

引用格式: 刘曙光, 张平, 赵昕玥. 新质生产力视角下中国海上新能源综合开发利用模式探讨[J]. 资源科学, 2025, 47(4): 691-702. [Liu S G, Zhang P, Zhao X Y. Study on integrated development and utilization modes of China's offshore renewable energy from the perspective of new-quality productivity[J]. Resources Science, 2025, 47(4): 691-702.] DOI: 10.18402/resci.2025.04.02

# 新质生产力视角下中国海上新能源 综合开发利用模式探讨

刘曙光<sup>1</sup>, 张平<sup>1,2</sup>, 赵昕玥<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学经济学院, 青岛 266100; 2. 自然资源部海洋发展战略研究所, 北京 100032)

**摘要:**【目的】海上新能源在全球气候变化应对中扮演重要角色。然而,当前海洋能开发单一利用模式的弊端已初露端倪。中国作为海上新能源大国,亟须为自身及全球性能源问题提供解决方案。【方法】本文通过文献分析和案例分析相结合的方法,详尽梳理了海上新能源开发利用出现的瓶颈及现实问题,总结归纳海上新能源综合开发利用各类模式及优势,基于海洋新质生产力发展要求研究提出中国海上新能源综合开发利用的趋势与策略。【结果】①当前单一海上新能源开发利用模式难以有效实现海洋对气候目标的贡献。②海上新能源发展存在占海面积大,空间利用率不高以及产业协同不足等现实问题。③海洋新质生产力理论框架可较好地研判海上新能源开发利用模式转型的四大趋势,即能能耦合、能产耦合、链式耦合、多重耦合,而4种综合利用模式也从实践端支撑了新质生产力的进一步发展。④基于现有案例和数据,经粗略估计,海上新能源综合开发利用模式可实现空间兼容与产业互补,具有良好的综合效益和商业前景。【结论】中国海上新能源开发利用已到了转型的关键时期,推动海上新能源与各类海上生产活动融合发展、拓展应用场景成为转型重点。有条件的沿海地区应明确综合开发理念,强化政策配套和指引,以能源协同、产业协同为突破口,引领构建具有全球影响力的新型海上新能源开发利用模式与产业体系,为发展海洋经济、建设海洋强国提供有力支撑。

**关键词:** 海上新能源; 海洋新质生产力; 模式转型; 综合利用; 案例分析

DOI: 10.18402/resci.2025.04.02

## 1 引言

进入21世纪第二个10年,以风电、太阳能等为代表的能源发展到第二阶段,即大规模走向海洋空间的时代。以海上风电为例,2014—2023年,全球海上风电装机容量由8.5 GW增长至72.6 GW,中国海上风电装机容量由440 MW增长至37.29 GW,增幅显著<sup>[1]</sup>。尽管海上风力发电取得长足进展,但不足以支持可持续的能源转型。要实现《巴黎协定》设定的全球平均气温较工业化前水平升温限制在1.5℃内的情景,若单以海上风电作为支撑,全球需要近500 GW的海上风电装机容量;到2050年,这

一数字将上升到2465 GW<sup>[2]</sup>。国际能源署认为,与其他海洋可再生能源共存的海上风电是实现全球气候目标的关键。中国作为能源生产与消费大国,为高质量实现“双碳”目标的承诺,必须大力发展可再生能源,大力促进能源结构转型<sup>[3]</sup>,尤其是要进一步挖掘海上不同能源类型的发展潜能,创新海上新能源开发利用场景,支撑党的二十届三中全会提出的“加快规划建设新型能源体系”“健全海洋资源开发保护制度”等改革任务。

海上新能源与海洋能、海洋可再生能源的内涵有所不同。海洋能一般仅包括潮汐能、波浪能、盐

收稿日期: 2024-06-25; 修订日期: 2024-12-14

基金项目: 国家社会科学基金研究重大专项(24VHQ004); 浙江文化研究工程重大项目(24WH02-6Z)

作者简介: 刘曙光,男,山东夏津人,博士,教授,研究方向为区域创新与国际经济合作。E-mail: 2000046@ouc.edu.cn

通讯作者: 张平,男,河南漯河人,博士研究生,研究方向为海洋经济理论及相关政策研究。E-mail: zhangping@cimamnr.org.cn

差能和温差能<sup>[14]</sup>。在中国的海洋管理中,海洋可再生能源的范围要更广泛,根据《全国海洋经济发展“十三五”规划》,海洋可再生能源除了潮汐能、波浪能、温差能外,还包括了海上风能。2022年7月1日实施的《海洋及相关产业分类》(GB/T20794-2021)进一步拓展了海洋电力产业的边界,将海上光伏发电及海洋风光互补发电纳入其中。综上,基于各类能源开发活动不断在海上涌现,结合中国海洋能源开发政策,本文海上新能源的范围包括潮汐能、波浪能、温差能、盐差能等海洋能,以及海上风能、太阳能等其他能源。

21世纪能源转型的目标给海上新能源的发展提供了历史机遇。然而,当前海上新能源开发占用海洋空间大,分布不集中,不但影响海流运动模式、海域温度、盐度条件,还客观挤占传统海洋产业活动空间,致使用海矛盾日益尖锐。因此,增强海上能源产业自身及外向整合力,提高能源开发利用效率和溢出效应,是海上新能源实现快速、健康发展的关键。

对于海上新能源综合开发利用这一命题,首先,需探究不同类别的海洋能在空间上集聚,能否增强能源间的耦合协调度。从现有理论层面的探讨看,海上不同能源之间互补性很强,潮汐能受月球、太阳和地球既定周期的影响,具有较高的可预测性<sup>[3]</sup>;波浪能、太阳能与风能互补,当风停止时,波浪能和太阳能可继续发电<sup>[3]</sup>。这些特点可为电网带来急需的稳定性和灵活性。陆域多能互补,如风电协同配置光伏、水电等产生了良好效益<sup>[5,6]</sup>,也为海洋新能源综合开发利用提供了借鉴参考。其次,还需进一步探讨综合开发利用模式是否带来经济效益。除多能互补模式产生的直接收益外,能源供给方与需求方的结合模式将产生更为巨大的商业潜力。有学者从能源生产、运输、消费全产业链着手,研究发现电力输送与消费环节对可再生能源竞争力具有显著影响<sup>[7]</sup>。海上可再生能源与海上用能产业的结合创造了新的发展前景,比如海上新能源可以支持航运、油气开采、海水冷却、海水淡化等的电力需求并帮助相关海洋活动脱碳<sup>[3]</sup>,这种海上新能源加产业的综合利用可降低海洋活动的平准化度电成本(Levelized Cost of Energy, LCOE),激发海洋

能的市场需求。海上新能源对“蓝色经济”的整合力,还表现在同其他产业的“技术伴生”“运维伴生”潜力,如海上新能源可与海洋牧场、石油和天然气工业共享各自供应链的技术和要素,实现投资及运维过程的要素整合<sup>[8]</sup>。

综上,无论是理论基础、实践探索还是市场前景、政策安排(图1),海上新能源已经具备了综合开发利用的条件。在此背景下,中国必须明晰海上新能源综合开发利用的政策导向,完善制度安排,积极吸收国际先进经验,巩固海上新能源产业优势,培育打造海洋新质生产力。

## 2 海上新能源开发利用分析框架

### 2.1 海洋新质生产力理论框架

海洋新质生产力是生产力在海洋经济高质量发展过程中现代化转型的最新体现,以新发展理念为引领,展现新型人海关系,具备生产力的本质特征<sup>[9]</sup>。海洋新质生产力的“新”主要体现在海洋人力资本的升级、海洋劳动对象的优化、海洋劳动工具的革新;海洋新质生产力的“质”主要体现在对海洋资源的高效集约利用上,高效、智能、可持续的海洋资源利用策略,无疑是构成海洋新质生产力“质”的重要表现。从海洋生产力的发展过程看,海洋新质生产力相较于过去的海洋资源开发而言,强调的不仅仅是生产能力和产出数量的增加,而是海洋生产方式、技术、管理等的根本性革新,是海洋生产力质的飞跃。党的十八大以来,中国海洋生产总值从2013年的5.4万亿元提高到2024年的10.5万亿元,无论是政府还是社会各界对发展海洋生产力的期待和要求也在发生变化。从“建设海洋强国”到“坚持陆海统筹,加快建设海洋强国”,再到不断探索推进“发展海洋经济,保护海洋生态环境,加快建设海洋强国”,体现了海洋事业发展的历史进程与海洋生产力之间的伴随与互促。

在这个过程中,海洋新质生产力逐渐脱胎。具体体现在:①海洋发展进入新阶段。当前中国进入全面建设社会主义现代化国家、向第二个百年奋斗目标进军的阶段,在世界百年未有之大变局下,海洋作为联通世界的桥梁和改革开放的舞台,需要释放更大的潜能,为经济增长与发展安全发挥更大的作

2025年4月

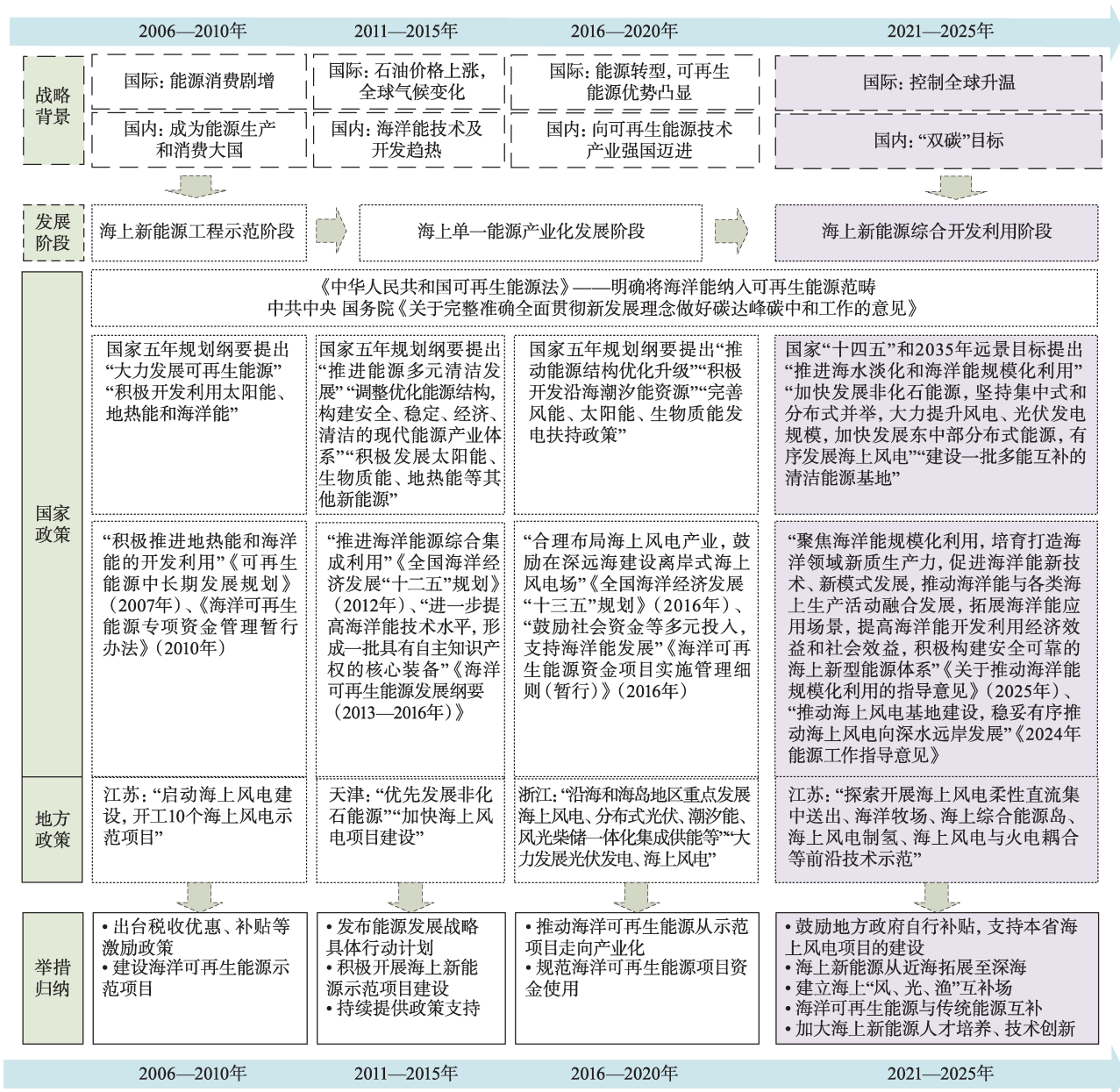


图1 海上新能源开发利用的发展历程

Figure 1 Development history of offshore renewable energy development and utilization

用,并进一步推动生产力的革新。②海洋发展有了新理念。随着创新、协调、绿色、开放、共享五大发展理念的贯彻实施,人海关系从以开发利用海洋为主过渡为尊重海洋、保护海洋、发展海洋、治理海洋的新型人海关系,继而推动传统海洋经济发展模式变革,海洋生产力发生质的提升和结构的优化。③海洋发展有了新动力。海洋事业发展获得更坚实的科技和人才基础,依靠科技创新,中国极大程度提高了海洋资源开发效率,拓展了海洋开发的边

界。在日新月异的海洋利用场景下,智能化和数字化技术逐渐成熟,跨学科融合推动了创新技术的出现,为海洋综合开发过程中的复杂问题提供解决思路。同时,海洋管理人才、技术研发人才、科学家队伍不断壮大,为生产力变革提供了智力支撑。④海洋开发有了新空间、新对象,不断激发萌出新业态。海洋新疆域拓展意味着海洋开发新对象不断涌现和资源利用方式的突破,体现了海洋生产力的转变和进步,如《〈联合国海洋法公约〉下国家管辖范围



以外区域海洋生物多样性的养护和可持续利用协定》通过后,生物基因资源开发为医药、生物材料等产业带来了更多可能;国际海底管理局主导下围绕多金属结核、多金属硫化物等矿产资源的开采规则一旦通过,将为全球矿业提供新发展路径。海洋新质生产力的发展促进了海洋人才、海洋开发对象、涉海开发工具的升级、优化,为海上新能源利用跃升进入新阶段奠定了坚实基础(图2)。

## 2.2 海洋新质生产力与海上新能源互动机制

### 2.2.1 海洋新质生产力理论对能源利用模式转型的解释

新质生产力提出伊始,就与新能源密切相关。习近平总书记首次提出新质生产力概念时强调,要“积极培育新能源、新材料、先进制造、电子信息等战略性新兴产业,积极培育未来产业,加快形成新质生产力,增强发展新动能。”新质生产力这个概念的提出,为判断海洋新能源发展方向和规律提供一个全新角度与理论框架(图3)。

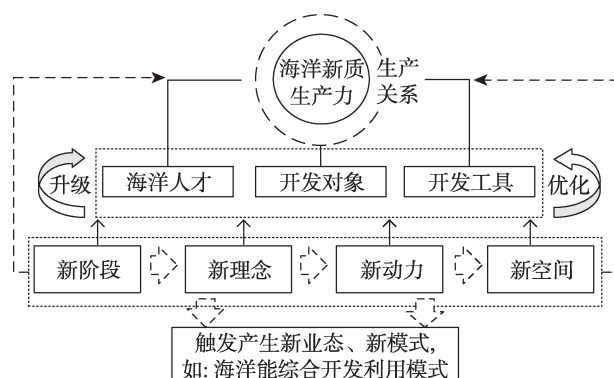


图2 海洋新质生产力理论框架

Figure 2 Theoretical framework of marine new-quality productivity

从海洋新质生产力所体现的发展阶段看,海洋新能源发展必须走综合利用的模式。目前,国内外对海上新能源综合利用模式进行了有益探索,具体包括:海上新能源体系中海上风能、太阳能等在同一空间的协调利用(能能耦合);海上新能源与其他涉海产业的空间协同(能产耦合);海上新能源

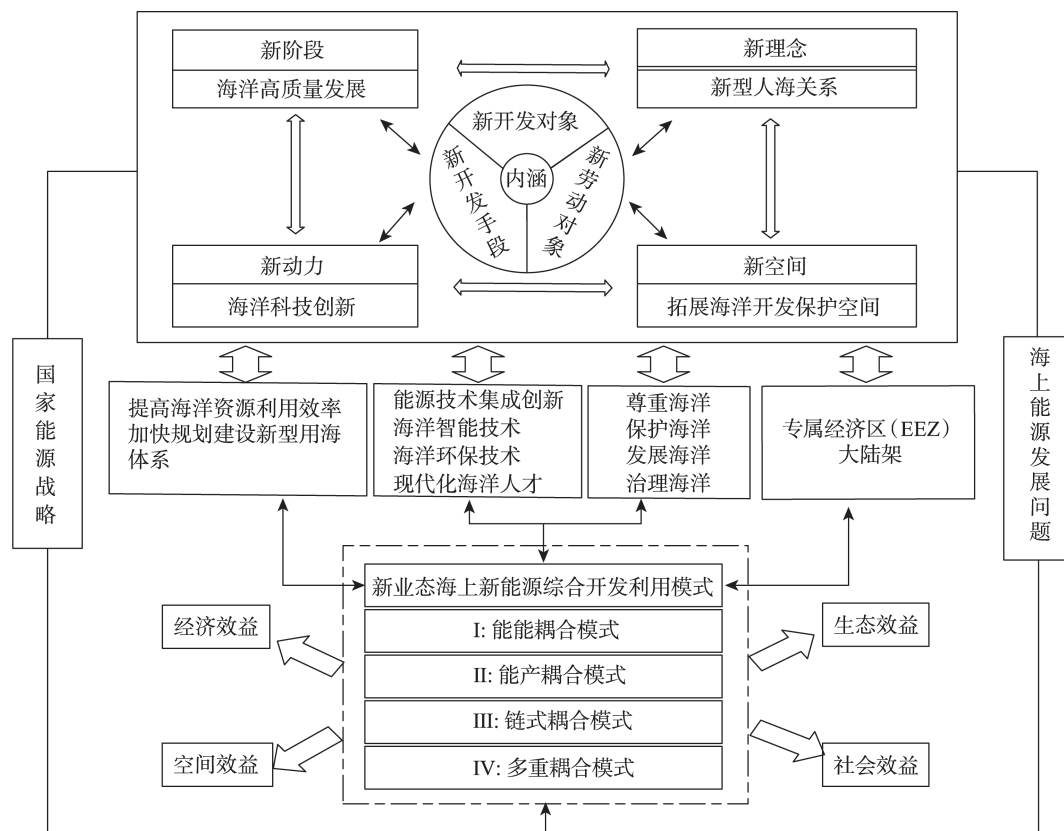


图3 海洋新质生产力与海上新能源互动关系

Figure 3 Interaction between marine new-quality productivity and offshore renewable energy

2025年4月

供给和需求全产业链的耦合发展(链式耦合);海上新能源发展与生态环境保护、应对气候变化等的目标协同(多重耦合)。海洋新质生产力视角下的海上新能源综合开发利用意味着从单一能源开发转向多能源互补、综合利用,意味着跨学科和跨行业的整合<sup>[10]</sup>,从而实现海洋资源利用效能的跃升(表1)。

从海洋新质生产力所体现的发展理念看,海上新能源的发展必须摒弃传统的开发方式,以协调的理念疏通各能源之间的融合开发,以绿色的发展规划推动海上新能源的可持续发展,以开放的态度开展海上新能源国际交流并吸取国际先进经验,以共享的方式促进海上新能源综合应用。

从海洋新质生产力所体现的开发手段、开发对象看,海上新能源的发展必须通过技术创新与集成、管理创新与集成,推动海上新能源开发利用既要拓展边界又要拓展开发的深度和广度。一方面,深远海区用海矛盾少,且具备更强的风能、潮汐能、波浪能等资源,能够使海上新能源的发展效率提升。另一方面,单一用海模式在技术水平上跟综合利用背后的技术体系不可同日而语,后者不但具有正外部性,还将极大地提升单位空间资源利用效率,有利于提高国家在海洋能源技术、产业及规则制定的国际话语权。

2.2.2 海上新能源利用实践对海洋新质生产力理论的支撑

海上新能源综合开发利用也为海洋新质生产力持续发展提供动力。首先,海上新能源综合开发利用带来的技术升级为海洋新质生产力注入科技创新动力,并推动海洋能开发进入新的阶段。海上新能源的开发推动了相关技术的进步,包括深海漂浮式风电技术<sup>[7]</sup>、人工智能预测波浪能技术、潮汐能发电技术等,这些技术提高了能源的开发效率,降低了成本,使海上新能源更具市场竞争力。同时,海上新能源项目的实施需要多领域、多学科的融合支持<sup>[7]</sup>,这种跨学科的技术融合促进了海洋科技的整体进步。

其次,海上新能源综合开发利用推动海洋新质生产力形成先进业态。综合开发策略通过统筹海上风能、波浪能、潮汐能等多种能源形式,实现了海洋资源的多元化利用,增强了海洋能源系统的韧性;通过生产力规划和合理布局,促进产业链上下游的联动和集群化发展,避免资源浪费。例如,海上风电的开发与海洋牧场、海水淡化、海水制氢、海洋旅游等产业相结合,形成协同效应,提高整体经济收益。

再次,海上新能源综合开发利用为海洋新质生产力搭建绿色发展桥梁。综合开发不仅推动了能

表1 海上新能源综合开发利用模式及代表项目

Table 1 Integrated development and utilization modes of offshore renewable energy and representative projects

| 模式                     | 内容                                                         | 代表项目                                                                                     | 开发利用的优势                                                          |
|------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 能能耦合模式:能源+能源           | 多种海上能源相结合,在同一空间内共同开发利用,如海上风电与海上光伏共同开发                      | 华能山东半岛南4号海上风电项目(2024年)<br>意大利科里利亚诺海上风光互补发电场(预计2028年)                                     | 风电与光伏、波浪能等共同开发,既为电网带来急需的稳定性和灵活性,也直接提高了单位海洋空间的能源产出规模              |
| 能产耦合模式:能源+涉海产业         | 基于海域使用空间兼容性,以能源与涉海产业协同发展为特色的产业集聚,如海上风电与海洋牧场共同开发            | 平潭深远海养殖和海上风电融合发展项目(2022年)<br>昌邑市海洋牧场与三峡300MW海上风电融合试验示范项目(2022年)<br>国能共享号漂浮式风渔融合项目(2023年) | 海上新能源与涉海产业联动,既提高了海域空间利用效率,还提高了经济收益;挖掘了海上新能源产业项目在空间上的兼容性          |
| 链式耦合模式:能源+用能产业         | 基于产业链的耦合性,通过海上风电、海上光伏等能源产生的电力进行制氢生产;为海上油气平台或其他涉海产业进行电力输送   | 浮式风电平台海油观澜号(2023年)<br>明阳阳江青洲四海上风电场项目(2023年)<br>挪威Hywind Tampen海上风电项目(2023年)              | 海上风电所产生的电力向海上油气平台输电,减少铺设岸电输送管道的成本;创新了海上新能源的应用场景,增强海洋能源与其他产业的伴生能力 |
| 多重耦合:能能耦合、能产耦合、链式耦合的综合 | 基于陆海统筹、陆海联动,通过能源、产业等综合开发利用,进一步实现CO <sub>2</sub> 减排、海洋治理等目标 | 明阳集团东方CZ9海上风电场示范项目(在建)<br>荷兰北海农场1号(预计2040年)                                              | 将陆域产业引入海洋,结合海洋新能源的绿电优势,实现能源互补、产能互补、用海兼容,创新海洋资源开发利用模式             |

源结构的优化转型,更推动了海洋经济发展模式的创新与社会价值的重塑。长远来看,海上新能源的综合开发利用减少了对化石燃料的依赖,降低了温室气体排放,有助于实现全球“碳中和”目标。同时,技术创新使得海上新能源的开发成本降低但开发效率提高,越来越具备绿色开发的特征,实现经济增长与环境保护的双赢。

最后,海上新能源综合开发利用搭建了国际合作平台,为海洋新质生产力注入开放理念。在全球化的背景下,海上新能源的合作开发已成为促进国际科技交流、经济合作与环境保护的重要纽带,各国在技术研发、资金投入、政策制定等方面共享探索经验,共同解决技术难题。这种跨国界的技术交流与合作,加速了海上新能源技术的创新与应用,促进了海洋新质生产力的快速成长。

综合来看,海上新能源综合开发是生产力发展新阶段的必然要求,同时也是海洋新质生产力的重要体现。海上新能源综合开发聚焦多能互补,提高了资源利用效率,拓展了资源开发边界,促进了能源新技术、新模式的发展,推动了海上新能源与各类海上生产活动的融合,丰富了海上新能源应用场景,带来了较好的经济效益、生态效益、空间效益和社会效益。海上新能源综合开发利用与海洋新质生产力之间的互促,为构建安全可靠的海上新型能源体系、推动海洋经济和海洋强国建设提供有力支撑。

### 3 海上新能源综合开发利用现实困境

#### 3.1 综合开发利用理念不足

中国在推动海上新能源综合开发利用方面已有一定的基础和宏观规划,但在具体发展实践中仍存在海上新能源空间布局缺乏前瞻性、沿海产业布局各自为政、供需不匹配等问题<sup>[11]</sup>。当前中国近海海上新能源属于“见缝插针”的开发模式,与航道、养殖等其他用海项目交错布局,难以形成海上新能源的规模化和集群化发展<sup>[11]</sup>。尽管推动新能源集中与分布并举的策略被提及多年,但在实际开发过程中,存在海洋资源利用竞争化、海洋空间碎片化现象,综合开发利用模式尚未形成。从产业耦合的角度来看,陆海新能源之间缺乏协同<sup>[12]</sup>,不同类型海洋能源利用缺乏协同<sup>[13]</sup>、海上新能源与其他海洋产业

缺乏协同<sup>[14]</sup>、海上新能源在沿海各地区间的发展缺乏协同<sup>[15,16]</sup>。尽管海上风电与海洋牧场等海洋产业融合模式已在多地进行了试点,但受企业经营范围、深远海运输成本等因素的影响,目前仍未得到广泛普及。究其原因除了各领域技术成熟度、环境要求、投资风险等不同客观因素外,更重要的是缺乏以产业耦合实现机制为目标的海上新能源综合利用顶层设计<sup>[17]</sup>。

#### 3.2 综合开发利用的技术门槛较高

海上新能源综合开发利用需要技术手段的创新和完善。当前,中国海上新能源综合开发利用在技术方面仍面临以下几个问题:①不同海洋能源的技术成熟度不同,能量转换和储存能力发展进程不一,导致多能互补集成应用难度较大<sup>[18-20]</sup>。海上风电经过多年发展已具备相对成熟的技术体系,甚至已从近海海上风电向深远海区域不断探索并实行商业化运作<sup>[21]</sup>;而波浪能和潮汐能虽然研发时间较早,但技术成熟度仍有较大提升空间,加之受地理位置和水文等条件限制,商业化运营仅点状分布<sup>[22]</sup>。以海洋波浪能为例,自2010年“鸭式I号”完成海试,截至2024年,装机容量100 kW以上的波浪能项目仅“南鲲号”“舟山号”“长山号”等10余项。②海上新能源产业链各环节技术发展不平衡<sup>[23]</sup>。上中下游技术脱节,高端轴承、控制系统、储能设备等核心技术与国际先进水平仍存在差距<sup>[24]</sup>,装备自主设计技术水平不足<sup>[25]</sup>,安装、运维技术存在短板<sup>[26]</sup>。③海上新能源多能互补综合利用工程项目大多处于初步运营阶段,从技术经济完善的角度看,还缺乏经验积累<sup>[27,28]</sup>。

#### 3.3 综合开发利用的人才和产业政策有待完善

海洋新能源产业是技术密集型产业,现已进入跨越式发展阶段,对具有海洋工程、新能源科技、环境保护等专业知识的复合型人才,以及兼具实际操作经验和管理能力的复合型人才需求强烈。但与海洋新能源产业综合开发利用相匹配的人才培训体系尚未建立,进一步加剧了人才短缺的问题<sup>[29]</sup>。

现有海上新能源政策有待进一步形成合力。海洋新能源综合开发利用处于起步阶段,在项目立项、消纳机制、财政金融、海洋空间资源配置等方面都亟须配套政策支持。虽然中国已经发布了多项



2025年4月

关于海洋新能源发展的政策和指导意见,如《国家发展改革委 国家能源局关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》等,但这些政策在具体实施过程中仍需结合项目发展实际需求进一步细化完善。目前,针对海上新能源综合开发利用仍缺乏明确的政策指导,特别是深远海风电、海上光伏等与海洋牧场、海水制氢等其他产业协同发展中,存在供应链中断、成本上涨和产业政策不明朗等问题,给海上新能源的整体发展造成了一定的困难<sup>[30]</sup>,企业的运营风险和成本大大增加<sup>[31]</sup>。此外,海洋新能源的综合开发利用涉及能源、环保、海洋管理等多个部门管理事项,但各部门在规划制定、项目实施过程中缺乏有效的协调机制,影响项目审批和实施效率<sup>[32]</sup>。

### 3.4 海洋生态环境的影响评估较为欠缺

针对海上新能源过度开发和不合理利用所产生的现实及潜在生态环境风险,还存在争议<sup>[33]</sup>。如海上风电场的建设会改变海洋流动模式、影响海洋生物的迁徙路径,装置安装及运行时产生的噪音会干扰海洋生物的正常生活习性<sup>[34]</sup>;海上光伏项目与自然光照竞争,影响海洋植物的光合作用,从而影响整个海洋食物链<sup>[35]</sup>;潮汐能和波浪能的开发通过改变海域的物理条件(如温度和盐度),间接影响海洋生态系统的结构和功能<sup>[36]</sup>。因此,海上新能源的综合开发利用需要对海洋生态环境、海洋生物多样性进行全面的科学评估,同时需要开发环境友好型的海洋能源技术,减少可能对海洋环境产生的负面影响。

总体而言,中国海上新能源的开发利用水平距离海洋新质生产力要求仍然存在一定差距,也进一步说明构建海上新能源综合开发利用体系的必要性、紧迫性<sup>[36]</sup>。

## 4 海上新能源开发利用案例分析

### 4.1 海上新能源综合开发利用案例介绍

海上新能源的综合开发利用是各海洋强国正在不断探索的领域,中国的明阳阳江青洲四海上风电场项目作为国内首个融合“海上风电+海洋牧场+海水制氢”的创新项目,构建了海洋能源+产业的综合开发利用模式,为海洋资源的多元化利用开辟了新的路径<sup>[37]</sup>。此后,平潭、昌邑、莆田等地陆续开展

了“海上风电+海洋牧场”的综合开发利用模式,为实现生态、经济和社会效益持续发力。

国际上也有类似的开发案例,如海上能源岛是将自然岛屿或人工平台充当海上发电枢纽,并将电力输送到周边地区或国家的海洋能综合利用模式,即本文所提到的多重耦合模式<sup>[38]</sup>。海上能源岛的构想并不局限于风能发电和简单地建立海上-陆地电力输送网,而是在岛上设立港口、机场等交通设施和简易的设备生产装配线以及大型备品备件仓库,借助技术革新整合多能源、多产业、多供电设施,为岛内外输送电力,实现运维工作的规模化和集中化<sup>[39]</sup>。这一方式既增强了能源与能源、能源与产业之间的关系,同时也在能源岛不断优化的过程中促进科技进步,进而实现生产力转型。

截至目前,欧洲北海能源岛是启动最早、设计最完善的多重耦合综合开发模式,虽建成时间还未明确,但其项目设计顺应了未来发展趋势,兼具商业价值,为后续中国开展海上新能源综合开发利用提供了设想借鉴。这一模式紧紧围绕“可再生能源+储能+联合制氢”等的综合利用方案,重点布局氢能、新能源材料、装备制造和港航物流等产业,通过拉长海洋可再生能源产业链条,推进海上风电母港、深远海风电试点示范和“风光+氢”等多种能源资源集成<sup>[40]</sup>。这种多元化产业链的整合,有效提升了项目的整体效益和海域使用效率,促进了相关产业的发展,展示了在技术创新、政策支持、产业链整合以及环境保护等方面的有益尝试,为中国实现高效整合风能、太阳能、海洋能等多种能源,协同发展氢能、储能设施和智慧电网等提供借鉴<sup>[38]</sup>。

### 4.2 海上新能源综合开发利用收益估算

为了进一步验证海上新能源综合开发利用模式相比单一能源开发利用的优势,本文以华能山东半岛南4号海上风电场(总装机规模301.6 MW)为初始条件,对该项目进行不同场景的探索性“综合”模拟,估算其从单一能源开发利用转向能能耦合、能产耦合、链式耦合、多重耦合后,其经济效益、生态效益、社会效益的提升。估算依据及估算结果详见表2。

由于海上新能源综合开发利用仍处于起步阶段,且大部分项目数据尚未全部公开,因此目前表

表2 海上新能源综合利用的收益估算

Table 2 Revenue estimation of integrated development and utilization of offshore renewable energy

| 利用模式    | 项目类型及估算依据                                                                                                                                                                             | 估算结果                                                       |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 单一利用    | 单一海上风电用海<br>以华能山东半岛南4号海上风电项目为基础<br>华能项目年发电量约8.21亿kWh<br>2020年新核准近海风电指导价为0.75元/kWh                                                                                                     | 计算过程:年发电量×电价<br>估算结果:6.1575亿元                              |
| I能能耦合   | 海上风电+海上光伏<br>以华能“黄海一号”海上光伏平台为参照,“黄海一号”共设434块光伏板,平台面积1624 m <sup>2</sup><br>根据公开信息,1块光伏板年发电量约为400 kWh<br>按照有关规定,“黄海一号”海上光伏平台海域使用金约100万~140万/hm <sup>2</sup> ,取中间值120万元/hm <sup>2</sup> | 计算过程:海上风电收益+光伏发电量×电价+海域使用金<br>估算结果:6.1607亿元<br>收益增量:32.5万元 |
| II能产耦合1 | 海上风电+海上光伏+海洋牧场<br>华能山东半岛南4号海上风电项目总装机容量为301.6 MW<br>以三峡海上风电融合示范项目为参照,该项目装机容量与华能山东半岛4号海上风电项目相当,投放半滑舌鳎苗种105万尾<br>假设华能山东半岛4号海上风电项目内开设海洋牧场投放鱼苗数与三峡融合项目同等<br>一尾半滑舌鳎的利润在20~30元               | 计算过程:能能耦合收益+鱼苗收益<br>估算结果:6.4232亿元<br>收益增量:2657.5万元         |
| II能产耦合2 | 海上风电+海上光伏+海洋牧场+海水制氢<br>以珠海桂山风场制氢项目为参照<br>制氢风机装机容量为3 MW,年发电量约1000万kWh,每小时产氢80标方,理想状态下华能山东半岛南4号项目年发电总量为同等装机容量珠海桂山项目年发电量的82.1%,因此年制氢量也为珠海桂山项目年制氢量的82.1%,能源用氢价格2.3元/标方                    | 计算过程:能产耦合1收益+海水制氢收益<br>估算结果:6.4364亿元<br>收益增量:2789.8万元      |
| III链式耦合 | 海上风电+海上光伏+海洋牧场+海水制氢+油气平台<br>假设渤海区域海上油气平台5%的电力使用由华能山东半岛南4号项目提供,渤海油田岸电供电量达22亿kWh/年<br>海上风电场存在欠负荷运转现象<br>增加用电需求方可提高海上风电场运转功率,逼近满负荷运转                                                     | 计算过程:能产耦合2收益+油气平台供电收益<br>估算结果:7.2614亿元<br>收益增量:1.1039亿元    |
| IV多重耦合  | 海上风电+海上光伏+海洋牧场+海水制氢+油气平台+其他产业+……加总其他产业收益                                                                                                                                              | 计算过程:链式耦合收益+其他产业附加收益<br>估算结果:7.2614亿元+……亿元<br>收益增量:待计算     |

注:表内信息为作者根据公开信息搜集得到;收益增量指相较于单一利用模式的收益增幅。

内收益仅为通过简单加总计算得出,以较为直观的方式体现海上新能源综合利用模式相较于单一能源开发带来的经济收益增幅部分。通过对海上风电项目叠加效果的模拟可以得出,4种综合利用模式会带来更高的显性经济收益,以及如技术水平提升、综合型人才增加等隐性收益,这些收益不仅印证了综合开发模式的可实现性,展现了海上新能源综合利用的优势,也为海上能源体系转型路径提供借鉴。

5 结论与政策启示

5.1 结论

海洋生产力加速变革背景下,海上新能源利用

也面临着全新的挑战和更加丰富的应用场景,本文搭建了海洋新质生产力理论分析框架,对海上新能源发展趋势进行探讨,得出以下结论:

(1)海上新能源单一利用模式难以有效应对全球气候治理目标,且在空间利用方面与其他用海产业的矛盾日益尖锐,在产业链条方面与各类用能活动融合度低,明显滞后于时代发展要求和海上能源应用场景的拓展。为破解上述问题,必须找到一套切实提高海上新能源综合经济效率的解决方案。

(2)海洋新质生产力理论对能源利用模式转型的解释明确了未来海上新能源开发必须走综合利用的新模式,即从单一能源开发利用转向多能源互



2025年4月

补开发、能源与产业协调发展的策略。它顺应新的发展阶段,代表了新型的海洋生产能力与开发手段,不仅符合海洋高质量发展的时代潮流,更是与新型能源体系建设的实际需求紧密相连,为海上新能源的开发利用和其他海洋产业的发展带来新机遇。

(3)基于理论分析和案例总结、归纳演绎,未来海上新能源综合利用可进一步细化为4种类型:能能耦合、能产耦合、链式耦合、多重耦合模式,它们很大程度地实现空间兼容,产业协同,继而催生出新能源利用场景,带来更高的经济效益、生态效益、空间效益、社会效益。

(4)利用现有案例及可获数据,陆续叠加海上光伏、海洋牧场、海水制氢、油气生产等相关产业活动,经粗略估计发现,综合利用模式具有较好的商业前景,叠加海洋牧场海上能源综合开发模式可提升经济效益约4.3%,叠加上述全部产业活动后可提升经济效益约17.9%。

## 5.2 政策启示

为进一步顺应海洋新质生产力发展要求,更好推动海上新能源开发利用模式转型,提出以下几点政策启示:

(1)在多能源互补开发方面,应统筹海上风能、太阳能、潮汐能等多种能源形式,减少对单一能源的依赖,采取集中与分布并举的开发策略,在现有海上风电基地选划构建多能源互补示范项目(基地),避免布局碎片化,提高海洋资源空间利用效率。

(2)在产业协同发展方面,应完善市场准入规则和鼓励政策,将能产耦合理念传导到产业链建设和发展中,构建聚集型海上新能源产业-用能储能产业发展体系,推动海洋新能源与先进制造业、服务业和信息技术产业相结合,提升海洋新能源溢出效应和范围经济。

(3)在培育综合开发利用技术方面,协同推进产业链各环节技术研发,统一海洋能的装备技术和储能技术的发展进程,避免出现上中下游技术脱节;提升海上新能源装备自主设计能力,开展核心技术攻关,补齐安装、运维技术短板;推动跨学科技术融合,探索海上风能、太阳能、波浪能和潮汐能等

多能源互补集成应用。

(4)在环境与生态治理方面,注重经济效益的同时,考虑对海洋生态系统的影响,建立严格的环境影响评估和保护机制;持续跟踪海上新能源综合开发利用项目动态,做好产能、收益相关数据搜集工作,为后续进行更加系统、科学的效益评估,为项目的优化提供有力依据。

## 参考文献(References):

- [1] IRENA. Renewable Capacity Statistics 2021[M]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021.
- [2] EPO, IRENA. Patent Insight Report: Offshore Wind Energy [EB/OL]. (2023-11-09) [2024-04-06]. <https://www.epo.org/en/news-events/news/epo-publishes-new-patent-insight-report-off-shore-wind-energy>.
- [3] 王琦, 马丽. 中国能源转型的空间分异与内生驱动因素[J]. 资源科学, 2024, 46(9): 1709-1722. [Wang Q, Ma L. Spatial differentiation and endogenous driving mechanisms of China's energy transition[J]. Resources Science, 2024, 46(9): 1709-1722.]
- [4] Copping A E, Hemery L G. OES-Environmental 2020 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World[EB/OL]. (2021-09-01) [2024-04-06]. <https://www.osti.gov/biblio/1632878/>.
- [5] 刘楠, 康俊杰, 赵春阳. 多能互补能源基地开发模式及综合效益提升方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1339-1352. [Liu N, Kang J J, Zhao C Y. Development model of multi-energy complementary energy base and comprehensive benefits enhancement method[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1339-1352.]
- [6] 冯春晖, 解海东. 大型能源基地一体化发展模式探析[J]. 煤炭经济研究, 2017, 37(8): 62-65. [Feng C H, Xie H D. Discussion on integrated development mode of large energy base[J]. Coal Economic Research, 2017, 37(8): 62-65.]
- [7] 白玉湖, 李清平. 基于海洋油气开采设施的海洋新能源一体化开发技术[J]. 可再生能源, 2010, 28(2): 137-140, 144. [Bai Y H, Li Q P. The integration technology for developing new ocean energy based on the offshore oil production facilities[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(2): 137-140, 144.]
- [8] 王兵. 供应链参与规模对中国区域经济发展的影响: 兼论中国的主场全球化[J]. 经济学家, 2022, (11): 94-105. [Wang B. Supply chain participation scale on China's regional economic development: Also on home-market globalization[J]. Economist, 2022, (11): 94-105.]
- [9] 王金伟, 黄震方, 王兆峰, 等. 乡村振兴视域下新质生产力赋能

- 文旅深度融合: 科学问题与战略路径[J]. 资源科学, 2024, 46(12): 2335-2354. [Wang J W, Huang Z F, Wang Z F, et al. Empowering integration of culture and tourism with new quality productive forces the perspective of rural revitalization: Scientific issues and strategic paths[J]. Resources Science, 2024, 46(12): 2335-2354].
- [10] 姜勇, 赵喜喜, 田敬云, 等. 我国海洋可再生能源产业技术发展现状以及山东省未来发展思路[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(9): 32-35. [Jiang Y, Zhao X X, Tian J Y, et al. Current status of marine renewable energy industry technology in China and future development ideas in Shandong Province[J]. Marine Development and Management, 2015, 32(9): 32-35.]
- [11] 刘杨. 国家能源局: 加快培育能源新业态新模式[N]. 中国证券报, 2024-03-23(A5). [Liu Y. National Energy Administration: Accelerating the Cultivation of New Energy Business Formats and Models[N]. China Securities News, 2024-03-23(A5).]
- [12] 时璟丽. 新能源利用率发展方向及实施建议[J]. 中国电力企业管理, 2022, (7): 52-53. [Shi J L. Development direction and implementation suggestions for the utilization rate of new energy[J]. China Power Enterprise Management, 2022, (7): 52-53.]
- [13] 刘吉臻, 马利飞, 王庆华, 等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考[J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 149-159. [Liu J Z, Ma L F, Wang Q H, et al. Offshore wind power supports China's energy transition[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 149-159.]
- [14] 阳杰, 张建华, 马兆荣, 等. 海上风电与海洋牧场融合发展趋势与技术挑战[J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 1-16. [Yang J, Zhang J H, Ma Z R, et al. Development trend and technical challenges of the integration of offshore wind power and marine ranching[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(2): 1-16.]
- [15] 顾云娟, 钱林峰, 周红芳, 等. 江苏海上风电产业创新发展路径与对策研究[J]. 海洋开发与管理, 2023, 40(4): 106-115. [Gu Y J, Qian L F, Zhou H F, et al. The innovative development path and countermeasures of Jiangsu's offshore wind power industry under the new dual-cycle development pattern[J]. Ocean Development and Management, 2023, 40(4): 106-115.]
- [16] 王学栋, 孟宇. “双碳”目标背景下山东省海上风电消纳机制研究[J]. 能源与环境, 2023, (2): 13-15. [Wang X D, Meng Y. Research on the mechanism of offshore wind power consumption in Shandong Province under the background of the “Dual Carbon” Strategy[J]. Energy and Environment, 2023, (2): 13-15.]
- [17] 鄂歆奕. 海洋可再生能源, 前景几何?[N]. 中国自然资源报, 2022-03-28(005). [E X Y. How Promising Is Marine Renewable Energy?[N]. China Natural Resources News, 2022-03-28(005).]
- [18] 张效莉, 周红芳, 费梓凡, 等. 我国海上风电产业概况、问题及创新发展的趋势研究[J]. 海洋经济, 2022, 12(3): 40-51. [Zhang X L, Zhou H F, Fei Z F, et al. Research on the situation, problems and trend of innovation and development of China's offshore wind power industry[J]. Marine Economy, 2022, 12(3): 40-51.]
- [19] 张继生, 俞诗琪, 张灿, 等. 潮流能水轮机阵列水动力与布局优化研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 79-87. [Zhang J S, Yu S Q, Zhang C, et al. Research progress on hydrodynamics and layout optimization of tidal stream turbine arrays[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 79-87.]
- [20] 王林. 全球潮汐能商业化提速[N]. 中国能源报, 2023-04-17(005). [Wang L. Acceleration of Global Tidal Energy Commercialization[N]. China Energy News, 2023-04-17(005).]
- [21] 周胡, 鲍超明, 曹林, 等. 海上风电产业发展趋势与 Power to X 模式应用[J]. 船舶工程, 2023, 45(S1): 421-425. [Zhou H, Bao C M, Cao L, et al. Development trend of offshore wind power industry and application of Power to X model[J]. Ship Engineering, 2023, 45(S1): 421-425.]
- [22] 潘荣伟, 冯钰栋, 许卫东, 等. 海南海域风能波浪能分布特征研究[J/OL]. 海洋通报, (2024-04-06) [2024-05-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1076.P.20240515.1434.003.html>. [Pan R W, Feng Y D, Xu W D, et al. Study on the distribution characteristics of wind energy and wave energy resource in Hainan sea area[J/OL]. Marine Science Bulletin, (2024-04-06) [2024-05-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1076.P.20240515.1434.003.html>.]
- [23] 汤阳. 新型电力系统中的新能源技术综述[J]. 集成电路应用, 2024, 41(3): 142-143. [Tang Y. Overview of new energy technologies in new power systems[J]. Application of IC, 2024, 41(3): 142-143.]
- [24] 顾云娟, 周红芳, 方颖, 等. 海上风电全产业链发展对策研究: 基于国内外经验分析[J]. 生态经济, 2022, 38(9): 80-86. [Gu Y J, Zhou H F, Fang Y, et al. Research on the development countermeasures of the whole industry chain of offshore wind power: Based on domestic and foreign experience analysis[J]. Ecological Economics, 2022, 38(9): 80-86.]
- [25] 麻常雷, 历鑫, 张彩琳. 中国海洋能产业发展分析[J]. 油气与新能源, 2024, 36(1): 16-21. [Ma C L, Li X, Zhang C L. An examination of the growth of the ocean energy sector in China[J]. Oil and New Energy, 2024, 36(1): 16-21.]
- [26] 房方, 梁栋场, 刘亚娟, 等. 海上风电智能控制与运维关键技术[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 175-185. [Fang F, Liang D Y, Liu Y J, et al. Key technologies for intelligent control and operation and maintenance of offshore wind power[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 175-185.]
- [27] 雷怡菲. 近海混合可再生能源系统的多能互补与优化调度策略[D]. 长沙: 湖南大学, 2020. [Lei Y F. Multi-Energy Complementary and Optimal Scheduling Strategy for Offshore Hybrid Renewable Energy Systems[D]. Changsha: Hunan University, 2020.]
- [28] 王世明, 李泽宇, 于涛, 等. 多能互补海洋能集成发电技术研究

2025年4月

- 综述[J]. 海洋通报, 2019, 38(3): 241–249. [Wang S M, Li Z Y, Yu T, et al. A review of research on multi-energy complementary ocean energy integrated power generation technology[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(3): 241–249.]
- [29] 韩英亮. 海洋强国战略背景下涉海专业人才培养策略探析[J]. 产业创新研究, 2024, (3): 186–188. [Han Y L. Analysis of talent cultivation strategies for maritime professionals under the strategy of becoming a strong maritime country[J]. Industrial Innovation, 2024, (3): 186–188.]
- [30] 许丹, 刘崇明, 王欣, 等. 海洋可再生能源政策研究[J]. 绿色科技, 2015, (8): 304–307. [Xu D, Liu C M, Wang X, et al. Research on the policy for marine renewable energy[J]. Journal of Green Science and Technology, 2015, (8): 304–307.]
- [31] 韦有周. 英国海上风电产业扶持政策演变、最新态势及启示研究[J]. 海洋经济, 2016, 6(4): 59–64. [Wei Y Z. Research on the development of UK's offshore wind industry policy[J]. Marine Economy, 2016, 6(4): 59–64.]
- [32] 罗兴婷, 张苇锟. 海洋新能源产业技术创新系统构建及政策保障[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(7): 789–795. [Luo X T, Zhang W K. Ocean energy industry technology innovation system and policy guarantee[J]. Resource Development & Market, 2017, 33(7): 789–795.]
- [33] Langhamer O, Dahlgren T G, Rosenqvist G. Effect of an offshore wind farm on the viviparous eel-pout: Biometrics, brood development and population studies in Lillgrund, Sweden[J]. Ecological Indicators, 2018, DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.08.035.
- [34] Marx J, Schreiber A, Zapp P. Response to 'Life-cycle greenhouse gas emissions of onshore and offshore wind turbines' [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 219: 33–34.
- [35] 徐姗姗, 姚敬华, 黄东亚. 漂浮式光伏发电系统材料在海洋环境中的腐蚀效应分析[J]. 太阳能, 2022, (10): 27–32. [Xu S S, Yao J H, Huang D Y. Analysis of corrosion effect of materials in floating pv power generation system in marine environment[J]. Solar Energy, 2022, (10): 27–32.]
- [36] 史宏达, 尤再进, 罗兴铸, 等. 基于我国资源特征的海洋能高效利用研究[J]. 中国基础科学, 2023, 25(1): 7–14. [Shi H D, You Z J, Luo X Q, et al. Research of efficient utilization of marine energy based on China's resource characteristics[J]. China Basic Science, 2023, 25(1): 7–14.]
- [37] 王立坤, 郭宇, 陈秋华, 等. 海上风电制氢技术展望[J]. 设备管理与维修, 2023, (14): 131–133. [Wang L K, Guo Y, Chen Q H, et al. Prospects of offshore wind power hydrogen production technology[J]. Plant Maintenance Engineering, 2023, (14): 131–133.]
- [38] Alexandra L, Yannick W, Ruud E, et al. Electrolysis as a flexibility resource on energy islands: The case of the North Sea[J]. Energy Policy, 2023, DOI: 10.1016/j.enpol.2023.113921.
- [39] Goran D, Pedro C G, Asgeir T. Powering Europe with North Sea offshore wind: The impact of hydrogen investments on grid infrastructure and power prices, energy[J]. 2023, DOI: 10.1016/j.energy.2022.125654.
- [40] Malte J, Connor D, Tim C G, 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, 2002, DOI: 10.1016/j.adapen.2022.100090.



# Study on integrated development and utilization modes of China's offshore renewable energy from the perspective of new-quality productivity

LIU Shuguang<sup>1</sup>, ZHANG Ping<sup>1,2</sup>, ZHAO Xinyue<sup>2</sup>

(1. School of Economics, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. China Institute for Marine Affairs (CIMA), Beijing 100032, China)

**Abstract:** [Objective] Offshore renewable energy plays a crucial role in addressing global climate change. However, the limitations of the current single utilization mode in marine energy development have become apparent. As a major nation in offshore renewable energy, China needs to develop solutions for both domestic and global energy challenges. [Methods] Through a combination of literature review and case studies, this research systematically analyzes the bottlenecks and practical challenges in the development and utilization of offshore renewable energy. It summarizes integrated utilization modes and their respective advantages for offshore renewable energy. Based on the development requirements of marine new-quality productivity, it proposes trends and strategies for the integrated development and utilization of offshore renewable energy in China. [Results] (1) The current single mode for the development and utilization of offshore renewable energy fails to effectively contribute to climate goals through the ocean. (2) Key practical challenges in offshore renewable energy development include large sea area occupation, low space utilization, and insufficient industrial coordination. (3) The theoretical framework of marine new-quality productivity can better identify four major trends in the transformation of offshore renewable energy development and utilization modes: energy-energy coupling, energy-production coupling, chain coupling, and multiple coupling. These four integrated modes practically facilitate the further development of new-quality productivity. (4) Based on existing cases and data, it is roughly estimated that the integrated development and utilization modes of offshore renewable energy can achieve spatial compatibility and industrial complementarity, demonstrating strong comprehensive benefits and commercial prospects. [Conclusion] The development and utilization of offshore renewable energy in China has reached a critical transformation stage. The integration of offshore renewable energy with various marine production activities and the expansion of application scenarios should be prioritized. Qualified coastal areas should clarify the concept of integrated development and strengthen policy support and guidance. Taking energy and industrial synergy as breakthrough points, China will pioneer the establishment of globally influential new modes and industrial systems for offshore renewable energy development and utilization, providing strong support for building a thriving marine economy and a leading maritime nation.

**Key words:** offshore renewable energy; marine new-quality productivity; mode transformation; integrated utilization; case study