海洋战略性新兴产业发展的环境影响分析及我国监管对策

杨正先，魏树运，王晓萌，韩建波

（国家海洋环境监测中心　大连　116023）

摘要：海洋战略性新兴产业已经成为我国海洋经济发展的重要引擎和实现“双碳”目标的重要发展领域。文章以海上风电场、海上光伏场、新型海水养殖基地及海底碳封存工程等为例，对国内外海洋战略性新兴产业发展趋势及其环境影响展开分析，发现随着产业种类及规模的增长，海洋生态环境影响及生态风险已逐步显现。我国海洋战略性新兴产业整体上已处于由新增长点向战略支柱产业跨越的关键节点，但环境影响研究及监管工作尚处于起步阶段。为促进我国海洋战略性新兴产业的绿色高质量发展，应强化产业发展的生态环境影响基础研究，重点关注长期生态影响及灾害风险；根据产业类型、规模及区位等，制定具有针对性的法规标准及监管制度；做好海洋战略性新兴产业相关的国际公约履约工作，积极参与或组织相关国际政策文件及技术指南的制修订，促进我国海洋战略性新兴产业国际化发展。

关键词：海洋战略性新兴产业；环境影响；监管对策

中图分类号：X37；P741　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005－9857(2024)09－0147－08

Analysis on Environmental Impact of the Development of Marine Strategic Emerging Industries and Supervision Countermeasures in China

YANG Zhengxian，WEI Shuyun，WANG Xiaomeng，HAN Jianbo

（National Marine Environmental Monitoring Center，Dalian 116023，China）

Abstract：Marine strategic emerging industries have become an important engine for the development of the marine economy and a key development area to achieve the “carbon peaking and carbon neutrality goals” in China. This paper takes offshore wind farms，offshore photovoltaic fields，new marine aquaculture bases，and offshore carbon storage projects as examples to analyze the development trends and environmental impacts of marine strategic emerging industries at home and abroad. Research shows that with the increase of industry types and scale，the environ-

收稿日期：2024-03-09；**修订日期**：2024-09-06

基金项目：国家重点研发计划项目（2017YFA0604904）.

作者简介：杨正先，高级工程师，硕士，研究方向为海洋资源环境管理

通信作者：韩建波，博士，研究员，研究方向为海洋工程环境影响评价技术

ment impact and ecological risks have gradually become apparent. Overall, marine strategic emerging industries in China are in a critical stage of transitioning from new growth points to strategic pillar industries, but environmental impact research and supervisory system are still in the initial stage. In order to promote the green and high-quality development of marine strategic emerging industries in China, it is necessary to strengthen basic research on ecological and environmental impacts, and focus on long-term ecological impacts and disaster risks; develop targeted regulations, standards, and regulatory systems based on industry type, scale, and location; ensure compliance with relevant international conventions, participate or organize actively in the formulation and revision of relevant international policy documents and technical guidelines, and promote international development of marine strategic emerging industries in China.

Keywords: Marine strategic emerging industries, Environmental impact, Supervision countermeasures

0 引言

海洋战略性新兴产业是由海洋领域新技术诞生并应用或重大战略需求牵引而产生的开发、利用和保护海洋所进行的生产和服务活动的总和[1]，通常包括海上新能源、海洋装备制造、海洋新材料、海洋资源创新性利用等产业，具有新兴性、高成长性和带动性、技术密集、高附加值及动态性等特点。海洋战略性新兴产业的发展对推动整体海洋产业升级换代，促进我国海洋经济高质量发展，建设海洋强国具有重要意义[2]。

随着海洋战略性新兴产业种类和规模的增加，随之而来的环境影响也逐步显现，并被国内外广泛关注，成为制约产业长远发展的潜在因素。本文以海上风电场、海上光伏场、新型海水养殖基地及海底碳封存工程等为例，分析了海洋战略性新兴产业国内外发展现状、趋势及其环境影响，并从环境监管角度提出了我国海洋战略性新兴产业的绿色高质量发展的若干对策建议。

1 国内外发展现状与趋势

1.1 海上风电场

欧洲作为海上风电技术的诞生地，从 1991 年丹麦建成全球首个海上风电项目至今，英国、德国、荷兰等引领行业发展 30 余年。中国在 2010 年完成首座大型海上风电场的装机[3]，并于 2021 年超越英国，成为全球海上风电累计装机规模最大的国家，到 2022 年，占全球新增总装机容量的 57.6%，累计装机规模达到 31.44GW，占全球海上风电累计装机规模的 48.9%[4]，年新增装机和累计装机均位居全球首位。

2023 年，我国风电产业捷报频传，全球首台单机容量最大的 16 MW 海上风电机组在福建平潭投运；广东明阳集团的 20 MW 海上风电机组在汕尾海工基地下线；我国首座深远海浮式风电平台“海油观澜号”在海南文昌海域正式投入运营；全球首次海上风电无淡化海水原位直接电解制氢技术海上中试在福建兴化湾海上风电场获得成功。

1.2 海上光伏场

海上光伏作为一种新兴的清洁能源发电方式，有着巨大的发展潜力[5]。海上光伏通常包括桩基式和漂浮式，现阶段海上光伏以桩基式为主，一般位于滩涂及潮间带[6]。漂浮式光伏造价较高，但是环境影响较小、适用范围更广，预计未来将成为海洋光伏电站的主流形式。目前全球有 60 余个国家在积极推进漂浮式光伏电站建设，其中有超过 35 个国家拥有 350 个漂浮式光伏电站。据相关研究显示，2021 年全球部署的漂浮式光伏装机容量为 1.6 GW，预计到 2026 年将增长到 4.8 GW[7]。

2022 年，国家电投山东半岛南 3 号海上风电场 20MW 深远海漂浮式光伏 500 kW 实证项目成功发电，成为全球首个投用的深远海风光同场漂浮式光伏实证项目。2023 年，国家电投集团在山东海阳市和威海市文登区近海建设的两大桩基固定式海上

光伏项目落地并稳定运行。同年，全球最大海上光伏项目——山东东营垦利 1 GW 海上光伏项目在东营广利港正式开工。

1.3　新型海水养殖基地

传统的陆地和浅海养殖，面临着土地资源有限、环境污染等问题，而深海具有庞大的水体容量和稳定的水质条件，为鱼类等经济生物生长提供了更广阔的空间，被视为海水养殖未来发展方向[8]。早在 20 世纪 80 年代，部分欧美发达国家开始进行深远海养殖技术的探索与应用，推动新一轮海水养殖浪潮的兴起[9]，经过近半个世纪的发展，深远海养殖已从简单的深水网箱养殖发展成深远海智慧养殖工厂，包括养殖平台和养殖工船等形式[10]。我国建造的全球首艘 10 万吨级智慧渔业大型养殖工船“国信 1 号”于 2022 年交付运营，在全球范围内，其养殖渔船单船吨位和养殖规模最大、单舱水体量最高。青岛国信集团还计划用 5～10 年，投入约 350 亿元，将养殖船队拓展到 50 艘，年产值预计达 500 亿元以上。

此外，人工上升流在养殖产业中的发展潜力也备受关注。人工上升流是通过在海洋中放置上升流装备系统，人为产生自海底到海面的海水流动，增加上层水体营养盐供给，从而实现养殖增产，被认为有利于促进蓝碳增汇[11]。日本学者率先提出利用水泵抽水实现海底营养盐的提升，并于 2003 年启动了“拓海”（TAKUMI）上升流工程[12]。挪威为了抑制挪威海湾的有毒藻类生长，促进贻贝类的养殖，采取了气泡幕举升法形成人工上升流[13]。我国海洋人工上升流示范工程快速推进，已经成为国内外关注重点[14]。

由浙江大学牵头的研究团队在山东鳌山湾海域打造了国内首个人工上升流增汇示范工程，据称在近 333 hm^2 海带养殖海域，3 年增加产值近 8 000 万元，同时实现了海洋碳增汇。2023 年，该研究团队在浙江省嵊泗县贻贝养殖海域再次建造了人工上升流示范工程，计划营造“贻贝增产－碳增汇”的养殖模式。

1.4　海底碳封存工程

海底碳封存是减少全球温室气体排放的重要途径之一。挪威、英国、丹麦、荷兰、日本等发达国家已将海底碳封存视为积极应对气候变化的有效措施并开展了实验或示范工程研究[15]。随着减排形势趋紧，传统海上油气田回注减排的量很有限，以“岸碳入海”为主的海底碳封存成为新方向，预计在未来 10 年将迎来暴发式增长。欧洲北海周边国家启动了多个海上碳封存项目，包括挪威 Northern Lights 项目、丹麦 Greensand 项目、英国 Acorn 项目、荷兰 Porthos 项目等；此外，澳大利亚启动了 CarbonNet 项目，美国在墨西哥湾启动了 Houston Ship Channel 项目，马来西亚在南海琼台礁海域启动了 Kasawari 项目。

2023 年，我国首个百万吨级海上碳封存示范工程——恩平 15－1 油田碳封存示范工程在珠江口海域正式投用，标志着我国已初步形成海上二氧化碳注入、封存和监测的全套钻井技术及装备体系[16]。同年，中国海油、广东省发展改革委、壳牌集团和埃克森美孚签署了《在中国大亚湾地区开发和运营碳捕集、利用与封存（CCS/CCUS）项目联合研究协议》，标志着我国首个海上千万吨级碳捕集、利用与封存项目集群示范项目的联合研究工作正式启动。此外，由青岛海洋地质研究所等单位开展了杭州湾南岸碳封存示范工程战略研究项目，为未来长三角地区“岸碳入海”开展了可行性论证[17]。

1.5　小结

海洋战略性新兴产业整体上呈现由浅水到深水、由近海到远海、由试点工程到大规模开发的趋势，并成为世界海洋大国重点发展和竞争的前沿阵地。其中，海上风电大面积铺开，向深远海发展；新型海水养殖基地也纷纷亮相，种类创新且规模扩大；全球已有 10 余个不同规模的海底碳封存研究及示范性项目，并且规划了多个千万吨级“岸碳入海”项目；海上光伏快速发展，多个项目已经投入商业运营。

我国海洋装备制造能力已处于国际先进水平，有力带动和支撑了我国海洋战略性新兴产业的迅速发展，部分产业已处于国际先进水平，特别是海上风电、光伏及新型海水养殖捷报频传，实现多个“全球第一”，海底碳封存项目也在有序推进，示范

工程已投入运营，并启动了多个“岸碳入海”项目的规划研究。根据《2022 年中国海洋经济统计公报》，我国海洋战略性新兴产业增加值比上年增长7.9%，远高于传统产业发展速度，整体上已经由新增长点向战略支柱产业过渡。

2 环境影响分析

2.1 海上风电场

与陆上风电项目相比，海上风电场在发电效率等各方面的优势更为明显[18]，但是随着海上风电的规模扩大，成片密布的风机基础结构对海洋水动力条件，以及对候鸟及渔业资源迁徙的干扰，对地形地貌及生物群落的影响不容忽视。Galparsoro 等[19]根据 158 份研究报告中提取的 867 项关于海上风电对生态环境的影响结果显示，72%为负面影响，仅有 13%是积极的。高度、中度负面影响占调查结果的 45%，其中 32%涉及鸟类、7%涉及海洋哺乳动物、2%涉及鱼类。

海上风电对鸟类的影响主要表现为鸟类与风机发生撞击导致死亡、占用鸟类的栖息地、影响了海鸟筑巢和繁衍，以及施工期间的机器噪声、灯光、磁场都会对鸟类的觅食、繁殖和迁徙产生一定的影响等[20]。海上风电项目建设期的打桩工作会对哺乳动物的数量和分布产生重大影响，对鱼类的影响程度取决于受影响的物种及其脆弱性和敏感性水平[21]。

此外，海上风电的污染影响也不容忽视，为避免风机基础的钢结构被海水腐蚀，海上风电通常采用牺牲阳极保护法，会导致重金属随流扩散，对周围水质与海洋生态造成影响[22]。且海上风电广泛采用充油电缆及变电器绝缘油，以及机组齿轮箱润滑油，在自然损坏及维护不当时也存在漏油风险。目前海上风电的生态环境影响研究仍不够深入系统，主要是缺乏实验和长期的数据积累，未来需要通过设立长期定位观测试验站，分析海上风电场对海洋生物、群落及生态系统的影响机制。

2.2 海上光伏场

大面积布设海上光伏面板会产生遮光效应，导致水体太阳辐射减少并影响海中藻类生长。光伏面板还在一定程度上限制了水面和周围环境之间的氧气交换，造成浅水层的低氧或厌氧性环境[23]。遮光效应还会导致海水水温结构和变幅发生改变，引起生物群落结构发生变化[24]。藻类生长受影响和水中氧气补充不足，还可能导致漂浮性鱼卵和浅水层的仔稚鱼的死亡，光照减弱和水温变幅的改变也会直接影响鱼类生长发育过程[25]，以及近岸海草床及海藻场的生态功能受损，甚至会导致沉水植物消失[26]。密集的海上光伏设施桩基还会使水文动力环境包括流速、流向发生显著变化，改变原有生境条件及生物群落，并对鱼虾类生物的洄游行为造成影响，可能降低生物物种的丰度和多样性。

海上光伏建设及运营期间的噪音、灯光、对底质的扰动以及产生的污染物会对海洋生态环境以及周边鸟类活动造成影响。根据世界自然保护联盟(IUCN)发布的指南[27]，海上光伏发电场对鸟类的潜在影响主要有：①占用鸟类觅食地，影响鸟类觅食；②导致鸟类撞击太阳能电池板或输电线路致残或致死；③让部分鸟类误以为太阳能电池板为水面，诱发降落撞击。

此外，光伏板表面容易积尘，影响发电效率，因此通常需要定期清洗(每年约 2 次)。大面积清洗使用的表面活性剂及磷酸盐等助洗剂可能会对海洋环境及生态系统造成影响。高盐度、湿度条件下海上光伏采用的金属构建容易腐蚀，盐雾会使露出地面的预制管桩产生风化现象。与风电类似，牺牲阳极阴极保护是金属材料在海洋环境下应用的主要腐蚀防护手段之一，也可能造成海水及沉积物中锌等重金属含量增加[28]。此外，台风灾害可能会导致海上光伏板大面积损毁，并造成碎片垃圾及污染物质溶出。

2.3 新型海水养殖基地

基于养殖工船及网箱的深远海养殖相对于近岸养殖产生的环境影响较小，但仍需要密切关注养殖过程中可能引发的海水及沉积物污染，以及养殖规模的扩大可能导致的资源过度利用和饵料资源竞争加剧问题。大亚湾深水网箱养殖海域的调查发现，养殖区表层沉积物总氮和总磷含量总体上高于非养殖区[29]。除了残饵及鱼类排泄物带来的环境及生态影响以外，养殖人员生活污水、生活垃圾，

养殖鱼类逃逸对原有生物群落的影响，维护网箱产生的固体废弃物，船舶排放的舱底含油废水、船舶废气、船舶噪声对环境的影响也需要关注。

基于人工上升流的海水养殖通过改变海洋中的动力场及营养物质输运促进养殖增产。大规模人工上升流对海洋生态环境的影响是全方位的，目前重点关注上升流加剧表层水体的酸化以及对群落结构的干扰。底层海水的 pH 值通常较低，人工上升流系统将其提升到表层后将会导致表层水体酸化，对于海洋生态系统是重大威胁。Keller 等[30]研究表明，人工上升流技术可能将深水区含高浓度二氧化碳的海水带至表面，导致表层水体的 pH 值下降 0.15 个单位，从而使贝类等生物的生长速度和存活率受到影响，并可能导致该区域海表碳排放通量增加。

2.4　海底碳封存工程

海底碳封存在运输和地质封存过程中，由于人为操作失误、封存体结构缺陷及自然灾害等原因，二氧化碳可能会泄漏到海洋环境中，致使一定区域内的海水 pH 值降低，并可能导致海洋底栖生物群落发生改变。若泄漏量巨大，二氧化碳将释放回大气圈，加剧温室效应[31]。

目前尚无海底碳封存泄露案例，但相关项目也暴露了一些潜在风险。如挪威的 Sleipner 封存工程运行 3 年后，二氧化碳迅速移动到原计划的第八层咸水层结构的顶部，进入到未知的第九层，还发现了之前未知的地震烟囱和 Hugin 断裂带[32]。Snøhvit 项目更是与预期差异甚大，封存后储存层的压力迅速上升到危险水平，实际的储存容量远低于预算结果和实际需要，只能另外寻找封存结构进行封存[33]。截至 2023 年年末，全球已启动了 10 余个与海底碳封存监测相关的研究项目，并且全球 7 个大型海底碳封存工程都配套有监测项目[34]，但目前监测项目以井内监测及地球物理监测方式为主，海洋环境监测因技术不成熟、监测成本高、缺少规范约束等原因，在封存工程中的实际应用较少。

2.5　小结

现有研究结果及大量案例表明，海洋战略性新兴产业发展的生态环境影响不容忽视，特别是随着新产业种类、用海规模的增加，对海洋生态系统结构和功能的影响已经逐步显现，并引起国内外广泛关注，甚至引发质疑和反对意见。多种形式的海洋产业组合式发展，如近期备受关注的风光渔融合项目及海上风电制氢能源项目，对规划选址、环境影响评价、项目审批及配套管理提出新的挑战[35]。

环境影响研究是海洋战略性新兴产业开发及管理中不可或缺的重要内容，也是目前的技术体系中的短板，需要通过研究明确不同类别、规模及区位条件下环境影响程度及其可接受性，并根据影响机制及分析预测结果，调整和优化选址、工艺结构、施工运营方式等。我国海洋战略性新兴产业环境影响研究起步较晚并滞后于产业发展，由于缺乏长时间跟踪监测数据，产业长期海洋生态环境影响机制及程度尚不清楚，产业规模控制阈值、适应性调控对策还缺乏系统研究。

3　我国监管对策分析

3.1　加强环境影响基础研究

我国海上风电、光电及新型海水养殖基地等产业迅速发展，已经处于世界前沿水平，并且随着种类及规模的增长，我国海洋战略性新兴产业发展的生态环境影响已逐步显现，但长期海洋生态环境影响尚缺乏系统研究。有必要开展顶层设计和统筹规划，明确关键问题、技术难点及阶段性攻关目标。通过国内外案例调查、实验室和现场模拟实验，以及数值模拟分析等方法可获得对我国海洋战略性新兴产业生态环境影响的系统性认识，初步掌握不同情景下的产业规模控制阈值及适应性调控对策，并应用于管理实践，通过大量、持续的跟踪监测对结论进行验证，迭代发展形成相对全面、系统的认识及有针对性的管理调控对策。

我国海洋战略性新兴产业的环境影响研究需要重点关注大规模项目对于区域生态系统的长期影响，包括生物多样性、群落结构、渔业资源等。此外，还需考虑人为事故及自然灾害带来的生态环境风险，如二氧化碳海底封存中的泄露酸化风险、海上新能源基地广泛使用的充油电缆的漏油风险、海上光伏在台风灾害下损毁产生的环境风险。环境影响研究不仅需要解决当前已有项目的环境监测、

影响评价、预警监管中的技术及决策问题，更要具有一定的前瞻性，为未来我国海洋战略性新兴产业融合及大规模发展提供政策引导、优化设计、规模控制、生态管理的技术保障。

3.2 完善法规标准及监管制度

通过科学布局、优化设计、强化监管，可以有效提升我国海洋战略性新兴产业发展的环境安全性及资源利用的可持续性。2020 年，中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于构建现代环境治理体系的指导意见》，要求“健全法律法规标准，严格执法、加强监管，加快补齐环境治理体制机制短板”。2022 年，生态环境部发布了《“十四五”生态保护监管规划》，提出“提升生态风险防控与预警能力”。面对我国海洋战略性新兴产业的迅速发展，完善的法规标准及监管制度对于保障和促进产业的健康规范化发展、防范化解环境风险及企业投资风险具有重要意义，已成为推进生态环境治理体系和治理能力现代化的重要任务。

我国海洋战略性新兴产业发展时间较短，存在相关标准欠缺，监管制度不清的问题，需要在国家层面明确责任分工，在环境影响系统研究的基础上，系统开展管理制度及配套法规标准研究，系统构建环境监管关键技术、方法、标准、法规、规划、政策及监管制度体系，为保障和促进我国海洋战略性新兴产业高质量发展提供良好的科学支撑、政策引导及制度保障。

3.3 关注国际公约履约及文件制修订

国际公约是保障国际社会共同利益、形成国际秩序及开展全球治理的重要基础。我国缔约、签署和批准了一系列与海洋及环境保护相关的国际公约，如《联合国海洋法公约》《防止倾倒废物及其他物质污染海洋的公约》《生物多样性公约》及《国际防止船舶造成污染公约》等，对我国海洋环境监管工作提供了有力的支撑。其中《联合国海洋法公约》明确规定了缔约国在海洋环境保护方面的责任和义务，为海洋环境的保护提供了法律框架和指导原则；《防止倾倒废物及其他物质污染海洋的公约》及《生物多样性公约》通过缔约国大会文件对海底碳封存及海洋地球工程明确了具体的管理要求；《国际防止船舶造成污染公约》及其附则Ⅳ修正案对包括养殖工船在内的船舶排污进行了限制。此外，我国还与周边国家签订了一系列合作协议及备忘录，主要涉及海洋环境及渔业资源保护相关的内容。

我国海洋战略性新兴产业主要分布于领海，未来可能向专属经济区扩展。开发过程中需要关注相关开发活动对海洋环境、渔业资源及生物多样性的影响，切实做好相关国际公约履约工作，并积极参与或组织国际公约相关政策及技术文件的编制及修订。充分利用好国际公约这一合作平台，一方面可积极吸收和借鉴国外发达国家的先进经验，解决国内海洋战略性新兴产业发展中的问题；另一方面我国也可以充分利用产业优势，为世界提供中国智慧和中国方案。

4 总结

我国海洋战略性新兴产业发展迅速，已经成为海洋经济发展的重要引擎和实现“双碳”目标的重要发展领域，特别是海上风电、海上光伏及新型海水养殖基地建设已经处于世界前沿水平，由新增长点向战略支柱产业过渡，但相关产业的环境影响研究及监管工作尚处于起步阶段。亟待在国家层面开展顶层设计，明确未来工作重点及任务分工，并制订行动方案。密切跟踪国内外产业、科研及管理实践最新进展，系统开展我国海洋战略性新兴产业的环境影响及灾害风险研究，构建具有针对性的标准、法规、规划、政策及监管制度体系，以保障和促进我国海洋战略性新兴产业的绿色高质量发展。积极参与或组织国际合作，为我国海洋战略性新兴产业国际化发展，营造开放创新、科学规范的发展政策环境。

参考文献(References)：

[1] 王昌林，盛朝迅.中国海洋战略性新兴产业发展现状、问题与对策探讨[J].海洋经济，2021，11(5)：9－17.

WANG Changlin, SHENG Chaoxun. Discussion on development status, problems and countermeasures of China's marine strategic emerging Industries[J]. Marine Economy, 2021, 11(5): 9－17.

[2] 童彤.布局海洋新兴产业和改造升级传统产业并重[N].中国经济时报，2023－11－29(002).
TONG Tong. Equal emphasis on the layout of emerging marine industries and the transformation and upgrading of traditional industries [N]. China Economic Times, 2023－11－29(002).

[3] 潘伟.风从海上来：中央企业协同发力深远海风能[J].国资报告，2023(7)：94－98.
PAN Wei. Wind comes from the sea: central enterprises collaborate to achieve profound sea wind energy[J]. State-Owned Assets Report, 2023(7): 94－98.

[4] Global Wind Energy Council. Global offshore wind report 2023[R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2023.

[5] 王森，秦宏伟，高鹏斌，等.南港冰期海上漂浮式光伏技术试验研究[J].海洋技术学报，2023，42(4)：67－75.
WANG Sen, QIN Hongwei, GAO Pengbin, et al. Experimental research on floating photovoltaic technology at sea during ice period in nangang[J]. Journal of Ocean Technology, 2023, 42(4): 67－75.

[6] 马月，吕永刚，温友超，等.海上光伏电站基础结构的综述[J].科技与创新，2023(20)：92－95.
MA Yue, LYU Yonggang, WEN Youchao, et al. Overview of infrastructure for offshore photovoltaic power stations[J]. Science and Technology & Innovation, 2023(20): 92－95.

[7] Pv magazine.Floating PV could reach 4.8 GW globally by 2026[EB/OL].[2022－01－29]. https:// www.pv－magazine.com/2022/01/19/floating－pv－could－reach－4－8－gw－globally－by－2026/

[8] 吴黄铭，王源，魏勤，等.福建省深远海养殖现状及发展对策[J].海洋开发与管理，2023，40(11)：120－126.
WU Huangming, WANG Yuan, WEI Qin, et al. Present situation and development countermeasures of far-reaching marine aquaculturein Fujian Province[J]. Ocean Development and Management, 2023, 40(11): 120－126.

[9] 徐皓，刘晃，黄文超.深远海设施养殖装备技术进展与展望[J].上海海洋大学学报，2023，32(5)：893－902.
XU Hao, LIU Huang, HUANG Wenchao. Advances and outlook of offshore aquaculture equipment technology[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(5): 893－902.

[10] WANG C, CHU Y, BAUMEISTER J, et al. Offshore fish farming: challenges and developments in fish pen designs[M]. Boca Raton: CRC Press, 2022: 87－128.

[11] 陈鹰，樊炜，潘依雯，等.海洋人工上升流系统理论与方法[M].北京：海洋出版社，2023：240－243.
CHEN Ying, FAN Wei, PAN Yiwen, et al. Artificial upwelling: theory and application[M]. Beijing: China Ocean Press, 2023: 240－243.

[12] OUCHI K, MURPHY A J. Real sea experiment of ocean nutrient enhancer "TAKUMI" upwelling deep ocean water[J]. Oceans Proceedings, 2003: 881－885.

[13] MCCLIMANS T A, HANDA A, FREDHEIM A, et al. Controlled artificial upwelling in a fjord to stimulate non-toxic algae[J]. Aquacultural Engineering, 2010(42): 140－147.

[14] 李纪，王莹，何柳，等.海洋地球工程的研究进展与相关国际法探析[J].海洋开发与管理，2022，39(2)：21－28.
LI Ji, WANG Ying, HE Liu, et al. Research progress in ocean geoengineering and the related international law[J]. Ocean Development and Management, 2022, 39(2): 21－28.

[15] 宋爽，韩建波，陈虹，等."双碳"目标下二氧化碳海底地质封存在中国的发展潜力及建议[J].科技导报，2023，41(22)：30－37.
SONG Shuang, HAN Jianbo, CHEN Hong, et al. Development potential and countermeasures of sub-seabed CO_2 sequestration under the target of carbon peaking and carbon neutrality in China[J]. Science & Technology Review. 2023, 41(22): 30－37.

[16] 申珍珍.中国海油碳捕集、利用与封存(CCUS)技术取得重大进展[J].测井技术，2023，47(2)：246.
SHEN Zhenzhen. CNOOC has made significant progress in CCUS technology[J]. Well Logging Technology, 2023, 47(2): 246.

[17] 青岛海洋地质研究所.青岛海地所杭州湾南岸碳封存示范工程战略研究项目通过验收[EB/OL].[2023－09－26].http://www.qimg.cgs.gov.cn/gzdt/202309/t20230926_744231.html.
Qingdao Institute of Marine Geology. The strategic research project of Hangzhou Bay South Bank Carbon Sequestration Demonstration project implemented by QIMG passed acceptance[EB/OL].[2023－09－26].http://www.qimg.cgs.gov.cn/gzdt/202309/t20230926_744231.html.

[18] 黄意财.海上风电工程生态环境影响的研究[J].通讯世界，2018(3)：205－206.

HUANG Yicai. Research on the ecological environment impact of offshore wind power engineering[J]. Telecom World, 2018 (3): 205－206.

[19] GALPARSORO I, MENCHACA I, GARMENDIA J M, et al. Reviewing the ecological impacts of offshore wind farms[J]. npj Ocean Sustainability, 2022(1):1.

[20] Dong Energy. Danish offshore wind: key environmental issues[R]. Denmark, 2006.

[21] 张世朋,赵一飞,刘晴,等.基于 CiteSpace 分析的海上风电开发对生态环境影响研究[J].南京师大学报(自然科学版),2022,45(4):66－73.
ZHANG Shipeng, ZHAO Yifei, LIU Qing, et al. Research on ecological and environmental impact of offshore wind power development based on citespace analysis[J]. Journal of Nanjing Normal University(Natural Science Edition), 2022, 45(4): 66－73.

[22] 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.

[23] 严美姣,王银东,胡贤江.光照对小球藻、斜生栅藻生长速率及叶绿素含量的影响[J].安徽农学通报,2007(23):27－29.
YAN Meijiao, WANG Yindong, HU Xianjiang. Impact of illumination on *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquusz* growth rate and chlorophyll contents[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007 (23): 27－29.

[24] 郑志伟,史方,彭建华,等.水面光伏电站对水域生态环境影响分析与对策[J].三峡生态环境监测,2018,3(4):47－50.
ZHENG Zhiwei, SHI Fang, PENG Jianhua, et al. Influences and countermeasures of water surface photovoltaic power station on water ecological environment[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2018, 3(4): 47－50.

[25] 周显青,牛翠娟,李庆芬.光照对鱼类生理活动影响的研究进展[J].生态学杂志,1999,18(6):59－61.
ZHOU Xianqing, NIU Cuijuan, LI Qingfen. A review of the effect of light on physiological activities of fishes[J]. Chinese Journal of Ecology, 1999, 18(6): 59－61.

[26] WANG Lijing, WANG Bangguo, CEN Wenxi, et al. Ecological impacts of the expansion of offshore wind farms on trophic level species of marine food chain[J]. Journal of Environmental Sciences, 2024, 139: 226－244.

[27] BENNUN L, VAN BOCHOVE J, NG C, et al. Mitigating biodiversity impacts associated with solar and wind energy development[M]. Gland, Switzerland: IUCN, 2021: 86－92.

[28] 张帅.深海环境因素对牺牲阳极活化过程影响的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
ZHANG Shuai. Research on the influence of deep sea environmental factors on sacrificial anode dissolution[D]. Harbin :Harbin Engineering University, 2017.

[29] 葛伟宏,王兴强,苏家齐,等.大亚湾深水网箱养殖海域表层沉积物碳、氮、磷分布特征及污染评估[J].江苏海洋大学学报(自然科学版),2023,32(4):51－59.
GE Weihong, WANG Xingqiang, SU Jiaqi, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of carbon, nitrogen, and phosphorus of surface sediment in the deep water cage aquaculture waters of daya bay[J]. Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Science Edition), 2023, 32(4): 51－59.

[30] KELLER D P, FENG E Y, OSCHLIES A. Potential climate engineering effectiveness and side effects during a high carbon dioxide-emission scenario[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3304.

[31] 张少鹏,刘晓磊,程光伟,等.海底碳封存环境地质灾害风险及监测技术研究[J].中国工程科学,2023,25(3):122－130.
ZHANG Shaopeng, LIU Xiaolei, CHENG Guangwei, et al. Geoenvironmental hazard risks and monitoring technologies for marine carbon sequestration[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 122－130.

[32] FURRE A K, EIKEN O, ALNES H, et al. 20 Years of Monitoring CO_2 injection at Sleipner[J]. Energy Procedia, 2017, 114: 3916－3926.

[33] SHI J, CLAIRE I, CAGLAR S, et al. Snøhvit CO_2 storage project: assessment of CO_2 injection performance through history matching of the injection well pressure over a 32-months period[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 3267－3274.

[34] 李姜辉,余凤玲,牛雄伟,等.海底碳封存监测技术体系研究及未来发展[J].地球科学进展,2023,38(11):1121－1144.
LI Jianghui, YU Fengling, NIU Xiongwei, et al. Advances and future development of monitoring technologies for marine carbon storage [J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(11): 1121－1144.

[35] 孙腾,龚语嫣,冯翠翠,等.海上风牧融合的难题与挑战[J].海洋开发与管理,2023,40(9):19－29.
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(9): 19－29.