海上风牧融合的难题与挑战

孙腾[1,2]，龚语嫣[1,2]，冯翠翠[1,2]，何旭辉[1,2]，张函[1,2]，化天然[1,2]，曲良[3]，叶观琼[1,2]

（1.浙江大学海洋学院　舟山　316021；2.浙江大学海南研究院　三亚　572025；
3.中国海油海洋环境与生态保护公益基金会　北京　100010）

摘要：在海洋战略和清洁能源战略背景下，我国围绕海洋牧场和海上风电开展了规模化建设并取得了巨大成就。但工程成本高昂、海洋生境破碎化和用海冲突等问题日益显著，国内外由此开展了海上风电和海洋牧场融合发展的试点与探索。文章整理分析了国内外相关研究和试点工作，针对海上风牧融合发展的现状以及在经济和政策可行性、选址与规划、鱼种选择、配套设备开发、生态影响评估（噪声、电磁场、底座干扰和重金属迁移等）等方面的难题与挑战提出建议。

关键词：海上风电；海洋牧场；融合发展；难题与挑战；生态影响评估

中图分类号：P74；S9；TK81　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005－9857(2023)09－0019－11

Difficulties and Challenges of the Integration of Offshore Wind Farms and Marine Ranching

SUN Teng[1,2], GONG Yuyan[1,2], FENG Cuicui[1,2], HE Xuhui[1,2], ZHANG Han[1,2], HUA Tianran[1,2], QU Liang[3], YE Guanqiong[1,2]

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. Hainan Institute, Zhejiang University, Sanya 572025, China; 3. CNOOC Foundation, Beijing 100010, China)

Abstract: Under the background of marine strategy and clean energy strategy, China has carried out large-scale construction around marine ranching and offshore wind farms and made great achievements. However, the problems such as high project cost, the fragmentation of marine habitats and maritime conflict are becoming increasingly prominent, which have led to the test and exploration of integrated development of offshore wind farms and marine ranching at home and abroad. Based on the analysis of relevant research and test work at home and abroad, suggestions are put forward for the current situation of integrated development of offshore wind and animal husbandry, as well as the difficulties and challenges in economic and policy feasibility, site selection and planning, fish species selection, supporting equipment development, ecological impact assessment (noise, electromagnetic field, base interference, heavy metal migration, etc.), etc.

Keywords: Offshore wind farms, Marine ranching, Integrated development, Difficulties and chal-

收稿日期：2022-12-01；**修订日期**：2023-07-28

基金项目：中国海油海洋环境与生态保护公益基金会海洋环保项目(CF-MEEC/TR/2022－12).

作者简介：孙腾，硕士，研究方向为海洋空间规划

通信作者：叶观琼，副教授，博士，研究方向为海岸带综合管理

lenges, Assessment of ecological impact

0 引言

可再生能源、可持续的海产品和健康的海洋生态系统是蓝色经济不可或缺的要素。在当前各国纷纷寻求能源转型及碳中和的背景下，海上风电具有风能密度高、风速稳定、单机发电量大等优势，成为目前热门的可再生能源发展着力点，多国也相继推出海上风电扩大发展计划。英国、德国、法国、荷兰等欧洲国家均计划到 2030 年新增数十吉瓦的装机量，美国计划到 2030 年累计装机达到 30GW，在亚洲，韩国、日本、越南等国计划到 2030 年累计装机量超过 25GW。全球风能理事会近期发布的《2022 年全球风能报告》显示，2021 年，全球海上风电新增装机容量 21.1 GW，同比增长两倍，创历史最大增幅，并将持续保持强劲增长势头[1]，我国海上风电累计并网容量也已达到千万千瓦，位居全球第三位。

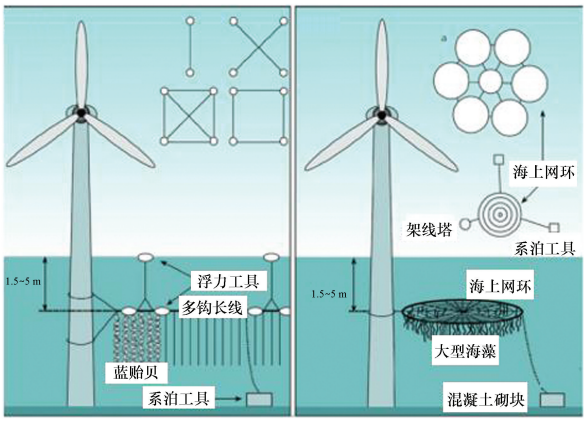
在传统渔业面临海洋生境碎片化、海水富营养化和渔业资源衰退等问题时，海洋牧场作为渔业转型新动力，近年来发展势头迅猛，在改善近海渔业生态环境、提高渔业资源可持续利用性等方面具有重要意义。鱼礁、网箱、海上平台等多种形式的海洋牧场在世界范围蓬勃发展，我国也高度重视海洋牧场建设，国家级海洋牧场已近 100 个，用海面积近 1 000 km^2，高居全球首位。

海洋尤其是近海海域承载着多种用途和功能，以海洋牧场和海上风电为代表的海洋工程长期的发展让海域重叠和冲突问题日益显著，而海上风电又存在对传统渔业的排斥性，在此背景下，诞生了海上风电与海洋牧场融合发展的理念，意在通过科学规划与融合，达到节约集约用海、助力海洋增汇、推动渔业高质量发展的目标。早在 2011 年，Lacroix 等[2]就提出了多元化海域使用，通过海洋空间规划（MSP）和海岸带综合管理（ICZM）来解决海域使用的冲突，包括了在海上风电场整合水产养殖等产业。二者融合有广阔前景，是机遇也是挑战，目前主要在探索、评估和试点阶段。本研究介绍了海上风牧融合的发展现况，并从政策、标准、规划、生态影响和经济可行性等方面存在的技术挑战与难题，提出了地方性补贴填补中央退补空当、实验室工作与实地调研结合评估生态影响等建议。

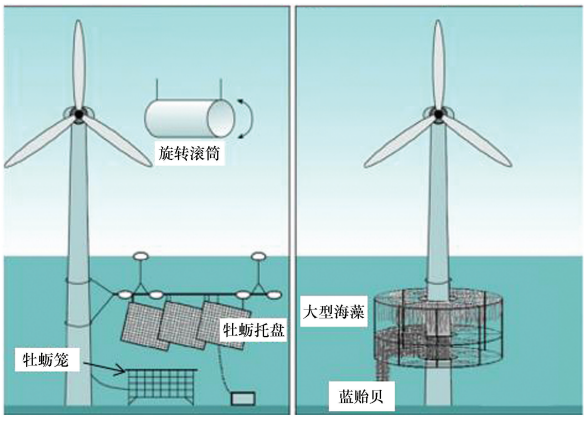
1 海上风牧融合发展现状

自海上风牧融合理念提出以来，各国陆续开始了试验与摸索。目前商业化运营的风牧融合项目极少，包括我国在内的很多国家都在进行试点开发。

当前风牧融合虽有设计鱼类养殖的相关专利和设想，但开展的试点主要以海上风电和贻贝养殖、海藻培植的结合为主。欧洲方面，以德国、荷兰等为代表的国家于 2000 年开展了海上风电与海水增养殖结合的试点研究[3]，将鱼类养殖网箱、贝藻养殖筏架固定在风机基础上（图 1），以达到集约用海的目标，并持续开展效益性、科学性相关研究。



(a)多钩长线结构的鸟瞰图，水下贻贝和海藻长绳养殖的侧视图　(b)环状结构的鸟瞰图，用于贻贝和海藻养殖的海上网环侧视图



(c)用于牡蛎养殖的“底部”笼和固定在延长线上的牡蛎托盘以及旋转滚筒的侧视图　(d)潜水式海上贝类和海藻笼设计

图 1　4 种风电单桩基础与养殖设备的结合方法[3]

Fig.1　Four methods of combining wind power monopile foundation and breeding equipment[3]

欧盟支持的蓝色经济海洋投资项目（Marine Investment for the Blue Economy，MARIBE），2015 年开始在西班牙加纳利群岛附近将漂浮式风机和鲈鱼养殖以及贻贝养殖相结合，但试点结果未知。Wever 等[4] 以德国的开放海洋多用途项目（Open Ocean Multi-Use，OOMU）为例，分析海上风电场养殖的实际应用可行性以及在政策、法律、社会经济和生态层面的需求和影响，研究提到了对当地主要经济鱼种的筛选以用作风电场养殖的对象，不同季节培育不同经济鱼类以达到效益最大化，涡轮机和网箱相关结构设备的一体化构建等。Griffin 等[5] 假设了一个海上风能公司和贻贝水产养殖公司共址的案例研究来模拟评估共址的社会效益，这个选在德国北海计划 Nordergründe 风电场里进行的案例分析得到的结果是积极的。Buck 等[6] 在位于德国所属北海的海上风能发电区进行了海藻培植研究，使用经济模型对北海海藻生产的经济可行性进行调查，认为北海的近海海藻生产在经济上不可行。Burg[7] 在荷兰 Borssele 海上风电场设计的通过半潜长线生产贻贝苗和消费级贻贝的养殖系统，基于经济模型和风险评估发现贻贝养殖是提高海上风电场收益的一种有吸引力的商业模式。Jansen 等[8] 通过建立的荷兰所属北海区域的空间分布模型表明，风电场的海上贻贝生产可以盈利。在比利时，北海养殖项目（Noordzee Aquacultuur）被推动进行，2017 年 C-Power 集团在风电场安装了第一个贻贝养殖系统，项目希望阐明在北海比利时风电场养殖贝类的生物、技术和经济可行性，以及同时管理贻贝养殖场和海上风电场的互补性[9]。韩国在 2016 年开展了海上风电与水产养殖结合项目，研究了如何建设水产品配送中心来有效利用韩国西南海岸海上风力发电共存式设施带来的渔产增长[10]。韩国科学家也对风电场区的渔业作业可能性进行了研究[11]。

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，山东省已经提出海上风牧融合发展相关规划，省委、省政府提出海洋强省建设“十大行动”，将海上风电开发作为推进现代海洋产业体系行动的重要内容，积极探索海上风电与海洋牧场融合发展新模式。

政策支持下，我国广东阳江和山东昌邑等地规划并建设了海上风牧融合项目，其中阳江风牧融合项目已投入使用，成为国内首个漂浮式风电基础与牧场融合项目；昌邑项目也在 2022 年 10 月完成全部风机吊装，项目在风机基础周围 50 m 海域内布置养殖区，采取投放产卵礁、集鱼礁、海珍品礁等措施，为鱼类、贝类等海洋生物提供良好的栖息和产卵场所。此外，我国台湾地区因为台湾海峡极佳的风能条件，海上风电发展较快，并在彰化等地开展与牧场的融合发展相关研究。莫爵亭等[12] 对阳江项目的研究认为项目海域初级生产力较高，浮游植物、浮游动物、大型底栖生物、潮间带生物、游泳动物等物种丰富，具备“海上风电＋海洋牧场”融合发展的生态基础和优势，也具有较大的渔业资源潜力和建设海洋牧场的可行性。陈灏等[13] 在分析广东省海上风电场建设的基础上，分析了马尾藻藻礁建设在海洋风电场的适宜性和投放条件，探讨了在广东省开展以“人工藻礁场＋海上风电场”为特点的融合发展模式的可行性。翟方国等[14] 研发了海底有缆在线观测系统以用于海洋牧场与海上风电的融合效应观测。Wang 等[15] 研究认为彰化区域案例海上风电场可配备约 720 个培养笼，在海上风电场的运营和维护不受影响的情况下可以使用该方法提供初具经济规模的养殖区，作为海上风力发电和海洋养殖的互惠方法。Huang 等[16] 则通过水动力模型与效益算法从设备融合、海洋环境、经济效益等方面全面评估了我国台湾彰化海上风电场区域网箱养殖的经济可行性，认为我国台湾地区有多种鱼类养殖能与风电融合并获利。

目前案例主要是对藻类和贻贝养殖的研究，研究结果大多是贻贝可以收益甚至成为风牧融合项目的大部分收益来源，但海藻养殖很难有经济效益（表 1）。风牧融合存在地区差异，我国广东有着马尾藻生长的优良海洋生态基础，马尾藻与风电结合有可能带来收益，但目前尚未开展。此外，对于鱼类养殖和风电融合的文献极少，更多的信息来自欧洲方面的项目工程网站。

表 1 海上风牧融合收益可行性研究

Table 1 Feasibility study of benefits from the integration of offshore wind and marine ranching

序号	风牧融合情况	收益可行性	试点地区
1	风电与贻贝养殖	可行	德国项目 Nordergründe[5]
2	风电与海藻	不可行	德国所属北海区域[6]
3	风电与贻贝养殖	可行	荷兰项目 Borssele[7]
4	风电与贻贝养殖	可行	荷兰所属北海区域[8]
5	风电与贻贝养殖	可行	比利时项目 Noordzee Aquacultuur[9]
6	风电与马尾藻	可行	中国广东阳江[15]
7	风电与金龟子、石斑鱼	可行	中国台湾彰化区域[16]
8	风电与浆草、黑线鳕	可行	德国所属北海区域[17]

2 风牧融合难题与挑战

海上风电与海洋牧场的融合在各国的鼓励下如火如荼地进行，但同时面临诸多挑战。本章旨在通过国内外相关研究对比分析，梳理在选址规划、设备兼容、生态影响评估和经济政策可行性等方面的难题与挑战，定位我国发展建设风牧融合面临的问题。

2.1 选址规划和鱼种选择

前文提到相关规划没有专门立法，造成了风电的规划区域经常更改及延滞建设。海上风电和海洋牧场有各自独立的选址方法，这让选址兼顾二者变得极具挑战。海上风电对海域地理条件有极高的要求，海洋牧场则对海域生态基础等要求较高，二者融合时需综合考虑风电的选址与区域海洋环境的生态环境、水文条件、适宜的经济鱼种。

欧洲多位科学家通过地理信息系统(GIS)和多标准评价(MCE)评估了近海水产养殖和风电场耦合的共址问题。Gimpel 通过 GIS 和 MCE 为德国北海专属经济区内风牧融合选址提供引导，基于温度、盐度或氧气等标准总共选择了 13 种可能的水产养殖候选物种(海藻、双壳类、鱼类和甲壳类动物)作为情景配置。研究认为 4—6 月，浆草在 10～20 m深度的适宜性得分最高，其次是 20～30 m 深度的黑线鳕[17]。Di Tullio 等[18]重点研究了 MCE 技术在海上风电场和开放水域贻贝养殖中的应用，在 MCE 技术的基础上开发了共址可持续性指数(SI)，考虑了风速、深度范围、设施位置以及海面温度异常等因素，使用生物变量叶绿素 a 和颗粒有机碳(POC)浓度来评估效益的影响。Benassai 等[19]运用适应性修改后的可持续性指数(SI)将海上风电场和开放水域水产养殖之间的兼容性程度进行定量评估，突出了两种技术的融合可能带来的主要问题。

但是利用 GIS 和 MCE 进行的评估目前并没有在工程中得到响应，也没有相关验证机制。

鱼种选择要考虑选址区域生态基础、结构基础等问题。例如，Weiss 等[20]根据结构和操作方面评估在近海网箱中养殖 8 种商业鱼类的适宜性。此外，鱼种选择还要考虑处在桩基产生的上升流区域和尾涡区域的鱼种对水流的耐受，要考虑区域水体的生态基础对养殖的支撑，这方面工作目前尚无系统性的研究。

2.2 设备兼容

海上风电与海洋牧场的融合很重要的一环是设计研发融合设备和结构，需要开发增殖性风机基础和渔业养殖系统的配套设施，并进行组装作业，也要做好设备的受力仿真模拟，如附着在风机基础上的牧场设备，会改变风机基础在海洋中的受力，需要进行模拟，验证结构稳定性、可靠性。对于海上风电和海洋牧场的结构设备融合以及相关运营，有反面的声音存在。欧洲的风力发电开发商认为风电场中的水产养殖设备可能会对风力涡轮机系统造成损坏，如网箱养殖锚固系统与风力发电机组是否可以整合仍有待确定，由于现有风电场开发存在一定的投资风险，为了将其与水产养殖生产相结合，影响了金融和保险公司承接业务的意愿，增加了保险成本和借贷成本[21]。欧洲的大多数风电场开发商认为与水产养殖生产的整合可能会影响风力涡轮机的运行和维护。

2.3 生态影响评估：噪声、电磁场、底座干扰和重金属

海上风牧融合需要做好对海洋环境和海洋生物的影响评估，目前因为数据的缺乏以及研究方式较为片面，又受制于海洋环境的复杂性，很难区分

风电场与其他因素的影响关系，不能很好地揭示海上风电对环境影响的作用机制。

海上风电对生境影响主要包括噪声、电磁场、底座干扰等。本节将分别介绍目前对于主要影响因子的评估研究。

2.3.1　噪声

噪声振动可以诱发物理损伤，掩盖生物对重要信号（通信、捕食者躲避和猎物寻找）的探测，影响海洋生物行为。例如，动物可能会离开噪声区域，这可能会干扰觅食或繁殖[22]。

海上风电施工期噪声可能造成生物物理损伤、生理行为异常和遮蔽效应。施工过程中基础的安装通常可以产生广泛的峰值源声级[23]。多项研究表明施工期噪声可以对鱼类和海洋哺乳动物造成损害和影响。许多科学家对此进行了研究。Popper 等[24]对打桩噪声造成的致命和永久性影响的研究揭示了多种物种的各种结果，从死亡到听力组织和其他器官的损伤。Halvorsen 等[25]发现湖鲟（*Acipenser fulvescens*）和尼罗罗非鱼（*Oreochromis niloticus*）发生损伤的声暴露最低水平分别为 204 dB 和 174 dB，随着声暴露水平升高，损伤会更严重。

海上风力发电场的预期寿命为 20～30 年，因此运行期阶段将是一个持续时间较长的水下声音来源，来自风力涡轮机的水下声音可以被描述为连续声源。Tougaard 等[26]在距离声源 100 m 处测得的单个涡轮机的估计声压级介于 105～125 dB 之间。运行期相比于施工期噪声小很多，但仍会产生一定影响。许多科学家对运行期海上风电场噪声影响展开调查和研究。Bergström 等[27]研究了瑞典风电场噪声水平与年际渔获量之间的相关性，结果表明，鱼类丰度与当地噪声环境呈负相关，在较高噪声水平下，鳗鲡和欧洲鳗鱼的鱼类丰度降低。Pine 等[28]发现海上风电场涡轮机噪声延迟了巨蟹的变态（幼体阶段），而在同一水平的自然环境中没有看到这种影响。Wahlberg 等[29]发现风轮机运行时相比，风轮机停机时，风轮机 100 m 范围内的鳕鱼和拟鲤可捕性增加，在海上风电场中，鳕鱼的叫声可能会被掩盖，它们的通信范围也会缩小。Luczkovich 等[30]研究表明，在嘈杂的环境中，少数鱼类可能会非自愿地提高它们的发声水平。Zhang 等[31]研究表明在 150 Hz 时，马齿鲆的最低听觉阈值为70 dB，与 140～180 Hz 的干扰声范围相匹配，涡轮机水下噪声的频率和水平与马齿鲆的听觉灵敏度和发声重叠，可能对它们的声学通信产生掩蔽效应，这种慢性掩蔽效应可能会影响它们的行为生态，并导致种群数量减少。表 2 整合了多名科学家实验得到的鱼类受噪声影响情况。

表 2　多种鱼类受噪声影响情况

Table 2　Several cases of fish affected by noise

鱼类	损伤情况	实验噪声情况	研究者
湖鲟（*Acipenser fulvescens*）	听力组织和其他器官易损伤	204 dB	Halvorsen 等[25]
尼罗罗非鱼（*Oreochromis niloticus*）	听力组织和其他器官易损伤	174 dB	Halvorsen 等[25]
杂交条纹鲈鱼和莫桑比克罗非鱼（*Oreochromis mossambicus*）	气压损伤和内耳毛细损伤	模拟打桩 960 次	Casper 等[32]
欧洲鲈鱼（*Dicentrarchus labrax*）	群聚行为结构改变	154 dB	Herbert-Read 等[33]
欧洲鲈鱼（*Dicentrarchus labrax*）	游泳速度和深度增加、受惊反应增加	180～192 dB	Neo 等[34]
黑溪鱼（*Spondyliosoma cantharus*）	增加通气速率	184 dB	Bruintjes 等[35]
寄居蟹（*Pagurus acadianus*）	削弱生存能力	模拟打桩	Roberts 等[36]
蓝贻贝（*Mytilus edulis*）	降低呼吸速率、损害清除废物的能力	接触沉积物振动	Roberts 等[36]
长鳍鱿鱼（*Doryteuthis pealeii*）	捕获率下降，失败捕食事件增加	低频（<1 000 Hz）脉冲声音	Popper 等[24]
欧洲鳗鱼（*Anguilla anguilla*）	鱼类丰度降低	较高连续噪声	Bergström 等[27]
马氏鲆（*Sebastiscus marmoratus*）	信号遮蔽	150 Hz 大于 70 dB	Herbert-Read 等[33]

由于材料特性和施工方法不同，各类型海上风电的基础可能具有不同的声学输出，基础类型也会影响风电场作为声源的方向性。因此在设计监测方案时，需要考虑不同的声学情况。各区域经济鱼种有差异，鱼种间的噪声耐受度也不同，需要实验室与实地调研结合的评估工作来给出

阈值。

所以，运行期的海上风电噪声依然会对一些鱼类产生影响，而施工期的噪声甚至可以带来损伤。如果风牧融合，则牧场中的鱼类比自然鱼类离噪声源更近，探明我国主要经济鱼类对风电场噪声的反应和耐受度，是风牧融合的一个难点。

2.3.2 电磁场

海上风电对海洋生物的电磁辐射影响来源包括海上风电机组、升压站和海底电缆，海底输出电缆是最主要的电磁辐射影响来源(图 2)。

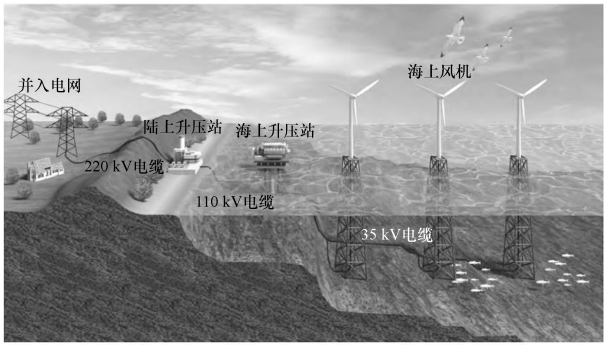


图 2 典型海上风电布置示意图[37]

Fig.2 Typical offshore wind power layout[37]

电磁辐射产生影响主要是因为某些海洋生物具有磁敏感性，磁场可能影响鱼类迁徙等海洋生物行动，且足够强度的磁场还会影响海洋生物的生殖和发育等生理过程。

目前广泛认为掩埋的海底光缆产生的电磁场影响随距离衰减很快，在海洋中对生物具体能产生何种影响不明晰，不过考虑到风电场与牧场结合后，养殖的物种相比于海洋中野生物种更近地暴露在电磁场中，所以本研究整理了一些国外关于海上风电电磁场影响的文章。除了少量的实验室结果或实测结果，大部分都是一些潜在影响评估。

袁健美等[38]以如东龙源风电示范区为例开展了海底磁场的现场探测、模拟磁场对海洋生物的影响试验。Gill 等[39]通过龙虾成长 5 个阶段的习性以及与假设的风电场环境，评估了海上风电的电磁场可能影响幼体发育以及成体的迁移。Bergström 等[40]关注到海上风电电磁场可能对使用电磁信号检测猎物的软骨鱼类产生影响。Gill 等[41]在英国的海上风电场，通过对比导体尺寸和电流负载对电缆的电磁场(EMF)进行建模的研究表明，电流负载与合成电磁场之间存在直接的比例关系，可能会引诱鱼类，通过对安圭拉属的研究表示电磁场可能干扰鱼类利用地磁场的定向能力，从而干扰鱼类的迁徙模式。主要研究集中在洄游鱼类物种上是因为它们是重要的经济鱼种且能在浅水区域接触到 EMF。海底电缆对底栖生物的影响距离更近，Bochert 等[42]研究了海底电缆电磁场对北海虾、蓝贻贝等主要生物的影响，在实验室进行了持续 3.7 mT静态磁场下生物变化研究，结果显示实验动物和对照动物之间的存活率没有差异，贻贝的性腺指数和病情指数的测定对照组无显著差异，这也提供了风牧结合的有力依据，底栖生物(如贝类)可以耐受 EMF 影响，适合作为风牧融合的经济物种。

强度为 1 600A 的电流在海底电缆中很常见，其可产生的磁场在 1 m 距离处减少到 320 μT，在 4 m 处减少到 110 μT，其值与 6 m 以外的地面磁场(50 μT)相似。相比之下，承载 132 kV 交流电的标准海底电缆在电缆的“表皮”上产生 1.6 μT 的磁场，而承载 10～15 kV 直流电的电缆在距离电缆表面几厘米之外不会产生显著的磁场。磁场随电缆类型和磁场建模而变化很大。因此需要按照实际海上风电场海底电缆具体状况，结合当地的重点物种电磁敏感度来进行研究。

除了上文提到的实验室结论以及经验评估，量化 EMF 并且确定磁场特征来研究电磁敏感生物是否会在 EMF 中产生反应一直是科学家们想要完成的工作。Hutchison 等[43]认为海底输电电缆产生的电磁场是可量化的，并以与背景地磁场相似的幅度进行测量，海洋环境中的电和磁敏感物种可以检测到这些 EMF，他们发现对电敏感的鳐鱼(*Leucoraja erinacea*)和对磁敏感的美国龙虾(*Homarus americanus*)在交叉电缆的 EMF 中产生了重要的生态行为反应，都能够通过高压直流输电(HVDC)电缆发出的 EMF 移动，行为运动的变化可能在后续推断出对电和磁敏感物种的重要生态后果。此外，他们还通过对两条高压直流电缆的电动势进行精细量化，确定了直流磁场的特征，并随后开发了海底环

境中直流磁场的精确模型。

要评估 EMF 的影响，也要尽量排除其他因素的影响，因为气候变化和风暴等原因造成的自然和人为干扰以及环境变化可能会掩盖效应大小。因此，Hutchison 等[44]认为要评估 EMF 对接受物种的影响，需要进行基线研究。关键在于选择一个敏感物种（龙虾、弹性鳃、鲟鱼、鳕鱼）和关键的运动行为（小范围、归巢、季节性迁徙）进行不同条件下的对照分析来进行研究。

因为磁场效应不明显，很多研究给出的结论都是潜在影响，而牧场要与风电场融合，牧场生物会比自然生物更近地暴露在海上风电磁场内，因此，更有效准确地评估风电场磁场对生物的影响是风牧融合的另一大难点。另外，国内关于磁场影响的研究有限，我国主要经济鱼种对风电磁场的耐受度不明。

2.3.3　底座干扰

提起海上风电基础的生境影响，更多的研究表明了底座的人工礁效应。海上风电的结构会引起水流扰动从而影响水体营养物质交换。有资料显示，海水流经风电机组桩基和半潜式平台时，迎流面会产生上升流，冲刷底质，底层营养盐上涌与表层海水充分交换，促进各种浮游植物生长，从而诱集各类海洋生物前来索饵，形成高度复杂的食物链。同时，海水背流面会产生背涡流，多数鱼类喜欢栖息于流速缓慢的涡流区。在荷兰 OWEZ 公司海上风电场，van Hal 等[45]科研人员以底栖生物、鱼类、鸟类和海洋哺乳动物多样性为评价对象，通过 2 年实地调查发现该风电场已成为生物群落的新栖息地，甚至增加了生物多样性。推测原因是底层营养物质富集与硬质基地给生物丰度带来依托。除了水下基础引起的上升流，水上结构引起的风尾流也可以诱发上升流。

但海上风电的底座改变了软质基础，在利于当地生物附着的同时也可能促进非本地物种定植，De Mesel 等[46]调查了在比利时海域建造的第一台风力涡轮机的混凝土基础上发展起来的大型底栖生物群落，发现了多种非本地物种出现在风电基础上。另外，底座引起的流场改变也可能影响鱼类的产卵等活动，Barbut 等[47]使用粒子跟踪模型与 3D 流体动力学模型相结合评估海上风电场与物种产卵场的空间重叠对已知育苗场的幼虫通量的影响，研究表明，欧洲鲈鱼、普通鲈鱼和布里尔鱼可能是受影响最大的比目鱼物种。

所以，底座引起的水动力变化和海底底质改变都会产生一定的负面作用，如果无法量化评估，也会成为风牧融合的难点。

2.3.4　重金属迁移与悬沙

有学者对打桩引起的悬沙和通电保护基础产生的锌元素迁移进行了研究。但施工期的悬沙影响广泛认为是暂时的且影响甚微，且牧场运行时不会处于施工期的海上风电场内。海上风电采用牺牲阳极保护法来避免风机基础的钢结构被海水腐蚀的同时，也会导致重金属随流扩散，对周围水质与海洋生态造成影响。王愿宁[48]以庄河海上风电场运行期间释放出的重金属锌为例，研究其输移扩散，在水动力模型基础上，添加对流扩散模型，得到重金属锌的浓度、水平扩散系数和扩散面积之间的关系。

但重金属离子浓度低，悬沙浓度低且影响时间短，目前尚无更有效的评估。若海上风牧融合，牧场生物将处于重金属输运区域，探明具体影响十分重要。

2.4　经济可行性和政策可行性

经济可行性方面，海上风电对传统渔业存在排斥性，牧场和风电自身的造价、日常维护费用也较高，如 Mikkola[49]介绍了波的尼亚湾一个结合了风能和鱼类养殖的多用途平台的案例研究，投资成本主要来自风力发电和平台建设，研究表明附着了鱼笼的风电结构方案增加了成本。因此与海洋牧场的融合既要尽量弥补包括渔业在内的损失，又要在后期能够覆盖高昂的建设维护费用，所以二者融合对经济效益的要求很高，这就需要多方合作，在经济鱼种选择、区域规划、效益评估等方面做到最好。

政策可行性方面来看，从发展清洁能源，实现碳中和的理念出发，我国颁布了一系列政策法规以扶持海上风电产业发展，以期引导海上风电产业快速形成规模，并实现平价并网输电。其中间接政策

是运用经济杠杆进行引导和管理，包括金融支持、上网电价补贴、税收优惠、科研鼓励等[50]。我国对海上风电的投入主要体现为上网电价补贴和科研专项经费支持[51]，但 2020 年 1 月，《关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见》中明确新增海上风电项目不再纳入中央财政补贴范围。邓江锋等[52]基于演化博弈理论，分析研究了海上风电企业和政府在海上风电产业是否补贴问题上的演化博弈过程，认为当前海上风电全面退补为时过早，海上风电还难以在 2022 年做到平价上网，退补导致企业成本压力巨大。

此外，我国尚未对海上风电做出专门立法，由于风电法律规范过于笼统、粗放，导致了我国在海洋资源规划上缺乏法律保障，在海上风电开发规划上没有充分考虑渔业资源、军事需要、海洋环境等各系统、各行业的统筹布局。例如，浙江瑞安海上风电场项目选址就进行过多次重新规划，这必定对评估、勘察、招标工作有一定阻碍作用。没有对海上风电由近海岸向深海发展的导向进行明确规定，这会给海上风电规划发展的一致性带来阻碍，海上风电的审批、规划、建设缺乏有力的法律保障，容易使得海上风电布局碎片化[53]。

对于风牧融合，我们关注到中华人民共和国农村农业部在回复人大代表意见时提到，虽然科学界正在开展研究，但还没有系统的成果，风电是否会对海洋牧场中渔业资源产生影响需要长期监测评估，目前还不具备从国家层面出台相关政策和规划的基础条件。

海上风电在退补政策和缺乏规划立法依据的背景下，与牧场的融合势必面临更多阻力。海上风牧的融合也需要系统性成果得到国家政策层面的扶持。

3 海上风牧融合展望

海上风电与海洋牧场在海域冲突的背景下走向融合，但作为一个研究新方向、科研新领域，面临在政策、生态、技术等方面的难点与挑战。针对以上问题，给出以下 5 个方面建议。

(1)在国家退补问题方面，介于广东阳江已成为第一个平价并网的海上风电工程且全国范围海上风电已经兴建多年，这符合一个产业的周期性政策调整。但是目前全国存在海上风电发展不均的问题，例如江苏的装机量和发电量远远超过其他地区，这就需要各省(自治区、直辖市)研究地方性补贴政策，填补中央退补带来空缺和相关影响，借鉴风电发达地区的经验，取长补短。

(2)在规划布局与选址方面，要加快专项立法，独立于可再生能源以及陆上风电的海上风电建设相关法律需要提上日程，让海上风电真正做到有法可依的布局并且高效规划与建设。组织相关专家，通过 GIS 等技术，结合实际，借鉴国外经验，形成自己的选址规划方法体系，找到兼顾风电和牧场选址的最优解。

(3)在经济效益方面，要组织渔业专家和海洋科学专家进行调研，选择优势经济鱼种，选择对噪声和电磁更耐受的物种，科学养殖，来弥补渔业排斥损失和建设维护耗资。

(4)在设备融合方面，要整合机械、自动化、电气等相关专业的资源，根据鱼种、贝类、藻类、底栖类生物需求，探索适合当地的海上风牧融合设备，并且要严谨科学地对其在海洋中的受力稳定性进行验证。

(5)在生态影响方面，加快通过实地调研结合实验室方法，在复杂的海洋环境中区分其他因素对海上风电影响分析的干扰，找到我国主要经济鱼种噪声和电磁的阈值，也可以借鉴国外的鱼类阈值，进行同种同属的类比，有效评估风牧融合项目中风电场对牧场生物的影响。尤其是电磁影响，目前更多的是潜在影响，不确定性很大，可采用自然实验和介观实验结合，掌握重点物种习性和电磁敏感度，更准确洞悉其对牧场物种的长久影响。

而关于重金属迁移的影响，在构建模型模拟扩散范围和浓度的基础上，要结合应用生物损失量的一些评估方法来定量预估重金属(主要是锌)的输移扩散造成的生物损失量，来为今后的防污染工作提供引导。

参考文献(References)：

[1] 周卓斌. 全球海上风电强劲增长[N]. 人民日报，2022－07－01(017).

ZHOU Zhuobin. Strong growth in offshore wind worldwide [N]. People's Daily, 2022－07－01(017).

[2] LACROIX D, PIOCH S. The multi-use in wind farm projects: more conflicts or a win-win opportunity? [J]. Aquatic Living Resources, 2011, 24(2): 129－135.

[3] 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: Springer, 2017.

[4] WEVER L, KRAUSE G, BUCK B H. Lessons from stakeholder dialogues on marine aquaculture in offshore wind farms: perceived potentials, constraints and research gaps[J]. Marine Policy, 2015, 51: 251－259.

[5] 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.

[6] BUCK B H, KRAUSE G, POGODA B, et al. The German case study: pioneer projects of aquaculture-wind farm multi-uses[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2017.

[7] 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.

[8] JANSEN H M, VAN DEN BURG S, BOLMAN B, et al. The feasibility of offshore aquaculture and its potential for multi-use in the North Sea[J]. Aquaculture international, 2016, 24(3): 735－756.

[9] 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.

[10] CHOI E J, KIM H W, LEE J Y, et al. Necessity of fisheries products processing & marketing center-based on sea farm project using co-location in offshore wind farms[J]. Korean Logistics Research Association, 2016, 26(3): 65－73

[11] JUNG C Y, HWANG B K, KIM S C. Possibility of fishery in offshore wind farms[J]. Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 2019, 25(5): 535－541.

[12] 莫爵亭，宋国炜，宋浪. 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.
MO Jueting, SONG Guowei, SONG Lang. Preliminary discussion on the ecological development feasibility of “offshore wind power ＋ ocean ranch” in Yangjian, Guangdong [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(2): 122－126.

[13] 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.

[14] 翟方国，李培良，顾艳镇，等. 海底有缆在线观测系统研究与应用综述[J]. 海洋科学，2020，44(8)：14－28.
ZHAI Fangguo, LI Peiliang, GU Yanzhen, et al. Review on the research and application of submarine cable online observation system[J]. Marine Science, 2020, 44(8): 14－28.

[15] WANG Huiyu, FANG Huiming, CHANG Yunchi. Study on the coexistence of offshore wind farms and cage culture[J]. Water, 2021, 13(14): 1960.

[16] HUANG Changting, AFERO F, HANG Changwu, et al. Economic feasibility assessment of cage aquaculture in offshore wind power generation areas in Changhua County, Taiwan [J]. Aquaculture, 2022, 548: 737611.

[17] 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.

[18] 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.

[19] BENASSAI G, STENBERG C, CHRISTOFFERSEN M, et al. A sustainability index for offshore wind farms and open water aquaculture[J]. Proceedings of Coastal Processes II, 2011,12: 3－14.

[20] WEISS C V C, ONDIVIELA B, GUINDA X, et al. Co-location opportunities for renewable energies and aquaculture facilities in the Canary Archipelago[J]. Ocean & Coastal Management, 2018, 166: 62－71.

[21] 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.

[22] MOONEY T A, ANDERSSON M H, STANLEY J. Acoustic impacts of offshore wind energy on fishery resources[J]. Oceanography, 2020, 33(4): 82－95.

[23] ISO (International Organization for Standardization). Underwater acoustics-measurement of radiated underwater sound from percussive pile driving[EB/OL]. (2017－08－16)[2023－07－25]. https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18406:ed－1:v1:en.

[24] 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.

[25] 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.

[26] TOUGAARD J，HERMANNSEN L，MADSEN P T. How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines? [J]. The Journal of the Acoustical Society of America，2020，148(5)：2885－2893.

[27] BERGSTRÖM L，SUNDQVIST F，BERGSTRÖM U. Effects of an offshore wind farm on temporal and spatial patterns in the demersal fish community[J]. Marine Ecology Progress Series，2013，485：199－210.

[28] PINE M K，JEFFS A G，RADFORD C A. Turbine sound may influence the metamorphosis behaviour of estuarine crab megalopae[J]. PLoS One，2012，7(12)：e51790.

[29] WAHLBERG M，WESTERBERG H. Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms[J]. Marine Ecology Progress Series，2005，288：295－309.

[30] LUCZKOVICH J J，KRAHFORST C S，KELLY K E，et al. The lombard effect in fishes：how boat noise impacts oyster toadfish vocalization amplitudes in natural experiments[J]. Proceedings of Meetings on Acoustics 4ENAL，2016，27(1)：010035.

[31] ZHANG Xuguang，GUO Hongyi，CHEN Jia，et al. Potential effects of underwater noise from wind turbines on the marbled rockfish (*Sebasticus marmoratus*)[J]. Journal of Applied Ichthyology，2021，37(4)：514－522.

[32] CASPER B M，SMITH M E，HALVORSEN M B，et al. Effects of exposure to pile driving sounds on fish inner ear tissues[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A：Molecular & Integrative Physiology，2013，166(2)：352－360.

[33] HERBERT-READ J E，KREMER L，BRUINTJES 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.

[34] NEO Y Y，HUBERT J，BOLLE L，et al. Sound exposure changes European seabass behaviour in a large outdoor floating pen：effects of temporal structure and a ramp-up procedure[J]. Environmental pollution，2016，214：26－34.

[35] BRUINTJES R，SIMPSON S D，HARDING H，et al. The impact of experimental impact pile driving on oxygen uptake in black seabream and plaice[J]. Proceedings of Meetings on Acoustics，2016，27(1)：123－131.

[36] 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.

[37] 蔡灵，姜尚，马丽，等.海上风电电磁辐射对海洋生物影响的研究综述[J].海洋开发与管理，2019，36(12)：72－76.
CAI Ling，JIANG Shang，MA Li，et al. Review of the research on the effects of electromagnetic radiation from offshore wind power on marine organisms[J]. Ocean Development and Management，2019，36(12)：72－76.

[38] 袁健美，贲成恺，高继先，等.海上风电磁场对 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.
YUAN Jianmei，BEN Chengkai，GAO Jixian，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.

[39] GILL A B，DEGRAER S，LIPSKY A，et al. Setting the context for offshore wind development effects on fish and fisheries[J]. Oceanography，2020，33(4)：118－127.

[40] BERGSTRÖM L，KAUTSKY L，MALM T，et al. Effects of offshore wind farms on marine wildlife：a generalized impact assessment[J]. Environmental Research Letters，2014，9(3)：034012.

[41] GILL A B，BARTLETT M，THOMSEN F. Potential interactions between diadromous fishes of UK conservation importance and the electromagnetic fields and subsea noise from marine renewable energy developments[J]. Journal of Fish Biology，2012，81(2)：664－695.

[42] BOCHERT R，ZETTLER M L. Long-term exposure of several marine benthic animals to static magnetic fields[J]. Bioelectromagnetics：Journal of the Bioelectromagnetics Society，The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine，The European Bioelectromagnetics Association，2004，25(7)：498－502.

[43] HUTCHISON Z L，GILL A B，SIGRAY P，et al. Anthropogenic electromagnetic fields (EMF) influence the behaviour of bottom-dwelling marine species[J]. Scientific reports，2020，10(1)：1－15.

[44] HUTCHISON Z L，SECOR D H，GILL A B. The interaction between resource species and electromagnetic fields associated with electricity production by offshore wind farms[J]. Oceanography，2020，33(4)：96－107.

[45] VAN HAL R，GRIFFIOEN A B，VAN KEEKEN O A. Changes in fish communities on a small spatial scale，an effect of increased habitat complexity by an offshore wind farm[J]. Marine Environ-

mental Research, 2017, 126: 26－36.

[46] DE MESEL I, KERCKHOF F, NORRO A, et al. Succession and seasonal dynamics of the epifauna community on offshore wind farm foundations and their role as stepping stones for non-indigenous species[J]. Hydrobiologia, 2015, 756(1): 37－50.

[47] BARBUT L, VASTENHOUD B, VIGIN L, et al. The proportion of flatfish recruitment in the North Sea potentially affected by offshore windfarms[J]. ICES Journal of Marine Science, 2020, 77(3): 1227－1237.

[48] 王愿宁. 庄河海上风电塔柱重金属输移扩散的预测研究[D]. 大连：大连海事大学，2019.
WANG Yuanning. Prediction of heavy metal transport and diffusion in Zhuanghe offshore wind power tower[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2019.

[49] 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.

[50] 张珂. 中国海上风电产业政策研究[D]. 武汉：武汉大学，2019.
ZHANG Ke. The study on China′s industrial policy of offshore wind power[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.

[51] 郑宇，张慧明. 海上风电技术政策：基于 X-Y 维度的国际比较研究[J]. 中国科技论坛，2017(10)：177－185.
ZHENG Yu, ZHANG Huiming. International comparison on offshore wind power technology policy[J]. Forum on Science and Technology in China, 2017(10): 177－185.

[52] 邓江锋，刘陈真子，张效莉. 我国海上风电产业补贴政策的进与退[J]. 海洋经济，2022，12(6)：52－63.
DENG Jiangfeng, LIU Chenzhenzi, ZHANG Xiaoli. The progress and retreat of China′s offshore wind power industry subsidy policy[J]. Marine Economy, 2022, 12(6): 52－63.

[53] 杨昊. 我国海上风电发展探析与对策建议[J]. 大众用电，2022，37(9)：13－15.
YANG Hao. Analysis and countermeasure suggestions for the development of offshore wind power in China[J]. Popular Utilization of Electricity, 2022, 37(9): 13－15.