

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.05.001

封闭式养殖工船研发历程回顾

刘晃^{1,3}, 徐皓^{1,3}, 庄志猛^{2,3}

(1 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092;

2 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071;

3 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 青岛 266237)

摘要:封闭式养殖工船是具有自主航行功能的海上封闭式养殖系统,也是一种综合的海上渔业生产平台,其生产功能以深远海封闭式“船载舱养”为主体,兼具水产品初加工与储运功能。文章回顾了大型封闭式养殖工船研发历经的孕育构想、积极探索和创新研发三个阶段,总结了研发过程中采取的以工业化理念构建现代水产养殖新模式、注重现代装备技术与水产养殖技术的深度融合、加强相关研究成果的专利战略布局等经验做法。中国大型封闭式养殖工船经历了30多年的探索研发,终于从梦想变成现实,其具有封闭式养殖,环境可控,是高质量绿色养殖方式;游弋式养殖,可充分利用自然条件,是高效的生产模式;大型化发展,发挥规模经济效益,构建综合生产平台等技术特点。未来,围绕养殖工船将形成渔业航母船队,搭建深远海养殖全流程、全周期、全链条的养殖体系,实现海水养殖走向深蓝。

关键词:海洋渔业;海水养殖;养殖工船;船载舱养;封闭式养殖

中图分类号:S953.4

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)05-0001-007

水产养殖为人们提供了品种丰富、质量优良的水产品,已经成为应对粮食安全及优质动物蛋白保障供给的重要发展方向。与牛、猪和禽类养殖相比,鱼类养殖具有更高的蛋白转化效率,其饲料转化率分别约为牛、猪和禽类的6倍、3倍和1.5倍^[1]。目前,中国海水养殖主要集中于沿岸近海,由于养殖密度过大、病害频发和环境恶化等问题,生存空间受到严重挤压,走向深远海,拓展新空间,发展绿色工业化养殖已经成为必然趋势^[2]。深远海有广阔空间和优质水源,发展潜力巨大,据估算中国在深远海适合鱼类养殖的面积有7万多km²,几乎未进行任何的开发利用。如果在这些海域开展鱼类养殖,年产量可达3900万t^[3]。深远海养殖已然成为当下发展热点,科技创新与产业化发展较为快速,以大型桁架类网箱、养殖工船等为代表的各种类型的大型养殖设施竞相投入产业化应用探索,深远海养殖设施的工业化水平得到显著提高,有望加快深远海养殖产业化发展^[4]。封闭式养殖工船是具有自主航

行功能的海上封闭式养殖系统(floating closed aquaculture systems, FCAS),也是一种综合的海上渔业生产平台,其生产功能以深远海封闭式“船载舱养”为主体,兼具水产品初加工与储运功能,既可以根据季节的变化,选择水温适宜的锚泊海域,也可主动躲避超强台风的正面袭击或赤潮等自然灾害,能有效解决长期困扰传统开放式网箱养殖“听天由命”的痛点,可以将海水养殖从近岸推向深远海。

养殖工船的构想和雏形大致可以追溯到20世纪70年代,中国水产科学研究院黄海水产研究所雷霖院士在构想“未来海洋牧场”建设蓝图中提出了海上养鱼工厂的初步设想和愿景^[5]。历经反复的探索研究,直到2022年5月20日全球首艘10万吨级智慧渔业大型封闭式养殖工船“国信1号”正式交付运营,一个标志性的阶段成果,让养殖工船从梦想变成现实,开启了海水养殖走向深蓝的产业化进程。封闭式养殖工船还可以与深远海养殖网箱、陆上工厂化养殖设施相结

收稿日期:2022-07-20

基金项目:工业和信息化部高技术船舶科研项目“可移动式养殖工船工程开发及关键系统研制”(工信部装函[2019]360号);中国水产科学研究院基本业务费(2021GH04);山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0301)

作者简介:刘晃(1973—),男,研究员,研究方向:水产养殖工程和渔业发展战略。E-mail:liuhuag@fmiri.ac.cn

合,形成效率最大化的陆海接力养殖方式;与捕捞渔船组成“渔业航母船队”,在远离大陆的远海、公海开展渔业综合生产,形成“养-捕-加”一体化、“海-岛-陆”相联动的新型渔业生产模式。围绕养殖工船形成的渔业航母船队,将搭建深远海养殖全流程、全周期、全链条的养殖体系,极大优化水产养殖生产结构和作业维度,提升中国深远海渔业资源利用能级,通过“以养为主”来建设真正的“深蓝粮仓”,实现向大海要优质蛋白,可为保障中国粮食安全和生态安全贡献力量。养殖船队还可驻守在边远海疆,极大提高区域存在感和态势感知能力,对于维护国家海洋战略利益和海洋安全具有深远意义。养殖工船也可以作为大国名片,走出国门践行海洋命运共同体的理念,以海洋联通世界,通过和平、发展、合作、共赢方式,扎扎实实推进海洋强国建设。

未来,封闭式养殖工船的发展前景广阔,本研究主要回顾了封闭式养殖工船的发展历程,归纳了其技术特点,并总结了研究进展的主要经验,旨在为封闭式养殖工船的健康可持续发展提供借鉴。

1 发展历程

1.1 孕育构想阶段

20 世纪 90 年代到 21 世纪前叶的近 20 年期间,世界水产养殖把发展的目光转到公海大洋,提出了一种全新的现代化养殖产业——海上工业化养鱼,并提出了基于船舶平台养殖的大型养殖工船的概念^[6]。欧美渔业发达国家先后提出了养殖工船设计方案,围绕工船结构、养殖系统、养殖方式等方面开展积极探索研究。如西班牙的 de Bartolomé 等^[7]提出了一种游弋式金枪鱼养殖工船(The Tuna Offshore Unit)的创意性设想,设计了一艘船长 189 m、宽 56 m、航速 8 kn 的半潜式养殖工船,养殖舱底可打开,以刚性网箱扩展养殖空间,养殖水体最大可达 195 000 m³,据称该工船可航行至地中海、几内亚湾、澳大利亚等海域的渔场接运活捕金枪鱼幼鱼,在 10 个月内将蓝鳍金枪鱼养成,最后到达日本海域出售。荷兰农村和农业系统创新网络(Innovatie Netwerk)发布了船载养殖可行性研究报告^[8],提出了 Innofisk 养殖工船的概念,围绕大西洋鲑孵化、繁育、养成与加工,开

展了船载养殖的经济可行性分析,结果表明开展船载幼鱼繁育是可行的,年产量要在 1 000 t 以上才具有经济可行性,适宜的养殖密度为 20 kg/m³左右。但是,由于欧美发达国家海洋捕捞资源较为丰富,缺乏大规模发展水产养殖的动力,这些研究大多仅停留在概念设计和可行性研究阶段。

中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所丁永良研究员长期跟踪海上工业化养鱼研发进程,并梳理总结提出了养殖工船的概念,并指出养殖工船需要构建全过程“完全养殖”,自成体系“独立生产”,要实现机械化、自动化、信息化,以及需要注重“结合旅游”“绿色食品”“全年生产”“后勤保障”等技术方向^[6],为中国封闭式养殖工船技术研发构建了基本的体系框架。

1.2 积极探索阶段

国际海事组织(IMO)于 2003 年通过了 MARPOL73/78 防污公约附则 I 修正案,为淘汰单壳油轮制定了时间表^[9]。因此,有大量的单壳油轮将被淘汰,在此背景之下,养殖工船再度进入业界视野。欧洲国家开展了养殖工船的可行性试验验证,土耳其 Denizsan 航运公司将一艘船长 153.33 m、宽 22.8 m、型深 12.5 m、载重吨 19 030 t 的散货船改造成养殖工船,设有 12 个养鱼舱和 5 台海水泵,配备了投饲、增氧、进排水管、照明等设备以及水温、pH、水位和流速等测试仪器,开展了虹鳟的养殖试验,初始平均体质量为 25±2.7 g,11 个月后代 3.7±0.4 kg,饲料系数、特定生长率和养殖密度分别为 1.1±0.1、1.51±0.3%/d 和 101±2.1 kg/m³^[10]。挪威 Mood Harvest 公司提出了 FMPH(Floating Marine Production & Harvest)海上浮式生产平台设计方案,将载重吨 150 000 t 的旧船改造后开展大西洋鲑循环水养殖,养殖密度可达 60 kg/m³,年生产量将达到 10 000~15 000 t^[11]。航运界传奇人物挪威的 John Fredriksen 在 2016 年希腊海事展上提出将致力于散货船改装成养殖工船的研发和推广思路^[12]。挪威 Marine Harvest 公司作为世界最大的大西洋鲑生产商,也有计划利用废旧的巴拿马型散装船改造后开展大西洋鲑养殖^[13]。

中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所于 2012 年立项开展利用油轮改建养殖工船的可行性研究,提出了 10 万吨级阿芙拉型油轮的养殖工

船改建方案,设计养殖水体 75 000 m³,可以形成年产 4 000 t 以上海水鱼的养殖能力,并创新研发了一种船载海洋养殖系统,可以选择在水温合适、水质优良的海域进行养殖,还可以应急躲避台风,降低养殖风险^[14]。依托上海市创新行动计划“大型海上渔业综合服务平台总体技术研究(2015—2017)”项目,开展了大型养殖工船系统功能与总体设计、安全保障和综合性能优化等关键技术研究,完成了国内首艘具备自航能力,集养殖、繁育、加工、物流补给等多功能于一体的 10 万吨级大型游弋式渔业综合生产平台的工程化总体技术方案^[15]。依托青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山创新计划课题,完成了 3 000 吨级科研示范养殖工船“鲁岚渔 61699”的研制改造,并开展了部分功能性试验验证^[16]。在这期间,围绕养殖工船总体研究和系统构建等方向进行了不断地探索和尝试,形成了具有自主知识产权的集养殖、繁育、加工、物流补给等多功能于一体的规模化养殖工船技术方案,还先后为企业完成了 10 万、20 万和 30 万吨级等系列旧船改造养殖工船的可行性研究^[17-18]。

1.3 创新研发阶段

近 10 年来,以挪威为代表的大西洋鲑网箱养殖生产国,深受海虱(Sea lice)病害的伤害和环境养殖容量的限制,走出近岸峡湾,走向深远海开放水域成为必然选择。在挪威政府 2015 年开始实施的创新许可证计划(Development Licenses)的刺激下,集养殖生产各环节为一体的大型深远海养殖平台成为研发热点^[19]。挪威 NSK 船舶设计公司 Nordlaks Oppdrett 养殖公司设计,中国烟台来福士公司建造了具有移动推进装置的“Havfarm 1”养殖工船,该工船长 385 m、宽 59 m、高 65 m,拥有 6 个养殖网箱,养殖水体达 400 000 m³,还配备了鱼苗输送、饲料投喂、水下增氧、死鱼回收、成鱼收获等养殖装备,将锚泊在离岸开放海域开展生产,可养殖 10 000 t 大西洋鲑^[20-21]。为更好地解决表层海水寄生虫病害、防止网衣损坏导致养殖物种逃逸等产业制约性问题,挪威 Eidsfjord Sjøfarm 公司研发的 Eidsfjord Giant 封闭式养殖工船于 2021 年获得了挪威政府颁发的创新许可证。该工船长 270 m、宽 41 m,具有 6 个密闭式养殖舱,养殖总水体 69 000 m³,采用水泵抽取下层海

水,并可以根据需要调整取水深度,由水泵抽取的海水经过滤器后注入养殖舱,能有效将海虱阻挡在外,计划将大西洋鲑养到 2~2.5 kg 后再转移至网箱养成,预期产能将达到 5 000 t 以上^[22]。

同一时期,中国也瞄准了深远海养殖产业发展态势,中国工程院先后启动实施了“中国水产养殖业可持续发展战略研究(2009—2013)”“水产养殖业‘十三五’规划战略研究(2014—2016)”“现代海水养殖新技术、新方式和新空间发展战略研究(2015—2016)”以及“水产健康养殖发展战略研究(2016—2017)”等多项重大、重点咨询研究课题^[23],围绕深远海养殖,提出了大型养殖工船发展策略^[24-25]。2014 年底原农业部在北京召开了深远海大型养殖平台构建研讨会,深入讨论了发展深远海养殖的重大意义、海上养殖功能区装备研发以及如何完善辅助功能设施建设等^[26]。青岛海洋科学与技术试点国家实验室启动了“深蓝渔业技术创新工程专项(2018—2021)”,开展了养殖工船自航及系泊工况下的耐波性能研究,构建了广义单点锚泊系统,建立平台单点锚泊安全评价方法^[27-28],分析了养殖工船动力系统的合理配置,结合养殖工船工况特点,获取动力系统最佳配置方案^[29-30]。研发了船载舱养结构、智能装备和养殖工船基本船型,提出了以黄条鲷、大菱鲆、大西洋鲑等为养殖对象的工船养殖模式,突破了养殖舱流场特性及液面制荡、旋流集污技术,提出“纵向隔板,横向隔舱”船载适渔性舱养结构,形成了一批以“船载舱养”技术为核心内容的自主知识产权^[31-32]。受青岛国信集团委托,中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所承担了 10 万吨级大型养殖工船“国信 1 号”的总体设计任务,同时开展了 5 000 吨级中试船“国信 101”的改装设计和大黄鱼船载舱养中试试验,通过两个生长期的养殖试验,实现了大黄鱼集约化船载舱养,养殖密度达到 20 kg/m³,养成存活率达到 95% 以上,生长性能明显优于传统网箱养殖^[33]。2022 年 5 月,全球首艘 10 万吨级大型养殖工船“国信 1 号”交付运营,标志着可以适应无限航区要求的海上工业化养殖的开端。该工船投资 4.5 亿元,总长 249.9 m、型宽 45 m、型深 21.5 m,载重量约 100 000 t,满载排水量约 130 000 t,海上自持力 90 d,定位在 12~200 海里专属经济

区之内、40 m 等深线之外。全船设置有 15 个养殖舱,养殖水体 80 000 m³,可以开展大黄鱼、石斑鱼、大西洋鲑、黄条鲷等名优鱼类养殖,设计产量 3 500 t 以上、养殖密度 20 kg/m³ 以上,并配有冰鲜鱼产品自动化加工生产线^[34-35]。

2 主要技术特点

2.1 封闭式养殖,环境可控,是高质量绿色养殖方式

封闭式养殖工船是以“船载舱养”为主体,通过抽取下层优质海水在隔离的鱼舱中进行集约化养殖,单舱水体数千至数万立方米,相当于在海上建立了一座超大型的工厂化养殖车间。海上封闭式养殖系统根据是否具有自主航行能力,分为定置式养殖平台、移动式船型平台和游弋式养殖工船等。封闭式养殖系统具有养殖环境可控、集约化程度高、能抵御敌害生物侵害和养殖排污物可收集等特点,是绿色高效的养殖方式。近些年来,挪威等国正在大力研发玻璃钢或钢材构筑的海上封闭式养殖系统,可以利用抽取下层海水来免受海虱病害的侵噬,正在成为大西洋鲑网箱养殖产业转型发展的新途径^[36]。从最新的研究与实践来看,其与开放式网箱养殖系统相比,取水口远离容易滋生病原体的表层海水,可以有效控制养殖病害发生。而且优质的水质和稳定的水温,可以提高了系统的集约化程度,养殖大西洋鲑的密度可以达到 75 kg/m³,是网箱养殖的 3.75 倍以上^[37]。大型化的养殖舱有利于构建适合于鱼类生长所需的水流环境,促进鱼类保持有氧运动,以获得良好的生长效果和肌肉品质。封闭式养殖系统还可以实现粪便、残饲等固形物的收集,养殖排放减少 60%~70% 以上。隔离性设施化养殖还可以更有效地防止养殖对象的逃逸,以保护水域生态安全,更有利于构建高质量的工业化生产系统^[38-41]。

2.2 游弋式养殖,可充分利用自然条件,是高效的生产模式

封闭式养殖工船是具有游弋功能,规模化的封闭式养殖及综合生产平台,除具有封闭式养殖系统的基本特点之外,还可以游弋在更开放的远海,利用不同海域季节性水文条件,构建全程适宜、水质优良的水温环境,可主动躲避台风侵袭,

达到高效安全生产的效果。中国沿海海域与挪威等国有很大差异,周年水温的温差较大,大陆架构造使 30 m 以深海域远离海岸,频繁的台风侵袭给海上生产带来巨大风险。中国网箱养殖方式一旦走出内湾水域,就必须面对“在哪养才安全?养什么鱼才合适?”的问题。养殖工船的自主航行能力,既能主动规避超强台风中心侵袭,又能确保人员、物质和养殖对象的安全,具备走向深水、远海的保障条件。例如:大黄鱼适宜生长的水温在 22~28℃,利用工船养殖大黄鱼,冬季可以在东海南部附近海域,到夏季逐步转往黄海海域,全周期保持优良水质和适宜水温条件,就如同在海上建造了一座利用自然条件的可移动养鱼工厂,可全年开展全天候工业化养殖,构建大黄鱼“南鱼北养”模式。通过“国信 101”中试试验船的生产试验证明,工船养殖方式不仅大大缩短了养殖周期,而且生产效率更高更有效^[33]。因此,采用同样方式,利用季节性不同水层的水温条件,工船可以针对性暖水性、温水性和冷水性鱼类,构建出不同的深远海高效养殖生产模式。

2.3 大型化发展,发挥规模经济效益,构建综合生产平台

封闭式养殖工船经济性在于规模化和工业化,只有大型化的工船平台,才能形成规模经济效益,只有标准化的生产方式及其陆海联动的生产体系,才能保证生产规模的实现。大型化不仅保障了养殖对象的安全与高效生产,还需具备管理人员生活和生产物资存放的功能,与开放式网箱养殖设施相比,装备系统更为复杂,生产运行需要更多的能源成本。通过“国信 1 号”养殖工船^[34]、荷兰 Innofisk 概念船^[8]以及张光发等^[42]基于技术经济论证模型的研究结果,证明了养殖规模对投资运行成本的分摊非常重要。国信 1 号大型养殖工船,载重量 100 000 t,养殖水体近 80 000 m³,养殖产能达到 3000~5 000 t/年^[34],等同于一个 5 000 亩(333.33 hm²) 以上的池塘养殖场的鱼产量,相当于 50 栋以上占地 2 000 m² 的工厂化循环水养殖车间,可以替代 3 000 个以上的近岸“鱼排”。封闭式养殖工船将引领海水养殖进入规模化、工业化、自动化、智能化的现代渔业阶段。基于大型养殖工船,还可以构建海上养殖产品即时加工、捕捞渔获物中继加工、生产物资补给配送等

生产功能,以及海洋环境、生物资源等科考功能,成为大型综合渔业生产母船平台,对于人类开发海洋水域资源,变蓝色海洋为蓝色粮仓,实现海洋渔业从“以捕为主”向“以养为主”的深蓝渔业转变。

3 主要经验

3.1 采用工业化理念构建现代水产养殖新模式

封闭式养殖工船模式是一项新兴产业,是一个全新的生产模式,是当前推进渔业转型升级,培育新经济增长点的创新之举。传统水产养殖方式普遍缺乏标准化生产、系统化管理、现代化装备、资本化金融等工业元素,生产方式依然是传统的、粗放的,生产操作、养殖管理还是依靠人力与经验,存在着品质安全、资源消耗与环境影响等问题而被社会所诟病,养殖产品也不能因品质优劣而形成价格上的差异。因此,封闭式养殖工船从可行性研究之初,就坚持工业化理念,加强工业化的养殖工艺、操作规范、品质管理等技术体系研究,大力提升海上养殖装备的机械化、信息化、智能化水平,同时强化海上信息物流通道、陆基加工储运基地等打通深远海养殖全产业链各个关键节点的布局,全面构建“养-捕-加”一体化、“海-岛-陆”相联动的现代水产养殖新模式,并通过示范带动和产业政策引导,从而形成海上工业化深远海养殖生产群。

3.2 注重现代装备技术与水产养殖技术的深度融合

深远海水域生产条件特殊,需要以规模化、工业化生产为前提,构建全面的生产体系。这就需要充分发挥科技创新的引领作用,围绕“在哪养?养什么?怎样养?怎么实现盈利?”等科技问题和产业需求,注重现代装备技术与水产养殖技术的深度融合,一方面是要选育针对不同海域特点、不同养殖环境、满足市场需求的适养品种,加强船载舱养条件下鱼类行为机理研究,通过对养殖小环境的精准调控,实现可持续福利养殖。另一方面是要突破工程装备与养殖工艺耦合度较低的问题,研发针对性强、适用性好的精准智能投喂、自动起捕作业、连续生态捕捞、船载加工等技术装备,大力提升养殖工船的机械化、信息化和智能化水平。构建工业化全产业链生产模式,实现从“试验”到“示范”。下一步需要加大技术攻关力

度,跨越性提升科技创新引领技术水平,技术保障产业可持续发展,解决好生产规模与成本效益问题,从而实现在深远海养殖领域领跑世界发展。

3.3 加强相关研究成果的专利战略布局

封闭式养殖工船的创制研发进程中,首创了“船载舱养”海上工业化养殖方式,突破了大型鱼舱水体交换与流场构建、船舶减振制荡技术与鱼舱结构、工业化养殖精准投喂与智能管控等关键技术,形成了多项自主知识产权。研发团队从立项之初就十分重视知识产权保护,进行了前期的专利战略布局。目前,围绕封闭式养殖工船及相关领域,在全球范围提交了72件专利申请,其中,在中国的专利申请量最多为69件,同时也在美国、挪威、澳大利亚等发达国家提交了专利申请。已经获得授权的专利43件,其中,发明专利21件,实用新型专利22件。正是在封闭式养殖工船的研发进程中,研究团队密切关注追踪相关领域的技术发展,注重掌握核心技术,努力提高自身专利质量,做好核心技术的专利布局规划和实施,从而实现在全球深远海养殖领域处于技术领跑的发展态势。

4 结论

封闭式养殖工船作为一个具有探索性的新兴产业,近些年来得到快速发展,在取得一定经验的同时,依然存在不少的问题与挑战。因此,下一步需要可根据资源节约、环境友好、质量安全等绿色发展要求,按照拓展深远海海域工业化养殖的战略布局,通过跨学科、跨专业协同创新与自主研发,围绕封闭式养殖工船船体平台、智能化设施装备、船载舱养关键技术和模式等,突破总体性、关键性技术瓶颈,研发智能化核心装备技术,促进封闭式养殖工船健康可持续发展,走出一条具有中国特色的深远海养殖发展之路。□

参考文献

- [1] FRY J P, MAILLOUX N A, LOVE D C, et al. Feed conversion efficiency in aquaculture: do we measure it correctly? [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(2): 024017.
- [2] 唐启升 主编. 环境友好型水产养殖发展战略: 新思路、新任务、新途径[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [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] 徐皓, 刘晃, 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.
- [5] 魏赞. 雷东与深远海养殖工船[J]. 船舶工程, 2021, 43(4): 6-7.
- [6] 丁永良. 海上工业化养鱼[J]. 现代渔业信息, 2006, 21(3): 4-6.
- [7] DE BARTOLOMÉ F, MÉNDEZ A. The tuna offshore unit: Concept and operation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(1): 20-27.
- [8] VAN LAERE V, VAN BATENBURG O, HUIZING H J. InnoFisk1: Feasibility study into a new concept for sustainable aquaculture on board of a ship, Report no. 05. 2. 086E[R]. Utrecht: Innovation Network Rural Areas and Agricultural Systems, 2005.
- [9] 彭晓峰, 洪辉. 国内航行单壳油轮淘汰政策分析[J]. 世界海运, 2010, 33(9): 70-73.
- [10] BILEN S, KIZAK V, BILEN A M. Floating Fish Farm Unit (3FU). Is it an Appropriate Method for Salmonid Production? [J]. Marine Science and Technology Bulletin, 2013, 2: 8-12.
- [11] Mood Harvest AS. FMPH-Floating Marine Production & Harvest [EB/OL]. (2022-6-13). <https://www.moodharvest.no>.
- [12] 徐晓丽, 郑一铭. 后疫情时代深远海渔业养殖装备发展动向[J]. 中国船检, 2021(3): 55-58.
- [13] 中国渔业装备与工程科技信息网. 挪威一养殖公司利用废弃散货船养殖鲑鱼[J]. 渔业现代化, 2016, 43(4): 26.
- [14] 徐皓, 陈军, 倪琦, 等. 一种船载海洋养殖系统: CN201210402362.4[P]. 2012-10-19.
- [15] 蔡计强, 张宇雷, 李建宇, 等. 10万吨级深远海养殖平台总体技术研究[J]. 船舶工程, 2017, 39(增刊1): 198-203.
- [16] 兰欣. 我国第一艘养殖工船“鲁岚渔 61699”启航[N]. 中国科学报, 2017-07-12(06).
- [17] 刘晃, 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.
- [18] 徐琰斐, 刘晃. 深蓝渔业发展策略研究[J]. 渔业现代化, 2019, 46(3): 1-6.
- [19] CHRISTIANSEN E A N. Diversity in narratives to green the Norwegian salmon farming industry[J]. Marine Policy, 2017, 75: 156-164.
- [20] 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.
- [21] 张宇雷, 倪琦, 刘晃, 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.
- [22] BERGE A. 270 meter long driverless salmon farm ship secures development permits [EB/OL]. (2021-10-21). <https://salmonbusiness.com/the-270-meter-long-eidsfjord-giant-secures-seven-development-permits/>.
- [23] 唐启升 主编. 水产养殖绿色发展咨询研究报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2017.
- [24] 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.
- [25] 徐皓. 水产养殖设施与深水养殖平台工程发展战略[J]. 中国工程科学, 2016, 18(3): 37-42.
- [26] 康丽琳. 我国首个深远海大型养殖平台启动构建[EB/OL]. (2014-11-24). http://www.gov.cn/xinwen/2014-11/24/content_2782858.htm.
- [27] 崔铭超, 金娇辉, 黄温赞. 养殖工船系统构建与总体技术探讨[J]. 渔业现代化, 2019, 46(2): 61-66.
- [28] 韩冰, 湛志新, 崔铭超, 等. 基于三维势流理论的深远海养殖工船耐波性能分析[J]. 渔业现代化, 2020, 47(6): 58-65.
- [29] 崔铭超, 张彬, 王靖. 10万吨级养殖工船快速性及动力系统配置分析[J]. 渔业现代化, 2020, 47(2): 68-74.
- [30] 黎建勋, 王靖. 某型深远海养殖工船动力系统方案设计[J]. 渔业现代化, 2020, 47(5): 74-81.
- [31] 渔业机械仪器研究所. “深蓝渔业”技术创新工程专项的四个项目顺利通过验收[EB/OL]. (2022-01-05). <https://www.cafs.ac.cn/info/1051/39960.htm>.
- [32] CUI M, LI Z, ZHANG C, et al. Statistical investigation into the flow field of closed aquaculture tanks aboard a platform under periodic oscillation[J]. Ocean Engineering, 2022, 248: 110677.
- [33] 渔业机械仪器研究所. “深远海工业化绿色养殖关键技术研发”的中试船养殖试验通过现场验收[EB/OL]. (2021-08-31). <https://www.fmri.ac.cn/info/1013/21254.htm>.
- [34] 渔业机械仪器研究所. 全球首艘十万吨级智慧渔业大型养殖工船交付运营[EB/OL]. (2022-5-20). <https://www.fmri.ac.cn/info/1013/22016.htm>.
- [35] 央视网. 全球首艘 10 万吨级智慧渔业大型养殖工船交付运营[EB/OL]. (2022-05-20). http://photo.cctv.com/2022/05/20/PHOAT5blfxK980WaqBw6oIu220520.shtml#D5HRm18MimG220520_1.
- [36] WANG C M, WIEGERINK J, LEOW B T. Opportunities for floating closed containment systems for fish farming[J]. Journal of Aquaculture & Marine Biology, 2020, 9(4): 123-127.
- [37] CALABRESE S. Environmental and biological requirements of post-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in closed-containment aquaculture systems[D]. Bergen: University of Bergen.
- [38] THORARENSEN H, FARRELL A P. The biological requirements for post-smolt Atlantic salmon in closed-containment systems. Aquaculture, 2011, 312: 1-14.
- [39] CALABRESE S, NILSEN T O, KOLAREVIC J, et al. Stocking density limits for post-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) emphasis on production performance and welfare. Aquaculture, 2017, 468: 363-370.
- [40] NILSEN A, NIELSEN K V, BERGHEIM A. A closer look at closed cages: Growth and mortality rates during production of post-smolt Atlantic salmon in marine closed confinement systems[J]. Aquacultural Engineering, 2020, 91: 102124.
- [41] BALSEIRO P, MOE Ø, GAMLEM I, et al. Comparison between Atlantic salmon *Salmo salar* post-smolts reared in open sea cages and in the Preline raceway semi-closed containment aquaculture system[J]. Journal of Fish Biology, 2018, 93(3): 567-579.
- [42] 张光发, 安海听, 刘鹰, 等. 散货船改装养殖工船的经济论证模型及系统设计[J]. 渔业现代化, 2018, 45(2): 1-5.

Review of floating closed aquaculture vessel development

LIU Huang^{1,3}, XU Hao^{1,3}, ZHUANG Zhimeng^{2,3}

(1 *Fishery Machinery and Instrument Research Institute,*

Chinese Academy of Fishery Science, Shanghai 200092, China;

2 Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

3 Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: The closed aquaculture vessel is a floating closed aquaculture system at sea with an autonomous navigation function, and also a comprehensive marine fishery production platform. Its production function is mainly based on the closed "aquaculture on board" in the deep sea, and it has both primary processing and storage and transportation functions of aquatic products. The article reviewed the three stages of conceptualisation, the large closed aquaculture vessel the breeding idea of research and development experience, actively explore, and the development of innovation summarizes the research and development taken by industrialization idea in the process of constructing modern aquaculture new mode, pay attention to the depth of the modern equipment technology and aquaculture technology integration, strengthening the practice experience in related research achievements of patent strategy layout. After more than 30 years of exploration and development, China's large closed aquaculture vessel has finally become a reality from a dream. It has closed breeding, a controllable environment, and a high-quality green breeding method. Cruise farming, which can make full use of natural conditions, is an efficient production mode; Large-scale development, give full play to economies of scale, the construction of a comprehensive production platform, and other technical characteristics. In the future, a fishery aircraft carrier fleet will be formed around the closed aquaculture vessel, and a full-process, full-cycle, and full-chain aquaculture system will be built to realize the deep blue trend of mariculture.

Key words: marine fisheries; mariculture; aquaculture vessel; aquaculture on board; floating closed aquaculture systems