

引用格式: 阳杰, 张建华, 马兆荣, 等. 海上风电与海洋牧场融合发展趋势与技术挑战 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 1-16. YANG Jie, ZHANG Jianhua, MA Zhaorong, et al. Development trend and technical challenges of the integration of offshore wind turbine with marine ranch [J]. Southern energy construction, 2024, 11(2): 1-16. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.01](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.01).

海上风电与海洋牧场融合发展趋势与技术挑战

阳杰^{1,2,✉}, 张建华¹, 马兆荣², 刘东华², 王洪庆², 尹梓炜²

(1. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的]在“双碳”目标及“海洋强国”战略背景下,以海上风电为代表的海洋可再生能源和以海洋牧场为代表的海洋资源融合发展是未来海洋资源开发利用的新方向、新形势、新机遇。文章针对海上风电与海洋牧场融合发展模式及关键技术进行了综述分析,以向国内相关研究和工程项目提供技术参考。[方法]以我国海洋资源融合开发需求为导向,分析海上风电与海洋牧场融合全球发展趋势,明确我国风渔融合发展的现状与短板;在此基础上,重点剖析了海上风电与海洋牧场融合发展的融合模式、装备设计、工程案例及关键技术问题,最后对我国海上风电与海洋牧场融合发展进行了未来展望。[结果]通过对海上风电与海洋牧场融合发展模式及关键技术问题进行梳理分析,阐明了瓶颈问题及技术挑战,指出了未来突破方向,为我国海上资源综合利用提供了科学指导和参考依据。[结论]文章说明了海上风电与海洋牧场融合发展的必要性和可行性,提出了我国海上风电与海洋牧场融合的可行途径。

关键词: 风渔融合; 海上风电; 海洋牧场; 一体化技术; 多能互补

中图分类号: TK89; TK81

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)02-0001-16

DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.01](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.01)

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Development Trend and Technical Challenges of the Integration of Offshore Wind Turbine with Marine Ranch

YANG Jie^{1,2,✉}, ZHANG Jianhua¹, MA Zhaorong², LIU Donghua², WANG Hongqing², YIN Ziwei²

(1. College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Under the background of "carbon peak and neutrality" target and "ocean power" strategy, the integration of ocean renewable energy represented by offshore wind power and ocean resources represented by marine ranch is the new direction, new situation and new opportunity for the future development and utilization of ocean resources. The article reviews and analyzes the integrated development mode and key technical problems of offshore wind power and marine pasture, in order to provide technical references to the relevant research and engineering projects in China. [Method] Taking the integration of China's marine resources development needs as the guide, the global development trend of offshore wind power and marine ranch integration was analyzed, and the current situation and shortcomings of China's wind-fishery integration development were clarified. On this basis, the integration mode, equipment design, engineering cases and key technical problems of the integration development of offshore wind power and ocean ranch were analyzed in detail. Finally, a future outlook on the integration development of offshore wind power and ocean ranch in China was discussed. [Result] Through the analysis of the integrated development mode and key technical problems of the integration of offshore wind power and marine ranch development, the bottlenecks and technical challenges are clarified, and the key breakthrough directions are pointed out, providing scientific guidance and reference basis for the comprehensive development and utilization of offshore resources in China. [Conclusion] The article illustrates the necessity and feasibility of integrating the development of offshore wind power and marine ranch, and proposes a feasible way to integrate offshore wind power and marine ranch in China.

收稿日期: 2024-03-05 修回日期: 2024-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于悬挂调谐质量惯容阻尼器的大型浮式风机减振机理及分析方法研究”(52271268); 中国能建广东院科技项目“多能融合浮式平台概念设计及关键技术研究”(EV11251W)

Key words: wind-fisheries integration; offshore wind power; marine ranch; integrated dynamic modeling; multi-functional complementary

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

在“碳达峰、碳中和”及“海洋强国”战略背景下,我国的能源结构正由传统化石能源体系向低碳、清洁、安全的可再生能源体系转变,其中风能显示出巨大潜力,已逐渐成为商业化程度最高、年发电量最大的绿色可再生能源之一^[1]。与此同时,作为重要的海洋资源,我国的海洋渔业也极具开发价值,现代化海洋牧场的出现大幅提升了海洋渔业资源的开发效率,推动海洋养殖模式向深远海化、智能化及可持续发展,目前正处于大力探索研究、示范发展的阶段。然而,由于近海海上风电规划区与海洋牧场规划区、军事规划区、生态环境保护及交通航道等因素的冲突加剧,海域利用率低,未来深远海海上风电与现代化海洋牧场融合必将成为发展趋势^[2]。

随着海洋能源与海洋资源的开发逐步走向深远海,深海风能与渔业资源的开发不仅技术难度提高,且单一形式的海洋资源开发装备具有成本高、经济性差、海域利用率低以及商业化难度大等弊端。在此背景下,开发综合利用海洋能源与渔业资源的多元融合发展模式具备集约用海、立体用海的优势,也是促进深远海海上风电与现代化海洋牧场大规模商业化开发的有效途径。海上风电与海洋牧场融合发展可以共享海上空间资源、协同设计、建设和运维,降低两者单独开发的设计、建造及运维成本,提高综合开发整体收益。海上风电场供电系统可为海洋牧场养殖就近提供电力,海上风电场通信系统可为海洋牧场提供远程监测、自动控制等智能化功能,海上风电场的结构设施可以为海洋牧场提供安全遮蔽支持。基于以上原因,海上风电与海洋牧场融合开发对于推动海上风电和海洋牧场共同向智能化、深远海化发展具有重要意义,是推动新旧能源体系转换及海洋强国发展的重要路径。

1 海上风电与海洋牧场融合发展现状

1.1 国外海上风电与海洋牧场融合发展现状

最早在 21 世纪初,以德国、荷兰等为代表的欧

盟国家开始了海上风电与海洋牧场融合的探索^[3]。2000 年,德国在启动了“海洋牧场-海上风电场多用途利用先驱项目”(Pioneer Projects of Aquaculture-Wind Farm Multi-Uses)^[4],此项目在北海开展了多项风渔融合研究子项目:(1)The feasibility study 项目研究了在北海开展风渔融合的经济性与可行性,并提出了 4 种风渔结合概念,主要是将贝藻类养殖延绳、筏架固定在单桩基础的海上风力机上,以达到海域空间集约利用的目的,详见图 1;(2)Open Ocean Aquaculture 项目研究了在风电场内部养殖贻贝及海藻的技术可行性和经济性;(3)Roter Sand 项目研究了不同材料与功能的贝藻养殖延绳与风机基础的连接方式及适用性;(4)Open Ocean Multi-Use 项目研

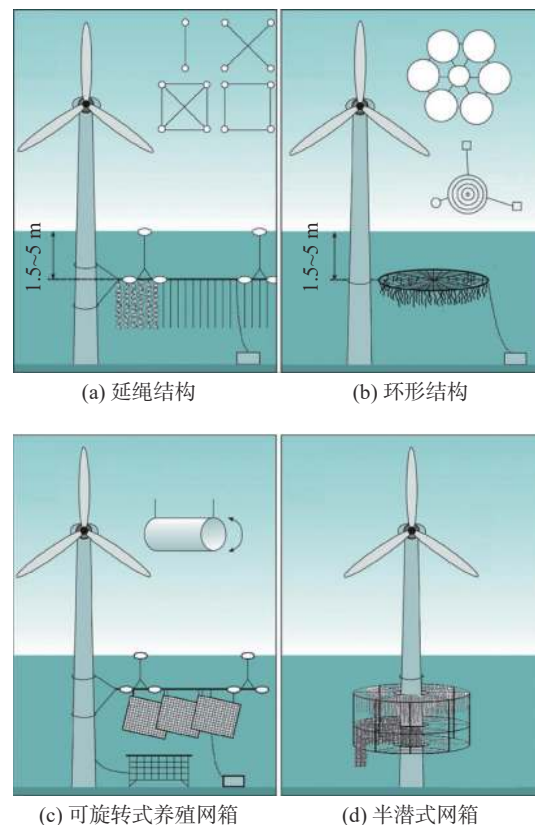


图 1 4 种海上风电单桩基础风渔融合概念^[4]

Fig. 1 Four concepts of integrating offshore wind turbine monopile foundation with aquaculture^[4]

究了固定式三桩海上风电基础与半潜式养殖网箱融合的技术可行性及经济性,提出了2种不同的融合方案并进行了模型试验^[5],详见图2^[6]。2011年,欧盟多国共同发起了一项名为“The Ocean of Tomorrow”的倡议,其中倡议主题就包括了一项“多用途海上平台”研究计划,计划中包含H20CEAN、MERMAID和TROPOS等项目^[7]。其中,TROPOS项目中提出了漂浮式风渔融合多用途平台概念,并对此进行了水池模型试验研究,这是最早的漂浮式风渔融合试验之一^[8],详见图3^[7]。2012年,荷兰Ecofys和Hortimare公司联合开展了海上风电与海藻养殖融合研究,这是风渔融合最早的海上大规模试验之一^[4]。2015年,挪威科学和工业研究基金会与挪威国家石油公司合作开展了一项利用海上风电场空白水域同时进行三文鱼、贻贝以及海藻养殖的风渔融合项目(Integrated Multi-Trophic Aquaculture, IMTA)研究,项目养殖区域位于北海南部海域,水深为40 m,离岸距离为100 km,详见图4^[9]。2017年,比利时开展了“Edulis”项目,该项目研究了在海上风电场海域中进行贻贝养殖的技术可行性和经济性,项目首次试验海域位于C-Power海上风电场,第二次试验海域位于Belwind海上风电场,该项目产生了较好的经济效应,证明了海上风电场中贻贝养殖的可行性^[10]。2020年,挪威三文鱼生产商SalMar公司提出了一型风渔融合多功能平台概念Hex Box,平台的养殖水体达 $4.25 \times 10^5 \text{ m}^3$,配备3台60 kW的风力发电机,设计波高为10 m,详见图5^[11]。Hex Box风渔融合概念是海上风电与海洋牧场共结构融合的典型概念,但是,此概念目前

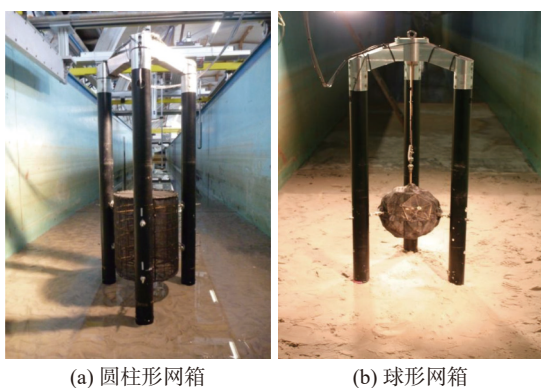


图2 两种海上风电三桩基础与半潜式网箱融合概念^[6]

Fig. 2 Two concepts of integrating offshore wind turbine triple pile foundation with semi-submersible aquaculture^[6]

并未真正投入使用。在亚洲地区,韩国是较早开展风渔融合研究的国家,韩国在2016年针对其海上风电场提出了海上风电与贝类及藻类养殖结合的概念,详见图6^[12]。该项目研究结果表明,在海上风电场中进行双壳贝类及海藻等海产品养殖的产量较其他海域的养殖产量增加^[12]。

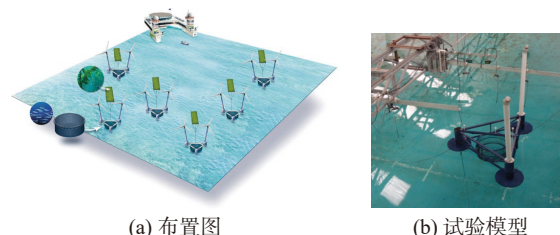


图3 TROPOS 漂浮式风渔融合概念^[7]

Fig. 3 The concept of integrating floating offshore wind turbine with aquaculture (TROPOS)^[7]

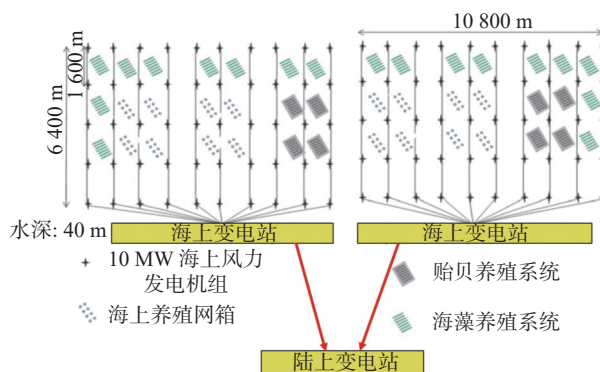


图4 Sintef-Statoil 北海风渔融合设计图^[9]

Fig. 4 Sintef-Statoil IMTA design for the North Sea^[9]



图5 Hex Box 风渔融合概念^[11]

Fig. 5 Hex Box concept of integrating floating offshore wind turbine with aquaculture^[11]

1.2 国内海上风电与海洋牧场融合发展现状

近年来,我国高度重视海上风电与海洋牧场的融合发展,多省出台相关政策扶持产业发展。如,广

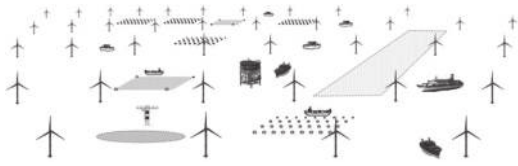


图 6 海上风电与贝藻类养殖融合概念^[12]

Fig. 6 The concept of integrating offshore wind turbines with shellfish aquaculture^[12]

东省印发《关于加快海洋渔业转型升级促进现代化海洋牧场高质量发展的若干措施》，山东省也提出了海上风渔融合发展相关规划^[13]。除了相关政策推动外，近年来我国海上风电产业取得了跨越式发展，现代化海洋牧场也正逐步寻求深水海域的布局与突破，都促使我国开始积极探索海上风电与海洋牧场融合发展的新模式、新装备。2018年，我国首个“海上风电+海洋牧场”融合发展研究试验项目“莱州海上风电+海洋牧场”项目获准，并于2022年11月实现首批机组并网^[14]。2019年，山东昌邑海洋牧场与三峡300 MW海上风电融合试验示范项目获准，并于2022年12月实现并网发电^[15]。2019年12月，广东省阳江市阳西青洲岛风电融合海域国家级海洋牧场示范区获批为第五批国家级海洋牧场示范区，阳西示范区海域面积为497 km²，是全国海域面积最大的国家级海洋牧场示范区^[16]。2020年，广东“阳江沙扒深海渔业养殖实验区项目”立项，项目依托阳江沙扒300 MW风电场，在风电场内安装一座抗台型重力式HDPE(高密度聚乙烯)养殖网箱，该项目是国内首个完成建设的风渔融合示范项目^[17]。2021年，福建平潭“深远海养殖海上风电融合发展试验项目”在试验风电场内投放钢制养殖网箱，试验养殖石斑鱼、鲷科类等鱼种，并开展了海上风电场噪声等环境要素对海洋牧场养殖的影响研究，对推动海上风电场与海洋牧场融合发展提供了可行性验证^[18]。2022年2月，广东省阳江南鹏岛海域中广核国家级海洋牧场示范区获批为第七批国家级海洋牧场示范区，该风渔融合示范区将规划建设人工鱼礁区、四桩桩基网箱养殖试验区、智慧渔场区及贝类底播吊养区^[19]。2022年5月，国家电投“新能源+海洋牧场”融合创新示范基地开工建设，该项目计划打造“海洋能源+海洋牧场+海洋碳汇+海洋生态修复”融合创新的风渔融合示范项目^[20]。2022年11月，明阳集团“东方CZ9海上风电场示范项目”正式动工，项目计划将建

设成“海上风电+海洋牧场+海水制氢”创新开发示范项目，打造海南首个海洋能源立体化融合示范项目^[21]。2023年8月，我国自主研发的风渔融合一体化智能养殖网箱“明渔一号”在阳江青洲四海上风电场正式吊装成功，“明渔一号”首次实现了风机导管架基础与网箱养殖的深度融合，其导管架融合网箱养殖水体约为5000 m³^[22]，详见图7。2023年11月，国家能源集团龙源电力开发建设的全球首个“漂浮式海上风电与养殖融合项目”正式完工并落户福建省莆田市，项目建成的“国能共享号”平台是由“漂浮式风机+养殖网箱”组成，平台由三立柱半潜式平台、4 MW海上风力机、网衣系统和系泊锚固系统等组成，养殖水体为10000 m³，详见图8^[23]。2023年9月，中广核“汕尾后湖渔业网箱与科研综合实验平台项目”立项，该项目将采用固定式海上风电场与固定式养殖网箱共场域融合的风渔融合方式，

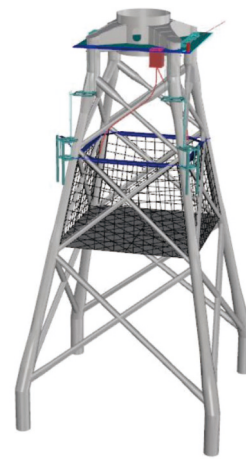


图 7 “明渔一号”导管架基础

Fig. 7 Jacket foundation of Ming Fish No. 1



图 8 “国能共享号”概念图^[23]

Fig. 8 Conceptual diagram of the National Energy Sharing Vessel^[23]

该项目目前仍处于建造阶段。目前国内已立项风渔融合工程项目基本信息见表1。可以看出,目前我国的海上风电与海洋牧场融合发展迅速,目前已经初步进入了开发建设阶段。

2 海上风电与海洋牧场融合模式及工程案例分析

目前,根据海洋风电与海洋牧场2种产业的融

表1 国内已立项风渔融合项目基本情况

Tab. 1 Basic information on offshore wind turbine and marine ranch integration projects that have been established in China

项目名称	项目地点	融合类型	项目状态	项目规模
山东莱州海上风电与海洋牧场融合发展试验项目	山东省莱州市	海上风电+人工鱼礁+养殖网箱	2018年获准;2022年11月首批机组并网发电。	风电场装机总容量为304 MW,是全国首个海上风电与海洋牧场融合发展研究试验项目。
山东昌邑海洋牧场与三峡300 MW海上风电融合试验示范项目	山东省昌邑市	海上风电+人工鱼礁+贝藻类养殖	2019年获准;2022年12月实现并网发电。	风电场装机总容量为300 MW,场址离岸距离14~18 km。
阳西青洲岛风电融合海域国家级海洋牧场示范区	广东省阳江市	海上风电+人工鱼礁+养殖网箱	2019年12月批准为第五批国家级海洋牧场示范区。	示范区海域面积497平方公里,为全国海域面积最大的国家级海洋牧场示范区。
广东阳江沙扒深海渔业养殖实验区项目	广东省阳江市	海上风电+重力式养殖网箱	2020年立项;2022年1月实现养殖金鲳鱼收获。	依托阳江沙扒300 MW风电场,在风电场内放置一座抗台型HDPE养殖网箱,离岸距离30 km。
福建平潭深远海养殖海上风电融合发展试验项目	福建省福州市	海上风电+钢制养殖网箱	2021年12月实现并网发电。	在试验风电场内投放钢制养殖网箱,试验养殖石斑鱼、鲷科类等。
国家电投“新能源+海洋牧场”融合创新示范基地	广东省揭阳市	海上风电+人工鱼礁+景观旅游	2022年5月28日开工。	风电场装机总容量为315 MW,提出“海洋能源+海洋牧场+海洋碳汇+海洋生态修复”的“四海模式”。
明阳集团东方CZ9海上风电场示范项目	海南省东方市	海上风电+养殖网箱+海水制氢	2022年11月30日开工。	风电场装机总容量为1500 MW,为海南首个海洋能源立体开发示范项目。
阳江南鹏岛海域中广核国家级海洋牧场示范区	广东省阳江市	海上风电+人工鱼礁+养殖网箱	2022年2月批准为第七批国家级海洋牧场示范区。	规划建设人工鱼礁区、四桩桩基网箱养殖试验区、智慧渔场区、贝类底播吊样区。
青州四海上风电场与网箱融合示范项目	广东省阳江市	导管架基础+养殖网箱	2023年4月,开工建造;2023年8月,风机吊装成功。	风电场装机总容量为500 MW,其导管架融合网箱养殖水体约为5000 m ³ ,可养殖金鲳鱼约15万尾。
福建龙源漂浮式海上风电与养殖融合项目“国能共享号”	福建省莆田市	半潜式基础+养殖网箱	2022年11月,半潜式浮体平台开工建造;2023年10月,平台完成安装。	基础型式采用三立柱半潜式结构,安装1台4 MW漂浮式海上风电机组,平台养殖水体约为10000 m ³ 。
汕尾后湖渔业网箱与科研综合实验平台项目	广东省汕尾市	海上风电+桁架式养殖网箱	2023年8月立项,目前处于建造阶段。	风电场装机总容量为500 MW,养殖网箱主体结构长70 m,宽35 m,养殖水体约60000 m ³ 。

合及交互程度,风渔融合模式主要可以分为共场域融合模式和共结构融合模式两类。共场域融合模式可以分为“海上风电+人工鱼礁”“海上风电+贝类藻类”“海上风电+养殖网箱”及“海上风电+休闲渔旅”4种融合方案。共结构融合模式可以分为固定式基础融合和漂浮式基础融合两种方案。

共场域融合指的是在海上风电场区域内部规划海洋牧场养殖区域,利用海上风电机组之间的空白海域,进行海洋渔业养殖。一方面通过外围的海上风电结构设施保证渔业养殖设施的安全,防止附近船舶失控碰撞,防止外部恶劣环境的影响。另一方面,在海上风电项目的设计阶段,对海洋牧场及其他需要供电产业进行接口预留,从而实现在基本不增加风电造价的前提下,实现海洋牧场在建设期的自由化,实时建成实时接入,自由扩展用海规模,自行确定养殖品种。

共结构融合指的是通过固定式或漂浮式风机基础与海洋牧场装备进行融合设计,即在固定式或漂浮式风机基础设计时,考虑加装养殖装备(主要是网衣)所增加的工作载荷,以形成新型的海上风电与海洋牧场一体化装备。

2.1 共场域融合模式

2.1.1 “海上风电+人工鱼礁”融合方案

“海上风电+人工鱼礁”的融合方案主要通过通过在固定式风电基础周围投放人工鱼礁,并在礁群上设立一定数量的光源,形成有利于海洋生物的仿自然生态环境,一方面可以吸引鱼类聚集和产卵,养护渔业资源,另一方面可以达到风电桩基础冲刷防护的效果,如图9^[24]所示。在海上风电场中投放人工鱼礁可以改善海域生态环境,营造海洋生物栖息的良好环境,为海洋生物提供繁殖及生长的人造场所,进

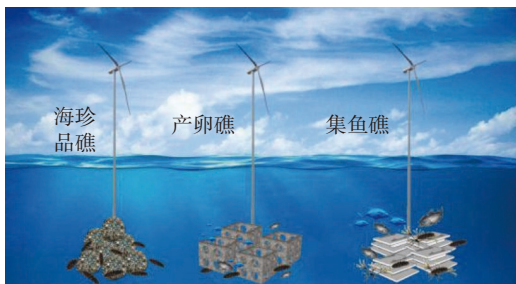


图9 “海上风电+人工鱼礁”融合方案^[24]

Fig. 9 Integrated solution of "offshore wind turbine and artificial reef"^[24]

而达到保护、增殖和提高渔获量的目的。“海上风电+人工鱼礁”融合方案主要重生态效益。

山东昌邑海洋牧场与三峡 300 MW 海上风电融合试验示范项目是“海上风电+人工鱼礁”的融合方案的典型代表,该项目通过在海上风电场中投放产卵礁、集鱼礁和海珍品礁等,为海洋生物提供人工栖息及繁殖场所,改善海上风电场海域的海洋生态环境^[24]。

2.1.2 “海上风电+贝藻类”融合方案

“海上风电+贝藻类”融合方案是将贝藻类养殖浮子和绳索组成浮式筏架,并通过缆绳将筏架固定于海上风电场区域海底,使藻类和贝类幼苗附着在浮筏上悬挂的绳索上进行养殖,如图10^[4]所示。“海上风电+贝藻类”融合方案与海上风电场不存在结构融合,潜在冲突较小,布设方便。



图10 “海上风电+贝藻类”融合方案^[4]

Fig. 10 Integrated solution of "offshore wind turbine with shellfish and algae"^[4]

目前,对藻类和贻贝养殖的研究是风渔融合养殖品种研究中最丰富的,从目前欧洲相关研究来看,贻贝养殖是风渔融合项目收益的主要方式,而藻类养殖的经济性较差,具体项目见表2。但是,由于风渔融合养殖品种的地区差异性较大,不同地区要进行不同分析,陈灏等^[16]通过研究分析了广东省海上风电场中建设马尾藻养殖场的可行性,证明了“海上

表2 “海上风电+贝藻类”融合项目

Tab. 2 Integrated project of "offshore wind turbine with shellfish and algae aquaculture"

序号	项目	融合类型	经济性
1	德国Nordergründe项目 ^[25]	海上风电+贻贝	可行
2	荷兰Borssele项目 ^[26]	海上风电+贻贝	可行
3	德国Pioneer Projects of Aquaculture-Wind Farm Multi-Uses项目 ^[4]	海上风电+海藻	不可行
4	荷兰北海养殖项目 ^[27]	海上风电+贻贝	可行
5	比利时Noordzee Aquacultuur项目 ^[28]	海上风电+贻贝	可行

风电+马尾藻”融合方案在广东省具备实施经济性。

2.1.3 “海上风电+养殖网箱”融合方案

“海上风电+独立养殖网箱”融合方案是根据不同养殖品种需求、水深、海洋环境条件等将不同类型的养殖网箱布设在海上风电机组之间的空白海域,通过海上风电场为海洋牧场供电,实现海上风电与海洋牧场共场域融合,共同建设、共同运维。根据不同型式的养殖网箱装备可以采用不同形式的融合方案。养殖网箱装备的选择需根据养殖品种、环境条件、智能化、经济性要求等因素具体选择:

1) 满足养殖品种的实际需求: 不同鱼类生活习性不同, 应匹配相应的养殖方式, 如石斑鱼不适合大规模水体养殖, 金鲳鱼适合大型网箱养殖等。

2) 环境因素: 根据水深、波浪、极端海况等条件, 定制设计对应的养殖设施。

3) 智能化要求: 自动投饵机、网衣清洗机器人、智能监测系统、传感系统等智能化设备是保障深远海养殖活动有序开展、把控养殖风险的重要手段, 根据最终养殖方案, 匹配对应设备系统。

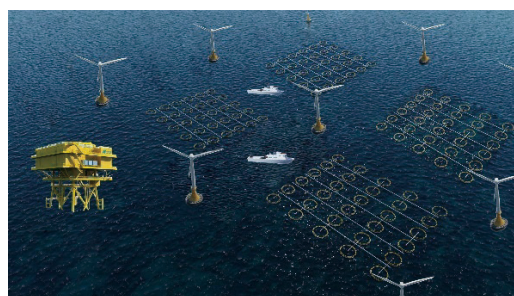
4) 经济性要求: 重力式 HDPE 网箱、深远海桁架式网箱等养殖装备的投资差异极大, 如一个 100 m 周长的抗风浪型 HDPE 网箱的价格多在 100 万元以内, 而一个 60000 m³ 深远海桁架式网箱的投资可能高达近亿元, 因此分别对应不同养殖模式、运维方式、附加经营模式等, 影响投资经济性评估。

目前, 主流的海上养殖网箱主要分为 3 类, 分别是重力式网箱、桁架类网箱以及养殖工船。“海上风电+独立养殖网箱”融合方案主要采用“海上风电+重力式网箱”及“海上风电+桁架类网箱”2 种方式, 具体融合方式如图 11 所示。

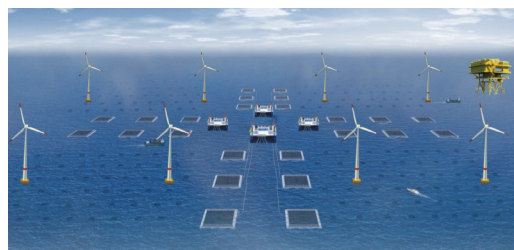
明阳智能阳江沙扒“海上风电+海洋牧场”融合示范项目是“海上风电+重力式网箱”的融合方案的典型代表, 项目在阳江沙扒 300 MW 风电场内放置一座周长为 80 m 的抗台型 HDPE 养殖网箱, 网箱离岸距离 30 km, 自 2021 年 8 月安装成功后, 所养殖的金鲳鱼已成功收获, 这也证明了通过海上风电空白区域进行渔业养殖可行性^[17]。

2.1.4 “海上风电+休闲渔旅”融合方案

“海上风电+休闲渔旅”融合方案是以海上风电场能源资源为基础, 结合具备先进养殖设施的海洋渔业生产人工浮岛平台和深海智能网箱, 形成风电



(a) 海上风电+重力式网箱



(b) 海上风电+桁架类网箱

图 11 “海上风电+养殖网箱”融合方案

Fig. 11 Integrated solution of "offshore wind turbine with aquaculture"

场能源转化、渔业生产、休闲旅游、环境保护的海洋开发产业综合体。

“耕海一号”是“海上风电+休闲渔旅”融合方案的典型代表, “耕海一号”将海上风电、渔业养殖、智慧渔业、休闲文旅、科技研发、科普教育等功能集于一体, 年可接待游客 5 万人次以上, 是全国首座综合性、示范性、集成性的智能化大型现代生态海洋牧场综合体平台, 详见图 12^[29]。



图 12 “耕海一号”渔旅综合平台^[29]

Fig. 12 Integrated platform of tourism and aquaculture^[29]

共场域融合方案将海上风电与海洋牧场在结构上尽量分离, 相互独立, 互不干扰, 海上风机与海洋牧场分布相对松散, 技术风险低, 是当前近海海域海上风电和海洋牧场融合的首选方案。但是, 这种融

合方式属于空间融合,在结构融合和功能融合方面还存在一些缺点,虽然海上风机与养殖网箱处于同一海域,但两者间相对独立,海洋牧场布置需要考虑海上风机电缆布置、航道布置等因素,削弱了两者间的协同增益功能。

2.2 共结构融合方案

2.2.1 固定式基础共结构融合方案

目前,固定式风机基础主要分为单桩基础、导管架基础及吸力桶基础,根据风机基础不同可以形成不同的共结构融合方案。对于导管架基础,可在导管架平台的支撑结构围上网衣,形成封闭的养殖空间,具体图 13 所示;对于单桩基础或吸力桶基础,可以在风机基础周围附加养殖结构形成养殖空间。海上风电与海洋牧场融合结构是一种结合两种不同功能的复杂海洋工程结构,截至目前对于浅近海固定式风力机与海洋牧场共结构融合应用仍处于试验示范阶段^[30]。江俊杰提出在导管架平台的支撑结构上加装养殖网衣进行养殖,并对融合养殖网衣后的海上风机结构的动力响应进行了规律性分析^[31]。张天翼综合海上风电与海洋牧场设计理念,提出一型固定式单桩海上风机基础融合钢结构海洋牧场的新型海上风渔融合结构,并对此概念进行了耦合动力响应分析与振动控制策略研究^[32]。



图 13 导管架基础共结构融合概念

Fig. 13 Concept of co-structural integration of jacket foundation

“明渔一号”是固定式基础共结构融合方案的典型代表,“明渔一号”采用导管架基础与养殖网衣共结构融合方案设计,导管架基础底部跟开 30 m,风机基础连距离 69 km,作业水深 45 ~ 48 m,海洋牧场

养殖水体约 5000 m³,网衣采用分片式布置方案,防止网衣与导管架基础发生摩擦,分片式网衣通过网衣工装与导管架连接,具体网衣布置方案如图 14 所示。“明渔一号”首批投放 10000 尾金鲳鱼,养殖密度为 10 ~ 15 kg/m³。据了解,“明渔一号”导管架+网衣共结构融合方案可显著降低资源开发成本,具有较优的经济性,提高海上风电场整体收益率约 1.5%。

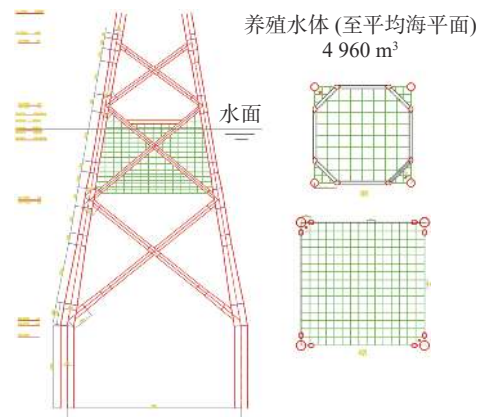


图 14 网衣布置方案

Fig. 14 Netting layout program

2.2.2 漂浮式基础共结构融合方案

目前,漂浮式风机基础主要分为单柱式基础、半潜式基础及张力腿式基础,根据风机基础不同可以形成不同的共结构融合方案。由于半潜式基础下部的空间较大,可为海水养殖提供空间,形成“上部发电、下部养鱼”的共结构融合模式,所以目前漂浮式基础共结构融合方案大都采用半潜式基础与养殖网箱融合方案。对于半潜式风机基础,可根据浮式基础下部的空间型式设计风渔结合一体化综合支撑平台,形成结构共融,融合型式如图 8 所示。

目前,国内外对于漂浮式风渔融合一体化装备的研究仍处于起步阶段。Zheng 和 Lei^[33]提出了一型融合半潜式基础与养殖网箱的风渔融合一体化平台 FOWT-SFFC,见图 15(a),并将 FOWT-SFFC 平台的动力响应特性与 OC3-Hywind^[34]及 OC4-DeepCwind^[35]漂浮式风力机进行了对比分析,结果表明新型风渔融合一体化平台的动力响应特性在极端工况时较其他两型漂浮式风力机更优。Chu 等^[36]提出了一型融合单柱式基础与养殖网箱的风渔融合一体化平台 COSPAR,见图 15(b),并对 COSPAR 平台进行了动力响应分析,对比了有无风机下单柱式养殖平台的

响应, 结果表明 COSPAR 平台在垂荡及纵摇方向的响应小于无风机下的漂浮式养殖平台。钟豪^[37]提出了一型八边形半潜式基础风机与养殖网箱融合的风电渔场综合平台, 见图 15(c), 并对选取不同的环境情况对风电渔场综合平台进行频域和时域响应分析。Zheng^[38-39]提出了一型融合半潜式垂直轴风机、海洋牧场及光伏发电的漂浮式多功能综合平台 WSA, 见图 15(d), 并通过数值模拟及水池模型试验分析了漂浮式多功能综合平台的动力响应特性, 证明了概念的可行性。Li 等^[40]提出了一型融合半潜式风机基础、波浪能发电装置及海洋牧场的漂浮式多功能综合平台 Blue Growth Farm, 见图 15(e), 并对 Blue Growth Farm 在典型环境下的水动力性能进行了分析, 得到了多功能综合平台的耦合动力响应特性。

“国能共享号”是漂浮式基础共结构融合方案的典型代表, 也是全球首个漂浮式风渔融合项目, “国能共享号”采用三立柱半潜式基础与养殖网箱共结构融合方案设计, 由浮式基础、4 MW 海上风力机、养殖网箱及系泊系统组成, 平台立柱高 28 m, 立柱间长 70 m, 设计吃水 14 m, 总重量 4900 t, 养殖水体容积约 10000 m³^[23]。

共结构融合方案的优势是可以充分利用海上风电支撑基础结构, 将海上风电与海洋牧场深度融合, 形成多功能平台, 实现真正的功能融合, 结构紧凑, 降本增效显著, 是未来深远海资源和能源综合开发的重要方向。但是, 目前共结构融合方案还有许多关键问题亟需解决, 如新型融合装备的防腐要求提高、网衣带来的水动力载荷影响、风机基础与养殖网衣间的相互作用机制不明等等, 短期技术风险和成本较高。

3 海上风电与海洋牧场融合发展关键技术问题

目前, 海上风电与海洋牧场融合应用仍处于探索和试验示范阶段, 在风渔融合选址规范、建设模式、技术发展、鱼种选择、生态评估及经济可行性方面还存在许多关键技术问题, 在后续的探索和研究过程中, 需要重点关注以下问题。

3.1 风渔共场域融合选址及布局设计

对于海上风电与海洋牧场共场域融合模式, 最重要的问题之一就是共址选择及布局设计问题。海

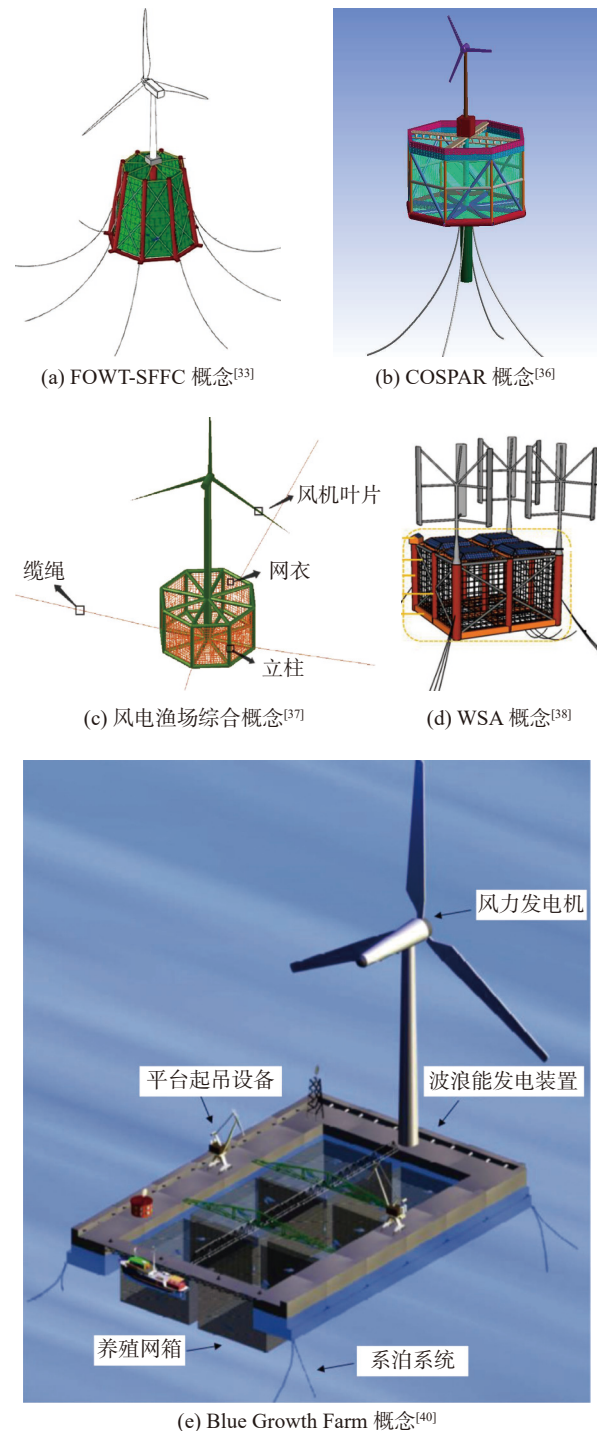


图 15 漂浮式基础共结构融合方案

Fig. 15 Concept of co-structural integration of floating offshore foundation

上风电选址和海洋牧场选址都有各自不同的场址选择方法, 进行风渔融合选址需要同时兼顾海上风电场的海域地址要求以及海洋牧场的海域生态要求。目前, 风渔融合场址大多数都是在已规划或建成的

海上风电场中进行选址,但是许多海上风电场受到地理位置及海洋环境条件限制,并不适合于海洋牧场建设,因此在规划风渔融合项目时,应针对海洋牧场与海上风电融合开展全面的共址适宜性研究。

在共址方法研究方面,目前有许多学者对此进行了研究,Hooper 等^[41-42]对英国海上风电与海洋牧场共场域融合的可能性及阻碍因素进行了研究,分析了棕蟹及欧洲龙虾在海上风电场中的共址养殖的可行性。Gimpel 等^[43]运用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)和多重标准评估方法(multi-criteria evaluation, MCE)探索了德国风渔融合适用海域场址,为风渔共场域融合试点项目选址提供了合适地点。Di Tulli 等^[44]运用海洋空间规划及 MCE 方法开发了共址可持续发展指数用于研究丹麦海域海上风电与贻贝养殖共场域选址的适宜性,解决了丹麦沿海地区海上风力和贻贝养殖场的共存问题,为海上风电与海洋牧场融合选址提供了方法借鉴。Bonsu 等^[45]通过文献调研和政策分析研究了北海周边 7 个国家的海上风电与海洋牧场共址潜力及可行性,结果表明在北海 2030 年前建成的海上风电场中,采用海上风电与甲壳纲品种(如棕蟹及欧洲龙虾)养殖融合的经济性较好。莫爵亭等^[46]根据相关海洋监测法规,对广东省阳江海上风电海域的叶绿素 α 、初级生产力以及海洋生物种类进行了分析和统计,研究了在阳江海上风电场开展海上风电与海洋牧场融合项目的可行性,结果表明阳江海域具备风渔共址融合的生态基础和优势。李松^[47]采用层次分析法(AHP)法,以奉贤海上风电场为目标,对海上风电与海洋牧场融合选址的适宜性进行研究,结果表明奉贤海上风电场址具有风渔融合的良好条件,但需要优先建设修复型海洋牧场以解决水质环境和生物资源整体较差等问题。但是, GIS、MCE 及 AIP 等方法还未在实际风渔融合项目中得到运用,仍缺乏相关的验证机制。

通过风渔共场域融合研究可以发现,风渔融合共址主要需要考虑 3 个方面的因素:风电场因素、海域环境因素以及其他制约因素。风电场因素包括风电场离岸距离因素及自然灾害因素。风电场离岸距离的远近及是否有岛屿作为运维中转将直接影响海洋牧场日常投喂及运维的成本,而台风、寒潮等自然灾害的发生频率则会直接影响到海洋牧场运营的

经济性及安全性。海域环境因素主要包括水文环境条件、水质环境条件及生物资源条件。共址水域的水深、海流等水文环境条件将直接影响海洋牧场的养殖品种及数量,如流速大的海域不利于海洋生物聚集。共址水域的溶氧量、无机氮及磷酸盐等水质环境条件将会直接影响到海洋牧场的初级生产力,进而影响到养殖品种的增殖量。共址水域的浮游生物、底栖生物及渔业资源则是海洋牧场增殖的保障条件。除此之外,风渔融合共址选择的其他制约因素还包括社会经济因素及用海冲突因素等,在进行共址选择时需要综合考虑场址所在区域的经济基础、产业结构、用海规划及发展规划。

对于风渔共场域融合布局设计方面,规划时可遵循“总体融合、功能分离”的原则,即在风电场区域兼容海洋牧场的功能,但是两者的功能区有所分离,不产生干扰。在海上风电场中进行海洋牧场布局规划时需要避开海运主航道、运维航道及海底电缆等。在“总体融合、功能分离”的原则下,进一步考虑海上风电与海洋牧场的联合运营方案,将码头、运维船舶和运维人员统一调配,降低成本,实现两者的深度融合。

3.2 风渔共结构融合装备研发技术

风渔共结构融合装备与单一的海上风电装备及单一的海洋牧场装备相比,风渔共结构融合装备是一种结合两种不同功能的复杂海洋工程结构,其融合系统是一个复杂的多物理场、多体耦合系统,其中涉及包括空气动力学、水动力学、结构力学、弹性力学、材料学、环境学以及自动控制技术等,使得系统动力响应特性的复杂性与结构设计难度大大提高。

国内外学者针对深远海养殖平台的水动力特性研究取得了一定的进展^[48-50]。但是,风渔共结构融合装备若需有序地向深远海发展,仍亟需突破以下技术瓶颈:(1)深远海风渔共结构融合装备安全保障技术。目前风渔共结构融合装备的目标海域一般都是深远海海域,海域的海洋环境一般比较恶劣,大水深、台风、巨浪以及强流等恶劣海况都需要考虑,因此亟需通过数值模型、水池试验、海上模型试验等方法对风渔共结构融合装备开展水动力分析、结构安全评估分析、系泊安全分析、网衣装配分析及安装分析等安全保障技术研究,为融合发展奠定基础^[51-52];

(2) 深远海智慧海洋渔业养殖技术。风渔融合装备走向深远海是必然趋势, 传统的海洋牧场人工投喂及运维方案将不再适用于深远海海洋牧场, 因此亟需解决智能投饵、无人值守、海洋环境精准监测、网衣自动清洗、鱼群精准监测及伤残死鱼自动收集等实现深远海智慧海洋渔业养殖的关键性技术问题^[53]。人工智能、5G 技术、传感、大数据、云计算、卫星遥感等先进技术手段是实现深远海风渔融合最终落地的关键基础; (3) 风渔融合协同增效技术。风渔共结构融合如何实现协同开发, 降本增效是共结构融合方案的关键核心。海上风电与海洋牧场的空间布局设计、风机基础与养殖网衣间的相互作用过程和机制、海上风电对海洋牧场养殖环境的影响观测与综合评价, 以及协同运维技术的研发与应用等都是实现风渔融合协同增效亟需解决的问题^[54]。

3.3 风渔融合鱼种选择及培育

深远海风渔融合开发的经济效益与增殖鱼种的选择息息相关, 我国南北的养殖品种存在着巨大差异, 融合开发时需综合考虑风电选址与增殖鱼种。目前, 我国北方(辽宁、山东、河北)的海洋养殖以鲆鲽类冷水性鱼类为主, 而南方(海南、广东、福建)则是以石斑鱼、金鲳鱼、大黄鱼等为主。风渔融合开发鱼种的筛选应当遵循以下原则:

- 1) 养殖鱼类的温度耐受、最适生长温度应在网箱所在水域水温范围内。
- 2) 养殖鱼类需具备一定耐密集养殖能力。
- 3) 养殖鱼类应具有一定耐高流速的游泳能力。
- 4) 需要有适宜养殖鱼类生长的人工配合饲料产品。

以广东省为例, 目前, 广东省适合于深远海养殖的鱼种有石斑鱼、金鲳鱼、海鲈鱼、军曹鱼、大黄鱼、美国红鱼等, 各鱼种的生长适应性条件如表 3 所示。

目前, 广东省区域的风渔融合项目如“明渔一号”

表 3 养殖种类筛选表

Tab. 3 Selection table of breeding species

鱼种	抗流性强	广盐/‰	广温/℃	技术成熟	经济价值
石斑鱼	强	11~41	16~39	是	高
金鲳鱼	弱	4~28	18~35	是	一般
海鲈鱼	中等	2~34	1~36	是	一般
军曹鱼	强	4~35	20~31	是	高
大黄鱼	中等	24~34	10~32	是	高
美国红鱼	强	0~40	2~33	是	低

以及许多单独的海洋牧场在养殖品种上的选择仍然是以金鲳鱼等经济价值一般的鱼种为主。因此, 在未来的深远海风渔融合鱼种方面, 仍需要集合政府、高校、科研院所以及养殖企业等多方共同研究开发、引进、优选、培育适合当地的深远海养殖的高附加值和较强市场竞争力的鱼种, 丰富深远海养殖品种。

3.4 风渔融合生态影响评估

风渔融合开发前需要对海洋环境和海洋生物的影响评估, 目前海上风电对生态环境的影响来源主要包括噪声、电磁场等。对此, 国内外学者也针对此问题做了相关研究。

海上风电施工期噪声可能造成部分海洋生物出现物理损伤、生理行为异常和遮蔽效应^[55-56]。研究表明, 湖鲟^[56]、尼罗罗非鱼^[56]、欧洲鲈鱼^[57]、蓝贻贝^[58]、中华白海豚^[59]及大黄鱼^[60]等鱼类可能会受到海上风电施工期间噪声影响。但是, 施工期对于鱼类的生理影响是短暂的, 风机正常运行后的噪声将会大幅度减小, 声波传入水体中将进一步衰减^[61-62], 且不同型号的海上风力机具有不同的声学特性^[63]。因此在评估噪声影响时, 需要结合实际工程考虑不同的风机的声学特性、不同区域的经济鱼种的噪声耐受性。对于风渔融合开发区域的增殖鱼种, 鱼种离风机噪声源更近, 准确探明增殖品种对海上风电场噪声的反应及耐受度非常重要。

海上风电产生的电磁辐射来源主要包括海上风力机组、海上升压站以及海底电缆, 其中海底电缆是电磁辐射影响主要来源^[13]。但是, 海底电缆均敷设于海底土层以下, 除此之外, 海底电缆的金属屏蔽层、铠装层等也能对电磁辐射进行屏蔽。因此, 目前大多数研究给出的结果是海上风电场产生的电磁场对部分鱼种存在潜在影响, 但不明显^[64-65]。然而, 对于风渔融合开发区域的增殖鱼种, 鱼种离电磁场区域更近, 因此精确评估电磁场对增殖鱼种的影响比单独风电场中的电磁场影响评估更为重要。

除了噪声和电磁场外, 风渔融合开发建设还可能对鸟类生存^[66]、海洋水文动力、地形地貌和冲淤及悬浮泥沙^[67]产生一定影响, 这些因素也需要在风渔融合开发设计中进行进一步考虑。

3.5 风渔融合经济可行性评估

在风渔融合经济性可行性方面, 除了需要考虑

海上风电及海洋牧场的本身造价之外,海洋养殖的种苗、饲料以及日常运维成本也非常高,如何利用两个产业间的融合形成降本增效是风渔融合实现经济效益的关键问题。吴迪等^[54]以阳江某海上风电场开展的风渔融合试验案例表明,合理的风渔融合开发可以形成优势互补,减少融合开发成本,实现产业协同增益。但是, Mikkola 等^[68]对波的尼亚湾的风渔融合案例进行了分析,结果表明增加养殖网箱后的风渔融合平台建设成本增加。因此,合理考虑风渔融合选址及布局、风渔融合模式、增殖鱼种选择以及协同运维等多方面因素是降低风渔融合成本的关键。

4 海上风电与海洋牧场融合发展展望

海上风电与海洋牧场融合是工业领域和农业领域两个业态在海域利用上的高度融合,融合过程势必存在政策、理念、技术及生态等方面的冲突和挑战。针对上一章节中的关键技术问题,给出以下 3 个方面的建议。

4.1 完善海洋装备规范标准

目前,针对深远海海洋牧场装备开发的设计规范及标准体系尚不完善,海洋牧场平台的设计基本是借鉴于船舶和海洋平台的相关规范要求进行设计,对于海洋牧场设计存在一定的不匹配性,而对于风渔一体化融合装备的设计规范仍处于空白状态。因此,需要尽快根据海洋牧场装备及风渔融合装备的生产需求、海况条件、养殖鱼种需求等形成一套针对综合开发的设计规范和标准体系。在风渔共场域融合选址及布局方面,也需要形成一整套针对综合开发的制度体系和标准体系,鼓励相关企业按照综合开发模式申请海域,其中包括综合开发海域使用论证技术标准、海域立体确权、海域使用金征收标准以及海域使用权规定等。

4.2 加强融合发展关键技术研究

风渔融合型海洋装备建设是一个系统工程,涉及海洋工程、电气工程、海洋养殖、海洋物理、海洋化学、海洋地质、海洋生物、海洋生态观测及海洋管理等多个学科和领域。因此,需要构建产、学、研合作平台,积极引导科研院所、高校和企业针对风渔融合发展关键技术进行研发,加快推进风渔共场域融合选址及布局设计研究、风渔共结构融合装备基础研发技术研究、深远海适养性鱼种培育研究及风渔

融合生态影响评估研究,从而实现“绿色能源+海上粮仓”的风渔融合开发模式。

4.3 推动全产业链体系构建

目前,风渔融合的研究主要集中于养殖装备的研发与设计,相关的海洋牧场产业链全过程资源尚未得到有效整合。与海上风电及海洋牧场相关联的上下游产业众多,上游产业包括种苗培育、水产饲料、水产药业、海洋工程制造业等;直接相关的产业则包括海上风电场产业、海洋养殖业及海水捕捞等;下游产业包括水产品加工、冷链物流、海产品销售等^[69]。除此之外,风渔融合还可以推动休闲游钓、餐饮娱乐、海上运动、海洋科研等渔旅融合业态发展。因此,打通上下游产业链,构建从装备研发制造、联合运维、海洋养殖、冷链物流、海产品加工及销售的全产业链体系,完善“设计-制造-养殖-销售”的整体布局,是风渔融合发展模式降低综合成本,实现深远海化、集约化、可持续化发展的关键。

5 结论

海上风电和海洋牧场融合发展是未来海洋资源综合开发利用的新方向、新形势、新机遇。风渔融合开发模式可以有效提高我国海域集约利用率、海域资源开发效率及海洋资源开发技术水平并有效降低海洋资源开发成本,形成优势互补,实现业态融合,促进海洋养殖行业升级和海上风电降本增效,形成海洋多元化开发模式,为我国未来海洋经济高质量发展提供新的模式和路径。

文章综述了风渔融合发展的现状,风渔融合的基本模式及相关案例,风渔融合发展的关键技术问题及未来展望分析,为我国现阶段的海上风电与海洋牧场融合技术研究和相关工程项目开展提供了较为全面的技术参考。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院. 国务院关于加强建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见 [EB/OL]. (2021-02-22) [2024-03-01]. www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-02/22/content_5588274.htm.
State Council of the People's Republic of China. The guiding opinions of the state council of the People's Republic of China on accelerating the establishment and improvement of a green, low-carbon and circular development economic system [EB/OL]. (2021-02-22) [2024-03-01]. www.gov.cn/zhengce/zhengceku/

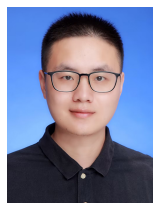
- 2021-02/22/content_5588274.htm.
- [2] 李华军, 刘福顺, 杜君峰, 等. 海洋工程发展趋势与技术挑战 [J]. *海岸工程*, 2022, 41(4): 283-300. DOI: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220518001.
- LI H J, LIU F S, DU J F, et al. Development trend and technical challenges of ocean engineering [J]. *Coastal Engineering*, 2022, 41(4): 283-300. DOI: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220518001.
- [3] 张嘉祺, 王琛, 梁发云. “双碳”背景下我国海上风电与海洋牧场协同开发初探 [J]. *能源环境保护*, 2022, 36(5): 18-26. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8759.2022.05.003.
- ZHANG J Q, WANG C, LIANG F Y. Preliminary study on cooperative development of offshore wind power & marine ranch in China under the background of "dual carbon" [J]. *Energy environmental protection*, 2022, 36(5): 18-26. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8759.2022.05.003.
- [4] BUCK B H, LANGAN R. Aquaculture perspective of multi-use sites in the open ocean: the untapped potential for marine resources in the anthropocene [M]. Amsterdam: Springer Nature, 2017.
- [5] GOSEBERG N, FRANZ B, SCHLURMANN T. The potential co-use of aquaculture and offshore wind energy structures [C]// Proceedings of the Sixth Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (CGJOINT 2012). 2012, 6: 597-603.
- [6] BUCK B H, DUBOIS J, EBELING M W, et al. Multiple Nutzung und co-management von offshore-strukturen: marine aquakultur und offshore-windparks [R/OL]. (2012-06-30) [2024-03-01]. <https://pdfs.semanticscholar.org/0fb7/72b43e12c8ed779a05b9bd5e9b5c4f5342e9.pdf>.
- [7] PAPANDROULAKIS N, THOMSEN C, MINTENBECK K, et al. The EU-project "TROPOS" [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2017.
- [8] QUEVEDO E, DELORY E, CASTRO A, et al. Modular multi-purpose offshore platforms, the TROPOS project approach [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Ocean Energy, Dublin, Ireland. 2012: 17-19.
- [9] HE W, YTTERRIK R, OLSEN G P, et al. A case study of multi-use platform: aquaculture in offshore wind farms [R/OL]. (2015-03-15) [2024-03-01]. <https://www.ewea.org/offshore2015/conference/allposters/PO054.pdf>.
- [10] VIGIN L, DEVOLDER M, SCORY S. Kaart van het gebruik van de Belgische zeegebieden-carte de l'usage des espaces marins belges [EB/OL]. (2016-11-02) [2024-03-01]. <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/249022.pdf>.
- [11] Ocean Aquafarms. Hex Box [EB/OL]. (2020-04-01) [2024-03-01]. <http://www.oceanaquafarms.com/>.
- [12] 李亚杰, 闫中杰, 刘扬, 等. 海上风电与海洋养殖融合发展现状与展望 [J]. *船舶工程*, 2023, 45(增刊 1): 166-170. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2023.S1.33.
- LI Y J, YAN Z J, LIU Y, et al. Integration of offshore wind power and marine aquaculture [J]. *Ship engineering*, 2023, 45(Suppl. 1): 166-170. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2023.S1.33.
- [13] 孙腾, 龚语嫣, 冯翠翠, 等. 海上风牧融合的难题与挑战 [J]. *海洋开发与管理*, 2023, 40(9): 19-29. DOI: 10.20016/j.cnki.hykyfygl.20231017.001.
- SUN T, GONG Y Y, FENG C C, et al. Difficulties and challenges of the integration of offshore wind farms and marine ranching [J]. *Ocean development and management*, 2023, 40(9): 19-29. DOI: 10.20016/j.cnki.hykyfygl.20231017.001.
- [14] 国务院国资委新闻中心. 全国首个!莱州市海上风电项目首批机组并网发电 [EB/OL]. (2022-12-02) [2024-03-01]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c26597971/content.html>.
- News center of State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council. The first in China! The first batch of units of the Laizhou offshore wind power project were connected to the grid for power generation [EB/OL]. (2022-12-02) [2024-03-01]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c26597971/content.html>.
- [15] 马哲, 何乃波, 李友训, 等. 山东省海洋可再生能源产业发展现状与对策研究 [J]. *科技和产业*, 2020, 20(3): 63-67, 69. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1807.2020.03.011.
- MA Z, HE N B, LI Y X, et al. Status and strategies on the marine renewable energy in Shandong Province [J]. *Science technology and industry*, 2020, 20(3): 63-67, 69. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1807.2020.03.011.
- [16] 陈灏, 孙省利, 张才学, 等. 广东省实施海洋牧场与海上风电融合发展的可行性分析 [J]. *海洋通报*, 2022, 41(2): 208-214. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2022.02.010.
- CHEN H, SUN S L, ZHANG C X, et al. Feasibility analysis on the integrated development of marine ranch and offshore wind power in Guangdong Province [J]. *Marine science bulletin*, 2022, 41(2): 208-214. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2022.02.010.
- [17] 李丽旻. 多地探索“海上风电+海洋牧场”模式 [N]. *中国能源报*, 2022-06-27(003). DOI: 10.28693/n.cnki.nshca.2022.001346.
- LI L M. Exploration of the "offshore wind power + marine ranching" model in multiple places [N]. *China energy news*, 2022-06-27(003). DOI: 10.28693/n.cnki.nshca.2022.001346.
- [18] 平潭综合实验区经济发展局. 平潭综合实验区探索“海上风电+海洋牧场”融合发展试点 [EB/OL]. (2023-08-14) [2024-03-01]. https://fgw.fujian.gov.cn/zwggk/xwtd/sxdt/202308/t20230815_6227837.htm.
- Pingtán comprehensive experimental zone economy. The Pingtan comprehensive experimental zone explores the pilot of the integrated development of "offshore wind power + marine ranching" [EB/OL]. (2023-08-14) [2024-03-01]. https://fgw.fujian.gov.cn/zwggk/xwtd/sxdt/202308/t20230815_6227837.htm.
- [19] 风能产业网. 昌邑市海洋牧场与三峡 300 MW 海上风电融合试验示范项目开工 [EB/OL]. (2022-06-27) [2024-03-01]. <http://www.cweea.com.cn/xwtd/html/34133.html>.
- Wind energy industry network. The Changyi marine ranch and

- three gorges 300 MW offshore wind power integration pilot demonstration project started [EB/OL]. (2022-06-27) [2024-03-01]. <http://www.cweea.com.cn/xwdt/html/34133.html>.
- [20] 网易新闻. 打造“渔业碳汇”全新示范!国家电投“新能源+海洋牧场”融合创新示范基地(神泉)开工 [EB/OL]. (2022-05-31) [2024-03-01]. <https://www.163.com/dy/article/H8O1MIAU0511KMS0.html>.
- Netease news. Create a new demonstration of "fishery carbon sink"! National power investment "new energy + marine ranch" integration and innovation demonstration Base (Shenquan) started [EB/OL]. (2022-05-31) [2024-03-01]. <https://www.163.com/dy/article/H8O1MIAU0511KMS0.html>.
- [21] 龙船风电网. 1500 MW! 明阳海南“海上风电+海洋牧场+海水制氢”示范项目动工 [EB/OL]. (2022-12-01) [2024-03-01]. <https://wind.imarine.cn/news/51593.html>.
- Lwind. 1500 MW! Mingyang Hainan "offshore wind power + marine ranch + seawater hydrogen production" demonstration project started [EB/OL]. (2022-12-01) [2024-03-01]. <https://wind.imarine.cn/news/51593.html>.
- [22] 王雅蝶. 全球首台风渔一体化智能装备“明渔 1 号”整体建成 [J]. 水产科技情报, 2023, 50(5): 340.
- WANG Y D. The world's first typhoon fishing integrated intelligent equipment "Mingyu 1" has been completed as a whole [J]. Fisheries science & technology information, 2023, 50(5): 340.
- [23] 陆成宽. “国能共享号”开启鱼、电融合发展模式 [N]. 科技日报, 2023-10-24(005). DOI:10.28502/n.cnki.nkjrb.2023.005984.
- LU C K. The "national energy sharing account" opens the integrated development model of fish and electricity [N]. Science and technology daily, 2023-10-24(005). DOI:10.28502/n.cnki.nkjrb.2023.005984.
- [24] 田宗伟, 袁向南. 不仅仅是为了发电 [J]. 中国三峡, 2023(3): 46-55. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6349.2023.03.008.
- TIAN Z W, YUAN X N. Not just to generate electricity [J]. China three gorges, 2023(3): 46-55. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6349.2023.03.008.
- [25] GRIFFIN R, BUCK B, KRAUSE G. Private incentives for the emergence of co-production of offshore wind energy and mussel aquaculture [J]. Aquaculture, 2015, 436: 80-89. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2014.10.035.
- [26] VAN DEN BURG S, KAMERMANS P, BLANCH M, et al. Business case for mussel aquaculture in offshore wind farms in the North Sea [J]. Marine policy, 2017, 85: 1-7. DOI: 10.1016/j.marpol.2017.08.007.
- [27] 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: 735-756. DOI: 10.1007/s10499-016-9987-y.
- [28] DALTON G, BARDÓCZ T, BLANCH M, et al. Feasibility of investment in Blue Growth multiple-use of space and multi-use platform projects; results of a novel assessment approach and case studies [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2019, 107: 338-359. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.060.
- [29] 仙辑. “耕海一号” [J]. 走向世界, 2023(21): 56-57. DOI: 10.3969/j.issn.1005-393X.2023.21.015.
- XIAN J. "Genghai No. 1" [J]. Openings, 2023(21): 56-57. DOI: 10.3969/j.issn.1005-393X.2023.21.015.
- [30] 杨红生, 茹小尚, 张立斌, 等. 海洋牧场与海上风电融合发展: 理念与展望 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(6): 700-707. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.06.011.
- YANG H S, RU X S, ZHANG L B, et al. Industrial convergence of marine ranching and offshore wind power: concept and prospect [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(6): 700-707. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.06.011.
- [31] 江俊杰. 导管架风机基础加装养殖网箱方案设计及其力学性能分析 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
- JIANG J J. Design and mechanical properties analysis of aquaculture net cage installed on Jacket wind turbine base [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018.
- [32] 张天翼. 新型固定式海上风机与海水养殖融合结构动力特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2022.000410.
- ZHANG T Y. Dynamic characteristic study of a novel integrated offshore structure consisting of a bottom fixed offshore wind turbine and an aquaculture cage [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2022.000410.
- [33] ZHENG X, LEI Y. Stochastic response analysis for a floating offshore wind turbine integrated with a steel fish farming cage [J]. Applied sciences, 2018, 8(8). DOI: 10.3390/app8081229.
- [34] JONKMAN J. Definition of the floating system for phase IV of OC3 [R]. USA: National Renewable Energy Laboratory, 2010. DOI: 10.2172/979456.
- [35] ROBERTSON A, JONKMAN J, MASCIOLA M, et al. Definition of the semisubmersible floating system for phase II of OC4 [R]. USA: National Renewable Energy Laboratory, 2014. DOI: 10.2172/1155123.
- [36] CHU Y I, WANG C M. Hydrodynamic response analysis of combined spar wind turbine and fish cage for offshore fish farms [J]. International journal of structural stability and dynamics, 2020, 20(9): 2050104. DOI: 10.1142/S0219455420501047.
- [37] 钟豪. 浮式风电渔场综合平台水动力特性数值模拟初步研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2021.002422.
- ZHONG H. Preliminary study on numerical simulation of hydrodynamic characteristics of power and aquaculture integrated platform [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2021.002422.
- [38] ZHENG X Y, ZHENG H, LEI Y, et al. An offshore floating wind-solar-aquaculture system: concept design and extreme response in survival conditions [J]. Energies, 2020, 13(3): 604. DOI: 10.3390/en13030604.

- [39] ZHENG X Y, ZHENG H, LEI Y, et al. Nonlinear stochastic responses of a newly developed floating wind-solar-aquaculture system [J]. *Ocean engineering*, 2021, 241: 110055. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2021.110055](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110055).
- [40] LI L, RUZZO C, COLLU M, et al. Analysis of the coupled dynamic response of an offshore floating multi-purpose platform for the Blue Economy [J]. *Ocean engineering*, 2020, 217: 107943. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2020.107943](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107943).
- [41] HOOPER T, AUSTEN M. The co-location of offshore windfarms and decapod fisheries in the UK: constraints and opportunities [J]. *Marine policy*, 2014, 43: 295-300. DOI: [10.1016/j.marpol.2013.06.011](https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.06.011).
- [42] HOOPER T, ASHLEY M, AUSTEN M. Perceptions of fishers and developers on the co-location of offshore wind farms and decapod fisheries in the UK [J]. *Marine policy*, 2015, 61: 16-22. DOI: [10.1016/j.marpol.2015.06.031](https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.06.031).
- [43] GIMPEL A, STELZENMÜLLER V, GROTE B, et al. A GIS modelling framework to evaluate marine spatial planning scenarios: Co-location of offshore wind farms and aquaculture in the German EEZ [J]. *Marine policy*, 2015, 55: 102-115. DOI: [10.1016/j.marpol.2015.01.012](https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.01.012).
- [44] DI TULLIO G R, MARIANI P, BENASSAI G, et al. Sustainable use of marine resources through offshore wind and mussel farm co-location [J]. *Ecological modelling*, 2018, 367: 34-41. DOI: [10.1016/j.ecolmodel.2017.10.012](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.10.012).
- [45] BONSU P O, LETSCHERT J, YATES K L, et al. Co-location of fisheries and offshore wind farms: current practices and enabling conditions in the North Sea [J]. *Marine policy*, 2024, 159: 105941. DOI: [10.1016/j.marpol.2023.105941](https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105941).
- [46] 莫爵亭, 宋国炜, 宋焱. 广东阳江“海上风电+海洋牧场”生态发展可行性初探 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(2): 122-126. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.018](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.018).
MO J T, SONG G W, SONG L. Preliminary discussion on the ecological development feasibility of "offshore wind power + ocean ranch" in Yangjiang, Guangdong [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(2): 122-126. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.018](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.018).
- [47] 李松. 海洋牧场与海上风电融合发展的适宜性评价: 以奉贤海上风电场为例 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(增刊2): 426-430. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2023.S2.068](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2023.S2.068).
LI S. Suitability evaluation of the combination of offshore wind energy with marine ranching: taking Fengxian offshore wind farm as an example [J]. *Water resources and hydropower engineering*, 2023, 54(Suppl. 2): 426-430. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2023.S2.068](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2023.S2.068).
- [48] 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 [J]. *Journal of marine and science engineering*, 2019, 7(7): 238. DOI: [10.3390/jmse7070238](https://doi.org/10.3390/jmse7070238).
- [49] 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 [J]. *Ocean engineering*, 2019, 194: 106653. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2019.106653](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106653).
- [50] HUANG X H, LIU H Y, HU Y, et al. Hydrodynamic performance of a semisubmersible offshore fish farm with a single point mooring system in pure waves and current [J]. *Aquacultural engineering*, 2020, 90: 102075. DOI: [10.1016/j.aquaeng.2020.102075](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102075).
- [51] 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. DOI: [10.19663/j.issn2095-9869.20210816003](https://doi.org/10.19663/j.issn2095-9869.20210816003).
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. DOI: [10.19663/j.issn2095-9869.20210816003](https://doi.org/10.19663/j.issn2095-9869.20210816003).
- [52] 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. DOI: [10.3969/j.issn.1009-1742.2016.03.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1742.2016.03.016).
- [53] 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. DOI: [10.3969/j.issn.1009-1742.2016.03.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1742.2016.03.016).
- [53] 徐琰斐, 徐皓, 刘晃, 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. DOI: [10.3969/j.issn.1007-9580.2021.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9580.2021.01.002).
- [54] 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. DOI: [10.3969/j.issn.1007-9580.2021.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9580.2021.01.002).
- [54] 吴迪, 任重进, 韩荣贵, 等. 海上风电与海洋牧场融合发展现状与实践探索 [J]. *中国渔业经济*, 2023, 41(3): 78-84. DOI: [10.3969/j.issn.1009-590X.2023.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-590X.2023.03.010).
- [55] WU D, REN Z J, HAN R G, et al. Exploration and practice of offshore wind power and marine ranching integration development technology [J]. *Chinese fisheries economics*, 2023, 41(3): 78-84. DOI: [10.3969/j.issn.1009-590X.2023.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-590X.2023.03.010).
- [55] POPPER A N, HASTINGS M C. The effects of anthropogenic sources of sound on fishes [J]. *Journal of fish biology*, 2009, 75(3): 455-489. DOI: [10.1111/j.1095-8649.2009.02319.x](https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02319.x).
- [56] HALVORSEN M B, CASPER B M, MATTHEWS F, et al. Effects of exposure to pile-driving sounds on the lake sturgeon, Nile tilapia and hogchoker [J]. *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, 2012, 279(1748): 4705-4714. DOI: [10.1098/rspb.2012.1544](https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1544).
- [57] HERBERT-READ J E, KREMER L, BRUINJES R, et al. Anthropogenic noise pollution from pile-driving disrupts the structure and dynamics of fish shoals [J]. *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, 2017, 284(1863): 20171627. DOI: [10.1098/rspb.2017.1627](https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1627).
- [58] ROBERTS L, LAIDRE M E. Finding a home in the noise: cross-modal impact of anthropogenic vibration on animal search

- behaviour [J]. *Biology open*, 2019, 8(7): bio041988. DOI: [10.1242/bio.041988](https://doi.org/10.1242/bio.041988).
- [59] 汪启铭. 海上风电场建设水下噪声对中华白海豚影响研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
WANG Q M. Research on the impact of underwater noise radiated from offshore wind farm on Chinese white dolphin (*Sousa chinensis*) [D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.
- [60] 牛富强, 李智, 薛睿超, 等. 海上风电打桩水下噪声测量及其对大黄鱼的影响 [J]. *海洋科学*, 2021, 45(8): 60-68. DOI: [10.11759/hyxx20201019001](https://doi.org/10.11759/hyxx20201019001).
NIU F Q, LI Z, XUE R C, et al. Underwater noise measurements of offshore wind piling and their effects on *pseudosciaena crocea* [J]. *Marine sciences*, 2021, 45(8): 60-68. DOI: [10.11759/hyxx20201019001](https://doi.org/10.11759/hyxx20201019001).
- [61] KERCKHOF F, RUMES B, JACQUES T, et al. Early development of the subtidal marine biofouling on a concrete offshore windmill foundation on the Thornton Bank (Southern North Sea): first monitoring results [J]. *Underwater technology*, 2010, 29(3): 137-149. DOI: [10.3723/ut.29.137](https://doi.org/10.3723/ut.29.137).
- [62] 汪润芝, 原峰, 李崇淑, 等. 海上风电场建设与运行对渔业资源群落结构及空间分布的影响研究 [J]. *海洋开发与管理*, 2022, 39(12): 98-106. DOI: [10.20016/j.cnki.hykyfjgl.20221208.003](https://doi.org/10.20016/j.cnki.hykyfjgl.20221208.003).
WANG R Z, YUAN F, LI C S, et al. Effects research of offshore wind farm construction and operation on fishery resources community structure and spatial distribution [J]. *Ocean development and management*, 2022, 39(12): 98-106. DOI: [10.20016/j.cnki.hykyfjgl.20221208.003](https://doi.org/10.20016/j.cnki.hykyfjgl.20221208.003).
- [63] 牛富强, 杨燕明, 许肖梅, 等. 海洋风电场运营期水下噪声测量及特性初步分析 [J]. *震动与冲击*, 2016, 33(2): 1-4. DOI: [10.13465/j.cnki.jvs.2016.12.034](https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2016.12.034).
NIU F Q, YANG Y M, XU X M, et al. Measurements and analysis of underwater noise from the operation of offshore wind farms [J]. *Journal of vibration and shock*, 2016, 33(2): 1-4. DOI: [10.13465/j.cnki.jvs.2016.12.034](https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2016.12.034).
- [64] 袁健美, 贲成恺, 高继先, 等. 海上风电电磁场对 12 种海洋生物存活率与行为的影响 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 3051-3056. DOI: [10.13292/j.1000-4890.201611.021](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201611.021).
YUAN J M, BEN C K, GAO J X, et al. Effects of magnetic field of offshore wind farm on the survival and behavior of marine organisms [J]. *Chinese journal of ecology*, 2016, 35(11): 3051-3056. DOI: [10.13292/j.1000-4890.201611.021](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201611.021).
- [65] BOCHERT R, ZETTLER M L. Long-term exposure of several marine benthic animals to static magnetic fields [J]. *Bioelectromagnetics*, 2004, 25(7): 498-502. DOI: [10.1002/bem.20019](https://doi.org/10.1002/bem.20019).
- [66] 胡韧, 叶锦韶, 戚永乐. 海上风电场对鸟类的影响及其危害预防 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(3): 1-7. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.001).
HU R, YE J S, QI Y L. Impact and harm mitigation of offshore wind farms on birds [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(3): 1-7. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.001).
- [67] 冯银银, 周全利, 刘元进, 等. 海洋牧场与海上风电融合发展项目对海洋环境的若干影响分析 [J]. *环境保护科学*, 2023, 49(1): 69-74. DOI: [10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022040031](https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022040031).
FENG Y Y, ZHOU Q L, LIU Y J, et al. Impact of marine ranching and offshore wind power industrial convergence projects on marine environment [J]. *Environmental protection science*, 2023, 49(1): 69-74. DOI: [10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022040031](https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022040031).
- [68] MIKKOLA E, HEINONEN J, KANKAINEN M, et al. Multi-platform concepts for combining offshore wind energy and fish farming in freezing sea areas: Case study in the Gulf of Bothnia [C]//International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2018, 51258: V006T05A029.
- [69] 王爱香, 王金环. 发展海洋牧场 构建“蓝色粮仓” [J]. *中国渔业经济*, 2013, 31(3): 69-74. DOI: [10.3969/j.issn.1009-590X.2013.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-590X.2013.03.012).
WANG A X, WANG J H. Developing sea ranch to build a "blue granary" [J]. *China fishery economy*, 2013, 31(3): 69-74. DOI: [10.3969/j.issn.1009-590X.2013.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-590X.2013.03.012).

作者简介:



阳杰

阳杰 (第一作者, 通信作者)

1993-, 男, 博士后, 上海交通大学船舶与海洋工程博士, 主要从事海上多能融合装备、漂浮式风力机设计研究 (e-mail) yangjie02@gedi.com.cn。

(编辑 叶筠英)