

引用格式:李志川,李星华,劳景水,等.海上风电场选址研究及未来发展前景[J].南方能源建设,2025,12(1):127-140. LI Zhichuan, LI Xinghua, LAO Jingshui, et al. Study on the siting of offshore wind farms and prospects for future development [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 127-140. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-147.

海上风电场选址研究及未来发展前景

李志川¹, 李星华^{2,3,✉}, 劳景水¹, 喻志友¹, 徐伟¹, 孙见章¹, 张子健^{2,3}, 李亚^{2,3}

(1. 湛江南海西部石油勘察设计有限公司, 广东 湛江 524057;

2. 深圳市普罗海洋科技有限责任公司, 广东 深圳 518000;

3. 深圳清华大学研究院, 广东 深圳 518057)

摘要: [目的]在“碳中和”的时代背景下,对新能源的开发受到更多国家和地区的关注。海上风电场以丰富的风资源为基础,近年来得到政府的大力开发。掌握海上风电场的研究进展对后期发展新能源具有一定意义。[方法]对 Web of Science 核心数据库中海上风电场选址相关文献进行检索,基于1177篇检索结果利用 CiteSpace 软件进行文献分析。[结果]研究表明:美国、中国和英国对海上风电场相关研究较为重视,近年来的发文量增长较快。在1997—2010年间,对海上风能、波浪能等资源评估研究较多,以此作为海上风电场宏观选址基础;2011—2020年,对海上风电场微观布局更加重视;2021年至今海上风电场的可持续发展成为研究重点。[结论]整体来看,风资源的分布、海底构造的变化和海洋地质灾害的发生以及政策的发布均会影响海上风电场场址的选择。随着浅海风电场技术的成熟,未来海上风电场逐渐向深海开发,进一步推动漂浮式海上风电基础的发展。除此之外,海上风电场与海上油气开发以及海洋养殖等更多海上项目的合作发展将会得到更多的研究和关注。

关键词: 未来发展;海上风电场;位置选择;影响因素;CiteSpace

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-147

文章编号: 2095-8676(2025)01-0127-14

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-147

中图分类号: TK89; TM614; G35



论文二维码

Study on the Siting of Offshore Wind Farms and Prospects for Future Development

LI Zhichuan¹, LI Xinghua^{2,3,✉}, LAO Jingshui¹, YU Zhiyou¹, XU Wei¹, SUN Jianzhang¹, ZHANG Zijian^{2,3}, LI Ya^{2,3}

(1. Zhanjiang Nanhai West Oil Survey & Design Co., Ltd., Zhanjiang 524057, Guangdong, China;

2. Prime Ocean Technology (Shenzhen) Inc., Shenzhen 518000, Guangdong, China;

3. Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] Under the background of carbon neutrality, the development of new energy has attracted more attention from countries and regions, and offshore wind farms, based on abundant wind resources, have been vigorously developed by governments. [Method] The literature related to the offshore wind farms site selection was searched in the Web of Science core database, and the search results were analyzed based on CiteSpace software. [Result] The results show that the United States, China and England paid more attention to the research on offshore wind farms, and the number of publications had increased rapidly in recent years. During the period 1997-2010, the assessment of offshore wind energy, wave energy and other resources had been studied as the basis for the macro site selection of offshore wind farms. From 2011 to 2020, the micro-layout of offshore wind farms had been paid more attention. Since 2021, more studies begun to emphasize the sustainable development of offshore wind farms. [Conclusion] Overall, the location selection of offshore wind farms is influenced by the distribution of wind resources, the change of seafloor structure, the occurrence of marine

收稿日期: 2024-05-11 修回日期: 2024-06-05

基金项目: 广东省重大人才工程项目“海洋综合开发的精准地勘技术体系研发及应用”(2021ZT09H390);深圳海外高层次人才创新创业专项资金孔雀团队项目“基于精准地勘的海洋负压基础一体化技术研发与应用”(KQTD20200820113011026);南山区高层次人才团队支持计划项目“基于精准地勘的海洋负压基础一体化技术研发与应用”(LHTD2021000X)

geohazards, as well as the issuance of policy. With the maturity of shallow sea wind farm technology, the deep-sea offshore wind farm will be gradually developed in the future, which will further promote the development of floating offshore wind power. In addition, the cooperation development of offshore wind farms with oil and gas development, marine aquaculture and other projects will receive more research and attention.

Key words: future development; offshore wind farm; location selection; influence factor; CiteSpace

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

当今较多国家正在经历快速的工业化和城市化,全球能源需求不断增长,人类需要寻求更多的能源来满足生活需求和社会发展^[1]。以化石燃料为代表的传统能源,在开采和燃烧过程中会产生大量的温室气体和污染物,对环境和气候造成严重危害。另外,传统能源的有限性和国际市场的影响会导致这类能源使用成本逐渐增高。可再生新能源的资源接近无限,从环保、可持续性、经济性和能源安全性来看具有较多优势。因此,目前越来越多的国家和地区开始关注新能源的研发^[2]。风电场作为一种利用风力产生电能的可再生能源发电系统,是世界各地推动清洁能源转型的重要组成部分,在全球范围内发展迅速^[3]。

风电场按照选址区域主要划分为陆地风电场和海上风电场。陆地风场可持续性较低,对土地生态系统和野生动植物的影响较大,一定程度上导致了人地矛盾冲突^[4]。因此,越来越多的区域和国家正在投资和发展海上风电场,以利用更丰富和稳定的风能资源,推动可再生能源的发展。在 20 世纪初至 20 世纪 70 年代,主要进行风电场的早期研究和实验;1991 年,丹麦形成了世界上第一个商业化海上风电场,证明了海上风电的可行性^[5];21 世纪初,欧洲成为海上风电场发展的主要推动者;随着海上风电场技术进步和政府支持,随后北美和亚洲及其他区域也逐渐大力发展海上风电场。根据《2023 年全球海上风电报告》,截至 2022 年底,全球三大洲 19 个国家的海上风电装机容量总计 64.3 MW,占全球风机装机容量的 7.1%,预计未来 10 a(2023—2032 年)32 个市场上的海上风电容量将超过 380 MW。因此,海上风电场作为可再生能源领域的关键组成部分,既能实现能源多样性又能减轻对气候环境的影响。而且随着技术创新和部分海上风电场项目的成熟,

其建设和运营成本逐渐降低,具有广阔的发展前景。

目前对新能源的需求促使了海上风电场相关研究文献的增加,主要涉及方向包含海上基础设施和工程技术维护^[5]、风电场风力涡轮机性能提升和技术创新^[6]、风电场内电气设计^[7],以及对海上集电系统、送电系统以及陆上电网系统一体化研究等方面^[8]。然而,海上风电场要可持续发展首先需要确定适合建设风电场的位置。当前对海上风电场的选址多以某一典型研究区为案例进行分析。例如 Argin 等^[9]对土耳其 55 个沿海地区的风能潜力进行评估,通过风图集分析和应用程序(WAsP)进行统计分析,确定了 5 个海岸线作为合适风电场位置。Gao 等^[10]分析潜在风场 10 a 小时风数据,并利用多群体遗传算法计算最小的能源成本,最终提出香港东南水域是开发海上风电场的最佳区域。这些研究型文章多聚焦不同的算法分析并融合多学科领域来确定典型区域的海上风电场宏观选址,为海上风电场选址奠定了坚实的基础^[11-12]。此外,关于海上风电场发展的综述型文献多是基于关键主题字进行文献识别、初步筛选和最终筛选来综合分析影响海上风电场选址的因素,但发文章与研究型文章差距较大。

整体来看,目前对海上风电场发展的研究在时间角度上多研究某一阶段,在空间角度上多研究某一区域,对全球海上风电场领域研究热点变化以及后期发展方向的系统性分析较少。因此,以海上风电场选址为主题,梳理已有研究结果,结合不同的方法体系和视角综合性的分析海上风电场发展历程是有必要的。文章立足海上风电场选址角度,首先在 2.1 章节分析收集的文献信息;其次,基于文献计量软件 CiteSpace,在 2.2 章节对研究海上风电场领域的国家/地区和机构之间的合作关系进行分析;再次,通过对关键字重点分析,在 2.3 章节对长时间阶段内海上风电场领域的研究内容进行总结;最后讨论了海上风电场选址的影响因素,并根据分析结果对未

来海上风电场的主要研究方向进行预测。文章拟解决以下问题: (1)海上风电场研究文献基本情况; (2)海上风电场不同阶段研究内容; (3)影响海上风电场选址的因素; (4)海上风电场未来发展方向。

1 方法和数据

1.1 研究方法

本次研究主要依赖 CiteSpace 软件, 该软件是美国雷德赛尔大学的陈超美教授开发的 1 个免费的 Java 应用程序, 其基础理论主要依据托马斯·库恩的科学革命理论^[13]、罗纳德·Burt 结构洞理论^[14]、Pirolli 的最优信息觅食理论^[15]和 Kleinberg 的探测频率突增的算法理论^[16]。基于前 2 个理论, CiteSpace 分析某一领域不同时间段的研究内容聚类, 并将不同聚类进行连接, 更深入地了解一个聚类如何连接到另一个几乎完全独立的聚类; 结构洞的思想在 CiteSpace 中体现为寻找具有高度中介中心性的节点。基于第 3 个理论, 提出如何付出最少的损耗来获得最大的效益, 进一步解释了研究者对某一领域的研究方向如何决策。CiteSpace 借鉴的第 4 个重要理论是为了明确地衡量对这种效益的强度和持久性, 主要体现在某一关键字等出现频次极速增长, 表明该领域是 1 项有潜力研究方向^[17]。

基于上述理论, CiteSpace 对文献数据的处理流程主要为: 首先, 通过 Web of Science、谷歌学术等文献平台搜索研究方向主题字来获取数据或建立数据库^[18]; 其次, 作者根据自己的研究侧重点进行共被引分析、合作分析、关键字分析、聚类分析等不同的分析; 最后, CiteSpace 软件为这些分析提供交互式可视化图表, 使研究人员能探索和了解特定领域科学文献的结构和动态。

本次研究中, 使用文献计量软件 CiteSpace 6.2.4 对海上风电场选址相关领域文献进行分析; 使用 Origin 2021 绘图软件对文章中的插图进行描绘; 使用 Excel 2021 对文章中表格进行汇总整理。

1.2 数据来源

本次文献综述的研究数据来自于 Web of Science (WOS) 核心数据集, 围绕海上风电场地址选择进行搜索, 具体检索式为 (((TS=(offshore wind power location)) OR TS=(site selection of offshore wind

farms)) OR TS=(site selection of offshore wind generation)) OR TS=(offshore wind farm location)) OR TS=(offshore wind farm site selection)。为了研究的全面性, 本次未设置检索起始时间, 设置检索截止时间为“2023-08-31”。主要的文献类型设置为研究型文章和综述, 语种以英文为主, 具体检索流程如下(图 1), 最终检索到相关文献 1177 篇。

1.3 数据处理

本次对文献分析主要涉及 3 个方面(图 2): (1)已发表文章的基础信息(包括发表年份、发文量、期刊等); (2)合作分析(国家、机构在该领域的合作关系分析); (3)关键字分析(关键字共现分析、聚类分析和演变分析)。通过以上分析, 了解海上风电场现阶段研究状态以及过去的研究内容, 梳理未来的发展方向。

2 结果

2.1 文献基本信息

2.1.1 年度发文量

年度发文量能体现该研究领域是否为研究热点, 从一定角度反映该研究领域的发展历程与变化规律^[19]。WOS 文献分析结果(图 3)表明, 1997—2016 年, 关于海上风电场选址的文献发表量基本呈现上升态势; 2017—2022 年, 发文量呈现“波浪式”变化, 在 2022 年发文量达到最大, 为 182 篇。由于文献搜索截止时间的限制, 2023 年文献发文量为 72 篇。整体来看, 1997—2011 年期间为该领域初步发展阶段, 在该阶段内发文量 107 篇; 2012—2023 年为该领域快速发展阶段, 整体发文量 1070 篇, 占整个研究阶段发文量的 90.91%。对 1997—2023 年研究文献进行拟合分析($R^2=0.8575$), 发文量呈现增长趋势, 表明海上风电场选址研究受到更多学者的关注, 具有较丰富的研究前景。

2.1.2 发文期刊分析

通过对文献发文期刊分析, 能直观地反映海上风电场及相关研究文献的主要期刊来源, 对后期该领域文献的查询、相关数据搜索和论文投稿具有一定意义。如表 1 所示, 1996—2023 年, 该领域发文量第一的期刊是《RENEWABLE ENERGY》, 约占总发文量 6.032%, 5 a 平均影响因子为 8.4, 且发文量具有

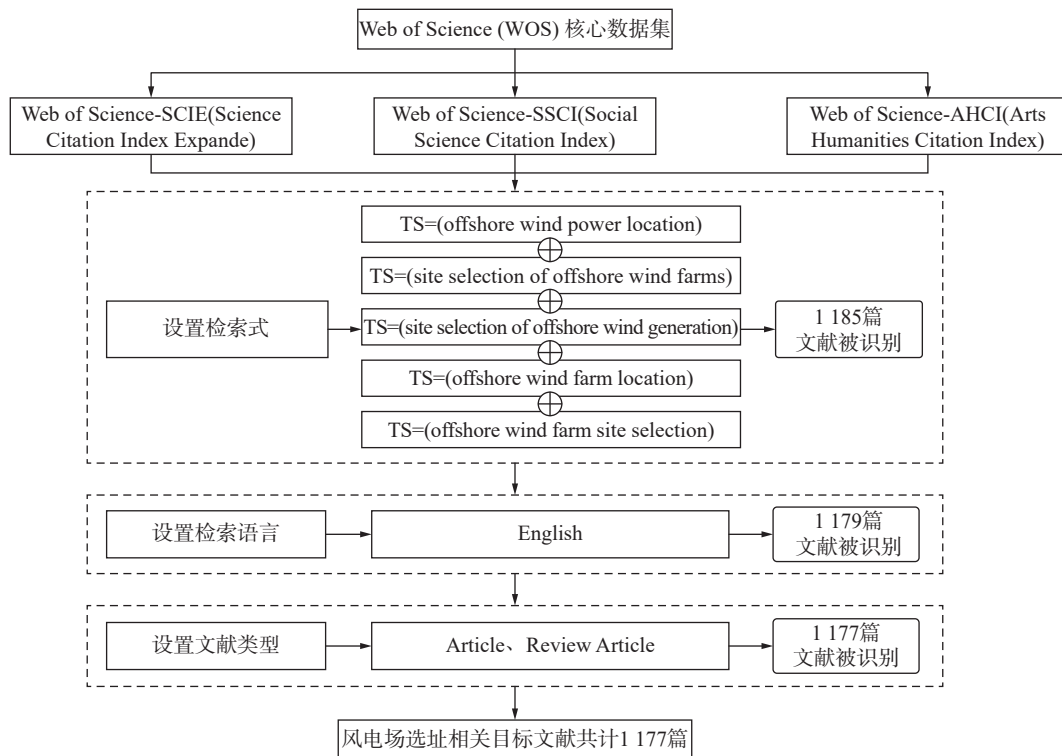


图 1 关键词检索流程

Fig. 1 Database search process

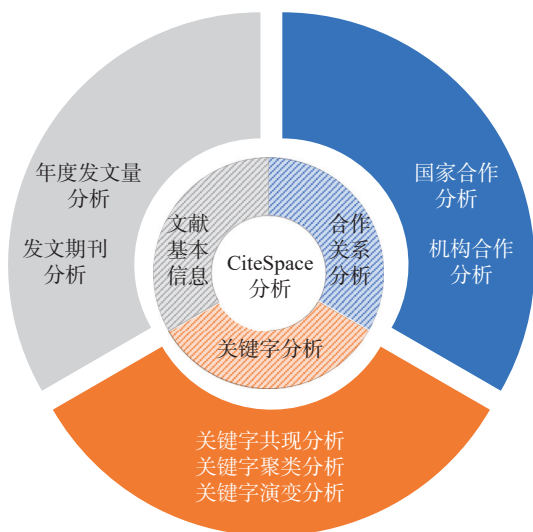


图 2 文献分析

Fig. 2 Article analysis

上升趋势,表明该期刊在海上风电场领域具有较高的学术影响力;第二为《ENERGIES》期刊,虽然此期刊近 5 a 影响因子和 JCR 分区均低于前者,但仍具有较大的发文量,对海上风电场选址领域做出一定的贡献;《ENERGY》期刊发文量位于第三位,约占 4.163%,近 5 a 影响因子较高,为 9.3。

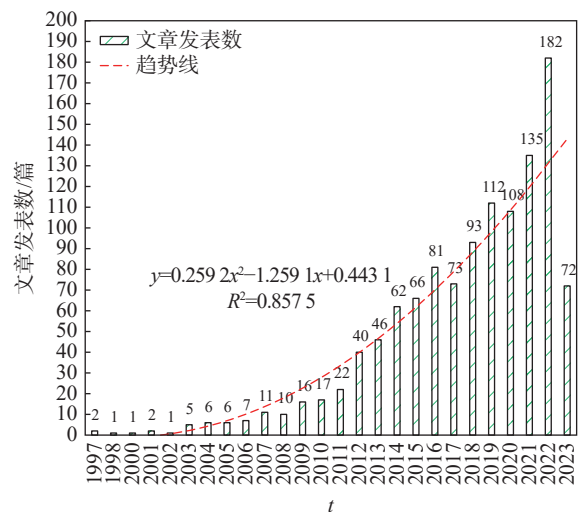


图 3 1997—2023 年文献发表量

Fig. 3 Number of papers published from 1997 to 2023

2.2 合作分析

2.2.1 国家合作分析

CiteSpace 国家合作分析结果表明海上风电场选址领域研究人员来自于 78 个国家和地区,其中发文量前 10 的国家地区统计如表 2 所示。发文量排名前 3 的国家和区域分别是美国、中国和英格兰,发文

表 1 发文 TOP5 期刊

Tab. 1 Top five journals in terms of publications

排名	期刊	发文量/篇	百分比/%	近5 a平均影响因子	JCR 分区
1	RENEWABLE ENERGY	71	6.032	8.4	一区
2	ENERGIES	69	5.862	3.3	三区
3	ENERGY	49	4.163	9.3	一区
4	RENEWABLE SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	42	3.568	16.9	一区
5	OCEAN ENGINEERING	40	3.398	5.2	一区

注: 表格中近5 a平均影响因子和JCR分区均来源于Web of Science对期刊的搜索。

量分别为 178、152 和 149 篇, 占海上风电场选址领域发文量的 29.86%。发文量的制约要素一般有国家综合实力、地区对海上风电的需求以及自身具有的自然资源。整体来看发文量国家排名前 20 位国家主要集中在北美区域的美国、亚洲区域的中国, 以及欧洲的英国、西班牙、丹麦、德国、荷兰、挪威、葡萄牙。

国家/地区之间的合作分析网络图(图 4)中, 节点表示国家/地区, 节点的大小表示发文量, 节点连线表示国家/地区之间的联系。节点的重要性可通过中心性进行衡量, 中心性高表示节点之间密切程度越大。中心性>0.1 的节点称为关键节点, 一个领域的转折点通常表现为高中心性的节点。

从国家及地区间发文量及合作关系图谱(图 4)

表 2 海上风电场发文量前 10 的国家地区统计表

Tab. 2 Statistics of top 10 countries and regions in terms of number of published papers

排名	国家/地区	发文量/篇	中心性
1	美国	178	0.18
2	中国	152	0.13
3	英格兰	149	0.15
4	西班牙	110	0.28
5	丹麦	82	0.12
6	德国	67	0.13
7	荷兰	65	0.02
8	苏格兰	62	0.21
9	挪威	55	0.12
10	葡萄牙	47	0

可以看出, 各个国家和地区之间合作密切。美国、中国、英格兰和西班牙对海上风电场研究发文较多, 与多个国家和区域的研究交汇, 表明这些国家以及地区的研究对周边国家具有较大的影响力。中心数较大的国家和地区分别为西班牙(0.28)、苏格兰(0.21)、美国(0.18)、英格兰(0.15)、中国(0.13)和德国(0.13), 表明这些国家和地区对海上风电场领域的研究较为重视。

2.2.2 机构合作分析

对海上风电场研究相关机构进行可视化分析, 分析结果(图 5)表明, 共有 273 个机构撰写并发表海上风电场选址及相关文章。发文量占主导地位的前 3 位机构分别是丹麦理工大学(Technical University

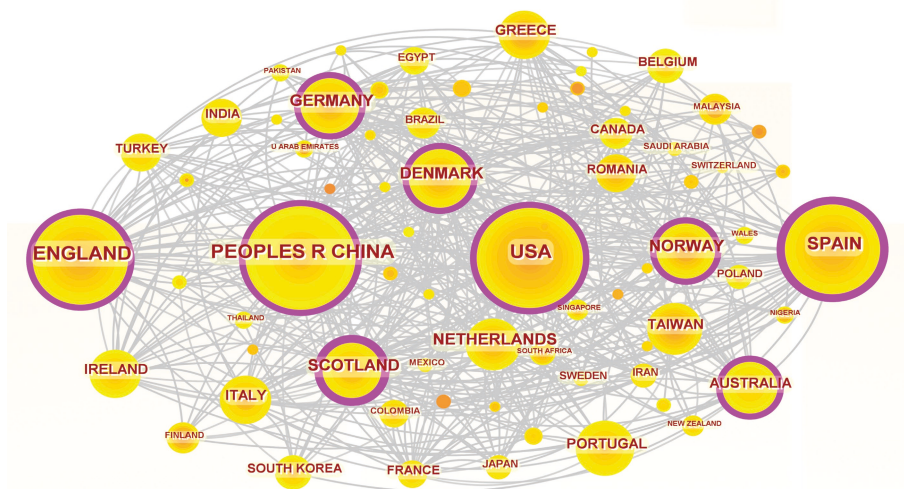


图 4 基于 CiteSpace 的国家合作分析

Fig. 4 Analysis of national cooperation based on CiteSpace

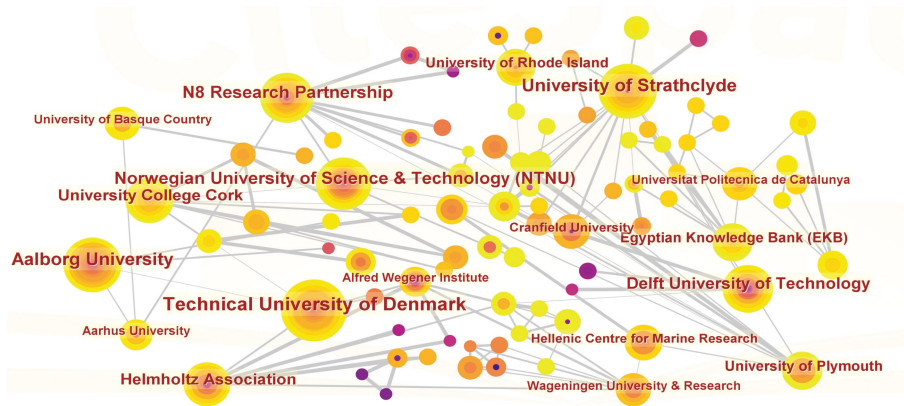


图 5 基于 CiteSpace 的机构合作分析

Fig. 5 Analysis of institutional cooperation based on CiteSpace

of Denmark)、葡萄牙的里斯本大学(Universidade de Lisboa)和里斯本高等理工学院(Instituto Superior de Tecnologia de Lisboa)。中心性较大的前 3 位机构分别是英国斯特拉斯克莱德大学(0.1)、埃及知识库(0.06)和普利茅斯大学(0.05)。发文量和中心性结果表明虽然前 3 个机构发文量较大,但与国际上相关研究机构的合作较少,后期需要加强国际交流合作,并对合作成果进一步发表,以丰富海上风电场研究领域成果。

2.3 关键字分析

2.3.1 关键字共现分析

关键字是论文核心论点与主题的高度概括,对

关键字的分析能有助于挖掘该区域的研究热点^[20]。通过 CiteSpace 的关键字分析模块得到海上风电场研究的关键字共现图谱,包括 181 个节点和 1934 条连线,其中关键字出现频次越高表现为节点半径越大,中心性越大则节点字体越大,连线表示关键字之间的关联性。

根据关键字共现图(图 6),出现频次较高的关键词分别为风能(wind energy)、可再生能源(renewable energy)、风力涡轮机(wind turbines)、影响(impact)、功率(power)、可变性(variability),速度(speed)、能源(energy)、优化(optimization)、海上风电(offshore wind)等。

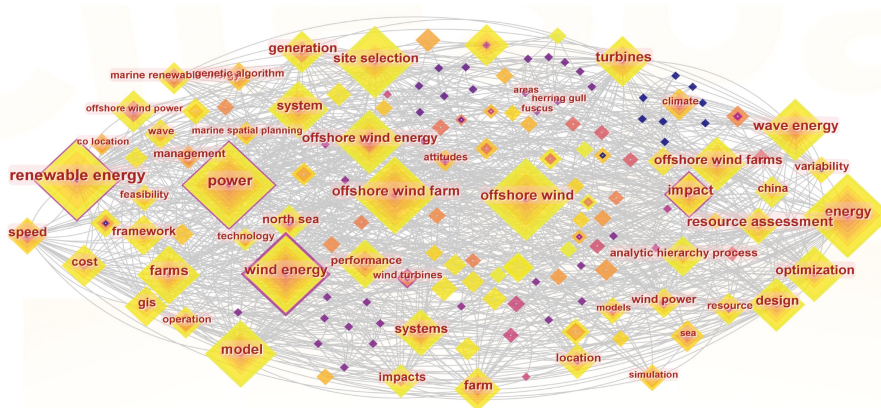


图 6 基于 CiteSpace 的关键字共现分析

Fig. 6 Keyword co-occurrence analysis based on CiteSpace

2.3.2 关键字聚类分析

对关键字进行聚类分析,进一步探索关键字之间的内在关系,聚类模块值 $Q=0.412>0.3$ 、聚类平均轮廓值 $S=0.7941>0.5$,表明聚类结果有效。聚类分

析结果(图 7)表明,关键字聚类分别为选址(site selection)、风力发电(wind power)、海上发电场(offshore wind farms)、比利时大陆架(Belgian continental shelf)和波浪能选址指南(Wave Energy

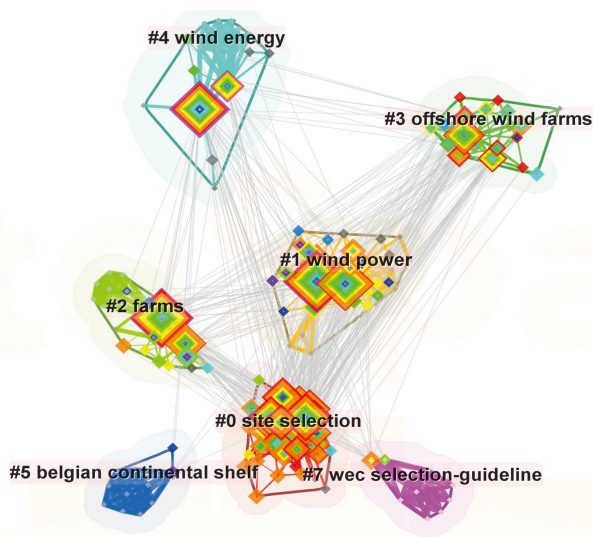


图 7 对关键词 K 聚类分析的结果

Fig. 7 Graph of keyword K clustering results

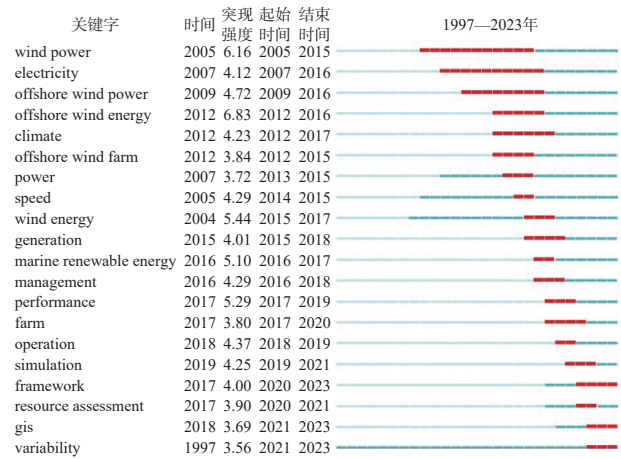
Converters(WEC) selection guideline), 基本围绕海上新能源发展和风电场选址区域及方法。

2.3.3 关键字突现分析

对关键字进行突发性探测, 能得到在一定时间内出现频次增长率快速增加的关键词, 其可以分析不同时期内的研究热点以及未来该领域的发展趋势。本次对 1997—2023 年前 20 个关键词进行突现分析, 以掌握研究阶段内海上风电场某一阶段研究领域热点的变化。突现分析结果(图 8)表明, 2005—2015 年, 研究热点关键词主要是风能(wind power)、电力(electricity)、海上风电(offshore wind power)、气候(climate)和速度(speed)等。主要的研究方向是对风力发电以及气候和风速等对风电场影响, 并进一步将研究区域关注到近海风电场。2016—2020 年, 研究热点主要为风电生产(generation)、场(farm)、管理(management)和工作情况(performance)等, 主要的研究方向是海上新能源风电场的管理和经营。2021 年至今, 研究热点主要是框架/framework)、模拟(simulation)、地理信息系统(GIS)、可变性(variability)和资源评估(resource assessment), 主要的研究方向是对风电场场址方法进行探索、结合模拟和 GIS 技术形成风电场选址方法框架。

2.3.4 关键字演变分析

聚类分析中的时间线视图(Timeline view)可以反映相关研究的发展历程和各阶段的主要研究内容。根据上述分析, 海上风电场的研究在 2010 年以后较



注: “时间”表示关键字首次出现的时间; “起始时间和结束时间”表示该关键词作为前沿研究内容的起始和终止年份; 蓝色范围表示关键字出现的时间范围, 红色范围表示该关键字作为前沿热点的时间范围。

图 8 前 20 个关键字突现分析

Fig. 8 Analysis of the top 20 keyword bursts

为集中, 因此, 将 1997—2023 年划分为 1997—2010 年、2011—2020 年和 2021—2023 年 3 个研究阶段进行分析, 主要是为了避免后期研究关键词出现频次较多, 覆盖前期研究关键词, 导致对海上风电场研究领域演进趋势认识不全面。

1997—2023 年关键字时间演变分析结果(图 9)表明, 在 1997—2023 年整个研究阶段内, 海上风电场领域起步较早的研究聚集在标签“选址指南”(#7 wec selection guideline), 其次主要关注是“近海风电场”(#3 offshore wind farms)及相关的“风力、风能”(#2 wind power、 #1 farms 和 #4 wind energy)等。2005 年后研究多集中在“位置选址”(#0 site selection)。

1997—2010 年关键字时间演变分析结果(图 10、表 3)表明, 1997—2010 年期间, 主要研究方向一方面是对海洋新能源(海洋波浪资源、海洋风能等)的评估, 另一方面是对海上风电场技术性和经济性的需求进行分析。在这一阶段, “合成孔径雷达”(#3 Synthetic aperture radar)在海上风电场中的应用是研究重点之一, 主要应用卫星合成孔径雷达对沿海风场信息遥感反演, 从而提供海上风速的空间模式, 评估海洋风能和波浪能等。大众对风电场的态度(#0 attitude)也是这一阶段研究重点之一, 分析人们对海上风电场持有的正面或负面态度, 以及引发这种态度的决定因素, 从而对海上风电场发展策略进一步规划。

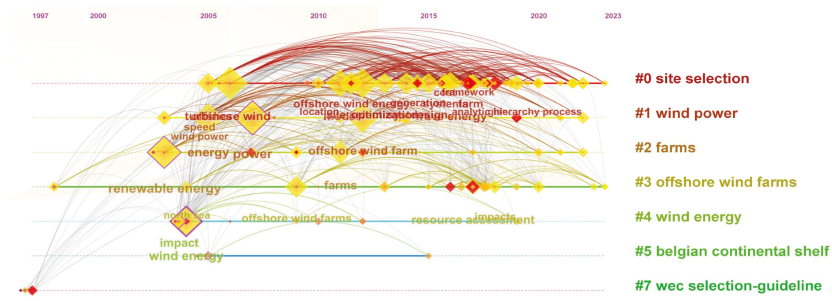


图 9 1997—2023 年关键字时间演变分析

Fig. 9 Analysis of time evolution from 1997 to 2023

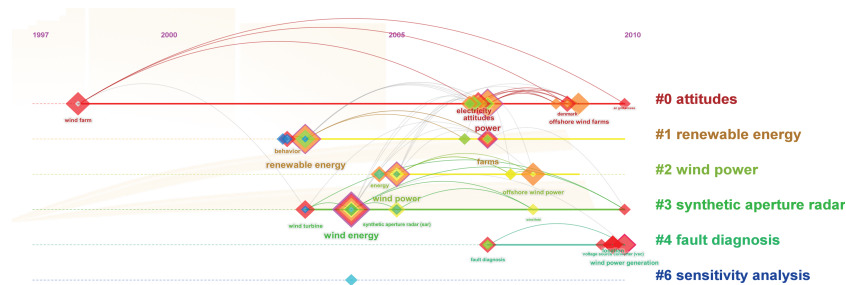


图 10 1997—2010 年关键字时间演变分析

Fig. 10 Analysis of time evolution from 1997 to 2010

表 3 1997—2010 年聚类关键字

Tab. 3 Clustered Keywords from 1997 to 2010

时间	聚类 Silhouette	主题 (LSI)
1997—2010年	0 0.819	绿色涡轮机; 可再生能源; 权力选择 态度; 风电场; 尼姆比; 风能; 海上风电场
	1 0.906	可再生能源; 环境影响评价; 系统综述; 环境政策; 负担得起的能源 海上风力涡轮机; 可再生能源; 负担得起的能源; 环境政策; 环境影响评价
	2 0.979	禁区; 海上风电; 风资源评估; 风力发电; 容量系数 容量系数; 多输出过程; 风力发电; 禁区; 海上风电
	3 0.955	风能; 合成孔径雷达; 互连要求; 风电场布局; 风力涡轮机 互连要求; 风电场布局; 风力涡轮机; 高压; 动力传输
	4 1	自适应信号处理; 信号处理; 时频分析; 风力发电; 感应发电机 可再生能源发电; 直流电缆建模; 同步发电机; 故障诊断; 自适应信号处理
	6 1	鸟; 保护经营敏感性分析; 风能

2011—2020 年关键字时间演变分析结果(图 11、表 4)表明, 在 2011—2020 年间, 除了一直作为研究重点的波浪能(#1 wave energy)、风能(#4 wind energy)、新能源(#5 renewable energy)和近海风电(#7 offshore wind power)外, 在这一阶段, 研究逐渐关注敏感性分析(#0 sensitivity analysis)和海洋空间规划(#3 marine spatial planning)。前者主要研究重点是海上风电场与陆地交流主电网连接过程中, 输电控制、电力系统模拟仿真和稳定性测试等方面, 该方面的研究结果为海上风电场的可靠运行提供支撑; 后

者主要研究方向是通过海洋空间规划选择合适风电场位置, 来避免海上风电场对海洋生态系统、海洋野生生物以及当地海洋水产养殖等产生较大的负面影响。

2021—2023 年关键字时间演变分析结果(图 12、表 5)表明, 在 2021—2023 年间, 除了前期一直被广泛研究的海洋空间规划(#0 marine spatial planning)、风能(#2 wind energy)、波浪能(#3 wave energy)、能量转化(#4 energy transition)和近海风电(#5 offshore wind power)之外, 关注重点趋向位置选址(#1 site selection)和间歇性(#7 intermittency)。风电场位置

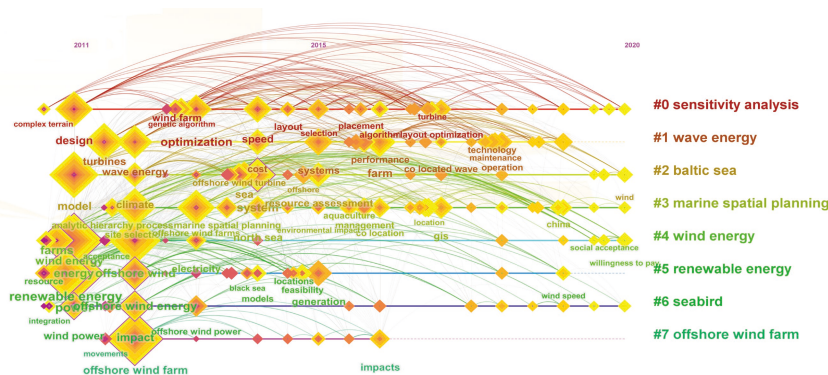


图 11 2011—2020 年关键字时间演变分析
Fig. 11 Analysis of time evolution from 2011 to 2020

表 4 2011—2020 年聚类关键字
Tab. 4 Cluster Keywords from 2011 to 2020

时间	聚类	Silhouette	主题 (LSI)
2011— 2020年	0	0.718	海上设施; 输电控制; 输电故障; 岸上电网; 断路器电压源转换器; 电力系统仿真; 功率变换器; 电力系统稳定性; 多端高压直流输电网
	1	0.656	波浪能; 海上风电; 混合风浪; 水动力响应; 物理建模 岸上电网; 断路器; 常规线路; 离岸可再生能源; 高压直流电力变换器
	2	0.747	可再生能源; 波浪能转换器; 海上风力涡轮机; 动态分析; 年代中期再分析资料 风能; 数值天气预报; 风资源评估; 中尺度模式; 风气候学
	3	0.564	海上风电场; 选址; 加权模型; 聚合算子; 多准则群 海洋空间规划; 多准则分析; 海洋水产养殖; 可再生能源; 贝类养殖
	4	0.782	风能; 海上设施; 发电经济学; 环境经济学; 福利损失 海上风电; 波浪能; 混合风浪; 水动力响应; 物理建模
	5	0.665	可再生能源; 风能; 波浪能; 海上能源; 功率密度 海上风能; 东海岸; 电力需求; 中尺度模式; 飓风风险
	6	0.725	海洋空间规划; 海上风电; 底栖生境; 海岸带管理; 可再生能源 继电保护; 大型海上风电场; 输电保护; 电网; 风力发电厂
7	0.749	海上风电场; 不良影响; 累积效应; 修复时间; 建筑噪声 风能; 涡轮机特性; 功率曲线; CO ₂ 捕集; 合成甲烷	

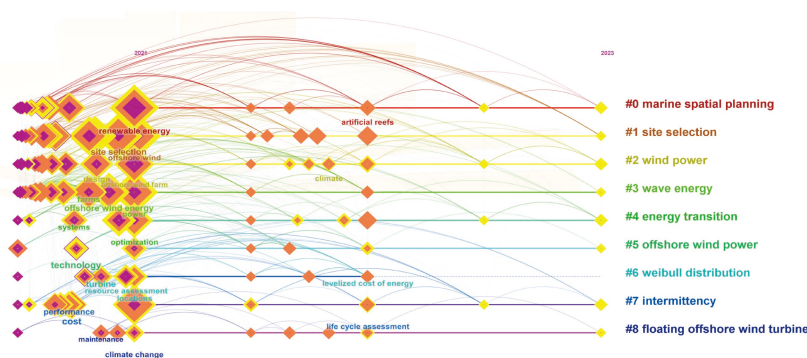


图 12 2021—2023 年关键字时间演变分析
Fig. 12 Analysis of time evolution from 2021 to 2023

的选择是前期研究的综合体现, 不仅需要考虑海洋风能、波浪能以及海洋地质等自然要素对选址的影响, 也要综合分析场址位置对海洋生态系统、其他海洋设置的影响以及成本投入和经济效益。间歇性

(#7 intermittency) 主要研究方向是对风能等可再生能源的间歇性问题进行分析解决, 通过探索不同的储能系统, 达到电网内发电和用电的平衡, 稳定风电系统性能, 从而提高可再生资源的利用率。

表 5 2021—2023 年聚类关键字
Tab. 5 Cluster keywords for from 2021 to 2023

时间	聚类	Silhouette	主题 (LSI)
	0	0.783	可再生能源; 海上风能; 海上风电; 风能; 蓝色经济 海上风电场; 捕捞努力位移; 适应能力; 捕鱼专家; 社会生态评估
	1	0.613	选址; 海上风电场; 可再生能源投资; 金融风险; 风险评估 层次分析法; 浮动海上风电场; 多准则决策方法; 证据推理; 多属性决策分析
	2	0.674	风能; 海上风电场; 海上风能潜力; 潜力分析; 计算流体力学 波浪能; 海上风能; 大西洋风力漂浮物; 位于同一地点的风浪场; 加权产品模型
	3	0.746	海上风能; 电力储备; 同位置风浪; 电网稳定性; 新的混合多准则决策 波浪能; 金丝雀岛; 蒙特卡罗方法; 华南地区; 海洋资源
2021— 2023年	4	0.571	高压直流输电; 海上风电; 模块化多电平变换器; 二极管整流器; 控制策略设计 能量转换; 风能; 阻尼技术; 浮动式风力涡轮机; 极限状态
	5	0.758	海上风电; 绿氢; 液氢; 低碳燃料; 漂浮风 可再生能源; 储能; 绿色氨; 海上风电场; 液态氢
	6	0.777	威布尔分布; 风能; 风速分布; 海上风电资源评估; 年发电量 社会蜘蛛优化; 粒子群优化; 海上风能评估; 威布尔参数估计; 风力评估
	7	0.843	风能; 海上风电; 集合预测; 冲突解决; 博弈论 海上风能; 社区规模的电力存储; 潮流能量; 沿海零能源社区; 混合可再生能源系统
	8	0.868	海上浮动风力涡轮机; 阵列间电力电缆; 应激因素; 高压直流输电; 海洋可再生能源 hvd输电; 高压; 能源安全; 电力系统稳定性; 远程社区电气化

3 讨论

3.1 影响风电场选址的因素

1996—2023 年的海上风电场选址相关文献研究结果表明, 海上风电场选址是一个复杂的综合性决策问题, 选址的结果能决定海上风电场的开发成功与否。目前对风电场宏观选址的主要考虑因素如下:

1) 风能等自然资源

不同阶段关键字演变分析结果中多次出现“风能”和“波浪能”等聚类词, 表明风力资源的分布是影响海上风电场宏观选址的重要因素之一。一般通过平均风速、风力功密度、风频和主要风向分布等指标对风能进行评估, 从而对海上风电场的选址有初步掌握。赵辉等^[21]认为风电场位置年平均风速和功率密度不小于 6 m/s 和 200 W/m² 时, 该区域才能作为潜在海上风电场场址, 并以 110 m 高度年平均风速 8.05 m/s, 功率密度 558 w/m² 的中广核嵊泗海上风电场场址位置进行选址合理性分析。唐征歧等^[22]分析上海市长江口周边区域风场及其他因素, 选取平均风速 6~7 m/s, 功率密度在 280~300 W/m² 区域作为上海深远海风电场场址。Mehmet Argin^[9]通过对土耳其海域风速进行分析, 选取 50 m 高度风速 3 m/s, 150 m 风速 4 m/s 以上区域作为筛选风电场场址基础条件。根据前期的研究成

果, 分析不同的风力资源指标能确定海上风电场的宏观地址, 其中海上风速和风力密度的大小是风电场选址重要考虑因素, 一般年平均风速大于 6 m/s 的地区较为适合建设风电场。

2) 海底地质结构

海上风电场选址的前期工作之一是进行海上勘探, 在此过程中对海底地质结构进行评估, 分析海底地形及地质框架结构, 并对沉积物性质以及粒度进行研究。一般海域表面沉积物按照 Folk 沉积物类型命名方法划分为含砾沉积物(砾质砂、含砾泥、泥质砂质砾、含砾泥质砂、含砾砂)和不含砾沉积物(砂、粉砂、泥质砂、粉砂质砂、砂质泥、砂质粉砂、泥)两大类。沉积物的粒度特征可以反映沉积动力、物质来源和搬运距离等, 其分析结果能评估海洋地貌变化以及水动力条件等^[23]。在施工过程中平均流速会变化, 改变工程区潮流场, 从而导致工程区海域冲淤环境变化, 影响风电场桩基周围泥沙冲击^[24]。因此, 一般会综合考虑水动力和泥沙冲淤影响来确定海上风电场工程选址, 研究结果(表 4、表 5)中“流体力学”“水动力响应”等关键词聚类也证实了这一点。因此, 海洋表面沉积物空间分布也是影响海上风电场宏观选址的重要因素之一。

3) 海洋地质灾害

海洋地质灾害对海上风电场生命周期有巨大的

威胁,主要海洋地质灾害包括天然气水合物分解、浅水流、海底滑坡和浅层气等。天然气水合物的分解会引起地层承载力不均匀分布,可能会造成钻井平台桩腿的不均匀沉降,甚至导致平台倾覆^[25]。浅水流(Shallow Water Flow, SWF)是分布在海底数百米以内浅地层中的超压砂体,在超压驱动下形成砂水流,在钻井时高速喷出,严重危害深水钻井。海底滑坡会导致浅地层结构受到破坏,对原生沉积具有较大破坏和改造作用,滑坡滑动和堆积作用严重威胁海上风电基础、海底电缆等重要设施,对海上风电工程的建设和运行造成巨大威胁^[26]。海底浅层气体一般是指海底以下1 km浅地层内聚集的有机气体,具有压力高、井喷强烈且速度快等特点,在海上钻探、原位测试和基础设施施工作业中易产生喷溢和火灾,严重威胁人员和设施的安全^[27]。因此,在海上风电场选址前期需要对潜在区域进行实地勘探,尽量避免海洋地质灾害多发区域。

4) 社会因素

不同阶段关键字演变分析结果中出现了“禁区”“环境政策”“金融风险”“环境影响评价”“鸟类”等关键字,表明海上风电场在选址过程中,也需要考虑社会经济和自然条件,从国家级的领海使用权到省级的已有区域规划方案都需要综合考虑,以避免产生用海冲突造成经济损失。一般风电场的选址需要避开军事区等具有重要意义区域;避开航道、锚地和港口等区域,避免船舶与风电机组的碰撞,造成船舶和风机破坏;避开通信、电力、油气等海底管线保护范围;综合考虑并网条件、交通条件和施工条件衡量建设和运营过程中经济和技术等多种因素。

此外,海上风电场选址需要考虑经济收益和技术可行性,离岸距离和水深会影响海上风机、建设材料的运输和风电场施工建设等,对海上风电场的运营影响较大。目前近海风电场一般在水深10~20 m、距岸线10~15 km的区域建造。同时还需要综合考虑场址所在区域是否具有电网消纳能力^[28-29],避免产生电能较多却需要花费较大代价运输其他区域情况。

3.2 海上风电场研究发展

在低碳经济背景下,加速能源结构的清洁化转型得到了世界各国的普遍重视^[30]。风力发电作为清洁能源的典型代表之一,在全球范围发展迅速,从传统的陆地风力发电到海洋风力发电,均表明风力发

电受到更多研究者的关注。海洋中丰富的风力资源导致其具有更高的开发价值和利用潜能,基于目前的海上风电场研究重点,未来海洋风电场可能的发展方向如下:

1) 浅海风电场向深海风电场过渡

全球90%的海上风机装机容量在北海和附近的大西洋进行调试和运营,北欧北海和波罗的海附近的海上风电生产最高,集中了较多的风电场。这与我们对关键词聚类分析和时间演变分析结果中“比利时大陆架”和“波罗的海”较一致。目前海上风电场的建设区域多集中在浅海,水深通常在不超过50 m的地区,位置多靠近陆地,浅海风能受近岸地形和陆地影响,风资源相对稳定,致使海上风电场选址优先考虑该区域,但是随着技术的不断进步和可再生能源的重要性日益凸显,越来越多的国家开始在深海建立风电场,以期为能源的转型和减少化石燃料的依赖作贡献。

与浅海风电场对比,在地理位置上深海风电场一般选择离海岸远的海域,在较深水域中建设,需要更复杂的基础设施。位置的差异导致深海风电场风力资源更为丰富,风速较高风力潜能较大。在对环境的影响中,浅海和深海风电场都会不可避免影响海洋生态系统,深海风电场距离陆地较远,对人类景观视觉和噪音等影响较小。虽然目前深海风电场面临建设、维护和运营等较多问题,但深海丰富的风力资源进一步推动海上风电场的研究从浅海向深海过渡,致使深海风电场的开发成为该领域研究热点之一。

2) 浮动式海上风电场研究

“浮动式海上风机”多次出现在我们关键字时间演变分析结果中,表明对该领域的研究逐渐引起重视。海上风电场研究区域从浅海向深海过渡,必然需要推进了新的技术和设备的产生,一般传统的桩式基础通过将钢筋混凝土或钢制的桩(通常是竖直的柱状结构)插入海床中,以提供稳定的支撑结构,根据不同的地质条件设计不同的钻孔、打桩技术方案从而支撑海洋平台、风力涡轮机等设施,但桩式基础的应用在一些场景可能会受限制,尤其是深水区域。与传统桩式基础相对比,浮式基础适应较深的水深,能开采60 m深度以上的海上区域,突破一般50 m技术限制,使风电场能够部署在距离海岸较远

的远海区域。其浮筒式平台、半潜式平台和张力腿平台等不同的设计能适应不同的海洋环境,且浮动基础在安装过程中对海底的入侵性较小具有一定的环境效益。因此,未来随着对深海风电场的开发,浮动式海上风电场将会成为该领域研究重点之一。浮动式基础或者桩式基础的选择一般取决于风电场位置、水深、海洋环境条件以及技术可行性等因素,随着技术的发展和深远海洋风能潜力的发觉,浮动式基础在深水海域中的应用将会越来越受关注。

3) 海上风电场以其他海上开发项目合作

我们对关键字聚类分析的结果中多次出现“海洋空间规划”,海洋空间规划是指对海洋领域进行综合性规划和管理,分析和分配人类海洋活动时空分布,有效地组织海洋资源和海洋空间的利用,平衡用海活动之间的关系,平衡海洋开发利用需求与海洋生态环境保护需求之间的关系^[31-32]。在此背景下,人们对海上风电场和水产养殖场整合共存的混合装置越来越感兴趣^[33],这与我们的研究结果“海洋农场”“贝类养殖”一致(表 4)。这样的共存装置需要关注风能和波浪能的生产潜力、水产养殖网箱和能源装置的结构要求(例如水产养殖的系泊方式和风电场地基的结合)、操作和维护活动的限制以及向电网输送能源的可行性等问题^[34]。两者可以共享部分基础设施如输电线路、水下设施等^[21],从而降低建设和运营成本,且养殖和风电能使收入来源多样化,最终达到相关利益者资源共享,又提高了海洋空间利用效率的共赢局面^[35]。因此,未来研究方向之一是与海上风电场共存的海洋养殖场的设计,需要进一步分析风电场建设对海洋生态环境的影响,如何结合风机基础和养殖设施等问题^[36]。

海洋风电场除了结合海洋养殖业以外,研究结果(表 5)多次出现“绿氢”“液氢”和“绿氨”等关键字,表明海上风电场与其他新能源的联合开发也逐渐受到更多的关注^[37]。由于陆地上进行氨气和氢气合成,受到用地、选址、审批和投资等诸多因素限制,很多国家把目光投向了海上风电,利用海上风电产生的电能,进行绿氢和绿氨的生产,并利用绿氨作为氢能源载体运输到岸上,同时解决 2 个能源相关市场^[38]。此外,海上风电与海上石油开发进行结合,两者均走向深水远海,油气矿区和新能源开发在地理空间上会出现部分重合,进一步促进两者的结合。

4 结论

通过 CiteSpace 软件对 1177 篇文献进行分析,自 2010 年以后,海上风电场发文量增加幅度较大,美国、中国和英格兰发表研究文章最多,西班牙,丹麦,德国和挪威等欧洲国家对海上风电发展的影响较大,不同国家、地区和机构之间的合作研究逐渐紧密。前期(1997—2010 年)对海上资源评估研究较多,为海上风电场宏观选址提供坚实基础;中期(2011—2020 年),逐渐关注海上风电场的微观布局,对风电场内电力系统以及管线配置研究增多;近期(2021—2023 年)探索海上风电场的稳定运行,分析不同的储能系统来解决风资源的间歇问题,实现海上风电场的可持续发展。结合目前的研究,海上风电场选址优先考虑风力资源丰富、海底地质构造稳定、海洋灾害较少区域,平衡人与自然共处空间。整体来看,未来海上风电场领域研究将从浅海向深海开发,并推动浮动式风电场工程技术的发展,除此之外,海上风电场会和其他海上油气开发、海洋养殖等海洋项目合作更加紧密。

参考文献:

- [1] KIKSTRA J S, MASTRUCCI A, MIN J, et al. Decent living gaps and energy needs around the world [J]. *Environmental research letters*, 2021, 16(9): 095006. DOI: 10.1088/1748-9326/ac1c27.
- [2] DECASTRO M, SALVADOR S, GÓMEZ-GESTEIRA M, et al. Europe, China and the United States: three different approaches to the development of offshore wind energy [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2019, 109: 55-70. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.025.
- [3] ZHAO X G, REN L Z. Focus on the development of offshore wind power in China: Has the golden period come? [J]. *Renewable energy*, 2015, 81: 644-657. DOI: 10.1016/j.renene.2015.03.077.
- [4] HARRISON-ATLAS D, LOPEZ A, LANTZ E. Dynamic land use implications of rapidly expanding and evolving wind power deployment [J]. *Environmental research letters*, 2022, 17(4): 044064. DOI: 10.1088/1748-9326/ac5f2c.
- [5] 杨光亚. 欧洲海上风电工程实践回顾及未来技术展望 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(21): 23-32. DOI: 10.7500/AEPS20210427001.
- [6] YANG G Y. Review on engineering practices and future technology prospects of European offshore wind power [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(21): 23-32. DOI: 10.7500/AEPS20210427001.
- [6] MOON H, JEONG J, PARK S, et al. Numerical and experimental validation of vortex generator effect on power performance

- improvement in MW-class wind turbine blade [J]. *Renewable energy*, 2023, 212: 443-454. DOI: 10.1016/j.renene.2023.04.104.
- [7] 刘晓明, 谭祖颀, 袁振华, 等. 柔性直流入海上风电并网选址综合优化 [J]. *发电技术*, 2022, 43(6): 892-900. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22011.
- LIU X M, TAN Z K, YUAN Z H, et al. Comprehensive optimization of access point selection for offshore wind farm integrated with voltage source converter high voltage direct current [J]. *Power generation technology*, 2022, 43(6): 892-900. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22011.
- [8] CROWLE A, THIES P. Floating offshore wind turbines port requirements for construction [J]. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part M: journal of engineering for the maritime environment*, 2022, 236(4): 1047-1056. DOI: 10.1177/14750902221078425.
- [9] ARGIN M, YERCI V, ERDOGAN N, et al. Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multi-criteria site selection [J]. *Energy strategy reviews*, 2019, 23: 33-46. DOI: 10.1016/j.esr.2018.12.005.
- [10] GAO X X, YANG H X, LU L. Study on offshore wind power potential and wind farm optimization in Hong Kong [J]. *Applied energy*, 2014, 130: 519-531. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.02.070.
- [11] AYDIN N Y, KENTEL E, DUZGUN S. GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: a case study from western Turkey [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2010, 14(1): 364-373. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.023.
- [12] ATICI K B, SIMSEK A B, ULUCAN A, et al. A GIS-based multiple criteria decision analysis approach for wind power plant site selection [J]. *Utilities policy*, 2015, 37: 86-96. DOI: 10.1016/j.jup.2015.06.001.
- [13] SHAPER D. The structure of scientific revolutions [J]. *The philosophical review*, 1964, 73(3): 383-394. DOI: 10.2307/2183664.
- [14] BURT R S. Structural holes and good ideas [J]. *American journal of sociology*, 2004, 110(2): 349-399. DOI: 10.1086/421787.
- [15] PIROLI P, CARD S. Information foraging [J]. *Psychological review*, 1999, 106(4): 643. DOI: 10.1037/0033-295X.106.4.643.
- [16] KLEINBERG J. Bursty and hierarchical structure in streams [C]// Anon. Proceedings of the Eighth ACM SIGKDD international Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Edmonton Alberta, Canada, July 23, 2002. New York: Association for Computing Machinery, 2002: 91-101. DOI: 10.1145/775047.775061.
- [17] 陈超美. CiteSpace的分析原理 [M]//陈超美, 李杰. 科学知识前沿图谱实践. 北京: 高等教育出版社, 2018: 1-4.
- CHEN C M. Design and analytic principles of CiteSpace [M]// CHEN C M, LI J. Practice of Mapping Scientific Frontiers. Beijing: Higher Education Press, 2018: 1-4.
- [18] LI X J, MA E, QU H L. Knowledge mapping of hospitality research- a visual analysis using CiteSpace [J]. *International journal of hospitality management*, 2017, 60: 77-93. DOI: 10.1016/j.ijhm.2016.10.006.
- [19] SUN Y Q, WU S M, GONG G Y. Trends of research on polycyclic aromatic hydrocarbons in food: a 20-year perspective from 1997 to 2017 [J]. *Trends in food science technology*, 2019, 83: 86-98. DOI: 10.1016/j.tifs.2018.11.015.
- [20] 韩增林, 李彬, 张坤领, 等. 基于 CiteSpace 中国海洋经济研究的知识图谱分析 [J]. *地理科学*, 2016, 36(5): 643-652. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.05.001.
- HAN Z L, LI B, ZHANG K L, et al. Knowledge structure of China's marine economy research: an analysis based on CiteSpace map [J]. *Scientia geographica sinica*, 2016, 36(5): 643-652. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.05.001.
- [21] ZANUTTIGH B, ANGELELLI E, BELLOTTI G, et al. Boosting blue growth in a mild sea: analysis of the synergies produced by a multi-purpose offshore installation in the northern Adriatic, Italy [J]. *Sustainability*, 2015, 7(6): 6804-6853. DOI: 10.3390/su7066804.
- [22] 唐征歧, 江建平, 李子林, 等. 深远海域海上风电场定量选址方法研究 [J]. *交通信息与安全*, 2018, 36(2): 106-111. DOI: 10.3963/j.issn.1674-4861.2018.02.015.
- TANG Z Q, JIANG J P, LI Z L, et al. A quantitative method for site selection of offshore wind farms in far-reaching sea areas [J]. *Journal of transport information and safety*, 2018, 36(2): 106-111. DOI: 10.3963/j.issn.1674-4861.2018.02.015.
- [23] 梅西, 熊伟, 张勇, 等. 中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式 [J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1447-1462. DOI: 10.12029/gc20200511.
- MEI X, XIONG W, ZHANG Y, et al. Distribution regularity and sedimentary differentiation patterns of China seas surface sediments [J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1447-1462. DOI: 10.12029/gc20200511.
- [24] 刘必劲. 福建省海上风电场选址影响因素探讨 [J]. *福建水产*, 2015, 37(4): 320-324. DOI: 10.14012/j.cnki.fjsc.2015.04.009.
- LIU B J. Research on the influence factors of offshore wind farm location in Fujian Province [J]. *Journal of Fujian fisheries*, 2015, 37(4): 320-324. DOI: 10.14012/j.cnki.fjsc.2015.04.009.
- [25] 徐龙. 海上风电推动能源转型的战略选择分析 [J]. *质量与市场*, 2021(11): 145-147.
- XU L. Analysis of strategic options for offshore wind to drive the energy transition [J]. *Quality & market*, 2021(11): 145-147.
- [26] 单治刚, 孙森军, 王振红, 等. 海上风电重大工程地质问题与对策研究 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(增刊1): 203-212. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0465.
- SHAN Z G, SUN M J, WANG Z H, et al. Research on major engineering geological problems and corresponding countermeasures in offshore wind power [J]. *Journal of engineering geology*, 2021, 29(Suppl.1): 203-212. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0465.
- [27] 李中, 谢仁军, 吴怡, 等. 中国海洋油气钻完井技术的进展与展望 [J]. *天然气工业*, 2021, 41(8): 178-185. DOI: 10.3787/j.issn.

- 1000-0976.2021.08.016.
LI Z, XIE R J, WU Y, et al. Progress and prospect of CNOOC's oil and gas well drilling and completion technologies [J]. *Natural gas industry*, 2021, 41(8): 178-185. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.016.
- [28] 刘展志, 王诗超, 郝为瀚, 等. 大规模海上风电集中送出建设模式研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(1): 13-20. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.002.
LIU Z Z, WANG S C, HAO W H, et al. Research on construction mode of large-scale offshore wind power centralized transmission [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 13-20. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.002.
- [29] 王晴勤, 温国标. 基于交能融合的分布式海上风电选址与布置 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(2): 59-67. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.06.
WANG Q Q, WEN G B. Site selection and layout of distributed offshore wind power based on energy and transportation integration [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 59-67. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.06.
- [30] STRUNZ S. Speeding up the energy transition [J]. *Nature sustainability*, 2018, 1(8): 390-391. DOI: 10.1038/s41893-018-0120-2.
- [31] 郭雨晨. 英国海洋空间规划关键问题研究及对我国的启示 [J]. *行政管理改革*, 2020(4): 74-81. DOI: 10.14150/j.cnki.1674-7453.2020.04.009.
GUO Y C. Marine spatial planning: lessons learned from English experience [J]. *Administration reform*, 2020(4): 74-81. DOI: 10.14150/j.cnki.1674-7453.2020.04.009.
- [32] PYC D. Implementation of marine spatial planning instruments for sustainable marine governance in Poland [J]. *TransNav: international journal on marine navigation and safety of sea transportation*, 2019, 13(2): 311-316. DOI: 10.12716/1001.13.02.06.
- [33] BOO S Y, SHELLEY S A, SHIN S H, et al. Design and analysis of a sub-surface longline marine aquaculture farm for co-existence with offshore wind farm [J]. *Journal of marine science and engineering*, 2023, 11(5): 1034. DOI: 10.3390/jmse11051034.
- [34] WEISS C V C, ONDIVIELA B, GUINDA X, et al. Co-location opportunities for renewable energies and aquaculture facilities in the Canary Archipelago [J]. *Ocean & coastal management*, 2018, 166: 62-71. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.05.006.
- [35] MICHLER-CIELUCH T, KRAUSE G, BUCK B H. Marine aquaculture within offshore wind farms: social aspects of multiple-use planning [J]. *GAIA-ecological perspectives for science and society*, 2009, 18(2): 158-162. DOI: 10.14512/GAIA.18.2.14.
- [36] 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. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.01.
YANG J, ZHANG J H, MA Z R, et al. Development trend and technical challenges of the integration of offshore wind turbine with marine ranch [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 1-16. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.01.
- [37] 王峰, 遂鹏, 张清涛, 等. 海上风电制氢发展趋势及前景展望 [J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(5): 41-48. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2022.05.004.
WANG F, LU P, ZHANG Q T, et al. Development trend and prospects of hydrogen production from offshore wind power [J]. *Integrated intelligent energy*, 2022, 44(5): 41-48. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2022.05.004.
- [38] SALMON N, BAÑARES-ALCÁNTAR A R. A global, spatially granular techno-economic analysis of offshore green ammonia production [J]. *Journal of cleaner production*, 2022, 367: 133045. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133045.

作者简介:



李志川

李志川(第一作者)

1982-, 男, 博士, 海油发展清洁能源公司风电首席工程师, 主要从事海上风电场规划与设计(e-mail)lizhch6@cnooc.com.cn。

李星华(通信作者)

1998-, 女, 硕士, 主要从事 GIS 在海上风电场的应用(e-mail)lxhjeenedo@163.com。

(编辑 叶筠英)

广 告

封面图片: 战略性新兴产业与未来产业能源专辑 ----- 封一

《南方能源建设》入选新华网 2024 年科技期刊服务高质量创新发展案例 ----- 封二

2025 年先进核能技术专刊征稿启事 ----- P189

《南方能源建设》期刊最美封面 ----- 封三

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司 ----- 封四