

北部湾海上风电与海洋牧场发展现状与展望

何则辰^{1,2,3}, 徐兴永^{1,2,3}, 胡晓薇^{1,2,3}, 朱祖浩^{1,2,3}, 陈 洁^{1,2,3}

- (1. 自然资源部第四海洋研究所, 广西 北海 536015;
2. 广西北部湾海洋资源环境与可持续发展重点实验室, 广西 北海 536015;
3. 自然资源部热带海洋生态系统与生物资源重点实验室, 广西 北海 536015)

摘 要: “十四五”规划纲要为海上风电与海洋牧场的融合发展提供了有力的政策支持, 两者融合发展是一种具有广阔前景和巨大潜力的海洋经济模式, 其中北部湾城市群中海上风电与海洋牧场的融合发展仍处在探索阶段, 尤其是广西沿岸海域海上风电开发相对较为落后。本文对海上风电与海洋牧场融合发展理念、国内外海上风电与海洋牧场发展现状及融合发展模式进行总结, 并结合北部湾海洋资源环境特征, 对北部湾海上风电与海洋牧场融合建设现状进行展望, 说明了两项融合建设的必要性和可行性, 以期为北部湾海上资源集约开发利用提供科学指导和参考依据。

关键词: 海上风电; 海洋牧场; 融合发展; 北部湾

中图分类号: TM614; S953.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2025)02-0128-11

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20240724001

引用格式: 何则辰, 徐兴永, 胡晓薇, 等, 2025. 北部湾海上风电与海洋牧场发展现状与展望[J]. 海岸工程, 44(2): 128-138. HE Z C, XU X Y, HU X W, et al, 2025. Status and expectation of integrated development of offshore wind power and marine ranching in the Beibu Gulf[J]. Coastal Engineering, 44(2): 128-138.

北部湾是我国连接东盟的国际大通道和海上丝绸之路的重要枢纽、陆海统筹发展示范区, 具有特殊的战略地位和区位优势。2017 年国务院批复北部湾城市群的规划建设, 包括广西 6 市、广东 3 市和海南 6 县市。该城市群背靠大西南、毗邻粤港澳、面向东南亚, 在西部大开发宏伟蓝图中及国家对外开放的广阔舞台上, 该区域占据着不可替代的独特战略位置。我国“十四五”规划明确提出要协同推进海洋保护、发展与权益维护, 加速海洋强国建设。国家发展改革委在 2022 年发布的《北部湾城市群建设“十四五”实施方案》中明确了未来发展目标, 要建设向海经济体系, 其中包括海上风电新型支柱产业和海洋牧场传统产业的升级。在北部湾这片蔚蓝的海域上, 海上风电和海洋牧场正逐步成为驱动海洋经济转型升级的关键力量。鉴于两者在促进海洋经济高质量发展、优化经济结构及增强发展动力方面所展现出的巨大潜力, 有必要对北部湾地区海上风电与海洋牧场的融合建设进行更为深远的展望, 并聚焦融合过程中亟待解决的重点问题。

1 海上风电与海洋牧场融合发展理念

鉴于全球可再生、清洁能源需求的持续攀升, 海上风电正日益成为各国关注的焦点与战略重地。与此同时, 海洋牧场的建设能够促进生态系统的保护和生物多样性的提升。因此, 在能源转型和

收稿日期: 2024-07-24

资助项目: 科技基础资源调查专项(2023FY100800); 自然资源部第四海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(JKF202305); 中国(广西)—东盟国家海洋生物资源保护与利用创新平台建设项目(桂科 AD20159095)

作者简介: 何则辰(1990—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事海上可再生能源开发与利用方面研究。

E-mail: hezechen@4io.org.cn

(责任编辑 胡筱敏)

环境保护方面,将海上风电与海洋牧场融合开发可实现清洁能源和海洋生态的可持续发展。

海上风电的规模化发展占据了海上较大的空间,其建设区域逐渐由浅水区向深水区扩展;而海洋牧场因近岸人类活动效应,如旅游、海水养殖、污水排放等,也正在向深水区推进,将会导致两者的建设区域存在交叉,势必出现用海矛盾等一系列问题(李亚杰等,2023)。因此,从空间利用和生态平衡的角度而言,通过合理的空间规划,将海洋牧场装置与海上风电基础深度融合,可最大限度地减少对彼此的影响,从而实现和谐共存。

根据欧洲早期对海洋风电环境修复、生物聚集效应方面的研究结果,风电场桩基能聚集鱼类,已被证明可以充当人工鱼礁(杨红生等,2019),主要原因是风电基础的迎流和背流面易产生上升流和背涡流,这些涡流区流速缓慢,会引起水质理化等要素的明显变化,使得浮游生物、甲壳类和鱼类发生物理性聚集,达到改善海洋生态环境、养护海洋生物资源的目的(董元元,2019;李阳,2019;孙岳等,2022)。另外,由于风电场的排他特性,其所在海域往往被设定为禁渔区,这一特性为海上风电场与海洋牧场的融合发展提供了独特的契机,使得在风电场内构建海洋牧场不仅在理论上具备可行性,更在实际操作中展现出极高的实践价值与潜力(陈灏等,2022)。

2 海上风电与海洋牧场发展现状

2.1 海上风电发展现状

海上风电是可再生能源领域的重要组成部分。相较于陆上风电,海上风电展现出更为显著的优势:其资源丰富、发电效率高、无须占用土地,且易于实现规模化开发。国外海上风电机组的发展大致经历了百千瓦级示范(1970—2000年)、兆瓦级商业应用(2000—2010年)、数兆瓦级商业应用(2010年至今)三个阶段(吴迪等,2023)。目前,全球海上风电领域正经历着迅猛的扩张期,其装机量呈现出显著的增长态势。从地域分布来看,这股增长浪潮主要聚焦于亚太与欧洲两大区域。截至2022年末,全球海上风电总装机容量已跃升至64.31 GW(陶建根等,2023),其中亚太和欧洲地区各占比52%和47%,亚太地区已成为世界上最大的海上风电市场。全球风能理事会(Global Wind Energy Council, GWEC)发布的《2023年全球海上风电报告》预测,到2032年,全球将新增建设380 GW(3.8亿kW)的海上风电,其中近一半来自亚太地区。然而,欧洲在海上浮式风电领域仍处于领先地位,截至2022年底,欧洲地区的浮式风电总装机容量达到171 MW,占据全球浮式风电市场份额的91%,亚太地区浮式风电装机16.7 MW,占全球市场份额的9%。

国内海上风电起步虽晚,但发展速度令人瞩目。2007年,在渤海湾畔,我国成功建设并启动了第一台海上风电机组,标志着我国正式迈入了海上风电的前期探索与开发阶段。目前,我国海上风电已经走向规模化与集群化发展的新阶段,从近浅海域迈向深远海,从小规模试点迅速扩展至大规模集中开发,展现出强劲发展势头。截至2023年底,我国海上风电装机量累计超过36 GW(杜剑强等,2023;苏南,2023),连续三年雄踞全球海上风电累计装机规模榜首,已形成完整的海上风电产业链,具备大规模开发和建设海上风电的能力。国家发展改革委和国家能源局于2022年1月29日发布《“十四五”现代能源体系规划》,提出要加速东南部沿海海上风电集群化开发,重点布局广东、浙江、福建、江苏、山东等海上风电基地。在此背景下,多地积极响应国家规划,相继出台了地方性的海上风电发展规划和支持政策,预计各沿海省份将大力推进项目落地实施,推动海上风电向深远海发展,促进相关产业链的优化升级。

国家发展改革委在《北部湾城市群建设“十四五”实施方案》(发改规划〔2022〕482号)中提出建设北部湾海上风电基地,推进阳江沙扒、湛江外罗、钦州、海南西部海上风电场建设(赵靓,2022)。2022年6月1日,国家发展改革委、国家能源局等9部门联合印发《“十四五”可再生能

源发展规划》(发改能源〔2021〕1445号)提出:重点建设北部湾千万千瓦级海上风电基地。广西钦州、防城港,广东湛江、阳江,以及海南等均已制定了相应的“十四五”规划(表1),加快推进近海海上风电开发建设,加速海上风电深远海示范应用。

表1 北部湾城市群海上风电规划

Table 1 Offshore wind power planning for the urban cluster of the Beibu Gulf

规划名称	主要规划内容
《湛江市制造业高质量发展“十四五”规划》	加快徐闻、雷州风电项目建设,打造海上风电全产业链
《阳江市能源发展“十四五”规划》	重点构建广东(阳江)国际风电城
《海南省风电装备产业发展规划(2022—2025年)》	打造海上风电500亿级产业链(群)
《广西可再生能源发展“十四五”规划》	优先加速钦州、防城港等近海25个海上风电场开发,总装机容量达2250万kW

2.2 海洋牧场发展现状

海洋牧场是基于海洋生态学原理与现代工程技术,在特定海域构建并管理,旨在高效利用自然生产力培育渔业资源的人工渔场(杨红生等,2018)。国外海洋牧场发展历程可分为3个阶段:初期探索阶段(1795—1970年)、规模化建设阶段(1971—2000年)和生态化建设阶段(2001—2022年)(袁华荣,2022)。人工鱼礁与增殖放流作为国外海洋牧场发展的两种主要方式,已经在日本、美国等多个国家得到了广泛应用并取得了显著成效(丁德文等,2022)。20世纪60年代美国率先制定了“海洋牧场建设计划”,随后在加利福尼亚州成功打造了集观光旅游、休闲垂钓功能于一体的综合性休闲型海洋牧场。日本于1971年提出了海洋牧场建设的宏伟构想,并成功建立了全球首个真正意义上的海洋牧场——日本黑潮牧场。进入21世纪后,日本高度重视运用新技术修复渔业生态环境、保护并增殖渔业生物资源,比如冈山县海洋牧场,更是将海洋牧场建设推向深远海域。韩国自1998年起在统营、丽水、蔚珍、泰安、济州建设了不同类型的海洋牧场示范区,根据韩国政府海洋牧场计划,至2030年将建设500个海洋牧场,综合开展海水养殖、人工鱼礁、增殖放流等工作,实现全沿岸海洋牧场化。美国卡特琳娜海洋牧场成立于2012年,是美国第一家离岸牧场,旨在探索高效、环保的海洋牧场建设模式和技术手段,其建成标志着美国在海洋牧场建设方面的进一步探索与发展。

在过去的几十年里,海洋牧场的建设经历了从传统到现代的转型,发展成为涵盖生态养殖、休闲渔业、海洋旅游等多个领域的综合性产业,即将迈向“海洋牧场3.0时代”,该阶段以数字化和体系化为标志,覆盖淡水和海洋,构建全域型水域生态牧场(杨红生等,2022)。2022年11月,农业农村部印发《关于加强水生生物资源养护的指导意见》(农渔发〔2022〕23号),提出到2025年将建设国家级海洋牧场示范区200个。截至2023年7月,我国已建成海洋牧场超300个,其中国家级海洋牧场示范区169个,投放鱼礁超过5000万 m^3 ,用海面积超过3000 km^2 ,标志着我国海洋牧场产业已初具雏形(经济日报,2023)。然而,目前我国海洋养殖业主要聚焦于近岸浅水区,呈现出一种较为原始粗放的运营模式,存在显著的布局失衡、单位面积内养殖密度过高、养殖产品质量参差不齐等问题(林鸣,2022)。2013年国务院发布《关于促进海洋渔业持续健康发展的若干意见》(国发〔2013〕11号),明确限定海上养殖面积不超过 $1.15\times 10^4\text{km}^2$ 并鼓励离岸养殖,而截至2022年,我国海上养殖面积已显著超出该限制,达到 $2.07\times 10^4\text{km}^2$ 以上(农业农村部渔业渔政管理局等,2023),近岸海水养殖面临过度饱和和挑战。但近五年来,我国在深远海养殖技术领域取得了突破性进展,

相继建造了诸如养殖工船“国信 1 号”等、深海网箱系统“深蓝 1 号”等、深海养殖综合平台“海峡 1 号”“耕海 1 号”“嵎海 1 号”等(林鸣, 2022)。

北部湾城市群中已规划建设 7 个国家级海洋牧场示范区(表 2), 其中防城港市白龙珍珠湾海域、北海冠头岭西南海域两个示范区建设多功能平台项目, 并搭载水文水质监测设备和水上水下监控设备, 不仅发挥了海洋环境监测和牧场看护管理功能, 还可为游客提供休闲垂钓、潜水、海上寻宝、海洋生态知识科普等休闲旅游体验服务, 也为沿海各市推进海洋牧场与二三产业融合发展, 探索海洋牧场多元融合发展提供了新模式。

表 2 北部湾城市群国家级海洋牧场示范区

Table 2 National marine ranching demonstration zones in the urban cluster of the Beibu Gulf

所在海域	主要建设内容
广西钦州市三娘湾海域	海域面积为 2 万 hm^2 , 建设人工鱼礁区 5 334 hm^2 , 投放礁体 114.34 万 m^3
广西北海市冠头岭西南海域	海域面积为 480 hm^2 , 共投放人工鱼礁 6.5 万 m^3
广西北海市银滩南部海域	总占海面积约为 194.031 3 hm^2 , 鱼礁群共 12 个, 共形成礁体空方量约 19.2 万 m^3 (实方量约 20 135.1 m^3)
广西防城港市白龙珍珠湾海域	总体规划面积为 450 km^2 , 累计建设投放人工鱼礁单体 3 580 个、约 21 万 m^3 , 藻礁 6 000 个
广东湛江市硇洲岛东侧海域	用海总面积 38.270 7 hm^2 , 全部为透水构筑物用海, 其中人工鱼礁区为 32.000 1 hm^2 , 海藻场区为 6.270 6 hm^2
广东吴川市博茂海域	海域面积 1 940 hm^2 , 建造投放礁体 26 400 m^3
广东湛江市遂溪县江洪海域	批准用海总面积 150 hm^2 , 其中人工鱼礁透水构筑物用海 19.6 hm^2 , 渔业资源增殖养殖开放式养殖用海 130.4 hm^2

2.3 海上风电与海洋牧场融合发展现状

从 20 世纪 80 年代开始, 国外针对海上资源开采平台与海洋养殖的融合开发进行了探索。欧洲地区是开发海上风电场的前驱, 欧盟资助了一批海上风电多业态融合开发研究项目(European Commission, 2014, 2015, 2016, 2018, 2022), 针对多个海域的不同海洋融合开发模式(包括海上风电、波浪能、海上风电制氢、海洋牧场等)进行了经济性、敏感性和可行性分析, 研究结果表明在当下的技术条件下, 海上风电与海洋牧场融合开发是最具前景的融合开发模式。英国 North Hoyle 与德国 Meerwind 等风电场的多个实践项目验证了海上风电与渔业养殖兼容的可行性, 技术上确立了融合项目的成功路径(Krone et al, 2013)。欧洲先行国家, 比如荷兰、比利时和挪威等, 已率先开展海上风电与海水增养殖融合试验, 将养殖设施固定于风机基础上, 为二者协同发展展现了潜力典范(秦旭瑶, 2022)。

亚洲国家针对海上风电与海洋牧场共场域融合开发的研究起步较晚, 韩国于 2016 年实施的融合开发项目显示, 海上风电区内双壳贝类与海藻等关键经济生物资源量显著增加(Buck et al, 2018)。我国 2013 年莆田南日岛融合开发项目首次提出了多营养层次立体综合养殖。2019 年 3 月, 山东潍坊昌邑市“风光渔”一体化海上风电项目作为全国首例“风光渔”同场建设项目获批, 于 2022 年底全容量并网发电。莱州市“风渔”融合发展研究试验项目装机容量 304 MW, 于 2023 年 3 月全容量并网, 是全国首个海上风电与海洋牧场融合发展研究试验项目(郑直等, 2023)。2019 年 12 月, 广东省阳西青洲岛风电融合海域国家级海洋牧场示范区已获批我国首个风渔结合国家级海洋牧场。2020 年 11 月, 福建莆田龙源“电力漂浮式风电+网箱养殖融合项目”进入样机研发阶段, 标志着

首个漂浮式风渔融合示范项目取得新进展。2022 年 9 月,国内首个“海上风电+海洋牧场+海水制氢”融合项目明阳阳江青洲四海上风电场项目全面启动施工,该项目在全球首创新举,实现了风机导管架基础与养殖网箱的深度融合。

在“双碳”战略的明确导向下,国内沿海省市积极绘制海上风电发展的宏伟蓝图。步入“十四五”时期,上海、广西、福建、浙江、山东、辽宁、江苏及广东等沿海省市,分别规划新增 1.8、3、4.1、4.55、5、7.75、11.74 及 17 GW,总计约 51 GW 的装机容量(甄妮,2022),彰显了海上风电作为新兴清洁能源的蓬勃发展态势。国家可再生能源“十四五”规划更是高瞻远瞩,明确指出要加速推进山东半岛、长三角、闽南、粤东、北部湾等区域,构建具有千万千瓦级规模的海上风电能源基地,同时鼓励百万千瓦级的重点项目集中连片开发。此外,规划还强调要结合这些基地的建设,积极探索并推进深远海海上风电评价示范项目与海上能源岛示范工程(丁怡婷,2023)。

北部湾城市群中已规划 5 个风渔融合开发项目,其中广东阳江 4 个(阳杰等,2024)(表 3)。阳江的“明渔一号”项目采用先进的抗台风设计,搭载智能化渔业养殖系统,实现了海上风电与深远海渔业的智慧化、无人化运营管理。此外,阳江还计划在未来几年内建设更多大型智能养殖装备,进一步推动风渔融合项目的规模化发展。

表 3 北部湾城市群已立项风渔融合开发项目

Table 3 Wind power and Fishery integration projects that have been approved in the urban cluster of the Beibu Gulf

项目名称	融合类型	项目状态	主要建设内容
广东阳江阳西青洲岛风电融合海域国家级海洋牧场示范区	海上风电+人工鱼礁+养殖网箱	2019 年 12 月批准	人工鱼礁区、海上风电融合区、休闲渔业区等
广东阳江沙扒深海渔业养殖实验区项目	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	300 MW 风电场+抗台型 HDPE 养殖网箱
广东阳江南鹏岛海域中广核国家级海洋牧场示范区	海上风电+人工鱼礁+养殖网箱	2022 年 2 月批准	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
广东阳江青洲四海上风电场与网箱融合示范项目	导管架基础+养殖网箱	2023 年 4 月开工,2023 年 8 月风机吊装成功	500 MW 风电场,养殖水体约 5 000 m ³ ,养殖金鲳鱼约 15 万尾
海南东方市明阳集团东方 CZ9 海上风电场示范项目	海上风电+养殖网箱+海水制氢	2022 年 11 月开工	1 500 MW 风电场,海南首个海洋能源立体开发示范项目

3 海上风电与海洋牧场融合发展模式

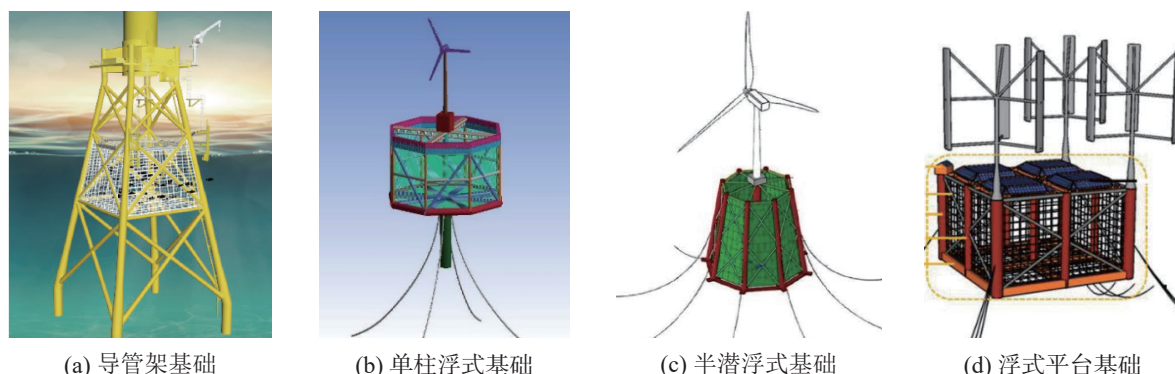
按照海上风电机组和海洋牧场养殖装备的布置方式,海上风电与海洋牧场的融合方式可以划分为共结构和共场域模式,其中共结构模式根据功能区融合程度又可划分为功能融合与功能分离模式。

1) 共结构融合模式

该模式将风机基础结构作为支撑平台与海洋养殖设施进行有机结合,如将养殖网箱与固定式或漂浮式风机基础、多功能浮式平台等相结合(图 1)。“明渔一号”作为固定式基础融合创新的杰出典范,创造性地结合了导管架基础与养殖网衣的共构设计理念,是我国自主研发的全球首台风渔一体化智能装备。“国能共享号”将三立柱半潜浮式基础与养殖网箱一体化融合,展现了风渔融合技术创新的新高峰。

共结构融合模式不仅注重结构上的结合,更强调功能上的互补与协同,通过充分利用海上风电的基础结构,减少海域使用面积,降低养殖设施的独立建设成本,提高海域的立体化利用效率,实现海上风电与海洋养殖产业深度融合,养殖装备所需能源也可直接得到补给。然而,海上风电

与海洋牧场功能完全不同, 两者共结构融合模式存在相互作用机理不明确、载荷计算规范不完备、融合运维难度大等问题, 需要定制化研发。



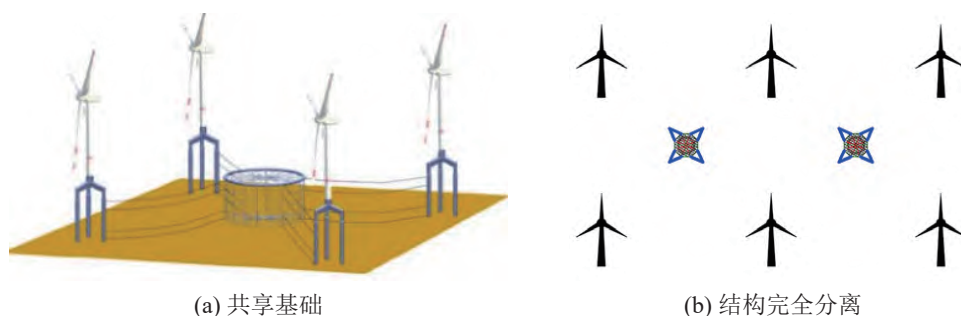
注: 图 a、图 b、图 c 和图 d 分别来源于阳杰等(2024)、Chu 等(2020)、Zheng 等(2018)和 Zheng 等(2020)。

图 1 风电机组与养殖网箱共结构融合模式示意图

Fig. 1 Integration models of the shared structures of wind turbines and aquaculture cages

2) 共场域融合模式

该模式中, 海上风机与牧场养殖装备既可以相对独立, 也可以共享基础设施, 充分利用风电场与养殖区之间的互补性。在风电机组群的空隙中开展海洋养殖, 既能提高海域的空间使用率, 又可以保证养殖环境、养殖作业、运维活动等不易受到影响, 如图 2 所示。然而, 该模式也存在一些不足之处, 例如海洋牧场设施建设成本增加, 以及海上风电为养殖装备供电成本增加。对于共享基础设施的融合方式, 风电基础系泊点处附加荷载增大, 而目前尚无相关规范对此类载荷进行指导, 将导致风电基础的技术风险提高。



注: 本图来源于李亚杰等(2023)。

图 2 风电机组与养殖网箱共场域模式示意图

Fig. 2 Models of the shared field of wind turbines and aquaculture cages

在现有经济技术条件下, 海上风电场与海洋牧场在同一片海域共场域融合布置是两者融合开发的首选方案。国内外针对海上风电与海洋牧场共场域融合开发的可行性进行了研究, 并开展了多项初步应用示范(Buck et al, 2017; 李丽旻, 2022), 如莱州市海上风电与海洋牧场融合发展研究试验项目、昌邑市海洋牧场与三峡 300 MW 海上风电融合试验示范项目及韩国东南部沿海的渔业和水产养殖(Integrated Multi-trophic Aquaculture, IMTA)与海上风电场共场域融合试验项目。虽然国内外对海洋多业态融合开发进行长期和广泛的研究, 但是各海域海洋动力环境、海洋生物生态特性、风场环境等差异较大, 亟需厘清目标海域海上风电与海洋牧场融合开发的相互影响机制, 探索融合开发的关键技术。

4 北部湾海上风电与海洋牧场建设展望

北部湾城市群在海上风电场区和国家级海洋牧场区的规划上,已经迈出了坚实的步伐。特别是广东省和海南省,在风渔联合开发项目的建设上已取得了显著进展。相比之下,北部湾广西近岸海域的海洋牧场示范区虽取得了良好的经济效益,但海上风电场建设仍相对落后。为推动北部湾海上风电与海洋牧场建设的快速和可持续发展,本节在总结北部湾典型海洋环境特征的基础上,给出了北部湾海上风电与海洋牧场融合建设的建议。

4.1 北部湾典型海洋环境特征

北部湾地理位置特殊,是一个半封闭的海湾,平均水深 40 m,最深达 100 m,海底地貌呈现为新生代大型沉积盆地,其底部自湾顶向湾口缓缓倾斜,覆盖着源自陆地的丰富泥沙沉积。沉积层厚达数千米(中国科学院,1999)。一般情况下,相较于拥有较大沉积物的海床,被细小颗粒覆盖的海床条件对于海上风电基地建设更为有利。南海北部湾和琼州海峡的海底表层主要由细颗粒陆源碎屑堆积,琼州海峡侵蚀洼地边缘及潮流沙脊下部存在大中型沙波,这些沙波活动频繁,导致海底稳定性不佳,并伴有强烈的冲刷、淤积及泥沙大规模运动(张磊,2011;王淼等,2013)。因此,对海底地质条件要求较高的重力式与负压桶式基础在北部湾并不适用,而桩基础具有结构简单稳定、承载力高、占海床面积小、适用范围广等优点是较好的选择。对于水深小于 30 m 的海域,可选择单桩式基础(李志川等,2022),而水深大于 30 m 时,可考虑小直径的三桩基础、导管架基础和多桩承台基础等。水深大且海洋环境条件恶劣时,应选用刚度较高的导管架结构或浮式基础结构以确保稳定性。

北部湾海洋环境特点显著,其拥有包括珊瑚礁、海草床等多种海洋生态系统,孕育了独特的海洋生物栖息与繁殖场所。同时其渔业资源也极为充沛,位列我国四大渔场,并在我国南海展现出高度的物种多样性,其中鱼类 500 多种、甲壳类近 400 种、贝类 300 多种、浮游植物 300 多种、浮游动物约 400 种。盛产鲳鱼、竹荚鱼、金枪鱼、金线鱼、沙丁鱼、比目鱼、鲭鱼等 50 余种高经济价值的鱼类。同时,药用生物资源极为丰富,尤其是大型海洋药用生物资源多样性在全国名列前茅,同时是我国传统中药如珍珠、牡蛎、文蛤等的主要产地。海洋牧场可有效保护和利用海洋渔业资源,通过建立规模化渔业设施与系统化管理体系,实现鱼、虾、贝和藻等海洋资源的精准规划与放养,提高渔业资源的可持续利用率。同时,对于海洋生态系统的恢复、保护,以及海洋生物多样性维护都具有积极作用。

北部湾地处北热带和亚热带的交界处,季风特征显著(中国科学院,1999)。北部湾海域年平均风速约为 6.0~8.5 m/s,风资源条件相对较好。冬季,由于东北季风强度显著增强,这一强风驱动着外海的水体沿着海湾东侧向北流动,而与此同时,海湾内部的水体则顺应风向的转变,沿着海湾西侧向南流动,共同构成了一个逆时针方向的海水环流系统。夏季,西南季风则成为主导力量,推动海水形成一个与冬季流向完全相反的环流模式,即整个环流系统转为顺时针方向。因此,北部湾的海流变化与季风密切相关,形成了特定的环流模式。从能源角度看,北部湾的环流和季风特点为海上风电提供了天然条件,具备规模开发海上风电的潜力。

北部湾湾内以规则全日潮为主,潮波主要由外海传入形成,湾内同时存在规则全日潮流、不规则全日潮流以及不规则半日潮流,且以往复式潮流为主。根据北部湾潮流场数值模拟结果,在涨落急流场中,最大流速位于琼州海峡口处,流速高达 2 m/s(韦聪等,2023)。北部湾湾内潮差从湾口向湾顶递增,在北海附近海域,最大潮差高达 7 m(中国科学院,1999)。平均潮差为 2.13~2.52 m,

一般3月最小,12月最大,潮差分布呈现沿岸大、近海小,东部比西部大、湾内比湾外大的特点。而海域中的流速和潮位变化可能会对风机基础和养殖网箱的结构稳定性、安全性以及运行效率等产生深远的影响,比如:过大的流速和潮位变化可能会增加风机基础受力,降低其稳定性,甚至影响风机的运行;会增加网箱受到的水流冲击力,可能使网箱发生变形或移位,影响养殖鱼类的生长环境;会对基础或锚固结构周围的海床和沉积物产生冲刷和侵蚀作用等。因此,在设计风机和网箱等结构时,需要根据具体的海域条件和风机设计要求来评估流速和潮位对风机的影响,以确保其安全运行和稳定性。

4.2 北部湾海上风电与海洋牧场融合建设建议

在北部湾沿岸这一生态敏感且资源丰富的区域,已经布局了海洋牧场、水源涵养、生物多样性保护、海洋生态系统保护与修复等关键功能区,这些区域对于维护生物多样性、促进生态平衡以及保障渔业资源可持续发展具有不可估量的价值。因此,在北部湾规划建设海上风电项目时,必须采取一系列措施以确保与关键功能区的和谐共存,避免对海水水质、海洋生物、海洋生态系统功能等造成负面影响。

1)评估融合场域的环境适宜性与承载能力。量化电磁辐射、振动及噪声对海洋生物的影响,围绕易冲刷海洋底质、水文水质及生物生态等因子评估生态环境影响,建立环境承载力评价指标体系,评价融合场域建设的区域环境承载力,确保在保护生态的前提下实现可再生能源开发与海洋生态保护的协调发展。

2)共场域融合布局方案。利用风机基础群的水动力影响、洋流和波浪特点优化养殖环境,合理规划海上风机组与养殖网箱、人工鱼礁等设施的空间布局,确保两者在空间上不产生冲突,并实现海域资源的高效集约利用,促进清洁能源与生态渔业的空间融合。

3)立体化多业态融合开发。基于海上风机的稳固架构,将牧场、休闲救助平台、智能化养殖等多元设施与风机基础一体化创新设计与融合布局,旨在减少海洋牧场运营成本、扩大经济生物养殖规模并提升生产效率,进而促进海洋经济向可持续发展转型。同时,结合生态礁石的建设,进一步优化海洋生态环境。

4)增殖型风机基础结构设计。将风机基础与人工鱼礁有机融合,开发增殖型风机基础,既促进底栖海珍品与礁栖鱼类自然增殖,又稳固区域海洋生物食物网,实现资源保育与生态修复的双重效益。在固定式或漂浮式风机基础一体化设计时,需充分考虑在风机基础结构上增设用于水产养殖的设备,如网衣、养殖笼等,所带来的额外工作负荷,通过精确计算与结构优化,确保风电设施在承载养殖功能的同时,依然能够维持其结构的稳固性与运行安全性,以催生新型的海上风电与海洋牧场一体化装备,实现能源开发与海洋资源利用的深度融合。

参考文献 (References):

- 陈灏,孙省利,张才学,等,2022.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*,41(2):208-214.
- CHEN H, SUN X L, ZHANG C X, et al, 2022. Feasibility analysis on the integrated development of marine ranch and offshore wind power in Guangdong Province[J]. *Marine Science Bulletin*, 41(2): 208-214.
- 丁德文,索安宁,2022.现代海洋牧场建设的人工生态系统理论思考[J].*中国科学院院刊*,37(9):1335-1346. DING D W, SUO A N, 2022. Theoretical thinking of artificial ecosystem for modern marine ranching[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 37(9): 1335-1346.
- 丁怡婷,2023.海上风起绿电来[N].*人民日报*,2023-08-10(10). DING Y T, 2023. Offshore wind generates green electricity[N]. *Renmin Ribao*, 2023-08-10(10).

- 董元元, 2019. 浅谈海上风电发展趋势[J]. 现代营销(信息版), 27(10): 73. DONG Y Y, 2019. A brief discussion on the development trend of offshore wind power[J]. Modern Marketing (Information Edition), 27(10): 73.
- 杜剑强, 仲俊成, 李斌, 等, 2023. 中国海上风电发展现状及展望[J]. 油气与新能源, 35(3): 1-7. DU J Q, ZHONG J C, LI B, et al, 2023. Current status and prospects of offshore wind power development in China[J]. Oil and Gas and New Energy, 35(3): 1-7.
- 经济日报, 2023. 建设海洋牧场充实“蓝色粮仓”[EB/OL]. (2023-07-05)[2024-07-24]. http://ipaper.ce.cn/pad/content/202307/05/content_276914.html. Economic Daily, 2023. Developing marine pastures to enrich the ‘Blue Granary’ [EB/OL]. (2023-07-05)[2024-07-24]. http://ipaper.ce.cn/pad/content/202307/05/content_276914.html.
- 李丽旻, 2022. 多地探索“海上风电+海洋牧场”模式[N]. 中国能源报, 2022-06-27(3). LI L M, 2022. Exploration of the “offshore wind power + marine ranching” model in multiple places[N]. China Energy News, 2022-06-27(3).
- 李亚杰, 闫中杰, 刘扬, 等, 2023. 海上风电与海洋养殖融合发展现状与展望[J]. 船舶工程, 45: 166-170. LI Y J, YAN Z J, LIU Y, et al, 2023. Integration of offshore wind power and marine aquaculture[J]. Ship Engineering, 45: 166-170.
- 李阳, 2019. 广西发展海上风电的现状与建议[J]. 南方国土资源, 36(8): 79-81. LI Y, 2019. Current situation and suggestions for the development of offshore wind power in Guangxi[J]. Southern Land and Resources, 36(8): 79-81.
- 李志川, 胡鹏, 马佳星, 等, 2022. 中国海上风电发展现状分析及展望[J]. 中国海上油气, 34(5): 229-236. LI Z C, HU P, MA J X, et al, 2022. Analysis and prospect of offshore wind power development in China[J]. China Offshore Oil and Gas, 34(5): 229-236.
- 林鸣, 2022. 发展大规模深远海养殖: 问题, 模式与实现路径[J]. 管理世界, 38(12): 39-58. LIN M, 2022. Developing large-scale deep sea aquaculture: problems, modes and realization ways[J]. Management World, 38(12): 39-58.
- 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, 2023. 2023年中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社. Fishery and Fishery Administration Bureau of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries, 2023. 2023 China fisheries statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press.
- 秦旭瑶, 2022. 波浪与风渔组合结构相互作用研究[D]. 大连: 大连理工大学. QIN X Y, 2022. Study on the interaction between wave and offshore wind turbine-cage assemblage structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology.
- 苏南, 2023. 我国海上风电新增装机重返“高速路”[N]. 中国能源报, 2023-12-25(17). SU N, 2023. China's newly installed offshore wind power capacity returns to the “highway”[N]. China Energy News, 2023-12-25(17).
- 孙岳, 蒋欣慰, 秦松, 等, 2022. 海上风电和海洋牧场融合发展现状与展望[J]. 水产养殖, 43(11): 70-73. SUN Y, JIANG X W, QIN S, et al, 2022. Current status and prospects of integrated development of offshore wind power and marine ranching[J]. Aquaculture, 43(11): 70-73.
- 陶建根, 陈怡, 黄博远, 2023. 海上风电发展现状与趋势分析[J]. 能源工程, 43(4): 1-9. TAO J G, CHEN Y, HUANG B Y, 2023. Current situation and development trend of offshore wind power[J]. Energy Engineering, 43(4): 1-9.
- 王淼, 吴云青, 苏萌, 等, 2013. 单桩式基础应用于我国海上风电的可行性探讨[J]. 电力建设, 34(4): 63-66. WANG M, WU Y Q, SU M, et al, 2013. Application of single pile foundation in offshore wind power in China[J]. Electric Power Construction, 34(4): 63-66.
- 韦聪, 陈波, 2023. 北部湾三维潮汐潮流数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 53(增刊): 1-10. WEI C, CHEN B, 2023. Numerical simulation of 3-D tide and tidal current in the Beibu Gulf[J]. Periodical of Ocean University of China, 53(Suppl.1): 1-10.
- 吴迪, 任重进, 韩荣贵, 等, 2023. 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, 3(41): 78-84. WU D, REN Z J, HAN R G, et al, 2023. Exploration and practice of offshore wind power and marine ranching integration development technology[J]. Chinese Fisheries Economics, 3(41): 78-84.
- 杨红生, 杨心愿, 林承刚, 等, 2018. 着力实现海洋牧场建设的理念、装备、技术、管理现代化[J]. 中国科学院院刊, 33(7): 732-738. YANG H S, YANG X Y, LIN C G, et al, 2018. Strive to realize modernization of concept, equipment, technology, and management of modern marine ranching development[J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 33(7): 732-738.

- 杨红生,茹小尚,张立斌,等,2019.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,34(6):700-707.
- YANG H S, RU X S, ZHANG L B, et al, 2019. Industrial convergence of marine ranching and offshore wind power: concept and prospect[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 34(6): 700-707.
- 杨红生,丁德文,2022.海洋牧场3.0:历程、现状与展望[J].中国科学院院刊,37(6):832-839. YANG H S, DING D W, 2022. Marine ranching version 3.0: history, status, and prospects[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 37(6): 832-839.
- 阳杰,张建华,马兆荣,等,2024.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,11(2):1-16. YANG J, ZHANG J H, MA Z R, et al, 2024. Development trend and technical challenges of the integration of offshore wind turbine with marine ranch[J]. Southern Energy Construction, 11(2): 1-16.
- 袁华荣,2022.国内外海洋牧场发展历程与现状[J].海洋与渔业,(4):110-112. YUAN H R, 2022. Development History and Current Status of Marine Pastures at Home and Abroad[J]. Ocean and Fisheries, (4): 110-112.
- 张磊,2011.海上风电机组基础的适用性与选择[J].科技创新导报,(25):105-107. ZHANG L, 2011. Applicability and selection of offshore wind turbine foundation[J]. Science and Technology Innovation Herald, (25): 105-107.
- 赵靓,2022.五大千万千瓦级海上风电基地周边配套产业加紧完善[J].风能,(10):44-47. ZHAO L, 2022. Accelerate the improvement of supporting industries around the five major offshore wind power bases with a capacity of tens of millions of kilowatts[J]. Wind Energy, (10): 44-47.
- 甄妮,2022.风电产业新格局:基地规模化、风机大型化支撑行业高质量发展[J].能源,(7):25-28. ZHEN N, 2022. The new pattern of wind power industry: large-scale bases, upsizing of turbines, and support for high-quality industry development[J]. Energy, (7): 25-28.
- 郑直,张冉,徐亚茜,等,2023.海上风电与海洋牧场新型风电桩包覆防腐技术[J].全面腐蚀控制,37(7):101-106. ZHENG Z, ZHANG R, XU Y Q, et al, 2023. New petrolatum coating anti-corrosion technology for wind power pile of offshore wind and marine ranching[J]. Total Corrosion Control, 37(7): 101-106.
- 中国科学院,1999.中国大西南的海上通路——北部湾[EB/OL].(1999-10-25)[2024-06-10].中国科普博览.<http://www.kepu.com.cn/vmuseum/earth/ocean/scenery/scn208.html>. Chinese Academy of Sciences, 1999. Maritime passage of southwest China: Beibu Gulf[EB/OL].(1999-10-25)[2024-06-10]. China Science Popularization Expo <http://www.kepu.com.cn/vmuseum/earth/ocean/scenery/scn208.html>.
- BUCK B H, LANGAN R, 2017. Aquaculture perspective of multi-use sites in the open ocean: the untapped potential for marine resources in the Anthropocene[M]. Bremerhaven: Springer International Publishing.
- BUCK B H, TROELL M F, KRAUSE G, et al, 2018. State of the art and challenges for offshore integrated multi-trophic aquaculture (IMTA)[J/OL]. Frontiers in Marine Science, 5: 1-21(2018-05-15)[2024-07-24]. <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2018.00165/full>.
- CHU Y I, WANG C M, 2020. Hydrodynamic response analysis of combined spar wind turbine and fish cage for offshore fish farms[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 20(9): 2050104.
- European Commission, 2014. Development of a wind-wave power open-sea platform equipped for hydrogen generation with support for multiple users of energy[R/OL].(2014-12-31)[2024-06-05]. <https://cordis.europa.eu/project/id/288145/reporting>.
- European Commission, 2015. Modular multi-use deep water offshore platform harnessing and servicing mediterranean, subtropical and tropical marine and maritime resources[R/OL].(2015-01-31)[2024-06-05]. <https://cordis.europa.eu/project/id/288192/reporting>.
- European Commission, 2016. Marine investment for the blue economy[R/OL].(2016-08-31)[2024-06-05]. <https://cordis.europa.eu/project/id/652629/reporting>.
- European Commission, 2018. Multi-Use in European Seas[R/OL].(2018-10-31)[2024-06-05]. <https://cordis.europa.eu/project/id/727451/reporting>.
- European Commission, 2022. Development and demonstration of an automated, modular and environmentally friendly multi-functional platform for open sea farm installations of the Blue Growth Industry[R/OL].(2022-03-31)[2024-06-

- 05]. <https://cordis.europa.eu/article/id/442000-renewable-energy-powers-open-sea-farming-innovation>.
- KRONE R, GUTOW L, BREV T, et al, 2013. Mobile demersal megafauna atartificial structures in the german bight-like-ly effects of offshore wind farm development[J]. *Estuar Coast Shelf*, 125: 1-9.
- ZHENG X, LEI Y, 2018. Stochastic response analysis for a floating offshore wind turbine integrated with a steel fish farming cage[J]. *Applied Sciences*, 8(8): 1229.
- ZHENG X Y, ZHENG H, LEI Y, et al, 2020. An offshore floating wind-solar-aquaculture system: concept design and extreme response in survival conditions[J]. *Energies*, 13(3): 604.

Status and Expectation of Integrated Development of Offshore Wind Power and Marine Ranching in the Beibu Gulf

HE Zechen^{1,2,3}, XU Xingyong^{1,2,3}, HU Xiaowei^{1,2,3}, ZHU Zuhao^{1,2,3}, CHEN Jie^{1,2,3}

(1. *Fourth Institute of Oceanography, MNR, Beihai 536015, China;*

2. *Guangxi Key Laboratory of Beibu Gulf Marine Resources, Environment and Sustainable Development, Beihai 536015, China;*

3. *Key Laboratory of Tropical Marine Ecosystem and Bioresource, MNR, Beihai 536015, China*)

Abstract: The ‘14th Five-Year Plan’ has provided robust policy support for the integrated development of offshore wind power and marine ranching and such an integrated development is a marine economic model with broad prospects and enormous potential. However, the integrated development of offshore wind power and marine ranching in the urban cluster of the Beibu Gulf is still in an exploratory stage, especially in the coastal area of Guangxi such integrated development is relatively backward. In this article, the concept of the integrated development of offshore wind power and marine ranching and its current status and development models at home and abroad are summarized. And in order to provide scientific guidance and reference basis for intensive development and utilization of marine resources in the Beibu Gulf, the integrated construction of offshore wind power and marine ranching in the Beibu Gulf is expected based on the characteristics of marine resources and environments in the Beibu Gulf region and the necessity and feasibility of the integrated construction are explained.

Keywords: offshore wind power; marine ranching; integration development; Beibu Gulf

Received: July 24, 2024