

文章编号: 1674-5566(2023)05-0893-10

DOI: 10.12024/jsou.20230704277

深远海设施养殖装备技术进展与展望

徐 皓, 刘 晃, 黄文超

(中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所 农业农村部渔业装备与工程技术重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 为加快推进中国深远海养殖的健康可持续发展, 促进海水养殖空间拓展和海洋渔业产业转型升级, 阐述中国深远海养殖设施装备技术的发展现状, 列举重力式网箱、桁架类网箱、养殖工船等主要深远海养殖模式的技术进展以及典型设施。对应深远海养殖生产体系构建的技术要求, 分析阐明国内外在品种培育、苗种生产、养殖设施、生产管理装备等方面的科技创新进展与发展趋势。进一步围绕中国深远海养殖如何实现可持续健康发展, 剖析阐明目前主要存在良种缺乏、学科融合不足、设施设备技术成熟度不够、设计建造缺少规范等问题, 并在此基础上提出中国深远海养殖要实现安全、养多、养好以及走深走远, 未来在品种、设施、设备、产业链等方面需要突破的技术关键点, 旨在为加快推进中国深远海养殖高质量发展提供参考。

关键词: 水产养殖; 深远海养殖; 品种; 养殖装备; 产业链

中图分类号: S 953.2 **文献标志码:** A

渔业为人们提供了品种丰富、品质优良的水产品, 为全世界提供了近五分之一的食用动物蛋白^[1-2]。近年来, 世界海洋渔业捕捞产量增长放缓甚至萎缩, 90% 的野生捕获物种已经过度捕捞, 未来水产品的供应将更加依赖水产养殖^[3-4]。但是, 随着社会可持续发展在经济生态、环境等方面提出的更高要求, 水产养殖的空间受到严重挤压, 现有生产方式所造成的养殖密度过大、病害频发和环境恶化等问题日益突出, 制约了产量和品质的进一步提高^[5-8]。拓展深远海养殖空间, 利用深远海优质海水资源开展可持续健康养殖, 形成优质蛋白质的“蓝色粮仓”, 是中国渔业转型升级、保障食物安全的需要, 也是生态环境保护、实现中国渔业可持续发展的需要^[9-11]。

深远海设施养殖主要是指以重力式网箱、桁架类网箱及养殖平台、养殖工船等大型渔业装备为主体, 以机械化、自动化、智能化装备技术为支撑, 在深远海进行集约化、规模化高效养殖的生产方式^[12]。中国深远海设施养殖相关技术研究虽然起步较晚, 但近些年发展很快, 在设施装备

工程化研发、鱼类养殖技术等方面已取得了一批实用性科技成果。高密度聚乙烯(HDPE)框架重力式网箱工程技术实现了产业化, 已成为深水网箱应用的主体^[13-16]。桁架类网箱从“十三五”开始研发, 已开发多种结构类型, 并进行了工程示范^[14-16]。10万t级深远海大型养殖工船已于2022年建成并投入运营, 舱养大黄鱼已陆续起捕, 反响良好^[17-19]。

本文阐述中国深远海设施养殖装备技术的发展现状, 对比分析国内外在深远海养殖科技创新方面存在的差距, 剖析问题, 以此提出未来发展的技术展望, 旨在为加快推进中国深远海养殖可持续发展提供参考^[13]。

1 中国深远海设施养殖装备技术现状

1.1 重力式深水网箱

20世纪末, 中国通过对挪威HDPE框架重力式网箱的引进与再创新, 研发出更能适应中国特定海况要求的重力式深水网箱。目前, 重力式深水网箱养殖已成为中国海上鱼类养殖的主要生

收稿日期: 2023-07-10 修回日期: 2023-07-28

基金项目: 青岛海洋科技中心山东省专项经费(2022QNL030001)

作者简介: 徐 皓(1962—), 男, 研究员, 研究方向为渔业装备。E-mail: xuhao@fmiri.ac.cn

通信作者: 刘 晃, E-mail: liuhuag@fmiri.ac.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

产方式^[19-20]。近些年来,随着国家对深远海养殖产业发展重视,重力式深水网箱建设规模也得到了迅速发展,2021年全国深水网箱养殖水体3 965万m³,产量33.72万t^[21-22],主要分布在水深15 m以内、有一定遮蔽度的海域。但是,对应更深水域和开放性海域的发展要求,总体发展上还存在诸多问题,具体表现:一是以HDPE框架重力式网箱为主的深水网箱设施受材料、结构等性能限制,往往难以抵御超强台风的正面侵袭,设施安全保障能力不足;二是重力式深水网箱主要布置在湾口避风水域,养殖富营养物质排放与环境承载力的矛盾依然突出;三是养殖作业装备配套不完善,养殖过程主要依靠人工劳力,机械化程度不高,作业效率低;四是受近岸水域污染影响,养殖病害问题突出,综合经济效益低;五是可养品种单一,产业体系不完善,产业模式有限^[18,22-24]。

1.2 桁架类深远海网箱

以金属型材构建的桁架类网箱,与重力式深水网箱相比,具有更为安全、不易变形的刚性箱体,更适宜构建养殖水体更大的网箱,加以配备操作装备,就能设置在更深、更远的海域。2017年由中国船厂承建的挪威“Ocean Farm 1”大型网箱交付运营,带动了桁架类网箱在中国的研发热潮,先后研发出了全潜、半潜、浮式和坐底式等各种型式的桁架类网箱。

1.2.1 全潜式桁架类网箱

2018年7月,中国自主研发的第一个桁架类深远海网箱“深蓝1号”交付使用,至此开启了中国大型桁架类深远海网箱设施装备先河^[18]。“深蓝1号”全潜式桁架类网箱(图版-1),直径60 m,高35 m,采用多边形柱体结构,全潜于水温较低、不受海面风浪影响的海底水域,配置了水下投喂、鱼鳔补气、水下监控等设备,养殖水体达到5万m³,设计年产量1 500 t,用于鲑鳟鱼养殖,并于2018年7月投放至离日照港130 n mile、水深55 m的南黄海冷水团海域进行养殖生产,在试生产过程中曾经遇到网箱倾斜、网衣破损、起捕作业等问题,后经优化改进,设施装备得到了优化完善,并于2022年成功收获中国首批深远海养殖大西洋鲑^[25-30]。

1.2.2 半潜式桁架类网箱

“德海1号”桁架类半潜式网箱(图版-2),网

箱长91.3 m、宽27.6 m、深7.5 m,采用板架与桁架组合结构,单点锚泊,配置投饵机、起网机、洗网机和远程监控等装备,养殖水体1.1万m³,设计年产量200~300 t,并于2018年9月投放至离岸18 n mile、水深15 m的珠海桂山岛海域进行养殖生产,完成了军曹鱼、大黄鱼、卵形鲳鲹的养殖试验,并经过了17级超强台风的考验,基本达到了预期效果,但也存在一些局部缺陷,如上层结构安全性、网衣清洗、精准投喂和机械化捕捞等问题,在此基础上,通过工程优化,设计建造了“德海2号”和“普网1号”^[14-16,26]。

1.2.3 浮式桁架类网箱

“振渔1号”桁架类浮式网箱(图版-3),采用旋转式箱体结构,网箱长60 m、宽30 m、深3 m,养殖水体1.3万m³,配置了机械化网箱箱体旋转晒网功能,以及信息化技术和风电能源系统,设计年产量120 t,并于2019年5月投放至福建连江县离岸1 n mile、水深18 m的海域,已开展多批次大黄鱼养殖,也曾出现旋转晒网机构可靠性问题和起捕机械化作业等问题,在工程试验的基础上进行了优化改进,后又建成了养殖水体1.5万m³的“定海湾1号”和“定海湾2号”浮式桁架类系列网箱,以及养殖水体1万m³的“泰渔1号”、“泰渔2号”和“泰渔3号”箱型桁架钢结构网箱。目前都主要布置在离岸1 n mile以内、水深12 m的海域,开展大黄鱼养殖^[14-16,19,26,31]。

1.2.4 座底式桁架类网箱

“长鲸1号”座底式桁架类网箱(图版-4)是全球首个深水坐底式养殖大网箱,并实现了自动提网功能。该网箱为四边形桁架钢结构,长66 m、宽66 m、高34 m,养殖水体6万m³,配置了水质环境和鱼类行为监视系统及自动投饵和机械化捕捞装备,设计产能1 000 t/a,于2019年5月投放至距烟台蓬莱30 n mile、水深30 m的长岛县大钦岛海域进行养殖生产,主养鱼种包括黑鲟鱼、六线鱼等。实际生产中曾出现网衣破损、网衣清洗等问题,后经改进优化,特别是针对网衣破损问题,改进了网衣箱体结构以及选用超高分子量聚乙烯网衣和网绳材料,提高了网箱的安全性,形成了6万m³和9.4万m³两型座底式、标准化桁架类网箱,先后建造了8个该类型系列网箱“经海1号”~“经海8号”^[14-16,30,32]。

1.2.5 渔旅融合桁架类网箱

“澎湖号”渔旅融合桁架类网箱(图版-5)是集成波浪能发电的半潜式桁架钢结构养殖旅游平台,养殖水体 1.5万 m^3 ,设计产能 150 t/a ,主养鱼种包括卵形鲳鲹、石斑鱼等。该平台集成了养殖、绿色能源、管理服务和智能生产等4个功能区,配置了20人居住舱室以及养殖自动投饵设备、伤残死鱼收集设备、养殖平台数据采集与监控系统等设备,能够实现鱼类生长过程中全程智能化监控与风险预警,于2019年8月投放至离岸 20 n mile 、水深 17 m 的珠海桂山岛海域。在“澎湖号”试验示范的基础上,强化养殖功能,又设计建造了“闽投1号”“普盛海洋牧场1号”“普盛海洋牧场3号”等^[14-16,19,31]。

1.3 养殖工船

养殖工船是建立在船舶平台上的养殖系统,其基本功能包括:养殖舱室、水质管控、养殖作业、饲料仓储、人员居住、船舶航行等,能根据水质、水温的要求在海上游弋或锚泊,可以主动躲避台风、赤潮等危害性海况的影响,使深远海养殖具有更高的鱼类生长效率和系统安全性。养殖工船建设方案最早在20世纪90年代由欧洲提出,中国系统性研发开始于2008年以后,2012年提出了具有自主知识产权的“船载海洋养殖系统”,2019年完成了 10万 t 级大型养殖工船的技术研究与功能研发,构建了基础船型,开启了养殖工船的生产实践。

1.3.1 封闭型大型养殖工船

全球首艘 10万 t 级深远海大型养殖工船“国信1号”于2022年5月在青岛交付运营。“国信1号”封闭型大型养殖工船(图版-6)总长 250 m 、型宽 45 m 、型深 21.5 m ,最大排水量 13万 t ,设置有15个养殖水舱,养殖水体 8万 m^3 ,设计产能为每年 3700 t 大黄鱼。该船为全封闭舱养结构,抽取下层海水补充溶氧开展可管控的高密度养殖,配置了环境监测、溶氧调控、自动投饵、舱壁清洗、机械化聚捕、船载加工以及船岸一体化智能管控等高效作业装备,采用了先进的船舶电力推进技术和减震工艺,养殖水体的声学指标已达到静音级科考船水平,全船设置 2108 个信息测点,对15个养殖舱内水、氧、光、饲、鱼以及船舶航行情况进行实时监测与集中控制。2022年9月首批舱养大黄鱼起鱼上市,市场反响良好^[18-19,30]。

1.3.2 通海型养殖工船

“民德”轮养殖工船(图版-7),是利用 8000 t 级散货船改装而成的,将两个货舱改为养殖舱,采用舱壁与海贯通方式,将表层海水引入养殖舱,于2020年10月投入使用,实现了北方鱼苗入舱、游弋到南海开展养殖试验。该船养殖水体 6650 m^3 ,可养殖高体鲷 100 t ,试验达到了预期效果,验证了通海型工船可以开展鱼类养殖,之后就没有后续生产性运行的报道。与封闭式舱养工船相比,通海型养殖工船属于类似网箱的开放型养殖系统,养殖密度相对较低、养殖病害防控较难^[19]。

2 国内外深远海养殖科技进展与趋势分析

2.1 深远海主养品种良种化

世界鱼类养殖发达的国家一般国土面积比较小,周围海域通常都在一个气候带,养殖品种的选择范围比较小,对主要养殖品种的基础生物学和生态学研究相对集中。挪威大西洋鲑养殖协会根据多年的积累,建立了包含环境温度等因素在内的大西洋鲑生长模型,为大西洋鲑深远海养殖计划和可行性评估提供了准确的生长模型。开展大西洋鲑营养需求的研究,为精确设计饲料配方和降低鱼粉和鱼油的用量奠定了基础^[33-34]。大西洋鲑的选育,基于18个遗传性状参数,经过40多年的连续筛选和培育,其体质量、繁殖力、抗病、脂肪含量、脂肪分布、肉色等性状都有明显改善,生长速度提升了1倍,良种的覆盖率达到80%以上^[36-37]。

中国海水鱼类养殖研究本身起步比较晚,但发展迅速,从20世纪80年代开始,先后开发了真鲷、牙鲆、大菱鲆、红鳍东方鲀、石斑鱼、军曹鱼、卵形鲳鲹等几十种海水鱼类的苗种人工繁育和成鱼养殖技术,是世界上海水鱼类养殖品种最多的国家^[35],但是具体到每个品种,则存在研究投入不足和基础研究薄弱等弊端,许多主养品种的生物学和生态学基础研究积累不足,限制了精确养殖技术的研发。在良种选育方面,除少数几个新品种外,大都是未经任何改良的野生种。良种覆盖率低,表现为生长速度不均匀,抗逆性差和产量低,亟须加大基础研究投入,加快良种开发^[38-42]。

2.2 深远海养殖苗种繁育规模化技术

从20世纪70年代海水鱼类苗种繁育技术发展初期开始,日本、欧洲和美国等水产养殖强国就致力于发展工厂化育苗技术,建立了包括亲鱼产卵调控、生物饵料培养和强化以及仔稚鱼培育等成熟的工厂化苗种繁育技术体系。大西洋鲑、真鲷、牙鲆、金头鲷和欧洲鲈等的苗种出池、计数、规格分选和注射疫苗等生产操作实现了机械化和自动化,极大地降低了人工成本和提高了工作效率。日本水产综合研究中心通过改善仔鱼培育技术和预防危害严重的病毒性疾病,使东星斑、七带石斑鱼、褐石斑和红点石斑鱼等多种石斑鱼工厂化苗种培育成活率大幅提升,到达规模化生产的水平^[43-45]。

中国海水鱼类人工苗种生产,北方的大菱鲆、半滑舌鳎和牙鲆等品种以室内工厂化为主,南方的石斑鱼、黑鲷和军曹鱼等品种则以室外土池培育为主,为了降低苗种繁育成本和分散产业风险,已经形成明确的受精卵采集、仔稚鱼培育、苗种中间培育和生物饵料培养等专业分工,其特点是严重依赖人工操作,设备和装备的利用率低,尤其是利用开放土池培育仔稚鱼和生物饵料已成为预防疾病传染非常大的障碍,进行技术改造和优化升级难度较大。另外,石斑鱼土池人工苗种生产不稳定,所生产的苗种常常携带着鱼类神经坏死病毒(NNV)和虹彩病毒,有能力从事工厂化苗种生产的企业不多,而且苗种生产规模和质量不够稳定^[46-48]。

2.3 深远海养殖设施大型化、多样化

近年来国外网箱养殖设施逐渐向大型化发展,不断地向更深更开放的海域深入。网箱设施在前期研发的半潜式张力腿网箱、碟形网箱、球形网箱等类型的基础上,具有较高机械化自动化作业水平的大型桁架类网箱成为热点,如:挪威用于大西洋鲑养殖的“Ocean Farm 1”半潜式网箱,高69 m,直径110 m,有效养殖水体超过25万 m^3 ,设计产能达6 000 t/a;“Havfarm 1”拖曳式船型网箱,长385 m,型宽59.5 m,拖航吃水8 m,养殖水体40万 m^3 ,设计产能达1万 t/a^[49-51]。为防控表层海水病害危害和养殖物种逃逸,封闭式养殖系统在大西洋鲑养殖上应用成为研究热点,如挪威Huage Aqua公司研发的封闭式蛋型养殖平台“The Egg”,高44 m,宽33 m,从水下20 m深处抽

取海水,养殖水体20 000 m^3 ,可养殖鲑鱼1 000 t/a。挪威Aquafarm Equipment公司开发的封闭式罐型养殖平台“Neptune”,周长126 m,直径40 m,深22 m,养殖水体21 000 m^3 ,养殖产能为1 000 t/a^[52-53]。

中国重力式网箱已由原来的周长40 m,逐步增大到周长60、90、120 m等,大规格的深水网箱还未普及使用。目前在建和已投入运营的桁架类网箱中,单体规模较大的“经海5号”~“经海8号”养殖水体为9.4万 m^3 ,大部分桁架类网箱的养殖水体为1万~3万 m^3 ,包括了全潜式、半潜式、座底式等多种类型,总体上还处于试验和试生产阶段,设计产能还未实现。“国信1号”10万t级大型养殖工船属于具有游弋功能的封闭式养殖平台,正处在产能逐步提升的生产运行阶段。在“十四五”重点研发计划项目等课题的支持下,具有可移动功能的封闭式养殖平台正在研发中^[52-54]。

2.4 深远海养殖生产管理自动化、智能化

在养殖鱼类状态观测的水下传感器监控和传输技术研究方面,挪威、美国和日本等国家发展出多种传感器实时监控系统。挪威、日本等国家采用水下成像、声呐探测等多种技术,实时估算养殖鱼类个体质量、群体生物量以及死亡情况,为投喂、清理以及出售等决策提供依据。挪威的水下大西洋鲑体表图像分析技术可以确定寄生虫的感染情况,为寄生虫的治疗和预防提供依据。在养殖智能管控方面,日本研制的“空海”管理系统,可以针对养殖品种的生长特点,结合养殖管理平台传感器所收集的天气、潮流、风向、水温、盐度和溶氧等参数,提出饵料投喂策略。加拿大Feeding Systems公司的自动投饵系统可针对养殖对象设置不同的投饵控制软件,有效地提高了投饵系统的使用效率,并通过自动投饵系统和控制软件的协调配合提高了饵料利用率与经济效益^[14,27,55-57]。

中国在深远海养殖配套装备方面已取得长足进步,已具备机械化集中投喂,鱼类行为监测系统、水下作业机器人、养殖信息化管理系统等工业化养殖配套能力,但自动化智能化水平还有待提高,在装备安全性、作业高效性和系统完整性等方面也存在不足。中国装备制造能力和建造水平已处于世界先进水平,全球最先进的深远海智能养殖平台“Ocean Farm 1”和“Havfarm 1”都

是在中国建造的,但配套的作业装备全部由挪威研发和制造^[14,27,58]。

3 深远海养殖发展存在的主要问题

3.1 适合深远海的良种匮乏,基础研究理论支撑不足

目前适合深远海工业化养殖的品种非常有限,代表性种类,如在黄渤海海域主要是花鲈、许氏平鲷等,东海海域主要是大黄鱼等,南海海域主要是卵形鲳鲹、石斑鱼等。但是,总体上良种化水平不高,生长性状不稳定,鱼种携带病原。养殖过程未能完全摆脱鲜活饵料,全程饲料投喂技术有待确立;浪流环境饲养鱼类行为学与营养机制不清,对应生长模型的营养策略、生长管控等技术体系和生产工艺还未建立;养殖区域生态环境演化机制与环境承载力研究还很缺乏,影响着深远海养殖的产业化进程。

3.2 学科交叉融合不够,技术支撑能力不足,配套体系不完善

深远海养殖产业涉及海工装备制造、养殖技术与养殖工艺、养殖作业装备自动化、生态环境评价、鱼类行为智能识别等多学科多技术交叉融合。目前中国开发的大型桁架类网箱几乎都是由海工与船舶企业设计建造的,与水产养殖工艺与装备的协同攻关需要加强。随着海工市场逐步回暖,海工企业对海洋水产养殖业的热度和积极性也逐渐减弱,学科交叉与产业融合更显不足,产品研发技术支撑能力不够,产业链系统性配套不完善,技术储备严重不足,没有建立完整的产业技术体系。

3.3 设施装备技术不够成熟、标准化程度低,装备保障不足

深远海养殖涉及渔业资源、养殖、捕捞、加工、装备、信息等诸多方面,其中渔业装备的研发能力是发展深远海养殖的重要保障和支撑。由于中国深远海养殖起步较晚,相关研究基础弱,养殖设施与配套装备自主研发能力不高,加之持续、稳定的科技投入不足,科技创新进程缓慢,能力不强,原创性成果不多,高新技术研究明显滞后,科技成果储备明显不足。同时,科研成果向产业化转化能力不强,支撑推进深远海养殖发展的设施装备技术成熟度不高,相关设计、建造、产业配套的技术标准滞后,产品标准

化程度低,装备保障不足,制约着我国深远海养殖走深走远。

3.4 设施装备设计建造缺乏规范引导,设施装备水平参差不齐

随着越来越多的各种类型的深远海养殖设施装备投入应用,安全保障能力不足、配套装备无法满足生产需求、环保程度较低等已逐渐凸显成共性问题。由于缺乏规范化引导,深远海复杂海况环境下开展工业化生产所必需的抗风浪能力、自动化智能化装备配套、环保设备配套等基本要求,在设施装备的设计和建造中没有得到充分体现,这导致了目前中国深远海养殖设施装备水平参差不齐,也制约了深远海养殖的健康可持续发展。

4 深远海养殖技术展望

4.1 建立适养品种开发及工业化养殖技术体系

适养品种选择是深远海养殖系统构建的基本前提,养殖品种的选择应充分发挥水质优良水域养殖成活率高、病害少的优势。适养品种开发应考虑如下因素:一是环境水温要求。需要针对中国沿海海域周年水温变化情况,选择能够生存并具有最长生长期的养殖种类。二是竞争性要求。养殖产品需要有足够利润空间,具有与养殖方式的竞争优势。三是市场潜力。养殖产品有足够的消费市场甚至消费文化,不会因大量的产品上市导致价格下跌。四是品种特性。养殖对象需要具有符合工业化养殖要求的种质性状,如生长速度快、适合高密度养殖等,有利于集约化养殖、转运与加工。五是养殖技术。有适合养殖营养需求的全过程配方饲料及生产体系。

4.2 研发安全性与经济性兼具的设施装备

中国深远海养殖设施装备正处于产业化发展起步期,设施系统的构建主要以保障恶劣海况下的安全生产为基本考虑,还需要满足在开放海域开展集约化养殖生产的要求,提高养殖系统的经济性。一是适宜性。能够有效地利用海域水资源条件,创造适合集约化、高效养殖生产所需的水温、水流等条件。二是安全性。养殖设施的结构、锚泊系统需要应对恶劣海况下风浪流的危害,有针对性地进行工程化设计和建设,以保障人员、物资、养殖对象的安全。三是操控性。需要构建标准化、规范化的全产业链生产系统,以

满足海上养殖生产管控与保障的需求。四是经济性。以养殖对象的市场价值、海域条件、消费习惯等为前提,构建经济适用、规模经济效益好的设施设备和生产系统。

4.3 构建陆海统筹全产业链生产保障体系

深远海养殖系统远离大陆,物流加工系统是不可或缺的生产保障,其成本效益只有通过陆海统筹全产业链的系统化、规模化和有效的组织才能控制到理想的水平。一是要以大陆为基点,构建包括海上高值化加工、冷链物流和活体运输等组成的覆盖全产业链的生产物流与加工体系,以保障生产物资的及时补给,养殖与捕捞渔获的初加工和及时转运。二是要配备专业化冷藏、活鱼、鱼苗运输船,保障鱼种、饲料和其他生产物资的供给。三是要配备有基于船舶平台的海上加工系统,以提高产品品质与利用价值。四是要建立陆基生产系统,包括产前的苗种供给、饲料生产和产后的活鱼暂养、加工和物流配送等。

参考文献:

- [1] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2016: contributing to food security and nutrition for all[R]. Rome: FAO, 2016.
- [2] 刘晔,徐皓,徐琰斐. 深蓝渔业的内涵与特征[J]. 渔业现代化, 2018, 45(5): 1-6.
LIU H, XU H, XU Y F. Connotation and characteristics of deepblue fishery[J]. Fishery Modernization, 2018, 45(5): 1-6.
- [3] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2018: meeting the sustainable development goals [R]. Rome: FAO, 2018.
- [4] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2020: sustainability in action[R]. Rome: FAO, 2022.
- [5] LANGAN R. Opportunities and challenges for off-shore farming [M]//BURNELL G, ALLAN G. New Technologies in Aquaculture, Improving Production Efficiency. Quality and Environmental Management. Boca Raton: Woodhead Publishing, 2009: 895-913.
- [6] 徐琰斐,刘晔. 深蓝渔业发展策略研究[J]. 渔业现代化, 2019, 46(3): 1-6.
XU Y F, LIU H. Research on development strategy of deep ocean fishery [J]. Fishery Modernization, 2019, 46(3): 1-6.
- [7] 崔铭超,鲍旭腾,王庆伟. 我国深远海养殖设施装备发展研究[J]. 船舶工程, 2021, 43(4): 31-38.
CUI M C, BAO X T, WANG Q W. Research on the development of offshore aquaculture facilities and equipment in China[J]. Ship Engineering, 2021, 43(4):31-38.
- [8] 徐皓,刘晔,徐琰斐. 我国深远海养殖发展现状与展望[J]. 中国水产, 2021(6): 36-39.
XU H, LIU H, XU Y F. Development and prospect of offshore aquaculture in China [J]. China Fisheries, 2021 (6): 36-39.
- [9] 麦康森,徐皓,薛长湖,等. 开拓我国深远海养殖新空间的战略研究[J]. 中国工程科学, 2016, 18(3): 90-95.
MAI K S, XU H, XUE C H, et al. Study on strategies for developing offshore as the new spaces for mariculture in China[J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(3): 90-95.
- [10] 徐皓,陈家勇,方辉,等. 中国海洋渔业转型与深蓝渔业战略性新兴产业[J]. 渔业现代化, 2020, 47(3): 1-9.
XU H, CHEN J Y, FANG H, et al. Chinese marine fishery transformation and strategic emerging industry of deep ocean fishery[J]. Fishery Modernization, 2020, 47(3): 1-9.
- [11] 徐琰斐,徐皓,刘晔,等. 中国深远海养殖发展方式研究[J]. 渔业现代化, 2021, 48(1): 9-15.
XU Y F, XU H, LIU H, et al. Research on the development way of deepsea mariculture in China [J]. Fishery Modernization, 2021, 48(1): 9-15.
- [12] 农业农村部,工业和信息化部,国家发展改革委,等. 关于加快推进深远海养殖发展的意见[EB/OL]. 北京: 中国政府网, 2023[2023-06-12]. https://www.gov.cn/govweb/zhengce/zhengceku/202306/content_6886007.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Industry and Information Technology, National Development and Reform Commission, et al. Opinions on accelerating the development of deep sea aquaculture[EB/OL]. Beijing: The website of the Central People's Government of the PRC, 2023 [2023-06-12]. https://www.gov.cn/govweb/zhengce/zhengceku/202306/content_6886007.htm.
- [13] 徐杰,韩立民,张莹. 我国深远海养殖的产业特征及其政策支持[J]. 中国渔业经济, 2021, 39(1): 98-107.
XU J, HAN L M, ZHANG Y. Industrial characteristics and policy support of China's deep sea aquaculture[J]. Chinese Fisheries Economics, 2021, 39(1): 98-107.
- [14] 黄小华,庞国良,袁太平,等. 我国深远海网箱养殖工程与装备技术研究综述[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 121-131.
HUANG X H, PANG G L, YUAN T P, et al. Review of engineering and equipment technologies for deep-sea cage aquaculture in China [J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(6): 121-131.
- [15] 石建高,余雯雯,卢本才,等. 中国深远海网箱的发展现状与展望[J]. 水产学报, 2021, 45(6): 992-1005.
SHI J G, YU W W, LU B C, et al. Development status and prospect of Chinese deep-sea cage [J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(6): 992-1005.

- [16] 程世琪,石建高,袁瑞,等. 中国海水网箱的产业发展现状与未来发展方向[J]. 水产科技情报, 2022, 49(6): 369-376, 380.
CHENG S Q, SHI J G, YUAN R, et al. Current situation and future development direction of marine cage in China [J]. Fisheries Science & Technology Information, 2022, 49(6): 369-376, 380.
- [17] 胡方珍,盛伟群,王体涛. 深远海养殖装备技术现状 & 标准化工作建议[J]. 船舶标准化工程师, 2021, 54(5): 6-12.
HU F Z, SHENG W Q, WANG T T. Technical status and standardized suggestions of far-reaching marine aquaculture [J]. Ship Standardization Engineer, 2021, 54(5): 6-12.
- [18] 刘晃,徐皓,庄志猛. 封闭式养殖工船研发历程回顾[J]. 渔业现代化, 2022, 49(5): 1-7.
LIU H, XU H, ZHUANG Z M. Review of floating closed aquaculture vessel development [J]. Fishery Modernization, 2022, 49(5): 1-7.
- [19] 鲍旭腾,谌志新,崔铭超,等. 中国深远海养殖装备发展探讨及思考[J]. 渔业现代化, 2022, 49(5): 8-14.
BAO X T, CHEN Z X, CUI M C, et al. Discussion and consideration on the development of deep sea aquaculture equipment in China [J]. Fishery Modernization, 2022, 49(5): 8-14.
- [20] 郭根喜. 我国深水网箱养殖产业化发展存在的问题与基本对策[J]. 南方水产, 2006, 2(1): 66-70.
GUO G X. The existing problem and basic countermeasure in the industrialization development of deep-water net cage culture in China [J]. South China Fisheries Science, 2006, 2(1): 66-70.
- [21] 关长涛,林德芳,黄滨,等. 深海抗风浪网箱养殖设施与装备技术的研究进展[J]. 现代渔业信息, 2007, 22(4): 6-8.
GUAN C T, LIN D F, HUANG B, et al. Progress on research of farming equipment and technology of anti-storm sea net cage [J]. Modern Fisheries Information, 2007, 22(4): 6-8.
- [22] 黄一心,徐皓,丁建乐. 我国离岸水产养殖设施装备发展研究[J]. 渔业现代化, 2016, 43(2): 76-81.
HUANG Y X, XU H, DING J L. Research on the development of offshore aquaculture facilities and equipment in China [J]. Fishery Modernization, 2016, 43(2): 76-81.
- [23] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会. 2022中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
Bureau of Fisheries Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. Chinese fishery statistical yearbook 2022 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022.
- [24] 郭根喜,黄小华,胡昱,等. 深水网箱理论研究与实践 [M]. 北京: 海洋出版社, 2013.
GUO G X, HUANG X H, HU Y, et al. Deep water cage theory research and practice [M]. Beijing: China Ocean Press, 2013.
- [25] 徐皓,谌志新,蔡计强,等. 我国深远海养殖工程装备发展研究[J]. 渔业现代化, 2016, 43(3): 1-6.
XU H, CHEN Z X, CAI J Q, et al. Research on the development of deep sea aquaculture engineering equipment in China [J]. Fishery Modernization, 2016, 43(3): 1-6.
- [26] 陈坤鑫,盛松伟,张亚群,等. 海工型渔业养殖网箱技术现状与发展趋势[J]. 新能源进展, 2020, 8(5): 440-446.
CHEN K X, SHENG S W, ZHANG Y Q, et al. Technology status and development trend of ocean engineering aquaculture cage [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2020, 8(5): 440-446.
- [27] 闫国琦,倪小辉,莫嘉嗣. 深远海养殖装备技术研究现状与发展趋势[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(1): 123-129.
YAN G Q, NI X H, MO J S. Research status and development tendency of deep sea aquaculture equipments: a review [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2018, 33(1): 123-129.
- [28] 董双林. 黄海冷水团大型鲑科鱼类养殖研究进展与展望 [J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(3): 1-6.
DONG S L. Researching progresses and prospects in large salmonidae farming in cold water mass of Yellow Sea [J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(3): 1-6.
- [29] 新华社. 我国首批大西洋鲑喜获丰收“海上粮仓”渐入“深蓝”[EB/OL]. 北京: 中国政府网, 2022[2022-06-08]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-06/08/content_5694719.htm#1.
Xinhua News Agency. China's first batch of Atlantic salmon harvest "sea granaries" gradually into "deep blue" [EB/OL]. Beijing: The website of the Central People's Government of the PRC, 2022[2022-06-08]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-06/08/content_5694719.htm#1.
- [30] 陆民敏. “耕海”新牧歌 [N]. 中国水运报, 2022-05-25(8).
LU M M. The new pastoral song of "Cultivating Sea" [N]. China Water Transport News, 2022-05-25(8).
- [31] 颜澜萍. 踔厉奋发担使命 蓝色崛起正当时 [N]. 福州日报, 2022-03-25(23).
YAN L P. Vigorously undertaking the mission, blue rising at the right time [N]. Fuzhou Daily, 2022-03-25(23).
- [32] 李喆睿. 基于GIS的深水网箱养殖选址研究 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021.
LI Z R. Site selection of deep water cage aquaculture based on GIS [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.
- [33] 刘翀,刘晃,刘兴国,等. 挪威大西洋鲑养殖业可持续发展对中国水产养殖产业的借鉴 [J]. 渔业信息与战略, 2021, 36(3): 208-216.

- LIU C, LIU H, LIU X G, et al. Reference from sustainable development of Norwegian Atlantic salmon industry to Chinese aquaculture [J]. *Fishery Information & Strategy*, 2021, 36(3): 208-216.
- [34] 张宇雷, 倪琦, 刘晔, 等. 挪威大西洋鲑鱼工业化养殖现状及对中国的启示[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(8): 310-315.
- ZHANG Y L, NI Q, LIU H, et al. Status quo of industrialized aquaculture of Atlantic salmon in Norway and its implications for China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(8): 310-315.
- [35] 张智一. 海水鱼类养殖业绿色发展科技创新的困境及建议[J]. *科学管理研究*, 2020, 38(5): 93-99.
- ZHANG Z Y. Difficulties and suggestions of marine fish culture green development's technology innovation [J]. *Scientific Management Research*, 2020, 38(5): 93-99.
- [36] 陆亚男, 刘翀, 王茜, 等. 挪威大西洋鲑良种选育的发展历程及其对我国水产种业工作的借鉴[J]. *渔业信息与战略*, 2021, 36(4): 289-296.
- LIU Y N, LIU C, WANG Q, et al. Review of the selection and breeding process of Norwegian Atlantic salmon and its reference to Chinese aquatic breeding industry [J]. *Fishery Information & Strategy*, 2021, 36(4): 289-296.
- [37] 刘永新, 刘晔, 方辉, 等. 中国深蓝渔业发展现状与未来愿景[J]. *水产学报*, 2022, 46(4): 706-717.
- LIU Y X, LIU H, FANG H, et al. Developmental status and vision for the future of China's deep blue fishery [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(4): 706-717.
- [38] 刘晔, 徐琰斐, 缪苗. 基于SWOT模型的我国深远海养殖业发展[J]. *海洋开发与管理*, 2019, 36(4): 45-49.
- LIU H, XU Y F, MIAO M. The development of offshore aquaculture based on SWOT model [J]. *Ocean Development and Management*, 2019, 36(4): 45-49.
- [39] 雷霖霖. 中国海水鱼类养殖历史、现状和未来[M]//雷霖霖. 海水鱼类养殖理论与技术. 北京: 中国农业出版社, 2005: 3-14.
- LEI J L. History, present situation and future of marine fish culture in China [M]//LEI J L. *Theory and Technology of Marine Fish Culture*. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 3-14.
- [40] 周井娟. 中国海水鱼养殖业发展轨迹及技术变迁[J]. *农学学报*, 2020, 10(7): 88-96.
- ZHOU J J. Marine fish farming in China: development path and technological changes [J]. *Journal of Agriculture*, 2020, 10(7): 88-96.
- [41] 关长涛, 王琳, 徐永江. 我国海水鱼类养殖产业现状与未来绿色高质量发展思考(上)[J]. *科学养鱼*, 2020(7): 1-3.
- GUAN C T, WANG L, XU Y J. Present status of mariculture industry in China and thoughts for green and high-quality development in the future [J]. *Scientific Fish Farming*, 2020(7): 1-3.
- [42] 关长涛, 王琳, 徐永江. 我国海水鱼类养殖产业现状与未来绿色高质量发展思考(下)[J]. *科学养鱼*, 2020(8): 1-3.
- GUAN C T, WANG L, XU Y J. Present status of mariculture industry in China and thoughts for green and high-quality development in the future (Continued) [J]. *Scientific Fish Farming*, 2020(8): 1-3.
- [43] 李木子, 任同军, 曾雅. 日本水产种质资源管理制度对中国的启示研究[J]. *世界农业*, 2022(11): 37-46.
- LI M Z, REN T J, ZENG Y. A study on the inspiration of Japan's aquatic germplasm resource management system for China [J]. *World Agriculture*, 2022(11): 37-46.
- [44] BOCCANFUSO J J, ARISTIZABAL A E O, BERRUETA M. Improvement of natural spawning of black flounder, *Paralichthys orbignyanus* (Valenciennes, 1839) by photothermal and salinity conditioning in recirculating aquaculture system [J]. *Aquaculture*, 2019, 502: 134-141.
- [45] PEPE-VICTORIANO R, MIRANDA L, ORTEGA A, et al. First natural spawning of wild-caught premature south pacific bonito (*Sarda chiliensis chiliensis*, Cuvier 1832) conditioned in recirculating aquaculture system and a descriptive characterization of their eggs embryonic development [J]. *Aquaculture Reports*, 2021, 19: 100563.
- [46] 张宇雷, 张瑜霏, 单建军, 等. 鱼类工厂化循环水人工繁育设施装备应用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(19): 212-218.
- ZHANG Y L, ZHANG Y F, SHAN J J, et al. Review of progress on fish breeding and seed production using Recirculating Aquaculture System (RAS) [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(19): 212-218.
- [47] 胡红浪, 韩枫, 桂建芳. 中国水产种业技术创新现状与展望[J]. *水产学报*, 2023, 47(1): 1-10.
- HU H L, HAN F, GUI J F. Current situation and prospect of technological innovation in China's aquatic seed industry [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(1): 1-10.
- [48] 刘永新, 邵长伟, 侯吉伦, 等. 中国水产育种研究现状与发展建议[J]. *水产学报*, 2023, 47(1): 54-67.
- LIU Y X, SHAO C W, HOU J L, et al. Research status and development suggestion of China's aquaculture breeding [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(1): 54-67.
- [49] GENTRY R R, LESTER S E, KAPPEL C V, et al. Offshore aquaculture: spatial planning principles for sustainable development [J]. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(2): 733-743.
- [50] MORRO B, DAVIDSON K, ADAMS T P, et al. Offshore aquaculture of finfish: Big expectations at sea [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2022, 14(2): 791-815.
- [51] LESTER S E, GENTRY R R, KAPPEL C V, et al.

- Offshore aquaculture in the United States: untapped potential in need of smart policy [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(28): 7162-7165.
- [52] CHU Y I, WANG C M, PARK J C, et al. Review of cage and containment tank designs for offshore fish farming [J]. Aquaculture, 2020, 519: 734928.
- [53] WANG C M, CHU Y, BAUMEISTER J, et al. Offshore fish farming: challenges and developments in fish pen designs [M]//ISLAM N, BARTELL S M. Global Blue Economy. Boca Raton: CRC Press, 2022: 87-128.
- [54] LONG L N, LIU H, CUI M C, et al. Offshore aquaculture in China[J]. Reviews in Aquaculture, 2023: 1-17. <https://doi.org/10.1111/raq.12837>.
- [55] 曹晓慧, 刘晃. 养殖鱼类摄食行为的特征提取研究与应用进展[J]. 渔业现代化, 2021, 48(2): 1-8.
- CAO X H, LIU H. Advances in the study and application of feature extraction in feeding behavior of cultured fish [J]. Fishery Modernization, 2021, 48(2): 1-8.
- [56] 张佳林, 徐立鸿, 刘世晶. 基于水下机器视觉的大西洋鲑摄食行为分类[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 158-164.
- ZHANG J L, XU L H, LIU S J. Classification of Atlantic salmon feeding behavior based on underwater machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(13): 158-164.
- [57] 刘世晶, 李国栋, 涂雪滢, 等. 水产养殖生产信息化技术发展研究[J]. 渔业现代化, 2021, 48(3): 1-9.
- LIU S J, LI G D, TU X Y, et al. Research on the development of aquaculture production information technology[J]. Fishery Modernization, 2021, 48(3): 1-9.
- [58] 吴侃侃, 李青生, 黄海萍, 等. 我国深远海养殖现状及发展对策[J]. 海洋开发与管理, 2022, 39(10): 11-18.
- WU K K, LI Q S, HUANG H P, et al. Deep-sea aquaculture progress and development measures in China [J]. Ocean Development and Management, 2022, 39(10): 11-18.

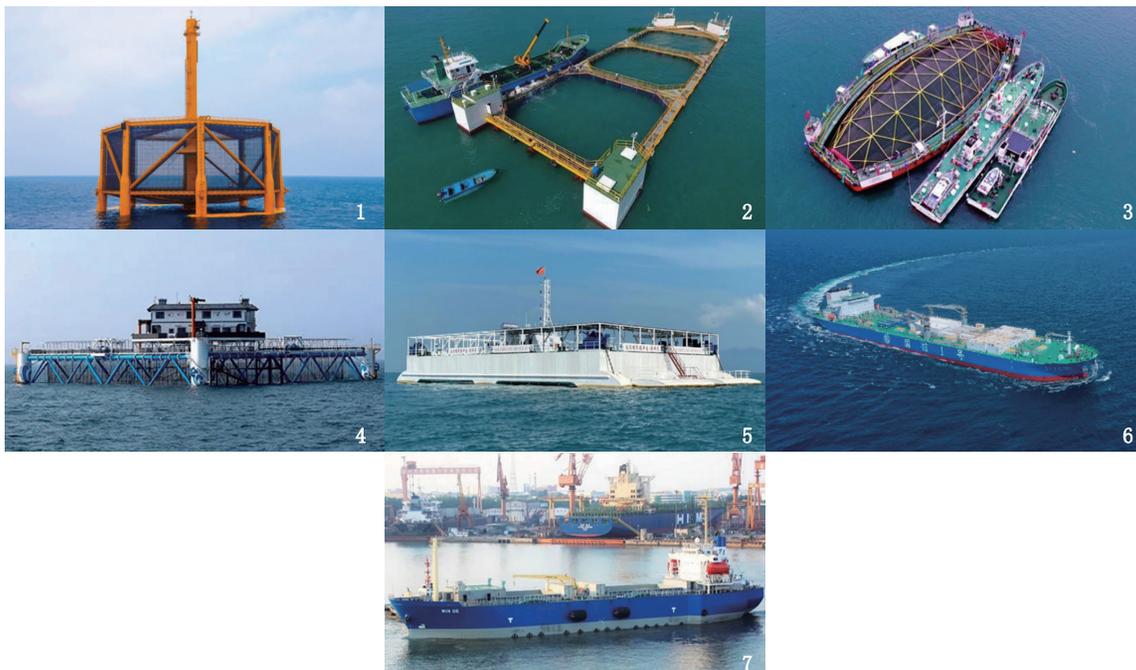
Advances and outlook of offshore aquaculture equipment technology

XU Hao, LIU Huang, HUANG Wenchao

(Key laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to accelerate the healthy and sustainable development of deep-sea aquaculture in China and promote the spatial expansion of mariculture and the transformation and upgrading of marine fishery industry, the article expounds the current status of deep-sea aquaculture facilities, and equipment as well as technology in China and lists the latest technical progress and typical facilities of the main types of deep-sea aquaculture including gravity cages, truss-type cages and aquaculture vessels etc. Then in response to the technical requirements for the construction of deep-sea aquaculture system, the article clarifies the progress and development trend of science and technology innovation at home and abroad in the areas of breed cultivation, fry production, aquaculture facilities, and production management equipment, etc. The article further dissects the main problems existing at present, such as lack of good breeds, insufficient integration of disciplines, technical immaturity of facilities and equipment, as well as lack of standardization in design and construction based on the analysis on how to realize the sustainable and healthy development of deep-sea aquaculture in China. Last but not least, the key technical breakthroughs in species, facilities and equipment, and industrial chain are proposed to achieve safety, quantity and quality breeding, as well as deeper and farther deep-sea aquaculture in China, with the aim to provide reference for accelerating the sustainable development of deep-sea aquaculture in China.

Key words: aquaculture; deep-sea aquaculture; varieties; aquaculture equipment; industrial chain



1. 深蓝1号; 2. 德海1号; 3. 振渔1号; 4. 长鲸1号; 5. 澎湖号; 6. 国信1号; 7. 民德轮。
 1. Shenlan 1; 2. Dehai 1; 3. Zhenyu 1; 4. Changjing 1; 5. Penghu; 6. Conson 1; 7. Minde.

图版 中国大型深远海养殖设施

Plate Large-scale offshore aquaculture facilities in China