

引用格式: 杜文杰, 蔡国田, 漆小玲, 等. 海上可再生能源开发利用研究综述: 基于五维框架的分析[J]. 资源科学, 2025, 47(4): 675–690. [Du W J, Cai G T, Qi X L, et al. Review on development and utilization of offshore renewable energy: An analysis based on a five-dimensional framework[J]. Resources Science, 2025, 47(4): 675–690.] DOI: 10.18402/resci.2025.04.01

海上可再生能源开发利用研究综述 ——基于五维框架的分析

杜文杰^{1,2,3,4}, 蔡国田^{1,2,3,4}, 漆小玲^{1,2,3,4}, 汪 鹏^{1,2,3,4}, 张基祥^{2,3,4}

(1. 中国科学技术大学能源科学与技术学院, 合肥 230026; 2. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 3. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640; 4. 广东省可再生能源重点实验室, 广州 510640)

摘 要:海上可再生能源潜力丰富, 具有协同开发的特点和潜力, 但也面临环境复杂、可靠性差及空间竞争等问题; 且其跨学科理论基础尚未得到充分认识, 可持续开发与利用路径缺乏系统性认知。本文从能源地理学的视角切入, 构建了涵盖潜力、技术、产业、空间和治理共5个维度的研究框架, 通过多维度整合与跨领域分析, 系统梳理了海上可再生能源开发利用在潜力评价、技术开发、产业协同、空间评估及影响治理等方面的研究进展。综述发现: ①海上可再生能源尚处于发展初期, 具有“种类多潜力大但技术失衡、场景丰富但融合不足”的显著特征。具体表现为, 海上风电技术成熟且在开发中占据主导地位, 能源产业开发方式多样且融合场景丰富, 但短期内开发方式仍以单一开发为主导。开发利用具有显著环境效益但可能导致风险转移。②科学研究、技术开发与产业融合实践远远落后于海上资源开发利用的现实需求, 具体表现为能源潜力评价尺度不同导致评估结果差异大, 且同一尺度下的评价标准不统一; 技术开发不成熟、产业融合经济性差导致海洋资源开发利用程度不高; 空间评估集中在平面选址和优化, 海洋立体利用和能产融合的空间选址和优化研究不足; 开发利用的生态影响机制尚不清楚。③海上可再生能源需通过统一潜力评估标准、提升技术经济性、推动产业融合、优化空间利用、完善治理框架等举措, 推动五维协调发展, 助力实现海洋资源高效利用和海洋经济高质量发展。本文旨在为理解和推进海上可再生能源发展提供一个全面的框架, 为政策制定者、研究人员和行业利益相关者提供有益见解。

关键词:海上可再生能源; 能源地理; 五维框架; 开发利用; 多能互补; 综述

DOI: 10.18402/resci.2025.04.01

1 引言

在气候变化和碳减排背景下, 海上可再生能源等清洁能源发展的需求十分迫切。海上可再生能源具有减少化石能源排放、不占用稀缺土地资源、离东部负荷中心近、可为海洋产业活动以及偏远岛屿提供能源等优点。同时, 海洋作为多种资源的载体, 表现出多种资源融合开发与海洋多用途开发相结合的潜力, 有助于实现联合国可持续发展目标(SDGs)^[1], 海上可再生能源开发更是在其中发挥重

要作用(图1)。尽管优势显著, 但其规模化开发也面临诸多问题, 如: 海上复杂多变的不利自然条件导致的高技术成本, 资源随机性、间歇性和波动性导致的能源供需匹配性差^[2], 以及产业间竞争海洋空间资源^[3]等。尽管海上可再生能源技术已取得一定进展^[4–6], 但其开发过程会引起一系列人与环境相互作用的问题^[7], 其技术开发与应用面临社会和环境方面的诸多挑战, 需要对环境影响以及治理机制等进行全面讨论, 以减少环境和社会负担^[8]。现有

收稿日期: 2024-05-21; 修订日期: 2024-09-18

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA/29010500)

作者简介: 杜文杰, 男, 河南信阳人, 博士研究生, 研究方向为能源地理、资源生态与自然资源保护。E-mail: duwjie@163.com

通讯作者: 蔡国田, 男, 湖南郴州人, 博士, 研究员, 研究方向为能源与低碳战略、能源地理。E-mail: caigt@ms.giec.ac.cn

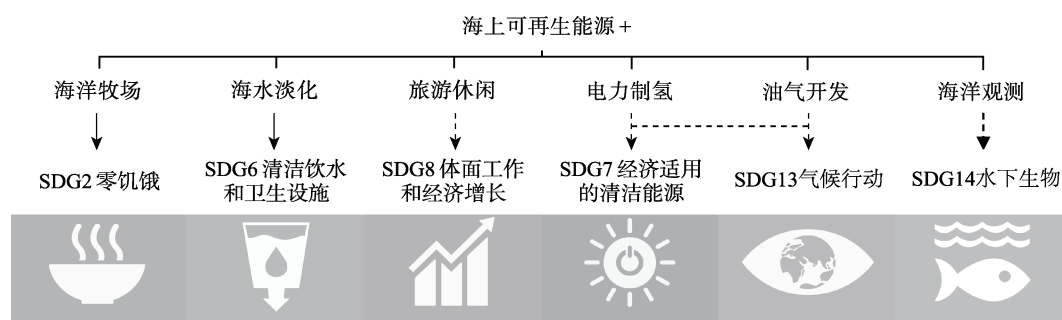


图1 海上可再生能源开发利用与SDGs关系

Figure 1 Relationship between development and utilization of offshore renewable energy and the SDGs

注:图中6个SDGs参考了联合国可持续发展目标。

认识集中在单一技术或单一视角,缺乏对海上可再生能源开发利用的理论基础、存在问题和解决方法的整体认识。为了更好地认识海上可再生能源开发可能引发的新挑战并提出未来发展方向,有必要从学科理论视角认识海上可再生能源开发利用。地理科学和能源科学分别作为实现可持续发展和能源开发利用的基础学科^[9],在这一过程中可发挥关键作用。

从地理科学与能源科学角度探讨海上可再生能源开发利用具有重要意义。①地理科学的核心在于研究人地关系地域系统,揭示自然系统与人类活动之间的复杂联系机制,并通过科学规划与合理开发促进人地关系的和谐发展^[10]。资源环境是人地关系的基本载体,需要通过深入认识资源环境要素的特性,并在资源环境承载力的范围内进行开发利用^[11];最终通过空间优化与资源合理配置,实现集约高效的利用格局,推动区域可持续发展。②能源是人类生存的重要因素,能源科学研究能源开发和利用过程中的规律等问题,如能量捕获与转换机理,可为资源转化利用提供技术支持。③能源地理学则在两个学科基础上研究能源资源在开采、运输、加工、转换和使用过程中能源系统与人类社会经济系统的相互作用^[12,13],但研究对象以传统化石能源和陆上可再生能源为主,对海上可再生能源开发利用关注较少。

海上可再生能源开发利用需考虑资源的空间潜力及布局、开发利用方式及其可能的生态环境影响,符合能源地理的传统研究共性。然而,海上可再生能源开发也具有其独特性,如土地产权的排他

性使一定空间内的陆地能源开发排斥其他活动,但在海洋环境中,风能、太阳能、渔业等不同资源要素单独或同时存在于水面、水中等不同空间,具有融合开发、立体利用的特点,可通过空间融合和结构融合等方式支持多能互补和能产融合等不同海洋产业开发模式,并以物质和能量形式供给海岛和陆域各项生产生活活动。不同区域的陆上或海洋活动在产生能源需求的同时,也会从空间对能源活动产生约束。这种约束不仅影响能源开发的选址和布局,还要求在能源规划中充分考虑多种活动之间的空间协调,进一步影响用海的功能和规划。因此,海上可再生能源开发利用是“能源”与“地理”的深度耦合。

基于此,本文以能源地理学为理论基础,对海上可再生能源开发利用划分研究内容体系并据此搭建分析框架(图2)。海上可再生能源开发利用研究涉及潜力维度、技术维度、产业维度、空间维度和治理维度。能源资源潜力是海上可再生能源开发基础,潜力维度聚焦于识别可再生能源的发电潜力,为可再生能源的开发利用奠定基础,充分挖掘资源潜力、实现高效开发是重要目标。技术维度主要指开发可再生能源技术并总结技术发展趋势。产业维度通过技术集成实现能源多用途利用,包括多能互补及与其他海洋产业融合开发,是技术维度的发展方向和开发利用的核心内容,是解决空间竞争和实现蓝色经济繁荣和可持续发展的重要途径。空间维度利用空间分析方法进行选址和配置,解决可再生能源开发利用的部署问题,空间优化结果可决定技术选择和能产融合类型及方式,如根据资源

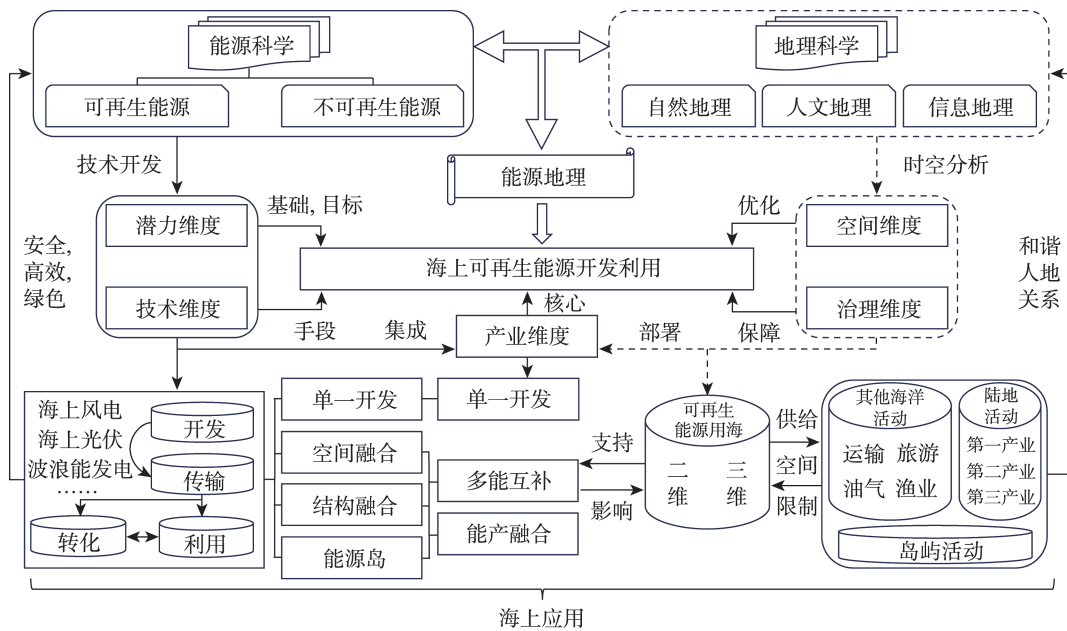


图2 基于能源地理学海上可再生能源开发利用内容体系

Figure 2 Framework of offshore renewable energy development and utilization based on energy geography

潜力不同选择不同融合发展方式。治理维度则从能源管理的角度出发,确保可再生能源开发利用得到有效实施和科学管理。在这一体系中,潜力维度是基础和目标,技术维度是手段,产业维度是实践应用,空间维度负责具体部署优化,而治理维度提供政策与管理的支持。5个维度互相支持和依赖,构成能源地理学关于海上可再生能源开发利用的理论框架。五维一体的可再生能源开发利用研究既能解决资源利用、技术制约、产业和空间竞争等问题,又可实现能源的安全高效绿色利用和区域的人地关系协调发展。本文将从这5个维度展开综述:从“潜力”维度总结发电潜力评估特点及不足,从“技术”维度回顾技术开发现状,从“产业”维度搜集应用案例并梳理总结协同开发的方式及场景,从“空间”维度分析空间评估研究进展,从“治理”维度探讨开发利用的生态环境影响及管理监督;最后,进行总结和展望。本文旨在为海上可再生能源开发利用、研究及管理提供理论支撑。

2 潜力维度

每种海上可再生能源类型都有其特定的开发潜力和分布规律,资源潜力评估是海上资源利用与可再生能源发展的前提^[14,15]。通过资源潜力评估,能够对不同技术路径下的环境影响(例如每度电的

碳排放)进行量化比较,从而得出更为可靠和科学的环境影响结论^[16]。通过统计分析已有的全球海上可再生能源发电潜力评估结果^[17-20]可以发现两个特点:①从中位数看,海上可再生能源年发电潜力巨大,其中海上光伏(2.2×10^5 TWh)和海上风电潜力(1.75×10^5 TWh)最大,超过海洋能发电总和(9.16×10^4 TWh)。海洋能发电中,温差能发电潜力最大(4.88×10^4 TWh),其次是波浪能(4.1×10^4 TWh)和盐差能(1.2×10^4 TWh),潮汐能(含潮流能)潜力最小。②同一能源潜力研究结果差异大,如每年海洋能发电最大最小值相差约 1.5×10^5 TWh。这种差异源自评估的尺度不同。常见潜力评估尺度包括理论潜力、地理潜力、技术潜力和经济潜力,其中,理论潜力评估仅考虑资源因素,地理潜力评估考虑包括水深在内的除资源以外的地理因子,技术潜力因子在地理因子基础上考虑技术特点如单机容量,经济潜力评估指在一定成本下的可用潜力。从理论潜力到经济潜力评估尺度逐渐精细化,潜力结果也逐渐减小,例如 Shao 等发现波浪能的经济潜力为理论潜力的 82%^[21]。

尽管潜力评价方法已经较为成熟,但评估结果易受到基础资源数据模拟准确性的影响^[22,23],且未厘清不同评价尺度下的评价标准及指标。具体而

言,地理潜力评估中不同自然地理因子如水深、离岸距离等筛选条件差异较大,技术潜力评估中不同单机容量和空间部署假设差异较大。以全球海上风电技术潜力评估为例,尽管美国国家可再生能源实验室^[24]和哈佛大学的研究^[25]对水深和离岸距离等重要因子设定条件一致,但由于原始风速数据和装机密度等重要因子的设定差异,二者得到的结果相差23%。由于以上不足,未来需制定标准的数据处理方法,并针对不同评价尺度分别选择合适的评价指标,构建统一评价标准,以提升评估结果的准确性。

能源资源的潜力评估通常在较大时间尺度上进行,能够为海上可再生能源宏观规划提供重要的依据。然而,与传统化石能源不同,可再生能源资源具有显著的时空不确定性^[26],给微观层面的能源系统运行和调度带来了巨大挑战。因此,在海上可再生能源资源潜力评估过程中,不仅需要考虑长期平均潜力,还必须重视资源潜力在未来不同时间的实际变化。未来需通过气象数据的模拟^[27]和基于机器学习的大气环流模型的开发^[28],实现资源潜力在更细时间尺度(如小时、分钟)的短时动态评估预测,以确保资源转化为能源后的可调度性和系统的稳定性。

3 技术维度

3.1 技术成熟度

海上可再生能源资源潜力丰富,且相比于陆地还具有波浪能、温差能等新型能源,需通过多种能量转换技术开发利用,采用国际通用的技术成熟度(Technology Readiness Level, TRL)分级^[29],纵向对

比各项技术(表1)可发现,海上能源发电的技术成熟度普遍较低,只有海上风电和潮汐能发电达到商业化应用,潮流能发电达到预商业化阶段,波浪能发电尚处于研究-工程示范阶段。尽管陆地光伏发电技术已成熟,但水上光伏发电却面临海上湿度大^[30]、海水及盐雾腐蚀和风浪冲击等部署和运营问题,目前也处于研究-工程示范阶段。海洋温差能发电技术尚处于工程示范阶段,其技术难点和主要成本来源为长距离深海管道^[31]。盐差能发电技术成熟度最低,处于实验室研究阶段,且面临膜成本高的问题。在此背景下,海上风电可为其他海上可再生能源发展提供经验^[32]。通过技术横向对比可发现,目前国际海上能源技术成熟度高于国内,中国海上可再生能源开发除了面临抗生物附着、抗腐蚀等共性技术难题外,还存在海试时间较短以及台风威胁的问题,亟须延长海试时间并加强抗台风技术的研究,以提高技术的可靠性和加速商业化进程。此外,中国浙江东海海域潮流能资源丰富,南海海域波浪能和温差能资源丰富,中国基于舟山和珠海建成国家海洋综合试验场,可在相应地区积极开展海试工作。

3.2 经济成本

平准化度电成本(LCOE)可用于比较不同能源技术的发电成本,通常包括设备成本、基础成本、运营维护成本、并网成本和退役成本。综合现有资料^[33]汇总可发现(表1):海上风电LCOE最低,其中固定式较漂浮式更具经济性;潮汐能发电、潮流能发电、波浪能发电和水上光伏(替代海上光伏)处于中间水平。其中,中国潮汐电站平均出厂电价区间

表1 国内外海上可再生能源技术成熟度、发展阶段与平准化度电成本(LCOE)对比

Table 1 Comparison of technology maturity, development stages, and LCOE of offshore renewable energy at home and abroad

能源技术	国际		国内		LCOE/(\$/kWh)
	成熟度	发展阶段	成熟度	发展阶段	
海上风电	9	商业化阶段	9	商业化阶段	0.09(固定式);0.16(漂浮式)
潮汐能发电	6~9	预商业化-商业化阶段	9	商业化阶段	0.20~0.45
潮流能发电	3~8	原型-商业化阶段	7~8	预商业化阶段	0.20~0.45
波浪能发电	1~8	研究-预商业化阶段	1~6	研究-工程示范阶段	0.30~0.55
水上光伏	4~6	工程示范阶段	3~6	研究-工程示范阶段	0.35
温差能发电	5~9	工程示范-商业化阶段	4~5	工程示范阶段	0.20~0.67
盐差能发电	1~6	研究-原型阶段	1~3	研究阶段	0.11~2.37

注:国际数据来源于文献[18],国内数据来源于文献[29],LCOE数据来源于文献[33]。

2025年4月

为0.19~0.36 \$/kWh^[34],较国外略低。尽管温差能可提供稳定的能源生产,但高LCOE限制了其发电应用。考虑到经济成本和技术成熟度,下一步应通过规模效应继续降低海上风电、潮流能和波浪能发电LCOE,通过技术进步降低海上光伏、温差能发电和盐差能发电LCOE。

3.3 装机容量

得益于技术成熟度最高,所有海上可再生能源中海上风电装机容量最大,且过去10年增长迅速。2013—2020年欧洲装机容量占主导,但2020年之后中国海上风电装机容量迅速增加,2022年与欧洲一同超过 3×10^4 MW。海上漂浮式光伏装机容量(不考虑滩涂光伏)小且发展十分缓慢,2014年首次在马尔代夫部署15 kW,2018年和2021又分别在荷兰和新加坡部署了50 kW和5 MW。2022年中国山东500 kW漂浮式海上光伏项目与海上风电连接,成为全球首个深远海风光同场漂浮式光伏项目。目前,海上漂浮式光伏项目仍在实验和探索阶段,尚未出现可推广的成熟案例。

截至2022年,全球海洋能装机容量超500 MW,远远落后于海上风电,且近10年发展缓慢。其中,潮汐能装机占海洋能总装机容量的88%,包括韩国始华湖潮汐电站、法国朗斯潮汐电站和中国江夏潮汐电站。除潮汐能外其他海洋能都无大阵列(10~100 MW)部署,潮流能有小阵列(2~10 MW)部署。区域上,欧洲海洋能装机占比稳定在47%~49%,在世界海洋能发展中占主导,受资源潜力和技术条件影响,中国所占份额很低,如中国潮流能发电技术水平与国际接近,但由于海域潮流流速总体较小,导致潮流能发电装机容量小且增长缓慢^[35]。但波浪能、潮流能和温差能利用技术近几年仍有明显进步,2022年世界最大单机容量1.6 MW潮流能发电机组“奋进号”实现并网;2023年部署世界首个兆瓦级漂浮式波浪能发电装置“南鲲号”;同年,中国船舶集团自主研发的50 kW海洋温差能发电系统完成陆试,广州海洋地质调查局牵头研发的20 kW海洋漂浮式温差能发电装置在南海成功完成海试。

4 产业维度

4.1 开发模式及方式

当前海上能源开发以单一开发提供绿色电力

为主,且面临与其他海洋产业竞争空间、成本较高、具有波动性和间歇性等问题,需通过多能互补和能产融合的海上可再生能源多用途开发解决。

(1)多能互补。解决波动性和间歇性需考虑能源间的互补性^[36]。多能互补作为一种创新的能源开发模式,根据海洋环境的特点同时开发和利用多种能源,形成海上综合能源系统或岛屿微电网,可增加能源生产和平滑功率输出^[37],提高能源系统输出的可靠性,实现资源的高效利用并降低成本。例如,风力发电和波浪能发电可弥补夜晚无太阳辐射和冬季太阳辐射较弱导致的光伏功率输出不足问题。此外,风能和波浪能互补可显著减少无电力输出时间^[38]和增加电力输出稳定性^[39]。经济上,风波阵列同场分布成本低于单项技术成本^[40,41]。

(2)能产融合。围绕海上可再生能源发展海洋产业,发挥其在协同开发中的基础性作用^[42],实现能产跨界融合是探索海洋产业发展和繁荣海洋经济的新模式。以海上能源为中心,通过共享空间资源或基础设施融合不同海洋产业实现海洋资源的绿色、高效和综合开发,提高单位面积海域经济价值产出、共摊运维成本。能产融合模式包括海上可再生能源与电力制氢(能氢)、油气开发(能油)、海水淡化(能淡)、海洋牧场(能渔)、旅游休闲(能旅)、海洋观测(能观)等6种融合场景。其中,能氢和能油融合可实现绿氢和油气等能量的绿色生产,能淡融合和能渔融合实现淡水和渔获等物质的绿色生产,能旅融合和能观融合实现文化科学价值的有效产出。

基于多能互补和能产融合两种开发模式可形成空间融合、结构融合和能源岛3种融合开发方式^[43](图3)。

(1)空间融合可较好解决单一开发导致的海上资源利用不充分、能源输出不连续稳定以及海上能源供电与产业用能空间不匹配问题。空间融合中各设施相对独立存在,可分为独立式和组合式,分别在发电场相邻空间和内部空间实现融合。独立式空间融合可解决规划与自然条件(如水深)等因子不匹配导致的空间限制,空间受限小,但融合程度低。而组合式分布可充分利用内部空间,具有阴影效应,有利于降低内部结构载荷,扩大运营维护天气窗口^[44],例如通过在风力涡轮机之间的闲置空

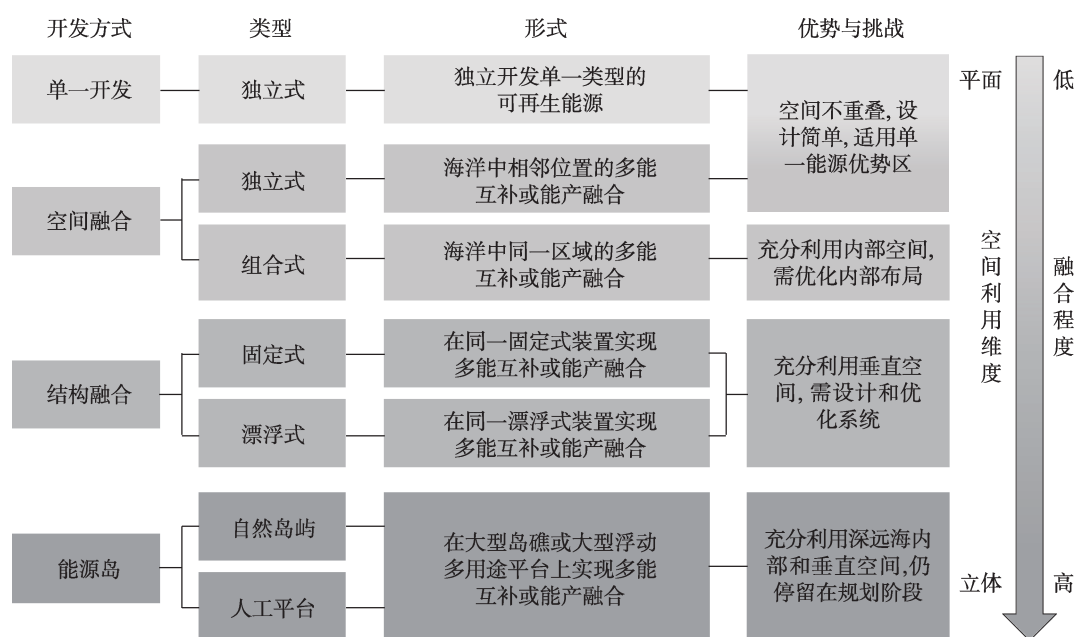


图3 海上可再生能源开发方式总结

Figure 3 Summary of development approaches for offshore renewable energy

间部署海上光伏的组合式分布。

(2)结构融合作为海上立体开发模式,可利用空间融合中尚未充分利用的海洋立体空间,进一步共享支撑结构和系泊系统,并增加单位海域发电量,减少运营维护成本,例如借助海上平台实现水上发电水下养殖的能产融合发展,因此对自然条件要求更高。离岸距离与水深是影响能源开发方式的两个重要因素,其中,离岸距离主要影响运输成本和电力传输成本,水深则影响离岸支撑技术和多用途应用融合潜力。较浅水域产业融合的潜力最大,多种产业类型都在0~100 m深度重叠。随着深度逐渐增加,合作潜力逐渐减小^[45]。

(3)能源岛最早作为海上风电的变流、传输和转化枢纽的概念被提出,后来发展为多种海上能源与产业融合的大型多用途平台^[46],如《山东省能源绿色低碳高质量发展三年行动计划(2023—2025年)》提出,探索打造海上风光能源、氢能、海洋牧场等多种能源、资源集成的海上能源岛,有利于开发远海可再生能源并增加多种能源和经济产品产出。相比于前两种方式,能源岛可有效解决离岸距离和水深增加导致的发展受限问题,如大容量深远海风电可在短距离通过低成本的交流电上岛汇流中转,再以适宜长距离的高压或特高压直流电形式上岸并

网,最大程度减少通过高压交流电远距离大容量输电带来的巨大成本^[47]。但能源岛发展面临初期投资成本高、建设工程复杂等问题,目前仍处于设计阶段。

首先,海上可再生能源开发短期内仍将以单一开发为主导,应积极寻求技术层面的突破。其次,相比单一开发而言,空间融合需有先进的电力管理系统;未来在光伏、波浪能发电等具体技术成熟后,将逐渐过渡到以空间融合方式为主。在此基础上,组合式空间融合对内部布局还有进一步的优化要求;因此,未来应加强内部载荷、功率输出和经济性优化研究,确保不同能源形式或产业活动在同一区域内的协调运行。再次,结构融合增加了结构设计的复杂性,对相关装备技术的综合集成化提出了更高的要求,当前仍然集中在大型平台的设计和模拟研究阶段;应加快设计多用途装备技术,注重模块化设计以简化结构融合的复杂性。随着海上可再生能源技术和海洋装备技术的发展成熟,结构融合方式比重将逐渐增加。最后,随着未来中长期装机容量增大和能产融合发展,将为能源岛发展提供巨大需求和机会。

4.2 产业融合场景

4.2.1 多能互补场景

通过参考多方资料并进行汇总统计,截至2023

2025年4月

年底,国内外多能互补技术皆以海上风电、光伏发电和波浪能发电3种为主。

国外共有46项多能互补应用,67%涉及海上风电。从组合类型看,风电-波浪能发电(风波)组合最多,已有多个概念、原型或实证项目被提出,其中固定式包括WaveStar, Wave Treader和WEGA等,漂浮式包括OWWE, W2Power和Poseidon等;其次是风电-光伏(风光),应用多以美国、加拿大等海洋观测设备为主;再次是光伏-波浪能发电(光-波)组合,包括观测浮标、波浪能滑翔器和Eco Wave Power公司的波浪能发电装置。3种组合皆以结构融合为主。

中国有23项海上多能互补应用,主要以光伏、波浪能发电和海上风电3种单项技术为主,且风电应用在近几年才开始增多。从组合类型看,光-波组合最多,包括中国科学院广州能源研究所研制的、安装了60 W波浪能发电装置和30 W光伏板、可实现原位供电观测的海洋观测浮标“海聆”号和漂浮式波浪能发电装置“万山号”。其次是风光组合,包括全球首个漂浮式风光渔融合项目“国能共享号”和全球首个投用的深远海风光同场项目(山东海上风电场风光互补实证项目)。最后是风波组合,未来还应通过风波协同优化控制策略增加能源产出^[48]。

除3种主要技术外,国外潮流能发电与风电等都有少量组合,中国潮流能发电的多能互补仍处于研究阶段,但潮汐能发电与光伏发电互补已有应用,例如中国国家能源集团龙源浙江温岭潮光互补型智能光伏电站于2022年实现全容量并网发电,实现江夏潮汐试验电站发电与库区之上光伏发电在空间上的互补。未来还可发展3种以上海上可再生能源融合,目前多种海上可再生能源互补集中在研

发和测试阶段,包括基于单桩式风能-波浪能-潮流能集成发电系统和集成4种可再生能源(风光波潮)的Hexifloat平台、“PH4S”平台等。

4.2.2 能产融合场景

截至2023年底,国外能产融合场景类型共18种,总数达到84例;中国能产融合类型共15种,总数达到72例;国内外差异总体不大。海上风电、光伏发电和波浪能发电是与产业结合最多的3种能源。其中,海上风电应用的场景种类最多,六大海洋产业都可与海上风电结合;海上光伏应用的场景数量最多,尤以与海洋观测融合为主。此外,温差能和潮流能也有部分应用。尽管能产融合类型众多,但不同海上能源具有不同的产业适宜性(表2)。

①能氢融合和能油融合以海上风电为主导,且多在空间上融合。其中,能氢融合代表应用包括2023年的法国Sealhyfe制氢项目(首次离岸制氢)和同年中国福建兴化湾海上风电场制氢项目(首次无淡化海水原位直接电解制氢);能油融合代表应用包括2023年海上浮式风电场Hywind Tampen和同年中国将绿电并入海南文昌油田群电网的“海油观澜号”。

②波浪能制淡成本最低^[49],也是海上能淡融合应用最多的能源,代表装置有Wave2O。

③能渔融合以海上风电为主,通过将养殖网箱筏架等固定在风机基础实现,代表应用包括阳江青洲四海上风电场MyAC-JS05装备。

④国外海上风电场可吸引人们进行参观和垂钓等活动^[50];国内则通过将光伏与波浪能与海上休闲平台耦合实现。

⑤海洋观测系统通常所需电力较小,一般在毫瓦级别~小额千瓦级别,小型光伏适用于海洋观测,因此能观融合以光伏为主。

未来,中国需开展风电制氢与油气深远海供

表2 能产融合场景主导能源及开发方式

Table 2 Dominant energy sources and development approaches in energy-industry integration scenarios

融合场景	国外		国内	
	主导能源	开发方式	主导能源	开发方式
能氢融合	风能	空间融合	风能	空间融合
能油融合	风能	空间融合	风能	空间融合
能淡融合	波浪能	结构融合	波浪能	结构融合
能渔融合	风能	空间融合	风能	结构融合
能旅融合	风能	空间融合	太阳能、波浪能	结构融合
能观融合	太阳能	结构融合	太阳能	结构融合

电,加快形成风电、海上氢能与油气田互补供能模式。同时,将深远海养殖^[51]与深远海风电开发结合,除使用风机基础外,还可使用以其他海上能源供给的多功能平台构建绿色海洋牧场,如“澎湖号”。此外,还可将海洋观测、海上旅游与能渔融合结合,如生态海洋牧场综合体平台“耕海1号”。对于岛屿生存发展而言,可通过波浪能制淡为岛屿供给淡水,解决岛屿淡水资源匮乏问题。由于光伏系统在冬季、夜晚等时间和高纬度、深海等地点无法提供持续稳定的输出,而小型海洋能设备相比风机和光伏设备有更低的维护需求^[52],且可在原位为海洋观测仪器提供动力^[53,54],因此,应积极发展深远海海洋观测海上可再生能源特别是海洋能补给技术^[55]。由于氢气生产、油气开发、海水制淡和渔业养殖多以化石燃料为能量来源,与可再生能源结合存在经济成本较高问题,需要通过技术创新解决绿色发展与经济成本权衡矛盾。

5 空间维度

海洋资源要素空间分布独特,能源资源的开发供给、人类生产生活的能源需求和管理端的优化决策,通过具体的空间部署共同影响物质流、能量流和价值流的空间流动方式,进而塑造不同区域间的分布与流动规律^[56]。①为实现能源供给,海上能源基础设施需要大量的材料供应。例如,风机中含有大量的钢、铝等常见材料和小部分的稀土等关键材料,这些材料在采集、运输、制造等全生命周期均会

形成复杂的物质流动模式,并受空间布局影响,海上风电深远海发展趋势通过改变风机基础和输电方式引起材料消耗种类和数量的改变。②海上可再生能源的能量流主要体现为将自然资源(如太阳能、风能、波浪能)转化为电能,通过海底电缆输送到陆地电网或直接供给海上设施进行生产或制氢,期间通过主体的空间选址和优化实现能源跨时空调配。③价值流反映了从资源开发、生产到最终能源消费的整个价值链中的增值过程,包括经济和文化旅游价值。通过将能源与产业融合可实现海上可再生能源开发产业链和价值链的延长,再通过利益主体的优化决策实现价值在空间上的重新分配(图4)。

由于需要在同一个地理空间或不同地理空间中实现单一开发、多能互补和能产融合,空间选址与优化评估成为影响开发部署和3种流动分布的重要方式。空间评估主要集中在二维平面上单一开发的空间选址与优化:①空间选址是空间优化的基础,海上可再生能源供给会受到资源数量和分布、水深、离岸距离等多种资源环境因素的影响,选址指标包括潜力评估、技术条件和空间规划等研究内容。学者们结合地理信息技术进行了海上风电^[57-60]、海上光伏^[20,61]、风波互补^[62,63]的空间选址适宜性评估。②空间优化是在空间选址基础上对技术选择和内部布局的完善,优化内容为能量流中的发电量最大和价值流中的经济成本最小。当前优化

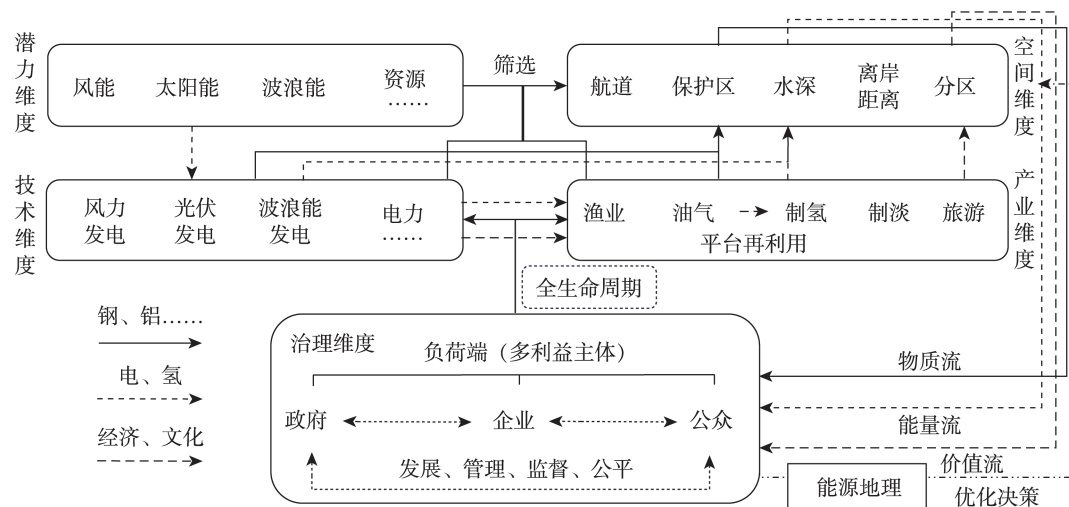


图4 基于五维的海上可再生能源开发利用物质流、能量流、价值流空间流动

Figure 4 Spatial flows of material, energy, and value in development and utilization of offshore renewable energy from a five-dimensional perspective

2025年4月

对象集中在海上单一能源,如风电^[64-66]、波浪能发电^[67]和潮流能发电^[68],如同一区域内水轮机横向间距减小,纵向间距增加时,可以提取更多的能量。少部分研究考虑了多能互补及能产融合的空间优化,如海上风电和波浪能发电^[69]、海上风电和光伏^[70]、海上风电和制氢^[71,72],从最小化成本的经济价值角度确定了最优空间布局,支持了多能互补平面部署。尽管如此,选址和优化依然存在诸多不足:一方面,研究对象中鲜有涉及海上可再生能源开发利用中的能产融合平面空间选址与优化;另一方面,物质流、能量流和价值流的模拟与优化研究不足,部分研究开展了海上风电的物质流空间模拟及预测^[73-75],但并未涉及空间优化(如使物质消耗最小)。而发电量最大和经济成本最小只是能量流和价值流的部分内容,还有待于对能量流和价值流进行完整的模拟以探求流动机制。

海域是包括水上、水面、水体、海床在内的三维立体空间,立体开发符合海上可再生能源向深海综合利用的趋势。因此,除平面空间外还需考虑三维立体空间。较多研究从功能兼容性出发评价区域海域立体分层利用的可行性,并未涉及海上可再生能源。国外侧重于研究通过海上能源结构融合技术开展立体利用,海上多功能平台作为结构融合的代表,在欧洲 ORECCA、MARINA、Space@Sea 等研究项目中进行了不同技术类型探讨,但由于技术未成熟,导致空间部署研究不足。国内已提出海上风电、光伏项目与养殖、核电温排水用海进行立体利用的实践,未来还需尽快针对“海洋风电+养殖”“海上光伏+养殖”等立体利用开展选址和优化评估,选出优先发展区域^[76,77]。多元利用形式和深远海发展趋势会导致更复杂的空间流动,因此,未来研究应重点关注物质流、能量流和价值流在空间中的动态模拟与优化,研究多种资源组合的空间功能、结构适宜性以优化能源系统的选址和部署策略,从而实现资源利用效率的最大化和环境影响的最小化。

6 治理维度

6.1 开发影响评估

海上可再生能源开发的生态影响和环境影响较复杂。

生态影响分为正面影响和负面影响。正面生

态影响主要为,海上风机可作为人工藻礁、鱼礁,实现资源养护、环境修复的功能^[78]。负面生态影响包括噪声污染、生物碰撞和电磁场效应等。目前研究多集中在海上风电,如风机会造成鸟类飞行路线调整、撞击死亡率增加和栖息地分布减少。对于波浪能发电、潮流能发电等海洋能源技术,尽管设备噪声不太可能对海洋动物造成声学损伤,也并未较多观察到水下生物碰撞发生,但由于水下监测困难且设备有限,建立水下噪声、海底电缆设施与动物行为之间的联系具有挑战性^[79]。因此,海上可再生能源开发引起的生态风险及生态系统服务影响仍存在显著不确定性^[80],未来仍有待加强监测与建模研究。

环境影响可通过环境影响评价、ISO14040 系列标准定义的生命周期评价和投入产出模型开展评估,目前已确定的是海上可再生能源在减少碳足迹方面效果显著,相比传统能源每度电可显著减少一个数量级的 CO₂ 排放^[81],并且海上风电相比陆上风电碳排放更小^[82]。海上风电与海上养殖特别是海洋牧场融合有助于实现减少能源碳排和增加渔业碳汇的双重效益^[83]。此外,海上可再生能源开发还可显著减少 PM10、臭氧破坏、富营养化等空气和水体污染物的排放。

此外,海上可再生能源开发对金属矿产资源和关键材料消耗大^[84,85],海上风机每单位发电能力的金属需求量是传统火电厂的 7~13 倍^[86]。随着矿产资源需求的不断增加,必须对地区乃至全球供应链的可持续性供给进行全面评估,深化金属-能源关联研究^[87],从材料供应风险等角度深入衡量海上可再生能源开发的社会经济影响;同时,分析矿产资源的开采对环境的潜在影响。鉴于材料在全球范围内的有限供应和开采环境成本,未来还应重点探讨退役器件的回收循环利用技术,并延长器件使用寿命^[88]。

由于海洋资源环境具有动态性、立体性和开放性,识别不同海域资源环境特点下能够支持的可再生能源类型及数量,分析多能互补、能产融合等多种产业压力的时空耦合效应及环境响应,对保障海洋生态环境的长期稳定性和可持续性具有重要意义。当前海洋资源环境承载力已从传统的水产资

源承载能力、海岛承载能力评估等扩展到综合承载能力评估^[89,90],但对海上可再生能源关注相对较少。未来研究应深入开展海上可再生能源开发利用的综合承载力评估,重点关注能源开发对产业布局、资源利用效率及生态环境的综合影响,评估结果将丰富人文-经济地理学中对人地关系的理解^[91,92],也可为能源转型下人海关系的协调发展提供科学依据。

6.2 利益主体协调

海上能源开发不仅涉及对内的规划和管理,还包括国家对外的领海主权利益维护。首要任务是基于历史和现代国际法原则,明确海洋主权,以确保在开发过程中国家权利的正当性。海上可再生能源开发利用将对海洋空间的规划和管理提出巨大挑战,需通过考虑各方利益提出可持续海洋活动解决方案^[93],发挥政府的激励约束作用和公众的监督作用。由政府 and 公众等多个利益主体参与编制的海洋空间规划应有综合性和战略性,并可灵活动态调整以适应未来需求,是解决空间冲突与促进海洋活动有序协调和生态环境可持续的重要方式^[79,94]。

政府将激励和约束机制贯穿能源开发治理全生命周期管理中,涵盖开发前政策引导、开发过程监管以及后期废弃物处理等关键环节。①当前国内仅海上风电和光伏与产业融合得到政策支持和法律保障,如2022年电力装备绿色低碳创新发展行动计划根据3种不同区位条件提出发展多种“海上风电+”的组合类型;2023年中国国家能源局发布了《加快油气勘探开发与新能源融合发展行动方案(2023~2025年)》;2024年4月,首个国家级海上光伏用海政策《自然资源要素支撑产业高质量发展指导目录(2024年本)》发布,提出将支持4类多用途光伏用海开发方式,但并未具体涉及其他海上可再生能源。未来应通过《中华人民共和国可再生能源法》等政策法规规范开发活动并简化许可程序^[95],例如将海上可再生能源设备部署在现有海洋牧场内可简化政府审批流程。②由于空间用途和产权管理维度由二维开始向三维转变,而三维立体利用同样离不开清晰的产权界定。自然资源部和浙江省自然资源厅出台政策鼓励立体式开发,推进海域使

用权立体分层设权以集约节约利用海洋资源。未来应结合用海需求,通过地理信息技术探索划定海洋功能平面及立体分区,明确各分区基本功能和使用权属关系,实现海上空间和资源的有效规划和利用。③海上可再生能源开发会引发巨大的物质流动,并且末期将产生巨大的废弃物,据估算到2060年中国海上风电场累计物质流出量可达到6.5~48.0 Mt^[74]。当前叶片及风电固废回收办法不能满足大量回收需求,应规范再利用和废弃材料尤其是关键材料和稀缺材料的处置,可参考海上油气平台退役后改造为多功能平台的案例,如海上制氢平台(荷兰PosHYdon海上绿氢试点项目)。

能源治理离不开公众参与。据国外研究,海上风电导致的视觉影响可能会带来绿色能源价值与沿海休闲娱乐价值的权衡。海滨区域用户愿意支付更多费用使海上风电场远离海岸^[96],并且海上风电场会显著改变游客出行行为,从而对当地经济产生负面影响^[97],但这种评估也会受到主体背景影响。与沿岸观光旅游不同,公众对在海上风电场区域进行海上休闲旅游态度具有较大不确定性。同样对于美国第一座海上风电场Block Island Wind Farm, Dalton等^[98]的研究表明,在拥有海上风电场的地区,休闲船舶体验的价值大大降低;而Smythe等^[99]则认为在可达的条件下,海上风电场可吸引人们前往海上进行海钓等休闲活动,但也谨慎地表明这种兴趣可能是短暂的。总体来说,在对待海上能源特别是海上风电与旅游休闲结合的问题上,公众态度表现出复杂性,其中对沿岸观光旅游影响以负面影响为主,对海上休闲旅游则具有较大的不确定性。国内应用中,福建一海上风电项目为适应当地景观和妈祖文化习俗曾经历数次重大调整,并导致了较大的调整成本。旅游休闲涉及公众体验与利益,提高公众对海上风电等海上能源规划的参与度可减少此负面影响^[100],但二者的结合机制仍有待于进一步研究,并从海上风电扩展到其他海上能源。

7 结语与展望

7.1 结语

本文基于能源地理学构建五维体系,系统分析海上可再生能源开发利用研究的现状与挑战,不仅有助于能源地理学学科内容向海洋空间的拓展延

2025年4月

伸,更为实现蓝色经济的高质量发展和多个可持续发展目标协同提供了科学框架。综述发现,海上可再生能源潜力大且种类繁多,但技术成熟度普遍较低,海上风电技术最成熟并在开发中占据主导地位,而波浪能、温差能等其他海洋能技术受限于经济性和技术可靠性尚未实现规模化开发,导致产业开发仍以单一风电开发为主。多能互补和能产融合可实现多元化利用方式和场景,有助于实现多种资源的融合开发,但需依赖技术进步、空间选址优化及生态环境影响评估和法律政策支持。现有研究在多尺度开发潜力、平面开发选址优化和开发环境影响等方面取得进展,但在潜力评估标准统一性、立体空间利用优化、开发生态影响等方面存在明显不足。现行政策体系尚不完善,开发利用支持及全生命周期管理亟待加强。这些局限表明,当前海上可再生能源的开发利用与研究仍处于发展初期,海上可再生能源的发展水平与实际需求仍存在显著差距。

7.2 展望

未来海上可再生能源开发利用需构建覆盖开发-利用-研究-治理的全链条创新体系,突破技术、产业、管理和跨学科研究的多重瓶颈。

(1)在开发上,首先应通过技术改进和创新、规模效应推动多种技术协调发展,重点突破深远海抗台风风机、高效波浪能转换装置等关键技术,并依托国家海洋综合试验场开展海试工作。

(2)在利用上,发展多能互补和能产融合,推动从单一能源生产向“电-氢-渔-旅”多元价值创造的转型,通过模块化等创新设计降低融合开发成本。

(3)在研究上,建立统一潜力评估标准和开展基于人工智能技术的短时动态评估预测以提升评估结果的实际应用价值;开发基于数字孪生的用海优化系统,模拟与优化物质流、能量流和价值流的空间配置,提高资源利用效率;加强海洋生物与环境观测,利用大数据和建模揭示海洋生物与海上可再生能源开发的互馈机制,促进资源开发与生态保护的平衡。

(4)在治理上,吸纳更多公众参与海上能源规划,借鉴陆地三维地籍管理经验推动海洋三维立体产权管理,制定平台再利用和风机叶片等物质回收

管理办法,构建全生命周期的能源治理框架。建议加强国际合作与跨学科协同,助力蓝色经济高质量发展。

参考文献(References):

- [1] Lee K-H, Noh J, Khim J S. The Blue Economy and the United Nations' sustainable development goals: Challenges and opportunities[J]. *Environment International*, 2020, DOI: 10.1016/j.envint.2020.105528.
- [2] Tong D, Farnham D J, Duan L, et al. Geophysical constraints on the reliability of solar and wind power worldwide[J]. *Nature Communications*, 2021, DOI: 10.1038/s41467-021-26355-z.
- [3] Guyot-Téphany J, Trouillet B, Diederichsen S, et al. Two decades of research on ocean multi-use: Achievements, challenges and the need for transdisciplinarity[J]. *NPJ Ocean Sustainability*, 2024, DOI: 10.1038/s44183-024-00043-z.
- [4] Aresti L, Christodoulides P, Michailides C, et al. Reviewing the energy, environment, and economy prospects of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) systems[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, DOI: 10.1016/j.seta.2023.103459.
- [5] Li M, Luo H J, Zhou S J, et al. State-of-the-art review of the flexibility and feasibility of emerging offshore and coastal ocean energy technologies in East and Southeast Asia[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, DOI: 10.1016/j.rser.2022.112404.
- [6] 李志川, 高敏, 齐磊, 等. 漂浮式风电开发技术研究综述[J]. *船舶工程*, 2023, 45(10): 153-160, 165. [Li Z C, Gao M, Qi L, et al. Review of floating wind power development technology research [J]. *Ship Engineering*, 2023, 45(10): 153-160, 165.]
- [7] Hu H K, Xue W D, Jiang P, et al. Bibliometric analysis for ocean renewable energy: An comprehensive review for hotspots, frontiers, and emerging trends[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, DOI: 10.1016/j.rser.2022.112739.
- [8] Caballero M D, Gunda T, McDonald Y J. Energy justice & coastal communities: The case for Meaningful Marine Renewable Energy Development[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, DOI: 10.1016/j.rser.2023.113491.
- [9] 傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策[J]. *地理学报*, 2017, 72(11): 1923-1932. [Fu B J. Geography: From knowledge, science to decision making support[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 1923-1932.]
- [10] 樊杰. “人地关系地域系统”是综合研究地理格局形成与演变规律的理论基石[J]. *地理学报*, 2018, 73(4): 597-607. [Fan J. “Territorial System of Human-environment Interaction”: A theoretical cornerstone for comprehensive research on formation and evolution of the geographical pattern[J]. *Acta Geographica Sinica*,

- 2018, 73(4): 597–607.]
- [11] 李小云, 杨宇, 刘毅. 中国人地关系演进及其资源环境基础研究进展[J]. 地理学报, 2016, 71(12): 2067–2088. [Liu X Y, Yang Y, Liu Y. Research progress in man-land relationship evolution and its resource-environment base in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2067–2088.]
- [12] Bridge G, Barr S, Bouzarovski S, et al. *Energy and Society: A Critical Perspective*[M]. London: Taylor and Francis, 2018.
- [13] 杨宇, 郭越, 樊杰, 等. 能源地理研究的发展与展望[J]. 地理学报, 2024, 79(1): 147–170. [Yang Y, Guo Y, Fan J, et al. The development and prospects of the study of energy geographies[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(1): 147–170.]
- [14] 沈镭. 面向碳中和的中国自然资源安全保障与实现策略[J]. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3037–3048. [Shen L. Study on security guarantee and implementation strategy of China's natural resources towards carbon neutrality[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(12): 3037–3048.]
- [15] 成升魁, 沈镭, 封志明, 等. 中国自然资源研究的发展历程及展望[J]. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1757–1772. [Cheng S K, Shen L, Feng Z M, et al. The development history and prospect of natural resources research in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(8): 1757–1772.]
- [16] Asdrubali F, Baldinelli G, D'Alessandro F, et al. Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 1113–1122.
- [17] IRENA. *Innovation Outlook: Ocean Energy Technologies*[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020.
- [18] IEA. *Ocean Energy in Islands and Remote Coastal Areas: Opportunities and Challenges*[R]. Paris: International Energy Agency, 2020.
- [19] IEA. *Offshore Wind Outlook 2019*[R]. Paris: International Energy Agency, 2019.
- [20] Silalahi D F, Blakers A. Global atlas of marine floating solar PV potential[J]. *Solar*, 2023, 3(3): 416–433.
- [21] Shao Z X, Gao H J, Liang B C, et al. Potential, trend and economic assessments of global wave power[J]. *Renewable Energy*, 2022, 195: 1087–1102.
- [22] 周荣卫, 何晓凤, 朱蓉, 等. 中国近海风能资源开发潜力数值模拟[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1434–1443. [Zhou R W, He X F, Zhu R, et al. Numerical simulation of the development potential of wind energy resources over China's offshore areas[J]. *Resources Science*, 2010, 32(8): 1434–1443.]
- [23] 郑崇伟, 贾本凯, 郭随平, 等. 全球海域波浪能资源储量分析[J]. 资源科学, 2013, 35(8): 1611–1616. [Zheng C W, Jia B K, Guo S P, et al. Wave energy resource storage assessment in global ocean[J]. *Resources Science*, 2013, 35(8): 1611–1616.]
- [24] Arent D, Sullivan P, Heimiller D, et al. *Improved Offshore Wind Resource Assessment in Global Climate Stabilization Scenarios*[R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- [25] Lu X, McElroy M B, Kiviluoma J. Global potential for wind-generated electricity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(27): 10933–10938.
- [26] Wang J X, Chen L D, Tan Z F, et al. Inherent spatiotemporal uncertainty of renewable power in China[J]. *Nature Communications*, 2023, DOI: 10.1038/s41467-023-40670-7.
- [27] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. *Nature*, 2015, 525(7567): 47–55.
- [28] Kochkov D, Yuval J, Langmore I, et al. Neural general circulation models for weather and climate[J]. *Nature*, 2024, 632(8027): 1060–1066.
- [29] 郑洁, 杨淑涵, 柳存根, 等. 海洋可再生能源装备技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 22–32. [Zheng J, Yang S H, Liu C G, et al. Development of marine renewable energy equipment and technologies[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(3): 22–32.]
- [30] Segbefia O K, Imenes A G, Sætre T O. Moisture ingress in photovoltaic modules: A review[J]. *Solar Energy*, 2021, 224: 889–906.
- [31] 付强, 王国荣, 周守为, 等. 温差能与低温海水资源综合利用研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 52–60. [Fu Q, Wang G R, Zhou S W, et al. Comprehensive utilization of temperature difference energy and low-temperature seawater resources[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 52–60.]
- [32] Pillet A, Lehner B, Stark S, et al. Mapping out the scenarios of ocean energy scale-up based on the development of offshore wind[J]. *Open Research Europe*, 2023, DOI: 10.12688/openreseurope.15906.1.
- [33] IRENA. *Offshore Renewables: An Action Agenda for Deployment*[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021.
- [34] 刘伟民, 刘蕾, 陈风云, 等. 中国海洋可再生能源技术进展[J]. 科技导报, 2020, 38(14): 27–39. [Liu W M, Liu L, Chen F Y, et al. Technical progress of marine renewable energy in China[J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(14): 27–39.]
- [35] Si Y L, Liu X D, Wang T, et al. State-of-the-art review and future trends of development of tidal current energy converters in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, DOI: 10.1016/j.rser.2022.112720.
- [36] Monforti F, Huld T, Bódis K, et al. Assessing complementarity of wind and solar resources for energy production in Italy. A Monte Carlo approach[J]. *Renewable Energy*, 2014, 63: 576–586.
- [37] Costoya X, de Castro M, Carvalho D, et al. Assessing the complementarity of future hybrid wind and solar photovoltaic energy resources for North America[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, DOI: 10.1016/j.rser.2022.113101.
- [38] Gao Q, Khan S S, Sergiienko N, et al. Assessment of wind and

2025年4月

- wave power characteristic and potential for hybrid exploration in Australia[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, DOI: 10.1016/j.rser.2022.112747.
- [39] Christie D, Neill S P, Arnold P. Characterising the wave energy resource of Lanzarote, Canary Islands[J]. *Renewable Energy*, 2023, 206: 1198–1211.
- [40] Clark C E, Miller A, DuPont B. An analytical cost model for co-located floating wind-wave energy arrays[J]. *Renewable Energy*, 2019, 132: 885–897.
- [41] Ramos V, Giannini G, Calheiros-Cabral T, et al. Assessing the effectiveness of a novel wec concept as a co-located solution for offshore wind farms[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(2): 267–267.
- [42] 郭胜伟, 门秀杰, 张胜军, 等. 中国海洋能源产业发展现状及协同发展思路[J]. *中国海上油气*, 2024, 36(3): 230–239. [Guo S W, Men X J, Zhang S J, et al. Development status and synergetic development idea of China's marine energy industry[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2024, 36(3): 230–239.]
- [43] Pérez-Collazo C, Greaves D, Iglesias G. A review of combined wave and offshore wind energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 141–153.
- [44] Astariz S, Perez-Collazo C, Abanades J, et al. Co-located wind-wave farm synergies (Operation & Maintenance): A case study[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 91: 63–75.
- [45] van den Burg S W K, Aguilar-Manjarrez J, Jenness J, et al. Assessment of the geographical potential for co-use of marine space, based on operational boundaries for Blue Growth sectors[J]. *Marine Policy*, 2019, 100: 43–57.
- [46] Pérez-Collazo C, Astariz S, Abanades J, et al. Co-located wave and offshore wind farms: A preliminary case study of an hybrid array[J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 2014, 1(34): 1–10.
- [47] Jansen M, Duffy C, Green T C, et al. Island in the sea: The prospects and impacts of an offshore wind power hub in the North Sea[J]. *Advances in Applied Energy*, 2022, DOI: 10.1016/j.adapen.2022.100090.
- [48] Gonzalez H D, Bianchi F D, Dominguez-Garcia J L, et al. Co-located wind-wave farms: Optimal control and grid integration[J]. *Energy*, 2023, DOI: 10.1016/j.energy.2023.127176.
- [49] Alawad S M, Mansour R B, Al-Sulaiman F A, et al. Renewable energy systems for water desalination applications: A comprehensive review[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117035.
- [50] Bidwell D, Smythe T, Tyler G. Anglers' support for an offshore wind farm: Fishing effects or clean energy symbolism[J]. *Marine Policy*, 2023, DOI: 10.1016/j.marpol.2023.105568.
- [51] 侯娟, 周为峰, 王鲁民, 等. 中国深远海养殖潜力的空间分析[J]. *资源科学*, 2020, 42(7): 1325–1337. [Hou J, Zhou W F, Wang L M, et al. Spatial analysis of the potential of deep-sea aquaculture in China[J]. *Resources Science*, 2020, 42(7): 1325–1337.]
- [52] LiVecchi A, Jenne D, Preus R. Powering the Blue Economy: Exploring Opportunities for Marine Renewable Energy in Maritime Markets[R]. Washington, D.C: U.S. Department of Energy, 2019.
- [53] Jung H, Subban C V, McTigue J D, et al. Extracting energy from ocean thermal and salinity gradients to power unmanned underwater vehicles: State of the art, current limitations, and future outlook[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, DOI: 10.1016/j.rser.2022.112283.
- [54] Wang G H, Yang Y N, Wang S X. Ocean thermal energy application technologies for unmanned underwater vehicles: A comprehensive review[J]. *Applied Energy*, 2020, DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115752.
- [55] 王军成, 孙继昌, 刘岩, 等. 我国海洋监测仪器装备发展分析及展望[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(3): 42–52. [Wang J C, Sun J C, Liu Y, et al. Research progress and prospect of marine monitoring instruments and equipment in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(3): 42–52.]
- [56] 蔡国田, 李沛, 赵黛青. 中国能源战略研究的经济地理学视角探讨[J]. *世界地理研究*, 2018, 27(1): 94–103. [Cai G T, Li P, Zhao D Q. China's energy strategy research: From the perspective of economic geography[J]. *World Regional Studies*, 2018, 27(1): 94–103.]
- [57] Castro-Santos L, Lamas-Galdo M I, Filgueira-Vizoso A. Managing the oceans: Site selection of a floating offshore wind farm based on GIS spatial analysis[J]. *Marine Policy*, 2020, DOI: 10.1016/j.marpol.2019.103803.
- [58] Gao J W, Guo F J, Ma Z Y, et al. Multi-criteria group decision-making framework for offshore wind farm site selection based on the intuitionistic linguistic aggregation operators[J]. *Energy*, 2020, DOI: 10.1016/j.energy.2020.117899.
- [59] Díaz H, Guedes Soares C. An integrated GIS approach for site selection of floating offshore wind farms in the Atlantic continental European coastline[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, DOI: 10.1016/j.rser.2020.110328.
- [60] Gil-García I C, Ramos-Escudero A, Molina-García Á, et al. GIS-based MCDM dual optimization approach for territorial-scale offshore wind power plants[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139484.
- [61] 邵萌, 伊传秀, 陈玉静, 等. 海南省波浪能开发智能化适宜性分析模型研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(6): 165–178. [Shao M, Yi C X, Chen Y J, et al. Research on intelligent model for suitability analysis of wave energy development in Hainan Province[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2024, 54(6): 165–178.]
- [62] Vasileiou M, Loukogeorgaki E, Vagiona D G. GIS-based multi-criteria

- teria decision analysis for site selection of hybrid offshore wind and wave energy systems in Greece[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 73: 745–757.
- [63] Zhou X, Huang Z, Wang H, et al. Site selection for hybrid offshore wind and wave power plants using a four-stage framework: A case study in Hainan, China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2022, DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106035.
- [64] Ziyaci P, Khorasanchi M, Sayyaadi H, et al. Minimizing the levelized cost of energy in an offshore wind farm with non-homogeneous turbines through layout optimization[J]. *Ocean Engineering*, 2022, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110859.
- [65] Eikrem K S, Lorentzen R J, Faria R, et al. Offshore wind farm layout optimization using ensemble methods[J]. *Renewable Energy*, 2023, DOI: 10.1016/j.renene.2023.119061.
- [66] He F L, Wagner M, Zhang L J, et al. A novel integrated approach for offshore wind power optimization[J]. *Ocean Engineering*, 2022, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112827.
- [67] Shadmani A, Reza Nikoo M, Etri T, et al. A multi-objective approach for location and layout optimization of wave energy converters[J]. *Applied Energy*, 2023, DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121397.
- [68] Zhang C, Zhang J S, Tong L L, et al. Investigation of array layout of tidal stream turbines on energy extraction efficiency[J]. *Ocean Engineering*, 2020, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106775.
- [69] Astariz S, Perez-Collazo C, Abanades J, et al. Co-located wave-wind farms: Economic assessment as a function of layout[J]. *Renewable Energy*, 2015, 83: 837–849.
- [70] Jiang H, Yao L, Zhou C. Assessment of offshore wind-solar energy potentials and spatial layout optimization in China's mainland[J]. *Ocean Engineering*, 2023, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115914.
- [71] Song S J, Lin H Y, Sherman P, et al. Production of hydrogen from offshore wind in China and cost-competitive supply to Japan[J]. *Nature Communications*, 2021, DOI: 10.1038/s41467-021-27214-7.
- [72] Zhou Z, Cai G T, Huang Y P, et al. Spatial and temporal evolution of cost-competitive offshore hydrogen in China: A techno-economic analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, DOI: 10.1016/j.rser.2024.114780.
- [73] Chen Y S, Cai G T, Zheng L X, et al. Modeling waste generation and end-of-life management of wind power development in Guangdong, China until 2050[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105533.
- [74] Chen Y S, Cai G T, Bai R X, et al. Spatiotemporally explicit pathway and material-energy-emission nexus of offshore wind energy development in China up to the year 2060[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106349.
- [75] Demuytere C, Vanderveken I, Thomassen G, et al. Prospective material flow analysis of the end-of-life decommissioning: Case study of a North Sea offshore wind farm[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107283.
- [76] 李彦平, 陈逸洋, 刘大海, 等. 海域立体分层利用的空间冲突及管理: 基于时空行为视角[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(10): 2475–2489. [Li Y P, Chen Y Y, Liu D H, et al. Spatial conflict and management of three-dimensional and layered utilization of sea areas: Based on the perspective of spatio-temporal behavior[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(10): 2475–2489.]
- [77] 李彦平, 刘大海, 陈逸洋, 等. 海域三维空间资源认知与立体化管理[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(1): 49–61. [Li Y P, Liu D H, Chen Y Y, et al. Cognition and three-dimensional management of three-dimensional spatial resources in sea areas[J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(1): 49–61.]
- [78] 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 H S, Ru X S, Zhang L B, 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.]
- [79] Copping A E, Hemery L G. OES-Environmental 2020 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World. Report for Ocean Energy Systems (OES)[R]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 2020.
- [80] Watson S C L, Somerfield P J, Lemasson A J, et al. The global impact of offshore wind farms on ecosystem services[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2024, DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2024.107023.
- [81] Dhanju A, Golmen L, Araghi P, et al. Other Marine-Based Energy Industries[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [82] 向宁, 王礼茂, 屈秋实, 等. 基于生命周期评估的海、陆风电系统排放对比[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 745–755. [Xiang N, Wang L M, Qu Q S, et al. Comparison of emissions from offshore and onshore wind power systems based on life cycle assessment[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 745–755.]
- [83] Maar M, Holbach A, Boderskov T, et al. Multi-use of offshore wind farms with low-trophic aquaculture can help achieve global sustainability goals[J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, DOI: 10.1038/s43247-023-01116-6.
- [84] Hertwich E G, Gibon T, Bouman E A, et al. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(20): 6277–6282.
- [85] Pennock S, Vanegas-Cantarero M M, Bloise-Thomaz T, et al. Life cycle assessment of a point-absorber wave energy array[J]. *Renewable Energy*, 2022, 190: 1078–1088.
- [86] IEA. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions[R].

2025年4月

- Paris: International Energy Agency, 2021.
- [87] 汪鹏, 王翹楚, 韩茹茹, 等. 全球关键金属-低碳能源关联研究综述及其启示[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 669-681. [Wang P, Wang Q C, Han R R, et al. Nexus between low-carbon energy and critical metals: Literature review and implications[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 669-681.]
- [88] Li C, Mogollón J M, Tukker A, et al. Future material requirements for global sustainable offshore wind energy development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, DOI: 10.1016/j.rser.2022.112603.
- [89] 杨正先, 张志锋, 韩建波, 等. 海洋资源环境承载力超载阈值确定方法探讨[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 313-319. [Yang Z X, Zhang Z F, Han J B, et al. Thresholds determination of marine resource and environmental carrying capacity[J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 313-319.]
- [90] 马仁锋, 季顺伟, 马静武, 等. 海域“双评价”的实践与应用: 以温州为例[J]. 经济地理, 2022, 42(1): 21-27. [Ma R F, Ji S W, Ma J W, et al. The practice and application of “Dual Evaluation” in marine areas: A case of Wenzhou[J]. Economic Geography, 2022, 42(1): 21-27.]
- [91] 樊杰, 周侃, 孙威, 等. 人文-经济地理学在生态文明建设中的学科价值与学术创新[J]. 地理科学进展, 2013, 32(2): 147-160. [Fan J, Zhou K, Sun W, et al. Scientific values and research innovations of human-economic geography in construction of ecological civilization[J]. Progress in Geography, 2013, 32(2): 147-160.]
- [92] 王亚飞, 樊杰. 资源环境承载力百年研究的系统综述[J]. 地理学报, 2023, 78(11): 2676-2693. [Wang Y F, Fan J. A systematic review of centenary studies on natural resources and environmental carrying capacity[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(11): 2676-2693.]
- [93] Cui Y, Zhao H D. Marine renewable energy project: The environmental implication and sustainable technology[J]. Ocean & Coastal Management, 2023, DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106415.
- [94] Spijkerboer R C, Zuidema C, Busscher T, et al. The performance of marine spatial planning in coordinating offshore wind energy with other sea-uses: The case of the Dutch North Sea[J]. Marine Policy, 2020, DOI: 10.1016/j.marpol.2020.103860.
- [95] Ramos V, Giannini G, Calheiros-Cabral T, et al. Legal framework of marine renewable energy: A review for the Atlantic region of Europe[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, DOI: 10.1016/j.rser.2020.110608.
- [96] Ladenburg J, Dubgaard A. Preferences of coastal zone user groups regarding the siting of offshore wind farms[J]. Ocean & Coastal Management, 2009, 52(5): 233-242.
- [97] Voltaire L, Loureiro M L, Knudsen C, et al. The impact of offshore wind farms on beach recreation demand: Policy intake from an economic study on the Catalan coast[J]. Marine Policy, 2017, 81: 116-123.
- [98] Dalton T, Weir M, Calianos A, et al. Recreational boaters' preferences for boating trips associated with offshore wind farms in US waters[J]. Marine Policy, 2020, DOI: 10.1016/j.marpol.2020.104216.
- [99] Smythe T, Bidwell D, Moore A, et al. Beyond the beach: Tradeoffs in tourism and recreation at the first offshore wind farm in the United States[J]. Energy Research & Social Science, 2020, DOI: 10.1016/j.erss.2020.101726.
- [100] Machado J T M, de Andrés M. Implications of offshore wind energy developments in coastal and maritime tourism and recreation areas: An analytical overview[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, DOI: 10.1016/j.eiar.2022.106999.

Review on development and utilization of offshore renewable energy: An analysis based on a five-dimensional framework

DU Wenjie^{1, 2, 3, 4}, CAI Guotian^{1, 2, 3, 4}, Qi Xiaoling^{1, 2, 3, 4}, WANG Peng^{1, 2, 3, 4}, ZHANG Jixiang^{2, 3, 4}

(1. School of Energy Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, CAS, Guangzhou 510640, China; 3. Key Laboratory of Renewable Energy, CAS,

Guangzhou 510640, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Offshore renewable energy boasts abundant potential and exhibits characteristics of synergistic development. However, it also faces challenges such as complex environmental conditions, low reliability, and spatial competition. Moreover, its interdisciplinary theoretical

foundations have not yet been fully understood, and a systematic understanding of sustainable development pathways is lacking. From the perspective of energy geography, a research framework encompassing five dimensions—potential, technology, industry, space, and governance is developed. Through multidimensional integration and cross-domain analysis, the study systematically reviews the research progress in the development and utilization of offshore renewable energy, including potential assessment, technological development, industrial synergy, spatial evaluation, and impact governance. The review indicates that: (1) Offshore renewable energy is still in its early stage, characterized by “diverse energy types with great potential but technological imbalance, and abundant application scenarios but insufficient integration”. Specifically, offshore wind power technology is mature and dominates development. Energy industry development approaches are diverse with various integration scenarios, while single-mode development still prevails in the short term. Development and utilization offer significant environmental benefits, but may lead to risk transfer. (2) Scientific research, technological development, and industrial integration practices lag far behind the actual needs of offshore resources development and utilization. This is manifested in large discrepancies in assessment results due to different evaluation scales for energy potential, and inconsistent evaluation criteria within the same scale. Immature technological development and poor economic viability of industrial integration hinder efficient development and utilization of marine resources. Spatial assessments focus primarily on planar site selection and optimization, with limited research on three-dimensional marine utilization and the integration of energy and industrial production. The ecological impact mechanisms of development and utilization remain unclear. (3) To promote coordinated development across the five dimensions, offshore renewable energy development should focus on unifying potential assessment standards, enhancing techno-economic efficiency, promoting industrial integration, optimizing spatial utilization, and improving the governance framework. These efforts will support the efficient use of marine resources and the high-quality development of the marine economy. This review provides a comprehensive framework for understanding and advancing offshore renewable energy development, offering valuable insights for policymakers, researchers, and industry stakeholders.

Key words: offshore renewable energy; energy geography; five-dimensional framework; development and utilization; multi-energy complementarity; review