.2025.00167>
- [9] Zhou, H., Kong, M., Yuan, H., Pan, Y., Wang, X., Chen, R., et al. (2024) Real-Time Underwater Object Detection

- Technology for Complex Underwater Environments Based on Deep Learning. *Ecological Informatics*, **82**, Article ID: 102680. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102680>
- [10] Ding, J., Hu, J., Lin, J. and Zhang, X. (2024) Lightweight Enhanced YOLOv8n Underwater Object Detection Network for Low Light Environments. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 27922. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79211-7>
- [11] Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., et al. (2023). Segment Anything. 2023 *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Paris, -6 October 2023, 3992-4003. <https://doi.org/10.1109/iccv51070.2023.00371>
- [12] Liu, S., Zeng, Z., Ren, T., Li, F., Zhang, H., Yang, J., et al. (2024) Grounding DINO: Marrying DINO with Grounded Pre-Training for Open-Set Object Detection. In: Leonardis, A., et al., *European Conference on Computer Vision*, Springer Nature Switzerland, 38-55. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72970-6_3
- [13] Zhang, H., Li, F., Liu, S., Zhang, L., Su, H., Zhu, J., Ni, L. M. and Shum, H. Y. (2023) DINO: DETR with Improved DeNoising Anchor Boxes for End-to-End Object Detection. *International Conference on Learning Representations (ICLR 2023)*, Kigali, Rwanda, 1-5 May 2023, 1-19. <https://openreview.net/forum?id=3mRwyG5one>
- [14] Li, W., Du, Z., Xu, X., Bai, Z., Han, J., Cui, M., et al. (2024) A Review of Aquaculture: From Single Modality Analysis to Multimodality Fusion. *Computers and Electronics in Agriculture*, **226**, Article ID: 109367. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109367>
- [15] Føre, M., Alver, M.O., Alfredsen, J.A., Rasheed, A., Hukkelås, T., Bjelland, H.V., et al. (2024) Digital Twins in Intensive Aquaculture—Challenges, Opportunities and Future Prospects. *Computers and Electronics in Agriculture*, **218**, Article ID: 108676. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108676>
- [16] 徐凤强, 董鹏, 王辉兵, 等. 基于水下机器人的海产品智能检测与自主抓取系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(12): 2393-2402.
- [17] Phung, A., Billings, G., Daniele, A.F., Walter, M.R. and Camilli, R. (2023) Enhancing Scientific Exploration of the Deep Sea through Shared Autonomy in Remote Manipulation. *Science Robotics*, **8**, eadi5227. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.adi5227>
- [18] Phung, A., Billings, G., Daniele, A.F., Walter, M.R. and Camilli, R. (2024) A Shared Autonomy System for Precise and Efficient Remote Underwater Manipulation. *IEEE Transactions on Robotics*, **40**, 4147-4159. <https://doi.org/10.1109/tro.2024.3431830>
- [19] Liu, R., Ha, H., Hou, M., Song, S. and Vondrick, C. (2025) Self-Improving Autonomous Underwater Manipulation. 2025 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Atlanta, 19-23 May 2025, 16915-16922. <https://doi.org/10.1109/icra55743.2025.11128759>
- [20] Amundsen, H.B., Caharija, W. and Pettersen, K.Y. (2021) Autonomous ROV Inspections of Aquaculture Net Pens Using DVL. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **47**, 1-19. <https://doi.org/10.1109/joe.2021.3105285>
- [21] Fu, J., Liu, D., He, Y. and Cheng, F. (2024) Autonomous Net Inspection and Cleaning in Sea-Based Fish Farms: A Review. *Computers and Electronics in Agriculture*, **227**, Article ID: 109609. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109609>
- [22] Liu, J., Yu, F., He, B. and Soares, C.G. (2024) A Review of Underwater Docking and Charging Technology for Autonomous Vehicles. *Ocean Engineering*, **297**, Article ID: 117154. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117154>
- [23] Kelasidi, E., Triantafyllou, M. and Ohrem, S.J. (2025) Editorial: Autonomous Robotic Systems in Aquaculture: Research Challenges and Industry Needs. *Frontiers in Robotics and AI*, **12**, Article ID: 1740881. <https://doi.org/10.3389/frobt.2025.1740881>
- [24] 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.
- [25] 周文英, 史文崇. 机器学习在渔业研究中的应用进展与展望[J]. 渔业研究, 2022, 44(4): 407-414.
- [26] 汪小昆, 武尧, 肖茂华, 等. 水产养殖中智能识别技术的研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(1): 24-33.