



生态环境友好型的海上可再生能源技术发展前瞻

孙朋元¹, 江志兵², 陈友淦³, 宋晓晖⁴, 庞业珍⁵, 蔡博峰⁴, 许肖梅³, 李晔^{1*}

1. 南方科技大学海洋科学与工程系, 深圳 518055

2. 自然资源部第二海洋研究所, 海洋生态系统动力学重点实验室, 杭州 310012

3. 厦门大学海洋与地球学院, 厦门 361101

4. 生态环境部环境规划院, 碳达峰碳中和研究中心, 北京 100041

5. 中国船舶科学研究中心, 船舶振动噪声重点实验室, 无锡 214082

* E-mail: liye@sustech.edu.cn

收稿日期: 2024-10-10; 接受日期: 2025-01-02; 网络版发表日期: 2025-02-26

国家自然科学基金(批准号: U24A20196)资助项目

摘要 在建设海洋强国策略的实施下, 海上可再生能源技术发展在保障国家能源安全、提升经济效益的同时, 带来的生态环境效应同样值得高度关注. 合理开发生态环境友好型的海上可再生能源技术设备, 对积极推动我国海洋经济发展和改善海洋生态环境具有重要意义. 本文对现阶段海上风电、海上光伏、波浪能和潮流能等几种主要的海上可再生能源技术及其对生态环境的影响进行了综述, 对比了国内外在相关方面的研究情况, 并讨论了我国沿海各省市的政策和规划, 在此基础上提出了生态环境友好型海上可再生能源技术的未来发展建议, 为探索生态环境友好型的海上低碳能源技术方案提供有益参考.

关键词 海上可再生能源, 生态环境影响, 海上低碳能源技术方案, 碳达峰碳中和

1 引言

近年来, 世界各国陆续对海上可再生能源开发利用技术投入大量支持, 各种海上可再生能源发电系统的装机总量持续上升^[1]. 截至2024年, 全球以海上风电为主(海上光伏、潮流能、波浪能等)的海上可再生能源系统装机总量已超过80 GW, 其中海上风电占比超过90%^[2,3]. 在海上可再生能源技术的快速发展过程中, 海上可再生能源系统的建造及运行对海洋生态环境的影响也逐渐受到关注, 而现阶段海上可再生能源系统与海洋生态环境间的交互作用机理尚不明确, 后续针

对环境影响的评估方法和解决方案也尚有不足^[4].

随着我国逐步加大海岛及海洋经济的开发和建设力度, 海上可再生能源技术正步入一个全新的发展阶段, 在海上可再生能源设备的产能效率、结构设计以及建造成本等多方面得到优化的同时, 其对生态环境的影响也值得进一步考虑和评估^[5]. 海洋环境中的物理和化学特征与陆地有着明显差异, 海上可再生能源设备的开发和选型应特别注意环境适应性的要求, 包括满足不同海洋环境条件下的特定要求.

现有研究已表明在海上可再生能源设备大规模开发应用的趋势下, 其实际部署对当地生态环境既有积

引用格式: 孙朋元, 江志兵, 陈友淦, 等. 生态环境友好型的海上可再生能源技术发展前瞻. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 423–441
Sun P Y, Jiang Z B, Chen Y G, et al. Outlook on the development of eco-friendly offshore renewable energy technologies (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 423–441, doi: 10.1360/SST-2024-0267

极影响,也有消极影响^[6]。例如,海上可再生能源设备的大型水下基础可以充当人工鱼礁,吸引更多海洋生物,保护它们免受捕捞活动的影响,同时可利用基于海上可再生能源设备的海洋环境监测系统来监测水下基础和周围人工鱼礁对该区域海洋生物的影响^[7];但在海上项目的施工期间,又可能产生噪声污染,破坏海底生境,最终导致海洋生物伤亡等问题^[8]。因此,在海上可再生能源技术发展的全新阶段,研究人员一方面需致力于海上可再生能源设备的优质开发;另一方面也需尽可能减少其对生态环境的消极影响,探索生态环境友好型的海上低碳能源技术方案。

生态环境友好型的海上可再生能源技术旨在提升能源设备经济效益的同时,同步提升其生态环境效益,降低或消除其对生态环境的消极影响。本文对现阶段主要的海上可再生能源技术及其对生态环境的影响进行综述,对比国外与我国在相关方面的研究情况,探讨我国沿海各省市的政策和规划,在此基础上提出生态环境友好型海上可再生能源技术的未来发展建议,为我国开展大规模海上可再生能源与海洋生态环境的协同发展提供参考依据。

2 海上可再生能源技术

“双碳”目标下,传统能源技术(煤炭、石油、天然气等)在使用过程中由于会产生较高的碳排放,正面临着升级转型压力,需在清洁燃烧、高效转化、污染物控制等关键技术研发上下功夫。与之相比,可再生能源(风能、太阳能、海洋能等)直接或间接从太阳中俘获能量并在人类生命时间尺度内可以自然补足,在全球电力生产能源结构中扮演着越来越重要的角色。随着海洋开发的不断推进,深远海能源需求日益增加,合理开发和利用海上可再生能源已成为必然选择。

现阶段,在全球范围内受到广泛关注和大力发展的海上可再生能源技术主要包括海上风力发电、海上光伏发电、波浪能与潮流能发电等^[9]。其中,海上风电与海上光伏技术在过去十年得到了迅猛发展,与化石燃料相比已具备了一定的竞争力^[10]。波浪能与潮流能

发电技术的发展还相对落后,目前仍处于早期开发阶段^[11]。下文将对这几种主要的海上可再生能源技术的发展现状及趋势进行论述。

2.1 海上风力发电技术

海上风电通常靠近能源消耗中心且风能资源情况优于陆上风电,现正呈现加速发展的态势,按照风机基础的安装模式和安装位置可将海上风机分为近海固定式风机和深远海漂浮式风机^[12]。由于近海空间资源有限,且随着海上风电单机功率大型化,近海固定式基础在设计和施工上面临日益严峻的挑战。相比之下,漂浮式风机能够通过系泊系统实现灵活定位,不受水深限制,具备更强的环境适应性,并且在运输和安装方面也更为便捷^[13]。这也使得海上风电的发展轨迹不断地从浅近海走向深远海,相应地,海上风机支撑结构形式也伴随水深变化,从固定式支撑结构向漂浮式支撑结构演变^[14]。漂浮式海上风机的支撑结构在众多人员的热点研究下也不断地涌现出新形式,大体可按照其静稳性原理将之划分为以下四种类型及其综合型式^[15]:驳船式、半潜式、立柱式、张力腿式,具体结构如图1所示。

在目前的漂浮式海上风机发展进程中,欧洲、美国和日本等占据着技术主导地位。欧洲在50 m以上水深范围拥有大量的海上风能资源,漂浮式海上风电技术为这些海域的风能资源利用开发提供了有力的支撑,挪威国家石油公司根据挪威海域特点率先推出并商业化了压载平衡型的立柱式浮式风机Hywind¹⁾而使得漂浮式风机技术备受行业关注;基于Ideol公司研发的阻尼池半潜式海上风电机组,法国第一个浮式风机试验项目FloatGen²⁾发出全球首个钢筋混凝土基础的漂浮式样机,并于2018年开始进行样机运行测试,单机容量2 MW;基于美国PPI(Principle Power, Inc.)公司提出的WindFloat^[16]三立柱半潜式海上风电技术,EDP(Energias de Portugal)等企业在葡萄牙近海安装了全球首个半潜式海上风电机组样机,凭借半潜式平台良好的稳性特点,其在海上组装时可不使用重型吊船或桩基设备;日本拥有全球第六大海域面积,是风能资源较为丰富的国家,其在海上浮式风机方面已有多

1) NS Energy Staff Writer. Hywind. <https://www.nsenerybusiness.com/news/unitech-offshore-to-take-over-hywind-demo-floating-wind-turbine-fromequinor/>.

2) WEAMEC. FLOATGEN: The first offshore wind turbine in France. <https://www.weamec.fr/en/synthesis/floatgen/>.

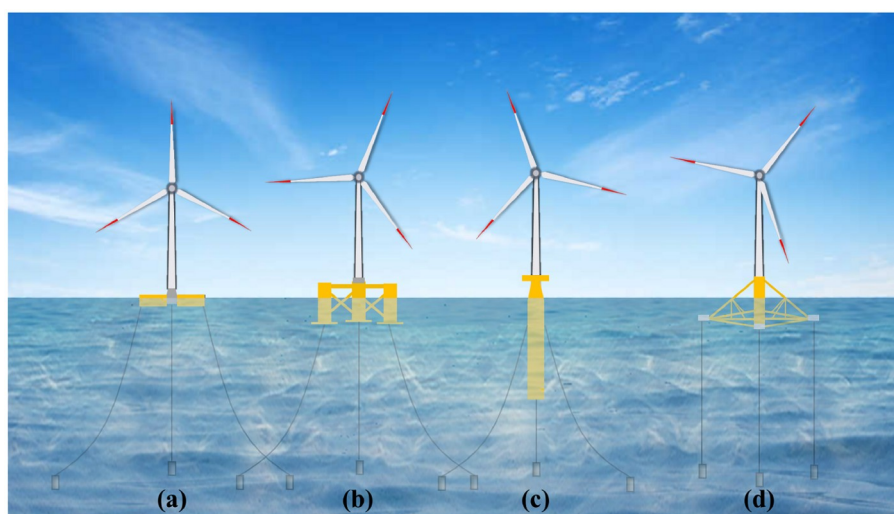


图 1 (网络版彩图) 漂浮式海上风机支撑结构的主要型式. (a) 驳船式; (b) 半潜式; (c) 立柱式; (d) 张力腿式

Figure 1 (Color online) Main types of floating offshore wind turbine support structures. (a) Barge; (b) semi-submersible; (c) spar; (d) tension-leg platform.

研究, 各种设计也已经发展到样机阶段, 如福岛一期、二期漂浮式风电项目^[17,18], Goto项目等. 全球浮式风电市场中, 欧洲仍然是风电的主流市场, 其占据着半壁以上的江山, 亚洲虽然起步较晚, 但是有后来居上的潜力^[19].

我国近年来在大型海上风电机组和柔直输电等技术方面的进展加快, 随着国家提出“十四五”海上风电发展要向深远海布局, 我国海上风电项目水深会逐渐突破60 m, 达到70~80 m甚至100 m以上的水平^[20]. 目前国内“三峡引领号”³⁾、“海装扶摇号”⁴⁾、“海油观澜号”⁵⁾、“国能共享号”⁶⁾和“明阳天成号”⁷⁾等多台半潜式样机均已落地, 预计未来5~10年漂浮式海上风电技术将得到快速发展和产业化应用. 在固定式海上风电场方面, 国家电力投资集团有限公司、中国长江三峡集

团有限公司、中国大唐集团有限公司和中国广核集团有限公司分别开发建设了“湛江徐闻300 MW海上风电项目”⁸⁾、“阳江沙扒海上风电项目”⁹⁾、“平潭长江澳海上风电项目”¹⁰⁾和“如东海上风电场示范项目”¹¹⁾等诸多标志性项目, 建成的海上风电场已遍布我国海岸线. 国内外具有代表性的海上风电设备及其主要信息汇总如表1所示.

2.2 海上光伏发电技术

海上光伏发电技术利用水上基台将光伏组件支撑在水面进行发电, 依靠漂浮系统、锚固系统、敷设系统和接地系统将光伏发电技术从陆地推向海洋^[21]. 从结构类型来看, 海上光伏装备主要分为桩基固定式和漂浮式两种, 其中桩基固定式海上光伏一般用于近海

3) 中国三峡新能源(集团)股份有限公司. 全球首台抗台风型漂浮式海上风电机组“落户”三峡集团海上风电场. <https://www.ctgne.com/sxxny-china/1077761/1077661/2024080500582298618/index.html>.

4) 中船海装风电有限公司. 揽风向海“浮”动未来——中国海装“扶摇号”浮式风电装备成功拖航. <http://www.hzwindpower.com/zongbuxinwen/20220531100257.html>.

5) 海洋石油工程股份有限公司. “海油观澜号”完工启航. https://www.cnoocengineering.com/art/2023/3/28/art_29351_15337479.html#1.

6) 国家能源集团. 龙源电力“国能共享号”首批投放1万尾鱼苗. <https://www.ceic.com/gjnyjtw/chnjcxw/202404/63983ba39f9c4971a52dcc2d-be5127a4.shtml>.

7) 明阳集团. 大国重器交汇大国工程. 全球最大漂浮式风电平台启航出海. <https://www.myse.com.cn/news/info.aspx?itemid=2417>.

8) 国家电力投资集团有限公司. 广东公司湛江徐闻海上风电场300兆瓦增容项目首回路风电机组并网成功. <http://www.spic.com.cn/xttd1/202410/t20241008324312.html>.

9) 中国三峡新能源(集团)股份有限公司. 广东阳江200万千瓦海上风电场. <https://www.ctgne.com/sxxnychina/1077724/1077727/d994908c-1.html>.

10) 福建平潭大唐海上风电有限责任公司. 大唐福建平潭长江澳110 MW海上风电项目最新进展. <https://wind.imarine.cn/news/98190.html>.

11) 中国广核新能源控股有限公司. 国内首个双十海上风电项目, 如东海上风电场. http://www.cgnne.com/cgneh/c101173/2018-06/08/content_db5fd4e090944b8d886059c7cfab22f2.shtml.

表 1 国内外代表性海上风电设备及其主要信息

Table 1 Key information on representative offshore wind energy devices (domestic and abroad)

项目或设备名称	基础型式	研发机构	设备描述	国家
Hywind	立柱式	Statoil(已更名为Equinor)	单机6 MW, 共5台, 世界首个商业化浮式风场	挪威
FloatGen	驳船式	Ideol公司	全球首个钢筋混凝土基础的漂浮式样机	法国
WindFloat	半潜式	Principle Power, Inc.	全球首个半潜式风机, 后续相继开展Atlantic和Kincardine项目	美国/葡萄牙
Fukushima	半潜式	Japan Marine United等	单机7 MW, 2015年末在日本福岛海域部署并投入试运行	日本
引领号	半潜式	中国长江三峡集团有限公司	单机5.5 MW, 2021年12月并网发电, 我国首座漂浮式风机	中国
扶摇号	半潜式	中船海装风电有限公司	单机6.2 MW, 2022年在广东湛江海域完成就位安装, 2023年5月成功微网发电	中国
湛江徐闻海上风电场	桩基固定式	国家电力投资集团有限公司	单机12 MW, 总装机300 MW, 湛江地区首个平价开发的海上风电项目	中国

或滩涂地区, 其地理适用性不如漂浮式光伏, 但由于采用了深入海底的固定立柱, 因此具有更好的风浪保护功能; 漂浮式海上光伏的应用范围更广, 特别是在人口密度高且可用土地有限的地区, 此外由于光伏板的遮阳效果, 漂浮式光伏在一定程度上还可以减少局地的水蒸发, 高度模块化的特点也使得浮式光伏安装快捷, 具有更大的发展潜力^[22]。在漂浮式海上光伏装备中, 漂浮系统是确保电站正常运行的重要支撑平台, 锚固系统是漂浮式海上光伏的设计核心。

目前, 全球范围内的漂浮式海上光伏规模化开发都处于起步阶段, 关键技术突破和标准制定正在加速推进, 一些欧洲创新企业已经将部分平台设计推进到海洋环境的全尺寸示范阶段^[23]。奥地利的Swimsol公司与维也纳科技大学合作, 在马尔代夫开发并启动了海洋环境下首批商业化的海上浮式光伏试验项目, 该项目包含四个独立停泊的平台, 总容量为100 kW^[24]; 挪威Ocean Sun^[12]公司借鉴海上渔场的浮动技术在2017年提出了一种完全柔性的海上光伏系统, 其光伏

板安装在耐海洋环境的高强度柔性薄膜上, 整个系统可以随着波浪起伏运动, 可以将海流和海风带来的环境荷载降至最低; 荷兰Ocean of Energy^[13]公司于2019年在荷兰北海开发了Zon op Zee试点项目, 其采用了模块化设计, 各模块之间采用铰链连接, 共计28个模块, 发电功率可达8.5 kW, 并于2020年扩大了1倍装机容量^[14]; 荷兰SolarDuck^[15]公司自2021年4月以来在荷兰内陆湾试运行了一个名为King Eider的阵列光伏项目, 其浮式光伏结构采用了4个模块化的三角形柱稳式平台设计, 使得刚性模块通过柔性结构灵活地连接在一起。

我国海上光伏技术得益于陆地光伏技术的成熟发展, 从研究实证开始进入规模化项目示范阶段^[25,26]。由国家电力投资集团有限公司主导开发的海阳HG34近海桩基式海上光伏关键技术研究及示范项目^[16]于2023年4月成功建成并实现离网发电, 规划装机容量270万 kW, 成为国内首批、全球最大规模的近海桩基固定式海上光伏项目; 由中国华能集团有限公司投资

12) Ocean Sun. Gallery | ocean sun. <https://oceansun.no/gallery/>.
13) Ocean of Energy. A world's first: Offshore floating solar farm installed at the Dutch North Sea. <https://oceansofenergy.blue/a-worlds-first-offshore-floating-solar-farm-installed-at-the-dutch-north-sea/>.
14) Bellini E. First lessons learnt from offshore pilot PV system in North Sea after 18-month operation. <https://www.pv-magazine.com/2021/07/16/first-lessons-learnt-from-offshore-pilot-pv-system-in-north-sea-after-18-month-operation/>.
15) SOLARDUCK. Flexibly interconnected semi-sub triangular structures. Articulated floating structure: PCT/EP2020/087842. <https://solarduck.tech/patents/>.
16) 国家电力投资集团有限公司. 山东能源在海阳建成近海桩基式海上光伏实证项目. <http://www.chinapower.hk/sc/media/news-p230504.php>, 2023.

建设、中国海洋工程装备技术发展有限公司承建的国内首套大型海上浮式光伏平台“黄海一号”¹⁷⁾于2024年8月初完成陆地建造,该平台采用六边形、桁架式钢结构设计,主尺度为25 m×25 m×9 m,空船重量320 t,将在山东半岛南4号海上风电场进行实地测试;中国长江三峡集团有限公司在福建省漳州市东山县建设的东山杏陈180 MW海上光伏电站项目¹⁸⁾,是中国首个海上光伏商业化运营示范项目,预计于2024年12月完成投产发电.国内外具有代表性的海上光伏设备及其主要信

息汇总如表2所示.

2.3 波浪能发电技术

波浪能发电技术利用装置的初级捕能机构从波浪中俘获能量,再通过能量转换-传递系统将俘获的能量进行传递、存储、变换等处理,最终将能量转换为电能输出^[27].按照初级捕能机构俘获波浪能的原理,可将波浪能发电装置大体分为点吸收式(振荡体式)、振荡水柱式和越浪式三种型式^[28],如图2所示.近年来,世

表 2 国内外代表性海上光伏设备及其主要信息
Table 2 Key information on representative offshore photovoltaic devices (domestic and abroad)

项目或设备名称	研发机构	设备描述	国家
Swimsol	Swimsol公司	海洋环境下首批商业化的海上浮式光伏试验项目	奥地利
Ocean Sun薄膜光伏	Ocean Sun公司	圆形浮力环拉紧特殊材料制成耐海洋环境的高强度柔性薄膜	挪威
Zon op Zee	Ocean of Energy公司	首个安装在公海上的漂浮式海上光伏系统	荷兰
King Eider	SolarDuck公司	额定功率65 kW,可在5 m波高下保持较高的整体稳定性	荷兰
海阳HG34	国家电力投资集团有限公司	国内首个在近海开放式海域条件建设的桩基固定式海上光伏	中国
黄海一号	中国海洋工程装备技术发展有限公司	国内首套大型海上漂浮式光伏平台	中国
东山杏陈海上光伏电站	中国长江三峡集团有限公司	规划容量180 MW,福建省首个滩涂海上光伏电站	中国

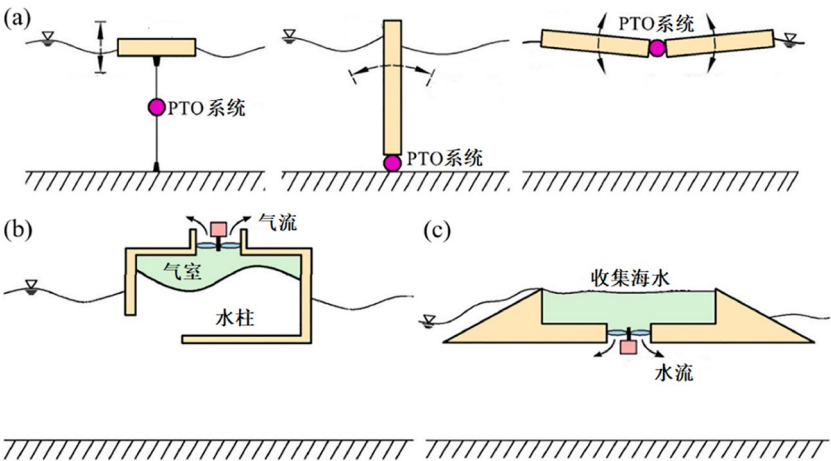


图 2 (网络版彩图)不同捕能原理的波浪能发电装置示意图. (a) 点吸收式; (b) 振荡水柱式; (c) 越浪式
Figure 2 (Color online) Wave energy converters with different energy harvesting principles. (a) Point absorption type; (b) oscillating water column type; (c) overtopping type.

17) 中国华能集团有限公司. 中国首套抗浪型漂浮式光伏平台启运出港. https://www.chng.com.cn/detail_mtbd/-/article/SIgvLjX6a9gO/v/1227174.html.
18) 中国三峡新能源(集团)股份有限公司. 福建: 海上光伏电站建设忙. <https://www.ctgne.com/sxxnychina/1077761/1077768/2024080501321895420/index.html>.

界各国均对波浪能利用研究投入大量支持, 波浪能技术获得了长足的发展, 在对波浪能发电装置的统计中, 振荡浮子式和振荡水柱式波浪能装置成为了波浪能利用方面最常用的两种技术形式^[29]。

受海洋资源环境禀赋和经济实力影响, 波浪能研究主要集中在欧美等国家或地区。在美国能源部和美国海军支持下, 美国OPT(Ocean Power Technologies)公司研制了PowerBuoy^[19]点吸收式装置, 目前该装置已实现3, 7.5, 40及150 kW定型化研制, 主要用于为海洋观测提供能量输出; 丹麦WaveStar Energy公司研发了一种多浮子的WaveStar^[30]波浪能装置, 该装置主体结构通过打桩固定在海岸线, 利用延伸出的多个吸波浮子吸收波浪能, 通过延伸臂上安装的液压系统实现能量转换, 总装机容量110 kW的1/2模型样机于2010年2月成功并网输电; 爱尔兰Ocean Energy公司完成了OE Buoy^[31]后弯管型波浪能装置1/4试验样机建造, 该装置装机功率500 kW, 先后在高威海湾有遮蔽的小浪区和大西洋沿岸的开阔海域进行实海况试验, 运行时间超过24000 h; 英格兰Pelamis海浪动力公司研制了Pelamis^[32]筏式波浪能装置, 其单体装机容量为750 kW, 在葡萄牙西北部Aguçadoura实现三台组网运行, 建造了世界第一个波浪能发电场, 总装机容量2.25 MW; 丹麦Friis-Madsen公司开发并研制了Wave Dragon^[33]聚波越浪式波浪能装置, 成为世界上首座漂浮越浪式波浪能发电装置, 其原型机的发电功率可达4~7 MW。

随着全面建设海洋强国策略逐步深入实施, 我国波浪能研究在近几年取得了快速发展, 研发出了一系列波浪能发电装置, 部分技术达到世界一流水平^[34]。中国科学院广州能源研究所研发出了具有我国自主知识产权的鹰式波浪能捕获技术, 并研建了10, 100, 260, 500 kW系列化波浪能发电装置^[35~38], 实现了鹰式波浪能技术实海况验证、近海海岛并网供电、远海岛礁并网供电, 使我国成为全球首个在深远海条件下布放波浪能发电装备并成功并网的国家, 此外兆瓦级别“南鲲号”鹰式波浪能发电装置目前已顺利完成下水仪式, 待并网发电后其预期整体可达到国际领先水平; 中国海洋大学开展了“海灵号”^[39]组合型振荡浮子式波浪能发

电装置的研制, 并于2014年在山东斋堂岛海域开展了10 kW样机的实海况测试; 针对中国南海台湾海峡附近的波浪能资源, 集美大学在十多年间开发研制了数代漂浮式波浪能发电装置^[40~43], 并于厦门小嶝岛海域进行了样机海试; 除此之外, 国家海洋技术中心、山东大学和浙江海洋学院等多家单位也分别进行了浮力摆式、“山大一号”和“海院1号”等波浪能样机的实海况测试^[44~47], 上海交通大学、清华大学、哈尔滨工程大学、东南大学等针对各式波浪能装置开展了一定的理论研究和实验室原理验证工作^[48~53], 但尚未研制实型样机。国内外已经进行实海况测试运行的代表性波浪能发电设备及其主要信息汇总如表3所示。

2.4 潮流能发电技术

潮流能发电技术主要利用潮流冲击下水轮机叶轮的转动, 将潮流能转换为转子的机械能, 进而驱动发电机进行发电^[54]。根据水轮机旋转轴与来流方向的关系, 可以将潮流能水轮机发电装置分为水平轴式和垂直轴式两种类型^[55]。其中水平轴水轮机具有获能效率高、发电稳定的优点, 是目前应用最多的潮流能发电装置类型, 但其发电机组置于水下, 对装置的密封性能要求比较严格; 垂直轴水轮机的能量转换效率一般低于水平轴水轮机, 但其优点在于不受来流方向的限制, 结构相对紧凑小巧, 安装灵活, 同时机舱可置于水面以上, 可减少密封设计的复杂性并降低维护成本^[56]。由于有风力机研究作为基础, 潮流能水轮机发电装置在技术方面相对较为成熟。除此之外, 还有振荡水翼式、风筝式等其他类型的潮流能装置^[57,58], 但普及程度不高。

目前, 欧洲国家在潮流能发电技术方面处于领先地位, 凭借其丰富的潮流能资源, 已开展多种类型的全尺寸水轮机样机实海况测试^[59]。英国SAE(SIMEC Atlantis Energy)公司主持的MeyGen^[60]项目是全球最大的潮流能项目之一, 其位于苏格兰北部的朋特兰湾, 利用水平轴水轮机开发当地的潮流能资源, 预计总装机容量可达398 MW; 英国OMP(Orbital Marine Power)公司研制的O2^[20]装置, 是目前世界上最大的潮流能发

19) PowerBuoy. PowerBuoy wave energy converter. <https://www.oceannews.com/news/en-ergy/ocean-power-technologies-signs-agreement-with-premier-oil>.

20) Bonifacic I. The world's "most powerful" tidal turbine is nearly ready to power on. <https://www.engadget.com/orbital-marine-power-o2-tidal-turbine212319827.html>.

表 3 国内外代表性波浪能发电设备及其主要信息

Table 3 Key information on representative wave energy devices (domestic and abroad)

设备名称及类型	装机功率	研发机构	设备描述	国家
PowerBuoy振荡浮子式波浪能发电装置	3/7.5/40/150 kW系列化	OPT公司	于新泽西沿海进行试验, 未并网	美国
WaveStar振荡浮子式波浪能发电装置	110/600 kW	WaveStar Energy公司	近海测试, 累计运行超过15000 h, 并网	丹麦
OE Buoy振荡水柱式波浪能发电装置	500 kW	Ocean Energy公司	在高威海湾小浪区和大西洋沿岸开阔海域海试, 未并网	爱尔兰
Pelamis筏式波浪能发电装置	750 kW	Pelamis海浪动力公司	在葡萄牙西北部完成波浪能场组网运行, 并网	苏格兰
Wave Dragon聚波越浪式波浪能发电装置	20 kW, 4~7 MW	Friis-Madsen公司	在大波浪环境下海试, 累计运行超过20000 h, 并网	丹麦
鹰式点吸收波浪能发电装置	10/100/260/500 kW系列化	中国科学院广州能源研究所	在珠海万山岛(近海)和西沙永兴岛(远海)海域进行海试, 并网	中国
海灵号振荡浮子式波浪能发电装置	10 kW	中国海洋大学	在青岛斋堂岛(近海)海域进行海试, 未并网	中国
集美1号/2号/3号振荡浮子式波浪能发电装置	10/30 kW	集美大学	在厦门小嶝岛(近海)海域进行海试, 未并网	中国

电设备, 其采用浮式结构设计, 由一个长浮体和两台 1 MW的水轮机组成, 于2021年7月在欧洲海洋能源中心(EMEC)投入运行; 法国HydroQuest公司设计了 1 MW的OceanQuest^[61]装置, 其主要结构包含两台双层垂直轴水轮机, 通过两层叶片的交错相位设计减少了水轮机承受载荷的波动; 加拿大SME(Sustainable Marine Energy)公司专注于浮式水轮机阵列的开发, 其研制的PLAT-I 6.40^[21]浮式潮流能平台由一艘三体船和六台水平轴水轮机组成, 该平台具有较低的拖曳水深要求, 显著降低了安装和维护成本; 美国ORPC公司研制的垂直轴水轮机RivGen^[22]使用螺旋型叶片, 结构采用横置设计, 额定功率在40~80 kW, 能够适应浅水工况。

我国潮流能发电技术近年来快速发展, 已成为全球少数掌握规模化潮流能开发利用技术的国家之一^[62]。浙江大学于2014和2015年分别在浙江摘箬山岛海域成功示范运行了60和120 kW潮流能水轮机样机^[63], 其中120 kW机组于2016年5月实现并网, 是国内首个并网发电的水平轴水轮机组, 此外浙江大学还于2017年完成了650 kW漂浮式水轮机的研制; 中国长江三峡集团有限公司在2015年海洋可再生能源专项资金

项目“舟山潮流能示范工程建设”支持下, 完成了两台额定功率为450 kW的“SG500A/B”水平轴潮流能发电机组的研发和建设^[64], 其建成的三峡舟山潮流能升压站是全球首座海洋潮流能发电站, 该项目也是世界上连续并入电网运行时间最长的潮流能发电项目。国内外已经进行实海况测试运行的代表性潮流能发电设备及其主要信息汇总如表4所示。

3 海上可再生能源开发对生态环境的影响

海上可再生能源技术的迅猛发展为我国海洋经济提升和能源结构改善注入了新的活力, 但同时也给生态环境带来了不可忽视的影响, 随着海上可再生能源设备逐步进入优质开发阶段, 越来越多的研究人员开始重视其在建造和运行过程中对当地生态环境带来的影响, 如海上可再生能源设备对周围动植物及其栖息地的潜在影响, 它们之间相互作用的海洋学过程, 以及在环境影响方面的量化分析与友好性评价方法等都需要进一步清晰阐述^[65,66]。图3给出了海上可再生能源设备对生态环境的主要影响示意图, 涉及水下噪声、电磁场、栖息地环境的改变、海洋动力环境的变化、

21) SME. Sustainable Marine Energy Ltd. <https://www.facebook.com/sustainablemarine/>.
22) ORPC. Sustainable Energy Solutions from Free-flowing Rivers & Tides. <https://orpc.com>.

表 4 国内外代表性潮流能发电设备及其主要信息

Table 4 Key information on representative current energy devices (domestic and abroad)

项目或设备名称	水轮机型式	研发机构	设备描述	国家
MeyGen	水平轴	SAE公司	有望成为全球首个商业化规模的潮流能发电阵列	英国
O2	水平轴	OMP公司	目前世界上最大的潮流能发电设备	英国
OceanQuest	垂直轴	HydroQuest公司	于2019~2021年在Paimpol-Bréhat试验场验证了技术可行性	法国
PLAT-I 6.40	水平轴	SME公司	2021年在Grand Passage区域下水测试	加拿大
RivGen	垂直轴	ORPC公司	新一代TidGen水轮机将在2024~2025年展开进一步试验验证	美国
浙江大学650 kW水轮机组	水平轴	浙江大学	国内首个实现并网的水平轴水轮机组	中国
三峡舟山潮流能发电机组	水平轴	中国长江三峡集团有限公司	在浙江舟山海域并网运行, 世界上连续并网时间最长的潮流能项目	中国

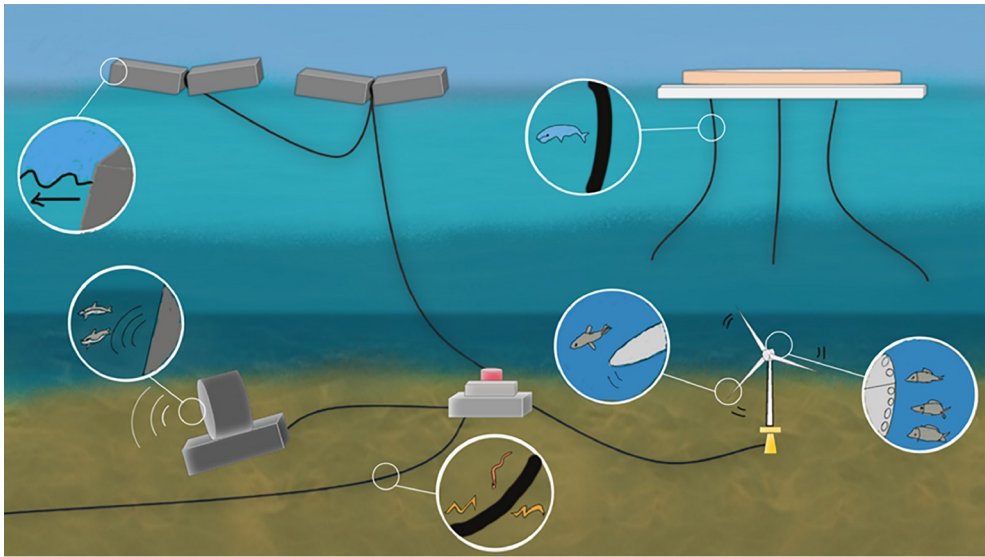


图 3 (网络版彩图)海上可再生能源设备对生态环境的主要影响示意图(从左上到右下依次为海洋动力环境变化、电磁场、缠绕风险、栖息地环境改变、碰撞风险和 underwater 噪声)

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of the main impacts of marine renewable energy equipment on the ecological environment. From top left to bottom right: changes in oceanographic systems, electromagnetic fields, mooring entanglement, changes in habitats, collision risk, and underwater noise.

缠绕风险和碰撞风险等.

3.1 水下噪声

在所有海洋环境中都包含多种声音来源, 如海洋环境的背景噪声(波浪、风和沉积物运输等)、不同程度的人为和生物噪声等. 声音作为许多海洋动物与周围环境以及彼此之间相互作用的核心方式, 在考虑海洋动物面临风险时, 必须考虑海上可再生能源设备施工和运行中所产生的人为水下噪声对其带来的潜在影

响^[67]. 海洋动物在海洋中使用声音, 就像陆地动物和人类在陆地上使用视觉一样——用于实现交流、导航、觅食、社交和躲避捕食者等生物功能, 而某些海上可再生能源设备带来的水下噪声可能会干扰海洋动物的这些活动, 造成其听觉掩蔽、压力或行为改变、听觉反应或损伤等, 在极端情况下, 高强度的水下噪声甚至可能会使海洋动物身体永久损伤或死亡^[68]. 因此, 海上可再生能源设备在施工和运行中产生的水下噪声及其带来的潜在影响已成为众多研究的焦点, 其

在建设期间(打桩施工等)向水下辐射的较高强度、宽频带噪声尤为显著,运行期间的噪声影响较为有限^[69-71]。由于现阶段部署的海上可再生能源设备数量相对较少,量化其产生的水下噪声对海洋动物的直接和间接影响仍存在诸多难题^[72,73],例如,难以准确测量海上可再生能源设备发出的噪声,难以区分海上可再生能源设备噪声和环境噪声,以及难以理解水下噪声如何影响海洋动物的行为等。目前相关研究还大都停留在实验室模拟阶段,有较少研究对海上可再生能源设备发出的水下噪声进行了原位观测或现场表征,还需进一步加强海上可再生能源设备噪声对海洋动物行为影响的相关研究^[74]。

3.2 电磁场

海洋环境中自然存在背景电磁场,而人为活动将造成海洋环境中电磁场的改变或增强。海上可再生能源设备所布放的输出电缆是海洋环境中人为电磁场的主要来源,通常情况下,输出电缆被埋设、铺设在海底,或者悬浮在装置之间的水体中,无论是传输高压直流电(DC)还是交流电(AC),电缆都会沿其整个长度辐射电磁场^[75]。海上可再生能源设备发出的电磁场与自然产生的地磁场之间的相互作用可能会引起易感动物行为和活动的改变(如某些海洋动物间的回避或吸引行为等),并且可能导致生长或繁殖功能的长期改变^[76]。并不是所有的海洋动物都可以觉察到电磁场,只有少数的物种具有感知和对这些刺激作出反应的感官功能,最有可能遇到并受到海上新能源设备产生电磁场影响的是那些长时间待在电力电缆附近的动物,如底栖动物^[76]。现阶段,电缆电磁场的有限元模拟研究已较为成熟,海洋动物物种的电磁感知能力研究仍处于发展当中,一些实验室和现场研究提高了我们对部分鱼类和无脊椎动物暴露于电磁场环境中的行为响应理解,但对于远洋物种(如远洋鱼类和海洋哺乳动物等)如何与水中铺设的电缆相互作用并受到其影响,我们仍然知之甚少^[76,77]。目前的一些研究数据表明,由单个装置或小型阵列电力电缆发出的电磁场对生态影响是有限的,并且生活在输出电缆附近的海洋动物不太可能受到其产生电磁场的直接损害^[76]。

3.3 栖息地环境的改变

对于在海洋环境的底部或中上层栖息的海洋生

物,其群落分布受到海底深度、海床特征以及海流速度等影响^[78]。海上可再生能源设备的部署往往需要安装重力基础或者固定桩,这些可能会改变底栖生物的生存环境,此外水体中的系泊缆、传输电缆和机械运动部件等也会对中上层生物的栖息地环境产生影响。对于在海底和水中布放的结构体,电力输出电缆的安装会干扰和改变一个狭长区域的生存环境,固定桩和地基周围沉积物的冲刷也可能改变底栖生境,这些影响都可能会改变海洋生物的生存或行为方式^[78]。另外这些结构体也可能起到人工渔礁的作用,海上可再生能源设备可以为污损生物提供栖息地,也可以吸引鱼类和其他动物,形成实际意义上的人工渔礁和海洋保护区,从而促进周围鱼类种群的增长^[78]。总体而言,如果海上可再生能源项目的选址尽量避开较为脆弱的生存环境,则由海上可再生能源设备和其阵列引起的海洋生物生存环境变化风险可大大降低。

3.4 海洋动力环境的变化

海上可再生能源设备往往部署在适合提取能量的高能量密度区域,而这些部署反过来也会影响该区域的海洋动力环境,导致流场结构、波浪高度和洋流速度等发生变化(如水下结构引起的水流阻塞、漂浮结构引起的海面波高变化,以及水轮机引起的尾流或湍流等),进而影响海上可再生能源设备周围近场和远场环境中的沉积物输运和水质量^[79]。海水运动决定了海洋生物及其栖息地所处的物理和生态状况,海洋动力环境的变化对水体混合、营养物浓度改变、浮游生物聚集、鱼类分布和无脊椎动物幼虫输运等方面均会有一定程度的影响^[80]。当然,小型海上可再生能源设备造成的海洋动力环境变化可能微乎其微,但更大规模的阵列部署可能会显著破坏潮汐、海浪和洋流驱动的自然过程^[81]。目前对海洋动力环境的研究主要来自数值模型,以及少量的实验室水槽研究和试验场项目,随着大型商业阵列化装置的部署,需要系统和长期的试验场数据来验证数值模型^[80]。

3.5 缠绕风险

大多数海上可再生能源设备(包括漂浮式和中层水域设备)都需要系泊系统(锚固装置和系泊缆)来保持其在水面或水中的位置,并且都需要传输电缆来用于设备互连或连接到海上变电站。这些系泊缆绳和传输

电缆的存在会给大型海洋动物带来缠绕风险, 尤其随着大型阵列化装置的部署以及在大型海洋动物的迁徙和觅食期间, 这种缠绕风险会剧增, 最终可能致使海洋动物无法脱困^[81]。海洋动物遭遇缠绕风险的可能性取决于线/电缆的配置和深度, 以及动物的大小和行为。目前, 关于海上可再生能源设备系泊和海底电缆缠绕风险的实证数据和重点研究还很缺乏, 需要对大型海洋动物的栖息地偏好和潜水行为开展进一步研究, 确定其繁殖和觅食栖息地, 分析其季节性迁徙路径, 以评估可能导致的缠绕风险, 为海上可再生能源设备的选址提供背景信息^[81]。通过建模和实地观测相结合可以加强对缠绕风险的评估, 但在相遇模型可以帮助预测海上可再生能源设备附近动物数量的同时, 仍需要实测数据来验证这些模型^[81]。

3.6 碰撞风险

海上可再生能源设备可能会对海洋哺乳动物、鱼类和海鸟等造成碰撞风险, 影响碰撞可能性的因素包括设备特性、动物行为和运动部件附近的动物密度等^[82]。由于涉及运动部件(叶片和转子等), 海上风电和潮流能发电设备对海洋动物带来碰撞风险的可能性更高; 而波浪能发电设备因为具有碰撞潜力的水下活动部件较少, 因此被认为在碰撞风险方面更为温和。截至目前, 海洋哺乳动物或海鸟与风力机相撞现象较少被观测到, 而且附近鱼类与水轮机的互动次数有限, 即使发生碰撞, 在快速流动且浑浊的水域中同样很难被观测^[82]。此外, 碰撞造成的后果也尚不清楚, 可能会导致动物受伤后康复, 也可能导致动物直接死亡。现阶段, 关于海洋动物在水下结构存在时如何表现的证据和理解有限, 很难确定海洋哺乳动物、鱼类和海鸟等对正在运行的叶片或转子的感知、反应和躲避能力如何^[82]。在缺乏这些行为信息的情况下, 关于碰撞风险的研究主要是通过计算机模拟近场行为和潜在的碰撞事件, 估算海上可再生能源设备附近出现海洋动物时发生碰撞的风险^[82]。也有一些研究人员使用水下视频和主动声学技术(如回声测深仪和声学摄像机)对已部署的水轮机周围进行监测, 以期对海洋动物的水下行为研究提供帮助^[83]。

4 国内外研究对比

海上可再生能源是国际能源转型策略的重要抓手, 欧美等国家或地区将海上可再生能源作为战略性新兴产业进行培育, 纷纷制定中长期发展目标和发展路线图, 实施完善法律法规、加大研发支持等举措, 出台鼓励性电价等激励政策, 促进海上可再生能源技术进步和产业发展, 抢先布局海上可再生能源领域^[84]。

国外研究机构对海上可再生能源技术发展对生态环境带来的影响关注较早, 从2010年开始, 由美国的西北太平洋国家实验室(PNNL)牵头, 在国际能源署海洋能系统(IEA-OES)合作成员国之间便开展了一项名为“海洋波浪、潮汐和洋流能源系统的环境影响评估和监测工作”的国际合作项目^[23], 项目持续周期从2010年到2027年, 包含美国、澳大利亚、加拿大、丹麦、英国、葡萄牙等数十个参与国家。该项目主要从压力源和受体两个角度, 研究了海上可再生能源系统与海洋生态环境的相互作用, 其中压力源指的是海上可再生能源系统中可能对海洋生物、栖息地、海洋学过程或生态系统造成伤害或压力的部分, 包括水轮机叶片、系泊线、锚或基础、电力输出电缆, 以及这些部件可能带来的风险等; 受体则包括生活在海上可再生能源系统周围的海洋生物、部署设备的栖息地以及相关的海洋学过程(如流场结构、海浪高度、沉积物运输、补给海洋生物的溶解气体和营养物质的浓度等)^[23]。研究人员通过理论建模、实验室验证以及现场监测等手段来检验目标之间的相互作用。另外, 也有一些国外学者分别从施工影响、运营影响、野生食物和渔业供给、病虫害防治和物种入侵、体验式娱乐、生态系统服务和社会接受度等相关方面进行了具体的评估, 在这些考虑因素中, 针对不同种群和物种, 反映出不同的影响结果, 对应解决策略也体现出较大的不确定性^[85-87]。

经过几十年的研究进程, 我国海上可再生能源开发利用技术实现了快速发展, 整体水平显著提升, 技术创新实力迈入世界第一方阵。同时, 海上可再生能源支撑服务体系迅速跟进, 国家级海上试验场陆续启动建设并投入运行, 海上可再生能源人才队伍迅速成长, 产学研用政相结合的局面逐步形成, 尤其是大批

23) IEA-OES. Assessment of environmental effects and monitoring efforts for ocean wave, tidal, and current energy systems. <https://www.ocean-ener-gy-systems.org/oes-projects/assessment-of-environmental-effects-and-monitoring-efforts-for-ocean-wave-tidal-and-current-energy-systems/>.

有实力企业参与,极大地提高了自我创新能力及产业化转化能力,我国海上可再生能源开发利用已具备一定的产业化发展基础及条件^[88]。

然而,由于我国对海上可再生能源的开发相对较晚,国内相关研究人员从近几年才开始关注海上可再生能源设备对生态环境的影响,且研究项目和研究成果相对较少^[89]。在海上可再生能源设备产生的水下噪声方面,有学者通过对3和5 MW风机附近的水下噪声进行监测,发现其产生的噪声强度能级水平较低,并不足以损坏海洋生物的内耳结构,而且不同风速下风机运转产生的水下噪声强度变化不明显,总体都与海洋环境背景噪声相当(海洋环境噪声本身动态变化范围较大,与海况、风浪、地质等密切相关)^[90];在生态系统和生物多样性方面,有学者认为海上可再生能源设备场的占地面积一般较大,如果规划范围内有湿地、自然保护区等生态敏感性区域存在,必然会在建设和运行过程中对其生态环境带来较大影响^[91]。可再生能源设备的建设也使人为干扰增多,水分、土壤等非生物因素改变,导致大量底栖生物生境改变和消失,生态系统中的高营养级生物也随之被迫迁移^[92]。在地质环境方面,有学者表示部分海上可再生能源设备的基础需要通过液压打桩及使用大量石块进行护桩,改变海域内原有地质情况的同时,也会使得海底泥沙悬浮,造成局部海水水质污染^[93]。综合研究表明,海上可再生能源技术发展对生态环境带来不可忽视的影响,但不同海洋生物种群或生态环境因素对海上可再生能源设备影响的响应程度不同,且在缺乏长期系统研究的情况下,海上可再生能源设备布设对部分生态环境因素的影响尚不明确,需要开展理论上的系统建模和长周期的监测验证工作,进行更有针对性的评估,而目前这方面的研究还很薄弱。

表5给出了国内外在海上可再生能源对海洋生态环境影响研究方面的对比情况。目前,国外开展海上可再生能源系统对海洋生态环境影响研究的主要机构包括德国应用物理与技术研究所、荷兰应用科学研究所、美国西北太平洋国家实验室、伍兹霍尔海洋研究所、美国国家可再生能源实验室等,其对于海上可再生能源开发对海洋生态环境影响的评估方法和解决方案等相关研究均位于前列。国内的南方科技大学、自然资源部第二海洋研究所、厦门大学、中国船舶科学研究中心等单位在海上可再生能源系统对海洋生态环

境影响方面进行了相关研究,已积累了一定的技术与运行经验,但相比国外仍较为滞后。

5 我国未来政策讨论及建议

5.1 未来发展动态

根据海上可再生能源开发目前存在的生态环境影响问题,在生态环境友好型的海上可再生能源技术未来发展过程中,将着力解决海上可再生能源系统与生态环境协同发展面临的瓶颈问题。针对现阶段几种主要的海上可再生能源技术,具体而言,未来研究将进一步明确海上风电建设和运行期间水下噪声产生与传播机理、完善降噪技术,最大限度降低风机噪声对海洋生物的影响;形成不同结构形式海上光伏阵列对海洋动力环境、冲淤及生物群落影响的精确评估方法,逐渐从短期环境效应转向长期累积效应;建立波浪能、潮流能系统运行对水下流场、声场、电磁场耦合环境及海洋生物的扰动机制评估模型,重点关注对区域性代表物种关键生命阶段的影响机理;构建精细化识别与监测海上可再生能源生态环境影响因素的工程平台,开展全方位、系统性、全生命周期的综合友好性评价等。通过对海上可再生能源开发对生态环境影响的研究资料积累和长周期验证工作,揭示海上可再生能源系统与海洋环境间的交互作用机理,完善针对生态环境影响的评估方法和解决方案,为大规模海上可再生能源与生态环境协同发展提供科学依据,促进生态环境友好型的海上低碳能源技术产业化发展。

5.2 相关政策规划

随着全球战略博弈加剧,海上方向战略压力和安全风险持续加大,海洋科技和产业竞争日趋激烈,海上可再生能源已成为国际能源技术竞争的前沿领域。同时,海上可再生能源技术的发展将导致海洋空间利用的增加以及现有用海活动的潜在冲突,在海域面积与空间资源有限的前提下,海上可再生能源设备的布放需要平衡环境、社会和经济效益,支持海洋可持续发展^[94]。

未来海上可再生能源技术在国家政策的支持和激励下必将呈现加速发展的态势,“十四五”期间,我国山东、江苏、浙江、福建、广东、海南、上海、天津等沿海省市均出台了推进发展海上可再生能源技术的相

表 5 国内外相关研究情况对比

Table 5 Comparison of relevant research (domestic and abroad)

生态环境影响方面	相关研究内容	国外研究情况	国内研究情况
水下噪声	- 海上风电噪声产生与传播机理; - 海上风电施工打桩噪声的降噪技术; - 海上风电噪声对海洋生物的干扰等	- 建立了有限元模型及改进的修正型抛物方程预测海上风电噪声; - 将气泡幕、水声阻尼网、围堰等降噪措施成功应用到工程实践; - 首次证明了海上风电水下噪声减小对海洋哺乳动物的积极作用; - 出台了多项国际标准来规范海上风电打桩噪声的测量	- 分析了不同模型对海上风电水下噪声传播的适用性; - 设计了网状屏、充气管、管格栅等多种风电打桩隔声装置; - 开展了海上风电场施工运行期水下噪声监测评估及海洋哺乳动物声学保护技术研究
电磁场	- 电磁场模拟技术及测量仪器的开发; - 海上可再生能源系统流场、声场和电磁场的定量分析方法; - 电磁场等物理场变化对海洋生物的影响等	- 设计了多种水下电磁场测量仪器并用于长期实时监测; - 提出了电磁场等多物理场扰动的定量分析方法和评估指标; - 将受影响物种的研究由哺乳动物推进到鱼类和无脊椎动物; - 提出在生态环评阶段, 考虑季节性、特定生命阶段、局部尺度和区域尺度的影响	- 开展了较为系统的电缆电磁场有限元模拟研究; - 分析了海洋软骨鱼类等动物物种电磁感知能力及其暴露于电磁场环境中的行为响应; - 制定了《海上风电工程海洋环境影响评价技术规范(行业规范)》电磁场相关内容
栖息地环境的改变	- 海上可再生能源建设对地形地貌的改变; - 海上可再生能源系统造成的遮光效应、冲刷机制变化等; - 海上可再生能源对生态系统影响的调查和解决方法等	- 分析了海上可再生能源系统对海洋地貌和水动力环境的改变以及对光合作用和浮游植物的影响; - 证实了海上新能源设施硬质基底可增加底栖生物数量和多样性; - 提出了多种减少海上可再生能源系统对海洋生态环境影响的调查技术方案和解决方法	- 阐释了典型近海工程建设对海洋生物栖息环境的影响过程和机制; - 建立了多个海域的野外科学观测研究站
海洋动力环境的变化	- 海上可再生能源的资源评估及环境影响评价方法; - 多尺度海洋动力学和生物地球化学过程; - 海上可再生能源装备设计和布局优化等	- 开发了海上可再生能源系统环境影响评估模型; - 指出了大规模浮式平台会显著影响其周边海域流场结构、水体混合、营养盐分布、初级生产力等; - 监测了漂浮式光伏运行期间对水质的影响, 并提出合理布局设计方法来保持水质平衡	- 评估了全球范围内部署浮式光伏的潜力及其对环境的长期影响; - 开发了中国海多尺度流场数值模拟系统; - 研发了近海复杂水体环境的卫星遥感技术
缠绕/碰撞风险	- 海上新能源设备的生态适应性设计原则; - 海上可再生能源系统的长期生态监测技术; - 海上可再生能源系统集成优化、环境影响评估方法等	- 研发了先进的风资源建模和风电机组设计工具, 支持系统优化设计; - 通过多能互补技术集约利用海洋空间, 最小化对海洋生态影响; - 应用了水质、声学等多种监测技术评估海上新能源对生态环境影响, 并建立了长期监测计划	- 开展了海上可再生能源系泊系统的优化设计并打造与其他功能模块的融合发展模式; - 开发了浮标等近海重要生态环境要素的监测技术

关规划^[95~101], 其中海上风电和海上光伏的规划概要情况如表6和7所示。相信基于现有技术支持以及国家政策引导, 我国海上可再生能源技术将进一步向大规模、高技术、低成本、多产业融合、生态环境友好型的方向发展, 成为实现能源可持续发展目标的重要力量。

5.3 未来发展建议

碳达峰、碳中和目标下建设海洋强国策略的实施, 为我国海上可再生能源技术提供了前所未有的发展机遇, 合理开发利用海洋可再生能源技术有利于解

决环境污染和现存能源不足的问题, 特别是在高效产能的同时可以带来生态环境效益, 对积极推动我国海洋经济发展和改善可再生能源结构具有深远意义。目前, 海上可再生能源开发对生态环境的影响研究在我国仍较为缺乏, 生态环境友好型的海上低碳能源技术方案尚在探索之中, 需加快开展大规模海上可再生能源与生态环境协同发展的基础研究, 并在以下多个方面做出努力。

(1) 提高环境监测技术

受限于无法清晰观测海洋动物与海上可再生能源设备水下结构间的相互作用, 研究人员不能准确获取

表 6 我国沿海省市“十四五”海上风电规划概要情况

Table 6 Overview of the “14th Five-Year Plan” for offshore wind power in coastal provinces and cities of China

省市	主要规划内容	政策文件
山东省	初步规划“十四五”期间海上风电争取启动10 GW, 规划到2030年总规模达35 GW, 重点推进渤中、半岛南5 GW以上项目开工建设, 建成并网2 GW, 争取7.6 GW场址纳入国家深远海海上风电规划	《山东省能源发展“十四五”规划》《山东海上风电发展规划(2021–2030年)》
江苏省	“十四五”规划海上风电项目场址共42个, 规模12.12 GW, 规划总面积为1444 km ² , 加快建设近海千万千瓦级海上风电基地, 规划研究深远海千万千瓦级海上风电基地	《江苏省“十四五”海上风电规划》《江苏沿海地区发展规划(2021–2025年)》
浙江省	“十四五”期间, 打造3个以上百万千瓦级海上风电基地, 全省海上风电力争新增装机容量4.5 GW以上, 累计装机容量达到5 GW以上, 开展象山、洞头和苍南深远海风电开发	《浙江省可再生能源发展“十四五”规划》《浙江海上风电发展规划(2021–2035年)》
福建省	“十四五”期间, 重点推进福州、宁德、莆田、漳州、平潭等资源较好地区的海上风电项目, 增加并网装机4.1 GW, 新增开发省管海域海上风电规模约10.3 GW, 力争推动深远海风电开工4.8 GW	《福建省“十四五”能源发展专项规划》《福建省海上风电场工程规划》
广东省	“十四五”期间, 规划新增海上风电装机容量约17 GW; 到2030年, 广东省海上风电规划总装机容量将达115.95 GW, 其中深远海风电89.1 GW	《广东省能源发展“十四五”规划》《广东省海上风电发展规划(2017–2030年)(修编)》
海南省	“十四五”期间, 规划新增海上风电场11个, 分别位于临高西北部、儋州西北部、东方西部、乐东西部和万宁东南部海域, 总装机容量12.3 GW, 单个场址规划装机容量0.50–1.5 GW	《海南省“十四五”能源发展规划》《海南省海上风电场工程规划》
上海市	“十四五”期间, 重点推进奉贤、南汇和金山三大近海海域风电开发, 探索实施深远海域和陆上分散式风电示范试点, 力争新增风机规模1.8 GW	《上海市能源发展“十四五”规划》

表 7 我国沿海省市“十四五”海上光伏规划概要情况

Table 7 Overview of the “14th Five-Year Plan” for offshore photovoltaics in coastal provinces and cities of China

省市	主要规划内容	政策文件
山东省	“十四五”期间, 打造“环渤海”和“沿黄海”双万兆瓦级海上光伏基地, 在具备条件的海域开展漂浮式海上光伏示范; 到2025年海上光伏项目开工15 GW, 建成12 GW左右, 到2030年建成40 GW左右	《山东省建设绿色低碳高质量发展先行区三年行动计划2023–2025》《能源保障网建设行动计划》
江苏省	重点开展43个固定桩基式海上光伏项目场址建设工作, 到2025年全省海上光伏累计并网规模力争达到5 GW左右, 到2027年建成万兆瓦级海上光伏基地, 全省累计并网规模达到10 GW左右	《江苏沿海地区发展规划(2021–2025年)》《江苏省海上光伏开发建设实施方案(2023–2027)》
浙江省	明确将光伏用海列入立体分层设权适用范围, 要求海上光伏项目提出生态建设方案并明确实施主体, 采取必要的生态修复措施, 切实改善海洋生态功能; 明确光伏项目用海控制指标, 做好光伏项目用海保障	《关于推进海域使用权立体分层设权的通知》《关于规范光伏项目用海管理的意见(试行)》
福建省	2022年, 公布了16个近海养殖渔光互补或水面(海上)光伏项目, 总规模为1.772 GW, 其中, 海上光伏项目为410 MW; 2023年, 明确福建省光伏电站申报项目分渔光互补、海上光伏和滩涂光伏三类	《福建省“十四五”能源发展专项规划》《关于组织开展2023年度光伏电站开发建设方案项目申报的通知》
天津市	拓展海域立体利用空间, 鼓励利用近海滩涂区、围而未填海域等区域建设海上光伏项目; 争取建立海上风电、海上光伏、海上地热项目(南港)涉海审批市级“绿色通道”	《关于落实支持“滨城”建设若干政策措施的工作方案》

海洋动物在受到海上可再生能源设备影响时的反应能力与行为信息, 因此提高水下环境监测技术, 验证海上可再生能源发电系统环境影响因素的监测识别方法在现阶段就显得尤为迫切。目前用于观察海洋动物与海洋可再生能源设备相互作用的最常用仪器是被动和主动声学仪器以及光学相机, 也有国家开始应用水质和遥感等监测方法来评估海上可再生能源对生态环境的

影响, 但仍存在监测针对性不足、监测要素少、时空分辨率低、实时化程度差等问题。后续发展需进一步设计能够承受恶劣海洋环境的监测设备及运行仪器, 提升船载数据采集系统的电力管理能力, 建立面向海上可再生能源的天-空-地-海一体化综合实证监测平台, 实现对海洋生态环境多影响因素的精细化识别与监测, 揭示海上可再生能源设备与海洋生态环境的交

互作用机理。

(2) 推动技术融合发展

形成生态环境友好型的海上低碳能源技术方案, 需要努力探索海上可再生能源设备的多种用途, 打造海上可再生能源设备的多功能开发模式, 推动海上可再生能源技术与其他不同种类功能技术的融合发展, 实现多种技术的协同开发和有益结合。例如, 海上可再生能源技术与海水养殖技术的应用场景相同, 且都逐渐向深远海聚焦, 深远海条件下, 海水养殖设备对稳定供电的需求越来越高, 通过传统的船载发电机或陆上国家电网线路对其进行电力输送的方式已不再适用, 海上可再生能源发电设备则很好地解决了这一问题, 这也为两者相辅相成的融合发展带来了重要契机。随着各项技术的不断成熟, “风渔融合”、“光渔融合”和“波渔融合”等海上可再生能源设备与海水养殖设备的协同开发将在实际应用中展现出更大的潜力。

(3) 加强海洋空间规划

海上可再生能源设备的增长将导致对海洋空间的使用增加, 并可能与现有用海活动发生冲突, 这些问题可以通过实施海洋空间规划来部分解决。传统的海洋管理形式是在单个部门基础上管理海上活动, 很少考虑在同一空间内发生的其他活动, 因此可能导致个别部门只针对个别案例来分配海洋空间, 缺乏一个综合的策略方针。海洋空间规划是国际上提倡的一种管理海洋活动的改进方法, 可以面向未来合理分配海洋空

间, 解决部门间的竞争, 减少部门冲突, 增加行业的透明度和确定性。未来海洋空间的合理使用需统一规划, 并做好与可再生能源发展、生态环境、海洋海事等相关规划对接, 推进海域使用权立体分层设权, 做好海上可再生能源项目用海保障, 融合海洋牧场等新型发展模式, 提高海洋空间资源的利用效率, 形成促进海上可再生能源大规模发展的合力, 平衡环境、社会和经济效益。

(4) 完善部门审批机制

海上融合项目的审批往往涉及多个管理部门, 如海上可再生能源项目管理属于国家能源局, 海水养殖项目管理属于农业农村部, 海域审批在自然资源部, 最终还得经过生态环境部审批。因此, 为提升项目审批效率, 避免审批流程冗杂, 需要完善各部门协调审批机制, 尽快制定出台海上融合项目的专项管理办法, 进一步规范审批流程。同时, 还需加强政策创新, 研究制定相关扶持政策, 在海洋空间规划、海上设施建设、生态健康养殖等方面给予政策支持, 鼓励和引导地方政府出台补贴、财税等方面的优惠政策, 指导地方能源主管部门积极协助海上项目投资企业与海洋、气象、海事、渔业、军事、环保等有关部门做好衔接, 构建产业健康发展的政策体系, 从而推动海上可再生能源技术规模化利用, 加速发展海上可再生能源及其相关产业, 有力支撑我国碳达峰、碳中和目标的实现。

参考文献

- 1 Fatih B, Laura C, Tim G, et al. Key clean energy technologies. World Energy Outlook 2024. IEA (International Energy Agency), Paris, 2024
- 2 Williams R, Zhao F, Backwel B, et al. Offshore wind as a key technology in the global energy transition. Global Offshore Wind Report 2024. GWEC (Global Wind Energy Council), Brussels, 2024
- 3 IRENA (International Renewable Energy Agency). Wind Energy Data & Solar Energy Data & Ocean Energy Data. Renew Gener, 2024, 1: 1–3
- 4 Ana B M. Annual Report: An overview of ocean energy activities in 2023. Global Offshore Wind Report 2024. GWEC (Global Wind Energy Council), Brussels, 2024
- 5 Peng W, Wang F, Wang J. Status and development suggestion for the development and utilization of ocean energy in China (in Chinese). Mar Econ, 2022, 12: 70–75 [彭伟, 王芳, 王冀. 我国海洋可再生能源开发利用现状及发展建议. 海洋经济, 2022, 12: 70–75]
- 6 Andrea E C, Deborah J R. Marine renewable energy: Environmental effects and monitoring strategies. OES-Environmental 2020 State of the Science Report. IEA-OES (International Energy Agency Ocean Energy Systems), Paris, 2020
- 7 Hooper T, Armstrong A, Vlaswinkel B. Environmental impacts and benefits of marine floating solar. Sol Energy, 2021, 219: 11–14
- 8 Pei Y Q, Li Z C, Pang Y Z. Summary of research on the impact, prediction, mitigation, and testing of offshore wind power noise (in Chinese). Water Res Plann Des, 2023, 7: 121–125 [裴雨晴, 李志超, 庞业珍. 海上风电噪声影响、预报、控制及测试研究综述. 水利规划与设计, 2023, 7: 121–125]

- 9 Ellabban O, Abu-Rub H, Blaabjerg F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renew Sustain Energy Rev*, 2014, 39: 748–764
- 10 Astariz S, Vazquez A, Iglesias G. Evaluation and comparison of the levelized cost of tidal, wave, and offshore wind energy. *J Renew Sustain Energy*, 2015, 7: 815–821
- 11 Cui L, Li M, Bai X. Current status and development trend of marine renewable energy technologies (in Chinese). *Ship Eng*, 2022, 43: 14–25 [崔琳, 李蒙, 白旭. 海洋可再生能源技术现状与发展趋势. *船舶工程*, 2022, 43: 14–25]
- 12 Edwards E C, Holcombe A, Brown S, et al. Trends in floating offshore wind platforms: A review of early-stage devices. *Renew Sustain Energy Rev*, 2024, 193: 114271
- 13 Hong S, McMorland J, Zhang H X, et al. Floating offshore wind farm installation, challenges and opportunities: A comprehensive survey. *Ocean Eng*, 2024, 304: 117793
- 14 Wang F Q, Hao J G, Li S, et al. Key technologies and development trends of floating offshore wind turbine (in Chinese). *Water Power*, 2022, 48: 9–12, 117 [王富强, 郝军刚, 李帅, 等. 漂浮式海上风电关键技术与发展趋势. *水力发电*, 2022, 48: 9–12, 117]
- 15 Edwards E C, Holcombe A, Brown S, et al. Evolution of floating offshore wind platforms: A review of at-sea devices. *Renew Sustain Energy Rev*, 2023, 183: 113416
- 16 Zambrano T, MacCready T, Kiceniuk J T, et al. Dynamic modeling of deepwater offshore wind turbine structures in Gulf of Mexico storm conditions. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Hamburg, 2006. 629–634
- 17 Ishihara T, Taki S. Fukushima floating offshore wind farm demonstration project (Fukushima FORWARD). *Fukushima Offshore Wind Consort*, 2011, 1: 1–6
- 18 Yoshimoto H, Awashima Y, Kitakoji Y, et al. Development of floating offshore substation and wind turbine for Fukushima FORWARD. In: *Proceedings of the International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy*. Tokyo, 2013. 28–30
- 19 Soares-Ramos E P P, de Oliveira-Assis L, Sarrias-Mena R, et al. Current status and future trends of offshore wind power in Europe. *Energy*, 2020, 202: 117787
- 20 Yan X R, Zhang N N, Ma K C, et al. Overview of current situation and trend of offshore wind power development in China (in Chinese). *Power Generat Technol*, 2024, 45: 1–12 [严新荣, 张宁宁, 马奎超, 等. 我国海上风电发展现状与趋势综述. *发电技术*, 2024, 45: 1–12]
- 21 Zheng J, Yang S H, Liu C G, et al. Development of marine renewable energy equipment and technologies (in Chinese). *Chin J Eng Sci*, 2023, 25: 22–32 [郑洁, 杨淑涵, 柳存根, 等. 海洋可再生能源装备技术发展研究. *中国工程科学*, 2023, 25: 22–32]
- 22 Ma Y, Lv Y G, Wen Y C, et al. Overview of offshore photovoltaic power plant infrastructure (in Chinese). *Sci Technol Innov*, 2023, 20: 92–95 [马月, 吕永刚, 温友超, 等. 海上光伏电站基础结构的综述. *科技与创新*, 2023, 20: 92–95]
- 23 López M, Claus R, Soto F, et al. Advancing offshore solar energy generation: The HelioSea concept. *Appl Energy*, 2024, 359: 122710
- 24 Geng B L, Tang X, Jin R J. Prospects for research on offshore floating photovoltaic structures and their hydrodynamic issues (in Chinese). *Ocean Eng*, 2024, 42: 190–208 [耿宝磊, 唐旭, 金瑞佳. 海上浮式光伏结构及其水动力问题研究展望. *海洋工程*, 2024, 42: 190–208]
- 25 Jiang G N. Analysis of the current situation and development trend of China's offshore photovoltaic industry (in Chinese). *Mod Indust Econ Inform*, 2024, 14: 77–79 [姜冠男. 我国海上光伏产业现状及发展趋势分析. *现代工业经济和信化*, 2024, 14: 77–79]
- 26 Wen Y, Lin P Z. Offshore solar photovoltaic potential in the seas around China. *Appl Energy*, 2024, 376: 124279
- 27 Shi H D, Liu Z. Research status and development tendency of ocean wave energy (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2021, 39: 7 [史宏达, 刘臻. 海洋波浪能研究进展及发展趋势. *科技导报*, 2021, 39: 7]
- 28 López I, Andreu J, Ceballos S, et al. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renew Sustain Energy Rev*, 2013, 27: 413–434
- 29 Zhang D, Li W, Lin Y. Wave energy in China: Current status and perspectives. *Renew Energy*, 2009, 34: 2089–2092
- 30 Hansen R H, Kramer M M, Vidal E. Discrete displacement hydraulic power take-off system for the Wavestar wave energy converter. *Energies*, 2013, 6: 4001–4044
- 31 Falcão A F O, Henriques J C C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renew Energy*, 2016, 85: 1391–1424
- 32 Henderson R. Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter. *Renew Energy*, 2006, 31: 271–283
- 33 Kofoed J P, Frigaard P, Friis-Madsen E, et al. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. *Renew Energy*, 2006, 31: 181–189

- 34 Lu Q, Shi H D. Progress and future trend of wave energy technology in China (in Chinese). *Coast Eng*, 2022, 41: 1–12 [路晴, 史宏达. 中国波浪能技术进展与未来趋势. *海岸工程*, 2022, 41: 1–12]
- 35 Sheng S W, Wang K L, Lin H J, et al. Model research and open sea tests of 100 kW wave energy convertor Sharp Eagle Wanshan. *Renew Energy*, 2017, 113: 587–595
- 36 Nguyen H P, Wang C M, Tay Z Y, et al. Wave energy converter and large floating platform integration: A review. *Ocean Eng*, 2020, 213: 107768
- 37 Liu Y, Li Y, He F, et al. Comparison study of tidal stream and wave energy technology development between China and some Western Countries. *Renew Sustain Energy Rev*, 2017, 76: 701–716
- 38 Huang S, Sheng S W, Gerthoffert A, et al. Numerical design study of multipoint mooring systems for the floating wave energy converter in deep water with a sloping bottom. *Renew Energy*, 2019, 136: 558–571
- 39 Liu Z, Qu N, Han Z, et al. Study on energy conversion and storage system for a prototype buoys-array wave energy converter. *Energy Sustain Dev*, 2016, 34: 100–110
- 40 Yang S H, He H Z, Chen H, et al. Experimental study on the performance of a floating array-point-raft wave energy converter under random wave conditions. *Renew Energy*, 2019, 139: 538–550
- 41 Sun P Y, Hu S, He H Z, et al. Structural optimization on the oscillating-array-buoys for energy-capturing enhancement of a novel floating wave energy converter system. *Energy Convers Manage*, 2021, 228: 113693
- 42 Sun P Y, Li Q, He H Z, et al. Design and optimization investigation on hydraulic transmission and energy storage system for a floating-array-buoys wave energy converter. *Energy Convers Manage*, 2021, 235: 113998
- 43 Sun P Y, He H Z, Chen H, et al. Sensitivity analysis of geometric characteristics on the cavity-buoy for energy capture efficiency enhancement of a semi-submersible floating-array-buoy wave energy converter system. *Ocean Eng*, 2024, 294: 116735
- 44 Wang M, Li M, Xia Z Y, et al. Model test of buoyant pendulum wave-power generation device (in Chinese). *Ocean Technol*, 2013, 32: 79–82 [王锰, 李蒙, 夏增艳, 等. 浮力摆式波浪能发电装置模型试验. *海洋技术*, 2013, 32: 79–82]
- 45 Liu Y J, Wu S, Wang D S, et al. Research progress of ocean wave energy converters (in Chinese). *J Shandong Univ (Eng Sci)*, 2021, 51: 63–75 [刘延俊, 武爽, 王登帅, 等. 海洋波浪能发电装置研究进展. *山东大学学报(工学版)*, 2021, 51: 63–75]
- 46 Lü Q, Li D T, Tang W T, et al. Design of energy harvesting efficiency of “Haiyuan 1” wave power generating platform’s buoy testing system based on LabVIEW. *J Ship Mech*, 2015, 19: 264–272
- 47 Lü Q, Li D T, Li D T, et al. Study on energy harvesting efficiency for wave power generating platform buoy of “Haiyuan 1” in actual sea conditions (in Chinese). *J Zhejiang Ocean Univ (Nat Sci)*, 2015, 34: 362–366 [吕沁, 李德堂, 李达特, 等. 实海况下“海院1号”波浪发电平台浮筒取能效率研究. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2015, 34: 362–366]
- 48 Xu Q L, Li Y H, Yu Y H, et al. Experimental and numerical investigations of a two-body floating-point absorber wave energy converter in regular waves. *J Fluids Struct*, 2019, 91: 102613
- 49 Gao H, Yu Y. The dynamics and power absorption of cone-cylinder wave energy converters with three degree of freedom in irregular waves. *Energy*, 2018, 143: 833–845
- 50 Zheng S M, Zhang Y L, Sheng W A. Maximum theoretical power absorption of connected floating bodies under motion constraints. *Appl Ocean Res*, 2016, 58: 95–103
- 51 Wang C, Xu H C, Zhang Y L, et al. Power capture analysis of a five-unit oscillating water column array integrated into a breakwater in terms of flow field visualization. *Energy Convers Manage*, 2023, 293: 117449
- 52 Zhang H M, Zhou B Z, Vogel C, et al. Hydrodynamic performance of a dual-floater hybrid system combining a floating breakwater and an oscillating-buoy type wave energy converter. *Appl Energy*, 2020, 259: 114212
- 53 Feng N J. Application of magnetic gear and field-modulated permanent magnet generator in ocean energy generation (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Nanjing: Southeast Univ, 2018. 14–18 [封宁君. 磁齿轮及磁场调制永磁电机在海洋能发电系统的应用研究. 博士学位论文. 南京: 东南大学, 2018. 14–18]
- 54 Wang S M, Li M M, Li Z Y, et al. Development overview of international tidal energy utilization technology (in Chinese). *Ship Eng*, 2020, 42: 23–28, 487 [王世明, 李淼淼, 李泽宇, 等. 国际潮流能利用技术发展综述. *船舶工程*, 2020, 42: 23–28, 487]
- 55 Sun K, Chen T Y. Current status and trends of research on ocean tidal energy generation technology (in Chinese). *Ship Eng*, 2024, 46: 16–27 [孙科, 陈天宇. 海洋潮流能发电技术研究现状与趋势. *船舶工程*, 2024, 46: 16–27]

- 56 Li G, Zhu W D. Tidal current energy harvesting technologies: A review of current status and life cycle assessment. *Renew Sustain Energy Rev*, 2023, 179: 113269
- 57 Jiang Y M, Yao H L. Study of an oscillating hydrofoil with chordwise active deformation on energy capture efficiency (in Chinese). *Period Ocean Univ China*, 2024, 54: 107–115 [姜祎萌, 姚慧岚. 振荡水翼弦向主动变形提高获能效率的机理研究. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2024, 54: 107–115]
- 58 Laws N D, Epps B P. Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook. *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, 57: 1245–1259
- 59 Segura E, Morales R, Somolinos J A. A strategic analysis of tidal current energy conversion systems in the European Union. *Appl Energy*, 2018, 212: 527–551
- 60 Risch D, van Geel N, Gillespie D, et al. Characterisation of underwater operational sound of a tidal stream turbine. *J Acoust Soc Am*, 2020, 147: 2547–2555
- 61 Grondeau M, Guillou S, Mercier P, et al. Wake of a ducted vertical axis tidal turbine in turbulent flows, LBM actuator-line approach. *Energies*, 2019, 12: 4273
- 62 Li W, Shi H D, Liu Z, et al. Research progress of ocean energy in China and its development proposals (in Chinese). *Sol Energy*, 2024, 7: 79–88 [李伟, 史宏达, 刘臻, 等. 中国海洋能研究现状及未来发展建议. *太阳能*, 2024, 7: 79–88]
- 63 Zhou H B. The optimization of blade design for horizontal axis marine current turbine (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Hangzhou: Zhejiang University, 2018 [周宏宾. 水平轴海流能机组叶片优化设计. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2018]
- 64 Zhang J S, Wang G H, Lin X F. A review of recent development and key technology problems in utilization of tidal stream energy (in Chinese). *J Hohai Univ (Nat Sci)*, 2021, 49: 220–232 [张继生, 汪国辉, 林祥峰. 潮流能开发利用现状与关键科技问题研究综述. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49: 220–232]
- 65 Popper A N, Haxel J, Staines G, et al. Marine energy converters: Potential acoustic effects on fishes and aquatic invertebrates. *J Acoust Soc Am*, 2023, 154: 518–532
- 66 Hasselman D J, Hemery L G, Copping A E, et al. “Scaling up” our understanding of environmental effects of marine renewable energy development from single devices to large-scale commercial arrays. *Sci Total Environ*, 2023, 904: 166801
- 67 Wang R X, Xu X M, Zou Z G, et al. Dominant frequency extraction for operational underwater sound of offshore wind turbines using adaptive stochastic resonance. *J Mar Sci Eng*, 2022, 10: 1517
- 68 Huang L F, Xu X M, Yang L L, et al. Underwater noise characteristics of offshore exploratory drilling and its impact on marine mammals. *Front Mar Sci*, 2023, 10: 1097701
- 69 Tao Y, Wang Q, Xu X M. Study on underwater noise assessment and management of offshore wind farms (in Chinese). *Admin Technol Environ Monit*, 2021, 33: 1–4, 8 [陶毅, 王强, 许肖梅. 海洋风电场水下噪声评估与管理研究. *环境监测管理和技术*, 2021, 33: 1–4, 8]
- 70 Bai Z G, Wei X Z, Pang Y Z. Analysis and experiment on sound isolation of air-tube layer on underwater cylindrical shell (in Chinese). *J Ship Mech*, 2018, 22: 645–652 [白振国, 韦喜忠, 庞业珍. 水下圆柱壳空气管隔声性能分析及试验研究. *船舶力学*, 2018, 22: 645–652]
- 71 Yu J Y, Xu X M, Zhang X H, et al. Finite element analysis of underwater piling noise field (in Chinese). *Tech Acoust*, 2019, 38: 448–450 [于晋源, 许肖梅, 张鑫海, 等. 水下打桩噪声场的有限元分析. *声学技术*, 2019, 38: 448–450]
- 72 Leung D Y C, Yang Y. Wind energy development and its environmental impact: A review. *Renew Sustain Energy Rev*, 2012, 16: 1031–1039
- 73 Zhou Y L, Xu X M, Zhang X H, et al. Vocalization behavior differs across reproductive stages in cultured large yellow croaker *Larimichthys crocea* (Perciformes: Sciaenidae). *Aquaculture*, 2022, 556: 738267
- 74 Brian P, Christopher B, Dorian M O. Risk to marine animals from underwater noise generated by marine renewable energy devices. OES-Environmental 2020 State of the Science Report. IEA-OES (International Energy Agency Ocean Energy Systems), Paris, 2020
- 75 Taormina B, Bald J, Want A, et al. A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. *Renew Sustain Energy Rev*, 2018, 96: 380–391
- 76 Andrew B G, Marieke D, Levy G T. Risk to animals from electromagnetic fields emitted by electric cables and marine renewable energy devices. OES-Environmental 2020 State of the Science Report. IEA-OES (International Energy Agency Ocean Energy Systems), Paris, 2020
- 77 Cai L, Jiang S, Ma L, et al. Review of the research on the effects of electromagnetic radiation from offshore wind power on marine organisms (in Chinese). *Ocean Dev Manag*, 2019, 36: 72–76 [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. *海洋开发与管理*, 2019, 36: 72–76]
- 78 Lenaig G H, Deborah J R. Changes in benthic and pelagic habitats caused by marine renewable energy devices. OES-Environmental 2020 State

- of the Science Report. IEA-OES (International Energy Agency Ocean Energy Systems), Paris, 2020
- 79 Benjamins S, Williamson B, Billing S L, et al. Potential environmental impacts of floating solar photovoltaic systems. *Renew Sustain Energy Rev*, 2024, 199: 114463
- 80 Jonathan M W, Grace C, Andrea E C, et al. Changes in oceanographic systems associated with marine renewable energy devices. OES-Environmental 2020 State of the Science Report. IEA-OES (International Energy Agency Ocean Energy Systems), Paris, 2020
- 81 Lysel G. Encounters of marine animals with marine renewable energy device mooring systems and subsea cables. OES-Environmental 2020 State of the Science Report. IEA-OES (International Energy Agency Ocean Energy Systems), Paris, 2020
- 82 Carol E S, Andrew C S, Elizabeth M, et al. Collision risk for animals around turbines. OES-Environmental 2020 State of the Science Report. IEA-OES (International Energy Agency Ocean Energy Systems), Paris, 2020
- 83 Daniel J H, David R B, Robert C, et al. Environmental monitoring technologies and techniques for detecting interactions of marine animals with turbines. OES-Environmental 2020 State of the Science Report. IEA-OES (International Energy Agency Ocean Energy Systems), Paris, 2020
- 84 Chapman J, Williamson B J, Couto A, et al. Integrated survey methodologies provide process-driven framework for marine renewable energy environmental impact assessment. *Mar Environ Res*, 2024, 198: 106532
- 85 Grear M E, McVey J R, Cotter E D, et al. Quantifying background magnetic fields at marine energy sites: Challenges and recommendations. *J Mar Sci Eng*, 2022, 10: 687
- 86 Maharjan M, Ekic A, Beedle M, et al. Evaluating grid strength under uncertain renewable generation. *Int J Electrical Power Energy Syst*, 2023, 146: 108737
- 87 Mikaela C F, Deborah J R. Social and economic data collection for marine renewable energy. OES-Environmental 2020 State of the Science Report. IEA-OES (International Energy Agency Ocean Energy Systems), Paris, 2020
- 88 Li S C, Wang Q L, Liu Y L. Renewable energy development in China under dual carbon goal: Opportunities and challenges (in Chinese). *Clim Environ Res*, 2024, 29: 390–398 [李双成, 王巧玲, 刘迎陆. “双碳”目标下的中国可再生能源发展: 机遇与挑战. *气候与环境研究*, 2024, 29: 390–398]
- 89 Wang X N, Ma C L. Utilization of marine renewable energy resources under the goal of carbon peaking and carbon neutrality (in Chinese). *Integr Intell Energy*, 2021, 43: 91–96 [王项南, 麻常雷. “双碳”目标下海洋可再生能源资源开发利用. *华电技术*, 2021, 43: 91–96]
- 90 Zhang W. Propagation research of offshore wind farm underwater noise (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016. 4–9 [章蔚. 海上风电场水下噪声传播研究. 硕士学位论文. 上海: 上海海洋大学, 2016. 4–9]
- 91 Huang Y C. Study on ecological environment impact of offshore wind power project (in Chinese). *Telecom World*, 2018, 3: 205–206 [黄意财. 海上风电工程生态环境影响的研究. *通讯世界*, 2018, 3: 205–206]
- 92 Su W, Wu N, Zhang L L, et al. A review of research on the effect of offshore wind power project on marine organisms (in Chinese). *Mar Sci Bull*, 2020, 39: 291–299 [苏文, 吴霓, 章柳立, 等. 海上风电工程对海洋生物影响的研究进展. *海洋通报*, 2020, 39: 291–299]
- 93 Wang T, Ru X S, Zhang L B. Research progress on the comprehensive impact of offshore wind farms on the marine ecological environment and biological resources (in Chinese). *Mar Sci*, 2022, 46: 95–104 [王婷, 茹小尚, 张立斌. 海上风电对海洋生态环境与海洋生物资源的综合影响研究进展. *海洋科学*, 2022, 46: 95–104]
- 94 Cui Y, Zhao H D. Marine renewable energy project: The environmental implication and sustainable technology. *Ocean Coast Manage*, 2023, 232: 106415
- 95 Lin Y X, Zhang J Y. Development status and prospect of offshore wind power (in Chinese). *Distrib Energy*, 2023, 8: 1–10 [林玉鑫, 张京业. 海上风电的发展现状与前景展望. *分布式能源*, 2023, 8: 1–10]
- 96 Zhang S S, Yang L Q, Liu Q, et al. Research on the development of offshore wind power hydrogen production industry in Guangdong province (in Chinese). *China Resour Compreh Util*, 2022, 40: 185–188 [张洒洒, 杨伦庆, 刘强, 等. 广东省海上风电制氢产业发展研究. *中国资源综合利用*, 2022, 40: 185–188]
- 97 Ma Z, Dang A T, Li B, et al. High quality development countermeasures of offshore wind power in Shandong province (in Chinese). *Ocean Dev Manag*, 2022, 39: 77–81 [马哲, 党安涛, 李彬, 等. 山东省海上风电产业高质量发展对策研究. *海洋开发与管理*, 2022, 39: 77–81]
- 98 Chen J P, Li G, Liu B, et al. Current status and prospect of membrane-based offshore floating photovoltaic technology (in Chinese). *South Energy Constr*, 2023, 10: 1–10 [陈继平, 李刚, 刘博, 等. 薄膜型海上漂浮式光伏技术现状及展望. *南方能源建设*, 2023, 10: 1–10]
- 99 Wang Z, Li N, Wang M, et al. Analysis and suggestions of offshore wind power industrial policy in China (in Chinese). *Energy China*, 2023, 45: 40–48 [王震, 李楠, 王萌, 等. 我国海上风电产业政策分析与建议. *中国能源*, 2023, 45: 40–48]

- 100 Zhang H F. A brief analysis of the market prospects of offshore photovoltaic (in Chinese). *Pearl River Transp*, 2024, 7: 130–132 [张海峰. 海上光伏业务市场前景浅析. *珠江水运*, 2024, 7: 130–132]
- 101 Yue Y F, Peng X R, Wang H Q, et al. Prospect of offshore floating photovoltaic power generation technology and its integrated development (in Chinese). *South Energy Constr*, 2024, 11: 42–50 [岳云峰, 彭欣然, 王洪庆, 等. 海上漂浮光伏发电技术及其融合发展展望. *南方能源建设*, 2024, 11: 42–50]

Outlook on the development of eco-friendly offshore renewable energy technologies

SUN PengYuan¹, JIANG ZhiBing², CHEN YouGan³, SONG XiaoHui⁴, PANG YeZhen⁵, CAI BoFeng⁴, XU XiaoMei³ & LI Ye¹

¹ Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

² Key Laboratory of Marine Ecosystem Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

³ College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361101, China

⁴ Carbon Peak and Carbon Neutrality Research Center, Environmental Planning Institute, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100041, China

⁵ Key Laboratory of Ship Vibration and Noise, China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China

With the implementation of the strategy of building maritime power, offshore renewable energy technology development is crucial for ensuring national energy security and enhancing economic efficiency. However, such efforts can also have ecological and environmental impacts that warrant significant attention. The responsible development of eco-friendly offshore renewable energy technologies and equipment is essential for actively promoting the growth of China's marine economy and improving the marine ecological environment, which involves the structure design, material selection, deployment location, and so on. This study examines several key offshore renewable energy technologies, encompassing offshore wind power and photovoltaics, wave energy, and tidal energy and their effects on the ecological environment, comparing the research status in these fields between other countries and China and investigating the policies and plans implemented by various coastal provinces and cities in China. With the foreseeable rapid increase in the installed capacity of offshore renewable energy equipment, it is urgent to balance the relationship between offshore renewable energy technology and the marine ecological environment. Based on this analysis, the study offers recommendations for the future development of eco-friendly offshore renewable energy technologies, providing valuable insights for exploring environmentally sustainable offshore low-carbon energy solutions in China.

offshore renewable energy, ecological environmental impact, sustainable offshore low-carbon energy solutions, carbon peak and carbon neutrality

doi: [10.1360/SST-2024-0267](https://doi.org/10.1360/SST-2024-0267)