



董双林, 中国海洋大学教授, 博士, 国家杰出青年科学基金获得者, 山东省泰山产业领军人才。中国海洋学会海洋经济分会主任委员、中国海洋湖沼学会养殖生态学会理事长。长期从事生态养殖理论与技术研究, 研发了低洼盐碱地池塘安全养殖技术和滩涂海水池塘清洁养殖技术, 推动了我国盐碱荒地渔业利用和滩涂池塘清洁生产, 并分别于2006年和2012年获得国家科技进步奖二等奖(首位)。2012年起又开拓了我国深远海鱼类绿色养殖领域, 已实现了温暖海域冷水鱼类养殖的世界性突破。出版专著1部, 以第一或通信作者发表论文250余篇, 其中SCI收录100余篇, 授权发明专利12项, 制定水产养殖地方标准2项。主编教材3本, 培养博士研究生57名。

· 综述 ·

迈向远海的中国水产养殖：机遇、挑战和发展策略

董双林^{1*}, 董云伟¹, 黄六一¹, 田相利¹,
韩立民², 李大海², 曹玲³

(1. 中国海洋大学, 海水养殖教育部重点实验室, 山东 青岛 266003;

2. 中国海洋大学海洋发展研究院, 山东 青岛 266100;

3. 上海交通大学海洋学院, 上海 200240)

摘要: 根据中国国情对海上养殖和深远海养殖装备进行了分类、比较, 并综述了中国近海和远海养殖特别是深远海养殖发展面临的机遇、挑战和发展策略。海上养殖可分为近岸养殖、离岸养殖、远海养殖和深远海养殖四类, 前二者可合称为近海养殖。深远海养殖或称装备型远海养殖特指具有钢架结构和自动投饲系统等, 可抵御或躲避强台风的远海养殖方式。深远海养殖装备包括远海围栏、复合式钢构网箱(包括半潜式和全潜式)、船形网箱(包括有动力和无动力)和海基养殖舱(包括养殖工船和封闭养殖舱)四类。近岸养殖向离岸、远海发展已是学术界共识和海水养殖业发展的内在需求。根据养殖水体生态性养殖容量和社会性养殖容量放养适宜种类和数量的苗种, 开展多营养层次综合养殖, 实施产业融合发展, 是提高离岸和远海养殖产量和经济效益的有效途径。在当前近海养殖、远海养殖与深远海养殖共存的背景下, 深远海养殖实现盈利的前提只能是养殖那些在池塘、近岸海域和离岸海域很难养殖的更高品质的种类, 或通过深远海养殖可获得额外收益的种类。基于鱼类行为和生理学知识的“以鱼为本”的智能化技术是目前深远海智能化养殖的短板, 需要依靠水产养殖、鱼类生物学、工程和信息化等方面的专家深度合作才可能真正解决。深远海养殖发展迫切需要一种集养殖、加工、物流、风电、旅游等于一体的大规模创新性生产、运营模式, 唯此才能实现环保、经济、民生三赢。

关键词: 近海养殖; 远海养殖; 机遇; 挑战; 发展策略; 中国

中图分类号: S 967

文献标志码: A

收稿日期: 2022-09-17 修回日期: 2022-10-06

资助项目: 国家自然科学基金-山东省联合基金(U1906206); 山东省泰山产业领军人才工程项目(LJNY201801)

通信作者: 董双林, 从事水产生态养殖理论与技术研究, E-mail: dongsl@ouc.edu.cn

20 世纪 60 年代以来, 全球水产品消费量年均增速 (3.2%) 超过了人口增速 (1.6%), 也高于畜禽产品消费量的增速 (2.8%), 且水产养殖产量已超过捕捞产量^[1]。因此, 水产养殖业将为保障人类食品安全、消除贫困和饥饿发挥越来越重要的作用。水产养殖较陆生动物养殖对饲料利用率更高, 因此, 如果全球养殖、食用更高比例的水产品, 人类可节约大量用于种植饲料粮的耕地, 而依然能养活预计于 2050 年增长到 97 亿的庞大人口^[2-3]。为此, 国内外学者提出了“蓝色粮仓”和“蓝色食物”等计划以加快水产养殖业的发展^[4-5]。

传统而落后的水产养殖模式不仅对自然资源 (如淡水、土地和野生鱼类资源) 产生了巨大压力, 还出现了水域富营养化、水体酸化、生物多样性丧失、生物入侵、遗传变异、疾病传播、全球变暖等问题^[6-8]。为减少这些负面影响, 学术界提出了绿色养殖、可持续养殖、生态集约化等发展理念和方法^[8-11]。2022 年《世界渔业和水产养殖状况》报告的主题是“蓝色转型”, 旨在推动水产养殖可持续集约化发展^[12]。

中国是世界上 13 个最缺水国家之一, 人均水资源占有量只相当于世界人均数的 1/4^[13]。中国也是耕地资源十分稀缺的国家, 人均耕地面积不足世界人均数的 40%^[14]。资源匮乏使得靠扩大养殖池塘面积或增加换水率来进一步提高中国内陆水产养殖产量的途径受到制约。在此背景下, 人们对近海和远海养殖寄予厚望。然而, 中国近岸海水养殖面积已占 -10 m 等深线以内海域总面积的 40% 左右, 接近其承载力极限^[15]。因此, 中国海水养殖从近岸走向离岸、远海已是大势所趋。

近 20 多年来, 远海养殖特别是深远海养殖已成为国内外关注的热点^[16-19]。中国具有巨大的

发展远海养殖和深远海养殖的海域空间^[20-21], 且深远海养殖在国际上后来居上, 发展迅猛, 倍受世人瞩目^[22]。但同时, 中国远海养殖和深远海养殖发展也面临诸多挑战和机遇。本文对海上养殖类型、深远海养殖装备进行了分类、比较, 综述了中国近海和远海养殖特别是深远海养殖发展面临的机遇、挑战和发展策略。

1 海水养殖类型的区域划分

由于各国海水养殖区域的环境条件差异很大, 因此世界上对海上养殖的区域划分尚未形成全球共识。美国将离岸 3~200 n mile 专属经济区内的水产养殖定义为远海养殖^[23]。联合国粮农组织 (FAO) 2010 年技术报告则依据离岸距离、水深、开放程度等, 将海上养殖划分为近岸养殖 (coastal aquaculture)、离岸养殖 (off-the-coast aquaculture) 和远海养殖 (offshore aquaculture) 三类。中国黄渤海和东海北部陆架坡度平缓, 海上养殖规模宏大, 目前中国山东省和江苏省的浮筏式养殖已经延伸到距海岸 15 km 外的开放海域。中国官方渔业统计资料已将深水网箱定义为具有抗风浪性能、安置在水深 20 m 以深海域的网箱^[24]。有些知名学者也将远海养殖或深远海养殖定义为在水深大于 20 m 的开放海域实施的海水养殖方式^[16, 19, 25]。基于符合中国国情、具有一定传承性且有助于管理和发展的原则, 本文将中国海上养殖分为近岸养殖、离岸养殖、远海养殖和深远海养殖 (deeper offshore aquaculture) 或称装备型远海养殖 (equipped offshore aquaculture) 四类 (表 1)。近岸和离岸养殖也可合并称为近海养殖 (nearshore aquaculture)。近岸养殖包括有遮蔽的港湾内或近岸视距可见 (2 km

表 1 海上水产养殖的分类

Tab. 1 Classification of marine aquaculture

类型 type	水深 water depth	海况 sea conditions	特点 features
近海养殖 nearshore aquaculture	近岸养殖 coastal aquaculture	<20 m 常有遮蔽, 风浪较小 usually sheltered, low swells	在视距内海域作业 within sight
	离岸养殖 off-the-coast aquaculture	<20 m 常有一定遮蔽, 风浪较大 somewhat sheltered, higher swells	在视距外海域作业 beyond sight
远海养殖 offshore aquaculture	>20 m	开放海域, 风浪大 open ocean, oceanic swells	需要加强的锚固系统或可沉降结构 with strengthened anchor system or submersible structure
深远海养殖或称装备型远海养殖 deeper offshore aquaculture or equipped offshore aquaculture	>20 m	开放海域, 风浪大, 水较深 open ocean, oceanic swells, deep in water depth	钢构, 具有自动投饲系统等, 可抵御或躲避强台风 owns steel framework and automatic feeding system etc., and can resist or avoid strong typhoon

左右)的海水养殖; 离岸养殖是在视距之外、常有一定遮蔽的水深20 m以浅海域实施的海水养殖; 远海养殖是在水深超过20 m的开放海域实施的海水养殖; 深远海养殖或装备型远海养殖是利用钢架结构且具有自动投饲系统的装备等、可抵御或躲避强台风的海水养殖方式。有些养殖活动介于两种类型之间, 可根据其主要特点进行归类。

“深远海养殖”这一称谓虽已出现在中国官方文件和渔业学术界, 但海洋科学和地学界并不认可其作业海域属于深海^[18], 公众认知也有歧义。另外, 中国现行“深远海养殖装备”绝大多数都在水深不足50 m的海域作业。因此, 用英文 *deeper offshore aquaculture*^[26] 比 *deep sea aquaculture* 表达深远海养殖更合适。同理, 采用“装备型远海养殖”比“深远海养殖”更为合理。

2 近海和远海水产养殖

目前中国近海和远海养殖模式有投饲和不投饲养殖两类。整体而言, 不投饲养殖系统比投饲养殖系统具有更高的可持续性, 远海养殖系统比近海养殖系统具有更高的可持续性^[8]。

2.1 近岸养殖

中国大陆海岸线全长约1.8万 km, -20 m等深线内海域面积约16万 km²^[27]。该海域的近岸养殖和离岸养殖是目前中国海水养殖的重要组成部分。就去壳动物性产品而言, 2018年产量约占海水养殖总产量的55%, 产值约占26%^[8]。

近些年, 随着海洋环保和海岸带综合治理工作的推进, 中国近岸养殖正在萎缩, 传统的近岸养殖海域正在成为观光休闲、游钓、海上运动等多种活动的场所。因此, 一些学者建议逐渐取缔近岸水产养殖业且部分地方政府已在实践^[16]。近岸养殖向离岸和远海转移是中国海水养殖业发展趋势和不得已而为之的选择。

2.2 离岸养殖

离岸养殖是捕捞渔民转产、转业的主要领域。离岸养殖包括投饲养殖 [如大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 网箱养殖] 和不投饲养殖 (如扇贝养殖)。虽然离岸投饲养殖在中国海水养殖产量中占比并不高, 但其引起的局部水体富营养化、食品安全和疾病传播风险等问题不容忽视^[7]。离岸投饲养殖的发展不能仅考虑生产性养殖容量, 还应考虑

生态性养殖容量和社会性养殖容量^[28], 并通过实施多营养层次综合养殖和科学规划, 提高养殖效益, 减小养殖生产的负面影响, 平衡各利益相关方的诉求^[25-26, 29]。

离岸非投饲养殖包括滤食性贝类、大型海藻养殖等。离岸非投饲养殖是一种基于天然饵料, 人为投入物质少, 可持续性较高, 可以净化水质的养殖模式, 其产品符合有机产品标准^[8, 30-31]。然而, 中国许多海域的养殖规模已出现超养殖容量现象。例如, 与1999年相比, 2018年中国扇贝养殖面积增加了11.3倍, 但养殖产量却仅增长了2.7倍。根据养殖水体生态性养殖容量和社会性养殖容量放养适宜种类和数量的苗种, 是提高其产量和经济效益的有效途径。

滤食性贝类不仅可利用天然饵料形成水产品, 其贝壳还可长期封存碳, 因此, 国内外许多学者建议将养殖的双壳贝类视作碳汇产品^[32-33]。但是, 许多海洋生物学和海洋化学专家持相反意见^[34-35], 理由是贝壳在钙化过程中每生成1 mol的CaCO₃, 在海水中会生成约0.6 mol的CO₂。贝类养殖海域的现场测定结果也表明, 贝类养殖会增加局部海水中CO₂分压^[36-38]。关于贝类碳汇/源问题国内外学者还未达成共识, 这很可能是方法论不同所致。迄今为止, 学术界仍缺乏一个原位、时空边界清晰、包含养殖生态系统各营养层次的实证研究^[39]。

2.3 远海养殖

远海养殖具有广阔的拓展空间、巨大的养殖容量、与其他用海活动冲突少、水质好、寄生虫病害轻等优势^[17, 19, 40], 已逐渐成为国内外海水养殖关注的热点。远海养殖的劣势因地制宜, 除技术难度大外^[41-42], 还包括投资强度大、风险大, 以及产权不明晰、缺乏相应的法律保障等^[7, 41], 欧美公众还关心其潜在环境影响和生态损失等^[22, 26, 41]。

美国是最早尝试在专属经济区海域 (EEZ, 3~200 n mile 联邦管辖海域) 开展远海养殖的国家之一, 然而, 在相关法案刚提出时就遭到多方反对, 原因是其潜在的鱼病传播和养殖污染风险等^[43]。直到2011年美国国家海洋与大气管理局和商务部联合声明支持发展远海养殖后, 情况才有所改观。由于在美国EEZ实施水产养殖受多个法律制约, 因此, 到2019年联邦政府批准的商业化或示范性远海养殖, 也仅有三处贝类养殖项目^[44]。

与许多欧美国家不同的是, 中国陆架总体上较平缓, 远海养殖海域距岸线更远、海况更恶劣, 养殖设施投资和生产成本也相对会更高。因此, 在中国进行远海养殖需要生产较高市场价格的产品, 以抵偿高投资和高养殖成本。侯娟等^[20]的分析表明, 中国适于鱼类养殖的海域面积远大于适于贝类养殖的海域面积, 因此, 发展高价值鱼类养殖应该成为中国远海养殖的重要选项。为减少养殖污染、提高经济效益、平衡与其他用海活动的利益, 远海养殖同样应该依据生态性和社会性养殖容量安排生产, 实施多营养层次综合养殖以及渔电互补等产业融合发展。

3 深远海养殖

20 世纪 50 年代, 美国将“棕熊号”货船改造成养殖工船, 并建造了一个简单的钢构网箱, 用于在近岸水域养殖银鲑 (*Oncorhynchus kisutch*)^[45], 可以视为装备型海水养殖的先驱。直到 20 世纪 80 年代, 瑞典和前苏联才真正开始研发能够在远海恶劣海况下养殖鱼类的钢构深远海养殖装备^[17, 40]。之后, 美国又研发了多种型号深远海养殖装备。目前, 在深远海养殖方面, 挪威和中国走在了世界前列^[22]。

挪威峡湾内大西洋鲑 (*Salmo salar*) 养殖容量已趋饱和且海虱病害日趋严重。虽然前些年大西洋鲑养殖规模不断扩大, 但其养殖成本并未相应下降。为此, 挪威政府正通过压减峡湾内养殖网

箱数量、奖励远海养殖配额等措施, 鼓励作为国家支柱产业的大西洋鲑养殖向远海发展。挪威走向远海的典型养殖装备包括半潜式“Ocean Farm 1”和船形网箱“Havfarm”等^[46]。

在中国各级政府大力支持下, 以及金融、装备制造和养殖企业积极参与下, 中国沿海多地各类创新性养殖装备不断涌现, 如“深蓝 1 号”、“德海 1 号”、“经海 1 号”、“蓝钻 1 号”、“澎湖号”、“国信 1 号”等。但社会各界对深远海养殖的发展仍存在一些模糊认识, 这不仅不利于深远海养殖产业的健康发展, 也使一些深远海养殖企业处于较大风险中。以下本文从装备类型、经济效益、装备智能化、与其他海洋新业态结合等方面进行介绍。

3.1 深远海养殖装备类型

依据养殖种类、海况条件、底质类型等的不同, 世界各国研发了很多类型的深远海养殖装备^[19, 46]。深远海养殖装备的显著特点是以刚性材料建造骨架, 具有自动投饲等系统, 可抵御或躲避强台风等。这些装备可简单地分为远海围栏、复合式钢构网箱、船形网箱和海基养殖舱四类(表 2)。复合式钢构网箱通常在水平方向上具有对称结构, 包括半潜式和全潜式结构; 船形网箱通常分多个养殖单元, 包括有驱动力和无驱动力结构; 海基养殖舱包括具有驱动力的养殖工船和无驱动力的海上封闭养殖舱。有些养殖结构介于两种类型之间, 可根据其主要特点进行归类。

由于船形网箱水平方向结构不对称, 当船较

表 2 深远海养殖装备类型

Tab. 2 Types of equipped offshore aquaculture

类型 types	例子 cases	特点 features	
远海网栏 offshore pens	中国的“蓝钻1号” Chinese ‘Lanzuan 1’	具有抗台风结构和网衣 with framework and nets that withstanding typhon	
复合式钢构网箱 composite steel cages	半潜式 semi-submersible	挪威的“海洋渔场1” Norwegian ‘Ocean Farm 1’	具有抗强风浪结构 strong swells-resistant structure
	全潜式 submersible	中国的“深蓝1号” Chinese ‘Deep Blue 1’	具有可避强风浪机制 strong swells-avoidable mechanism
船形网箱 vessel-shaped cages	有驱动力 powered	挪威的“Havfarm” Norwegian ‘Havfarm’	可变换迎水流方向, 碳足迹高 the vessel direction is adjustable, high carbon footprint
	无驱动力 unpowered	中国的“德海1号” Chinese ‘Dehai 1’	不可改变迎水流方向, 船尾部网箱易缺氧 the vessel direction is not adjustable, the aft cage is susceptible to hypoxia
海基封闭养殖舱 sea-based aquaculture tanks	养殖工船 aquaculture vessels	中国的“国信1号” Chinese ‘Guoxin 1’	可转移海区, 碳足迹高、生产成本低 changeable for farming site, high carbon footprint, high production cost
	封闭养殖舱 closed aquaculture tanks	挪威的“Neptun” Norwegian ‘Neptun’	可防海虱等, 碳足迹高、生产成本低 can prevent sea lice, high carbon footprint, high production cost

长且无驱动力时, 船尾部网箱单元容易出现缺氧现象^[47]。对于单点锚泊且有驱动力的船形网箱, 网箱迎水流方向可按照需要进行调整, 避免尾部网箱缺氧现象, 但这会额外增加耗能成本和产品的碳足迹。养殖工船具有可逐水温而移动、躲避台风的优点, 挪威的养殖从业者也希望用封闭养殖舱减轻海虱病害侵扰, 但海基养殖舱类装备一般都需燃油发电来频繁换水以保持舱内良好水质、减少病害, 因此养殖成本和碳足迹都很高。国际上概念性和曾试验的海基封闭养殖舱不少, 但仍在应用的数量极少^[46, 48-49], 这与其投资多、养殖成本高、碳足迹高不无关系。能否发挥养殖工船逐水温移动的优势, 养殖适宜的种类, 降低燃油和购置大规模苗种成本是提高养殖工船产品市场竞争力的关键。

3.2 深远海养殖的经济效益

深远海养殖的经济效益与养殖装备类型有关。在挪威, 陆基循环水养殖大西洋鲑的成本为 43.6 挪威克朗 (NOK)/kg (约 30 元人民币/kg), 开放海域网箱养殖成本为 30.6 NOK/kg, 海基养殖舱养殖成本为 37.9 NOK/kg^[46]。开放海域的养殖成本之所以较陆基循环水养殖更低, 是因为前者利用了海洋自净能力, 避免了全部或部分水处理的成本。另外, 网箱养殖还利用了天然海流补充溶解氧的作用, 因此, 充分利用海区生态系统服务功能的网箱养殖是最经济的海水养殖类型之一。

深远海养殖的经济效益与养殖规模有关。就单个网箱而言, 在一定容积范围内网箱容积越大单位容积造价越低, 但网箱的规格会受制于箱内水流流速和溶解氧动态, 并不是网箱越大经济效益越好。网箱在养殖过程中几乎完全靠天然海流换水、补充溶解氧, 因此, 海流最小的平潮期的海流速度和溶解氧水平是制约网箱规格的关键因子。网箱规格较大时应减小放养动物密度或配置增氧设备。由于深远海养殖海域远离岸线, 需要配置专门的交通运输、看护管理、捕捞等功能性船舶, 只有养殖网箱达到一定数量时才能充分发挥这些船舶的潜能, 降低单位产量养殖成本。

与其他海水养殖方式相比, 深远海养殖装备建造投资更多、生产管理成本更高^[7, 19, 46], 因此, 在近海养殖、远海养殖与深远海养殖共存的当下, 深远海养殖实现盈利的前提只能是养殖那些在池塘、近岸海域和离岸海域很难养殖的更高质量的

种类, 或通过深远海养殖可获得额外收益的种类。例如, 中国远海养殖的大黄鱼品质显著优于近海养殖的大黄鱼, 因此前者售价也就更高^[50]。再如, “深蓝 1 号”可以利用黄海冷水团养殖在中国海域通常不能度夏的鲑鳟鱼类^[51-52]。与挪威相比, 中国黄海冷水团养殖鲑鳟鱼类具有物流成本低、养殖周期短、人工成本低、水质好、海虱病轻等比较优势^[51]。此外, 养殖工船可随季节转移到不同海域, 如果安排得当, 可使养殖鱼类生长更快。挪威在峡湾中养殖大西洋鲑有超过 10% 的成本是用于预防海虱病害^[19], 而远海水域海虱密度低, 病害轻, 因此远海养殖防病成本较低。

中国深远海养殖的快速发展得益于产业发展的内在需求、装备制造企业的积极参与和政府的大力支持。装备制造企业的积极参与无疑是中国各类创新性深远海养殖装备大量涌现的重要原因, 但有些养殖装备的应用并没有解决好养殖种类的问题。深远海养殖的高建造投资和高生产管理成本决定了利用这些装备养殖那些当地民众可在普通池塘和普通网箱中养殖的种类通常不具备市场竞争力。

在远海养殖种类的筛选和驯养方面, 中国水产养殖业还有很多工作要做。中国北方有些地方在推广“南鱼北养”模式, 这其实是鱼类移植驯化方面的悖论。“南鱼北养”成功的案例通常是可利用地热资源或热电厂废热水资源或其他特殊因素, 不具备普遍性。相反, “北鱼南养”才具有普遍意义, 例如, 福建省等沿海区域在低温季节养殖北方的参、鲍、藻等种类。中国在黄海冷水团海域养殖鲑鳟鱼类也是养殖了从更高纬度引进的鱼类。

3.3 深远海养殖装备的智能化

当前中国很多深远海养殖装备常冠以“智能化”的标签, 但事实上并非如此。智能化水产养殖是在计算机网络、大数据、物联网和人工智能等技术支持下实施的水产养殖活动, 由“以人为本”的智能化和“以鱼为本”的智能化两部分组成。前者主要是以能满足人的各种需求为目标, 后者则是以能满足养殖鱼类各种需求为目标。近些年, 中国船舶和海工装备的智能化技术取得了长足的进步, 将这些以人为本的智能化技术移植到水产养殖中, 实施网箱设计、自动投饲、环境参数实时监测和处理、影像自动获取和处理、生物量评估、智能洗网、死鱼收集等已基本不存在技术障

碍^[53]。但是, 基于鱼类行为和生理学知识的智能化技术, 如智能投饲、智能增氧、智能补光、病害智能检测与评估、环境危险预警等, 目前距离实际应用还有很大差距^[54-56]。以鱼为本的智能化方面是当下深远海养殖智能化的短板, 只有水产养殖、鱼类学、工程和信息技术等方面的专家深度合作研发才可能真正实现深远海养殖的智能化。

同理, 凭借中国船舶和海工装备企业多年的技术积累, 深远海养殖装备抗风浪安全性等方面可得到良好的保障。但是, 基于鱼类行为和生理知识的下潜养殖喉鳔鱼类的鱼鳔补气设备、巨型网箱分批次按需捕鱼设备等尚未很好解决^[51-52]。

3.4 深远海养殖与风电产业的融合

1987年, 前苏联学者 Bugrov 首次在里海实施了开放水域养鱼装备“Sadco-Kitezh 号”与石油开采平台协同作业的尝试^[17], 可视为水产养殖与能源业协作生产的先驱。目前, 尽管风力发电机的运行是否会影响到养殖鱼类的生长还未形成共识^[57-58], 西方发达国家已普遍接受了将远海养殖与风电等产业融合发展的理念^[17, 59-60]。研究表明, 海水养殖与风电结合可使风电场运维成本降低 10%^[61]。He^[62] 的研究表明, 与风机基座结合的网箱养殖可使养鱼收益增加 44%。然而, Jansen 等^[63] 认为, 在欧洲北海海域, 风电与贝类养殖融合的经济可行性最高, 与藻类养殖融合的经济可行性次之, 与鱼类养殖融合的经济可行性最低。

在西方国家, 风电场不仅可与水产养殖共用同一海域, 还会产生鱼礁效应, 减少贝类养殖浮筏的锚桩用量, 有利于游钓业和贝类养殖的发展^[17, 59-60]。在中国, 虽然风电同样可与海水养殖共用海域, 但由于游钓业不发达, 风电场也更加远离海岸, 如何使远海和深远海养殖与风电等产业融合, 产生显著的互补互促效果, 还需有创新性的模式。

3.5 一种创新性深远海养殖模式

由于实施严格的环保督察、港湾整治、海岸带综合治理等政策, 中国近岸养殖已开始成规模地向离岸、远海转移, 这无疑给深远海养殖带来了重要机遇。然而, 上述分析和本研究团队的评估^[8] 显示, 中国目前的深远海养殖系统的可持续性权重并不高, 存在的主要问题包括单位养殖容积投资大、养殖成本高、对国家食品安全贡献率低(总产量低)、生态足迹高、无法解决近岸鱼排被取缔的渔民再就业等问题。如果从 20 世纪 80 年

代瑞典研发深远海养殖装备算起, 西方的深远海养殖已走过近半个世纪的历史, 然而, 现在世界上深远海养殖的规模并不大。这主要是因为各国都采取了企业为本的发展理念。深远海养殖投资、运营成本较高, 养殖规模的扩大一定会使养殖产品的市场价格降低, 企业利润率也会相应降低。因此, 企业为本的发展理念会影响深远海养殖的规模化发展。中国深远海养殖发展的目标主要是解决未来食物安全问题, 因此, 应该采取民生和企业效益并重的发展策略, 创新养殖模式。

中国交通建设股份有限公司和中国海洋大学的专家们提出了“海上牧渔城”发展模式。“海上牧渔城”是在远海海域利用防波减流设施围建一个巨型养殖场, 在其中利用普通养殖设施开展以鱼为主的多营养层次综合养殖, 并实现三产融合发展。由于巨大的养殖规模, 该模式不仅可高效率生产大量面向普通民众消费的绿色水产品, 还可使养殖、加工、物流、风电、旅游等一体化成为可能, 经济效益倍增。

以设计的“东海牧渔城”为例(图 1), 总投资约 100 亿元人民币可以围建周长 10 km、覆盖 8 km² 海域面积的巨型深远海养殖场, 设施寿命可达 100 年。养殖场内利用普通深水网箱主养大黄鱼等鱼类, 并利用浮筏设施综合养殖海带(*Saccharina japonica*)、龙须菜(*Gracilariopsis lemaneiformis*)、牡蛎、鲍等, 实施养殖、加工、物流、风电、旅游等一体化经营。虽然“海上牧渔城”模式投资巨大, 资金不易筹措, 但其单位容积投资相对较小、养殖成本低、养殖鱼类品质高、环境负面作用小、符合双碳目标要求、利于失鱼排渔民再就业、投资回收时间短, 是一种环保、经济、民生三赢的深远海养殖模式。

4 政策建议

近岸养殖向离岸、远海发展已是学术界共识和海水养殖业发展的内在需求。在近岸养殖、离岸养殖、远海养殖和装备型远海养殖多元共存的背景下, 建议针对各养殖类型制订相应的政策, 以确保海水养殖业的可持续发展。

①充分发挥中国近海空间资源丰富的优势, 采用激励与约束两手都硬的策略, 引导海水养殖由近岸向离岸、远海拓展。推动地方政府尽快落实新一轮《养殖水域滩涂规划》中关于禁养区和限养区的规定, 通过严格监管和迁移补贴等方式,

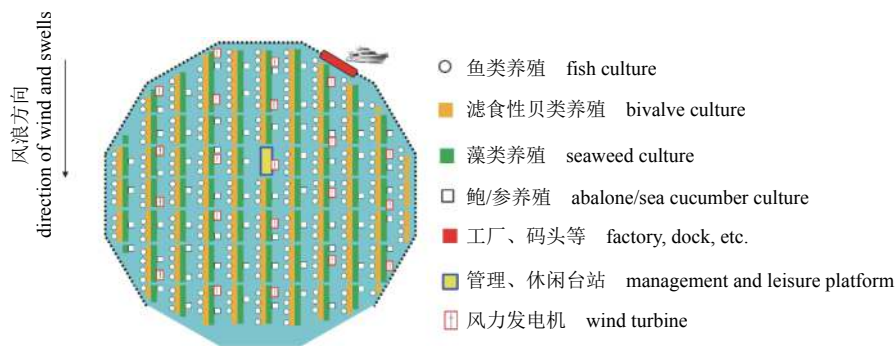


图1 “东海牧渔城”概念示意图

Fig. 1 Conceptual diagram of the Aquaculture Town in East China Sea

逐步减小近岸养殖强度。加速远海养殖有机食品认证,并在海域使用、装备建造、燃油补贴等方面给予优惠政策,促进离岸养殖、远海养殖和深远海养殖发展。

②加强对近海和远海海域养殖规划的研究,支持开展近海和远海海域生态性养殖容量和社会性养殖容量的研究,优化多营养层次综合养殖结构,保障近海和远海养殖健康发展;加强海洋生物育种研发力度,加快培育适用于远海养殖的优质品种;加强功能性饲料和免疫制剂的研发,保障养殖动物的健康;支持跨学科专家深度合作,完善深远海养殖规划和深远海养殖智能化技术体系。

③鼓励多产业融合发展,培育适应离岸和远海养殖发展的后勤补给、冷链物流、加工运销等一体化的新业态;打造环境保护、经济发展与民生保障三赢的规模化深远海养殖新模式,鼓励探索“国建民营”“共建共营”等多种治理结构。

④国家层面应尽快出台促进专属经济区海域水产养殖发展的政策,完善装备建造企业与海工装备检验机构协调机制,建立健全海洋环保、海事等部门评估、备案,省级渔业主管部门核发水产养殖许可证的管理制度,解决好远海养殖生产管理的合法性问题,促进专属经济区海域水产养殖健康、有序发展。

⑤尽快制订深远海养殖生产规范或标准,既为深远海养殖装备发展和养殖模式探索留有空间,又可避免无序发展,减少污染物排放,增加非化石能源使用比例,防止养殖海域水质恶化。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2018[R]. Rome: FAO, 2018.

- [2] Froehlich H E, Runge C A, Gentry R R, *et al.* Comparative terrestrial feed and land use of an aquaculture-dominant world[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(20): 5295-5300.
- [3] 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.
- [4] 韩立民, 李大海. “蓝色粮仓”: 国家粮食安全的战略保障[J]. *农业经济问题*, 2015(1): 24-29.
- [5] Han L M, Li D H. Blue food system: guarantee of China's food security[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2015(1): 24-29 (in Chinese).
- [6] Golden C D, Koehn J Z, Shepon A, *et al.* Aquatic foods to nourish nations[J]. *Nature*, 2021, 598(7880): 315-320.
- [7] Naylor R L, Hardy R W, Bureau D P, *et al.* Feeding aquaculture in an era of finite resources[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(36): 15103-15110.
- [8] Klinger D, Naylor R. Searching for solutions in aquaculture: charting a sustainable course[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2012, 37(1): 247-276.
- [9] Dong S L, Dong Y W, Cao L, *et al.* Optimization of aquaculture sustainability through ecological intensification in China[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2022, 14(3): 1249-1259.
- [10] Zou L L, Huang S L. Chinese aquaculture in light of green growth[J]. *Aquaculture Reports*, 2015, 2: 46-49.
- [11] Napier J A, Haslam R P, Olsen R E, *et al.* Agriculture can help aquaculture become greener[J]. *Nature Food*, 2020, 1(11): 680-683.

- [11] Stentiford G D, Bateman I J, Hinchliffe S J, *et al.* Sustainable aquaculture through the One Health lens[J]. *Nature Food*, 2020, 1(8): 468-474.
- [12] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2020[R]. Rome: FAO, 2022.
- [13] 吴普特, 冯浩, 牛文全, 等. 中国节水农业战略思考与研发重点[J]. *科技导报*, 2006, 24(5): 86-88.
Wu P T, Feng H, Niu W Q, *et al.* Research emphasis and reflection of strategy for water saving agriculture in China[J]. *Science and Technology Review*, 2006, 24(5): 86-88 (in Chinese).
- [14] 周天勇, 田博. 新形势下我国人口与粮食安全战略思考[J]. *中国经济评论*, 2021(7): 36-40.
Zhou T Y, Tian B. Strategic thinking on population and food security in China under the new situation[J]. *China Economic Review*, 2021(7): 36-40 (in Chinese).
- [15] 李大海, 韩立民. 陆海统筹构建粮食安全保障新体系研究[J]. *社会科学辑刊*, 2019(6): 109-117.
Li D H, Han L M. Study on building a new safeguard system of food security by ordinating land and sea[J]. *Social Science Journal*, 2019(6): 109-117 (in Chinese).
- [16] 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 (in Chinese).
- [17] Holm P, Buck B H, Langan R. Introduction: new approaches to sustainable offshore food production and the development of offshore platforms[M]//Buck B H, Langan R. *Aquaculture perspective of Multi-Use Sites in the open ocean: the untapped potential for marine resources in the anthropocene*. Switzerland: Springer, 2017: 1-20.
- [18] 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 (in Chinese).
- [19] 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.
- [20] 侯娟, 周为峰, 王鲁民, 等. 中国深远海养殖潜力的空间分析[J]. *资源科学*, 2020, 42(7): 1325-1337.
Hou J, Zhou W F, Wang L M, *et al.* Spatial analysis of the potential of deep-sea aquaculture in China[J]. *Resources Science*, 2020, 42(7): 1325-1337 (in Chinese).
- [21] Yu S E, Dong S L, Zhang Z X, *et al.* Mapping the potential for offshore aquaculture of salmonids in the Yellow Sea[J]. *Marine Life Science & Technology*, 2022, 4(3): 329-342.
- [22] Naylor R L, Hardy R W, Buschmann A H, *et al.* A 20-year retrospective review of global aquaculture[J]. *Nature*, 2021, 591(7851): 551-563.
- [23] USCOP. An ocean blueprint for the 21st century[R]. Washington, D. C.: U. S. Commission on Ocean Policy, 2004.
- [24] 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. 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
Fisheries and Fisheries Administration Bureau, MARA of P R China, National Fisheries Technology Extension Station, Chinese Society of Fisheries. *China fisheries statistics yearbook*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022 (in Chinese).
- [25] Lester S E, Stevens J M, Gentry R R, *et al.* Marine spatial planning makes room for offshore aquaculture in crowded coastal waters[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 945.
- [26] 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.
- [27] 王金环, 都基隆. 基于粮食安全视角发展海洋渔业的必要性分析[J]. *科技促进发展*, 2013(5): 72-76.
Wang J H, Du J L. Study on the necessity of marine fishery based on food safety[J]. *Science & Technology for Development*, 2013(5): 72-76 (in Chinese).
- [28] McKindsey C W. Carrying capacity for sustainable bivalve aquaculture[M]//Christou P, Savin R, Costa-Pierce B A, *et al.* *Sustainable food production*. New York: Springer, 2013.
- [29] Chopin T. Progression of the integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) concept and upscaling of IMTA systems towards commercialization[J]. *Aquaculture Europe*, 2012, 36(4): 5-12.

- [30] Waite R, Beveridge M, Brummett R, *et al.* Improving productivity and environmental performance of aquaculture[R]. Washington, D. C. : World Resources Institute, 2014: 60.
- [31] Lembo G, Mente E. Organic aquaculture: impacts and future developments[M]. Switzerland: Springer, 2019.
- [32] Tang Q S, Zhang J H, Fang J G. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 424: 97-104.
- [33] Moore D, Heilweck M, Petros P. Cultivate shellfish to remediate the atmosphere[M]//Moore D, Heilweck M, Petros P. Aquaculture: Ocean Blue Carbon Meets UN-SDGS. Switzerland: Springer, 2022.
- [34] Frankignoulle M, Canon C, Gattuso J P. Marine calcification as a source of carbon dioxide: positive feedback of increasing atmospheric CO₂[J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39: 458-462.
- [35] Munari C, Rossetti E, Mistri M. Shell formation in cultivated bivalves cannot be part of carbon trading systems: a study case with *Mytilus galloprovincialis*[J]. *Marine Environmental Research*, 2013, 92: 264-267.
- [36] Morris J P, Humphreys M P. Modelling seawater carbonate chemistry in shellfish aquaculture regions: insights into CO₂ release associated with shell formation and growth[J]. *Aquaculture*, 2019, 501: 338-344.
- [37] Yang B, Gao X L, Zhao J M, *et al.* Massive shellfish farming might accelerate coastal acidification: a case study on carbonate system dynamics in a bay scallop (*Argopecten irradians*) farming area, North Yellow Sea[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 798: 149214.
- [38] Liu Y, Zhang J H, Wu W G, *et al.* Effects of shellfish and macro-algae IMTA in North China on the environment, inorganic carbon system, organic carbon system, and sea-air CO₂ fluxes[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 864306.
- [39] Dong S L, Tian X L, Gao Q F. Aquaculture ecology[M]. Switzerland: Springer, 2023.
- [40] Lovatelli A, Aguilar-Manjarrez J, Soto D. FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings No. 24: expanding mariculture farther offshore: technical, environmental, spatial and governance challenges[C]. Orbetello: FAO, 2010.
- [41] 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.
- [42] Langan R. Ocean cage culture[M]//Tidwell J H. Aquaculture production systems. Oxford: Wiley-Blackwell, 2012.
- [43] Dalton R. Bill on deep-sea fish farms brings wave of disapproval[J]. *Nature*, 2005, 435(7045): 1014.
- [44] Fairbanks L. Policy mobilities and the sociomateriality of U. S. offshore aquaculture governance[J]. *Environment and Planning C: Politics and Space*, 2019, 37(5): 849-867.
- [45] Nash C E. The history of aquaculture[M]. Iowa: Wiley-Blackwell, 2011.
- [46] 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.
- [47] Li L, Jiang Z Y, Wang J G, *et al.* Numerical study on the heading misalignment and current velocity reduction of a vessel-shaped offshore fish farm[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2019, 141(5): 051602.
- [48] 胡方珍, 盛伟群, 王体涛. 深远海养殖装备技术现状及标准化工作建议[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 (in Chinese).
- [49] 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.
- Xu H, Liu H, Xu Y F. Current situation and prospect of China's far-reaching marine aquaculture[J]. *China Fisheries*, 2021(6): 36-39 (in Chinese).
- [50] 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 (in Chinese).
- [51] 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 (in Chinese).
- [52] Yu J F, Dong S L, Zhou Y G, *et al.* Effects of different types of air supplementation on rainbow trout confined underwater[J]. *Aquacultural Engineering*, 2022, 96: 102214.
- [53] 张建波, 王宇, 聂雪军, 等. 智慧渔业时代的深远海养殖平台控制系统[J]. *物联网学报*, 2021, 5(4): 120-136.
Zhang J B, Wang Y, Nie X J, *et al.* Offshore aquaculture platform control system in intelligent fishery era[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2021, 5(4): 120-136 (in Chinese).
- [54] 李道亮. 无人渔场引领农业智能化[J]. *机器人产业*, 2020(4): 46-51.
Li D L. Unmanned fish farm lead to intelligent agriculture[J]. *Robot Industry*, 2020(4): 46-51 (in Chinese).
- [55] Yang X T, Zhang S, Liu J T, *et al.* Deep learning for smart fish farming: applications, opportunities and challenges[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2021, 13(1): 66-90.
- [56] Wu Y H, Duan Y H, Wei Y G, *et al.* Application of intelligent and unmanned equipment in aquaculture: a review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 199: 107201.
- [57] Wahlberg M, Westerberg H. Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 288: 295-309.
- [58] Wilhelmsson D, Malm T, Öhman M C. The influence of offshore windpower on demersal fish[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2006, 63(5): 775-784.
- [59] Kaiser M J, Snyder B, Yu Y K. A review of the feasibility, costs, and benefits of platform-based open ocean aquaculture in the Gulf of Mexico[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2011, 54(10): 721-730.
- [60] Wever L, Krause G, Buck B H. Lessons from stakeholder dialogues on marine aquaculture in offshore wind farms: perceived potentials, constraints and research gaps[J]. *Marine Policy*, 2015, 51: 251-259.
- [61] Röckmann C, Lagerveld S, Stavenuiter J. Operation and maintenance costs of offshore wind farms and potential multi-use platforms in the Dutch North Sea[M]//Buck B H, Langan R. *Aquaculture perspective of Multi-Use Sites in the open ocean: the untapped potential for marine resources in the anthropocene*. Switzerland: Springer, 2017.
- [62] He W. Jacket-cage: dual-use the jacket foundation of offshore wind turbine for aquaculture farming[J]. *Wind Engineering*, 2015, 39(3): 311-320.
- [63] Jansen H M, van den Burg S, Bolman B, *et al.* The feasibility of offshore aquaculture and its potential for multi-use in the North Sea[J]. *Aquaculture International*, 2016, 24(3): 735-756.

Toward offshore aquaculture in China: opportunities, challenges and development strategies

DONG Shuanglin^{1*}, DONG Yunwei¹, HUANG Liuyi¹, TIAN Xiangli¹,
HAN Limin², LI Dahai², CAO Ling³

(1. Key Laboratory of Mariculture of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Institute of Marine Development, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3. School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper classifies and compares different types of mariculture and equipment involved in deeper offshore aquaculture according to China's national conditions, and reviews the opportunities, challenges and development strategies facing nearshore and offshore aquaculture, especially deeper offshore aquaculture. Mariculture can be divided into coastal aquaculture, off-the-coast aquaculture, offshore aquaculture, and deeper offshore aquaculture, and the first two can be collectively referred to as nearshore aquaculture. Deeper offshore aquaculture or equipped offshore aquaculture refers to offshore aquaculture that employs steel framework and automatic feeding system, that withstands or can avoid strong typhoons. The equipment of deeper offshore aquaculture includes offshore pens, composite steel cages (including semi-submersible and fully submersible ones), vessel-shaped cages (powered or unpowered) and sea-based aquaculture tanks (including aquaculture vessels and closed aquaculture tanks). The development from coastal to off-the-coast and further offshore mariculture has been an academic consensus and an inherent demand of the aquaculture industry in China. Stocking appropriate species and quantity of juveniles according to the ecological carrying capacity and social carrying capacity of the aquaculture waters, carrying out multi-trophic integrated aquaculture, and implementing industrial integration development are efficient ways to improve the production and economic benefits of off-the-coast and offshore aquaculture. Considering the coexistence of nearshore aquaculture, offshore aquaculture and deeper offshore aquaculture at present, deeper offshore aquaculture can only be profitable by cultivating higher-quality species that are difficult to cultivate in ponds, coastal waters and off-the-coast waters, or species that can gain additional income through deeper offshore aquaculture. Fish-oriented intelligentization based on knowledge of fish behavior and physiology is the current shortcoming of intelligent deeper offshore aquaculture, which can only be solved through in-depth cooperation among experts in aquaculture, fish biology, engineering and information technology. The development of deeper offshore aquaculture is in urgent need of a large-scale innovative operation model that integrates aquaculture, food processing, logistics, wind power generation, tourism etc., to achieve a triple win for environmental protection, economy and people's wellbeing.

Key words: nearshore aquaculture; offshore aquaculture; opportunities; challenges; development strategies; China

Corresponding author: DONG Shuanglin. E-mail: dongsl@ouc.edu.cn

Funding projects: NSFC-Shandong Province Joint Science Foundation (U1906206); Project of Taishan Industry Leader of Shandong (LJNY201801)