



· 综述 ·

中外海洋牧场建设之比较

茹小尚^{1,2,3,4}, 邓贝妮^{1,2,3,4}, 冯其明^{1,2,3,4}, 林承刚^{1,2,3,4},
张立斌^{1,2,3,4}, 杨红生^{1,2,3,4*}

(1. 中国科学院海洋研究所, 海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071;

2. 中国科学院海洋研究所, 海洋牧场工程实验室, 山东 青岛 266071;

3. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 近年来, 我国海洋牧场发展迅速, 169处国家级海洋牧场示范区获准建设。在科技和产业快速发展的同时, 一系列理论、技术和装备等问题亟待解决。日本、美国等国家海洋牧场建设起步较早, 在持续推进中取得了显著成效。本文从建设理念、建设技术、产业模式、技术瓶颈与发展建议等角度, 比较了中外海洋牧场发展历程, 总结了海洋牧场发展前景中亟待突破的关键科学问题和核心技术问题, 力求为促进现代化海洋牧场的持续高效发展提供科学对策。

关键词: 海洋牧场; 建设技术; 中外对比; 对策建议

中图分类号: S 953.2

文献标志码: A

海洋牧场是基于海洋生态系统原理, 在特定海域, 通过人工鱼礁、增殖放流等措施, 构建或修复海洋生物繁殖、生长、索饵或避敌所需的场所, 增殖养护渔业资源, 改善海域生态环境, 实现渔业资源可持续利用的渔业模式^[1-5]。海洋牧场建设可在有效缓解近海重要渔业生境退化趋势的基础上, 实现渔业资源的增殖, 是集环境保护、生态修复、资源养护于一体的海洋渔业新业态^[1-4], 对促进我国海洋经济结构调整具有重要意义。系统构建现代化海洋牧场建设技术体系, 是近年来实现我国海洋渔业持续健康发展的重要举措。本文通过梳理国内外海洋牧场发展历程、建设技术和产业特点等, 旨在指明我国海洋牧场发展的技术瓶颈和未来前景, 为我国海洋牧场产业的健康

可持续发展提供理论参考。

1 海洋牧场建设理念

1.1 国际海洋牧场理念发展进程

在国际上, 海洋牧场理念起源于发达国家(日本、美国、加拿大、英国与挪威等)在海洋渔业领域开展的人工鱼礁建设和增殖放流活动, 其主要目的在于恢复、维持或增加具有经济价值渔业资源的捕捞量。根据海洋牧场建设理念的差异, 海洋牧场的内涵主要涉及“增殖放流”与“人工鱼礁投放”两个方面, 且各国之间差异极大^[4-5]。

在增殖放流方面, 主要内涵为将海洋牧场视为对陆地畜牧业的模仿, 在天然海域进行增殖放

收稿日期: 2023-09-06 修回日期: 2023-10-11

资助项目: 国家重点研发计划(2021YFB3901034); 山东省重点研发计划(2022RZB07051)

第一作者: 茹小尚(照片), 从事海洋牧场工程技术与建设原理、养殖生态学研究,

E-mail: ruxiaoshang@qdio.ac.cn

通信作者: 杨红生, 从事海洋牧场工程技术与建设原理、养殖生态学研究, E-mail: hshyang@qdio.ac.cn



流后, 让苗种自然生长, 达到一定规格后开展捕捞, 核心在于强调海洋牧场是一种可持续性的海洋渔业生产的模式^[4-5]。据联合国粮农组织 (FAO) 统计, 1984 以来, 已有 64 个国家开展了 180 种的渔业资源增殖实践, 在欧洲、北美洲、亚洲与大洋洲建设了广泛的海洋牧场区。因各海域生态系统差异、渔业利用需求差异与经济发展差异等多种因素, 海洋牧场产业在不同国家地区之间形成了典型的产业差异性。例如, 美国注重调动公民积极参与并以休闲渔业为特色, 欧洲国家注重加强渔业资源管理以维持商业捕捞, 大洋洲国家重视生态系统保护而限制渔业资源开发等^[4]。

在人工鱼礁工程建设方面, 主要内涵为将人工鱼礁建设视为保护和养护渔业资源的一种技术手段, 通过原始的投放沉船、树木、石块, 到投放人为设计具有一定构型的混凝土礁、钢材礁等, 进而达到诱鱼、聚鱼和养护渔业资源的目的, 其核心同样在强调保障商业渔业资源的产出^[4-5]。近年来, 随着海洋生境的急剧衰退, 人工鱼礁的功能已从单纯的渔业资源增殖延伸为综合生态功能, 但在全球范围内, 各类型人工鱼礁建设的主要功能仍为渔业资源的增殖^[5]。该理念在日本尤为突出, 20 世纪 50 年代, 日本开始将人工鱼礁建设纳入国家规划进行实施, 1978—1987 年日本水产厅制定了《海洋牧场计划》, 规划在日本列岛沿海兴建 5000 km 长的人工鱼礁带, 把整个日本沿海建设成为广阔的“海洋牧场”。进入 20 世纪 90 年代, 日本的人工鱼礁建设已经形成标准化、规模化以及制度化的体制, 每年投入人工鱼礁建设的资金为 600 亿日元, 建设礁体 600 万空方^[6], 并在全国近岸 12.3% 的海域设置了人工鱼礁^[7]。为提高海域生产力, 日本相继开展了表层浮鱼礁、深水超大型鱼礁的研制, 探索开放性海洋牧场的建设道路, 并大力推进海洋牧场建设效果评估方法和技术的研究。

海洋牧场建设最初的目的是增加近岸海域水产品的产出, 随着海洋牧场理论和实践不断发展, 海洋牧场建设开始更加注重环境保护、生境修复与营造以及生物资源的养护^[8]。针对不同海区的条件和现状, 能够采取措施进行保护的, 就不要额外增加人工干预; 能够修复受损现状的, 就不要轻易改变物理环境条件开展重建; 在生态优先的前提下, 通过合理开发, 获取最佳生态效益的生境修复效果^[3]。目前, 国际海洋牧场的发

展逐渐强调与自然生境的保护修复相结合, 世界不同国家和地区分别开展了牡蛎礁型海洋牧场、海草床型海洋牧场、海藻场型海洋牧场和珊瑚礁型海洋牧场的建设, 并取得了显著的效果^[9-23]。例如, 地中海地区牡蛎礁型海洋牧场生物量丰富^[9]; 瑞典海藻场型海洋牧场能吸收环境中大量的氮和磷^[21]; 美国佛罗里达州海草床型海洋牧场短期内生物多样性增加^[13]; 美国夏威夷、佛罗里达州珊瑚礁海洋牧场对维持环境稳态起到了重要作用^[23]。

1.2 我国海洋牧场理念发展进程

基于我国特殊国情, 我国学者对海洋牧场的理念提出了原创性的创新与贡献。自 1947 年朱树屏提出“水即是鱼类的牧场”的理念以来, 曾呈奎、毛汉礼等在 1965—1979 年, 先后提出了“种植藻类和贝类的农场, 养鱼、虾的牧场”等早期海洋牧场初始理念^[24-25], 并于 1980—1985 年归纳出“海洋农牧化”的海洋牧场概念雏形^[26-28]。自此以后, 经过近 40 年的人工鱼礁投放、渔业资源增殖与浅海生境修复等系列初期海洋牧场建设实践活动的开展, 特别是《中国水生生物养护行动纲要》颁布以后, “海洋牧场”理念在我国得到了快速发展。

当前, 169 处国家级海洋牧场已经获批建设。在立足“绿色、生态、可持续发展”等现代渔业的战略定位下, 我国已形成具有明显中国特色的现代化海洋牧场建设与发展理念, 典型特征为海洋牧场将增殖放流、生境修复与资源养护等功能融合发展, 具体内涵主要包括“生态优先、陆海统筹、三产贯通、四化同步”等基本理念, 即海洋牧场的可持续发展必须依赖具有活力的海洋生态系统, 海洋牧场的建设必须包括海域与陆地的共同开发, 海洋牧场的产业链必须包括一二三产业的协同发展, 海洋牧场功能的高效发挥必须依赖技术与设备的现代化水平^[3, 8], 并在 2023 年 5 月发布了《海洋牧场基本术语》国家标准, 将海洋牧场的定义、分类等基本概念正式确立。

1.3 中外海洋牧场理念差异简析

对比中外海洋牧场建设理念特征, 相同点在于各国的海洋牧场理念都起源于全球海洋渔业资源持续衰退背景下的反思, 根本目的在于满足对于渔业资源的需求。差异之处: 与各国相比, 在各时期海洋科研工作者共同努力下, 我国海洋牧场理念一直处于动态发展过程, 并出现了明显的三段式跨越发展, 即以服务鱼贝藻养殖为特征的

早期雏形阶段, 该阶段特征为将海洋牧场等同于海水养殖; 以人工鱼礁投放和渔业资源增殖为特征的发展期, 该阶段重视海洋牧场建设的资源养护功能; 现阶段海洋牧场理念已发展为涵盖生境修复、资源养护和渔业资源持续产出, 乃至海洋大食物观等新内涵。总体而言, 我国动态发展的海洋牧场理念是我国海洋产业不断转型升级的理论缩影。

2 海洋牧场建设技术

随着世界各国海洋牧场建设的逐渐兴起, 海洋牧场相关研究工作也得到迅速发展。据不完全统计, 从 1968—2023 年, 国际海洋牧场研究呈稳定增长态势, 尤其是在 20 世纪 90 年代以后, 我国及其他国家相继出台了《日本海洋研究开发长期计划 (1998—2007)》、《美国海洋战略发展规划 (1995—2005)》、《韩国海洋牧场长期发展计划 (1998—2030)》、《国家级海洋牧场示范区建设规划 (2017—2025)》等国家战略规划, 海洋牧场相关研究进入快速发展阶段。

2.1 国际海洋牧场建设技术发展进程

日本海洋牧场的建设技术体系已经较为成熟。在生境营造技术方面, 日本通过 4 次沿岸渔场整顿开发事业计划, 建成了遍布全国沿海的人工鱼礁场^[29]。日本人鱼礁正在向材料现代化、组合构件标准化、形式多样化、规模大型化的方向发展, 人工鱼礁集鱼原理和环境改善效果评估等研究正在有序开展^[30-32]。在增殖放流技术方面, 日本在 20~30 年前已实现了 80 多种生物苗种的人工繁育, 针对增殖放流对象, 开展了苗种繁育、放流地点选择、苗种放流规格的筛选、放流前中间培育、放流效果评估、生物标志、放流对生物多样性和生态系统的影响等一系列研究及技术开发^[33-34]。在生物控制技术方面, 日本开展了鱼类驯化实验, 利用声学 and 光学刺激, 结合投饵训练、围栏气泡幕、水团幕和电栅栏等技术将鱼群控制在一定范围内^[35], 超声波生物遥测技术也被应用到鱼类行为研究当中^[36], 但相关技术大多停留在实验水平, 未得到规模化推广应用。

美国海洋牧场在生境营造方面, 首先结合地理信息系统和航空摄像手段建立了生境选址技术, 根据区域特点研发了多种特色的人工鱼礁体, 利用废弃材料的投放有效改善底质环境, 并在 20 世

纪 80 年代提出 rigs-to-reefs (从平台到礁体) 项目, 逐渐将退役的大型钻井平台或航空母舰改造成人工鱼礁。通过废弃牡蛎壳回收和志愿者活动, 提高公共参与度, 有效促进了衰退栖息地的修复, 并通过完善的监测和评估技术, 对生境营造的修复效果进行评估。在增殖放流方面, 建立了完善的苗种孵化和培育技术, 为牡蛎礁和海藻场修复以及经济鱼类的增殖提供充足的苗种资源, 有效结合生境营造和增殖技术, 形成较为完备的技术体系^[9-12]。此外, 在修复区域大力发展潜水和游钓产业, 有效促进了一二三产业融合发展, 并取得了显著的经济与生态效益^[17-20]。

欧洲国家在生境构建技术方面, 相关国家基于防拖网和海岸保护目的研发了特制的人工鱼礁体, 通过生态系统模型模拟鱼礁体投放产生的效益与影响。同时欧洲借鉴美国的 rigs-to-reefs 项目, 提出了 renewable-to-reefs (从再生资源到礁体) 的计划, 将退役的风电桩基等设施改造成人工栖息地, 有效提高了生态效益。德国、荷兰、比利时、挪威等国实施了海上风电和海水增养殖结合的试点研究, 促进海上风电和多营养层次养殖融合发展, 提高空间利用效率^[37]。在深远海养殖智能装备方面较为成熟, 如挪威建立了大西洋鲑 (*Salmo salar*) 智能化养殖技术体系, 通过在适宜海域布置大型养殖网箱和养殖工船, 利用先进的传感器技术和水下识别技术实时监测环境因子和生物状态, 同时建立了海产品的冷链运输和自动化加工技术, 实现了养殖和加工融合发展, 自动化、机械化程度较高, 有效降低了成本投入并提高了生产效率, 为未来牧养融合模式构建提供了装备和技术储备。

澳大利亚的海洋牧场建设主要是针对退化的自然生境进行修复, 在海草修复方面, 研发了海草种子播种机和移植海草的机器 ECOSUB1, 将海草移植推向了机械化。在珊瑚礁修复方面, 通过建立自然保护区, 限制破坏性捕捞活动, 在渔业区域建立了限额捕捞和限制规格捕捞制度, 有效降低了捕捞强度并养护幼体资源。在增殖放流方面, 相关学者根据澳大利亚西部增殖放流的例子形成了一套工作框架, 注重对海区物种增殖潜力进行评估, 通过标记进行增殖效果量化, 并通过监控和建模来评估放流的效果^[38]。

2.2 我国海洋牧场建设技术发展进程

我国海洋牧场建设理念提出较早, 但海洋牧

场建设直到进入 21 世纪后才得以快速发展, 装备技术体系正处在逐步完善过程中。在十三五期间, 依托科学技术部设立的国家重点研发计划“现代化海洋牧场高质量发展与生态安全保障技术”项目与“黄渤海现代化海洋牧场构建与立体开发模式示范”项目, 在生境营造方面, 突破了以人工鱼礁、海草床、海藻场、牡蛎礁和珊瑚礁为代表的海洋牧场多元栖息生境营造技术体系。在资源养护方面, 突破了以生态关键种识别、生物承载力评估、生态容纳量评估为核心的海洋牧场资源增殖与目标种管护技术。在安全保障方面, 突破了以专家决策系统为软件设施, 以自升式海洋牧场监测平台、浮标平台、潜标平台为硬件设备的海洋牧场自动化监测预警与智能化管理系统。相关研究成果通过整合我国 60 余年海洋牧场建设经验, 于 2021 年形成了我国首个海洋牧场建设领域的国家标准《海洋牧场建设技术指南》, 该标准明确了海洋牧场建设涉及的规划布局、生境营造、增殖放流、设施装备等关键技术要素, 也标志着我国以“生境营造-增殖放流-安全保障”为链条的现代化海洋牧场建设体系初步建立。

2.3 中外海洋牧场建设技术差异简析

对比中外海洋牧场建设技术特征, 相同点在于各国在海洋牧场的建设过程中都高度重视生境修复、资源养护相关的技术研发, 即各国大多以自身海域自然禀赋为基础, 初步构建了可行的海洋牧场建设技术体系。差异之处主要包括两点, 一是我国高度重视海洋牧场建设技术的应用推广工作, 得益于国家级海洋牧场示范区建设中所建立的“建设单位+技术依托单位”申报模式, 高校与科研院所开发的海洋牧场建设技术及时得到了应用推广。例如, 日本在 30 年前已研发出系列先进的鱼类控制技术, 但可能因缺少产业依托, 却未得到有效推广应用。二是因低氧等海洋生态灾害和海洋生物去向不明等对海洋牧场产业造成的严重影响, 我国在海洋牧场建设技术体系中高度重视资源环境在线监测系统的研发工作, 形成了基于自升式海洋牧场安全保障平台、浮标、潜标的立体监测系统。

但需要引起高度重视的是, 选址布局作为海洋牧场建设的前提环节, 对海洋牧场建设成败起到决定性作用, 例如我国长江口区域海洋牧场建设过程中, 因选址失误, 所投放的人工鱼礁在几

年内出现了大量沉降的现象。但经查阅文献, 各国在海洋牧场选址布局方面的理论与技术研究极少, 在未来研究中需得到进一步加强。

3 海洋牧场产业模式

3.1 国际海洋牧场产业模式

以日本、韩国为代表的亚洲海洋牧场产业特征是在开展增殖放流与人工鱼礁投放等活动时, 通过成立专职专业的水产管理中心对辖区内海洋牧场开展协调管理, 有效地促进了渔业资源的高效产出, 也符合渔业资源最大化利用的目标^[4, 39]。

以美国为代表的北美地区海洋牧场产业特征为通过投放人工鱼礁开展渔业资源的养护, 同时在产业模式上实现了创新, 即将海洋渔业与潜水观光和休闲旅游等第三产业开展融合, 创建了具有较高经济价值的休闲游钓产业, 并通过制定《钓鱼规定》等配套法律法规减少渔业资源的滥捕现象, 以促进休闲游钓业的可持续发展^[4, 40], 相关产业模式在加拿大也有报道。

以挪威、德国、英国等为代表的欧洲海洋牧场产业特征为注重通过增殖放流具有商业捕捞价值的贝类、鱼类苗种, 达到增加或维持天然海域内渔业资源量的目标, 进而为重要经济物种的商业捕捞提供支持^[4, 41]。大洋洲拥有全球最大的珊瑚礁生态系统, 为保护脆弱的珊瑚礁生态系统, 以澳大利亚为代表的大洋洲海洋牧场产业特征为在开展渔业资源捕捞活动时, 高度关注珊瑚礁生态系统的修复与保护, 并将海洋环境与资源信息系统等信息化技术融入到渔业生产中^[4, 42]。

3.2 我国海洋牧场产业模式

十三五期间, 在农业农村部的指导下, 我国已在近海初步建立了海洋牧场产业雏形, 不同海域呈现出明显的产业模式差异。在黄海与渤海, 形成了以刺参、鲍、海胆等传统海珍品底播增殖为主的海洋牧场产业集群, 一大批企业已经完成了集苗种繁育、底播增殖、成品养殖、产品精深加工的海洋牧场海珍品全产业链条打造。在南海, 积极开展了珊瑚礁修复工作, 并在现代化海洋牧场建设的基础上, 形成了潜水观光、食宿餐饮为一体的新型旅游产业。在东海, 海洋牧场建设仍以地方政府主导的公益性项目为主。

在国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专

项的支持下, 通过开展布局融合设计、增殖型风机基础研发、海上风电对海洋牧场资源环境评价体系构建等工作^[43], 创建了海洋牧场与海上风电融合发展模式。与传统海洋牧场产业模式相比, 渔能融合模式具有海域空间利用效率高、产值高等产业优势, 同时有效解决了地方渔业企业资金不足的问题。当前, 在“大食物观”新发展理念的指导下, 以大型深远海养殖装备为依托, 以“牧养互动”为技术特点的深远海海洋牧场产业模式也初具雏形, 在黄海的南隍城海域、南海的乐东海域都已取得重要进展, 为我国海洋牧场产业高质量发展提供了产业模板。

3.3 中外海洋牧场产业模式差异简析

对比中外海洋牧场产业模式特征, 相同点在于各国海洋牧场的产业基础都是渔业资源的可持续产出, 即以渔业资源采捕为主要业态的第一产业是各国海洋牧场的产业基础。差异之处在于, 我国海洋牧场产业模式积极吸纳了各国较为成熟的产业模式, 在一二三产业全链条产业创制和产业融合方面取得了较大进展。例如在渔旅融合模式中, 在吸收了美国海洋牧场产业中的休闲潜水、休闲游钓等项目的基础上, 也增加了游学科普、特色餐饮等产业模式, 代表包括河北省祥云湾国家级海洋牧场示范区等, 在渔能融合模式创制过程中, 吸纳了韩国利用风机基础的稳定性开展贝类增殖的基础上, 也直接研发了可以开展鱼类养殖的风机基础构型, 代表为广东省阳西青岛风电融合海域国家级海洋牧场示范区等。

4 问题与技术分析

4.1 关键科学问题

梳理对比国内外海洋牧场建设现状, 可知我国海洋牧场建设在技术方面虽已初见成效, 但在海洋牧场发展中仍存在许多亟需解决或悬而未决的关键科学问题。如适应性增殖模式、人工生态系统等理论仍未得到解答^[1-2], 而基于“蓝色增长”理念提出的海洋牧场生态城市化或生态城镇化建设新理论也未得到探索, 至于民众与行政主管部门关注已久的“海洋牧场内丰富的渔业资源到底从何而来, 是聚集而来, 还是人工鱼礁区性成熟个体产生的后代”, “海洋牧场内聚集的渔业资源被采捕后, 会不会造成毗邻海域渔业资源的毁灭性下降”等疑问, 至今仍未有明确的理论性答案。只

有破解海洋牧场建设过程中长久未解决和新产生的科学问题, 从基础理论层面对海洋牧场建设给予坚实的支撑, 才能实现海洋牧场建设高质量可持续发展, 基于以上技术与产业问题, 提出了海洋牧场亟待解决的 10 项科学问题, 即“牧场十问”:

① 如何将海洋牧场规划布局与我国传统渔业资源产卵场、索饵场、越冬场和洄游通道相结合。

② 海洋牧场生态系统的关键要素是什么, 对人类活动干扰的响应特征是什么。

③ 人工鱼礁等人工营造生境的聚鱼原理是什么。

④ 如何在受损的海草床、海藻场、珊瑚礁和牡蛎礁等区域开展原位的生境修复工作。

⑤ 海洋牧场内增加的渔业资源是聚集而来, 还是自然群体繁殖的后代。

⑥ 海洋牧场内聚集的渔业资源被采捕后, 不会造成毗邻海域渔业资源的毁灭性下降。

⑦ 增殖放流的苗种, 能否在海洋牧场内生长至性成熟, 并形成可稳定繁殖的自然群体。

⑧ 如何提高海洋牧场内低氧等海洋灾害的预测精度?

⑨ 海洋牧场内生物功能群的碳汇能力如何, 如何提高海洋牧场的碳汇功能。

⑩ 如何平衡海洋牧场的经济效益和生态效益, 如何维持海洋牧场生态功能的长效发挥。

4.2 关键技术瓶颈

不同尺度下海洋牧场群规划选址与空间布局技术研究仍未开展。当前, 我国已经建设了众多的国家级与省级海洋牧场示范区, 但海洋牧场的选址、规划与布局技术仍有待完善, 并主要体现在以下两点: 一是在大的空间格局下, 各海洋牧场建设仍以独立的单元区存在, 未能发挥出海洋牧场群或海洋牧场带的生态作用, 未能从国家层面将我国近海的海洋牧场总体规划布局与海洋生物的越冬场、产卵场、索饵场和洄游通道有机贯通, 出现了大空间尺度下海洋牧场生物养护功能不明确现状。二是在单个的海洋牧场单元内, 人工生境与自然生境的融合营造技术仍缺少理论支撑, 如不同功能的人工鱼礁设施如何与原有海草床、海藻场、珊瑚礁、牡蛎礁等生境开展有层次的布设^[4, 44], 导致了在小空间尺度下海洋牧场建设对原有生境改造能力不强的现象。

海洋牧场人工生态系统营造技术研究有待加强。归根结底, 海洋牧场是一种以人为主导

的海洋人工生态系统, 整体上我国海洋牧场建设仍存在生态学理论缺失、海洋生态工程技术缺少、生态管理缺位的问题^[2]。因此, 在海洋牧场人工生态系统设计方面, 存在渔业资源关键功能群遴选、生境营造规划、海洋牧场人工生态系统整体设计等技术研发有待加强的问题。在海洋牧场生态工程建设方面, 存在以生态苗种增殖为主的渔业资源关键功能群构建工程、生境营造工程、生态系统监控工程等技术有待加强的问题^[2, 45-46]。在海洋牧场生态适应性管理方面, 存在人工生态系统适应性管理方案制定、实施与评估等技术研发有待加强的问题^[2]。

“海洋牧场+”融合发展建设技术体系研发亟待开展 当前, 我国所完成的海洋牧场示范区多建设在近海区域, 更为广阔的深远海空间未得到有效开发。在大农业观、大食物观理念的指导下, 建设现代海洋牧场, 发展深水网箱、养殖工船等深远海养殖, 现代海洋牧场与深远海养殖有一定的联系且可以融合发展, 共同承担着向海洋要食物、构建多元化食物供给体系的重任, 但我国“海洋牧场+”融合发展建设技术体系仍处于起步状态, 主要存在以下几点问题: 大型养殖平台、养殖工船等装备研发有待加强; 缺少具有机械化、自动化和无人化特点的生产作业装备等。此外, 当前在全球气候变化下, 海洋生态灾害时有发生, 但高精度的海洋生态监测装备和预警预报系统研发仍处于初级阶段, 虽然可对水文、水质等参数开展监测, 但对浒苔与台风等生态灾害的应对能力仍有待加强, 制约了海洋牧场建设与深远海养殖等健康安全发展^[4]。

5 发展建议

5.1 加强顶层设计

海洋牧场的稳步发展离不开政府的管理和支持, 针对我国海洋牧场发展现状, 鉴于企业和渔民个体往往存在过度追求经济效益而忽视生态效益的问题, 应形成以农业农村部、自然资源部、发展和改革委员会等多单位为主导的顶层设计, 在海洋牧场建设与布局规划方面, 科学推进近海与深远海海洋牧场的协同发展、推进陆海一体化水域生态牧场建设, 在海洋牧场产业发展方面, 积极推进深远海牧养互动式、渔旅融合式、渔能融合式等新型产业模式国家级海洋牧场示范区建设, 并组织企业、渔民积极参与的海洋牧场发展

<https://www.china-fishery.cn>

联盟, 引导科研机构为其提供科学技术支持, 强化数字赋能在海洋牧场现代化建设中的作用, 实现理念、装备、技术和管理的现代化, 促进海洋牧场自身产业链条的三产贯通, 促进海洋牧场产业的高质量发展^[47]。

5.2 加大研发投入

据统计, 十三五期间, 科学技术部共设立两项海洋牧场相关国家重点研发项目, 国拨研发资金共计 4891 万元, 而开展国家级海洋牧场示范区建设国拨资金为 33.8 亿元, 科技投入为产业投入的 1.45%, 研发投入比严重不足。加快海洋牧场建设原理、装备和技术的研究是推动海洋牧场发展的根本动力, 我国海洋牧场相关领域的科研实力在产业快速发展中得到了显著提升, 但仍面临诸多困难, 应进一步加强科研投入, 并鼓励科技创新, 建议设立“海洋牧场现代化建设研发专项”, 针对现代海洋牧场建设过程中存在的关键科学问题和技术难题, 实施系统研究, 力求在海洋牧场构建原理、技术和管理各层面有所突破, 如监测评价、科学选址、承载力评估、生境营造、智能管控等方面, 为现代海洋牧场的科学有序发展提供理论和技术支撑。鼓励企业自发开展海洋牧场构建技术的研发与应用试验, 推动新技术的转化应用与推广, 促进我国海洋牧场事业的数字化、智能化和生态化发展^[48]。

5.3 强化国际合作

世界各国在海洋牧场建设与管理方面, 根据各自的国情均走出了独特的发展道路。发达国家海洋牧场建设的实践起步较早, 加强我国与其他国家渔业管理部门之间的交流, 相互借鉴海洋牧场发展的管理模式与经验, 将有助于海洋牧场实现跨越式发展。海洋牧场相关企业可以增进联系, 相互学习对方的优势技术与经验, 推动我国现代化海洋牧场建设事业的可持续发展。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 唐启升. 渔业资源增殖、海洋牧场、增殖渔业及其发展定位[J]. 中国水产, 2019(5): 28-29.
- Tang Q S. Fishery resources breeding, marine pasture, breeding fishery and its development orientation[J]. China Fisheries, 2019(5): 28-29 (in Chinese).

中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- [2] 丁德文, 索安宁. 现代海洋牧场建设的人工生态系统理论思考[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(9): 1335-1346.
Ding D W, Suo A N. Theoretical thinking of artificial ecosystem for modern marine ranching[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(9): 1335-1346 (in Chinese).
- [3] 杨红生, 章守宇, 张秀梅, 等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J]. *水产学报*, 2019, 43(4): 1255-1262.
Yang H S, Zhang S Y, Zhang X M, *et al.* Strategic thinking on the construction of modern marine ranching in China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(4): 1255-1262 (in Chinese).
- [4] 杨红生. 现代渔业科技创新发展现状与展望 [M]. 北京: 科学出版社, 2023.
Yang H S. Current advances and prospects of modern fishery[M]. Beijing: Science Press, 2023 (in Chinese).
- [5] 陈丕茂, 舒黎明, 袁华荣, 等. 国内外海洋牧场发展历程与定义分类概述[J]. *水产学报*, 2019, 43(9): 1851-1869.
Chen P M, Shu L M, Yuan H R, *et al.* Review on development, definition and classification of marine ranching in domestic and overseas[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1851-1869 (in Chinese).
- [6] 刘惠飞. 日本人工鱼礁建设的现状[J]. *现代渔业信息*, 2001, 16(12): 15-17.
Liu H F. The status of construction of artificial fish reef in Japan[J]. *Modern Fisheries Information*, 2001, 16(12): 15-17 (in Chinese).
- [7] 杨吝, 刘同渝, 黄汝堪. 人工鱼礁建设实绩考察[J]. *现代渔业信息*, 2005, 20(11): 6-8,20.
Yang L, Liu T Y, Huang R K. Reviews on actual achievements of construction of artificial fish reef[J]. *Modern Fisheries Information*, 2005, 20(11): 6-8,20 (in Chinese).
- [8] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. *水产学报*, 2016, 40(7): 1133-1140.
Yang H S. Construction of marine ranching in China: reviews and prospects[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(7): 1133-1140 (in Chinese).
- [9] Angeletti L, Taviani M. Offshore *Neopycnodonte* oyster reefs in the Mediterranean Sea[J]. *Diversity*, 2020, 12(3): 92.
- [10] Searles A R, Gipson E E, Walters L J, *et al.* Oyster reef restoration facilitates the recovery of macroinvertebrate abundance, diversity, and composition in estuarine communities[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 8163.
- [11] Lewis D M, Durham K E, Walters L J, *et al.* A resident fish guild as a higher trophic level indicator of oyster reef restoration success[J]. *Sustainability*, 2021, 13(23): 13004.
- [12] Longmire K S, Seitz R D, Smith A, *et al.* Saved by the shell: oyster reefs can shield juvenile blue crabs *Callinectes sapidus*[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2021, 672: 163-173.
- [13] McHenry J, Rassweiler A, Hernan G, *et al.* Modelling the biodiversity enhancement value of seagrass beds[J]. *Diversity and Distributions*, 2021, 27(11): 2036-2049.
- [14] Huston M A. Patterns of species diversity on coral reefs[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1985, 16: 149-177.
- [15] Brandl S J, Rasher D B, Côté I M, *et al.* Coral reef ecosystem functioning: eight core processes and the role of biodiversity[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2019, 17(8): 445-454.
- [16] Gove J M, Williams G J, Lecky J, *et al.* Coral reefs benefit from reduced land-sea impacts under ocean warming[J]. *Nature*, 2023, 621(7979): 536-542.
- [17] Rodriguez A B, Fodrie F J, Ridge J T, *et al.* Oyster reefs can outpace sea-level rise[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6): 493-497.
- [18] Peters J W, Eggleston D B, Puckett B J, *et al.* Oyster demographics in harvested reefs vs. No-take reserves: implications for larval spillover and restoration success[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2017, 4: 326.
- [19] Ridge J T, Rodriguez A B, Fodrie F J. Evidence of exceptional oyster-reef resilience to fluctuations in sea level[J]. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(23): 10409-10420.
- [20] Southwell M W, Veenstra J J, Adams C D, *et al.* Changes in sediment characteristics upon oyster reef restoration, NE Florida, USA[J]. *Journal of Coastal Zone Management*, 2017, 20(1): 442.
- [21] Hasselström L, Thomas J B, Nordström J, *et al.* Socioeconomic prospects of a seaweed bioeconomy in Sweden[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1610.
- [22] Gove J M, Williams G J, Lecky J, *et al.* Coral reefs benefit from reduced land-sea impacts under ocean warming[J]. *Nature*, 2023, 621(7979): 536-542.

- [23] Reguero B G, Storlazzi C D, Gibbs A E, *et al.* The value of US coral reefs for flood risk reduction[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(8): 688-698.
- [24] 曾呈奎, 毛汉礼. 海洋学的发展、现状和展望[J]. 科学通报, 1965, 10(10): 876-883.
Zeng C K, Mao H L. The development, present situation and prospect of oceanography[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1965, 10(10): 876-883 (in Chinese).
- [25] 曾呈奎. 关于我国专属经济海区水产生产农牧化的一些问题[J]. 自然资源, 1979, 1(1): 58-64.
Zeng C K. Some problems on the agriculture and herding of aquatic production in China's exclusive economic zone[J]. *Resources Science*, 1979, 1(1): 58-64 (in Chinese).
- [26] 曾呈奎. 我国海洋生物学在新时期的主要任务[J]. 海洋科学, 1980, 4(1): 1-5.
Zeng C K. The main task of marine biology in the new period in China[J]. *Ocean Science*, 1980, 4(1): 1-5 (in Chinese).
- [27] 曾呈奎, 徐恭昭. 海洋牧业的理论与实践[J]. 海洋科学, 1981, 5(1): 1-6.
Zeng C K, Xu G Z. Theory and practice of marine animal husbandry[J]. *Ocean Science*, 1981, 5(1): 1-6 (in Chinese).
- [28] 曾呈奎. 海洋农牧化大有可为[J]. 科技进步与对策, 1985, 2(2): 9-10.
Zeng C K. Prospect of marine agriculture and herding[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 1985, 2(2): 9-10 (in Chinese).
- [29] 井上誠章, 南部亮元, 桑原久実, 等. 長崎県壱岐周辺海域における人工魚礁の利用状況とメダイおよびマダイ資源密度に与える人工魚礁の効果 [J]. 日本水産学会誌, 2018, 84(6): 1010-1016.
Inoue N, Nambu R, Kuwahara H, *et al.* The present situation of utilization and the effects of artificial reefs on the resource density of Japanese butterfish *Hyperoglyphe japonica* and red seabream *Pagrus major* in the waters of the Iki Islands, Nagasaki, Japan[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 2018, 84(6): 1010-1016 (in Japanese).
- [30] 大竹臣哉. 浮魚礁の水理機構と生物生産 [J]. 水産工学, 2013, 50(1): 33-38.
Otake S. Hydraulic mechanism and biomass production around fish aggregating devices[J]. *Fisheries Engineering*, 2013, 50(1): 33-38 (in Japanese).
- [31] 小池志門, 大竹臣哉. 現地調査から見た人工魚礁の配列の違いによる流れへの影響 [J]. 水産工学, 2017, 53(3): 139-147.
Koike S, Otake S. The effect to the flow around the artificial reef in the different arrangement in situ[J]. *Fisheries Engineering*, 2017, 53(3): 139-147 (in Japanese).
- [32] 穴口裕司, 永松公明, 田原実, 等. 人工魚礁における生物多様性に関する研究事例 [J]. 水産工学, 2014, 50(3): 219-224.
Anaguchi Y, Nagamatsu K, Tahara M, *et al.* Some examples to study about the biodiversity in artificial fish reefs[J]. *Fisheries Engineering*, 2014, 50(3): 219-224 (in Japanese).
- [33] Ungson J R, Matsuda Y, Hirata H, *et al.* An economic assessment of the production and release of marine fish fingerlings for sea ranching[J]. *Aquaculture*, 1993, 118(3-4): 169-181.
- [34] 马平. 日本的栽培渔业及其技术[J]. 渔业现代化, 2004, 31(3): 23-25.
Ma P. Cultivated fishery and its technology in Japan[J]. *Fishery Modernization*, 2004, 31(3): 23-25 (in Chinese).
- [35] Itosu C, Nakamura M, Chiba Y, *et al.* The use of a water mass curtain to control fish behavior for marine ranching[J]. *Ocean Engineering*, 1998, 25(4-5): 345-358.
- [36] 伊藤靖, 吉田司. 人工魚礁における魚類行動研究への超音波バイオテレメトリー技術の適用とその課題 [J]. 水産工学, 2013, 49(3): 187-197.
Ito Y, Yoshida T. Application and problem for behavioral research of fishes using ultrasonic biotelemetry in artificial reef[J]. *Fisheries Engineering*, 2013, 49(3): 187-197 (in Japanese).
- [37] Buck B H, Langan R. Aquaculture perspective of multi-use sites in the open ocean: the untapped potential for marine resources in the Anthropocene[M]. Cham: Springer, 2017.
- [38] Loneragan N R, Jenkins G I, Taylor M D. Marine stock enhancement, restocking, and sea ranching in Australia: future directions and a synthesis of two decades of research and development[J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2013, 21(3-4): 222-236.
- [39] 余远安. 韩国、日本海洋牧场发展情况及我国开展此项工作的必要性分析[J]. 中国水产, 2008(3): 22-24.
She Y A. The development of Marine ranching in Korea and Japan and the necessity analysis of this work in China [M]. China Society of Fisheries, 2008, 3: 22-24 (in Chinese).

- China[J]. *China Fisheries*, 2008(3): 22-24 (in Chinese).
- [40] 凌申. 美国休闲渔业发展经验对长三角的启示[J]. *中国水产*, 2012(6): 46-48.
- Ling S. The enlightenment of the development experience of recreational fishery in the United States to the Yangtze River Delta[J]. *China Fisheries*, 2012(6): 46-48 (in Chinese).
- [41] 李波. 关于中国海洋牧场建设的问题研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- Li B. A study on China' marine ranching construction [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012 (in Chinese).
- [42] 黄其泉, 周劲峰, 王立华. 澳大利亚的渔业管理与信息技术应用[J]. *中国渔业经济*, 2006, 24(2): 23-26.
- Huang Q Q, Zhou J F, Wang L H. Management and the information application in Australian fisheries[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2006, 24(2): 23-26 (in Chinese).
- [43] Wang T, Ru X S, Deng B N, *et al.* Evidence that offshore wind farms might affect marine sediment quality and microbial communities[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856: 158782.
- [44] 许强, 章守宇. 基于层次分析法的舟山市海洋牧场选址评价[J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22(1): 128-133.
- Xu Q, Zhang S Y. Site selection evaluation of marine ranching in Zhoushan area based on AHP method[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, 22(1): 128-133 (in Chinese).
- [45] Ru X S, Feng Q M, Zhang S Y, *et al.* Eco-friendly method for rearing sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) larvae[J]. *Aquaculture Research*, 2022, 53(10): 3759-3766.
- [46] Deng B N, Gao Z M, Ru X S, *et al.* Metagenomic insights into the energy metabolism and immune variation of sea cucumber *Apostichopus japonicus* during reproduction[J]. *Aquaculture*, 2024, 579: 740125.
- [47] 杨红生, 丁德文. 海洋牧场3.0: 历程、现状与展望[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(6): 832-839.
- Yang H S, Ding D W. Marine ranching version 3.0: History, status and prospects[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(6): 832-839 (in Chinese).
- [48] 杨红生, 江春嬉, 张立斌, 等. 试论数字赋助力水域生态牧场建设[J]. *水产学报*, 2023, 47(4): 049508.
- Yang H S, Jiang C X, Zhang L B, *et al.* Digital empowerment promotes the construction of aquatic ecological ranching[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(4): 049508 (in Chinese).

Comparison of marine ranching constructions between China and foreign countries

RU Xiaoshang^{1,2,3,4}, DENG Beini^{1,2,3,4}, FENG Qiming^{1,2,3,4}, LIN Chenggang^{1,2,3,4},
ZHANG Libin^{1,2,3,4}, YANG Hongsheng^{1,2,3,4*}

- (1. *Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;*
2. *CAS Engineering Laboratory for Marine Ranching, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;*
3. *Center for Ocean Mega-science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;*
4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: In recent years, China's marine ranching has developed rapidly, and 169 national marine ranching demonstration zones have been built. However, in the development of science and technology and industry, it also faces a series of theoretical, equipment and technology problems to be broken through. Japan and other countries started the construction of marine ranching earlier and achieved remarkable results in continuous promotion. This paper compares the development process of marine ranching in China and abroad from the perspectives of construction concept, construction technology, industrial model, development prospect and technical bottleneck, summarizes the key scientific problems and core equipment technologies that need to be broken through in the development prospect of marine ranching, and strives to provide scientific countermeasures for promoting the sustainable and efficient development of modern marine ranching.

Key words: marine ranching; construction technology; comparison between China and foreign countries; countermeasure and suggestion

Corresponding author: YANG Hongsheng. E-mail: hshyang@qdio.ac.cn

Funding projects: National Key R & D Program of China (2021YFB3901304); Key R & D Program of Shandong Province (2022RZB07051)