



移动扫码阅读

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.

ZHANG Jiaqi, WANG Chen, LIANG Fayun. 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.

“双碳”背景下我国海上风电与海洋牧场协同开发初探

张嘉祺^{1,2},王琛^{1,2,*},梁发云^{1,2}

(1.同济大学地下建筑与工程系,上海200092;2.岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学),上海200092)

摘要:在“双碳”及“海洋强国”战略背景下,我国围绕海洋经济领域的开发和建设迅猛发展。另一方面,部分地区用海矛盾及工程运维成本增加等问题严重制约着海洋经济的高质量发展。针对海上风电场与海洋牧场的开发现状、技术瓶颈及协同开发等问题,分析了项目规划选址、风电基础及海珍品种类筛选、配套设施开发等方面的技术难点,结合工程实例提出建议。分析表明:现阶段的协同开发项目选址宜以风电机组为主、海洋牧场为辅,充分发挥二者在海域使用上的共通性,利用现有海上风电和海洋牧场建设技术提高综合效益。

关键词:海上风电;深水基础;海洋牧场;协同开发

中图分类号:X37

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)05-0018-09

Preliminary study on cooperative development of offshore wind power & marine ranch in China under the background of “dual carbon”

ZHANG Jiaqi^{1,2}, WANG Chen^{1,2,*}, LIANG Fayun^{1,2}

(1.Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2.Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Under the background of “dual carbon” and “marine power” strategy, China developed rapidly in the development and construction of marine economy. However, high-quality development of marine economy was seriously restricted by the contradictions of sea use and the rising operation cost. Based on the development status, technical bottleneck and collaborative development of offshore wind power and marine ranch, the technical difficulties in project planning and site selection, selection of wind power foundations and marine treasures, development of supporting facilities and other aspects were analyzed. Several suggestions were put forward based on engineering examples. The analysis showed that the site selection of cooperative development projects at this stage should be dominated by offshore wind turbines and supplemented by marine ranch, giving full play to their commonality in the use of marine areas. The existing construction technologies of offshore wind power and marine ranch were used to improve comprehensive benefits.

Key Words: Offshore wind power; Deepwater foundation; Marine ranch; Collaborative development

收稿日期:2022-06-26;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:上海市“科技创新行动计划”软科学重点项目(项目编号:21692107100);广西岩土力学与工程重点实验室开放研究基金(项目编号:20-Y-KF-07)

第一作者简介:张嘉祺(1999—),男,上海人,硕士研究生,主要研究方向为岩土工程。E-mail:zhangjiaqibox@163.com

通讯作者简介:王琛(1989—),男,山西太原人,助理教授,主要研究方向为海洋岩土工程和深水基础工程。E-mail:cwang33@tongji.edu.cn

0 引言

国际社会普遍认可并签署的《巴黎协定》指明了全球绿色低碳发展转型的大方向,提出了“全球平均温升控制在显著低于工业化前水平的 2°C 之内,并努力把温升限制在工业化前水平的 1.5°C 之内”的长期目标^[1]。作为目前最大的发展中国家,我国于2020年向国际社会郑重承诺,将“采取更加有力的政策和措施,使二氧化碳排放力争于

2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”。近年来,我国清洁能源占比持续增加,2021年发电量已达2.9万亿($\text{kW}\cdot\text{h}$),占全口径总量的34.6%^[2],如图1(a)所示。值得注意的是,我国绵长的海岸线和丰富的海上风能资源使海上风电产业显示出巨大潜力,已逐渐成为发展绿色能源的重要途径之一。2021年我国新增海上风电装机容量达到16.9 GW,较上一年增加约452.3%,发展十分迅猛^[3],如图1(b)所示。

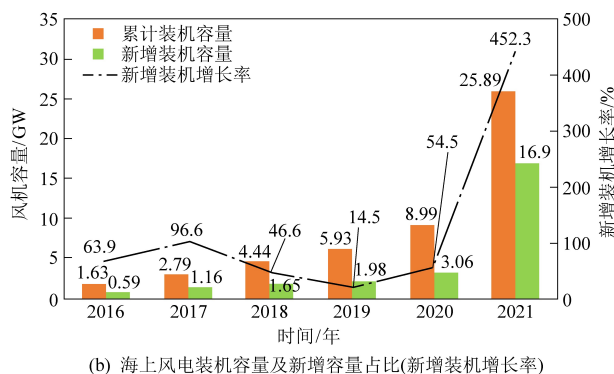
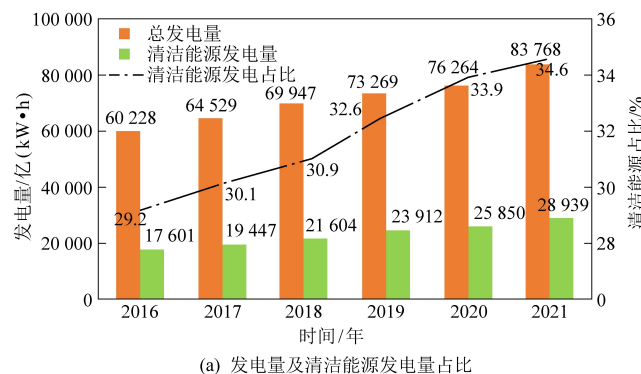


图1 全国2016~2021年清洁能源的发展趋势

Fig.1 The development trend of clean energy in China during 2016 to 2021

同时,海洋资源也具有极大的开发价值。海洋牧场的出现不仅大幅提升了海洋资源的开发效率,还能保护海洋生态环境,有利于推动海洋开发方式向循环利用型、可持续发展型转变,目前正处于积极探索、大力发展的阶段。因此,已建的国家级海洋牧场示范区主要以养护渔业资源、修复渔业水域生态环境和促进渔业转型增效为目标。特别是在“双碳”和“海洋强国”战略背景下,以海上风电为代表的海洋能源与以海洋牧场为代表的海洋资源开发利用引起了广泛关注。

然而,随着近海海域各功能区建设的逐渐完善,用海矛盾凸显,工程运维成本不断增加,严重制约着我国海洋经济的进一步高质量发展,主要表现为海上风电场对传统海上水产养殖、渔业捕捞的作业空间的挤占,以及海上风电场离岸开发距离增加导致的投资和运维成本提升。为解决上述问题,协调发展与合理利用海洋能源、资源,实现海域多能互补、海上风电与牧场降本增效,将海上风电与海洋牧场融合发展的构想应运而生。本文在系统总结海上风电与海洋牧场各自开发现状与关键技术的同时,提出了协同开发面临的现实难点与系统挑战,并以已有示范工程为例,提供了前瞻性分析和建议。

1 我国海上风电场开发现状与发展瓶颈

1.1 我国海上风能资源与海上风电开发现状

我国海上风电场的开发历经了3个阶段:科研型示范应用、商业化探索和规模化建设^[4]。目前,我国海上风电总体上呈现由近海到远海、由浅水到深水、由小规模示范到大规模集中开发的特点^[5]。

(1) 海洋风能资源情况

我国盛行大陆性季风气候,海陆热力差异大,海上风能资源丰富。据国家气象局估算^[6],风能资源总储量约43.5亿kW,其中海上可开发利用的风能储量约为7.5亿kW^[7]。《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710—2002)将风功率分为7个等级,其中风功率密度在4级以上的区域有利于风能并网发电。如表1所示,风能丰富区如东南沿海及其岛屿地区风功率密度在 $200\text{ W}/\text{m}^2$ 以上,有效风力出现时间百分率达80%~90%,是风电开发性价比最高的区域^[8]。

(2) 海上风电装机情况

2021年风电装机数据显示^[9-10],我国全年海上风电新增并网装机规模约为16.9 GW,同比增长452%,稳居全球第一。现有海上风电并网装机

容量约 26.4 GW,并计划在 2030 年和 2060 年海上风电总装机规模将达到 100 GW 和 160 GW。其中,大型海上风电基地主要分布在江苏、浙江、福建、

广东、山东、辽宁和广西沿海等地区。“十四五”规划期间,上述各省陆续出台支持政策(表 2),预计将新增 4 000~5 000 万 kW 海上风电装机容量。

表 1 我国海洋风能资源分区分布

Table 1 Distribution of marine wind energy resources in China

风能分区	风功率密度/(W·m ⁻²)	有效风力出现时间百分率/%	区域分布
丰富区	>200	80~90	东南沿海、台湾岛屿、南海群岛、海南岛南部、山东及辽东沿海、东南沿海及其岛屿
较丰富区	150~200	60~80	海南岛东部、渤海沿海
可利用区	50~150	40~60	福建和广东沿海、广西沿海及雷州半岛

表 2 沿海主要省份“十四五”海上风电相关规划

Table 2 Plan of offshore wind power in major coastal provinces during the 14th Five-Year Plan

省份	政策文件	主要内容
江苏	《江苏省“十四五”可再生能源发展专项规划(征求意见稿)》	海上风电新增约 800 万 kW
浙江	《浙江省可再生能源发展“十四五”规划》	全省海上风电力争新增装机容量 450 万 kW 以上,累计达到 500 万 kW 以上
广东	《关于印发促进海上风电有序开发和相关产业可持续发展实施方案的通知》	到 2025 年底,力争达到 1 800 万 kW
山东	《关于促进全省可再生能源高质量发展的意见(征求意见稿)》	全省海上风电争取启动 1 000 万 kW
海南	《海南省海洋经济发展“十四五”规划(2021—2025 年)》	浅海域优选 5 处项目场址,总装机容量 300 万 kW,2025 年实现投产规模约 120 万 kW

1.2 “双碳”背景下我国海上风电场的关键技术

“双碳”战略为海上风电开发建设提出了更高要求,可将其进程分为规划建设期、运行维护期和退役弃置期,其关键技术包括深水基础工程、电力汇集组网与传输以及风机退役决策等。规划建设期的主要工作流程涉及风场技术、电网连接方式、开发战略、项目结构等规划;获得批复后,开始项目审批、组织竞配,明确详细的工程设计、生产采购厂商,开始安装调试;在运维维护期,除了定期服务、维护检修和环境监测外,还需进行必要的升级改造,而达到计划使用年限后即进入退役弃置期。

(1) 深水基础工程

海上风力发电机组所处的自然环境十分复杂,常年受到海洋灾害的影响,在服役期间承受较大的水平荷载和倾覆弯矩,保障其下部基础的安全稳定至关重要。因此,基础造价占海上风电工程总造价的比重要远高于陆上风电,合理地选择基础形式对结构安全和工程造价具有重要影响^[11]。常见基础形式包括单桩基础、导管架基础和浮式基础,如图 2 所示。其中,单桩基础适用于水深小于 50 m 的海域,是目前海上风电中最常

见、最经济的型式,约 80% 的海上风机采用该类基础^[12]。导管架基础相较于单桩基础工艺更复杂,但在深水海域中建造成本优于单桩,适用于水深 40~100 m 的海域。漂浮式基础被认为是未来深远海风电开发的主要型式,包括立柱式基础、张力腿式平台和半潜式基础。立柱式基础因立柱较长,在海上进行安装难度较大;张力腿平台稳定性好、结构自重轻,但系泊系统的安装工艺复杂、安装费用高;半潜式基础适用于更深水域,安装难度相对较小,具有较大前景^[13]。

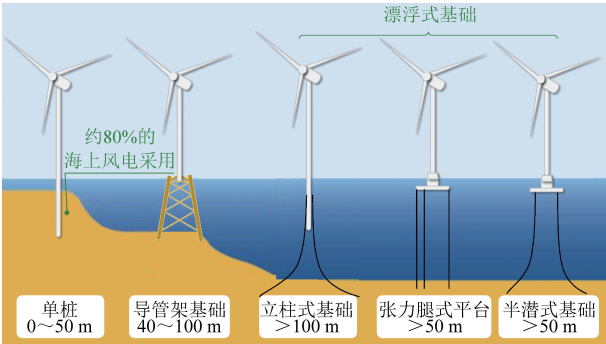


图 2 常见的海上风电基础形式及适用水深

Fig.2 Foundations and applicable depth of common offshore wind power

(2) 风电并网传输技术

随着大规模海上风电场的投产运行,电网系统对海上风电并网传输技术提出了更高的要求。与陆上风电机组不同,海上风电机组在进行高压交流输电时需要满足更多条件,目前主要有3种方式:高压交流、相控高压直流和电压源型高压直流。我国已有的海上风电开发项目多数集中于50 km左右的海域,主要采用高压交流输电方式。在输出功率相等、可靠性相当的情况下,直流输电线路成本将明显低于交流输电线路。随着海上风电朝着规模化、深远海化、大容量化的方向发展,未来深远海风电领域将会更多采用这一传输并网方式,由原先的单场并网技术逐渐发展成大规模集群送出技术^[14],需要提前进行技术攻坚和储备。

(3) 海上风电退役决策

海上风电场退役处置在规划设计过程中备受关注,需要从成本和环境的角度共同考虑。常见的退役处理策略包括:全面拆除(包括所有风场基座叶片以及海上电缆)、更新原有机型容量的海上风电机组、以及维修保护延长使用年限。从成本角度来看,全面拆除工程量最大、耗时最长、花费最高,而更新原有机型中产生的基座搭建、海缆更换也会提升建设成本。因此,欧洲许多风电项目选择将设备遗弃在原建设区中,不利于环境保护。从多方面考虑,对已到期的项目进行二次开发是更合理的手段,例如在已退役海上风电场搭建海洋牧场,能充分利用现有资源,降低全生命周期成本。

1.3 我国海上风电场未来的发展趋势

(1) 选址向深远海化

目前,近海海域风电建设规划区与生态环境保护、交通航道等区域的冲突加剧,海上风电离岸化、向深远海发展成为未来较明显的发展趋势。以欧洲的经验(截至2020年),在建海上风电项目平均离岸距离44 km,平均水深36 m,部分项目离岸已超100 km^[12]。我国三峡新能源江苏大丰H8-2# 300 MW海上风电首批机组于2021年并网发电,场址中心离岸距离72 km,水深7.5~20.9 m。朝深海发展后,海上风电项目将呈现基地化、规模化、集群化的特点。

(2) 机组容量大型化

海上风机大型化不仅能够摊薄风机制造、建设、安装成本,且在运营维护过程中可以减少故障

点、降低费用。欧洲地区海上风电发展历史悠久,现均已投入使用大容量的风机装置。我国现有海上风电的单机容量较小(主要以4 MW风机为主),但2019年起的海上风电中标项目中,5 MW、6 MW的风机已逐步成为主力,具有完全自主知识产权的10 MW风电机组也已正式投用^[15]。

(3) 海洋资源一体化

海洋牧场、“Power to X”、能源岛被视作未来海上风电的三种创新融合新模式,为产业融合发展提供可能性^[16]。海上风电与海洋牧场的协同开发在充分发挥空间资源价值的同时,可以解决水下部分无法得到有效利用的困局。《广东省海洋经济发展“十四五”规划》提出支撑海洋资源综合利用,推动海上风电项目开发与海洋牧场、海上制氢等的结合;《浙江省可再生能源发展“十四五”规划》中提出将“探索海上风电基地发展新模式”,集约化打造协同开发的示范项目。

2 我国海洋牧场开发现状与发展瓶颈

2.1 海洋牧场的建设与空间布局

海洋牧场的开发建设对于拓展海洋渔业发展空间、促进海洋渔业可持续发展有重要现实意义。2006年,国务院发布了《中国水生生物资源养护行动纲要》。《国家级海洋牧场示范区建设规划(2017—2025年)》显示,截至2016年,全国已投入海洋牧场建设资金55.8亿元。2021年,我国首个海洋牧场建设的国家标准《海洋牧场建设技术指南》正式发布。从总体上看,我国海洋牧场已实现规模化产出,已建成国家级海洋牧场示范区153个,主要分布在辽宁、河北、山东、浙江、广西、广东等(图3),从北到南建设了一系列以投放人工鱼礁、苗种,增殖放流,海珍品底播等为主的海洋牧场。

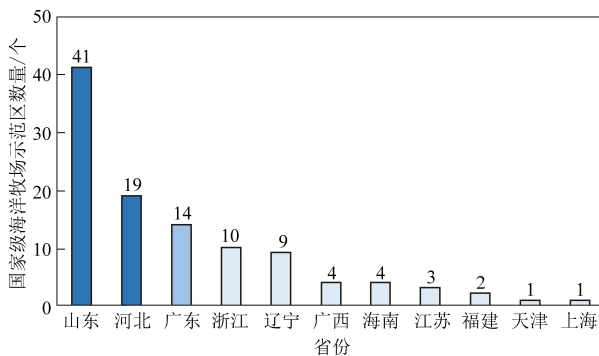


图3 我国沿海省份国家级海洋牧场示范区分布情况

Fig.3 Distribution of national marine ranching demonstration areas in coastal provinces of China

2.2 国内海洋牧场建设现状特征

我国北方以山东省、辽宁省为代表,依托渤海丰富的鱼类和海珍品资源,建立以“人工鱼礁+藻礁+贝藻”模式为主的经营性海洋牧场,产出品多为海参、海胆、梭子蟹等。由于企业资本入驻,北方海洋牧场建设以企业投资为主导,在建设数量以及建设规模方面取得了较大发展。南方地区以政府投资管理模式为主,以浙江省、福建省、广东省为代表,建立了以“人工鱼礁+海藻床+近海岛礁鱼种”模式为主的公益性海洋牧场,旨在修复近海海洋生态环境。

山东省滩涂面积辽阔,渔业资源丰富,近海栖息和洄游的鱼虾种类达260余种,拥有国家级海洋牧场44处(占全国40%)。建设理念上,山东省致力构建以“增殖放流+人工鱼礁+藻场移植+智能网箱”为主的海洋牧场建设模式,通过采用立体养殖、投放生态型人工鱼礁、修复海草场等手段,建立绿色海洋生态资源环境。浙江省岛屿数量众多,气候条件温和,海域辽阔,养料丰富。浙江渔场由舟山、鱼山、温台等6个渔场构成,总面积约22.27万 km^2 ,是东海渔场的重要组成部分^[17]。但受到迅速发展的临海产业影响,部分近海地区的海水养殖面积短缺。2018年浙江省出台《浙江省海岸线整治修复三年行动方案》,将海洋牧场建设的重点放在有效改善生态环境上,同时逐步提升渔业资源的产量。

2.3 海洋牧场的效益分析

(1)生态效益

海洋牧场属于人造生态系统,通过投放人工鱼礁、种植人工藻礁等建立适合海洋生物生长繁殖的环境,吸引外部生物与放养生物形成人工渔场,在水生生物栖息地和环境修复、渔业种群资源增殖、海域生态系统功能提升、生物多样性维系等方面具有综合效益,主要体现在以下3方面。

形成安全庇护场所:人工鱼礁区为大型藻类、附着生物等提供基质,礁区内形成多样性流场和流态,为水生生物提供栖息、繁衍、生长等所需空间。

改善海洋环境:渔礁周边及内部形成扰流和上升流,加速水层间交换,且藻类移植及海草床建设可以净化水质、改善底质、减缓温室效应、防止赤潮。

保护生物多样性:改善海洋生物群落种类和群落结构,优化海域生态环境质量,促进海洋渔业

持续健康发展。

(2)经济效益

产出品中的鱼、虾、蟹、参和贝等海珍品市场认可度高,可提高当地渔业产业收入。以天津大神堂海洋牧场为例^[18],在实地入户走访的14户中有11户的年收入平均增加10000元以上。在人工鱼礁区,刺网渔船每年经济效益达5万元/船~10万元/船,钓业渔船经济效益达1万元/船~3万元/船。海洋牧场的建设将带动产业上下游协同发展,包括从渔礁设计制造、海洋生物的育种、海洋牧场设施配套,到冷链物流运输、海产品加工等产业环节。此外,海洋牧场还可增加当地旅游业收入,有效带动沿岸地区交通运输、休闲垂钓、餐饮旅游等相关产业的发展,为海洋经济发展做出新贡献。

(3)社会效益

作为一种创新业态,海洋牧场的建设对沿海省份渔业产业的发展起到稳定的作用,为捕捞渔民提供转产转业的出路,保障渔区社会和谐稳定。海洋牧场作为增殖放流、改善水质环境的平台,能够提升社会对于海洋生态环境与人类活动关系的思考,提倡人与自然和谐共处,打造海洋上的“绿水青山、金山银山”,合理利用海洋资源,保护海洋生态环境。

2.4 海洋牧场的发展瓶颈

现代化海洋牧场建设既要求渔业产量的提升,还需要特别注重牧场运营效率。尽管在近年来的开发过程中综合利用了现代科学技术和方法^[19],海洋牧场的生产实践仍存在诸多发展瓶颈。在生态养殖模式的构建中,现代海洋牧场相较于传统牧场需要布放大量潜标以实时监测海水参数变化,随着其朝规模化、深远海化方向的发展,不少牧场出现供电不足的情况,导致大型现代化牧场增养殖设备、资源环境监测设施等难以维持稳定。此外,在我国沿海诸多省份中,现代化海洋牧场平台已不再满足于其单独的养殖功能,各省在注重第一产业传统养殖牧场发展的同时,也在积极布局第三产业休闲渔业和综合型牧场的建设。迫切的产业链提升需求对现代化海洋牧场的建设模式提出了高标准和新要求。

3 海上风电与海洋牧场的协同开发

面对未来平价发电、集约用海的需求,在“双碳”和“海洋强国”战略背景下,海上风电与海洋

牧场协同开发的构想应运而生。如何在有限的资源下实现多能互补、降本增效,形成海上能源水产养殖业的跨界合作与多元化模式将成为未来关注的重要议题。

3.1 协同开发的必要性

海洋资源是我国沿海地区经济发展的重要载体和战略空间,海洋经济建设必须从集约用海入手,寻求开发与保护的协调和平衡,促进海岸资源可持续利用的新理念。从发展趋势来看,海上风电与海洋牧场在适宜海域实行集中连片、适度规模的开发利用,有助于提升海域利用效率,打造以海上风电为核心的多元化海洋经济生态圈,为风电深远海发展产生的高昂运维成本和复杂运营管理提供解决思路。

(1) 水上和水下空间的融合

传统风电场在选址时主要遵循 4 个准则:风能资源、自然环境、交通环境和风机条件^[20]。在传统观念中,海上风电场的选址需要避开敏感海域,特别是远离海洋自然保护区、重要渔业水域,减少对航运与渔业捕捞的影响。但从开发利用的角度,海空、海面到海底均可作为实践对象,不同层次对应不同的自然地理与生态环境条件,可形成水上和水上、海面和海底的综合利用格局。海上风电场可为大型底栖生物提供平静清洁的水域环境和硬底质栖息场所,提高附近物种数和丰度^[21]。此外,休闲观光型海洋牧场被视作空间融合的另一方向,形成推动沿海省份发展的海洋经济综合圈。

(2) 风电降本与牧场增效的融合

以年均发电 3 500 h 为例,初始投资成本宜控制在 14 000 元/kW 以下。2018~2021 年,我国近海海上风电场单位千瓦造价约为 14 000~19 000 元/kW,海上风电机组及塔筒成本占比超过一半^[22]。其中风电机组、风机基础及施工、电缆、塔筒分别可约占 47%、19%、8%、4%。随着海上风电向深远海海域发展,运维成本占比将持续上升,需要兼顾经济性和安全性,可考虑从 4 个方面着手:提高风电机组的可靠性、建立智慧运维体系、提高运维方式效率与运维人员专业性,以及海上功能集群化开发。其中,海上功能集群化开发的思路另辟蹊径,体现了产业融合、学科交叉的理念。融合适宜的产业链有利于海上风电产业的深度发展,通过充分利用水上和水上、海面和海底空间开展海洋牧场养殖而获取的利润收入可持续性覆盖

风电项目的建设和运维成本,促进风电电力的高效产出、利用和消纳,有效降低重复的出海运维成本,进而实现海上资源价值最大化。此外,实现协同开发模式下的大规模建设,还可以改善风电场的生态环境,修复海上风电建设对于海洋生态的破坏。已有研究表明,如果将海上风电运营部门和海洋牧场养殖部门适当合并,联合经营的协同开发模式能缩短运营维修技术人员及配件的运输时间,降低运维成本^[23]。

(3) 风电与牧场功能的融合

风电渔场综合平台的研究目前处于初步阶段。Zheng^[24]提出了将浮式海上风力涡轮机与鱼养殖刚性笼结合的概念。班淇超等^[25]分析了风电与牧场渔业在空间上的协同性。也有研究以虚拟海上风蚌养殖场为例,描述了组合式海上多用途平台^[23]。现代海洋牧场的发展方向面向信息化和智能化,为了提高生产效率,海洋牧场建设需引入现代化养殖设备、监测系统和网络基础设施。在海洋牧场建设区域引入海上风电机组能保障海上电力的持续供应,提供电力解决方案,实现协同区域自给自足,使海洋牧场向远洋发展成为可能。

3.2 现阶段协同开发面临的技术难点与系统挑战

海上风电和海洋牧场有各自独立的选址评价体系。海上风电对海域地理条件有极高的要求,在海洋规划、海域管理、气象条件以及环境保护等方面需协调各部门^[26];而海洋牧场的选址属于空间管理范畴,不仅需要考虑生态学、海洋学、水文学、海洋动力学特征,还要考虑对投资者及渔民等相关利益方的社会影响^[27]。我国南北方存在着巨大差异,二者协同开发时需综合考虑风电的选址与海珍品种类,在能源、经济、生态、社会目标之间取得平衡,实现兼顾发展。就目前而言,协同开发项目的选址宜以风电机组为主、海洋牧场为辅,充分发挥二者在海域使用上的共通性。此外,协同开发中还面临诸多其他技术难点,包括但不限于:海珍品种类的甄选(包含增殖性风机基础和海珍品养殖系统的配套设施搭建),以及增殖式风机基础对于大型底栖动物、鱼类、贝壳类等经济生物生存环境和生理行为的影响评估。Buck 和 Krause^[28]提出了水产养殖和可再生能源系统的整合;Karampour^[29]等人提出开发新型多用途海上平台,充分利用同一地点、同一基础设施实现垂直一体化和共享服务;钟豪^[30]针对风电渔场综合平台开展了相关的水动力性能研究。

尽管山东、江苏、浙江等省份已就二者协同发展进行了初步探索,国家海洋局在《关于进一步规范海上风电用海管理的意见》中明确,目前尚不具备从国家层面出台相关政策的基础条件,需加紧建立协同开发项目的评价体系,评估协同开发项目的技术可行性、对海洋生态系统的潜在影响、项目的经济可行性、风电与养殖规模的融合建议,以及不同部门协调、企业利益关联等。Karampour^[29]等人研究了海洋牧场生命周期的不同阶段,认为规划和开发早期需要整体地、多学科地评估“蓝色增长”企业的可行性,识别和减轻风险,并在不同利益相关者之间实现渐进式发展。

3.3 协同开发模式在实践中的初步尝试

目前,以德国、荷兰等为代表的欧洲国家开展了协同开发的试点研究,将鱼类养殖网箱、贝藻养

殖筏架固定于风机基础,为评估二者的协同发展潜力提供了经验^[24]。德国启动了“海水养殖-风电场多用途先驱项目”^[31],在北海不同海域进行了贻贝和牡蛎与海上风电协同开发试验,涉及养殖品类、生态、技术、法规、市场等方面,包含多个子项目:(1) Feasibility Study,旨在探索协同开发的多用途潜力,提出了4种概念方案(延绳结构、环形结构、可旋转养殖网箱和半潜式网箱),详见图4;(2) Open Ocean Aquaculture,分析风电场建设区域内海上贻贝和海藻养殖的可行性;(3) Roster Sand,测试不同材料和功能的系泊延绳系统在开放水域的适用性,提出3种连接方案;(4) Open Ocean Multi-Use,以 Veja Mate 风电场三桩型基础为对象,研究半潜式养殖网箱与风机基础结合的可行性。

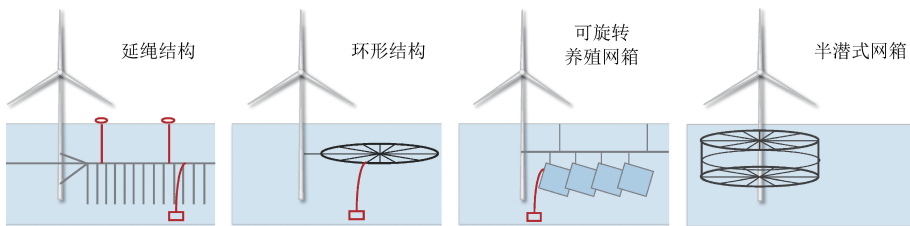


图4 Feasibility Study 项目提出的概念方案示意图^[30]

Fig.4 Schematic diagram of the conceptual scheme proposed by the Feasibility Study project^[30]

在欧盟第七框架计划中成员国发起“The Ocean of Tomorrow”号召,其中一个主题是“多用途海上平台”,包含 H2OCEAN、MERMAID 和 TROPOS^[32]。TROPOS 即“多用途模块化深水离岸平台”,旨在开发用于深水的浮动多用途模块化平台系统,并针对性地将风机浮式基础和鱼类藻类养殖相结合(图5)。韩国是最早开展风-渔结合研究的亚洲国家,2013 年针对西南海上风电场开发提出二者结合的构想,是第一个大规模与海藻、蚌类养殖相融合的风电项目。国内方面,莫爵亭^[33]等对广东阳江“海上风电+海洋牧场”发展模式的可行性进行了初步探讨,综合评估发现该区域具有较高的渔业资源潜力,具备协同开发的可行性。Zhang^[34]等讨论了海上风电场对养殖鱼类的噪声影响,证实了两种工程相结合的生物合理性。我国的昌邑海洋牧场与三峡 300 MW 海上风电融合试验示范项目于 2019 年开始建设,位于山东省潍坊市昌邑市境内北部莱州湾海域,预计 2024 年 6 月完工。2020 年 6 月,明阳阳江沙扒 300 WM 科研示范项目海上风电场也正式投入建设,包含周长为 80 m 的网箱,是项目中首个抗台风型实验

养殖网箱。

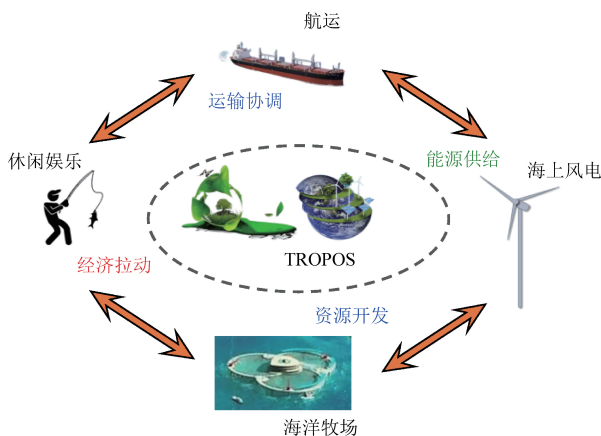


图5 TROPOS 项目^[31]

Fig.5 TROPOS Project^[31]

4 总 结

海洋经济产业的开发是一项复杂的系统工程。我国海上风电场的开发潜力巨大,目前已经步入平稳快速增长期,并且朝着深远海、规模化方向发展。海洋牧场作为我国修复海洋生态环境、提高海洋经济效益和社会效益的一种重要手

段,也在积极布局建设。本文针对现阶段我国单体海上风电与海洋牧场的开发现状和发展瓶颈进行分析,提出协同开发的必要性和可行性,吸纳国内外目前已有协同开发项目的案例经验,总结国内外海上风电建设、海水养殖及二者联合开发的案例,为保障融合项目的可持续发展,应针对工程的评价体系、设备设施开发、政策扶持进行综合考量。

参考文献

- [1] United Nations. Adoption of the Paris Agreement; FCCC/CP/2015/L. 9/Rev. 1 [R]. Paris: United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015.
- [2] 中电联统计与数据中心. 2021—2022 年度全国电力供需形势分析预测报告 [R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2022.
- [3] 王雪辰, 崔晓利. 我国电力发展与改革形势分析 (2022) [R]. 北京: 能源安全新战略研究院, 2022.
- [4] 王怡. 中国风电产业 40 年发展成就与展望 [J]. 中国能源, 2020, 42 (9): 28-32+9.
WANG Qia. Achievements and prospects of China's wind power industry development for 40 years [J]. Energy of China, 2020 (9): 28-32+9.
- [5] 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.
YANG Hongsheng, RU Xiaoshang, ZHANG Libin, 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.
- [6] 兰忠成. 中国风能资源的地理分布及风电开发利用初步评价 [D]. 兰州: 兰州大学, 2015: 21-25.
- [7] Chaojie Huang. Analysis of global offshore wind energy resources and current status of offshore power generation in China [J]. International Journal of Education and Economics, 2019, 2 (2): 123-124.
- [8] 宋婧. 我国风力资源分布及风电规划研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013: 17-19.
- [9] 克拉克森. 2021 年全球海上风电市场年终回顾与 2022 年全球海上风电市场展望 [J]. 珠江水运, 2022 (6): 64-66.
Clarkson. Review of global offshore wind power market in 2021 and prospect of global offshore wind power market in 2022 [J]. Pearl River Water Transport, 2022 (6): 64-66.
- [10] 鄂欽奕. 海洋可再生能源, 前景几何? [N]. 中国自然资源报, 2022-03-28 (5).
- [11] 王伟, 杨敏. 海上风电机组地基基础设计理论与工程应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 3.
- [12] Rory O' Sullivan. Offshore wind in Europe -Key trends and statistics 2020 [R]. Brussels: Wind Europe, 2021.
- [13] 周绪红, 王宇航, 邓然. 海上风电机组浮式基础结构综述 [J]. 中国电力, 2020, 53 (7): 100-105+112.
- ZHOU Xuhong, WANG Yuhang, DENG Ran. Review on floating foundation structures for offshore wind turbines [J]. Electric Power, 2020, 53 (7): 100-105+112.
- [14] 张占奎, 石文辉, 屈姬贤, 等. 大规模海上风电并网送出策略研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23 (4): 182-190.
ZHANG Zhankui, SHI Wenhui, QU Jixian, et al. Grid connection and transmission scheme of large-scale offshore wind power [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23 (4): 182-190.
- [15] 吴睿, 张健, 赵长红, 等. 基于 LCOE 模型的海上风电平价上网分析 [J]. 中国能源, 2021, 43 (2): 48-53.
WU Rui, ZHANG Jian, ZHAO Changhong, et al. Analysis of offshore wind power parity based on LCOE model [J]. Energy of China, 2021, 43 (2): 48-53.
- [16] 赵靓. 创新融合, 三种海上风电新模式 [J]. 风能, 2021 (8): 46-48.
ZHAO Liang. Innovative integration, three new offshore wind power modes [J]. Wind Energy, 2021 (8): 46-48.
- [17] 王琪. 浙江省海洋渔业资源可持续利用研究 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019: 9-10.
- [18] 李慕菡, 徐宏, 郭永军. 天津大神堂海洋牧场综合效益研究 [J]. 中国渔业经济, 2021, 39 (1): 68-73.
LI Muhan, XU Hong, GUO Yongjun. Study on the comprehensive benefits of Tianjin Dashentang marine ranching [J]. Chinese Fisheries Economics, 2021, 39 (1): 68-73.
- [19] 陈勇. 中国现代化海洋牧场研究与建设 [J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35 (2): 147-154.
CHEN Yong. Research and construction of modern marine ranching in China: A review [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35 (2): 147-154.
- [20] 唐征歧, 江建平, 李子林, 等. 深远海域海上风电场定量选址方法研究 [J]. 交通信息与安全, 2018, 36 (2): 106-111.
TANG Zhengqi, JIANG Jianping, LI Zilin, et al. Aquantitative method for site selection of offshore wind farms in far-reaching sea areas [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 36 (2): 106-111.
- [21] 詹晓芳, 马丽, 陆志强. 海上风电场对大型底栖生物影响 [J]. 生态学杂志, 2021, 40 (2): 586-592.
ZHAN Xiaofang, MA Li, LU Zhiqiang. Review on the effect of offshore wind farms on macrobenthos [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40 (2): 586-592.
- [22] 余文博. “平价时代”的海上风电降本增效技术研究 [J]. 上海节能, 2022 (4): 468-475.
YU Wenbo. Research on cost reduction and efficiency enhancement technology of offshore wind power in “Parity Era” [J]. Shanghai Energy Conservation, 2022 (4): 468-475.
- [23] Buck B H, Langan R. Aquaculture perspective of multi-use sites in the open ocean [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2017.
- [24] 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): 1229.

- [25] 班淇超, 边坤, 王梦涵, 等. 基于海洋牧场与离岸风电功能集成的海洋建筑可行性研究 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2020, 51 (6): 1121-1125.
- BAN Qichao, BIAN Kun, WANG Menghan, et al. Research on the feasibility of marine architectures based on the functional integration of marine ranching and offshore wind power [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 51 (6): 1121-1125.
- [26] 张育超, 徐鹏程. 海上风电现状及发展趋势研究 [J]. 山东工业技术, 2017 (16): 228.
- ZHANG Yuchao, XU Pengcheng. Research on current situation and development trend of offshore wind power [J]. Shandong Industrial Technology, 2017 (16): 228.
- [27] 王恩辰. 海洋牧场建设及其升级问题研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015: 37.
- [28] Buck B H, Krause G. Integration of aquaculture and renewable energy systems [M]. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, 2012.
- [29] Karampour H, Aryai V, Abbassi R, et al. Reliability of multi-purpose offshore-facilities: Present status and future direction in australia [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 148 (2035): 437.
- [30] 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: 7-8.
- [31] Buck B H, Langan R. The German case study: Pioneer projects of aquaculture-wind farm multi-uses [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2017.
- [32] Papandroulakis N, Thomsen C, Mintenbeck K, et al. The EU-Project “TROPOS” [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2017.
- [33] 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): 5.
- MO Jueting, SONG Guowei, SONG Lang. Preliminary discussion on the ecological development feasibility of “offshore wind power + ocean ranch” in Yangjiang, Guangdong [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7 (2): 5.
- [34] Zhang X, D Sun, Zhang X, et al. Regional ecological efficiency and future sustainable development of marine ranch in China: An empirical research using DEA and system dynamics [J]. Aquaculture, 2021, 534: 736339.