海上风电与海洋牧场融合模式、发展路径与实现机制研究

贾茹茹[1,2]，袁鸿烨[1]，高金伍[3]，杨国庆[1]

（1. 河北大学管理学院　保定　071002；2. 河北大学政府管理与公共政策研究中心　保定　071002；
3. 中国海洋大学经济学院　青岛　266101）

摘要：海上风电与海洋牧场融合发展已成为突破海域资源约束、提升海域利用效率的重要路径。文章系统分析了融合发展的现状与综合效益，识别其驱动机制，探索不同海域条件下融合发展的最优模式，并系统构建了融合发展路径与实现机制。研究表明：融合发展既来自资源协同与技术融合的内在驱动，也受到市场倒逼与政策引导等外部推动；融合发展模式与海域特征密切相关，呈现“空间维度—融合深度—技术维度”三维发展路径：在空间维度上，由近海浅水向深远海拓展；在融合深度上，从空间共享向结构共生深化；在技术维度上实现从基础应用向集成创新升级。为保障融合路径的有效实施，文章从空间规划、技术融合、产业协同与政策保障 4 个层面，系统构建了实现机制。研究成果旨在为推动海上风电与海洋牧场融合发展提供理论支撑与政策参考。

关键词：风渔融合；融合模式；发展路径；实现机制

中图分类号：F326.4；F426；P752　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-9857（2026）03-0011-16

Research on the Multi-use Modes，Development Pathways and Implementation Mechanism of Offshore Wind Power and Marine Ranching

JIA Ruru[1,2]，YUAN Hongye[1]，GAO Jinwu[3]，YANG Guoqing[1]

（1. School of Management，Hebei University，Baoding 071002，China；
2. Research Center for Government Management and Public Policy，Hebei University，Baoding 071002，China；
3. School of Economics，Ocean University of China，Qingdao 266101，China）

Abstract：The multi-use（MU）of offshore wind power and marine ranching has become a key pathway to overcome marine space constraints，enhance spatial utilization efficiency，and mitigate development. This paper analyzes the current situation and comprehensive benefits of MU development，identifies its driving mechanisms，explores the optimal development mode under different maritime space，and systematically constructs MU development

收稿日期：2025-11-22；**修订日期：**2026-03-12

基金项目：河北省自然科学基金项目（G2025201008）.

作者简介：贾茹茹，讲师，博士，研究方向为海洋经济与管理

通信作者：杨国庆，教授，博士，研究方向为智能决策与优化

pathway and implementation mechanism. The study reveals that MU is driven by both internal forces, such as resource synergy and technological integration, and external factors, including market pressure and policy guidance. The MU mode is closely related to marine area characteristics, demonstrating a three-dimensional development path of "space–integration depth–technology": spatially, it expands from nearshore shallow waters to deep and far-sea areas; in integration depth, it progresses from spatial sharing to structural symbiosis; and technologically, it advances from basic application to integrated innovation. To ensure the effective implementation of the MU pathway, an implementation mechanism is systematically designed from four aspects: spatial planning, technological innovation, industrial synergy, and policy support. The study aims to provide theoretical insights and policy references for the MU development of offshore wind power and marine ranching.

Keywords: Multi-use wind and fishery; Multi-use mode; Development pathway; Implementation mechanism

0 引言

在推动“双碳”目标和“海洋强国”建设的战略背景下，我国海洋经济进入扩能提质、向质量效益型转变高质量的新阶段。习近平总书记指出，“发达的海洋经济是建设海洋强国的重要支撑”。党的二十大报告提出，“发展海洋经济，保护海洋生态环境，加快建设海洋强国”。建设海上风电与海洋牧场，作为推动海洋经济高质量发展的重要抓手，分别承载着清洁能源供给与优质蛋白供应的战略功能，其产业发展备受重视。海上风电作为能源结构转型的重要支撑，其装机容量持续增长，技术路径逐渐多元[1]，但面临着用海空间紧张、生态干扰风险上升、开发成本高等现实挑战[2]。与此同时，海洋牧场作为优质蛋白供应的重要载体[3]，其发展也受到空间碎片化、产业链条短和设施化水平低等问题的制约[4]。面对两大产业发展的共性问题，推动二者从“毗邻共存”走向“融合发展”，成为突破海域资源约束、缓解开发运维压力和提升产业发展效能的重要方向[5]，对构建现代化海洋产业体系和培育海洋领域新质生产力具有深远意义。

海上风电与海洋牧场的融合发展旨在通过“多用途”利用有限的海洋空间，实现立体化开发，补齐各自发展中的短板，蕴含着空间重构、资源集约、功能互补与生态共生的潜力。早在 2000 年，以德国为代表的欧洲国家首先开展了海上风电与海水养殖的融合项目。近几年，我国福建莆田、广东阳江和山东昌邑等多地已经布局融合示范项目[6]。2019 年，山东潍坊昌邑市成功获批 300 MW 海上风电与海水养殖相结合的开发项目[7]。2022 年，明阳新能源投资控股集团在广东省阳江市阳西县沙扒镇成功地实施了“海上风电 + 海洋牧场”创新融合项目，完成了首期鱼类收获[8]。同年 5 月，国家电力投资集团有限公司在广东揭阳也启动了“新能源 + 海洋牧场”创新融合基地的建设工作[9]。随着融合实践的推进，国家层面的政策支持也日益明确。2024 年，国家能源局明确表示，要因地制宜探索海洋牧场与海上风电等融合发展模式[10]。2024 年 12 月，自然资源部发布《关于进一步加强海上风电项目用海管理的通知》，明确鼓励新增海上风电项目采用“风电 +”的综合开发利用模式，推行“一海多用”。

尽管融合发展前景广阔，但面临“概念热、落地难”的困境，多数项目仍停留在探索的初级阶段，其预期的协同增效远未充分释放。这一困境的根源在于：融合发展动力不明，战略规划缺乏精准靶向；融合实践项目布局呈现“碎片化”，其开发与海域特征及技术经济性的适配性，缺乏清晰的指导路径；跨行业的管理壁垒，也使融合生态难以形成。现有文献虽已肯定了融合的潜在效益[11-12]，但多集中于个案描述与可行性探讨[13-14]，未能从根本上回应上述痛点。这使实践者依然在“摸着石头过河”，严重制约了融合发展的规模化与商业化进程。

鉴于此，本文立足于破解海上风电与海洋牧场融合发展从“理念”到“实践”的梗阻，旨在系统

剖析驱动二者走向深度融合的内在动力与外部推手，探明依据不同融合模式与海域特征的融合发展路径，并系统构建该路径的实现机制。为此，本文将通过分析融合发展现状与效益，揭示其内外驱动机制，探究不同模式的适宜发展空间，并最终系统构建融合发展的路径及其实现机制。期望能为决策部门提供科学的规划建议，为开发企业提供可行的实践参考，进而推动我国海洋经济高质量发展。

1　海上风电与海洋牧场产业发展现状

1.1　海上风电产业发展现状

海上风电作为可再生清洁能源，资源分布范围广阔。在满足能源增长需求的同时，有助于减少对化石能源的依赖，降低碳排放，具有显著的环境与战略意义。近十年来，各国政府持续加大海上风电的政策支持与产业引导力度。据全球风能理事会预测，2024—2033 年全球海上风电新增装机容量将超过 410 GW，主要增长来自欧洲与中国[15]。截至 2024 年年底，欧洲海上风电总装机量累计 37 GW；同年，海上风电新增装机 2.6 GW；预计到 2030 年，欧洲海上风电年新增装机容量将达 31.4 GW，成为全球风电市场的重要增长引擎[16]。2024 年，中国新增海上风电装机容量达 5.62 GW，累计装机容量达 43.31 GW（图 1），分别占全球新增与累计装机总量的一半以上[1]。

当前，海上风电正朝大型化、深远海化和集群化方向发展，在提升资源开发效益的同时，也带来多重挑战。其一，机组大型化有效提升了风能捕获效率并优化了度电成本。2023—2024 年，我国新增机组平均单机容量由 9 MW 提升至近 10 MW；2023 年，10 MW 及以上新增装机容量占比达 46.4%（图 2）；同期风轮直径从 184 m 增至 252 m，有效提升了风能捕获效率。从累计装机结构来看，截至 2023 年，我国海上风电机组仍以 4.0 ～ 6.9 MW 级别为主，该区间累计装机容量合计占比达 60.7%，而 9 MW 及以上机组占比仅约 13.2%，大型机组替代空间广阔（图 3）。其二，海上风电开发呈现向深远海延伸的趋势。一方面，深远海风能资源更稳定强劲，并且对近岸生态及传统用海活动的干扰较小，开发潜力显著[15]；另一方面，极端海况对设备规格与结构设计提出了更高的要求，加剧了对专业工程船的运维依赖[17]，叠加远距离输电损耗，使深远海开发面临严峻的高投资、长周期与高风险壁垒，综合成本大幅攀升。其三，海上风电呈现集群化布局趋势。这一模式有效避免了用海空间碎片化，显著提升了资

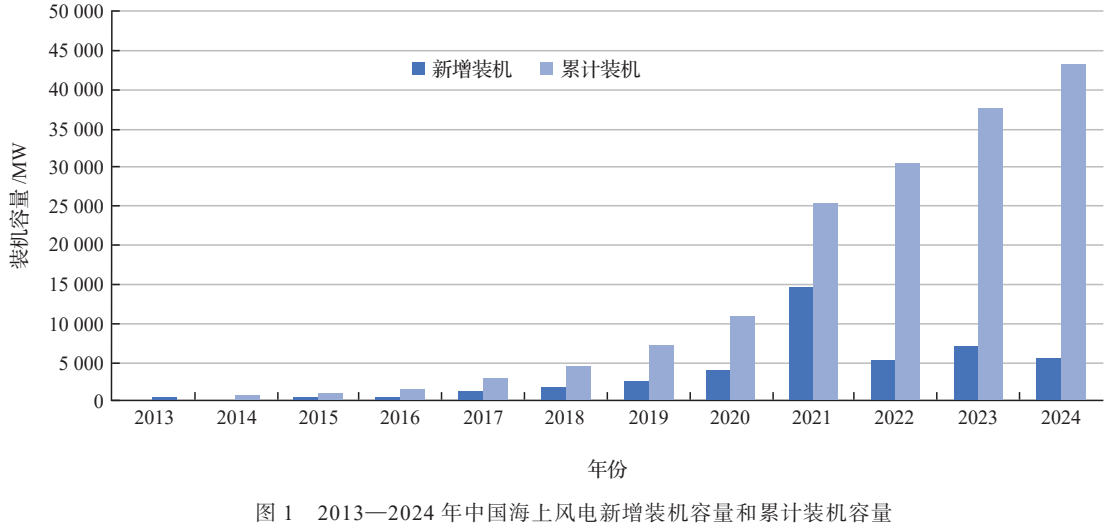

图 1　2013—2024 年中国海上风电新增装机容量和累计装机容量

Fig.1　Newly installed and cumulative installed capacity of offshore wind power in China from 2013 to 2024 (Data Source: CWEA)

注：数据来源于风能委员会。

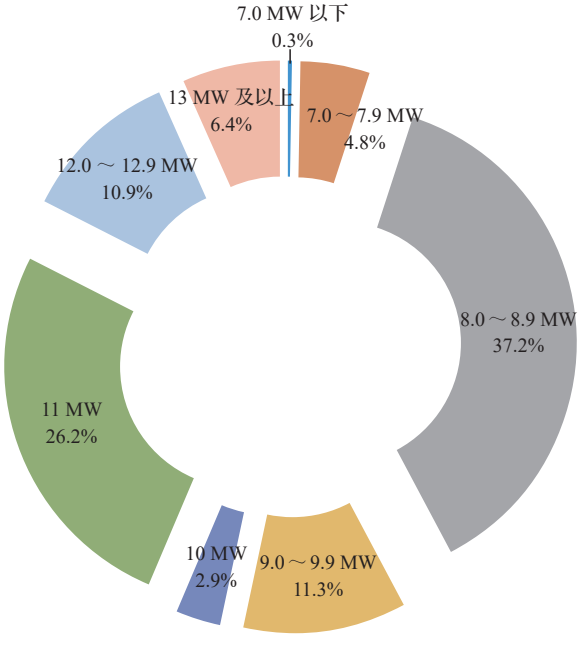

图 2 2023 年中国不同单机容量海上风电机组新增装机容量占比

Fig.2 Proportion of newly installed capacity of offshore wind turbines with different single-unit capacities in China, 2023

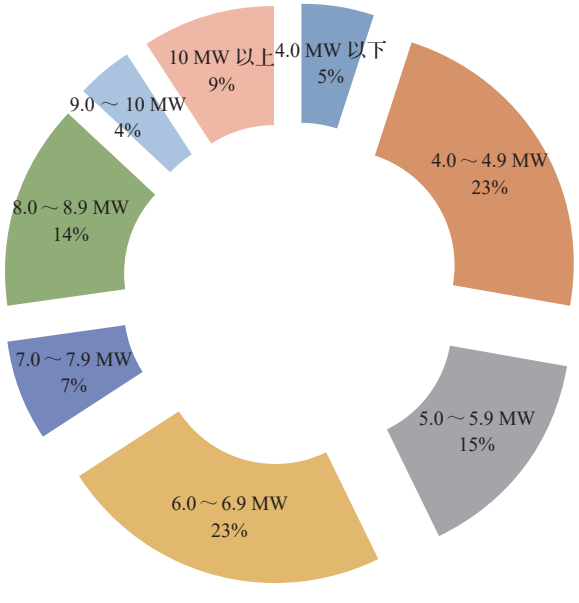

图 3 截至 2023 年中国不同单机容量海上风电机组累计装机容量占比

Fig.3 Proportion of cumulative installed capacity of offshore wind turbines with different single-unit capacities in China as of 2023

源利用效率，并已作为重点方向被纳入《“十四五”现代能源体系规划》。然而，高强度和高密度的集中开发使生态扰动日趋明显，不仅易破坏海底沉积物结构，更可能干扰周边海洋生物的栖息与活动。

1.2 海洋牧场产业发展现状

海洋牧场不仅是渔业资源保护与增殖、海域生态环境修复的重要方式，也是海洋渔业转型升级，发展海洋经济的重要方向。其本质是将传统的养殖产业与特定海域的生态环境有机结合[18]。早期海洋牧场建设主要集中于滩涂和浅海水域，其粗放型生产方式与过高的生物密度导致养殖产品质量下降及经济收益折损。20 世纪 70 年代，为应对渔业资源衰退问题，美国、日本和韩国等相继推行以“人工鱼礁建设”和“增殖放流”为核心手段的海洋牧场政策[3]。此阶段虽在理念上关注资源增殖与保护，但实际操作仍以提升水产品产量为主要目标。20 世纪末至 21 世纪初，海洋牧场建设进入生态化转型阶段[19]。中国作为全球最大的捕捞与海水养殖国，在延续增殖放流等传统手段基础上，率先提出并实践以“生态修复为核心目标”的修复型海洋牧场模式，其特征表现为生态化、信息化驱动的规模化建设。《海洋牧场分类》（SC/T 9111—2017）将海洋牧场分为养护型、增殖型和休闲型等一级类型。养护型是以保护和修复生态环境、养护渔业资源和珍稀濒危物种为主要目的，生态效益更为明显，属于公益性质；增殖型是以增殖渔业资源和产出渔获物为主要目的；休闲型是在渔业资源增殖的基础上开展休闲垂钓和渔业观光，属于经营性质[20]。截至 2024 年 7 月，我国已建成国家级海洋牧场示范区 189 个，总海域面积达 384 459.91 hm^2（图 4）[21]，标志着海洋牧场生态化和规模化建设取得实质性进展。

基于海洋牧场规模化和生态化发展的内在需求，其发展呈现出深远海化、集约化、生态化的显著趋势。这一进程在突破近海空间限制、提升现代化水平的同时，也带来了风险、成本与生态方面的多重挑战。近海环境退化与空间资源不足的现实压力，决定了海洋牧场向深远海战略拓展已成为必然路径。

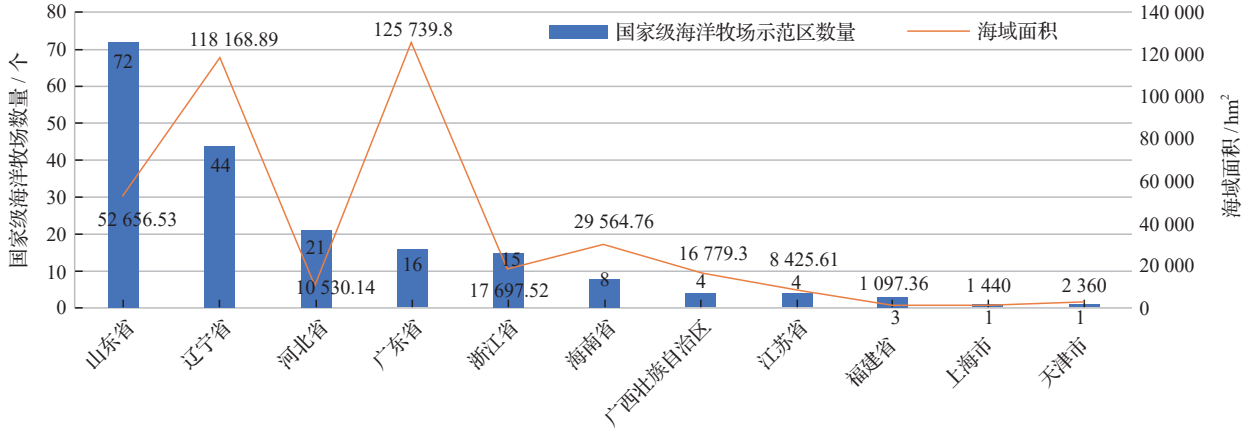

图 4　截至 2024 年沿海各省（自治区、直辖市）国家级海洋牧场数量与海域面积对比

Fig.4　Comparison of the number and marine area of national-level marine ranches among coastal provinces, autonomous regions, and municipalities as of 2024

20 世纪 80 年代起，挪威、美国和瑞典等渔业发达国家率先探索深远海养殖技术。我国早在 1998 年启动深水网箱研发，2017 年建成首艘养殖工船“鲁岚渔养 61699”。2022 年全球首艘 10 万吨级智慧渔业大型养殖工船“国信 1 号”投入使用[22]，显著拓展了产业空间。但极端海况带来的风浪灾害显著增加了网箱破损与漏鱼风险，叠加深远海能源供给困难，导致开发风险与成本高企。此外，海洋牧场逐步迈向集约生态化发展的新模式。深远海牧场面临供电不足风险，制约着大型现代化养殖设备与环境监测设施运行，而通过与海上风电在空间与功能上的集约利用，可构建清洁、低碳、自给型能源系统，进而降低对化石燃料的依赖，减少碳排放。但当前的高强度集约化模式仍存在隐患：高密度养殖易导致残饵与排泄物堆积引发局部水体富营养化；部分平台仍依赖柴油发电，加剧了额外污染与生态压力。

2　海上风电与海洋牧场融合效益与挑战

鉴于海上风电与海洋牧场面临的共性挑战，二者融合发展成为重要路径，以破解空间碎片化、开发成本高企、生态扰动显著等难题。海上风电与海洋牧场的融合，源于海洋“多用途开发”概念，其本质是通过空间共享、资源协同与设施融合，在单一海域实现立体化开发，以提高空间利用效率，降低开发成本，并提升生态效益与社会效益[23]。

2.1　融合效益

2.1.1　空间效率

海上风电与海洋牧场通过“海上发电、海下养殖”的立体融合方式，可实现海域资源高效协同利用，提高空间资源配置效益。海上风机主要占用海平面以上空间，其安装需保持一定的安全间距。在一个装机容量为 1 000 MW 的风电场中，预计空置海域面积高达 4 000 hm^2[24]。相比之下，海洋牧场主要利用海平面至海底之间的水体空间。二者融合开发可以实现海域垂直剖面的差异化利用，有效利用风电场的闲置区域。已有研究表明，海上风电与贻贝养殖融合开发可使空间利用效率提高 7% ～ 8%[25]。

2.1.2　经济效益

海上风电与海洋牧场通过资源共享和设备协同，可显著降低全周期成本，进而提升经济效益[26]。其全周期成本构成包括前期准备阶段、建设开发阶段和运维管理阶段（表 1）。

表 1 独立开发和融合开发的成本构成

Table 1 Comparison of cost composition between independent development and multi-use development

成本结构	海上风电	海洋牧场	融合开发	节约的成本
前期准备成本	相关手续办理成本	相关手续办理成本	相关手续办理成本	部分手续办理成本
	海域使用补偿成本（主要为渔民渔网的补偿费用）	—	—	海域使用相关补偿成本
	风电场勘测成本（海上风浪流、海底地质的勘测等成本）	环境勘测成本（水文环境监测、生物与生态调查、海底地形与地质勘测等费用）	环境勘测成本（兼顾风电和牧场的环境监测）	部分环境勘测成本
建设成本	风力涡轮机设计、制造、安装成本	养殖设施设计、制造、安装成本	增殖型风机与牧场结构融合平台的设计、制造、安装成本	—
	风机基础设计、制造、安装成本	支撑平台设计、制造、安装成本		风机基础相关成本
	塔筒设计、制造、安装成本	能源支撑系统设计、制造、建设成本		能源支撑系统相关成本
	电力输送设施设计、制造、安装成本	—	电力输送设施设计、制造、安装成本	—
运维管理成本	变电站制造、安装成本	—	变电站、制造、安装成本	—
	业务管理成本	业务管理成本	业务管理成本	部分业务管理成本
	运营成本	运营成本	运营成本	部分运营成本

在前期准备阶段，两类企业均需办理相关手续并进行环境监测，分别产生行政审批成本与环境监测成本；风电企业在独立开发时还需要向渔民支付渔网补偿费用。从欧洲案例的经验来看，若二者实施融合开发，双方可通过在同一场域内分担许可手续办理费用与勘测数据[27]，从而节省重复支出，避免风电企业的生态补偿成本，显著降低前期准备成本。

在建设开发阶段，海上风电需要配置风力涡轮机、风机基础、塔筒和电力输送系统等设施，而海洋牧场则涉及养殖设施、支撑平台及能源供给系统等设施[18]。若以牧场平台兼作风机基础，建设增殖型风电与牧场融合平台，实现风电直供牧场，可以省去独立风机基础和牧场的能源支撑系统，显著降低建设成本[28]。

在运维管理阶段，两类企业均需开展设备维护、定期巡检、人员保障、船舶与港口协调等工作，运维资源需求高度重叠。融合开发可共享运维资源，有效节约人力与物资支出，降低业务管理与运营成本[29]。同时，风电可直供牧场运行，减少牧场对柴油能源的依赖。一方面，降低牧场的能源供给成本和风险；另一方面，减少风电的电缆运输成本和损耗[30]。

2.1.3 生态效益

海上风电与海洋牧场的融合可以提高生态效益，主要体现在碳减排和生物多样性两个方面。一方面，风电场提供可再生能源替代海洋牧场对化石能源的需求，减少温室气体排放。例如，传统养殖设施“振宇 1 号”“福宝 1 号”，主要依赖柴油，且存在“供电难、供电不足”的问题，而“伏羲一号”融合平台上配置的风电机组与光伏阵列可满足日常用电需求，基本实现绿色能源供给。另一方面，海上风电和海洋牧场融合发展可以改善海洋生态环境，提高生物多样性。在融合开发区，风电桩基及其防冲刷结构具备人工鱼礁功能，能够有效提升底层渔业资源[31]。山东省昌邑市海洋牧场与三峡 300 MW 海上风电融合试验示范项目围绕风机基础设置产卵礁、集鱼礁和海珍品礁，其监测结果显示，风电桩基区域具有良好的聚鱼效应，生物种类与数量呈现增长趋势[32]。

2.1.4 社会效益

海上风电与海洋牧场的融合发展推动产业转型升级，具有显著的社会效益。融合促进了知识发展，带来技术创新，加快新旧能源体系转换，推动

产业融合的转型升级。融合项目对管理者和技术人员提出更高的综合能力要求，推动企业加大对员工技能提升与再培训的投入，为个体职业发展和人力资源素质提升提供良好契机。融合发展将带动众多相关行业的就业增长，增加地方就业机会，有助于缓解沿海区域人口就业压力[33]。广东汕尾陆丰市中广核“伏羲一号”风渔融合平台已于 2024 年 9 月正式投产，并成功衍生出“飞奔伏羲一号——巡游牧场看风电”等特色海岛文旅项目。预计 2027 年汕尾市将形成“海上风电 + 深海养殖 + 生态增益 + 休闲旅游”的风渔融合示范集群，年接待游客量预计突破 18 万人次，综合年产值约 4.5 亿元，为当地创造就业岗位约 800 个[34]。

2.2　融合挑战

尽管海上风电与海洋牧场融合在理论上具备显著的协同效益，但当前融合项目仍处于探索性的示范阶段，尚未实现规模化与商业化[28]。其面临的挑战主要体现在以下 3 个方面。

（1）海上风电与海洋牧场企业的体量与技术标准差距显著。海上风电投资规模大、工业标准化程度高，其场址规模与总投资远超海洋牧场，后者在融合开发中往往被视为附属工程[35]，并且双方在装备安全标准、运维调度以及事故责任界定上存在行业壁垒，这制约了二者在物理空间与设施结构上的整合。

（2）海洋牧场自身的投入产出结构失衡。对于增值型牧场，其核心诉求是市场化盈利。深远海牧场初期投入成本高，成本控制难度大。而在产出端，由于当前深远海养殖产品的产业链条延伸不足，冷链物流、精深加工及品牌溢价等后方产业化运营环节薄弱，导致高昂的养殖成本难以通过终端水产品的市场溢价有效消化。这种高投入和低产出的经济约束成为制约海洋牧场规模化推广的主要障碍[2]。

（3）海上风电与海洋牧场融合项目缺乏审批与监管的统筹规划。海上风电与海洋牧场分属能源与渔业不同的管理体系，多头管理导致项目不仅面临冗长的审批链条，更在用海权属界定、资产确权、环评审批及生态补偿等关键环节面临政策与法律空白。这不仅增加了项目的制度性交易成本，也阻碍了海域资源的优化配置[36]。

3　海上风电与海洋牧场融合驱动机制

为解决上述挑战，海上风电与海洋牧场融合发展形成了由内在驱动力与外部推动力共同作用、多层级联动的系统性结果，具体驱动机制如图 5 所示。

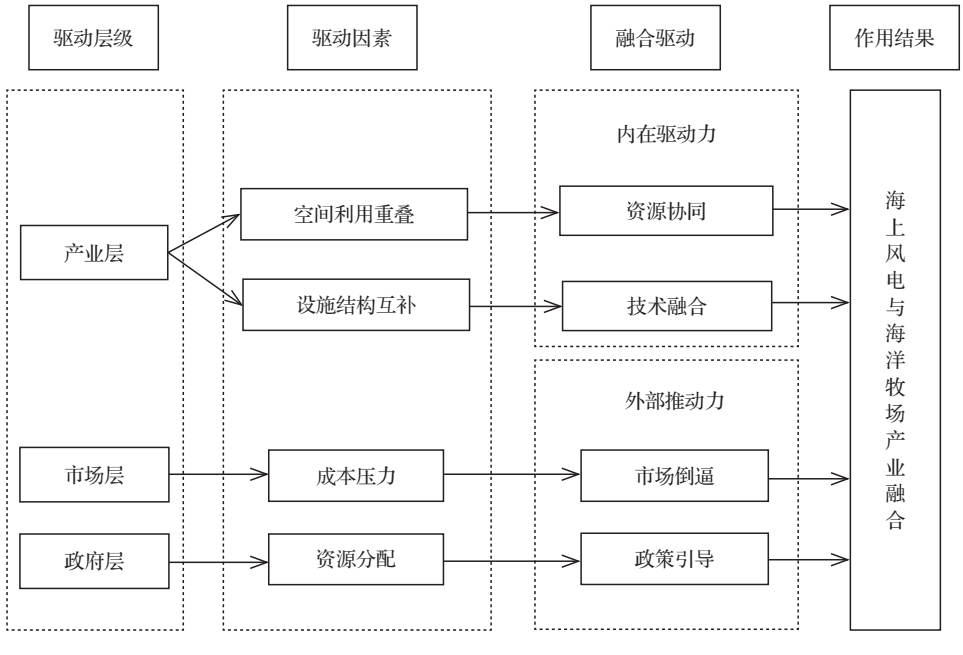

图 5　海上风电与海洋牧场产业融合的驱动机制

Fig.5　Driving mechanism of multi-use development of offshore wind and marine ranching

3.1 内在驱动力：资源协同与技术融合

产业融合的内在驱动力源于双方在空间资源与设施结构上的高度互补性，是应对风电与牧场企业缺乏合作内生动力挑战的物理与技术基础。资源协同：两个产业均属于自然资源密集型领域，对水文条件具有较高的依赖性，在空间利用上存在高度重叠，具有天然的协同性，为融合开发布局提供了物理前提。技术融合：两个产业的核心设施存在结构性互补，可以搭建增值型风机与牧场融合平台。海洋牧场平台可以作为风机基础，支撑风力发电机发电，实现结构与空间复用；风力发电可以直接供给海洋牧场的运营和生产，减少对独立能源供应系统的依赖（表 1）。目前，已有研究提出融合平台设计和相关专利技术，如适应极端海况的钢制养殖网箱、附着于风机基础的贻贝延绳养殖装置，验证了技术融合的可行性[28]。

3.2 外在推动力：市场倒逼与政策引导

产业融合的外部推动力主要表现在市场和政府两个层面，是克服当前投入产出不平衡、跨界商业模式不成熟与分配机制缺失的重要力量。市场倒逼：深远海海上风电建造成本高、运维费用高，面对来自陆上风电和光伏新能源等巨大的市场竞争压力，降本增效需求迫切，多渠道创收增效是必由之路。因而，海上风电与海洋牧场融合发展，通过分担高风险和成本，提高企业经济效益与市场竞争力。政策引导：相关政策制度已成为融合发展的主要驱动力[37]。国家能源局在《关于十四届全国人大第二次会议第 1834 号建议的答复摘要》中明确提出，要推进海上风电与海洋牧场融合发展新模式的试点工作。广东省国资委将珠海金湾风渔融合项目纳入“拓新项目”A 类清单，助力智能网箱建造。《福建省“十四五”海洋强省建设专项规划》中将海上风电与海洋养殖融合列为重点发展任务。

4 海上风电与海洋牧场融合模式与发展空间

海上风电与海洋牧场融合模式及其适宜发展空间，是推动二者融合发展的关键。融合模式决定经济性与可持续性，主要解决“怎么融合”的技术可行性问题。空间优化旨在解决“在哪里融合”的问题，确保融合发展的空间适宜性。

4.1 融合模式

根据海上风电与海洋牧场融合发展是否涉及基础设施结构创新，将融合模式分为两类：非基础设施创新的空间融合模式和基础设施创新的结构融合模式。

4.1.1 空间融合模式

空间融合是一种浅度融合，水上水下、集海面与海底空间立体开发，不涉及设施创新和新技术的发展。其原理是利用海上风机的稳固性，将智能化网箱、贝类筏架、藻类筏架、海珍品礁、集鱼礁和产卵礁等养殖设施与风机基础相融合，降低牧场运维成本，实现海域空间资源的集约高效利用。

海上风电与海洋牧场的空间融合模式主要包括“海上风电 + 人工鱼礁、海上风电 + 贝藻类和海上风电 + 养殖网箱”3 类[38]。“海上风电 + 人工鱼礁”的融合方案，其原理是在固定式风电基础周围投放人工鱼礁。“海上风电 + 贝藻类”的融合方案，其原理是将养殖的贝类和藻类附着在浮式筏架悬挂的绳索上，并通过缆绳将筏架固定于海上风电场区域。“海上风电 + 养殖网箱”的融合方案，其原理是将养殖网箱的部分系泊点设置在风电基础上，通过系泊链或缆绳将鱼笼连接到风机基础[39]。这些空间融合模式在结构上相对独立，聚焦于空间资源利用和运维资源层面的融合，从而降低牧场运维成本，实现海域空间资源的集约高效利用，适合初期探索。

4.1.2 结构融合模式

结构融合是一种深度技术融合，其核心是通过结构耦合和功能集成，将风电基础与养殖网箱有机结合，打造“风电—养殖”一体化设施。

结构融合模式根据风机基础类型不同，可以分为固定式风机基础结构融合和漂浮式风机基础结构融合。固定式风机基础结构融合是指以单桩、重力式、三脚架或导管架为风机基础，结合养殖网箱，构建固定式风机—牧场融合平台的融合方案。例如，养殖设施与混合单桩风力涡轮机基础结合，形成新型复合结构；三脚架和导管架基础在桩内形成内部空间，可用网板连接桩身形成封闭养殖网箱[40]，或在导管架周围搭建笼架，用延长板将网固定在笼

架上[41]。2023 年 7 月 25 日，全球首台导管架式海上风机与养殖一体化项目在广东省阳江市成功安装，验证了结构融合模式的可行性[42]。漂浮式风机基础结构融合以浮式风机为结构基础（如立柱式、半潜式、张力腿式或驳船式），实现浮式风机—牧场一体化平台的融合模式。例如，养殖设施结合立柱风机基础，形成圆锥形网箱结构，并以此作为风力涡轮机的浮动基础；钢制养殖网箱可与半潜式基础和驳船基础集成[43]；或将养殖网箱直接连接到驳船平台的底部，形成一个方形的网箱。基于风机与网箱设施之间的潜在融合方案，可以实现不同类型的结构融合模式开发，并可直接利用电能供应和运营养殖。

4.2　发展空间

鉴于空间融合模式和结构融合模式涉及不同设施和技术，其结构的稳定性和抗风险性不同，因而其适宜的发展空间也有所差异，表 2 列举了部分项目的融合模式及其发展空间。

表 2　融合模式及发展空间实例

Table 2　Examples of integration models and development spaces

项目名称	融合模式	类型	水深	主要养殖作物
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[44]	空间融合	人工鱼礁	7 ～ 9 m	半滑舌鳎等经济鱼类、贝藻
广东阳江沙扒深海渔业养殖实验区项目[45]	空间融合	养殖网箱	27 ～ 32 m	金鲳鱼
青州四海上风电场与网箱融合示范项目“明渔一号”[46]	固定式基础结构融合	导管架	48 m	金鲳鱼、石斑鱼
汕尾后湖渔业网箱与科研综合实验平台项目“伏羲一号”[47]	固定式基础结构融合	桩基式	约 25 m	石斑鱼、扇贝
福建龙源漂浮式海上风电与养殖融合项目“国能共享号”[48]	漂浮式基础结构融合	半潜式	35 m	大黄鱼
欧盟 Blue Growth Farm（BGF）项目[49]	漂浮式基础结构融合	半潜式	大于 100 m	大西洋鲑等高价值鱼类

4.2.1　空间融合模式的发展空间

关于空间融合模式，其适宜于水深较浅、地质稳定的浅海区域，但根据养殖种类不同，适宜深度有所差别。该模式聚焦于空间和运维层面的资源融合，而基础设施之间相互独立。在水深较浅、地质稳定的浅海区域，可以保障风机基础承载结构的稳定性，并降低漏鱼的风险[5]。具体的适宜水深则需要根据养殖物种的生态习性而确定。

4.2.2　结构融合模式的发展空间

关于结构融合模式，固定式风机基础结构融合和漂浮式风机基础结构融合的适宜空间也有所差别。

固定式风机基础结构融合模式适宜地质稳定的近海或半深海，需避开强洋流或极端浪高的深远海区域，其核心在于固定式基础通过将结构物嵌入或固定于海床来承受全部环境荷载。在恶劣的深远海海况条件下，巨大的波浪与洋流荷载会大幅增加基础结构的受力，不仅显著提高建设成本，更会引发结构振动与疲劳损伤，威胁整体稳定。在固定式风机基础结构融合实践中，单桩式和重力式风机结构融合方案适宜水深小于 30 m 的海域，导管架和三脚架风机结构融合方案适宜水深 30 ～ 60 m 的海域。

漂浮式风机基础结构融合模式可在高风险和高成本的深远海区域实施，不同的漂浮式风机基础结构融合方案，适宜深度也有所差异。一是立柱式风机结构融合方案因其基础重量较轻、重心低，具有良好的垂荡性能，主要适用于水深大于 100 m 的深水区域；二是驳船型风机结构融合方案基于船型浮体设计，依靠水线面面积提供的浮力与重力平衡维持稳性，适应水深通常大于 30 m；三是张力腿风机结构融合方案对水深的适应性较好，在运动响应方面表现出较好的稳定性，但锚泊系统复杂，加之国内现阶段缺乏成熟的制造与施工技术积累，导致其设备成本和安装成本较高，应用水深通常大于 40 m；四是半潜式风机结构融合方案适宜于水深大于 30 m 的海域，并且可以在建造基地组装好之后拖到指定海域。

综上所述，最优发展空间需要综合评估不同融合模式。空间融合模式普遍适宜浅海区域，结构融合模式普遍适宜深远海区域，其中，固定基础的结构融合方案适宜地质稳定的近海或半深海，漂浮式风机结构融合方案适宜深远海区域。

5 海上风电与海洋牧场融合发展路径与实现机制

5.1 多维发展路径

基于不同融合模式及其发展空间，海上风电与海洋牧场融合发展是一个随着海域水深、技术成熟度与协同深度变化而演进的多维路径，呈现出由浅入深、由分立到一体的趋势。因此，二者融合呈现“空间—融合深度—技术”三维发展路径（图 6）。

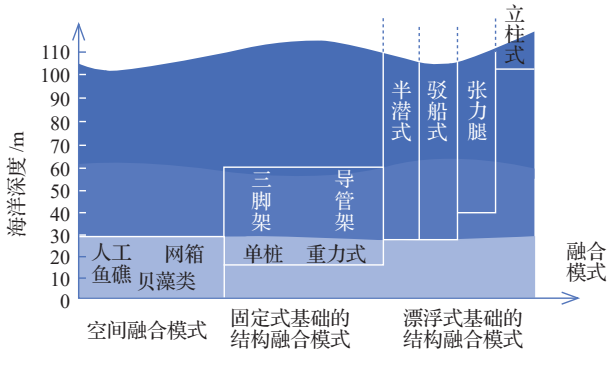

图 6 融合的多维发展路径

Fig.6 Schematic diagram of the multi-dimensional development path of integration

（1）空间维度：从近海浅水走向深远海的纵向拓展。①浅海区域（水深 0 ～ 30 m）：主要采用空间融合模式。养殖设施（如网箱、人工鱼礁）分散布设于固定式风机之间的海域，两者在空间上毗邻而居，共享海域资源，是初级的融合形式。②近海过渡区（水深 30 ～ 60 m）：主要采用固定式基础结构融合模式。此阶段主要依赖单桩和导管架等基础形式，养殖设施与固定风机基础结构集成，实现从空间共享到初步结构共生的过渡。③半深海区（水深 60 ～ 100 m）：融合模式演进为漂浮式基础结构融合。养殖平台与半潜式和张力腿等漂浮式风机基础构成一体化集成系统，突破水深限制。④深远海区域（水深 100 m 以上）：漂浮式基础结构融合模式进一步发展，需要基础重量较轻、具有良好的垂荡性能的立柱式风机基础，以应对更为恶劣的海域环境，实现向深远海战略空间的突破。

（2）融合深度：从空间共享到结构共生的协同深化。①资源协同型（空间融合模式）：海上风电与海洋牧场在规划海域内，水上、水下立体开发，共享运维资源，设施结构及运营相互独立。②设施依附型（固定式结构融合模式）：海上风电以固定式风机为基础结构，结合养殖网箱，构建固定式风机—牧场融合设施。风机基础为养殖生物提供生长场所（人工鱼礁效应），同时，海上风电可为牧场生产和监测设备提供绿色电力，实现能源与生态的资源互换。③系统融合型（漂浮式结构融合模式）：牧场设施与漂浮式风机基础在设计阶段一体化集成，实现从结构、能源到运维的全方位系统融合，是面向深远海的综合性解决方案。

（3）技术维度：从基础应用到集成创新的体系演进。①浅海技术：依赖于成熟的固定式风机基础技术与养殖设施，无须技术创新，技术风险低。②深海技术：催生了适用于水深较深的固定式基础（如三脚架）和新型养殖工船，是技术的过渡与验证阶段。③前沿技术：最终指向漂浮式风电技术与深远海养殖装备技术的跨界融合，成为技术创新的前沿，可以应对深远海环境下结构动力、系统协同控制等综合性挑战。

5.2 路径实现机制

海上风电与海洋牧场通过不同融合模式，在其适宜的空间维度立体开发海域空间，成为培育海洋新质生产力、推动海洋强国建设的重要路径。为推动融合发展路径的实现，本文从空间规划、技术融合、产业协同和政策保障 4 个层面，系统设计路径实现机制（图 7），以期实现空间效益、经济效益、生态效益与社会效益的统一。

5.2.1 空间规划机制：拓展发展空间维度

空间规划是海上风电与海洋牧场融合发展路径实现的物理载体基石。为高效协调海域空间资源，必须在海洋空间规划中明确设立多用途用海区。在传统海域承载力评估的基础上，清晰界定用海单元

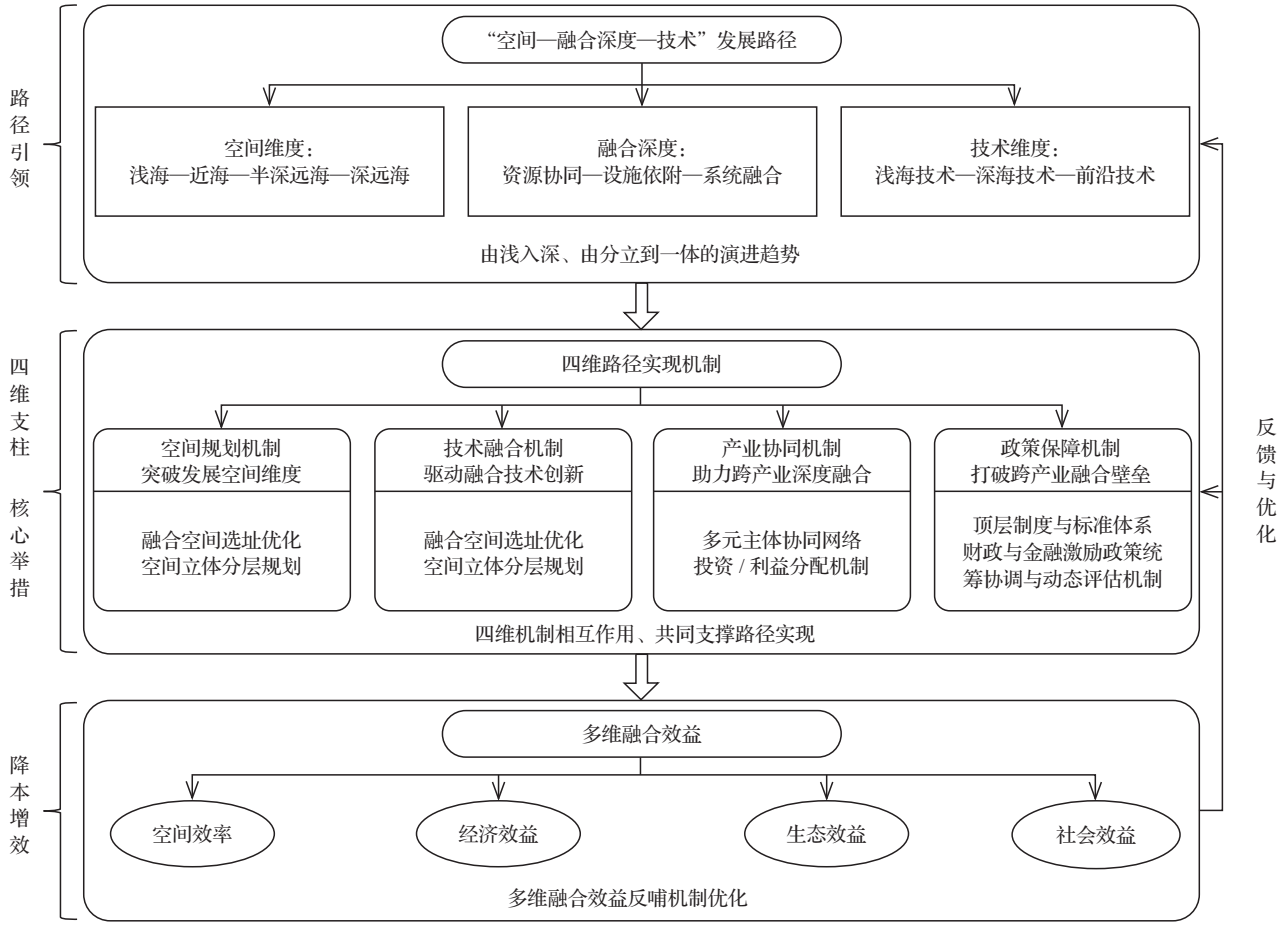

图 7　融合发展路径实现机制

Fig.7　Diagram of the implementation mechanism of the multi-use development pathway

的主体功能与兼容功能。北海经验表明，划设多用途区能有效协调不同类型用海活动，显著降低行政壁垒与用海冲突[50]。因此，为推进融合发展，亟须构建科学的海洋空间规划机制，其核心涵盖以下两个方面。

一是科学开展融合空间选址优化。首先，系统评估风能资源、生物特性、水文动力与地质地貌等因素，科学识别适宜融合发展的高潜力海域，确保选址决策兼具安全性和稳定性。其次，综合研判空间冲突风险，主动规避航道、锚地、保护区等敏感区域，防控用海冲突与运维安全隐患。最后，衡量并网条件、交通可达性及电网消纳能力，评估融合项目建设与运维的经济与技术可行性，确保项目整体效益。

二是大力推进空间立体分层规划。突破传统平面用海思维，建立三维立体化的产权与用海管理体系，明确水面、水体、海床、底土的垂直空间权属与功能配置。根据风电与牧场等海洋活动的空间需求，划分不同水体深度，实现资源的垂直复合利用。水面以上空间优先保障风机运行与安全，水体中层用于布设养殖网箱，海底及近底层营造人工鱼礁或开展贝藻类底播增殖。

5.2.2　技术融合机制：驱动融合技术创新

根据海上风电与海洋牧场的空间融合与结构融合模式，技术融合机制可分为以下两个方面。

一是构建协同运营与管控系统。协同运营管理与资源共享是海上风电与海洋牧场技术融合的基础。首先，搭建数据共享与决策系统，集成海洋环境监测、船舶动态监控和养殖作业管理等系统，实现风电与牧场运营管理数据的互联互通。其次，推

动运维体系一体化，统筹调度运维资源，实现单次航程协同作业。最后，建立灾害预警与风险联防联控机制，从而提升复合海域的综合管控能力与运营经济效益。

二是攻关一体化结构融合技术。组建跨学科协同研发团队，结合海洋工程、材料科学与水产养殖等专业领域，共同制定协同设计准则，开发适宜不同水深条件的结构融合技术（如固定式结构融合、漂浮式结构融合）。同时，建立全周期技术验证体系，通过数值模拟、物理实验与原型监测，综合评估其技术可行性与结构安全性。最后，构建智能运维体系，依托水下机器人、无人船及智能传感网络，实现对一体化结构的联合巡检、智能养护与状态实时监控，确保其长期运行的可靠性与经济性。

5.2.3 产业协同机制：助力跨产业深度融合

产业协同是海上风电与海洋牧场融合发展路径实现系统运行的纽带，其核心涵盖以下两个层面。

一是培育多元主体协同网络。突破传统行业壁垒，着力构建由政府引导、风电企业、牧场企业、制造商、高校与科研院所及金融资本共同参与的“政—产—学—研—资”多元协同网络。成立产业联盟或合资实体，明确各方权责利，形成知识共享、风险共担、利益共赢的开放式创新网络，为融合发展提供组织保障。明确运营策略，依据企业的资源和能力，制定独立运营策略或联盟运营策略。独立运营策略可降低交易和内部组织成本，但对企业的资源和能力要求很高，这种策略更适合少数具备雄厚实力的风电企业。相比之下，联盟运营策略通过跨产业主体的优势互补能有效分摊深远海高昂的综合开发成本与单一主体的试错风险，显著降低行业的跨界准入门槛。

二是建立投资、利益分配机制。鉴于融合开发项目高投资和高风险的特性，清晰界定共用资源（如基础设施、海缆、监测平台）的投资与运维责任，并建立基于投入成本、承担风险与贡献价值的动态利益分配机制，确保商业模式的长期稳定性与可持续性，从根本上激发各类市场主体的参与动力。

5.2.4 政策保障机制：打破跨产业融合壁垒

政策保障是海上风电与海洋牧场融合发展路径实现的制度支柱与外部推力。为此，需要构建多层次、多维度的顶层政策保障机制，重点涵盖以下3个方面。

一是完善顶层制度与标准体系。为深入贯彻落实中央关于“积极推进海域分层立体利用”的重要战略部署，我国正加快构建并完善相关的海域管理制度与标准体系。2023 年，《自然资源部关于探索推进海域立体分层设权工作的通知》和《海域立体分层设权宗海范围界定指南（试行）》相继印发，在国家层面明确了海域立体分层利用的管理制度与相关技术规范。这为海上风电与海洋牧场在同一海域的融合发展提供了清晰的用海权属界定与坚实的制度保障。在此基础上，国家主管部门正积极鼓励沿海地方探索海域分层立体利用的新模式，通过开展典型案例遴选与发布工作，发挥示范引领作用。后续应结合地方经济高质量发展的实际需求，持续跟进并拓展跨产业融合的海域管理模式，坚持“成熟一个、推广一个”的原则，将地方优秀经验上升为通用标准，为融合发展提供稳定可操作的政策支撑。

二是强化财政与金融激励政策。对水产养殖型牧场给予专项资金补贴、税收减免或绿色信贷支持。设立国家层面融合发展产业基金，引导社会资本参与，降低项目前期的高额投资门槛。例如，山东莱州 300 MW 海上风电和海洋牧场融合项目获2.4 亿元专项补贴；在广东阳江风渔融合示范项目“明渔一号”中，得益于国家税费优惠政策，其开发企业阳江明阳蕴华海上风电开发有限公司自 2023 年以来享受减免企业所得税额超过 1.2 亿元[51]，有效夯实了企业持续加大融合设备研发投入的资金基础。创新金融工具，提供深远海养殖专属的绿色信贷与巨灾保险。加大专项资金直接补贴力度，探索建立基于绿色电力认证和碳汇增量的生态产品价值实现机制，拓宽项目收益渠道。对资源恢复型牧场应建立生态服务采购机制。

三是建立统筹协调与动态评估机制。成立由国家能源局、自然资源部、生态环境部、农业农村部等部门组成的跨部门协调领导小组，统筹规划布局与政策配套。同时，构建融合发展的动态监测与后

评估体系，定期对政策实施效果、生态影响与经济效益进行综合评估，形成“政策制定—实施反馈—动态优化”的闭环管理，确保政策体系的适应性与有效性。

6　结论

在全国能源转型与海洋强国建设的双重战略驱动下，海上风电与海洋牧场向深远海融合发展已成为提升海洋空间利用效率、降低综合开发成本并缓解生态压力的必然趋势。因此，本文聚焦海上风电与海洋牧场的融合发展，通过分析二者的发展现状和多维融合效益，探讨了二者融合发展的内在驱动力和外部推动力，并揭示了其驱动机制。在此基础上，探讨了其潜在融合模式及其适宜的发展空间，解决了“怎么融合”以及“在哪里融合”的问题。基于此，本文构建了“空间维度—融合深度—技术维度”的三维发展路径框架，揭示出路径由浅入深、由分立走向一体的趋势。最后，系统设计路径实现机制，涵盖空间规划、技术融合、产业协同与政策保障四大机制，以实现空间效益、经济效益、生态效益和社会效益的协同共赢。然而，本文现阶段仍侧重于宏观路径设计与理论框架构建，尚缺乏基于典型海域真实运营数据的实证支撑与技术经济测算，并且对融合工程全生命周期内的底栖生境改变及长期生态累积效应缺乏深入评估。未来研究应重点依托深远海典型融合示范项目开展精细化的空间协同布局优化；同时，亟待攻关深远海况下的流固耦合机理与底层一体化装备技术，并进一步探索海域立体确权等适应性用海治理机制与长效数字生态追踪体系，从而为风渔融合产业的高质量、可持续发展提供更为严谨的科学依据。

参考文献（References）：

[1] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2024 年中国风电吊装容量统计简报[J]. 风能，2025(3)：61.
Chinese Wind Energy Association. Statistical brief report on wind power hoisting capacity in China in 2024[J]. Wind Energy，2025(3)：61.

[2] 林鸣. 发展大规模深远海养殖：问题、模式与实现路径[J]. 管理世界，2022，38(12)：39-58.
LIN Ming. Developing large-scale deep sea aquaculture：problems，modes and realization ways[J]. Journal of Management World，2022，38(12)：39-58.

[3] 杨红生，丁德文. 海洋牧场 3.0：历程、现状与展望[J]. 中国科学院院刊，2022，37(6)：832-839.
YANG Hongsheng，DING Dewen. Marine ranching version 3.0：history，status and prospects[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2022，37(6)：832-839.

[4] 张灿，孟庆辉，初佳兰，等. 我国海水养殖状况及渤海养殖治理成效分析[J]. 海洋环境科学，2021，40(6)：887-894.
ZHANG Can，MENG Qinghui，CHU Jialan，et al. Analysis on the status of mariculture in China and the effectiveness of mariculture management in the Bohai Sea[J]. Marine Environmental Science，2021，40(6)：887-894.

[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] 三峡集团在鲁首个海上风电项目全容量并网[EB/OL]. (2022-12-23)[2026-02-27]. http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c26784560/content.html.
Three Gorges Group’s First Offshore Wind Power Project in Shandong Achieves Full-Capacity Grid Connection[EB/OL]. (2022-12-23)[2026-02-27]. http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c26784560/content.html.

[7] 300 MW！国内首个“海上风电＋海洋牧场”示范项目即将在山东开建[N/OL]. 中国能源报，(2019-08-22)[2026-02-27]. https://wind.in-en.com/html/wind-2349759.shtml.
300 MW! China’s first “offshore wind power+marine ranching” demonstration project to start construction in Shandong[N/OL]. China Energy News，(2019-08-22)[2026-02-27]. https://wind. in-en. com/html/wind-2349759.shtml.

[8] 我国首个“海上风电＋海洋牧场”示范区收鱼！开创世界深远海抗台风养殖先河[EB/OL]. (2022-01-19)[2026-02-27]. https://www.myse.com.cn/News/info.aspx?itemid=400.

China's first "offshore wind power+marine ranching" demonstration area harvests fish, Pioneering global deep-sea typhoon-resistant aquaculture. [EB/OL]. (2022-01-19)[2026-02-27]. https://www.myse.com.cn/News/info.aspx?itemid=400.

[9] 广东海洋协会. 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]. (2022-06-02)[2026-02-27]. https://www.cweea.com.cn/xwdt/html/33972.html.
Guangdong Ocean Association. State Power Investment Corporation(SPIC) "new energy+marine ranching" integrated innovation demonstration base (Shenquan) starts construction[EB/OL]. (2022-06-02)[2026-02-27]. https://www.cweea.com.cn/xwdt/html/33972.html.

[10] 国家能源局. 关于十四届全国人大第二次会议第1834号建议的答复摘要[EB/OL]. (2024-12-05)[2026-02-27]. http://www.china-nengyuan.com/news/218482.html.
National Energy Administration. Summary of the reply to proposal No. 1834 of the second session of the 14th National People's Congress[EB/OL]. (2024-12-05)[2026-02-27]. http://www.china-nengyuan.com/news/218482.html.

[11] BUCK B H,TROELL M F,KRAUSE G,et al. State of the art and challenges for offshore integrated multi-trophic aquaculture (IMTA)[J]. Frontiers in Marine Science, 2018, 5: 165.

[12] CHEN Peng, KANG Yirou, XU Shijie, et al. Numerical modeling and dynamic response analysis of an integrated semi-submersible floating wind and aquaculture system[J]. Renewable Energy, 2024, 225: 120355.

[13] 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.
WU Di, REN Zhongjin, HAN Ronggui, et al. Exploration and practice of offshore wind power and marine ranching integration development technology[J]. Chinese Fisheries Economics, 2023, 41(3): 78-84.

[14] 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.
CHEN Hao, SUN Xingli, ZHANG Caixue, 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.

[15] Global Wind Energy Council. Global wind report 2024[R]. 2024.

[16] 长城国瑞证券有限公司. 风电行业研究报告[R]. 2024.
Great Wall Guorui Securities Co., Ltd. Wind Power Industry Research Report[R]. 2024.

[17] HONG S, MCMORLAND J, ZHANG Houxiang, et al. Floating offshore wind farm installation, challenges and opportunities: a comprehensive survey[J]. Ocean Engineering, 2024, 304: 117793.

[18] TAN Yongming, LOU Shangyou. Research and development of a large-scale modern recreational fishery marine ranch System[J]. Ocean Engineering, 2021, 233: 108610.

[19] 茹小尚, 邓贝妮, 冯其明, 等. 中外海洋牧场建设之比较[J]. 水产学报, 2023, 47(11): 95-104.
RU Xiaoshang, DENG Beini, FENG Qiming, et al. Comparison of marine ranching constructions between China and foreign countries[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(11): 95-104.

[20] 刘伟峰, 张朝晖, 邢文秀, 等. 渔业生产方式创新视角下我国海洋牧场的概念应用与优化路径[J]. 生态经济, 2024, 40(8): 137-144.
LIU Weifeng, ZHANG Zhaohui, XING Wenxiu, et al. Status and optimization paths of the concept application of marine ranching in China from the perspective of innovative fishery production method[J]. Ecological Economy, 2024, 40(8): 137-144.

[21] 项建强, 刘智华, 梁辉, 等. 海洋牧场与海上风电融合发展的现状、挑战与前景[J]. 中国水产, 2025(3): 46-50.
XIANG Jianqiang, LIU Zhihua, LIANG Hui, et al. Present situation, challenges and prospects of integrated development of marine ranch and offshore wind power[J]. China Fisheries, 2025(3): 46-50.

[22] 王旭, 张敏学. 中国海洋牧场建设: 战略意涵、风险挑战、发展路径[J]. 太平洋学报, 2024, 32(12): 67-80.
WANG Xu, ZHANG Minxue. China's marine ranching construction: strategic implications, risks and challenges, and development paths[J]. Pacific Journal, 2024, 32(12): 67-80.

[23] PRZEDRZYMIRSKA J, ZAUCHA J, CALADO H, et al. Multi-use of the sea as a sustainable development instrument in five EU sea basins[J]. Sustainability, 2021, 13(15): 8159.

[24] KITE-POWELL H L. Economics of multi-use and co-location[M]//Aquaculture Perspective of Multi-Use Sites in the Open Ocean: The Untapped Potential for Marine Resources in the Anthropocene. Cham: Springer, 2017: 233-249.

[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.

[26] VAN DEN BURG S W K, 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.

[27] 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]. Cham, Switzerland: Springer, 2017.

[28] LIU Dingpeng, HEO Taemin. Co-locating offshore renewables and aquaculture: feasibility, site-selection, and O&M synergies-a state of the art review[J]. Frontiers in Marine Science, 2026, 13: 1739325.

[29] LAGERVELD S, ROCKMANN C, SCHOLL M M, et al. Combining offshore wind energy and large-scale mussel farming: background & technical, ecological and economic considerations[R/OL]. Wageningen: IMARES Wageningen UR, (2014-08-28)[2026-02-27]. https://edepot.wur.nl/318329.

[30] ONYANGO V, PAPAIOANNOU E. Case study 2: marine renewables & aquaculture multi-use including the use of marine renewable energy near the point of generation (west coast of scotland–northern atlantic sea)[R]. Edinburgh: MUSES Project, (2017-11-30)[2026-02-27]. https://muses-project.com/?page_id=468.

[31] 汝会通，杜尉，盛化香. 海上风电与人工鱼礁融合区底层游泳生物群落结构特征研究[J/OL]. 海洋湖沼通报（中英文），[2026-02-27]. https://link. cnki. net/urlid/37.1141.p. 20250321.1730.004.
RU Huitong, DU Wei, SHENG Huaxiang. Study on structure characteristics of bottom swimming biomes in the fusion area of offshore wind power and artificial reef[J/OL]. Transactions of Oceanology and Limnology[2026-02-27]. https://link.cnki.net/urlid/37.1141.p.20250321.1730.004.

[32] 李涛. 潍坊昌邑：海洋牧场与海上风电融合发展[EB/OL]. (2024-08-08)[2026-02-27]. https://weifang.iqilu.com/wfyaowen/2024/0808/5698178.shtml.
LI Tao. Integrated development of marine ranching and offshore wind power in Changyi, Weifang[EB/OL]. (2024-08-08)[2026-02-27]. https://weifang.iqilu.com/wfyaowen/2024/0808/5698178.shtml.

[33] VAN GERVEN A, KERKHOVE T R H, LAGO M, et al. Facilitating an integrated assessment of impacts in marine multi-use: the Ocean Multi-use Assessment Framework (OMAF)[J]. Marine Policy, 2025, 173: 106570.

[34] 陈保良，刘倩，陈欣欣. 海上“生绿电”水下“鱼满仓”：全球单体最大抗台型风渔融合网箱平台“伏羲一号”正式投运[N/OL]. 南方日报，(2024-09-05)[2026-02-27]. https://gd.huaxia.com/c/2024/09/05/1958566.shtml.
CHEN Baoliang, LIU Qian, CHEN Xinxin. “Green power generated at sea, bountiful harvest underwater: The world’s largest single-unit typhoon-resistant wind-fishery integrated net cage platform ‘Fuxi-1’ officially commissioned”[N/OL]. Nanfang Daily, (2024-09-05)[2026-02-27]. https://gd.huaxia.com/c/2024/09/05/1958566.shtml.

[35] 季以恒，李晗，高源，等. 人工鱼礁用于海上风电和海洋牧场融合开发的经济性研究[J]. 中国渔业经济，2025，43(5)：72-82.
JI Yiheng, LI Han, GAO Yuan, et al. Economic feasibility of integrating artificial reefs with offshore wind farm[J]. Chinese Fisheries Economics, 2025, 43(5): 72-82.

[36] 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，2023，40：19-29.
SUN Teng, GONG Yuyan, FENG Cuicui, et al. Difficulties and challenges of the integration of offshore wind farms and marine ranching[J]. Ocean Development and Management, 2023, 40: 19-29.

[37] 杨林，邬晓萌. 我国远洋渔业政策评价及优化方向研究[J]. 海洋通报，2026，45(1)：114-125.
YANG Lin, HUAN Xiaomeng. Research on the evaluation and optimization direction of China’s pelagic fisheries policy[J]. Marine Science Bulletin, 2026, 45(1): 114-125.

[38] 黎静华，田伟，王明燕，等. 海上风电与海洋牧场融合发展研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报，2026，46：1966-80.
LI Jinghua, TIAN Wei, WANG Mingyan, et al. Research status and prospects of integration development of offshore wind power and marine ranching[J]. 2026, 46: 1966-80.

[39] 宋础. 海洋养殖设备对海上风电结构受力影响分析[J]. 上海节能，2023(5)：655-660.
SONG Chu. Analysis on influence of marine aquaculture equipment on stress of offshore wind power structures[J]. Shanghai Energy Saving, 2023(5): 655-660.

[40] TU Zhisheng, ZHANG Cailiang, LIU Hanqiu, et al. Hydrodynamic analysis of a multi-pile-supported offshore wind turbine integrated with an aquaculture cage[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(9): 1830.

[41] LI Na，SHI Wei，HAN Xu，et al. Dynamic analysis of an integrated offshore structure comprising a jacket-supported offshore wind turbine and aquaculture steel cage[J]. Ocean Engineering，2023，274：114059.

[42] 全球首台风渔融合一体化装备完成海上安装[EB/OL]. (2023-07-28) [2026-02-27]. https://www.cweea.com.cn.
Global first wind-fishery integrated equipment completes offshore installation [EB/OL]. (2023-07-28)[2026-02-27]. https://www.cweea.com.cn.

[43] ZHANG Chenglin，WANG Shiming，CUI Mingchao，et al. Modeling and dynamic response analysis of a submersible floating offshore wind turbine integrated with an aquaculture cage[J]. Ocean Engineering，2022，263：112338.

[44] 三峡能源山东昌邑莱州湾一期(300 MW)海上风电项目增殖放流项目项目公告[EB/OL]. (2023-05-05)[2026-02-27]. https://eps.ctg.com.cn/cms/channel/1ywgg1/240612375.htm.
Sanxia Energy Shandong Changyi Laizhou Bay Phase Ⅰ (300 MW) offshore wind power project stock enhancement and release program-program announcement[EB/OL]. (2023-05-05)[2026-02-27]. https://eps.ctg.com.cn/cms/channel/1ywgg1/240612375.htm/.

[45] 明阳阳江沙扒海上风电科研示范项目发件完工[EB/OL]. (2021-07-20) [2026-02-27]. https://wind.imarine.cn/news/19261.html.
Mingyang Yangjiang Shapa offshore wind power research demonstration project：component manufacturing and shipment Completed [EB/OL]. (2021-07-20)[2026-02-27]. https://wind.imarine.cn/news/19261.html.

[46] 中国能建勘察设计的国内首台12兆瓦海上风电机组安装成功[EB/OL]. (2023-06-21)[2026-02-27]. http://www.chinapower.com.cn/guihuajianshe/xinwen/2023-06-21/205667.html.
China’s first 12-MW fffshore wind turbine，engineered by China Energy Engineering Corporation，successfully installed[EB/OL]. (2023-06-21)[2026-02-27]. http://www.chinapower.com.cn/guihuajianshe/xinwen/2023-06-21/205667.html.

[47] 汕尾市人民政府. 汕尾市中广核“伏羲一号”网箱投放夏季鱼苗[EB/OL]. (2025-05-11)[2026-02-27]. https://www.shanwei.gov.cn/slhwz/rdgz/content/post_1146066.html.
Shanwei Municipal People’s Government：CGN’s “Fuxi No. 1” offshore cage deploys summer fish fry. [EB/OL]. (2025-05-11) [2026-02-27]. https://www.shanwei.gov.cn/slhwz/rdgz/content/post_1146066.html.

[48] 陈汉儿，林启鑫，陈世玉. 全球首座风渔融合浮式平台迎来首批渔获[N]. 福建日报，2025-01-26(3).
CHEN Haner，LIN Qixin，CHEN Shiyu. The world’s first floater-type wind-fishery integrated platform harvests its first catch[N]. Fujian Daily，2025-01-26(3).

[49] GAO Yan，COLLU M，LAGASCO F，et al. An innovative multi-purpose offshore platform concept for the blue economy proposed by the Blue Growth Farm Project[J]. Hydrolink，2021，3：75-8.

[50] STEINS N A，VERAART J A，KLOSTERMANN J E M，et al. Combining offshore wind farms，nature conservation and seafood：Lessons from a Dutch community of practice[J]. Marine Policy，2021，126：104371.

[51] 杨世华，黄韬炜. 阳西县税务局辅导企业用足用好各项税费优惠政策 助力海上风电产业向“新”而行[N/OL]. 南方日报，(2024-07-25)[2026-02-27]. https://guangdong.chinatax.gov.cn/gdsw/yjsw_tpxw/2024-07/25/content_3f39bc8c1c014cc48a26ba790e20c521.shtml.
YANG Shihua，HUANG Taowei. Yangxi County taxation bureau guides enterprises to make full use of tax and fee preferential policies，boosting offshore wind power industry toward “new” development[N/OL]. Nanfang Daily，(2024-07-25)[2026-02-27]. https://guangdong.chinatax.gov.cn/gdsw/yjsw_tpxw/2024-07/25/content_3f39bc8c1c014cc48a26ba790e20c521.shtml.