

doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2025.05.006

海水养殖空间规划研究进展

彭尧¹, 吴倩², 陈燕菁², 杜雯²

(1. 中国长江三峡集团有限公司江苏分公司, 江苏 南京 210019)

(2. 南京师范大学海洋科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 受全球气温变化及人口激增的影响,海水养殖业得到空前的关注. 其规模不断扩大,造成来自社会、经济与自然环境的众多问题. 在拥挤的近岸沿海空间中,如何有效协调或缓解其他用海活动与海水养殖的冲突,实现利益相关者的权益保障,是当前海水养殖空间规划研究的重要方向. 本文围绕冲突协调、容量评估与空间选址三大核心议题,对相关文献进行综述与评析. 结果表明:(1)在空间冲突协调方面,共址和向深远海转移成为主要解决方案,但其广泛应用仍受限于政策壁垒与技术经济可行性;(2)在容量评估方面,虽已构建出包含物理、生产、生态、社会的多维评估体系,但全球标准化框架缺失,且现有模型难以内化复杂的利益相关者冲突;(3)在空间选址方面,多准则决策分析与地理信息系统结合是主流方法,但静态模型难以应对海洋环境的动态变化,亟需发展集成 AI 与大数据的动态规划工具. 未来海水养殖空间规划研究将向精细化、动态化和综合化方向发展. 深度融合多源数据、开发动态适应性模型并积极探索多用途用海模式,是实现海水养殖可持续发展、平衡生态保护与经济增长的关键. 本文为相关领域的规划实践与研究创新提供理论参考.

[关键词] 海水养殖,冲突与协调,容量评估,空间选址规划

[中图分类号]S931.3 **[文献标志码]**A **[文章编号]**1001-4616(2025)05-0047-08

Progress in Mariculture Spatial Planning Research

Peng Yao¹, Wu Qian², Chen Yanjing², Du Wen²

(1. China Three Gorges Corporation Jiangsu Branch, Nanjing 210019, China)

(2. College of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Driven by global climate change and population explosion, the mariculture industry has received unprecedented attention. Its scale continues to expand, causing numerous social, economic, and natural environmental issues. In crowded near-shore coastal areas, effectively coordinating or mitigating conflicts between other sea-use activities and mariculture, while safeguarding the rights and interests of stakeholders, is a critical focus of current research on mariculture spatial planning. This paper systematically examines and analyzes related literatures centered on the three core issues: conflict coordination, capacity assessment, and spatial site selection. The results indicate that: (1) In spatial conflict coordination, co-location and relocation to offshore areas have emerged as primary solutions, yet their widespread application remains constrained by policy barriers and techno-economic feasibility. (2) Regarding capacity assessment, although a multi-dimensional evaluation system encompassing physical, production, ecological, and social aspects has been developed, a global standardized framework is absent, and existing models struggle to incorporate complex stakeholder conflicts. (3) For spatial site selection, the integration of multi-criteria decision analysis (MCDA) with geographic information system (GIS) represents the mainstream methodology, but static models are inadequate for addressing the dynamic changes in the marine environment, urgently necessitating the development of dynamic planning tools that incorporate AI and big data. Future research in mariculture spatial planning will advance towards refinement, dynamism, and integration. Achieving sustainable mariculture development and balancing ecological conservation with economic growth hinge on the deep integration of multi-source data, the development of dynamic adaptive models, and the active exploration of multi-purpose sea-use patterns. This paper provides a theoretical reference for planning practices and research innovation in related fields.

Key words: mariculture, conflict and coordination, capacity assessment, spatial site planning

收稿日期: 2025-03-18.

基金项目: 江苏省海洋科技创新项目(JSZRHYKJ202311)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX23_1725).

通讯作者: 杜雯, 硕士, 初级, 研究方向: 海岸带资源保护与利用. E-mail: w76004@njnu.edu.cn

在全球气候变化及人口急剧增长的大背景下,水产养殖部门的持续增长对实现联合国可持续发展目标具有重要推动作用^[1]. 近几十年来,水产养殖业发展迅猛. 联合国粮食及农业组织发布的《2024 年世界渔业和水产养殖状况》指出,2022 年,全球渔业和水产养殖产量再创新高. 水产养殖作为重要的食品生产方式之一,对全球食品供应特别是在稳定优质蛋白供给、满足全球消费需求等方面发挥着关键作用,未来十年水产养殖将继续扩大规模. 因此,水产养殖业应该得到优先支持和发展^[2]. 水产养殖的增量主要由海水养殖所贡献,研究表明,全球具有足够的适宜区域可以用于发展水产养殖,远远超过日益增长的海产品需求所需要的空间,海水养殖具有很高的增长潜力^[3].

现有文献多围绕养殖技术优化展开,例如深海网箱、智能养殖工船等设施的应用,以及减少氮磷排放、生态修复等尾水处理技术. 此外,养殖模式创新(如“船载舱养”“渔旅融合”)和品种结构调整(如贝类、藻类主导的养殖结构)也是研究热点. 为直观呈现这些主题间的结构关系,本研究利用 CiteSpace 生成了关键词共现网络图(见图 1). 相比之下,空间规划研究多停留在宏观政策建议层面.

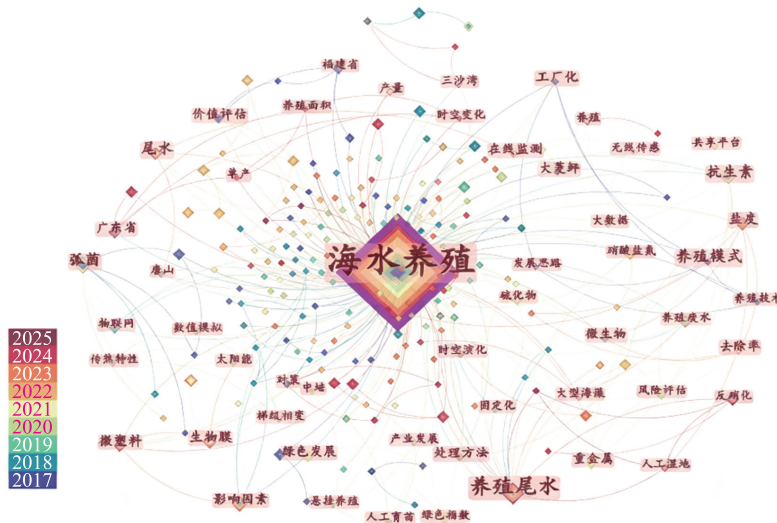


图 1 海水养殖研究现状

Fig. 1 Current status of mariculture research

海水养殖业面临的诸多挑战,归根结底是缺乏明确的空间规划和管理. 海水养殖空间规划是海洋空间规划的重要组成部分,通过合理有效利用海域资源,合理配置养殖设施和养殖结构,在获得社会经济效益的同时,不对生态环境产生较大破坏,是实现海水养殖空间开发和可持续利用目标的重要依据和总体部署. 海水养殖空间规划主要包括 3 个步骤:①分区,即为水产养殖发展确定合适的区域;②选址,即确定具体的位置进行水产养殖;③建立水产养殖管理区^[4].

科学合理的海水养殖空间规划是避免用海冲突、提高养殖产量和质量、减少生态环境负面影响、推动海水养殖业绿色可持续发展的关键^[5]. 因此,研究海水养殖空间规划至关重要. 基于此,本文梳理了海水养殖空间规划的当前核心要素,回顾其发展历程、研究动态,列举并分析了目前使用较多的辅助技术工具以及相关的外部影响,为海水养殖空间规划后续研究提供方向性参考.

1 海水养殖的冲突与协调

1.1 问题与冲突

海水养殖的冲突核心为资源利用与生态保护的博弈. 近年来,随着海水养殖规模的不断扩大,氮磷排放、抗生素残留等问题日益突出,直接威胁海洋生态系统的稳定性. Cromey 等^[6]通过 DEPOMOD 模型量化了养殖废水的沉积物扩散范围,证明超过生态容量后底栖生物多样性将显著下降. 此外,单一品种的规模化养殖导致遗传多样性丧失,而野生种群的过度捕捞进一步加剧生态失衡. Patricia 等^[7]研究发现,气候变化引发的赤潮频发与养殖区富营养化存在正反馈效应,威胁野生鱼类洄游路径. Michelle 等^[8]研究发现,养殖场衍生的防污污染物、治疗剂和溶解的营养物质可以集中并影响底栖和远洋生态系统. 此外,Fujita 等^[9]研究发现,海上养殖场基础设施的运输、部署和运营还可能给海洋野生动物带来生态风险(如纠缠、

船只撞击和栖息地排斥)。

因此未来研究需突破静态规划局限,开发 AI 驱动的动态适应性模型。目前相关学者也对动态适应性模型进行了研究,如 Beard 等^[10]提出的一种基于 Voronoi 单元和 GIS 的动态选址模型,能够有效整合异构时空数据,为海水养殖选址提供了新的思路。未来,随着大数据和人工智能技术的发展,动态选址工具的应用潜力将进一步释放,为海水养殖空间规划提供更加精准和实时的决策支持,最终推动养殖产业向智能化、可持续化方向转型升级。

海水养殖所面临的问题本质上是有限环境承载力与无限经济诉求的冲突,所以通过跨学科模型,例如将 Ecopath 与 GIS 耦合,从而量化生态阈值,构建多利益主体参与的共治框架,并依托 CRISPR 基因编辑、区块链追溯等技术实现精准管理。

1.2 共址情况与利益相关者协调

空间共享作为一种创新的海洋资源管理策略,不仅有助于避免不同海洋活动之间的竞争冲突,还能显著提高海洋空间的利用效率。海水养殖规模的扩大也推动了与其他用海活动(如海上风电、石油平台等)的共址研究。研究表明,这种共址模式在技术和经济上都具有可行性,并且能够带来显著的协同效应^[11-12]。近年来,关于在风电场进行鱼类养殖的可行性研究逐渐增多。Maar 等^[13]的研究表明,海上风电场与低营养水产养殖相结合的多用途模式可同步实现可持续能源生产、优质海产品供应和生态系统修复,该模式还能推动全球水产养殖产量增长 132%。自 2000 年以来,德国、荷兰、比利时、挪威等欧洲国家已经开始实施海上风电场与海水养殖结合的试点项目。例如,德国的海上风电与养殖结合计划(OOMU)^[14]、欧盟的近海低营养水产养殖项目(OLAMUR)^[15]和比利时的 Edulis 项目^[16]等。这些项目不仅验证了共址模式的可行性,还为未来的大规模推广积累了宝贵经验。随着水产养殖的发展,学者们也开始探索水产养殖与其他海洋基础设施如风能、波浪能装置等的结合^[17]。这些研究进一步揭示了海洋空间多用途使用的潜力,并为未来的研究提供了新的方向。

尽管共址模式具有显著的优势,但其广泛应用仍面临诸多挑战。①立法政策的缺失、部门之间的思维壁垒和繁琐的行政程序是主要的制度性障碍。②技术和运营风险、环境影响等问题需要进一步研究和解决。③要警惕空间过度集约化的风险,在实施共址模式的时候要考虑设定生态承载力阈值,并建立可持续的空间管理机制,以实现生态保护与经济效益之间的平衡。

随着海水养殖规模的扩大,近岸海域的空间资源逐渐饱和,深远海水养殖成为缓解空间压力的重要途径^[18]。研究表明,部分养殖品种在远海地区的生产潜力明显高于沿海地区。挪威船级社 DNV^[19]研究指出,挪威的深远海三文鱼养殖存活率超过 90%,远高于传统近岸网箱,这一发现为海水养殖的发展提供了科学依据。深远海水养殖具有巨大的生产潜能和发展潜力,主要体现在以下几个方面:①深远海区域拥有更为广阔的水域空间,能够有效缓解近海养殖密度过高带来的环境压力;②深远海的水质更为清洁,有利于提高养殖产品的品质 and 安全性;③海水养殖能够充分利用海洋垂直空间,发展立体化、智能化的养殖模式,提高单位面积的产出效率^[20]。

深远海水养殖突破近岸资源瓶颈,其广阔空间潜力与生态效益已得到学界广泛认可,但是目前研究多聚焦于自然条件适配性与生产技术革新,对如极端气候系统性风险的量化评估仍显不足。此外,能够为深远海水养殖提供直接指导的科学文献有限,尚未形成一套完整的、科学的深远海水养殖空间规划流程。未来需要更全面的科学指导来确定海水养殖发展的适宜位置。

利益相关者的参与是海水养殖规划和管理的重要组成部分,尤其是在协调水产养殖与其他用海活动之间的冲突方面具有重要意义^[21]。不同利益相关者的看法和建议不容忽视,应当被充分纳入养殖规划的决策过程中^[22](见图 2)。如果利益相关者的诉求与建议没有得到充分的考虑和接纳,可能会导致资源管理不善、公众信任度下降、社会冲突加剧,甚至引发长期的环境和社会问题。然而,有些利益相关者由于缺乏对空间规划概念和技术知识的理解,往往难以有效参与到水产养殖空间规划的复杂决策过程中,这也会进一步加剧水产养殖空间布局调整 and 优化的挑战^[23]。

学术界和实践界已经探索了多种利益相关者参与的方法和工具,包括问卷调查、深度访谈和公众咨询等^[24]。然而,在水产养殖选址标准上,专家通常更倾向于从生态环境保护的角度出发,认为环境指标是首要评价标准;而利益相关者则更关注经济效益和社会福利^[25]。因此,在进行水产养殖空间规划时,必须结合专家和利益相关者的意见,平衡环境保护与经济发展的关系,以实现水产养殖的可持续发展。

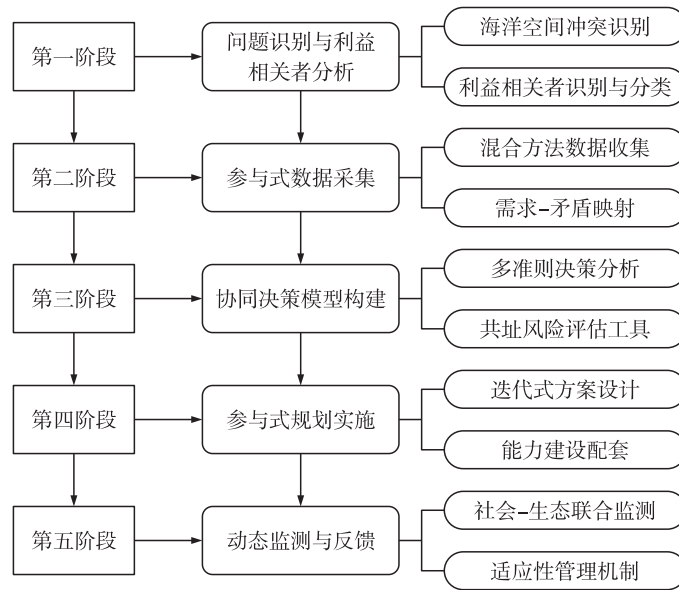


图 2 海洋空间规划利益相关者参与流程

Fig. 2 Stakeholder engagement process in marine spatial planning

2 海水养殖容量评估

海水养殖容量(养殖承载能力)评估在优化养殖空间布局、支持选址和管理工作中起着至关重要的作用。养殖容量的概念最初来源于种群生态学的 Logistic 方程,用于描述种群在有限资源环境下的增长规律。1990 年,Carver 等^[26]首次将贝类养殖的养殖容量定义为“在不影响生产率的前提下,能够获得最大产量的放养密度”。这一定义主要关注经济效益,而忽略了生态和环境因素的影响。早期对经济效益的盲目追求导致了诸多生态环境问题,如水体富营养化、生物多样性下降等。随着研究的深入,养殖容量的概念逐渐从单一的经济效益扩展为包含生态、环境、社会等多维度的综合概念。Inglis 等^[27]将贝类养殖容量划分为 4 种类型:物理容量、生产容量、生态容量和社会容量。这一分类为大多数学者所认同,并成为后续研究的基础。在 4 种养殖容量类型中,物理容量与水产养殖者的利益直接相关,是养殖选址时最常考虑的标准,通常与生产容量结合使用,用于优化养殖空间布局^[28]。

养殖容量的评估方法也在不断演进。早期研究主要依赖经验法和简单的数学模型,如瞬时生长率和能量收支法。随着生态系统动力学和计算机技术的发展,更多复杂的建模工具被引入,如 Logistic 方程^[29]、箱式模型^[30]和 Ecopath 模型^[31]等(见表 1)。

表 1 养殖容量的评估方法

Table 1 Evaluation methods for carrying capacity

名称	用途	来源
Logistic 方程	Logistic 方程用于描述种群在有限资源环境下的增长规律	[29]
Box Model	箱式模型用于模拟养殖活动对生态系统的影响,可以帮助评估养殖容量	[30]
DEPOMOD 模型	DEPOMOD 模型用于评估水产养殖对沉积物和水质的影响	[6]
Ecopath 模型	Ecopath 模型用于评估生态系统中各组成部分的相互作用	[31]
AIoT	基于物联网和人工智能的智能水产养殖管理系统,通过实时监测水质参数和鱼类行为,优化投喂策略,减少资源浪费,提升养殖效率	[32]

这些模型能够更精确地模拟养殖活动对生态系统的影响,为养殖容量的综合评估提供了科学依据。此外,地理信息系统(GIS)在物理和生态容量评估中的应用也日益广泛^[33],未来有望扩展到所有养殖容量类别,推动水产养殖容量研究的进一步发展^[4]。

目前,养殖容量评估已被纳入现代水产养殖管理框架,特别是基于生态系统的水产养殖方法中。在养殖规划和选址的早期阶段,养殖容量评估用于确定所选区域的环境适宜性和养殖限度,成为养殖许可证发放的科学依据^[34]。然而,由于环境、社会和文化背景的差异,不同国家在 4 类养殖容量评估的顺序、选择和

权重上存在显著差异. 当前研究应用 Ecopath 等模型工具, 初步实现了对沉积物影响、能量流动等生态过程的定量解析, 并借助 GIS 技术强化了空间规划的可视化决策能力. 然而, 一些因素仍制约评估体系的实践效能, 如利益相关者冲突(如传统渔业与规模化养殖)难以通过现有数学模型内化、全球标准化框架的缺失等. 未来的研究需要进一步整合生态、环境、经济和社会因素, 开发更加精细化的评估工具和方法, 以支持全球水产养殖的可持续发展.

3 海水养殖空间选址与规划

社会经济的迅速发展和人类用海活动的增加, 使得海洋空间日益拥挤, 不同用海行业、涉海部门之间的竞争、冲突加剧, 水产养殖空间被严重挤压, 迫切需要科学、有效的决策支持工具进行空间管理, 确定适宜的可利用养殖区域已成为支持和扩大水产养殖的重要课题. 20 世纪 80 年代后期以来, 水产养殖空间规划相关研究不断涌现. 1988 年, Kapetsky 等^[35]通过 GIS 技术快速定位和评估了美国路易斯安那州鲶鱼养殖发展适宜区域, 率先将地理信息系统运用到水产养殖规划研究中. Falconer 等^[36]在 2016 年创新性地将物种分布模型(species distribution models)与 GIS 结合, 应用于水产养殖选址, 为水产养殖的空间规划提供了新的方法. 现今地理信息系统作为强有力的工具在水产养殖空间规划中得到普遍应用, 但其潜在应用仍有待进一步探索. 此外, 随着养殖规模的增加, 近岸海域的空间资源逐渐饱和, 养殖活动与其他用海活动冲突日益加剧. 因此, 科学的空间选址和适宜性评价成为确保海水养殖可持续发展的基础^[37].

多数研究证实了多准则决策分析(multi-criteria decision analysis, MCDA)在海水养殖选址上的应用价值, 尤其是在评估不同区域的适宜性、优化养殖布局以及减少与其他用海活动的冲突方面表现出显著优势^[38-40]. 但是海洋环境具有高度的时空变异性, 受气候变化、洋流、水温、水质等多种因素的影响, 静态的选址模型难以准确反映长期养殖活动的可行性. 因此, 迫切需要开发能够整合新的、不断发展的时空数据的选址支持工具, 以应对海洋环境的动态变化. Couture 等^[41]于 2021 年提出的情景分析(scenario analysis)能够为基于生态系统方法的养殖规划补充时间尺度上的分析, 以评估预期结果的可行性.

在进行海洋空间规划时, 多学科交叉融合发展也为水产养殖空间规划提供了新的研究思路. He 等^[42]以意大利艾米利亚-罗马涅地区双壳贝类养殖区为例, 首次运用系统规划工具 Marxan with Zones 对“养殖适宜性最大化”与“生物多样性保护最大化”进行多目标空间协同, 验证了系统规划方法在“养-保”权衡中的可行性与效率.

在决策支持工具和系统开发研究方面, 水产养殖选址是一个复杂的空间问题, 涉及环境、经济、社会等多维度因素的权衡与协调. 虽然地理信息系统能够为决策者提供一定的空间参考, 但其功能局限于数据可视化 and 基础空间分析, 难以全面应对海水养殖选址中的复杂决策需求, 因此, 仍需开发特定的工具来支持水产养殖的空间规划与管理. 随着现代信息技术的进步, 尤其是大数据、人工智能和云计算的发展, 众多水产养殖决策支持工具和系统应运而生(见表 2).

表 2 目前常见的水产养殖决策支持工具和系统

Table 2 Common decision-support tools and systems for aquaculture

名称	用途	来源
FARM 模型	通过输入指定的环境参数和养殖场尺度参数模拟养殖场的潜在收获量、经济收益和水质影响	[43]
ShellGIS 模型	贝类水产养殖选址和养殖场管理工具	[44]
AquaSpace 模型	基于 GIS 开发的水产养殖空间规划工具, 能够对水产养殖系统涉及的环境、经济、部门间 30 项指标进行空间明确和综合评估	[45]
AkvaVis 模型	用于新养殖物种的选址	[46]
SMILE 模型	基于 3D 流体动力学模型、贝类生长模拟模型、生物地球化学模型和水产养殖特定生态模型, 确定贝类生产区的可持续承载力	[13]
APDSS 模型	具备养殖场选址、适宜性评价和养殖容量估算等功能	[28]
Ecopath 模型	用于评估生态系统中各组成部分的相互作用, 包括水产养殖活动对生态系统的影响	[31]
MaxEnt 模型	基于最大熵原理的空间分布模型, 预测水产养殖物种的潜在分布区域	[47]
Marxan 模型	空间规划和保护区设计的系统规划工具, 可应用于水产养殖空间规划	[48]

这些工具在理论上具有显著优势, 但其实际应用仍面临诸多挑战. ①这些模型的应用需要大量高质

量的数据支撑,包括环境数据、生物数据和社会经济数据。然而,数据的匮乏、数据质量和数据的适用性限制了这些工具应用的准确性和有效性。②许多工具的开发主要基于学术研究,缺乏与实际管理需求的紧密结合,导致其在实际海水养殖空间规划中的应用较为有限^[49]。③工具的复杂性和用户友好性也是影响其推广的重要因素,许多养殖从业者和管理者缺乏使用这些工具的技术能力。

4 述评与展望

4.1 现存问题与挑战

结合以上研究分析可以发现,海水养殖空间规划是一个涉及多学科知识的复杂地理空间问题,一直是海水养殖研究的重点。虽然海水养殖空间规划取得了较大的学术成果和实际应用,但还存在一定的局限性。(1)缺失长期规划与管理。目前的研究着重于早期选址的适宜性分析,鲜少结合养殖承载能力综合评估养殖区域可行性、明确具体养殖密度与养殖品种。海洋处于不断变化的状态,随着时间的推移,环境因素可能会发生改变,但目前的选址方法和模型主要适用于对海水养殖空间的静态描述和一次性分析,不能满足海水养殖空间长期规划与管理的需求。(2)较少将气候变化纳入海水养殖空间规划中。水产养殖对环境和生态系统依赖性强,容易受气候影响。因此,海水养殖的长期规划与空间选址不仅要关注当前社会、经济和环境条件的限制,还需要对未来条件进行充分考虑。(3)数据与模型的精度不足。现有生态承载力模型对复杂系统的模拟能力有限,尤其在气候变化叠加效应的耦合机制解析上存在显著偏差。

4.2 总结与展望

未来,海水养殖空间规划的研究将朝着更加精细化、动态化和综合化的方向发展。(1)随着大数据和人工智能技术的快速发展,未来的海水养殖空间规划将更加注重动态选址模型的开发与应用。例如,可以将 Biomod2(物种分布建模)与 Ecopath with Ecosim(生态系统能量流动模型)结合起来,先通过 Biomod2 找到适宜区,再用 Ecopath 评估该区域的生态承载力是否支持养殖规模。(2)海水养殖与海上风电、石油平台等用海活动的共址研究将继续成为未来研究的热点。未来的研究应进一步探索共址模式的技术可行性和经济可行性,特别是在不同海域环境下的适用性。(3)实现生态保护与养殖开发的协同优化。例如,将 Zonation(空间优先排序工具)与 Marxan(系统保护规划工具)结合应用于海水养殖空间规划,先用 Zonation 识别高保护价值区,再用 Marxan 优化剩余区域的养殖开发布局。Zonation 输出的优先级地图可作为 Marxan 的约束条件,避免在关键生态区布局养殖,综合生成“禁止养殖区”、“适宜养殖区”和“有条件养殖区”分区方案。

[参考文献]

- [1] NAYLOR R L, HARDY R W, BUSCHMANN A H, et al. A 20-year retrospective review of global aquaculture[J]. *Nature*, 2021, 591(7851): 551–563.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2024[R]. Rome: FAO, 2024.
- [3] GENTRY R R, FROEHLICH H E, GRIMM D, et al. Mapping the global potential for marine aquaculture[J]. *Nature ecology & evolution*, 2017, 1(9): 1317–1324.
- [4] AGUILAR-MANJARREZ J, KAPETSKY J M, SOTO D. The potential of spatial planning tools to support the ecosystem approach to aquaculture[C]//Food and Agriculture Organization of the United Nations Expert Workshop. Rome, 2010.
- [5] LESTER S E, STEVENS J M, GENTRY R R, et al. Marine spatial planning makes room for offshore aquaculture in crowded coastal waters[J]. *Nature communications*, 2018, 9: 945.
- [6] CROMEY C J, NICKELD T D, BLACK K D. DEPOMOD: modelling the deposition and biological effects of waste solids from marine cage farms[J]. *Aquaculture*, 2002, 214(1/4): 211–239.
- [7] PATRICIA M, GILBERT P M, MITRA A. From webs, loops, shunts, and pumps to microbial multitasking: evolving concepts of marine microbial ecology, the mixoplankton paradigm, and implications for a future ocean[J]. *Limnology and oceanography*, 2022, 67(3): 585–597.
- [8] MICHELLE N, SIMONE M N, VOPEL K. The need for proactive environmental management of offshore aquaculture[J].

- Reviews in aquaculture,2024,16(2):603–607.
- [9] FUJITA R, BRITTINGHAM P, CAO L, et al. Toward an environmentally responsible offshore aquaculture industry in the United States: ecological risks, remedies, and knowledge gaps[J]. *Marine policy*, 2022, 147: 105351.
- [10] BEARD K, KIMBLE M, YUAN J, et al. A method for heterogeneous spatio-temporal data integration in support of marine aquaculture site selection[J]. *Journal of marine science and engineering*, 2020, 8(2): 96.
- [11] KYRIAZI Z. From identification of compatibilities and conflicts to reaching marine spatial allocation agreements. Review of actions required and relevant tools and processes[J]. *Ocean & coastal management*, 2018, 166: 103–112.
- [12] LAGERVALID S, RÖCKMANN C, SCHOLL M. A study on the combination of offshore wind energy with offshore aquaculture [J]. *Ocean & coastal management*, 2015, 112: 67–76.
- [13] MAAR M, HOLBACH A, BODERSKOV T, et al. Multi-use of offshore wind farms with low-trophic aquaculture can help achieve global sustainability goals[J]. *Communications earth & environment*, 2023, 4: 447.
- [14] KANNEN A. Challenges for marine spatial planning in the context of multiple sea uses, policy arenas and actors based on experiences from the German North Sea[J]. *Regional environmental change*, 2014, 14(6): 2139–2150.
- [15] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2022 [R]. Rome: FAO, 2022.
- [16] Federal Government of Belgium. Marine spatial plan for the Belgian part of the North Sea [R]. Brussels: Federal Government of Belgium, 2014.
- [17] CARLOS V C W, BARBARA O, XABIER G, et al. Co-location opportunities for renewable energies and aquaculture facilities in the Canary Archipelago[J]. *Ocean & coastal management*, 2018, 166: 62–71.
- [18] LOVATELLI A, AGUILAR-MANJARREZ J, SOTO D. Expanding mariculture farther offshore: technical, environmental, spatial and governance challenges [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010.
- [19] Det Norske Veritas. The future of ocean farming: aquaculture forecast to 2050 [R]. Høvik: Det Norske Veritas, 2021.
- [20] LONG L, LIU H, CUI M, et al. Offshore aquaculture in China[J]. *Reviews in aquaculture*, 2024, 16(1): 254–270.
- [21] RICHARD A C, JOSE A M, FABIO M, et al. Multi-stakeholder perspectives on spatial planning processes for mariculture in the Mediterranean and Black Sea[J]. *Reviews in aquaculture*, 2020, 12(1): 347–364.
- [22] ALEX H. The rocky path to sustainable fisheries management and conservation in the Galápagos Marine Reserve[J]. *Ocean & coastal management*, 2008, 51(9): 567–574.
- [23] JACEK Z, ANJA K. Engagement of stakeholders in the marine/maritime spatial planning process[J]. *Marine policy*, 2021, 132: 103394.
- [24] KUJALA J, SACHS S, LEINONEN H, et al. Stakeholder engagement: past, present, and future[J]. *Business & society*, 2022, 61(5): 1136–1196.
- [25] GOUVELLO R L, HOCHART L E, LAFFOLEY D, et al. Aquaculture and marine protected areas: potential opportunities and synergies[J]. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems*, 2017, 27(1): 138–150.
- [26] CARVER C E A, MALLET A L. Estimating the carrying capacity of a coastal inlet for mussel culture[J]. *Aquaculture*, 1990, 88(1): 39–53.
- [27] INGLIS G J, HAYDEN B J, ROSS A H. An overview of factors affecting the carrying capacity of coastal embayments for mussel culture[R]. Christchurch: National Institute of Water and Atmospheric Research, 2000.
- [28] YOU J Y, YU L J. A set of web-based public decision support tools for integrated planning and management in aquaculture [J]. *Methods*, 2022, 9: 101795.
- [29] DUC N M. Contribution of fish production to farmers' subjective well-being in Vietnam: a Logistic model[J]. *Journal of the world aquaculture society*, 2009, 40(3): 417–424.
- [30] RAMON F, JON G. A box model for ecosystem-level management of mussel culture carrying capacity in a coastal bay[J]. *Ecosystems*, 2009, 12: 1222–1233.
- [31] CHRISTENSEN V, PAULY D. ECOPATH II: a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics[J]. *Ecological modelling*, 1992, 61(3/4): 169–185.
- [32] FAHMIDA W T, NASRIN A, ANINDYA N, et al. Integrating AIoT technologies in aquaculture: a systematic review[J]. *Future internet*, 2025, 17(5): 199.
- [33] MCKINDSEY C W, THETMEYER H, LANDRY T, et al. Review of recent carrying capacity models for bivalve culture and recommendations for research and management[J]. *Aquaculture*, 2006, 261(2): 451–462.

- [34] WEITZMAN J, FILGUEIRA R. The evolution and application of carrying capacity in aquaculture; towards a research agenda [J]. *Reviews in aquaculture*, 2020, 12(3): 1297–1322.
- [35] KAPETSKY J M, HILL J M, WORTHY L D. A geographical information system for catfish farming development [J]. *Aquaculture*, 1988, 68(4): 311–320.
- [36] FALCONER L, TELFER T C, ROSS L G. Investigation of a novel approach for aquaculture site selection [J]. *Journal of environmental management*, 2016, 181: 791–804.
- [37] CLAWSON G, KUEMPEL C D, FRAZIER M, et al. Mapping the spatial distribution of global mariculture production [J]. *Aquaculture*, 2022, 553: 738066.
- [38] BUITRAGO J, RADA M, HERNÁNDEZ H, et al. A single-use site selection technique, using GIS, for aquaculture planning: choosing locations for mangrove oyster raft culture in Margarita Island, Venezuela [J]. *Environmental management*, 2005, 35(5): 544–556.
- [39] RADIARTA I N, SAITOH S I, MIYAZONO A. GIS-based multi-criteria evaluation models for identifying suitable sites for Japanese scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) aquaculture in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan [J]. *Aquaculture*, 2008, 284(1/4): 127–135.
- [40] FRANCISCO V S, MARCELO E A, GERMAN P D. Opportunities for strengthening aquaculture industry through multicriteria decision-making [J]. *Reviews in aquaculture*, 2019, 11(1): 105–118.
- [41] COUTURE J L, DUMAS J, FEKETE B M, et al. Scenario analysis can guide aquaculture planning to meet sustainable future production goals [J]. *ICES journal of marine science*, 2021, 78(3): 821–831.
- [42] HE R J, GUO D, HUANG Z, et al. Systematic investigation of stereochemistry, stereoselective bioactivity, and antifungal mechanism of chiral triazole fungicide metconazole [J]. *Science of the total environment*, 2021, 784: 147194.
- [43] FERREIRA J G, HAWKINS A J S, BRICKER S B. Management of productivity, environmental effects and profitability of shellfish aquaculture; the farm aquaculture resource management (FARM) model [J]. *Aquaculture*, 2007, 264(4): 160–174.
- [44] NEWELL C R, HAWKINS A J S, MORRIS K, et al. ShellGIS: a dynamic tool for shellfish farm site selection [J]. *World aquaculture*, 2013, 44(3): 50–53.
- [45] GIMPEL A, STELZENMÜLLER V, TOPSCH S, et al. A GIS-based tool for an integrated assessment of spatial planning trade-offs with aquaculture [J]. *Science of the total environment*, 2018, 627: 1644–1655.
- [46] ERVIK A, AGNALT A L, ASPLIN L, et al. AkvaVis-dynamic GIS-tool for siting of fish farms for new aquaculture species: environmental quality requirements for new aquaculture species and Atlantic salmon [R]. Bergen: Institute of Marine Research, 2008.
- [47] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecological modelling*, 2006, 190(3/4): 231–259.
- [48] BALL I R, POSSINGHAM H P, WATTS M. *Marxan and relatives: software for spatial conservation prioritization* [M]// MOILANEN A, WILSON K A, POSSINGHAM H P. *Spatial conservation prioritization: quantitative methods and computational tools*. Oxford: Oxford University Press, 2009.
- [49] LACROIX D, PIOCH S. The multi-use in wind farm projects: more conflicts or a win-win opportunity? [J]. *Aquatic living resources*, 2011, 24(2): 129–135.

[责任编辑: 丁 蓉]