

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20210816003

http://www.yykxjz.cn/

黄小华, 庞国良, 袁太平, 胡昱, 王绍敏, 郭根喜, 陶启友. 我国深远海网箱养殖工程与装备技术研究综述. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 121-131

HUANG X H, PANG G L, YUAN T P, HU Y, WANG S M, GUO G X, TAO Q Y. Review of engineering and equipment technologies for deep-sea cage aquaculture in China. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(6): 121-131

# 我国深远海网箱养殖工程与装备技术研究综述\*

黄小华<sup>①</sup> 庞国良 袁太平 胡昱 王绍敏 郭根喜 陶启友

(中国水产科学研究院南海水产研究所 广东省网箱工程技术研究中心  
农业农村部外海渔业开发重点实验室 广东 广州 510300)

**摘要** 在远离大陆的深远海水域发展大型网箱养殖,已成为缓解近海养殖环境压力、突破资源受限和空间制约问题的重要举措。深远海网箱养殖产业的蓬勃发展,加速促进了养殖方式转型升级和海洋养殖空间大幅拓展,形成了海洋设施养殖新发展格局。本文立足我国网箱养殖产业发展现状,分析深远海网箱养殖产业发展需求、发展前景以及设施装备科技需求,详细介绍国内外深远海网箱养殖工程与有关装备技术的研究应用情况,分析我国深远海网箱养殖工程与装备发展面临的主要问题,并从科学规划、科技引领、规范建设和创新模式等方面,对深远海网箱养殖产业发展提出相关建议。

**关键词** 深远海网箱; 养殖工程; 装备技术; 研究综述

**中图分类号** S953 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)06-0121-11

为拓展海洋养殖空间、利用外海优质水质条件发展现代水产养殖,近几年我国大力支持大型深远海网箱建设并取得显著成效。尽管我国大型深远海网箱工程技术研究相比挪威起步较晚(Li *et al.*, 2018),但深远海网箱养殖涉及的系统安全技术、智能管理技术和养殖模式构建等方面均已取得重要进展(徐琰斐等, 2021),国内已投入养殖运营的大型深远海网箱数量约有20个,典型网箱型式有半潜式“德海1号”、全潜式“深蓝1号”、坐底式“长鲸1号”等(Huang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2019; 纪毓昭等, 2020),单个网箱

养殖水体最大达7万m<sup>3</sup>,作业水深拓展至60m,有效促进了我国深远海养殖产业的高质量发展。本文立足我国网箱养殖产业发展现状,分析深远海网箱养殖发展需求和产业发展前景,介绍国内外深远海网箱养殖工程与有关装备技术的研究应用情况,分析我国深远海网箱养殖工程与装备发展存在的主要问题,并对深远海网箱养殖产业发展提出相关建议。

## 1 我国网箱养殖产业发展现状

中国是世界上最早使用网箱养殖的国家,800多

\* 国家重点研发计划(2019YFD0900903)、国家自然科学基金(32173024)、中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2020TD77)、中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2021SD10; 2021TS04)和农业农村部外海渔业开发重点实验室开放基金(LOF2021-04)共同资助 [This work was supported by National Key Research and Development Program of China (2019YFD0900903), National Natural Science Foundation of China (32173024), Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2020TD77), Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, South China Sea Fisheries Research Institute, CAFS (2021SD10; 2021TS04), and Fund of Key Laboratory of Open-Sea Fishery Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (LOF2021-04)].

<sup>①</sup> 通信作者: 黄小华, 研究员, E-mail: huangx-hua@163.com

收稿日期: 2021-08-16, 收修改稿日期: 2021-09-26

年前,就有古人以竹和布构成网箱进行养殖(郭根喜等, 2013)。我国海水网箱养殖始于 20 世纪 80 年代,广东、福建两省使用普通的小型网箱进行的石斑鱼(*Epinephelus* spp.)养殖试验取得成功,当时网箱结构形式多为方形,将多个网箱通过绳索连接在一起构成一组,俗称“鱼排”,由于结构简单、投资少、管理方便,在全国沿海得到迅速推广。自 2003 年开始,海水网箱养殖数据纳入中国渔业统计年鉴(原农业部渔业局, 2003),养殖产量呈逐年递增态势,其中,网箱养殖成为海水鱼养殖主要方式,长期以来其养殖产量占据海水鱼养殖总产量约 1/2 (图 1),但由于该类网箱自身的局限性,如结构简陋、养殖容量小、抗风浪能力差,普通网箱养殖基本分布在具有天然屏障的港湾内或近岸水域,设置水深通常小于 10 m。

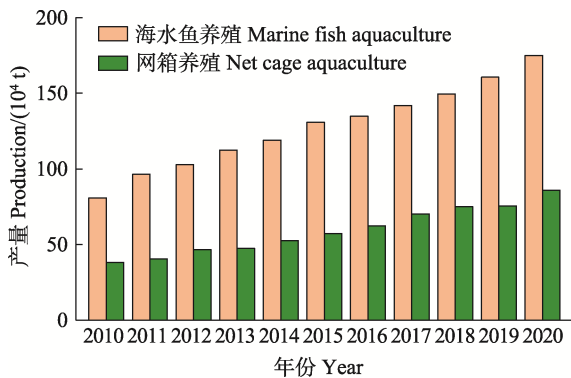


图 1 网箱养殖产量与海水鱼养殖产量对比  
Fig.1 Comparison between net cage aquaculture production and marine fish aquaculture production

深水网箱具有养殖容量大、抗风浪能力强、养殖效益好的显著优势,已成为突破近海养殖空间受限、推动网箱养殖方式转变、获取安全优质水产品的重要设施装备(Huang *et al*, 2016)。我国深水网箱养殖始于 1998 年(郭根喜, 2006),经过 20 多年网箱养殖工程技术和产业规模化发展,我国深水网箱设施及养殖技术已形成一定的产业基础,养殖产量也从 2003 年的 1.3 万 t 发展到 2020 年的 29.31 万 t(图 2),现有网箱设施保有量约为 1.5 万箱(农业农村部渔业渔政管理局, 2021)。目前,我国深水网箱主要为高密度聚乙烯重力式深水网箱,占比达我国深水网箱总量的 95% 以上,从网箱周长 40 m 发展到最大周长 130 m,单箱养殖产量超 30 t,深水网箱工程理论研究逐步深入和完善(Zhao *et al*, 2013; Huang *et al*, 2018; Chen *et al*, 2019),有效提升了外海深水网箱抵御自然风险的能力。自动投饵系统、远程监控、高效起捕等关键配套装备和技术得到一定程度的应用(胡昱等, 2017、

2019),深水网箱规模化健康养殖模式趋向成熟并开始向工业化模式迈进,网箱养殖海域逐步向外海拓展至水深 20~30 m。当前,我国深水网箱养殖鱼类品种丰富,涉及卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)、大黄鱼(*Larimichthys crocea*)、军曹鱼(*Rachycentron canadum*)、高体鲷(*Seriola dumerili*)、石斑鱼、河鲀(*Tetraodontidae*)、许氏平鲷(*Sebastes schlegelii*)等约 20 种,其中,卵形鲳鲹已发展成为深水网箱养殖主导鱼类品种,树立了全国知名品牌(中国渔业协会金鲳鱼分会, 2020)。作为承上启下的产业链关键环节,深水网箱养殖协同带动了苗种培育、装备制造、饲料生产、成鱼加工、产品销售等行业的发展,经济社会效益显著。

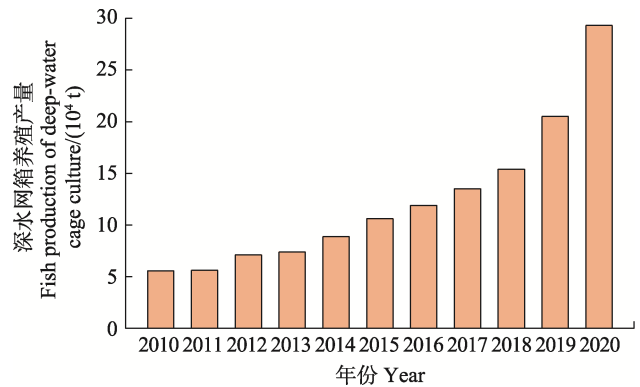


图 2 深水网箱养殖产量变化(2010—2020)  
Fig.2 Fish production of deep-water cage culture from 2010 to 2020

## 2 我国深远海网箱养殖发展需求

### 2.1 深远海养殖产业需求

联合国粮食及农业组织 FAO(2020)预测全球水产品总量有望从 2018 年的 1.79 亿 t 增至 2030 年的 2.04 亿 t。由于近 20 年全球捕捞产量变化很小,为满足优质水产动物蛋白需求,水产养殖将是水产品总量增长的唯一途径。陆基和近海水产养殖面临空间、资源和环境约束等问题,而深远海水域辽阔、水质优良、水体交换速度快,是发展现代水产养殖业和海洋渔业经济的新空间,因此,开展深远海规模化设施养殖将是今后我国水产养殖产量提升的主要来源。我国深远海养殖一般是指在离大陆岸线 10 km 以外、水深不小于 20 m、具有大洋性浪流特征的开放海域,采用规模化的养殖设施和机械化、自动化、智能化养殖管控装备,开展鱼类高效养殖生产,养殖配置符合生态环境相关要求。为加快构建水产养殖业绿色发展的空间格局和生产方式,我国出台一系列积极政策大力支持发展深远

海养殖,如:2019年1月,农业农村部等十部委发布了《关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见》(农渔发[2019]1号),明确提出“支持发展深远海绿色养殖,鼓励深远海大型智能化养殖渔场建设,提高养殖设施和装备水平”。同年10月,农业农村部办公厅颁发了《关于修订深水抗风浪网箱补贴标准有关内容的通知》(农办渔[2019]31号),明确了发展深水网箱、深远海养殖装备的补贴范围和标准,鼓励产学研发展深远海养殖产业。深远海养殖将在建设蓝色粮仓、拓展海洋养殖空间、加快形成海洋设施养殖新生产格局等方面发挥重要作用,发展前景广阔。

## 2.2 深远海网箱养殖设施与装备科技需求

由于深远海海域远离岸线、浪大流急、台风频发,对深远海网箱规模化养殖安全性和可控性提出了更高要求和挑战,在网箱设施与装备方面的科技需求主要来源于三方面:(1)网箱安全保障技术。我国海域海况复杂,临近的西北太平洋(含南海)年均有20多个不同等级台风,对我国沿海地区有直接影响(康斌,2016),深远海网箱必须具备足够的安全可靠性才能抵御大风浪和强流的冲击,具体的安全保障技术涉及水动力分析、主体结构安全评估方法、锚泊敷设以及网具装配工艺等,应重点解决大型柔性网衣如何与钢制桁架结构安全协同运行以避免长周期养殖过程中网衣发生破损的问题。(2)装备精准控制技术。配套装备技术水平的提升能够加快推进水产养殖业绿色发展,使养殖产量大幅提高及生产可控成为可能。养殖装备向精准控制方向发展是必然趋势,如投饵的精准决策、环境的精准监测、鱼群的精准评估、死鱼的精准判别、作业流程的精准规划等关键技术是实现深远海养殖智能化管理必须解决的技术难题。(3)智能养殖信息技术。随着大数据、云计算、物联网、人工智能等现代信息技术的飞速发展,各个领域的信息化越来越

越受到重视,发展深远海网箱智慧养殖是必行之路。智能化养殖需要对养殖过程所有生产要素包括养殖生物、养殖环境、养殖设施和配套装备进行科学管控,利用智能感知技术获取信息,5G通信技术传递信息,大数据分析技术挖掘信息,人工智能技术决策信息,并程序化指导深远海网箱养殖生产全过程,以实现深远海无人驻守养殖。

## 3 国内外深远海网箱养殖工程与装备技术研究应用情况

### 3.1 国外研究应用情况

**3.1.1 深远海网箱养殖设施** 20世纪90年代,世界渔业发达国家(挪威、日本等)在深远海养殖设施研发应用方面进行探索,依靠丰富的研究积淀及成熟的产业推动,其深远海养殖设施研究应用相当成熟。挪威作为世界上海洋产业最完备的国家之一,其深远海养殖产业一直走在全球前列,对各地区开展深远海养殖具有强大的引领作用,其中代表性的深远海养殖设施是半潜式大型网箱“Ocean Farm 1”(图3)与大型养殖工船“Jostein Albert”(图4),其中,养殖工船“Jostein Albert”包括6座大型深水网箱,故也称为船型桁架结构大型深远海网箱。Ocean Farm 1是世界首座超大型漂浮式深海钢结构网箱,网箱主体为圆形,直径和高度分别为110 m和69 m,容量达到25万 $m^3$ ,可年产大西洋鲑(*Salmo salar*)6000 t,系泊系统方面由8根缆索锚泊固定,可抗12级台风,其设计、建造并成功投入生产运营被誉为深远海网箱养殖模式的重要典范。Jostein Albert 船型网箱总长430 m、宽59 m、高65 m,养殖水体高达40万 $m^3$ ,系泊系统采用外转塔单点系泊的方式,其交付后被布设于挪威哈德瑟尔区域进行深远海大西洋鲑养殖作业,



图3 “Ocean Farm 1”网箱  
Fig.3 “Ocean Farm 1” sea cage



图4 “Jostein Albert”网箱  
Fig.4 “Jostein Albert” sea cage

可养殖规模达 10 000 t。需要强调的是,无论是“Ocean Farm 1”或“Jostein Albert”,都装备先进的自动化智能化养殖辅助系统,实现了鱼苗投送、自动投饵、鱼情监测、死鱼回收等功能。总体而言,国外大型深远海网箱养殖涉及的配套装备、技术、管控与养殖主体设施匹配程度高,通过大量先进科技手段实现了养殖过程机械化和信息化覆盖,较好实现了养殖集约化和智能化。

根据网箱组成划分,深远海网箱研究主要针对网箱主体结构、网衣以及系泊系统 3 个部分。作为海洋工程装备在渔业养殖领域的典型应用,通过借鉴典型海工装备(油气平台、浮式风电基础等)成熟的研究方法及技术手段,可以较好开展网箱主体平台及系泊系统的相关研究。基于商业软件对深远海网箱开展研究是主要手段之一,比如利用 SIMA 对网箱动态响应进行时域计算(Høiland, 2017; Dou, 2018)。网衣作为网箱系统的重要组成部分,对其水动力响应相关研究的时间较长,研究手段成熟,主要方法有网衣模型试验和数值仿真(Lader *et al.*, 2007; Kristiansen *et al.*, 2012; Klebert *et al.*, 2015)。上述论文主要研究深远海网箱系统的水动力特性,网箱在深远海应用中的结构安全问题也不容忽视。Yu 等(2019)采用数值仿真方法对养殖功能船与深远海网箱“Ocean Farm 1”进行碰撞分析,计算结果表明,提出的耦合计算方法可以很好地模拟网箱与船体的冲击效应。另外,部分学者针对深远海网箱系泊系统优化及其疲劳特性也开展了有意义的研究工作(Li *et al.*, 2019a、b; Hou *et al.*, 2020a、b)。通过梳理相关文献可以看出,关于深远海网箱的研究大多集中在网箱平台主体及网衣水动力响应领域,而对网箱各部分结构安全关注还不够,相关研究积累不足。网箱设施的深远海应用面临的海况更加恶劣且复杂,其各组成部分的结构安全问题在今后研究中应予以更多关注。

**3.1.2 大型网箱养殖关键配套装备** 国外网衣清洗技术长期处于垄断地位,产品化清洗装备已在产业应用多年。挪威最新一代网衣清洗机器人(图 5),配置 4 个不同角度布置的推进器、摄像头及水下姿态控制系统,可实现网衣内外任意角度的网衣清洗和网衣监测巡航(Multi Pump Innovation, 2021);日本带缆潜水网衣清洗机器人(图 6),执行机构采用歧管式转盘,利用倾斜安装的喷嘴射流反冲力带动转盘旋转,形成环形清洗面,可实现清洗机器人沿养殖网面的自主行走(Equipment Power, 2021);澳大利亚研制的网衣清洗机器人,清洗系统集成于功能船上,采用履带式

结构与水流双重驱动,能较好将清洗装置与网面贴合并实现自动化的网衣清洁(Ocean Farm, 2020);挪威 AKVA FNC 洗网机器人通过安装在机体上的旋转圆盘排出高压水冲洗网衣污渍生物,配置定位装置可使操作人员在显示屏上实时观察机器人位置(AKVA Group, 2019)。在清洗部件高压喷嘴空化效率方面,分析射流压力、喷嘴结构参数、喷嘴形式、空化云生长周期对空化云动力学行为的影响,结果表明,云层几何特征(厚度、长度、面积等)经过汇聚、生长、收缩等过程呈现振荡模式发展(Hutli *et al.*, 2019)。通过测量空蚀样靶的质量损失和对样靶的显微图像研究,获取了在高压环境下自激空化射流的空化强度和侵蚀规律,研究了最佳射流距离(Pan *et al.*, 2020)。



图 5 挪威网衣清洗机器人  
Fig.5 Aquaculture net cleaning robot in Norway



图 6 日本洋马网衣清洗机器人  
Fig.6 Aquaculture net cleaning robot in Japan

国外投饵系统的研究相对国内较早,技术相对较为成熟,自动化投饵系统已得到较为广泛的应用(Pascal, 2002; Oehme *et al.*, 2012)。挪威研制的投饵系统采用计算机智能控制,投饵决策由温度、溶氧、饲料传感器、鱼类行为等信息反馈,养殖管理软件综合分析决定并发出各项指令,数据传输到投饵控制系统,由投饵系统进行投喂决策。投饵系统可以同时实现对 40 个网箱远程投饵。加拿大为各种不同的养殖对象分别开发了

不同的投饵控制软件,软件以养殖对象的生活、摄食习性为依据,使用该自动投饵系统和专用软件能很好地提高饵料的利用率(Aas, 2011)。美国研发的投饵系统投饵精度和可靠性高,采用可编程控制器技术开发,最大投饵能力达 250 kg/min,最多可为 60 个网箱同时输送饲料(纠手才等, 2018; 纠手才, 2018)。

渔获起捕是大型网箱养殖生产的关键环节之一,依据不同基本原理分为射流式吸鱼泵、离心式吸鱼泵与真空式吸鱼泵。射流式吸鱼泵运用高速流通过喉管结构时在吸鱼管内部形成负压,大气压力作用下鱼水混合物被输送到喉管及扩散管。离心式吸鱼泵原理与普通离心泵相同,主要区别在于为保证活鱼输送,叶轮较宽。真空式吸鱼泵利用抽排吸鱼筒空气使其达到一定真空度,将鱼水混合物输送至吸鱼筒。渔业发达国家通过配置功能船搭载自动渔获装备,使收鱼效率大幅提升。在活鱼经过泵站叶轮后损伤方面,研究表明,流场压力波动和剪切力不会导致鱼体死亡率大幅增加,叶轮与鱼类的冲击作用是造成鱼类损伤的主要原因(Bierschenk *et al*, 2019)。研究表明,鲑鱼通过高螺距离心泵后的瞬时死亡率为 0~4%,低螺距离心泵瞬时死亡率为 3%~10%,低螺距的离心泵叶轮对鲑鱼的伤害明显大于高螺距叶轮,同时,鱼体的损伤程度随鱼体尺寸和叶轮转速增大而增大,总体来说,从安全过鱼和排水效率考虑,鱼体死亡率低、流量较大的高螺距离心泵效果较好(Thompson *et al*, 2011)。

总体而言,国外网箱养殖配套装备经长期发展已具有相当完备且系统的产品可用于养殖生产,深远海网箱养殖配套装备智能化程度高,推动了深远海网箱产业高效养殖发展进程。但针对国内深远海网箱养殖高海况环境(风浪大、台风频发)、海域特性(如网衣附着生物种类)、市场规模等因素,动辄价格上百万的养殖配套装备尚不能完全适用于国内产业发展需求。

### 3.2 国内研究应用情况

**3.2.1 深远海网箱养殖设施** 我国深远海网箱养殖设施根据作业状态主要分为坐底式、漂浮式和全潜式三类,其中,坐底式网箱是借鉴坐底式钻井平台技术特点形成的坐底式网箱设施,主要应用在我国黄渤海等海床坡度较小的区域。其中,代表性的网箱有“长鲸 1 号”(图 7)、“耕海 1 号”和“经海 1 号”等,其发展对促进我国深远海网箱养殖发展发挥了重要作用。国内漂浮式网箱中的典型代表有“振渔 1 号”、“澎湖号”及“德海 1 号”(图 8),主要分布于我国东海和南海。全潜式网箱典型代表有“深蓝 1 号”(图 9),是国内第一座全潜式深海渔业养殖装备,主要在黄海

冷水团进行三文鱼养殖生产(董双林, 2019);“德海 1 号”是我国第一座船型半潜桁架结构网箱,其成功抵御了 2018 年第 22 号超强台风“山竹”的侵袭,结构安全得到检验。



图 7 “长鲸 1 号”网箱  
Fig.7 The “Changjing No.1” sea cage



图 8 “德海 1 号”网箱  
Fig.8 The “Dehai No.1” sea cage

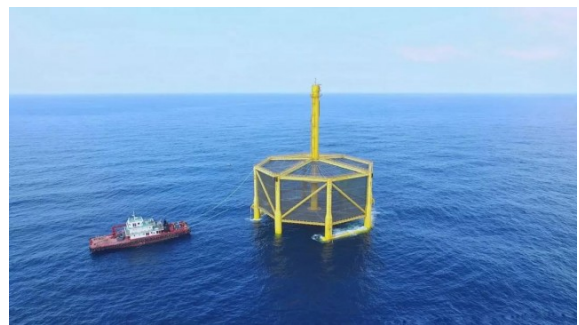


图 9 “深蓝 1 号”网箱  
Fig.9 The Shenlan No.1 sea cage

国内对深远海网箱也开展了丰富的研究工作,Zhao 等(2019)针对某“Ocean Farm”型深海网箱,通过开展物理模型试验研究了不同波浪要素、网衣存在与否及不同吃水深度对网箱系泊力和运动特性的影响。Huang 等(2019、2020)针对“德海 1 号”船型半潜桁架式网箱,比较分析了 3 种不同的单点系泊方式的系泊受力,并基于其中安全稳定性能最优的系泊方

式研究网箱在波浪流作用下的运动响应。网衣水动力研究方面, Yao 等(2016)基于一种新的混合体积法建立流场与网间的耦合关系,采用牛顿第三定律直接计算网衣阻力,用稀疏网格计算流场,结果显示,计算效率得到显著提高。Tang 等(2018)提出了用于计算网衣水动力载荷的十字形单元概念,讨论了密实度、材料、雷诺数等对网衣水动力的影响,在理论和试验分析基础上,提出了适用于高密实度网衣的计算公式。网箱运营作业过程中,网箱网衣会产生大量的生物附着等污损现象, Bi 等(2018、2020)针对此条件下网衣水动力特性进行系统探索。崔勇等(2015)基于 PIV 技术研究了方形网箱流场分布;针对双层网底网箱,还对其水动力特性开展了相关研究工作(崔勇等, 2019)。网箱结构安全方面, Hou 等(2020)利用虚拟随机过程中的广义概率密度演化方法研究了网箱系泊系统疲劳损伤分布,结果表明,系泊缆和整个系泊系统的疲劳损伤分布非常不对称,且有多峰,这与广泛使用的分析分布有很大不同。针对铜合金网衣疲劳问题, Wang 等(2020a、b)采用疲劳试验结合数值仿真方法对其疲劳特性进行研究,结果表明,铜合金材料的疲劳试验结果不能简单应用于网衣实际结构的疲劳寿命评估预测,且相较于传统的聚合物网衣,铜合金网衣不需考虑抗老化问题。此外,国内多位学者也从不同角度对深远海养殖历史沿革、发展现状、未来展望等方面开展相关研究(宋瑞银等, 2015; 徐皓等, 2016; 董双林, 2019; 徐琰斐等, 2019、2021; 徐晓丽等, 2021), 这些研究工作对于发展深远海网箱养殖也具有很好的参考价值。

经上述分析可以看出,我国在深远海网箱部分研究领域已取得较好的成果,可以说与国外发展并无明显不足,但在深远海网箱的工程化应用领域,尤其是网箱系统智能化、信息化方面,与网箱养殖发达国家相比还存在一定差距。

**3.2.2 大型网箱养殖关键配套装备** 国内网衣清洗技术与装备尚处于单项产品原型的研制阶段,相关理论有待进一步探索与完善。庄集超等(2018)研制的浮筒式新型深海网箱网衣清洗机器人,配以高压旋转水射流清转盘,能实现网衣清洗机器人的直行、转弯等运动;张小明等(2018、2011、2010)提出了一种水射流式水下洗网机。在喷嘴的空化效率方面,刘海霞等(2016)对淹没环境下水射流的冲击和空蚀效果开展了研究,结果表明,材料表面的破坏更多取决于空化效率而非连续的高速射流。在网衣清洗装备清洗试验方面,宋协法等(2006、2004)对涡旋式网箱清洗设备

使用效率进行研究,确定最佳毛刷长度为 15~20 mm,设备清洗效率达 30%以上;袁太平等(2021a、b)针对网衣清洗装备喷嘴及网衣清洗效果的研究表明,喷嘴结构参数对水下空蚀作用强度的影响程度大小顺序为出口扩角  $\alpha >$  喷嘴直径  $d >$  长径比  $n$ ,清洗装备最大养殖网衣清洁率达到 79.76%。其他少有关于空化射流式网衣清洗装备渔网清洗效率方面的试验研究。

我国针对自动投饵技术装备的研究比较全面。中国水产科学研究院南海水产研究所(胡昱等, 2008、2010、2011)研制出国内第一套深水网箱养殖远程自动投饵系统(图 10),可在手动、自动、远程投饵 3 种模式下对深水网箱自动投喂饲料。刘志强(2016)开发出基于气力输送的自动投饵设备,可以选择性地投放不同尺寸颗粒饵料及鲜杂鱼饵料。王俊会(2019)研制出一种适用于大规模网箱养殖的船载式投饵系统,通过触摸屏界面实现设备的启停、投料速度调控、运行状态监控及网箱饵料投喂数据的记录。目前,国内深远海养殖推广较好的投喂装备为船载移动式自动投饵系统装备,该装备一般采用气力输送饵料,作业方式灵活,投喂效率高,装备后期维护成本低,性价比较高,深远海养殖投喂推广效果较好(汪昌固, 2014; 左渠等, 2020)。



图 10 远程自动投饵系统

Fig.10 Long-distance automatic feeding system

目前,深远海网箱渔获起捕方式多样,包括人工抄网、吊机起捕或卷扬机辅助起捕等,国内对渔获起捕装备研究主要集中在吸鱼泵内部流动对鱼类影响及结构优化方面。鱼群被吸入输送泵前,鱼群的游动方向与主流方向相反,鱼群进入泵扩散段结构时,在管道周向和轴向涡流力作用下,鱼体发生旋转和翻转,发生在鱼体表面的瞬态空化云及泵扩宽段结构的稳态空化云对鱼体造成较大损伤(Xiao *et al*, 2015)。Long 等(2016)对射流式吸鱼泵的研究表明,鱼体经吸鱼泵后未发生鱼体死亡、器官损伤及游泳问题,鱼体表面损伤及鳃盖损伤主要由于循环流动、剪切流和压力梯度引起。研究还表明,射流式吸鱼泵径向位置是决定压力梯度和鱼鳞受力的重要因素,压力梯度产生的力

随径向距离和流量比的增大而增大,径向位置是决定喷射鱼泵中压力梯度和鱼鳞受力的重要因素(许攸等,2020)。真空式吸鱼泵结构简单且无鱼体损伤,特别对大规格渔获有独特优势,研究表明,同一个真空吸鱼筒吸排周期内,吸鱼筒内部温度降低2~4℃,真空吸鱼泵输送的草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)和鲫鱼(*Carassius auratus*)出现少量鳞片脱落,主要原因是同一管道截面多条鱼体同时通过,鱼体与管壁摩擦及与鱼体间相互摩擦造成擦伤(楚树坡等,2020)。

我国在大型网箱养殖饵料投喂、网衣清洗、渔获起捕等养殖环节开发出了一批机械化自动化配套装备,尤其是自动投饵机装备在深远海网箱养殖生产中得到迅速推广应用,加速促进了深海网箱工业化养殖进程,但部分配套装备的实用性和耐用性有待于提升,装备体积大、耗能大、效率低、可靠性差等问题突出。

#### 4 我国深远海网箱养殖工程与装备发展存在的主要问题

深远海区域的复杂海况对网箱设施装备的安全性、可靠性及便利性提出了更高的要求。我国近年来大型深远海网箱兴起为拓展深远海养殖空间提供了装备技术支撑,但养殖实践中发现大型网箱系统结构安全、配套装备技术方面的问题还比较突出,制约了深远海网箱养殖产业的健康发展,主要问题体现在以下几个方面:

(1)区域性深远海网箱养殖规划缺失。近几年,国内深远海网箱养殖快速兴起,我国深远海大型养殖设施制造水平走在世界前列,各类型近20座大型网箱陆续建成,布置在黄海、南海、东海等远离岸线的海域,早期养殖区域规划大多主要以HDPE网箱为目标划定的养殖区域,有些已不适应于深远海新型网箱的大型化发展需求,亟待开展与深远海大型网箱相匹配的海域区域性研究及规划,为深远海养殖提供示范海域。

(2)大型网衣破损机理研究不足。柔性网衣作为网箱包围养殖水体的核心部件,结构安全对保护养殖生物、防止鱼群逃逸至关重要,深远海大型网箱养殖生产实践表明,造成重大养殖经济损失的主要原因便是柔性网衣过载破损引起圈养鱼类的逃逸,而目前柔性网衣频繁发生过载破损机理却尚未明晰,污损生物附着水平对柔性网衣疲劳载荷及与结构物作用载荷分布特性研究、柔性网衣与钢制桁架结构的耦合装配工艺、柔性网衣缓冲卸载技术研究等方面还需开展大量研究,以期从根本上解决网衣破损问题。

(3)专业化养殖配套装备技术及应用水平不高。

深远海网箱长期作业于离岸高海况环境,专业化养殖配套装备必不可少。饵料投喂作为养殖管理的关键环节,机械自动化投喂装备已基本实现生产应用,但在饵料精准投喂、养殖决策、装备智能控制及降低能耗等方面还有待攻关;网衣清洗、渔获起捕、鱼类监测是实现深远海可控养殖中不可或缺的环节,尽管国内已研发出一批养殖配套管控装备,但由于效率低、可靠性差、关键技术存在卡脖子和维护成本大等问题,使市场化应用程度还不高,制约了深远海网箱工业化养殖进程。

(4)智能化养殖关键技术有待突破。目前,国内大型网箱养殖管理策略大多来自一线养殖渔民从业经验,基本未对养殖环节中饵料投喂、鱼类生长情况、鱼病滋生、污损生物网衣附着等情况进行科学实时监测,导致鱼类养殖存活率降低,养殖管理成本增大。亟需突破集成设施结构安全监测、环境因子(水温、pH、含氧量等)、鱼类生长及行为等信息为一体的智能管理平台,开发面向不同养殖对象的决策算法,构建精准养殖模式,大幅提升养殖存活率和管理效率,降低养殖成本和管理成本。

#### 5 我国深远海网箱养殖产业发展建议

“十四五”时期,应秉承现代渔业“创新、协调、绿色、开放、共享”的新发展理念,以促进网箱养殖绿色高质量发展为主线,以生态优先、科学有序、示范带动为原则,以科学规划、科技引领、规范建设为重点,扎实推动我国深远海网箱养殖产业健康发展和水产养殖新空间大幅拓展。为此提出以下五点建议:

(1)编制规划,统筹产业发展。在编制深远海养殖发展规划时,应该对深远海网箱养殖进行系统规划,坚持区域发展与空间战略布局相结合,坚持转变方式与产业结构调整相结合,从养殖海域、养殖规模、养殖品种、养殖装备及配套产业支撑等方面进行全方位顶层设计。

(2)创新驱动,引领产业发展。完善以企业为主体、市场为导向、产学研深度融合的技术创新体系,针对现阶段深远海网箱设施装备突出问题及技术瓶颈,通过设立科技专项开展产学研联合攻关,形成一批新技术、新装备、新工艺和新模式,在黄海、东海和南海三大海区建立核心示范区,以点带面形成深远海网箱现代化养殖示范区,引领产业发展。

(3)标准体系,规范产业发展。深远海网箱是一个系统工程,产业的高质量发展离不开标准体系的支撑。针对网箱设施安全设计、制造安装和布局形式,

关键养殖装备可靠性技术要求, 鱼类生态健康养殖, 冷链物流保鲜加工等方面制定完善的标准体系, 坚持以标准创新驱动产业链层次提升, 以高标准引领高质量, 促进我国海水网箱养殖产业转型升级。

(4) 创新模式, 融合产业发展。海上风电场距离岸线较远, 所占海域还未得到充分利用, 可创新发展“海上风电+网箱养殖”新模式, 推进深远海网箱养殖产业链的融合与延伸。此外, 可根据地方经济特色, 利用深远海网箱设施平台的优势, 创新发展“深远海养殖+休闲文旅”新模式, 挖掘渔业文化、旅游资源, 发展地方经济。

(5) 政策扶持, 保障产业发展。政府要将适宜深远海养殖海域纳入养殖水域滩涂规划, 完善养殖许可证发放制度, 充分利用国家及地方实施的深海网箱养殖装备补贴政策, 鼓励发展深远海网箱养殖。建议对实施水深 20 m 以上海域开展网箱养殖的企业减免海域使用金, 支持部分深远海养殖装备纳入农机购置补贴范围, 引导深远海养殖健康有序发展。

## 参 考 文 献

- AAS T S, OEHME M, SERENSEN M, *et al.* Analysis of pellet degradation of extruded high energy fish feeds with different physical qualities in a pneumatic feeding system. *Aquacultural Engineering*, 2011, 44(1): 25–34
- AKVA Group. Net cleaning. <https://www.akvagroup.com/download/catalogues>, 2019-04-21
- BANERJEE I, PANGULE R C, KANE R S. Antifouling coatings: Recent developments in the design of surfaces that prevent fouling by proteins, bacteria, and marine organisms. *Advanced Materials*, 2011, 23(6): 690–718
- BI C W, CHEN Q P, ZHAO Y P, *et al.* Experimental investigation on the hydrodynamic performance of plane nets fouled by hydroids in waves. *Ocean Engineering*, 2020, 213: 107839
- BI C W, ZHAO Y P, DONG G H, *et al.* Drag on and flow through the hydroid-fouled nets in currents. *Ocean Engineering*, 2018, 161: 195–204
- BIERSCHENK B M, PANDER J, MUELLER M, *et al.* Fish injury and mortality during passage through pumping stations. *Marine and Freshwater Research*, 2019, 70(3): 449–458
- CHEN Y Y, YANG B D, CHEN Y T. Applying a 3-D image measurement technique exploring the deformation of net cage under wave-current interaction. *Ocean Engineering*, 2019, 173: 823–834
- CHU S P, XU Z Q, TANG T L, *et al.* Vacuum fish pump for deep sea aquaculture platform. *Ship Engineering*, 2020, 42(S2): 68–71 [楚树坡, 徐志强, 汤涛林, 等. 深远海养殖平台真空式吸鱼泵. *船舶工程*, 2020, 42(S2): 68–71]
- CUI Y, GUAN C T, HUANG B, *et al.* Numerical simulation of the hydrodynamic characteristics of double-bottom cage for flounder fish under waves. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(6): 18–24 [崔勇, 关长涛, 黄滨, 等. 波浪作用下双层网底鲆鲽网箱水动力特性的数值模拟. *渔业科学进展*, 2019, 40(6): 18–24]
- CUI Y, GUAN C T, ZHAO X, *et al.* Analysis of two-dimension flow field of the square cage based on particle image velocimetry (PIV). *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(5): 138–144 [崔勇, 关长涛, 赵侠, 等. 基于 PIV 技术的方形网箱二维流场分析. *渔业科学进展*, 2015, 36(5): 138–144]
- DONG S L. Researching progresses and prospects in large Salmonidae farming in cold water mass of Yellow Sea. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2019, 49(3): 1–6 [董双林. 黄海冷水团大型鲑科鱼类养殖研究进展与展望. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(3): 1–6]
- DOU R. Numerical modeling and analysis of a semi-submersible fish-cage. Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2018
- Equipment Power. Yanmar net cleaner. <https://www.powerequipment.com.au/products/yanmar-net-cleaner/>, 2021-01-03
- FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome, 2020
- Golden Pompano Branch of China Fisheries Association. Report on the development of golden pompano industry in China (2020) [中国渔业协会金鲷鱼分会. 中国金鲷鱼产业发展报告(2020)]
- GUO G X, HUANG X H, HU Y, *et al.* Theoretical research and practice of deep-water net cage. Beijing: China Ocean Press, 2013 [郭根喜, 黄小华, 胡昱, 等. 深水网箱理论研究与实践. 北京: 海洋出版社, 2013]
- GUO G X. The existing problem and basic countermeasure in the industrialization development of deep-water net cage culture in China. *South China Fisheries Science*, 2006, 2(1): 1–5 [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. *南方水产*, 2006, 2(1): 1–5]
- HØILAND A V. Dynamic analysis of a vessel-shaped fish farm for open sea. University of Stavanger, Norway, 2017
- HOU H M, DONG G H, XU T J. Analysis of probabilistic fatigue damage of mooring system for offshore fish cage considering long-term stochastic wave conditions. *Ships and Offshore Structures*, 2020a(4): 1–12
- HOU H M, DONG G H, XU T J. Assessment of fatigue damage of mooring line for fish cage under wave groups. *Ocean Engineering*, 2020b, 210: 107568
- HU Y, GUO G X, HUANG X H, *et al.* Auto-feeding system of deep-water net cage based on PLC. *South China Fisheries Science*, 2011, 7(4): 61–68 [胡昱, 郭根喜, 黄小华, 等. 基于 PLC 的深水网箱自动投饵系统. *南方水产科学*, 2011, 7(4): 61–68]
- HU Y, GUO G X, TANG T L, *et al.* Design of auto-feeding



- system for deep water net cage based on MCGS. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(6): 110–115 [胡昱, 郭根喜, 汤涛林, 等. 基于 MCGS 的深水网箱自动投饵远程控制系统设计. *渔业科学进展*, 2010, 31(6): 110–115]
- HU Y, GUO G X, HUANG X H, *et al.* Nozzle design of high pressure free-jet-type submarine net cleaning machine. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(4): 16–20 [胡昱, 郭根喜, 黄小华, 等. 高压射流式水下洗网机喷嘴的设计. *南方水产科学*, 2008, 4(4): 16–20]
- HU Y, HUANG X H, TAO Q Y, *et al.* Design of a ZigBee wireless sensor network node for aquaculture monitoring. *Electronic Design Engineering*, 2017, 25(6): 100–104 [胡昱, 黄小华, 陶启友, 等. 基于 ZigBee 的深水网箱养殖无线传感网络节点设计. *电子设计工程*, 2017, 25(6): 100–104]
- HUANG X H, GUO G X, TAO Q Y, *et al.* Dynamic deformation of the floating collar of a net cage under the combined effect of waves and current. *Aquacultural Engineering*, 2018, 83: 47–56
- HUANG X H, GUO G X, TAO Q Y, *et al.* Numerical simulation of deformations and forces of a floating fish cage collar in waves. *Aquacultural Engineering*, 2016, 74: 111–119
- HUANG X H, LIU H Y, HU Y, *et al.* Hydrodynamic performance of a semi-submersible offshore fish farm with a single point mooring system in pure waves and current. *Aquacultural Engineering*, 2020, 90: 102075
- HUANG X H, WANG F F, LIU H Y, *et al.* Effects of mooring systems and ballast status on dynamic behaviors of semi-submersible offshore fish farm. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(15): 48–53 [黄小华, 王芳芳, 刘海阳, 等. 系泊和压载方式对半潜式渔场平台动力特性的影响. *农业工程学报*, 2019, 35(15): 48–53]
- HUTLI E, NEDELJKOVIC M, BONYAR A. Dynamic behavior of cavitation clouds: Visualization and statistical analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, 41(7): 281
- JI Y Z, WANG Z Y. Analysis and trend of deep-sea aquaculture development in China. *Ship Engineering*, 2020, 42(S2): 1–4, 82 [纪毓昭, 王志勇. 我国深远海养殖装备发展现状及趋势分析. *船舶工程*, 2020, 42(S2): 1–4, 82]
- JIU S C, ZHANG X L. Research progress of mariculture intelligent feeding equipment. *Ocean Development and Management*, 2018, 35(1): 21–27 [纠手才, 张效莉. 海水养殖智能投饵装备研究进展. *海洋开发与管理*, 2018, 35(1): 21–27]
- JIU S C. Research on key issues in the process of industrialization of mariculture intelligent equipment. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2018 [纠手才. 海水养殖智能装备产业化推进过程中的关键问题研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2018]
- KANG B. Statistical analysis of typhoon disasters in China. *China Flood and Drought Management*, 2016, 26(2): 36–40 [康斌. 我国台风灾害统计分析. *中国防汛抗旱*, 2016, 26(2): 36–40]
- KLEBERT P, PATURSSON, ENDRESEN P C, *et al.* Three-dimensional deformation of a large circular flexible sea cage in high currents: Field experiment and modeling. *Ocean Engineering*, 2015, 104: 511–520
- KRISTIANSEN T, FALTINSEN O M. Modelling of current loads on aquaculture net cages. *Journal of Fluids and Structures*, 2012, 34(4): 218–235
- LADER P, JENSEN A, SVEEN J K, *et al.* Experimental investigation of wave forces on net structures. *Applied Ocean Research*, 2007, 29(3): 112–127
- LI L, JIANG Z Y, HØILAND A V, *et al.* Numerical analysis of a vessel-shaped offshore fish farm. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2018, 140: 041201
- LI L, JIANG Z Y, ONG M C, *et al.* Design optimization of mooring system: An application to a vessel-shaped offshore fish farm. *Engineering Structures*, 2019a, 197: 109363
- LI L, JIANG Z, HOILANG A V, *et al.* Numerical study on the heading misalignment and current velocity reduction of a vessel-shaped offshore fish farm. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2019b, 141(5): 051602
- LIU H X, LI X G, ZHANG T, *et al.* Effects of jet pressure on impingement and cavitation erosion effects of submerged water jet. *Surface Technology*, 2016, 45(12): 104–110 [刘海霞, 李秀阁, 张桃, 等. 射流压力对淹没水射流冲击与空蚀效果的影响. *表面技术*, 2016, 45(12): 104–110]
- LIU Z Q. Development of automatic feeder for marine cage culture. Master's Thesis of Shandong Agricultural University, 2016 [刘志强. 海上网箱养殖自动投饵器的研制. 山东农业大学硕士研究生学位论文, 2016]
- LONG X P, XU M S, QIAO L Y, *et al.* Impact of the internal flow in a jet fish pump on the fish. *Ocean Engineering*, 2016, 126: 313–320
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. 2003 China Fishery Statistical Yearbook. Beijing: China Agriculture Press, 2003 [农业部渔业局. 2003 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2003]
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. 2021 China Fishery Statistical Yearbook. Beijing: China Agriculture Press, 2021 [农业农村部渔业渔政管理局. 2021 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2021]
- Multi Pump Innovation. JetMaster. <https://www.mpi-norway.com/products/jetmaster>, 2021-06-28
- Ocean Farm. Rov services. <https://www.Oceanfarmservices.com/services/rov>, 2020-08-11
- OEHME M, AAS T S, SERENSEN M, *et al.* Feed pellet distribution in a sea cage using pneumatic feeding system with rotor spreader. *Aquacultural Engineering*, 2012, 51: 44–52
- PAN Y, MA F, LIU B, *et al.* Cavitation intensity and erosion

- pattern of a self-excited cavitating jet. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 282: 116668
- PASCAL D D. An automated feeding system for intensive hatcheries. *Aquacultural Engineering*, 2002, 26(1): 13–26
- SONG R Y, ZHOU M L, LI Y, *et al.* Development and prospect of open-sea cage equipment engineering. *Mechanical Engineer*, 2015(10): 134–138 [宋瑞银, 周敏珑, 李越, 等. 深海网箱养殖装备关键技术研究进展. *机械工程师*, 2015(10): 134–138]
- SONG X F, JIA R, MA Y X. The design and experimental study of swirl current fish-cage cleanup equipment. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2006, 36(5): 733–738 [宋协法, 贾瑞, 马玉霞. 涡旋水流式网箱清洗设备的设计与实验. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(5): 733–738]
- SONG X F, SONG Y Y, WAN R. Effect of cleanup equipment of fish-cage. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2004, 11(Supp): 78–82 [宋协法, 宋业垚, 万荣. 养殖网箱清洗设备的实验研究. *中国水产科学*, 2004, 11(增刊): 78–82]
- STRAND I M, FALTINSEN O M. Linear wave-induced dynamic structural stress analysis of a 2D semi-flexible closed fish cage. *Journal of Fluids and Structures*, 2020, 94: 102909
- TANG M F, DONG G H, XU T J, *et al.* Experimental analysis of the hydrodynamic coefficient of net panels in current. *Applied Ocean Research*, 2018, 79: 253–261
- THOMPSON A M, GLASGOW J, BUEHRENS T. Mortality in juvenile salmonids passed through an agricultural Hidrostral pump. *Fisheries Management and Ecology*, 2011, 18(4): 333–338
- WANG C G. Research on development and key technology of cage intelligent feeding system. Master's Thesis of Taiyuan University of Science and Technology, 2014 [汪昌固. 网箱智能投喂系统开发及关键技术研究. 太原科技大学硕士研究生学位论文, 2014]
- WANG J H. Design and implementation of precise feeding strategy for deep water cage. Master's Thesis of Guangdong Ocean University, 2019 [王俊会. 深水网箱精准投饵策略设计与实现. 广东海洋大学硕士研究生学位论文, 2019]
- WANG S, GUO J, YUAN T, *et al.* Fatigue test and results analysis of copper alloy netting structure. *Journal of Ship Mechanics*, 2020a, 24(6): 808–818
- WANG S, SHEN W, GUO J, *et al.* Engineering prediction of fatigue strength for copper alloy netting structure by experimental method. *Aquacultural Engineering*, 2020b, 90: 102087
- XIAO L Z, LONG X P, LI L, *et al.* Movement characteristics of fish in a jet fish pump. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 480–492
- XU H, CHEN Z X, CAI J Q, *et al.* Research on the development of deep sea aquaculture engineering equipment in China. *Fishery Modernization*, 2016, 43(3): 1–6 [徐皓, 谌志新, 蔡计强, 等. 我国深远海养殖工程装备发展研究. *渔业现代化*, 2016, 43(3): 1–6]
- XU X L, ZHEN Y M. Development trend of marine fishery breeding equipment in post epidemic era. *China Ship Survey*, 2021(3): 55–58 [徐晓丽, 郑一铭. 后疫情时代深远海渔业养殖装备发展动向. *中国船检*, 2021(3): 55–58]
- XU Y F, LIU H. Research on development strategy of deep ocean fishery. *Fishery Modernization*, 2019, 46(3): 1–6 [徐琰斐, 刘晔. 深蓝渔业发展策略研究. *渔业现代化*, 2019, 46(3): 1–6]
- XU Y F, XU H, LIU H, *et al.* Research on the development way of deepsea mariculture in China. *Fishery Modernization*, 2021, 48(1): 9–15 [徐琰斐, 徐皓, 刘晔, 等. 中国深远海养殖发展方式研究. *渔业现代化*, 2021, 48(1): 9–15]
- XU Y, XU X L. Analysis on the development of fishery equipment and technology in the deep sea. *Marine Equipment and Materials Marketing*, 2020(9): 13–14 [许攸, 徐晓丽. 深远海渔业养殖装备技术发展分析. *船舶物资与市场*, 2020(9): 13–14]
- YAN G Q, NI X H, MO J S. Research status and development tendency of deep sea aquaculture equipment: A review. *Journal of Dalian Ocean University*, 2018, 33(1): 123–129 [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. *大连海洋大学学报*, 2018, 33(1): 123–129]
- YAO Y, CHEN Y, ZHOU H, *et al.* Numerical modeling of current loads on a net cage considering fluid-structure interaction. *Journal of Fluids and Structures*, 2016, 62: 350–366
- YU Z L, AMDAHL J, KRISTIANSEN D, *et al.* Numerical analysis of local and global responses of an offshore fish farm subjected to ship impacts. *Ocean Engineering*, 2019, 194: 106653
- YUAN T P, HU Y, WANG S M, *et al.* Effects of nozzle structure on the underwater cavitation characteristics of net clothes cleaning equipment. *Journal of Fisheries of China*, 2021a, 45(2): 296–305 [袁太平, 胡昱, 王绍敏, 等. 喷嘴结构对网衣清洗装备水下空化特性的影响. *水产学报*, 2021a, 45(2): 296–305]
- YUAN T P, HU Y, WANG S M, *et al.* Research on performance of cavitation jet equipment for deep-water cage cleaning. *South China Fisheries Science*, 2021b, 17(4): 110–116 [袁太平, 胡昱, 王绍敏, 等. 空化射流式深水网箱网衣清洗装备的性能研究. *南方水产科学*, 2021b, 17(4): 110–116]
- ZHANG X M, GUO G X, TAO Q Y, *et al.* Design of high-pressure water-jet manifold underwater net-washing machine. *South China Fisheries Science*, 2010, 6(3): 46–51 [张小明, 郭根喜, 陶启友, 等. 歧管式高压射流水下洗网机的设计. *南方水产科学*, 2010, 6(3): 46–51]
- ZHANG X M, GUO G X, TAO Q Y, *et al.* Rotating transient jet hitting force of the high-pressure jet manifold underwater net-washing machine. *Modern Manufacturing Engineering*, 2011(5): 21–25 [张小明, 郭根喜, 陶启友, 等. 高压射流水下洗网机旋转的瞬态射流打击力研究. *现代制造工程*,

- 2011(5): 21–25]
- ZHANG X M, ZHAN C Y. Cleaning efficiency under washing nettings by the water jet underwater netting-washing machine. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2018, 47(4): 52–54 [张小明, 詹春毅. 水射流式水下洗网机清洗囊网的效率研究. *机电工程技术*, 2018, 47(4): 52–54]
- ZHAO Y P, BI C W, DONG G H, *et al.* Numerical simulation of the flow field inside and around gravity cages. *Aquacultural Engineering*, 2013, 52: 1–13
- ZHAO Y P, GUAN C T, BI C W, *et al.* Experimental investigations on hydrodynamic responses of a semi-submersible offshore fish farm in waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7: 238
- ZHAO Z Y, DING J Q, JI Y L, *et al.* Exploration and practice of modern information technology and engineering equipment in the construction of marine ranch. *China Fisheries*, 2020(4): 33–37 [赵振营, 丁金强, 纪云龙, 等. 现代信息技术与工程装备在海洋牧场建设中的探索实践. *中国水产*, 2020(4): 33–37]
- ZHUANG J C, PANG H C, LIU Z L, *et al.* Design of a new deep-sea net cage cleaning robot. *Machinery*, 2018, 45(1): 72–75 [庄集超, 庞洪臣, 刘子浪, 等. 一种新型深海网箱网衣清洗机器人设计. *机器人技术*, 2018, 45(1): 72–75]
- ZUO Q, TIAN Y C, MA G Q. Research progress and problems of aquaculture intelligent feeding system. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2020, 27(4): 73–77 [左渠, 田云臣, 马国强. 水产养殖智能投饲系统研究进展和存在问题. *天津农学院学报*, 2020, 27(4): 73–77]

(编辑 冯小花)

## Review of Engineering and Equipment Technologies for Deep-Sea Cage Aquaculture in China

HUANG Xiaohua<sup>①</sup>, PANG Guoliang, YUAN Taiping, HU Yu,  
WANG Shaomin, GUO Genxi, TAO Qiyong

(South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Guangdong Cage Engineering Research Center, Key Laboratory of Open-Sea Fishery Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou, Guangdong 510300, China)

**Abstract** Owing to the major issues of pollution, limited resources, and restricted space for mariculture in coastal areas, it will be a significant advantage to develop large-scale cage aquaculture in open sea areas, which have the advantages of the finest water conditions. The vigorous development of scientific and technological innovation in deep-sea aquaculture plays a positive role in upgrading and transforming aquaculture methods and expanding the mariculture space. These lead to a new pattern of development of marine aquaculture facilities. Here, we present a summary of the status of China's cage culture industry, the demand for the development of the deep-sea cage culture industry, and the corresponding scientific and technological requirements of cage culture facilities and equipment. Then, research and applications in China and abroad are introduced in detail regarding two aspects: deep-sea cage culture facilities and related equipment and technology. Subsequently, the main problems faced in the development of deep-sea cage culture engineering and equipment in China are identified. Finally, suggestions are given for scientific planning, technological guidance, standardized construction, and innovative modes, for better development of the deep-sea cage culture industry. This review provides a reference for research and development of the deep-sea cage aquaculture industry in China.

**Key words** Deep-sea fish cage; Aquacultural engineering; Equipment technology; Research review

① Corresponding author: HUANG Xiaohua, E-mail: huangx-hua@163.com