

Doi:10.11840/j.issn.1001-6392.2024.03.011

海上风电场区位分布的动态演进和影响因素研究

韦有周¹, 崔晴¹, 刘一寒¹, 林香红²

(1. 上海海洋大学 经济管理学院, 上海 201306; 2. 国家海洋信息中心, 天津 300171)

摘要: 为应对能源安全和气候变化, 培育新兴产业, 我国大力发展海上风电产业。经过十余年发展, 海上风电累计装机总量已跃居全球首位, 但在这一过程中, 风电场的区位分布表现出显著的时空异质性, 即随着时间推移, 其经历一个由江苏到福建、广东、山东等地动态演化的过程, 研究不同阶段影响区位分布的主导因素及其变化, 对政府制定有效政策以促进产业发展具有重要意义。根据国家发布的政策文件以及中国风能协会等公布的数据, 本文划分了海上风电发展阶段, 采用动态偏离-份额拓展模型来测度产业转移以揭示区位分布的演进; 进一步将模糊集定性比较分析法与地理探测器模型结合, 从动态的角度分析了产业发展各阶段区位分布的主导因素及其变化, 并剖析了增长突出省区市的发展路径及其差异化。研究表明, 发展初期, 海上风电场区位分布受政府扶持力度和自然因素的影响较多, 随着产业发展及技术进步, 创新环境与专业人才逐渐成为关键因素, 典型的发展路径有政策驱动型、水域-政策驱动型、风能驱动型、创新-知识型、知识-政策驱动型等。进一步加快人才培养、完善产业链条、优化扶持方式应成为推动产业健康持续发展的努力方向。

关键词: 海上风电; 区位分布; 时空异质性; 地理探测器模型; fsQCA

中图分类号: P748; F129.9; TK89

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2024)03-0404-11

Study on dynamic evolution and influencing factors of location distribution of offshore wind farms

WEI Youzhou¹, CUI Qing¹, LIU Yihan¹, LIN Xianghong²

(1. College of Economics and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Marine Data Information Center, Tianjin 300171, China)

Abstract: In order to cope with energy security and climate change, and cultivate emerging industries, China has vigorously developed the offshore wind power industry. After more than ten years of development, the total installed capacity of offshore wind power has leapt to the first place in the world. But in this process, the location selection of wind farms shows significant spatiotemporal heterogeneity. that is, as time goes by, it experiences a dynamic evolution process from Jiangsu to Fujian, Zhejiang, Guangdong, Shandong. It is of great significance for the government to formulate effective policies to promote the industrial development on the basic of studying the dominant factors affecting the location distribution in different stages. According to the policy documents issued by the state and the data published by China Wind Energy Association, the development stages of offshore wind power were divided. And the evolution of location distribution was measured from a new research perspective by using extended model of the dynamic offset-share model. Then, by the combination of the fuzzy set qualitative comparative analysis (fsQCA) and the geographic detector model, the change of dominant factors of location distribution was analyzed from a dynamic perspective, and the development paths of provinces and cities with prominent growth rates were analyzed. The study shows that in the early stage of development, the location selection is largely affected by government support and natural factors. With industrial development and technological progress, innovation environment and professional talents gradually become the key factors. Typical development paths include policy oriented, water condition-

收稿日期: 2023-10-20; 修订日期: 2023-11-23;

基金项目: 上海市哲学社会科学规划课题项目 (2020BJB025)

作者简介: 韦有周 (1976—), 博士, 副教授, 主要从事海洋经济、世界经济研究, 电子邮箱: yzwei@shou.edu.cn

通信作者: 林香红, 副研究员, 主要从事海洋经济研究, 电子邮箱: tianshilezhuzhu@163.com

崔晴, 硕士研究生, 主要从事海洋经济研究, 电子邮箱: cuiqing96@163.com

policy oriented, wind oriented, innovation-talent oriented, talent-policy oriented, etc. Accelerating the cultivating of talents, improving the industrial chain, and optimizing the way of support should become the direction of efforts to promote the healthy and sustainable development of the offshore wind power industry.

Keywords: offshore wind power; spatiotemporal heterogeneity; location distribution; Geographic Detector model; fsQCA

发展海上风电产业是世界各国应对气候变化、破解能源安全问题、培育新兴产业的重要途径之一。十余年来，中国海上风电产业获得迅速发展，并逐渐由近海向深远海延伸。全球风能理事会（GWEC）发布的《2022年全球海上风电报告》显示，2022年我国海上风电装机规模已位居全球首位，新增装机容量占世界比重超过70%^[1]。但在产业发展过程中，海上风电场的区位分布表现出明显的时空异质性，上海、江苏、福建、浙江、广东、山东等沿海省市相继成为快速增长的地区。

探究海上风电场区位分布的动态演进规律，研究不同阶段影响区位分布的主导因素及其变化，分析典型沿海省区市海上风电的发展路径及其差异化，对政府制定有效政策以促进产业发展具有重要意义。

1 文献综述

进入21世纪，各国开始纷纷探索海上风电的商业化开发模式，欧洲在早期一枝独秀，关于海上风电的研究，也以探索性的定性论述以及不同国家的比较为主^[2-4]。中国起步较晚，在2010年后才进入商业化发展阶段，早期关于海上风电的研究主要包括发展制约因素^[5-7]、政策建议^[8-10]、经验借鉴^[11-12]、发展现状^[13-15]等；研究表明海上风电的技术性要求高，作为后起之秀，中国要充分发挥后发优势，借鉴欧洲在产业不同发展阶段激励政策的调整、演进的经验，做好规划指引。目前，国外一些学者逐渐关注到海上风电场的安全性、系统化管理^[16]以及选址优化^[17]问题，鉴于海上风电项目的长期性以及深远海开发的高度离岸性，海上风电的安全性、管理的系统性深刻影响着全生命周期成本^[18]，构建基于集成弹性工程的运维框架^[19]、采用闭环维护的管理方式^[20]等建议被提出以保证运维的经济性；从国内来看，随着补贴政策逐渐退出，海上风电产业投资收益率不高的问题进一步凸显，项目的价值评估、成本分析等

问题开始受到学者关注^[21-23]。同时，在风能装机容量逐渐扩大、海域集约化管理的形势下，海上风电场选址优化问题的重要性逐渐上升，部分学者利用多决策分析^[24-25]、层次分析^[26]、神经网络^[27]等方法，从静态的、微观的角度对海上风电场的最优开发区域进行分析；国内对项目选址的研究则较少，已有文献多以尾流模型为基础，提出提升风能发电效率的微观选址方案^[28-29]。

综上所述，海上风电的研究范围不断拓展，研究视角逐渐多元，研究方法不断丰富，然而，尚未有学者分析中国海上风电场区位分布的动态演进，并深入探究其影响因素。因此，本文尝试在划分海上风电发展阶段的基础上，采用动态偏离份额模型的拓展模型，以对中观产业转移的测度来反映微观区位分布的动态演进，并将模糊集定性比较分析法用于区位分布影响因素的研究，结合地理探测器模型，从动态角度分析影响海上风电产业区位分布的主导因素及其变化，剖析增长突出省区市的发展路径及其差异化，以期政府根据产业阶段制定有效政策以促进海上风电发展提供建议。

2 研究设计

2.1 研究框架

根据长波理论及产品生命周期理论，随着时间推移，产业生产技术特征发生改变，产品生产要素需求也会发生变化^[30]。在不同发展阶段，企业进行区位选择时，对区位因子的重要性程度也会有不同评价^[31]，即区位分布影响因素的重要性程度会随着产业发展而发生改变^[32]。

海上风电场的区位分布是微观企业区位选择行为的结果，风电开发商会根据当下阶段最重要的区位因子进行区位选择，随着时间推移、产业发展以及区位因子重要性程度的变化，企业将据此选择新的地区来布局，形成新的区位分布。当大量开发商在新的地区建设海上风电场，产业转

移的中观现象随之发生,也即企业区位分布的变化宏观表现为产业转移^[33-34]。

基于以上分析,本文分析框架如图1所示。A、B、C、D代表影响因素,随着产业的发展,虚线圆会发生移动,从而虚线圆所涵盖的最大区域(即主导因素)会发生变化,不同因子主导下

的区位分布也随之发生改变,进而表现为产业转移。因此,本文首先划分产业发展阶段,以对产业转移的定量测度来反映区位分布的变化,并进一步探析各阶段影响区位分布的主导因素及其变化,研究各增长突出省区市的发展路径及其差异化。

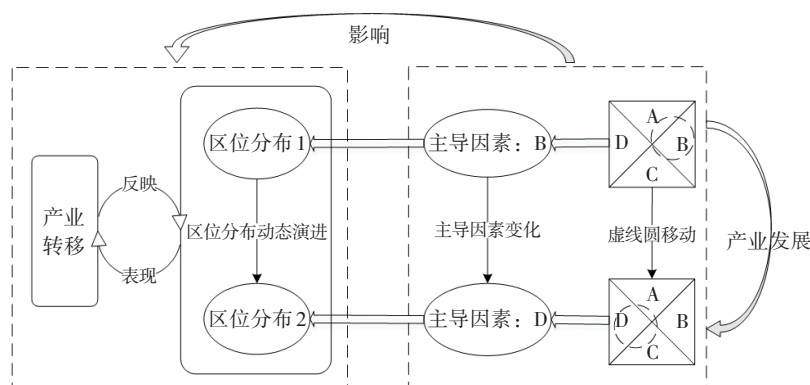


图1 分析框架图

2.2 指标选取与数据来源

区位分布的影响因素研究是伴随着区位选择理论的发展而发展的。传统区位理论从微观角度出发,认为最优区位是由成本最小化或利润最大化决定的点^[35-36],并论证了自然资源、地理环境、市场等影响企业成本和利润的因素对区位分布的作用。随着集聚经济的出现、跨国投资的兴起等,包括技术创新^[37-38]、知识外溢^[39-40]等在内的新区位因子开始显现,非经济因素的作用也开始受到关注^[41-42],现代区位理论的研究视角逐渐从微观企业层面延伸到产业层面^[43-44],转向系统的、整体的分析^[45],区位分布和产业布局也越来越密不可分。因此,随着时间的推移,区位因子并不是一成不变的,而且,不同产业类型,区位条件的选择也会存在差异。归纳起来有五个方面:一是自然因素,包括地理环境、能源、气候等;二是经济因素,包括市场潜能、市场规模等;三是技术因素,包括影响创新能力和技术扩散的环境;四是知识因素,包括知识溢出等;五是政策因素,包括财税优惠、要素保障、市场培育等政府扶持政策。

自然因素对产业布局的影响较大,不同产业对自然条件的要求也不尽相同。对于海上风电产业来说,风电场基础设施建设受限于自然水域条件,后者决定了施工难度,影响着项目经济可行

性^[46]。同时,作为新能源产业,能源禀赋是其重要物质基础,是产业形成的先决条件,海上风能资源的多寡决定了开发潜力的大小^[47]。因此,自然水域条件和风能储量可以用来表征自然因素。鉴于海域水深越深、地质越坚实,安装难度越高,而潮间带地质较易进行风电机组安装,近海水深和潮间带面积被确定为代表性指标以反映自然水域条件;风能储量的代表性指标则选取风能理论蕴藏量。

技术因素是企业生产成本降低的关键所在。作为新兴产业,海上风电发展高度依赖新技术等创新要素,良好创新环境有助于提高区域内企业的创新能力^[48],因此,技术创新环境可以作为技术因素的代表。借鉴《辞海》中对“环境”的释义,区域技术创新环境应既包含区域为技术创新提供的条件,也包括在条件的基础上形成的技术创新情况,代表性指标为反映技术创新情况的R&D项目数量、反映技术创新条件的创新环境综合得分以及反映制度环境的市场化指数。

知识因素主要受专业人才数量的影响。人是知识创造、传播的主体,人可以通过学习、研究获得知识,并将知识进行扩散与应用,产生外部经济^[49-50]。一个地区接受相关专业教育的人数越多,潜在的人力资源就越多,知识溢出也越大,技术进步也越快。因此,专业人才数量可以表征

知识因素，代表性指标为海洋科研机构的科研人员数量和高校的海洋相关专业毕业生人数。

经济因素是指影响市场规模的因素。对海上风电产业来说，其市场规模由电力需求数量和上网电价决定，但由于海上风电场的上网电价主要为标杆电价^[51]，因此，需求数量直接决定了海上风电产业的市场规模。考虑到东部沿海省区市经济发达，电力供应长期偏紧，海上风电离电力负荷中心近^[52]，可以有效弥补电力供应的不足，从短期来看，电力缺口是影响海上风电需求量的最主要因素，因而，代表性指标确定为电力消费量和发电量的差额。

政策因素指的是政府的扶持政策。政府政策的支持和引导是产业发展的强大推动力，它可以使地区在产业发展博弈中获得声誉^[53]，其包括资金扶持、税收优惠、政策保障等多方面。考虑到政府制定的产业发展目标越高，意味着扶持力度越大，而“十二五”“十三五”“十四五”期间，各个沿海省区市或在能源发展规划或在电力发展规划或在海洋经济发展规划等中都明确了海上风电发展目标，因此，本文用各类规划中海上风电产业发展目标（包括累计并网容量、装机容量等）的高低来反映各地政府扶持力度的大小。

各影响因素、具体代表性指标及数据来源如表1所示。

2.3 研究方法 with 数据处理

2.3.1 研究方法

本文采用地理探测器模型和模糊集定性比较分析法（fsQCA）相结合的方法。前者被广泛应用于自然科学和社会科学领域，能够探测空间分异

性并揭示背后驱动因子^[54]，可以有效测度影响因素的重要性程度；后者基于集合理论和组态思维^[55]，是一种案例导向型的研究方法，其可以从组态视角下分析影响因素的联动效应和路径。两种方法结合使用，分析结果可以相互验证以减少样本数量有限的影响；再者，地理探测器模型的分析结果可以为fsQCA的组态命名提供依据，进而分析影响海上风电场区位分布的主导因素及其变化，剖析各增长突出省区市的发展路径及其差异化。

2.3.2 数据处理方法

(1) 地理探测器模型的数据处理

根据地理探测器的要求，探测因子（影响因素）需要由数值型变量转化为分类变量。本文将除政府扶持力度以外的探测因子在ArcGIS中按照自然断点法分为五类；政府扶持力度则根据各个省份在五年规划中提出的海上风电发展目标分为高（5）、较高（4）、中（3）、较低（2）、低（1）五类。此外，为了满足地理探测器模型的使用条件，本文在分类过程中使每个类别至少包含两个样本。

(2) fsQCA的数据处理

鉴于样本量较少，且经过分类后数据的范围较小，因此，数据校准采用了赵岩等^[56]的方法，以最大值作为完全隶属点，最小值作为完全不隶属点；同时，为了尽可能避免出现0.5的模糊集隶属度，本文选择均值作为交叉隶属点，进而得到模糊集隶属分数。（考虑到数值型结果变量数据差距大、分布不均，因此，在直接校准数值型结果变量之前，本文也先将其转化为分类变量。）

表1 影响因素的代表性指标和数据来源

影响因素	代表因素	代表性指标	数据来源
自然因素	自然水域条件	潮间带面积	OSGeo
		近海水深	由四大主要海域近似
	风能储量	海上风能理论储量	《中国近海海洋—海洋可再生能源》
技术因素	技术创新环境	R&D项目数量	中国经济金融研究数据库（CSMAR）
		市场化指数	中国市场化指数数据库
		创新环境综合得分	《中国区域创新能力评价报告》
知识因素	专业人才数量	海洋科研机构科研人员数量 海洋相关专业毕业生人数	中国海洋经济统计年鉴
经济因素	市场需求数量	电力消费量和发电量的差额	国家统计局
政策因素	政府扶持力度	五年规划中海上风电发展目标	可再生能源发展规划、海洋经济发展规划、能源发展规划、电力发展规划等

3 区位分布的动态演进

3.1 海上风电发展历程

在海上风电产业十余年发展过程中,政府不断优化扶持政策与措施,而每次政策的调整也意味着海上风电产业进入了新的发展阶段。以国家发展改革委标志性文件发布时间为节点,海上风电发展可以划分为四个阶段,即示范性项目建设阶段(2008—2013年)、探索发展阶段(2013—2018年)、集中开发阶段(2018—2020年)、规模化和深远海探索开发阶段(2020年以后),各阶段海上风电发展情况如表2所示。

示范性项目建设阶段,海上风电产业处于发展初期,发展速度缓慢,但对潮间带滩涂风电场开发进行了有益尝试;探索发展阶段,上网电价得以确认,促进了海上风电场的开发与建设;集中开发阶段,由于“国补”将要退出,各省区市抓住最后机会大规模开发海上风电,迎来“抢装潮”;进入“十四五”时期,我国海上风电进入平价时代,海上风电向深远海大型化、规模化发展。

3.2 区位分布的动态演进

区位分布的变化指的是不同阶段,新进企业会选择不同地区,其与产业相对转移的概念相通,即强调增量引起区域间相对份额的变动^[57-58]。在海上风电产业中,它体现为各省区市新增装机容量的不同导致产业区域分布的调整。因此,我们采用对产业相对转移衡量的方法——动态偏离份

额模型的拓展模型,来测度海上风电场区位分布的动态演进,并以新增装机容量作为待分解经济增量。模型公式如下:

$$\sum_{j=1}^R (X'_j - X_j) = \sum_{j=1}^R \Delta X_j = \sum_{j=1}^R X_j r_{GDP} + \sum_{j=1}^R X_j (r - r_{GDP}) + \sum_{j=1}^R X_j (r_j - r) \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^R X_j (r_j - r) = [X_1 (r_1 - r)] + [X_2 (r_2 - r)] + \dots + [X_R (r_R - r)] = 0 \quad (2)$$

$$IT = X_j (r_j - r) \quad (3)$$

式中: j 代表的是省区市区域; r 代表的是全国海上风电装机容量增长率; r_j 代表的是 j 省区市区域海上风电装机容量增长率; $\sum \Delta X_j$ 表示全国新增海上风电装机容量,为待分解经济量,其可分解为式(1)中等式右边三部分,分别是国家增长分量、产业结构分量、产业转移分量,其中产业转移分量按省区市区域展开如式(2),此分量可证明为零^[59]。因此,产业转移分量可以反映新增海上风电装机容量在不同省区市区域之间分布,即反映产业相对转移的情况。

每个省区市区域的产业转移量计算如式(3)所示,其既受初期海上风电装机容量绝对量的影响,也受海上风电装机容量增长率相对量的影响;产业转移量大于零为转入区,小于零则为转出区。计算结果(表3)表明,海上风电场的区位分布经历了从江苏、上海逐渐向福建、广东、山东等地转移的过程。

表2 海上风电发展阶段和基本情况

阶段	标志性文件	产业发展基本情况	新增装机容量	装机容量增长倍数
示范性项目建设阶段 (2008—2013年)	《海上风电开发建设管理暂行办法》	发展初期受制于初期资本投入大、技术要求高、运营维护经验不足等因素限制,发展速度缓慢,但进行了有益的摸索和尝试,尤其是潮间带滩涂风电场开发,形成了特有的潮间带开发经验。	江苏约280 MW; 上海约110 MW。	江苏约275倍; 上海约105倍。
探索发展阶段 (2013—2018年)	《关于海上风电上网电价政策的通知》	上网电价在此阶段得以确定,再加上政府层面政策支撑,以及经验积累,累计装机量迅速增长。2017年新增机组吊装容量首次突破1 000 MW。	江苏约2 800 MW; 上海约300 MW; 福建约280 MW。	福建约57倍。
集中开发阶段 (2018—2020年)	《关于完善风电上网电价政策的通知》	国补政策处于退出的过渡性阶段,中国迎来了海上风电“抢装潮”,2018—2020年海上风电累计装机从4.4 GW增长到10.9 GW。	江苏约3 700 MW; 广东约1 250 MW; 福建约730 MW。	广东约11倍。
规模化和深远海探索 开发阶段 (2020年以后)	《关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见》	随着开发成本的降低,海上风电迈进平价时代,发电机组逐步突破10 MW,风电场也向吉瓦级别发展。	江苏约5 000 MW; 广东约4 900 MW; 山东约610 MW。	山东约58倍; 广东约4倍;

注:资料来源:国家发展改革委,中国风能协会(CWEA),《风能》。

表3 海上风电场区位分布变化测度

	2008—2013年	是否转入	2013—2018年	是否转入	2018—2020年	是否转入	2020—2021年	是否转入
江苏	191	是	236	是	-845	否	-4 101	否
福建	-80	否	236	是	310	是	-55	否
浙江	0	否	199	是	-83	否	938	是
辽宁	0	否	99	是	177	是	68	是
广东	0	否	117	是	1 069	是	3 071	是
山东	-76	否	-86	否	-13	否	603	是
上海	21	是	-704	否	-574	否	32	是
河北	0	否	159	是	-92	否	-400	否
天津	-58	否	-257	否	51	是	-156	否
广西	0	否	0	否	0	否	0	否
海南	0	否	0	否	0	否	0	否
求和	0	-	0	-	0	-	0	-

注：数值为零意味着基期与末期海上风电装机容量相同。即使数值小于零，该区域也有新增海上风电装机，只是该区域增速低于全国增速。

2008—2013年，江苏、上海产业转移量大于零，这意味着江苏、上海等地是最初发展海上风电的地区，且最早实现了装机容量的高速增长。

2013—2018年，福建产业转移量为236，成为除江苏以外产业转移量最大的地区，而上海产业转移量为-704，这意味着海上风电逐渐由上海向福建等地转移，福建是此阶段最主要的转入区。

2018—2020年，江苏产业转移量变为负值，其由转入区转变为转出区；广东产业转移分量为1 069，其成为最主要的转入地区。2020年后，从江苏向广东转移的趋势越来越明显（图2），广东仍为最主要的转入区，且山东成为新的转入地区。

因此，通过以上分析可以得出，第一阶段海

上风电发展相对突出的省市是江苏、上海，第二阶段是福建，第三阶段是广东，第四阶段是广东、山东。

4 结果分析

4.1 影响区位分布的主导因素及变化

利用地理探测器计算出各探测因子对海上风电区位分布的影响能力值 q ， q 值越大，探测因子的解释程度越大，结果如表4。

横向来看：2008—2013年，政府扶持力度是影响海上风电区位分布的主要因素， q 值达到0.9以上，其他各个影响因素的影响并不突出，其中

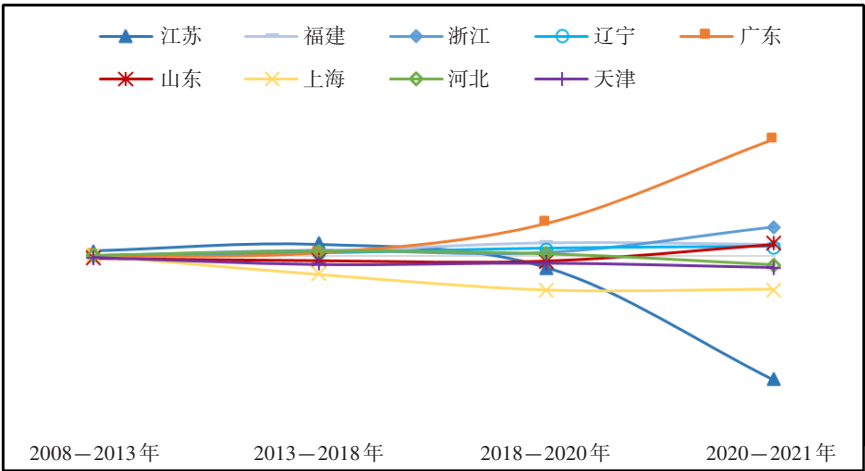


图2 沿海11个省区市海上风电装机转移累积图

注：以表3数据为基础，将沿海11个省区市海上风电产业转移量进行逐阶段累加，根据累计数绘制趋势折线图。

表 4 海上风电装机容量因子探测结果

探测因子	q 值					
	自然水域条件	风能储量	技术创新环境	专业人才数量	市场需求	政府扶持力度
2008—2013 年	0.487 27	0.365 39	0.378 65	0.458 13	0.461 72	0.919 73
2013—2018 年	0.586 01	0.630 16	0.525 34	0.345 92	0.228 39	0.536 07
2018—2020 年	0.170 15	0.524 55	0.405 04	0.568 91	0.264 09	0.069 25
2020—2021 年	0.163 24	0.510 08	0.503 66	0.571 26	0.363 22	0.570 77

自然水域条件是除政府扶持力度之外 q 值第二大的因素。2013—2018 年，政府扶持力度的作用减弱，风能储量的 q 值最大，其次是自然水域条件。2018—2020 年，自然水域条件、政府扶持力度的解释程度下降，q 值比较突出的因素是专业人才数量、风能储量、技术创新环境。2020—2021 年，专业人才数量为解释程度最大的因素，政府扶持力度再次成为 q 值第二大的因素。

纵向来看：自然水域条件的解释程度逐渐下降，这意味着地质、水深等自然水域条件对海上风电的建设施工成本的影响逐渐随风电技术的成熟而减弱；风能储量解释程度较为稳定，海洋风能是海上风电产业的动力源，是产业发展的根本依托，因此，风能储量的解释程度长期处于较高水平；技术创新环境、专业人才数量解释程度呈现上升趋势，这意味着技术、人才成为海上风电产业进一步发展壮大的重要推动力；政府扶持力度的重要性先呈现下降趋势，但在最新阶段，又有所回升，这主要是由于海上风电开发逐渐向深远海延伸，在技术难以迅速突破的情况下，开发商对成本的敏感性有所增强，加之中央补贴的退出，地方政府扶持的重要性进一步凸显。

4.2 增长突出省区市的发展路径及差异化

本节采用模糊集定性比较分析法，依据核心条件的不同，将各影响因素划分为不同的组态，包括政策驱动型、水域-政策驱动型、风能驱动型、创新-知识型、知识-政策驱动型等，并结合产业发展过程，以 3.2 分析的各阶段发展突出省区市为对象，研究海上风电的发展路径及其差异化。

(1) 示范性项目建设阶段

组态 1 的核心条件是政府扶持力度等，属于政策驱动型，如表 5 所示。在此阶段，发展突出的上海的路径就是组态 1。虽然上海风能资源并不富足，但早在《上海市风力发电“十一五”发展规划和 2020 年远景目标》《上海市能源发展

“十一五”规划》就已明确提出重点发展海上风电项目。在上海市政府大力扶持下，我国首座商业性海上风电项目——东海大桥海上风电场于 2010 年 6 月并网发电。

组态 2 的核心条件是自然水域条件、政府扶持力度等，属于水域-政策驱动型。在此阶段，发展突出的江苏的路径就是组态 2。江苏省是我国开发海上风电项目自然水域条件较好的地区，其沿海地势平坦，滩涂面积广阔，海岸为沙基质型，有利于低成本开发建设海上风电场；此外，江苏早在 2006 年发布的《江苏省风力发电发展规划（2006—2020 年）》中就对海上风电发展提出了明确目标。在优良的自然水域条件和政府扶持下，江苏响水、如东等潮间带风电项目进展迅速。截至 2013 年末，江苏成为海上风电装机容量最多的地区。

表 5 2008—2013 年高海上风电装机容量增长率组态分析

条件	组态		
	政策型	水域-政策型	水域型
	组态 1	组态 2	组态 3
自然水域条件	⊗	●	●
风能储量	⊗	●	⊗
技术创新环境	●	●	●
专业人才数量	●	●	●
市场需求	●	●	⊗
政府扶持力度	●	●	⊗
一致性	0.828	0.918	0.920
原始覆盖度	0.419	0.553	0.369
唯一覆盖度	0.183	0.317	0.102
解的一致性		0.909	
解的覆盖度		0.875	

注：●或●表示该条件存在，⊗或⊗表示该条件不存在；●或⊗表示核心条件，●或⊗表示边缘条件。

(2) 探索发展阶段

组态 1 的核心条件是风能储量等，属于风能

驱动型，如表6所示。在此阶段，发展突出的福建的路径就是组态1。福建受季风和台湾海峡“狭管效应”的共同影响，海上风能资源极为丰富，具有得天独厚的开发优势。虽然海上风电发展初期，受技术限制，风电开发企业选址时首先需要考虑台风的影响，但其不断地尝试抗台风设计，并从多方面采取具有针对性的应对措施。在突破技术障碍后，福建海上风电产业实现了快速发展。

表6 2013—2018年高海上风电装机容量增长率组态分析

条件	组态				
	风能型				水域型
	组态1	组态2	组态3	组态4	组态5
自然水域条件	●	●		●	●
风能储量	●	●	●	●	⊗
技术创新环境	⊗	●	●	⊗	⊗
专业人才数量	⊗		●	●	⊗
市场需求	⊗	●	●	●	●
政府扶持力度	●	●	●	⊗	⊗
一致性	0.912	0.912	0.912	0.897	0.894
原始覆盖度	0.208	0.384	0.436	0.189	0.255
唯一覆盖度	0.076	0.052	0.124	0.055	0.122
解的一致性			0.938		
解的覆盖度			0.781		

注：●或●表示该条件存在，⊗或⊗表示该条件不存在；●或⊗表示核心条件，●或⊗表示边缘条件。

(3) 集中开发阶段

组态1的核心条件是技术创新环境、专业人才数量等，属于创新-知识驱动型，如表7所示。在此阶段，发展突出的广东的路径就是组态1。广东充分发挥其市场化程度高，创新环境优良的优势，积极推进海上风电产业的人才培养、基础研究和成果转化的深度融合。近些年来，广东推进产业集群化发展，不断完善产业链，大力建设海上风电装备制造业产业基地，扩大电机、叶片、电机、塔筒、海底电缆、电梯等系列风电关键装备部件生产，为了加速阳江海上风电全产业链生态的形成，使其成为世界级的海上风电产业基地，广东积极打造“一港四中心”体系，即海上风电母港、风电研发中心、认证中心、大数据中心、运维中心，积极向风电产业链研发端、运营维护端等中高端迈进，并组建先进能源科学与技术广

东省实验室阳江分中心（阳江海上风电实验室），集中力量为风电产业服务。2018—2020年，广东海上风电装机容量增长率最高，由118 MW增长到1358 MW。

表7 2018—2020年高海上风电装机容量增长率组态分析

条件	组态			
	创新-知识型	水域型		
	组态1	组态2	组态3	组态4
自然水域条件	⊗	●	●	●
风能储量	●	●	⊗	●
技术创新环境	●	⊗	⊗	⊗
专业人才数量	●	●	⊗	⊗
市场需求	●	⊗		⊗
政府扶持力度	●	⊗	⊗	●
一致性	1	1	0.904	1
原始覆盖度	0.358	0.319	0.351	0.241
唯一覆盖度	0.211	0.073	0.168	0.022
解的一致性		0.951		
解的覆盖度		0.724		

注：●或●表示该条件存在，⊗或⊗表示该条件不存在；●或⊗表示核心条件，●或⊗表示边缘条件。

(4) 规模化和深远海探索开发阶段

组态1的核心条件是专业人才数量、技术创新环境、政府扶持力度等，属于知识-政策驱动型，如表8所示。在此阶段，发展突出的山东、广东的路径就是组态1。山东、广东重视能源与海洋相关专业建设和人才培养，有较为充足的技术人才和科研人才，有利于理论与经验资料的高效整合；并且，在“国补”退出之际，山东、广东较早实施地方政府补贴政策，为海上风电平价上网提供了一定的缓冲。此外，山东积极探索“海上风电+海洋牧场”模式融合、漂浮式风机基础、远距离海上送电、余电制氢和海水淡化等试验项目，稳妥推进漂浮式机组在深远海的示范应用，并提出打造海洋科技人才高地，支持有条件的高校设立海洋领域未来技术学院和现代产业学院，从全国涉海高校、院所选聘专家赴沿海市挂职，设立运营海洋人才发展基金。广东也积极推进人才建设，将相关专业列为社会紧缺专业，四方共同建设广东海洋大学阳江校区，充分依托高校优势学科专业，培育海上风电相关专业领域应用型人才。2020—2021年，山东海上风电装机容量

量由 9 MW 增长到 624 MW，其增长率最高，广东紧随其后，由 1 358 MW 增长到 6 240 MW。

表 8 2020—2021 年高海上风电装机容量增长率组态分析

条件	组态			
	知识-政策型		风能型	
	组态 1	组态 2	组态 3	组态 4
自然水域条件		⊗	●	●
风能储量	●		●	●
技术创新环境	●	●	⊗	⊗
专业人才数量	●	●	●	⊗
市场需求	●	●	⊗	⊗
政府扶持力度	●	●	⊗	●
一致性	0.916	0.964	1	1
原始覆盖度	0.586	0.471	0.248	0.251
唯一覆盖度	0.188	0.077	0.062	0.071
解的一致性		0.920		
解的覆盖度		0.820		

注：●或●表示该条件存在，⊗或⊗表示该条件不存在；●或⊗表示核心条件，●或⊗表示边缘条件。

因此，在示范项目建设阶段，最典型的区位分布驱动路径是政策型和水域-政策型；在探索发展阶段，最典型的是风能型；在集中开发阶段，最典型的是创新型；在规模化和深远海探索开发阶段，最典型的是知识-政策型。

5 结论与政策建议

本文定量测度了海上风电场区位分布的演化，研究了其主导影响因素的变化以及各阶段增长突出省区市的发展路径，得出以下结论与政策建议：

海上风电场的区位分布受多种因素的影响，且主导因素会随着产业发展和时间推移而发生改变。海上风电产业发展初期，政府引导和支持作用重大；同时，由于技术上的限制，海上风电场建设受水深、海岸线地质等自然水体条件的影响较大。随着海上风电项目从潮间带向近海转移，风能储量的重要性得到了显著提高，且其作为海上风电产业的动力源，重要性程度长期处于高水平。当技术发展到了一定程度后，自然水域条件对区位分布的影响程度逐渐降低，区域创新环境、专业人才数量等逐渐成为主导因素。基础设施越完备，市场化程度越高，创新环境越好，越容易

形成产业集聚，产业经验和专业人才的高效整合也进一步赋能海上风电产业的发展。

因此，为了促进海上风电产业的高质量发展，沿海各省区市应根据产业发展规律，立足新阶段，以政策优化为基础，通过“政府+企业+高校”三方合力，形成多层次专业人才储备库，构建起深度融合产业集群。具体建议如下：

(1) 多层次培养人才，建立专业人才储备库。政府应设立海洋人才发展基金，搭建产学研平台，吸引国内外各类海上风电人才；高校应加强对海洋人才的多学科交叉混合培养，与国外相关高水平大学、研发机构合作，培养高精尖人才；企业应强化企业员工职业培训，建立多层次专业人才储备库。

(2) 完善产业链条，形成产业集群基地。政府应瞄准地方经济的比较优势，提出产业集群发展规划；企业应以产业龙头为牵引，联手布局、紧随集聚，并加强与高校、科研机构合作；高校应做好创业孵化基地和产业园区的对接，推动教育链与产业链布局整合，形成更广泛的深度融合，推动海上风电核心技术突破。

(3) 政府精准施策，激发企业活力。政府应从海上风电全生命周期角度，系统性、针对性制定政策措施，因时、因地精准施策。在技术变革与国家退补的交汇期，政府应注意政策衔接，对海上风电项目按照有预期、递减的方式提供适当补贴，同时完善、细化深远海海上风电规划的编制，推动海上风电产业健康有序向前发展。

参 考 文 献

[1] WORLD FORUM OFFSHORE WIND. Global Offshore Wind Report 2022[EB/OL]. (2023-2-20) [2023-4-1]. https://wfo-global.org/wp-content/uploads/2023/03/WFO_Global-Offshore-Wind-Report-2022.pdf.

[2] 马晋龙, 孙勇, 叶学顺. 欧洲海上风电规划机制和激励策略及其启示[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 1-11, 92.

[3] SMIT T, JUNGINGER M, SMITS R. Technological learning in offshore wind energy: Different roles of the government[J]. Energy Policy, 2007, 35(12): 6431-6444.

[4] 卞恩林. 我国海上风电发展前景与制约因素分析[J]. 风能, 2013, 38(4): 58-60.

[5] CARTWRIGHT P. Connecting renewables: the challenge of integrating large offshore wind farms[J]. Refocus, 2006,

- 7(1): 24–26.
- [6] 何杰, 赵鑫, 杨家胜. 我国海上风电产业发展的对策与建议[J]. 人民长江, 2011, 42(1): 37–39.
- [7] 王震, 李楠, 王萌, 等. 我国海上风电产业政策分析与建议[J]. 中国能源, 2023, 45(Z1): 40–48.
- [8] 韦有周, 张效莉. 英国海上风电产业发展的现状、政策及经验[J]. 海洋经济, 2012, 2(6): 50–55.
- [9] PORTMAN M E, DUFF J A, KOPPEL J, et al. Offshore wind energy development in the exclusive economic zone: Legal and policy supports and impediments in Germany and the US[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(9): 3596–3607.
- [10] 刘林, 葛旭波, 张义斌, 等. 我国海上风电发展现状及分析[J]. 能源技术经济, 2012, 24(3): 66–72.
- [11] 杜剑强, 仲俊成, 李斌等. 中国海上风电发展现状及展望[J]. 油气与新能源, 2023, 35(3): 1–7.
- [12] JOSCHKO P, WIDOK A H, APPEL S, et al. Modeling and simulation of offshore wind farm O&M processes[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2015, 100(52): 31–39.
- [13] LIU Z, FAN S, WANG Y, et al. Genetic-algorithm-based layout optimization of an offshore wind farm under real seabed terrain encountering an engineering cost model[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 245: 114610.
- [14] XIA J, ZOU G. Operation and maintenance optimization of offshore wind farms based on digital twin: A review[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 268: 113322.
- [15] MENTES A, TURAN O. A new resilient risk management model for offshore wind turbine maintenance[J]. *Safety Science*, 2019, 119: 360–374.
- [16] LI M, JIANG X, CARROLL J, et al. A closed-loop maintenance strategy for offshore wind farms: Incorporating dynamic wind farm states and uncertainty-awareness in decision-making[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 184: 113535.
- [17] 冯奕, 刘哲, 刘秋华. 低碳背景下的江苏海上风电新发电成本计量体系构建[J]. 科技与经济, 2017, 30(6): 101–105.
- [18] 刘倩, 孙燕, 吴梦成, 等. 基于LSMC的不确定环境下海上风电项目价值评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(10): 8–14.
- [19] NAGABABU G, PUPPALA H, PRITAM K, et al. Two-stage GIS-MCDM based algorithm to identify plausible regions at micro level to install wind farms: A case study of India[J]. *Energy*, 2022, 248: 123594.
- [20] FETANAT A, KHORASANINEJAD E. A novel hybrid MCDM approach for offshore wind farm site selection: A case study of Iran[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 109: 17–28.
- [21] CACEOGLU E, YILDIZ H K, OGUZ E, et al. Offshore wind power plant site selection using Analytical Hierarchy Process for Northwest Turkey[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 252: 111178.
- [22] MARIN R, CIORTAN S, RUSU E. A novel method based on artificial neural networks for selecting the most appropriate locations of the offshore wind farms[J]. *Energy Reports*, 2022, 8(16): 408–413.
- [23] 周川, 蔡彦枫, 王俊等. 基于CFO的海上风电场微观选址优化算法研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(1): 67–73.
- [24] 罗晓健, 兰新阳, 穆欢等. 海上风电场微观选址方案研究[J]. 价值工程, 2023, 42(19): 22–25.
- [25] 庞效民. 工业区位因素变化与工业地理学研究的新动向[J]. 地理研究, 1992(3): 101–107.
- [26] VERNON R. International Investment and International Trade in the Product Cycle[J]. *Quarterly Journal of Economics*, 1966, 80(02): 190–207.
- [27] 张杰, 唐根年. 浙江省制造业空间分异格局及其影响因素[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1107–1117.
- [28] 魏后凯. 产业转移的发展趋势及其对竞争力的影响[J]. 福建论坛(经济社会版), 2003(4): 11–15.
- [29] 王云平. 产业转移问题研究的有关观点综述[J]. 经济管理, 2013, 35(6): 175–187.
- [30] EDWARDS P K. Book Review: The Location of Economic Activity[J]. *Journal of Marketing*, 1949, 14(1), 122–123.
- [31] RUTLEDGE V. Review of the Economics of Location[J]. *Journal of Political Economy*, 1956, 64(4): 347–349.
- [32] 蒋玲. 环境创新对FDI区位选择的影响[J]. 经济与管理, 2003(7): 35–36.
- [33] 彭如霞, 夏丽丽, 林剑铭. 创新政策环境对外商直接投资区位选择的影响——以珠江三角洲核心区六市为例[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 992–1005.
- [34] JOFRE-MONSENY J, MARIN-LOPEZ R, VILADECANES-MAESAL E. The determinants of localization and urbanization economies: Evidence from the location of new firms in Spain[J]. *Journal of Regional Science*, 2014, 54(2): 313–337.
- [35] 何雄浪, 王舒然. 产业集聚、知识溢出与中国区域经济增长[J]. 云南财经大学学报, 2021, 37(9): 15–30.
- [36] 郑磊, 吕美静. 东道国特征对中国制造业企业OFDI区位选择和子公司绩效影响的研究——基于投资动机视角的实证检验[J]. 宏观经济研究, 2022(1): 55–73, 101.
- [37] 俞国军, 贺灿飞, 朱华友. 基于关系视角的企业直接投资区位选择——过程与机理[J]. 人文地理, 2022, 37(2): 150–157.
- [38] 肖雁飞, 胡立涛, 刘友金, 等. 长三角地区对外产业转移区位选择及协同推进——基于“一带一路”107个成员国家的分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(4): 82–90.
- [39] 刘培华. 我国纺织服装行业对外投资区位选择研究——基于产业转移推力模型的分析[J]. 黑龙江金融, 2021(12): 10–13.

- [40] 李春梅. 区际产业转移与区域经济差距[J]. 经济经纬, 2021, 38(4): 13-22.
- [41] KIM J Y, OH K Y, KANG K S, et al. Site selection of offshore wind farms around the Korean Peninsula through economic evaluation[J]. *Renewable Energy*, 2013, 54: 189-195.
- [42] 郭其朝, 郑宗明. 海上风能资源开发潜力、投资效益及建议[J]. 能源与环境, 2011(4): 2-4.
- [43] GUNJAN B. The Impact of the Location on Innovation[EB/OL]. (2009-10-26) [2023-4-25]. <https://innovationmanagement.se/2009/10/26/the-impact-of-the-location-on-innovation/>.
- [44] 张勋, 乔坤元. 中国区域间经济互动的来源: 知识溢出还是技术扩散?[J]. 经济学(季刊), 2016, 15(4): 1629-1652.
- [45] 梁俊伟, 黄德成. 高校知识溢出与企业创新绩效[J]. 经济理论与经济管理, 2020(1): 82-96.
- [46] 蔡绍宽. 平价上网助力海上风电行业发展——未来五年海上风电从业同仁的使命[J]. 南方能源建设, 2019, 6(2): 7-15.
- [47] 施鹏飞. 风力发电的发展现状及展望[C]//国际清洁能源论坛(澳门). 国际清洁能源论坛(澳门)研究报告(2013). 社会科学文献出版社(Social Sciences Academic Press(China)), 2013: 28.
- [48] 郭立伟, 沈满洪. 新能源产业集群区位选择因素研究[J]. 学习与实践, 2015(2): 31-41.
- [49] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [50] RIHOUX B, RAGIN C C. Configurational comparative methods: Qualitative comparative analysis (QCA) and related techniques[M]. Sage Publications, 2009.
- [51] 赵岩, 谭海波, 何孟书. 地方政府互联网服务供给能力的影响因素及其组态——基于 27 省案例的定性比较分析[J]. 电子政务, 2021(4): 68-78.
- [52] 黄顺魁, 王裕瑾, 张可云. 中国制造业八大区域转移分析——基于偏离—份额分析[J]. 经济地理, 2013, 33(12): 90-96.
- [53] 孙久文, 彭薇. 劳动报酬上涨背景下的地区间产业转移研究[J]. 中国人民大学学报, 2012, 26(4): 63-71.
- [54] 成艾华, 赵凡. 基于偏离份额分析的中国区域间产业转移与污染转移的定量测度[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(5): 49-57.

(本文编辑: 袁泽轶)