

长三角城市绿色创新空间关联及影响因素研究

柏明国, 郑柯, 姚毓婷

(安徽工业大学商学院, 安徽马鞍山 243032)

摘要: 基于绿色创新投入、绿色创新产出及绿色创新环境 3 个维度建立长三角城市绿色创新能力综合评价指标体系, 采用全局熵值法对 2010—2021 年长三角 41 个地级城市的绿色创新能力进行测度, 基于改进的引力模型构建长三角城市绿色创新网络, 采用社会网络分析法从整体、个体和局部 3 个方面探讨长三角城市绿色创新空间关联的网络特征, 采用二次指派程序 (QAP) 回归分析法探究其影响因素。结果表明: 2010—2021 年, 长三角各城市间的绿色创新空间关联程度逐年增强, 但整体方面还有提升空间, 同时存在区域差异, 东部地区发展态势优于西部地区; 核心城市承担桥梁与中介作用, 且主要集中在东部和中部地区, 部分城市为“净受益”城市, 无法主动缔结与其他城市的关联; 皖北、皖南和浙南地区多为边缘城市, 这些城市对外联系较弱, 城市绿色创新发展呈现不均衡趋势; 高等教育水平、金融发展规模、对外开放程度、信息化水平等差异是影响长三角城市绿色创新网络空间关联的主要因素。为推动长三角地区绿色创新高质量发展, 应扩大核心城市的辐射范围, 带动边缘城市发展; 在第三、四子群内部建设中心城市, 承担与外界沟通的桥梁和中介作用; 缩小区域金融发展规模差异, 完善跨城协作的基础建设, 进行知识技术的交流互动与资源共享。

关键词: 长三角城市; 绿色创新; 社会网络分析; QAP 回归分析; 空间关联; 引力模型; 全局熵值法; 经济距离

中图分类号: F 124.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23131



Research on Spatial Correlation and Influencing Factors of Green Innovation in the Yangtze River Delta Cities

BAI Mingguo, ZHENG Ke, YAO Yuting

(School of Business, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: A comprehensive evaluation index system for the green innovation capacity of cities in the Yangtze River Delta region was established based on three aspects of green innovation input, green innovation output, and green innovation environment. The global entropy weight method was used to measure the green innovation capacity of 41 prefecture level cities in the region from 2010 to 2021. Based on the improved gravity model, a green innovation network of cities in the Yangtze River Delta region was constructed. The social network analysis method was used to explore the network characteristics of the spatial correlation of green innovation in cities in the Yangtze River Delta region from three aspects: overall, individual, and local. The quadratic assignment program (QAP) regression analysis method was used to explore its influencing factors. The results indicate that from 2010 to 2021, the spatial correlation of green innovation among cities in the Yangtze River Delta region increases year by year, but there is still room for improvement overall. At the same time, there are regional differences, and the development trend in the eastern region is better than that in the western region. The core cities serve as bridges and intermediaries, mainly concentrated in the eastern and central regions, with some cities being “net beneficiaries” and unable to actively

收稿日期: 2023-09-03

基金项目: 安徽省哲学社会科学规划项目 (AHSKY2022D115)

作者简介: 柏明国 (1969—), 男, 山东莒县人, 博士, 副教授, 主要研究方向为创新管理。

引文格式: 柏明国, 郑柯, 姚毓婷. 长三角城市绿色创新空间关联及影响因素研究 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(5):561-572.

establish connections with other cities. The northern, southern, and southern regions of Anhui are mostly peripheral cities with weak external connections and an uneven trend in urban green innovation development. Differences in higher education level, scale of financial development, degree of openness to the outside world, and level of informatization are the main factors affecting the spatial correlation of green innovation networks in the Yangtze River Delta cities. To promote high-quality development of green innovation in the Yangtze River Delta region, the radiation range of core cities should be expanded to drive the development of peripheral cities; Build a central city within the third and fourth subgroups, serving as a bridge and intermediary for communication with the outside world; Narrowing the gap in regional financial development scale, improving the infrastructure for cross city cooperation, and engaging in knowledge and technology exchange, interaction, and resource sharing.

Keywords: Yangtze River Delta cities; green innovation; social network analysis; QAP regression analysis; spatial correlation; gravity model; global entropy weight method; economic distance

绿色创新已成为我国实现双碳目标、区域高质量发展、完善生态文明建设的重要推动力。长江三角洲地区是中国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域之一,在国家现代化建设大局和全方位开放格局中具有举足轻重的战略地位,在发展过程中更要坚持绿色创新的发展理念,走可持续发展的道路。随着长三角一体化的全面深化,其集聚辐射能力也在不断增强,区域发展的关联已呈现系统、复杂的网络结构特征。各主体能够通过协调、整合创新资源进行多方合作,在获取自身利益的同时也能为其他创新主体创造价值,但由于长三角规划范围不断扩展,区域内城市发展差异愈加明显。网络密度、中心度和凝聚子群等结构特征,能够反映绿色创新协同发展的整体现状、内部聚集情况以及个体在网络中的位置。在此背景下,探究长三角城市绿色创新网络的空间关联特征及发展趋势,全面掌握城市绿色创新网络结构整体特征、各城市在该网络中发挥的作用以及城市集聚情况的时空演变趋势,有利于把握长三角城市群发展的优劣情况,对其他城市群的发展建设也具有重要的参考价值。

绿色创新常与生态创新、环境创新等概念替换使用,主要因为研究者们基于不同的视角和层面给予不同的表述。基于区域层面,彭文斌等^[1]认为绿色创新兼顾技术创新和绿色环保双重收益,是有效降低资源和能源消耗、改善环境污染并促进经济可持续发展的新型创新活动。基于城市群视角,刘柏阳^[2]认为绿色创新是在一定的能源和环境条件下促进创新、经济和环境协调发展的动态过程,主要体现在某地区在节能减排技术上改进或创新的进展。基于国家层面,欧盟提出,任何能够通过减少环境破坏、增强环境抗压能力和提升自然资源利用率等实现可持续发展目标的创新形式,都可称为绿色创新;中国

环境与发展国际合作委员会环境创新课题组^[3]将绿色创新的内涵扩展到社会和制度等领域,包括公众参与方式、体系制度、环境教育体系及公共环境技术等方面的创新。因此,绿色创新可被理解为能够缓解环境压力,实现经济、社会和生态高质量协调发展的一系列技术和非技术的创新活动。随着绿色创新理念的不断深入,学者们主要从研究对象、指标测度及影响因素等方面展开研究。研究对象方面,主要关注制造业和高新技术产业^[4-6],随着国家创新战略的进一步推进,将研究重心转向区域层面,探究绿色创新的区域差异及动态演进^[7-8]。指标测度方面,通常以绿色专利数衡量绿色创新能力^[9-12],除此之外,主要从绿色创新效率和绿色创新能力评价两方面构建综合评价指标体系。对于绿色创新效率,通常从投入和产出2个层面构建指标体系,反映绿色创新投入与产出间的内在联系^[13-15]。投入方面包括人员投入、资金投入、能源投入等维度^[16];为体现创新过程中产生的环境污染,产出方面除期望产出外,还将非期望产出纳入其中。对于绿色创新能力评价,除绿色创新投入和绿色创新产出外,还增加了创新支持能力、绿色发展、创新环境、创新扩散等层面^[17-19]。影响因素方面,主要聚焦于环境规制、产业结构、外商直接投资、教育水平、人力资本对绿色创新的影响^[20-22]。

创新网络是有效应对系统性创新的1种制度安排,主要联结机制为创新主体之间的合作创新关系^[23],其中创新网络的形成及演化机制是研究的核心问题之一。创新主体能够利用自身的发展动力和相互作用产生的外部动力共同推动形成创新网络,为应对信息资源的稀缺与不平衡,会不断调整彼此间的关系从而导致创新网络组织形态的演变,使其具备动态演变机制^[24-25]。目前,针对区域创新网络主要从网络构建及形成机制两方面展开研究。对于

创新网络的构建,多以合作专利或通过测算创新主体间的创新关联度构建创新网络,利用社会网络分析法研究创新网络的演变态势。吴梓华等^[26]采用城市间专利合作数据构建技术创新网络,研究山东半岛城市群技术创新网络的整体结构和时空演化;胡悦等^[27]以合著论文数据构建创新网络,探究京津冀城市群网络演化驱动机制;古惠冬等^[28]选取中国-东盟国家的合著论文数据构建跨境创新网络。随着信息技术的不断发展,学者通过改进的引力模型构建我国区域创新空间关联网络。王平等^[29]通过修正引力模型,结合地理距离和经济距离构建创新空间关联网络,运用社会网络分析法探析网络密度、中心度及凝聚子群等演化特征;方大春等^[30]基于托达罗人口迁徙模型,将各城市的球面实际距离和人均GDP差值纳入引力模型。对于创新网络结构的形成机制,Bunnell等^[31]认为,地理临近对创新关联具有显著的驱动作用,是创新关联产生与演化的基础;宋旭光等^[32]发现,地区之间的地理距离和人力资本水平差异增大,会阻碍地区之间的知识溢出和流动,削弱地区之间的创新关联关系;邵汉华等^[33]将创新过程分为2个阶段,发现地区之间经济发展方式的差异、地理位置的邻接有助于增强区域创新发展的空间关联性;方大春等^[30]发现,各区域产业结构差异、利用外资差异、经济发展水平差异、科技投入差异以及地理位置差异显著影响我国区域创新的空间关联和溢出效应。

通过对文献的梳理分析发现,绿色创新的研究主要集中于评价和影响因素等层面,缺乏城市间绿色创新关联关系的研究。随着区域一体化发展战略的深度推进,绿色创新的空间关系和协同发展成为研究的重点。社会网络分析方法能够考察关系数据及网络关系,揭示城市群空间网络结构的关联特征、演化规律及形成机制^[34]。将绿色发展理念渗透至创新系统,利于提高区域创新能力^[35]。2019年,上海、江苏、浙江、安徽三省一市的41个城市全部纳入长三角城市群一体化范畴,城市群空间范畴逐步扩张。长三角城市群具备雄厚的产业基础、优越的人才资源和创新环境以及便利的交通网络,故选取长三角城市群41个城市作为研究对象,采用社会网络分析方法,利用城市间绿色创新关联度构建长三角城市绿色创新网络,探究长三角城市绿色创新的网络结构特征及其影响因素,为长三角城市的绿色创新协同发展提供参考和建议。

1 研究设计

1.1 指标体系构建

城市的绿色创新活动是各类主体在外部环境支撑作用下,投入内部资源创造创新成果的过程。参照肖黎明等^[36]、付幅等^[37]的研究思路,结合科学性、系统性和可得性等指标选取原则,从绿色创新投入、绿色创新产出及绿色创新环境三方面构建长三角城市绿色创新能力综合评价指标体系,具体如表1。

表1 长三角城市绿色创新能力综合评价指标体系

Tab. 1 Comprehensive evaluation index system for green innovation capability in the Yangtze River Delta cities

一级准则层	二级准则层	指标层	单位	方向	
绿色创新投入	人力投入	R&D人员	人	+	
		科学研究与技术服务业从业人员	人	+	
		水利、环境和公共设施管理业从业人员	人	+	
	资金投入	R&D内部经费支出	万元	+	
		政府科教环保财政支出	万元	+	
		当年实际使用外资金额与GDP比值	%	+	
	能源投入	能源消耗总量	万t标准煤	-	
		全社会用电量	万kWh	-	
	绿色创新产出	生态效益	地表水断面I~III类水比例	%	+
			空气质量达到及好于二级的天数比例	%	+
人均绿地面积			m ²	+	
碳排放量			t	-	
技术成果		绿色专利授权数	件	+	
		高技术产业产值	亿元	+	
经济收益		人均GDP	元	+	
	第二、三产业产值	万元	+		

续表

一级准则层	二级准则层	指标层	单位	方向
绿色创新环境	科教文化	研发机构数	个	+
		普通高等学校数	所	+
		公共图书馆图书总藏量	万册	+
	基建水平	固定资产投资总额与GDP比值	%	+
		邮电业务收入占GDP比重	%	+
	环保力度	生活垃圾无害化处理率	%	+
		一般工业固体废物综合利用率	%	+
		污水处理厂集中处理率	%	+

选取长三角城市群 41 个地级及以上城市作为研究对象,构建指标体系的各项数据主要来自 2011—2022 年《中国城市统计年鉴》、长三角三省一市统计年鉴和科技统计公报;2010—2021 年长三角 41 个城市国民经济、社会发展统计公报以及生态环境状况公报。其中,绿色专利授权数在中国研究数据服务平台数据库中检索并统计得到;当年实际使用外资金额依据当年平均汇率转换成人民币计算;长三角各城市的碳排放量利用《中国能源统计年鉴》中煤炭、焦炭、天然气、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油与电力的标准煤转换系数和碳排放系数计算加总所得^[38]。残缺数据通过插值法补齐。

1.2 研究方法

1.2.1 全局熵值法

各类资源在区域内的自由流通会使不同城市的绿色创新发展相互联动、相互制约,这意味着城市间是否存在绿色创新联系以及联系程度很大程度上取决于不同城市的绿色创新能力,而不仅限于绿色创新技术和知识的联合产出。考虑到城市绿色创新能力受到多种要素的影响,通过构建指标评价体系对长三角 41 个城市的绿色创新能力进行测度。准确合理地分配指标权重是进行多指标综合评价的关键,常见的指标赋权方法有主成分分析法、变异系数法及熵值法等,其中熵值法不仅能规避主观影响,又能充分考虑到指标数据之间的差异性,评价结果更可靠。全局熵值法在传统熵值法基础上引入全局思想,对多组时序指标数据进行纵向与横向分析,能够客观地确定指标相对权重^[39]。

1.2.2 改进的引力模型

引力模型来源于牛顿万有引力定律,阐述 2 个主体因自身属性产生的相互影响和联系,联系程度与其质量成正比,与距离成反比。引力模型能够将主体的“属性数据”转化成主体间的“关系数据”,是 1 个能够较为合理量化主体间联系的理论模型,常被用于城市间关联关系研究,具有较高的可行性

和适用性。在区域间联通日益紧密的背景下,地理直线距离对发展的分割效应逐渐削弱,以经济距离表达区域空间距离更合理^[40]。故文中采用修正的引力模型,用地理距离和经济距离的综合距离衡量城市间的空间距离,其中人均 GDP 差值的绝对值越大,说明区域间资源流动性越强^[30],要素流动强度越高,城市之间绿色创新关联度越高。此外,考虑到区域绿色创新空间关联的不对等性,将城市绿色创新能力占比作为引力系数^[29],改进后的引力模型如式(1)。

$$T_{ij} = \frac{C_i}{C_i + C_j} \times \frac{C_i C_j}{d_{ij} / (g_i - g_j)} \quad (1)$$

式中: T_{ij} 为城市 i 与城市 j 之间的绿色创新关联度; C_i , C_j 分别为城市 i 、城市 j 的绿色创新能力; d_{ij} 为城市 i 与城市 j 人民政府之间的最短公路距离,由高德地图检索得到; g_i , g_j 分别为城市 i 、城市 j 的人均 GDP。

1.2.3 社会网络分析法

社会网络分析法以网络主体间的关联关系为研究对象,能够结合代数模型和图论工具直观反映网络整体结构及其属性特征、揭示个体间关联关系的紧密程度和集聚现象。文中遵循社会网络分析法的研究思路,从整体、个体和局部 3 个方面分析长三角城市绿色创新网络的时空演化特征,掌握城市绿色创新网络结构整体特征、各城市在网络中的角色和作用以及区域内城市集聚情况的演变趋势。

1) 整体特征分析。在网络整体特征方面,主要有网络密度、聚类系数、路径长度等指标,选取网络实际关联数与网络密度考察长三角城市绿色创新网络整体紧密性,采用聚类系数和平均路径长度分析网络小世界特征。聚类系数表示网络的平均聚集程度,反映城市间相互联通的情况;平均路径长度反映网络的全局效率和城市间联系的便利程度,体现网络的信息资源传输效率。

2) 个体特征指标。点度中心度反映该节点成员在整个网络中的位置,数值越高,说明该节点城市越处于城市群的中心地位;中间中心度,反映该成员

对与其他成员合作所需信息资源的控制力,数值越高,说明该成员的中介作用越大,对信息资源的控制能力越强;接近中心度能够描述该节点与其他节点之间联系的邻近程度,数值越高,说明该节点城市与其他城市的联系能力越强。

3) 局部特征指标。凝聚子群分析是根据一定的划分标准将整个网络分为若干个离散子集,分析小群体内部成员及各群体间的关系,既反映小群体在网络中所处的位置,又能简化复杂的整体网络结构,是典型的社会网络局部结构分析法。核心-边缘

结构是通过区分联系密度较高的一系列核心行动者和联系密度较低或不存在联系的一系列边缘行动者,验证行动者之间的发展是否存在由不平衡趋向于平衡的态势,从而解释区域网络结构的演变。

2 实证与结果分析

2.1 长三角城市绿色创新关联度测算分析

基于全局熵值法得到2010—2021年长三角41个城市绿色创新指数,依据式(1)计算城市间绿色创新关联度,结果如图1。

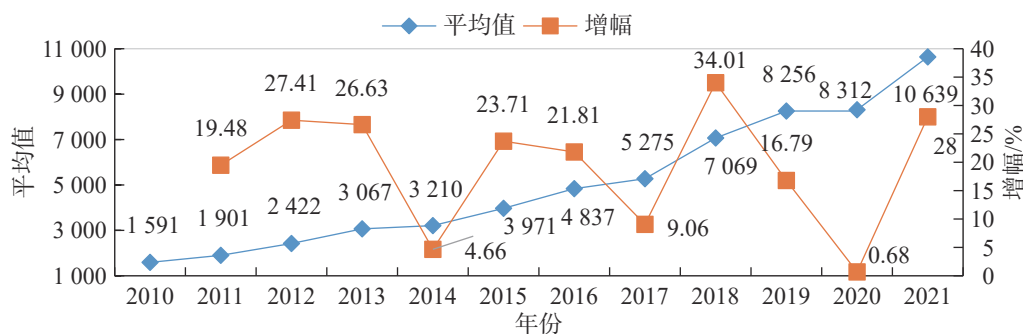


图1 长三角地区绿色创新关联度均值的时序变化

Fig. 1 Temporal variation of the mean correlation degree of green innovation in the Yangtze River Delta region

由图1可看出:2010—2021年,长三角地区整体绿色创新联系程度逐年增强,从2010年的1591增至2021年的10639,增长近6倍;2012,2018,2021年绿色创新整体关联度涨势明显,尤其是2018年增幅持续上升且达到最高值34.01%。究其原因,2010—2021年长三角城市经济协调会实行了4次扩容,从原本苏浙沪的16个城市增至苏浙皖沪全域共41个城市,各城市在经济、科创、教育、环保及社会保障方面进行深化合作,城市间的合作广度得到有效增强。但成员的增加也带来了一些问题,其中最为突出的是区域内部发展不协调,致使城市间合作交流始终处于不断调整的阶段,因此长三角绿色创新整体关联度的涨势虽不断上升但呈现发展不均衡的现象。

2.2 长三角城市绿色创新网络时空演化特征分析

基于长三角城市间的绿色创新关联度,建立有向矩阵,并以城市间绿色创新关联度的年份均值为临界值进行二值化处理,构建绿色创新空间关联有向二值矩阵,作为时空演化分析的数据依据。同时,为更全面、清晰地在空间层面分析长三角地区绿色创新关联发展的整体情况,只保留城市间绿色创新关联度大于该年份均值的连接轴线,利用ArcGIS 10.8软件展示长三角城市绿色创新空间网络格局的演化态势,如图2。由图2可看出:2010—2021年,

长三角绿色创新关联强度弱联系轴线和较弱联系轴线逐年减少,表明城市间联系程度逐步加深;强联系轴线增加6条,分别为上海、南京和苏州对周边城市的强连接,在增强自身能力的同时,也扶持了圈内成员的发展,说明都市圈建设取得成效;强联系轴线主要集中在城市群东部,联系轴线的强度存在较大的地域差异,东部地区大部分城市的发展态势要优于西部地区,皖北、苏北、浙南地区城市间的绿色创新关联关系较弱且发展缓慢。

2.2.1 整体特征

从实际关联数与网络密度、聚类系数与平均路径长度两方面分析长三角地区绿色创新的整体网络特征,如图3~4。其中平均路径长度为相对值。

由图3可看出:2010—2021年,长三角区域绿色创新空间网络的密度呈下降趋势,与之对应的网络关联系数呈相同趋势。网络关联系数在2021年达到最低值500,对应的网络密度为0.305;2017年达到最大值552,对应的网络密度为0.337。与理论上最大关联数1640(41×40)还有不小的差距,说明长三角城市绿色创新空间联系还有较大的提升空间,东部地区城市应继续发挥政策优势和地理优势,在提高自身创新能力的同时,带动周边城市发展,进而提升整个区域的绿色创新能力。

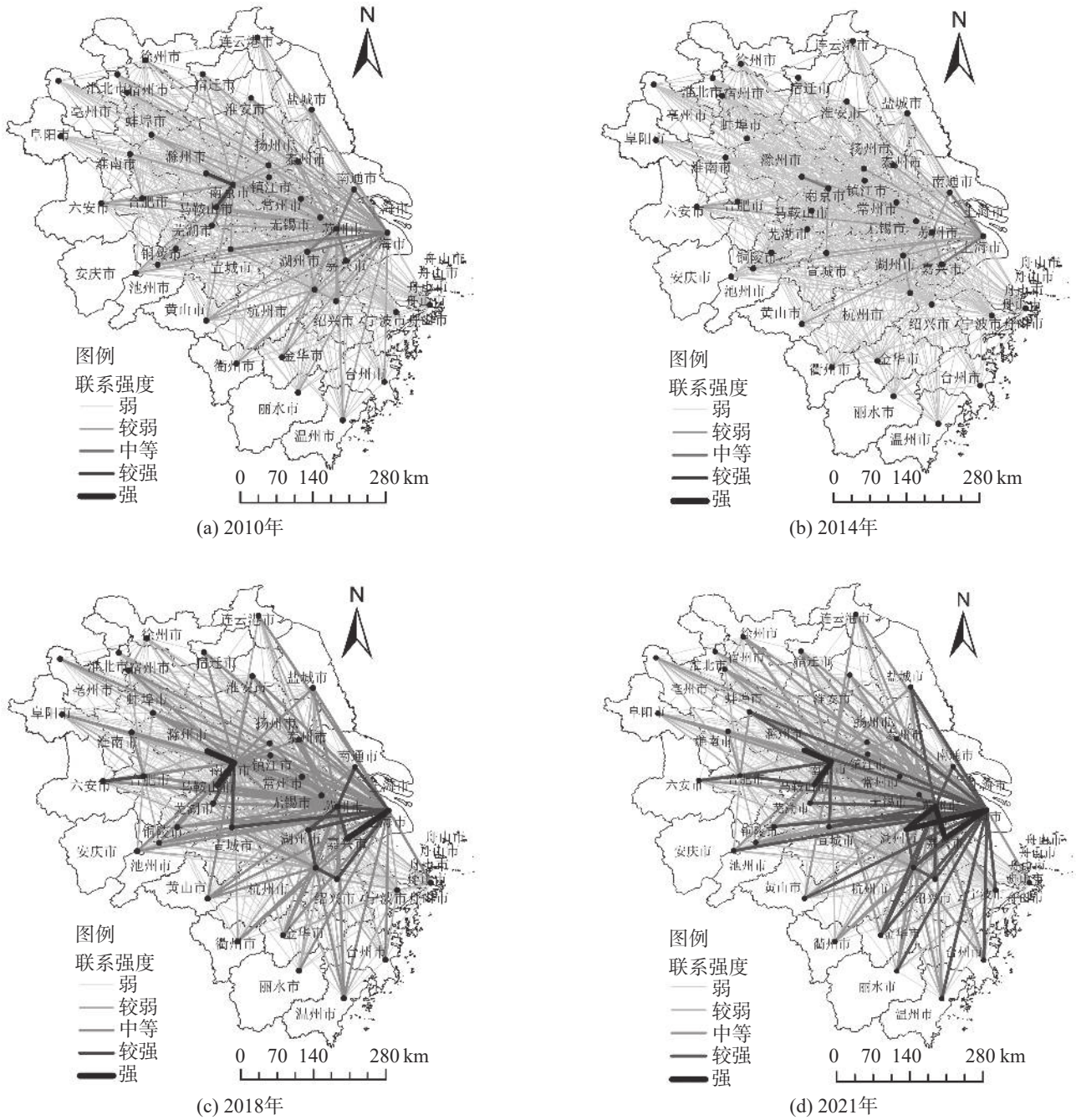


图2 长三角城市绿色创新空间网络格局的演化态势

Fig. 2 Evolutionary trend of green innovation spatial network pattern in Yangtze River Delta cities

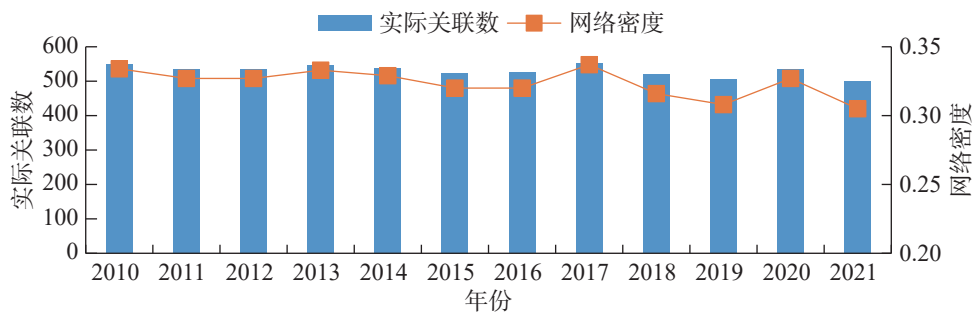


图3 网络实际关联数与网络密度

Fig. 3 Actual connection numbers and network density

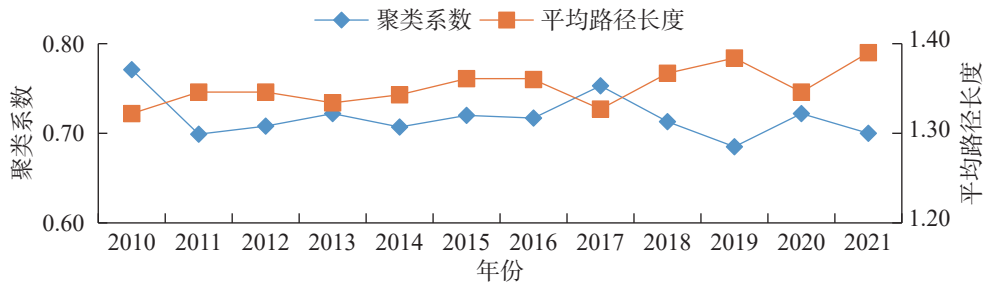


图4 聚类系数与平均路径长度

Fig. 4 Cluster coefficient and average path length

若网络的平均路径长度小于 10, 聚类系数大于 0.1, 则该网络存在小世界效应^[41]。由图 4 可看出: 2010—2021 年, 长三角城市绿色创新网络的聚类系数均在 0.65 以上, 平均路径长度在 1.3~1.4 之间, 表明城市间绿色创新联系所需经过的城市较少, 交流效率较大、互动性强。这意味着长三角城市绿色创新网络具有明显的小世界特征, 各个城市在进行技术交流、信息传播及资源共享等活动将会更便利, 城市间关联范围拓宽及程度加深的概率将不断增大。

总体看, 2010—2021 年, 长三角城市间创新资源和知识技术等要素的流动更便利, 这得益于长三

角一体化发展战略地位的提升, 使各城市的联动发展进程加快, 先后建成多条交通要道打破地理障碍, 破除城市间的行政壁垒。但绿色创新最大关联数还存在提升空间, 成员之间要主动进行技术交流、共享与合作, 带动落后成员的发展, 打造区域内协同共进的发展格局。

2.2.2 个体特征

不同城市在网络中的表现具有异质性, 为挖掘各城市在网络中扮演的角色及发挥的作用, 利用网络中心性分析城市个体特征, 借助 Ucinet 6.0 软件计算得到 2021 年长三角 41 个城市的网络中心性, 包括点度中心度、中间中心度和接近中心度, 结果见表 2。

表 2 2021 年长三角 41 个城市绿色创新网络节点中心度

Tab. 2 Centrality of green innovation network nodes in 41 cities in the Yangtze River Delta in 2021

城市	点度中心度				中间中心度		接近中心度	
	点出度	点入度	中心度	排序	中心度	排序	中心度	排序
上海	38	1	39	3	22.93	3	97.56	3
南京	37	3	40	1	22.96	1	100.00	1
无锡	40	0	40	2	22.96	2	100.00	2
徐州	8	12	20	22	1.84	25	66.67	22
常州	35	4	39	4	20.80	5	97.56	4
苏州	38	1	39	5	22.93	4	97.56	5
南通	29	6	35	7	19.80	8	88.89	7
连云港	0	12	12	41	0.33	41	58.82	41
淮安	4	12	16	35	0.60	39	62.50	35
盐城	6	13	19	25	1.28	31	65.57	25
扬州	29	5	34	9	19.80	9	86.96	9
镇江	29	5	34	10	19.80	10	86.96	10
泰州	21	9	30	13	12.17	13	80.00	13
宿迁	0	18	18	28	1.50	28	64.52	28
杭州	32	5	37	6	20.52	6	93.02	6
宁波	29	6	35	8	19.88	7	88.89	8
温州	1	15	16	36	1.14	32	62.50	36
嘉兴	19	12	31	12	11.52	14	81.63	12
湖州	9	14	23	17	2.79	21	70.18	17
绍兴	21	8	29	14	12.18	12	78.43	14
金华	0	17	17	33	1.39	30	63.49	33

续表

城市	点度中心度				中间中心度		接近中心度	
	点出度	点入度	中心度	排序	中心度	排序	中心度	排序
衢州	0	14	14	39	0.82	36	60.61	39
舟山	16	4	20	23	5.13	16	66.67	23
台州	0	14	14	40	0.82	37	60.61	40
丽水	0	15	15	37	0.82	38	61.54	37
合肥	24	10	34	11	17.12	11	86.96	11
淮北	1	14	15	38	0.47	40	61.54	38
亳州	0	18	18	29	1.41	29	64.52	29
宿州	0	22	22	19	3.88	17	68.97	19
蚌埠	1	21	22	20	3.15	20	68.97	20
阜阳	0	20	20	24	2.51	23	66.67	24
淮南	0	23	23	18	3.62	19	70.18	18
滁州	2	16	18	30	0.97	34	64.52	30
六安	0	21	21	21	2.68	22	67.80	21
马鞍山	12	12	24	16	3.77	18	71.43	16
芜湖	16	10	26	15	6.49	15	74.07	15
宣城	0	18	18	31	1.68	26	64.52	31
铜陵	3	16	19	26	1.09	33	65.57	26
池州	0	17	17	34	0.92	35	63.49	34
安庆	0	19	19	27	1.87	24	65.57	27
黄山	0	18	18	32	1.68	27	64.52	32
均值	12.20	12.20	24.39	—	7.81	—	73.91	—

分析表2中的点度中心度可知:长三角41个城市中有15个城市的点度中心度高于均值,表明这些城市处于网络的中心地带,大多位于长三角东部和中部地区。其中无锡、上海、苏州、南京和常州保持较高的点出度,对网络中大部分城市起到较强的辐射作用,是强网络中心;安徽省仅有合肥和芜湖保持较高的点出度,对周边城市起到辐射影响。相反,西部和南部地区多数城市的点入度大于点出度,受益大于溢出,说明这些城市处于被动的接受状态,不能主动与其他城市进行绿色创新协同发展。

分析表2中的中间中心度可知:南京、无锡、上海、苏州、常州和杭州的中间中心度远高于均值,说明这些城市在整个城市群中具有带领作用,发挥桥梁的作用,资源控制能力极强,能够影响区域内大部分城市的绿色创新交流;宁波、南通、扬州、镇江以及合肥等城市也发挥较强的中介作用,这些城市的信息与资源承载传播能力极高,能够提高长三角大部分城市之间的关联性和交互性,有效影响区域绿色创新的协同发展;绍兴、泰州和嘉兴等城市也有中介作用,但作用较小;其余城市的中间中心度低于均值,与外部主动建立联结的能力不足,未能促进所在地区绿色创新的协调发展。从区域差异来看,长

三角东部和中部地区具有较大的控制能力,在区域绿色创新方面具有强大的优势。

接近中心度反映城市在网络中传播信息的难易程度。分析表2中的接近中心度可知:接近中心度高于均值的有15个城市,他们在网络中发挥中心行动者的作用。其中南京、无锡、上海、常州、苏州和杭州对其他城市的绿色创新活动影响较大;南通、宁波、扬州、镇江和合肥等城市紧随其后,对其他城市也产生一定的积极影响;嘉兴、泰州、绍兴和芜湖对其他城市的影响较小;其余城市的接近中心度低于均值,说明这些城市目前难以与其他城市产生绿色创新活动的资源互动,处于网络中的边缘地带。

2021年,南京、无锡、上海、常州和苏州的三类中心度排名均位于前五,说明这些城市处于长三角城市群绿色创新空间网络的核心位置,不仅掌握较多资源,同时发挥桥梁与中介角色,可有效促进整个区域内部绿色创新的交流互动。丽水、淮北、衢州、台州、连云港等城市排名总体靠后,这些城市因地理位置偏远、经济发展水平偏低、绿色创新资源不足等条件限制,在网络中处于边缘地带。

2.2.3 局部特征

为探究长三角城市绿色创新网络内部的稳定性

及“小团体”情况,利用Ucinet 6.0软件中基于子群内外关系划分标准的块模型算法,将最大分割深度设为2,41个城市划分成4个子群,为对比明显,选

取2010、2021年长三角城市绿色创新网络的凝聚子群分布与核心、边缘结构进行分析,如图5。

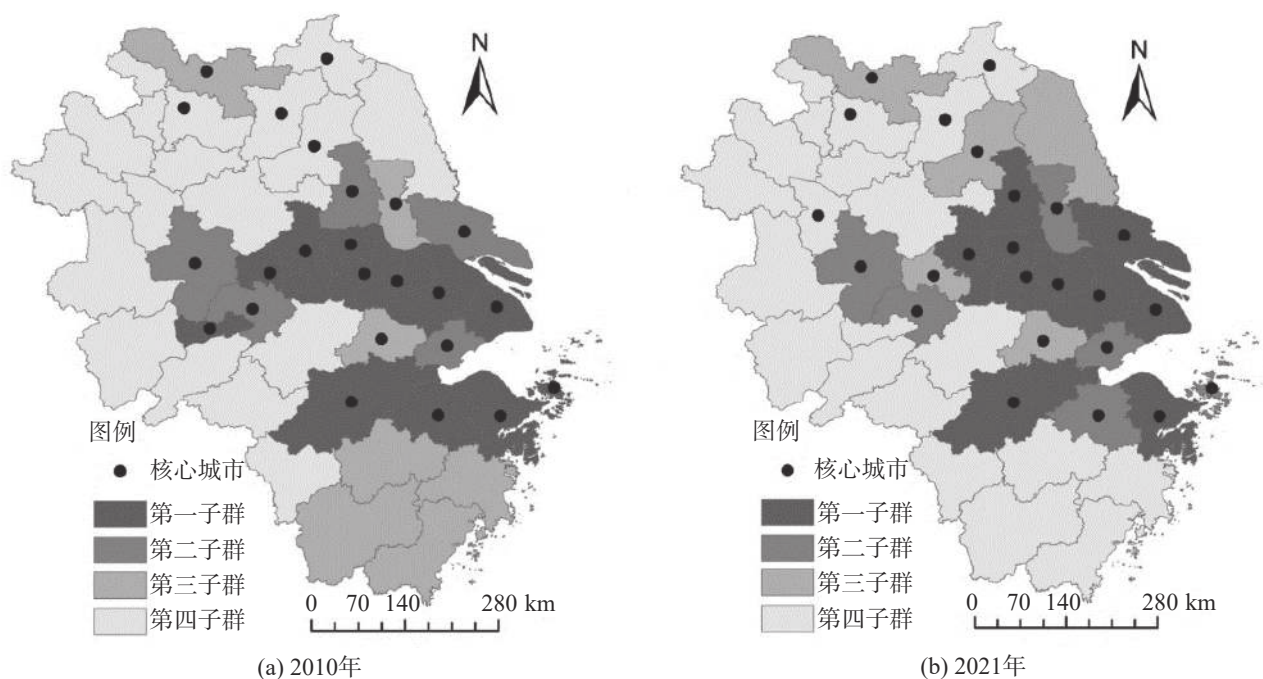


图5 长三角城市绿色创新网络凝聚子群分布与核心、边缘结构

Fig. 5 Agglomeration subgroup distribution and core-edge structure in the green innovation network of Yangtze River Delta cities

核心城市主要分布在长三角东部和中部地区,浙江南部以及安徽省的大部分城市始终为边缘城市,大多处于承接其他行政地区城市联系的状态,后续还需加大对这些城市的关注和支持。铜陵作为原先的资源型城市,由于近年传统优势逐渐消失,并受到生态环境约束等多重限制,产业转型升级乏力,工业经济形势较为严峻,从原先的核心城市变为边缘城市。淮南则积极主动适应经济发展新常态,以转型发展和创新发展为主线,摆脱了长久以来“一煤独大”的产业模式,实现了产业转型升级,从原先的边缘城市升级为核心城市。

样本期间,长三角城市群内部结构均有变动,表现为第一、三子群城市减少,第二、四子群城市增加。浙江南部几个城市由第三子群变动到第四子群,铜陵从第一子群变动到第四子群,说明这些城市的绿色创新资源投入不足,需要改变产业结构单一的发展模式;淮安和盐城由于大力实施创新驱动发展战略,扎实推进产业绿色化,先后创建了一批省级示范区,由第四子群变动到第三子群。从分布格局看,第一子群位于长三角绿色创新网络的核心位置,包括绿色创新网络中心度较高的上海、南京、无锡、

苏州、常州、杭州、南通、镇江、扬州和宁波等城市;第二子群的成员为泰州、嘉兴、绍兴、舟山、合肥、芜湖等城市;第三、四子群位于长三角绿色创新网络的边缘地区,成员多为长三角北部、皖西和浙南地区的城市,这些城市的中心度较低,而且多为“净受益”城市,主动与外界联系的能力不强。造成以上现象的原因在于这些城市的创新资源投入力度不强,产业结构相对单一,距离传统长三角中心城市较远等。

3 长三角城市绿色创新网络时空演化影响因素分析

考虑到数据的科学性、全面性、可获得性原则,选取地理邻近性、高等教育水平、产业结构、金融发展规模、对外开放程度、信息化水平、政府支持力度等7指标;考虑到部分指标变量存在一定的相关性,采用常规的统计检验方法易出现共线性问题,导致估计结果有偏差,相对于传统的统计计量方法,二次指派程序(quadratic assignment procedure, QAP)分析法可规避变量之间存在共线性的问题,能够更好地检验2个矩阵数据间的关系。文中利用QAP

分析法对2021年长三角城市绿色创新网络影响因素进行分析,具体模型如式(2)。

$$T = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 E + \beta_3 I + \beta_4 F + \beta_5 O + \beta_6 N + \beta_7 G + \mu \quad (2)$$

式中: T 为长三角城市绿色创新空间关联有向二值矩阵; β, μ 分别为待估参数与残差项; D, E, I, F, O, N, G 均为41阶二值矩阵,含义见表3。

表3 衡量指标及数据处理

Tab. 3 Measurement indicators and data processing

指标	数据含义	数据处理
地理邻近性 D	地理位置是否邻接	是取1, 否取0
高等教育水平差异 E	城市在校大学生的数量差值	
产业结构差异 I	城市第二产业产值与第三产业产值的比重差值	
金融发展规模差异 F	城市金融机构当年年末贷款余额与GDP比重差值	将各项指标差值数据的平均值设置成阈值, 差值大于该阈值记为1, 反之记为0
对外开放程度差异 O	城市进出口贸易总额与GDP比值差值	
信息化水平差异 N	城市国际互联网用户数量差值	
政府支持力度差异 G	城市科教环保财政支出总和占财政支出总额比重差值	

注: 地理邻近性数据依据各城市地理位置是否相邻接进行标记; 其他指标数据来源于2022年《中国城市统计年鉴》, 城市进出口贸易总额以当年美元平均汇率兑换成人民币计算。

3.1 QAP 相关性分析

通过QAP分析法检验被解释变量 T 与解释变量 D, E, I, F, O, N, G 之间的相关性, 利用Ucinet 6.0软件进行10 000次随机矩阵置换, 对长三角城市绿色创新空间关联有向二值矩阵和影响因素的差值矩阵进行QAP相关性分析和回归分析, 结果如表4。表4中的相关性分析结果显示: 高等教育水平差异 E 、金融发展规模差异 F 、对外开放程度差异 O 、信息化水平差异 N 和政府支持力度差异 G 均通过了显著性水平检验, 表明这些指标对长三角城市绿色创新空间关联有着显著的相关性。

表4 2021年长三角城市绿色创新网络的QAP回归分析结果

Tab. 4 QAP regression analysis results of green innovation network of Yangtze River Delta cities in 2021

解释变量	QAP相关分析结果	QAP回归分析结果
地理邻近性 D	0.012	
高等教育水平差异 E	0.432***	0.322***
产业结构差异 I	0.026	
金融发展规模差异 F	0.151*	-0.079*
对外开放程度差异 O	0.426***	0.253***
信息化水平差异 N	0.424***	0.324***
政府支持力度差异 G	0.236***	-0.025

注: *, **, ***分别表示在10%, 5%, 1%水平下显著。

3.2 QAP 回归结果分析

结合QAP相关分析的结果, 剔除无显著相关性的变量, 对模型进行修正^[42], 得到式(3), β' 和 μ' 分别为待估回归参数与残差项。

$$T = \beta'_0 + \beta'_1 E + \beta'_2 F + \beta'_3 O + \beta'_4 N + \beta'_5 G + \mu' \quad (3)$$

表4的QAP回归分析结果显示: 高等教育水平

差异 E 的回归系数为0.322, 位于1%水平上显著, 表明长三角城市高等教育水平差异能够正向驱动绿色创新联系的建立。长三角城市中拥有高等院校的数量差距最大超60所, 高等院校多的城市具有更雄厚的师资力量和先进的教学设施, 能够吸引高等教育欠发达地区学生的流入, 大部分学生毕业后会分散到其他城市就业, 这有利于促进不同高等教育水平城市间的知识交流和人才流动, 增进城市间绿色创新联系。

金融发展规模差异 F 的回归系数为-0.079, 通过10%的显著性检验, 说明金融发展规模差异增大, 会阻碍地区间创新活动的交流。近年长三角城市加快推动金融发展, 积极推出绿色金融产品, 但部分企业的绿色创新项目因资质要求限制, 较难得到金融市场的融资, 加上跨地区金融产品体系不够健全, 不利于金融发展差异大的地区间进行合作, 阻碍了城市间绿色创新空间关联关系。对外开放程度差异 O 的回归系数为0.253, 在1%的水平下显著, 表明对外开放程度的差异能够正向促进区域绿色创新空间关联。一方面, 城市对外开放能力增强, 有利于提升对外贸易规模, 加大国际先进技术产品引进力度, 促进其与国内其他城市高水平技术知识的共享和交流; 另一方面, 新市场能够刺激企业参与外部市场竞争, 倒逼其加快绿色创新技术交流和成果转化, 促进城市间绿色创新联系的形成。信息化水平差异 N 的回归系数为0.324, 位于1%水平上显著。说明长三角城市在信息化水平方面的差异越大, 城市间的绿色创新联系越紧密。互联网的快速普及拓宽了知识信息的传播渠道, 增大了信息的流通速率, 为不同城市加强技术联系进行创新合作提供了技术支持和交流

平台,能够加强城市间创新联系的紧密性。

4 结论与政策建议

4.1 结论

基于改进的引力模型,采用社会网络分析法和QAP回归分析法,从整体、个体和局部三方面探讨长三角城市绿色创新空间关联的网络特征及其影响因素,得到以下主要结论:

1) 从整体网络层面看,长三角地区各城市绿色创新发展迅速,且城市间的绿色创新联系程度逐年增强,但存在较大的区域差异,东部地区大部分城市的发展态势优于西部地区。长三角地区成员的增加对城市间关联发展造成一定影响,绿色创新空间关联关系系数还存在较大的提升空间,区域内城市间的关联还需加强。

2) 从个体层面看,在南京、无锡、上海、常州、苏州等核心城市的引导作用下,多数城市的参与度不断提升,东部和中部城市发挥桥梁和中介作用,促进网络内部绿色创新的交流互动。浙江南部地区以及新纳入长三角的安徽省大部分城市的绿色创新能力相对较低,呈“净受益”现象,被动接受其他城市的影响,无法主动缔结与其他城市的关联,难以为其他城市合作交流提供帮助。

3) 从局部特征看,整个长三角地区绿色创新网络呈显著的“核心-边缘”空间结构,核心城市主要集中于长三角东部和中部地区,绿色创新发展具有不平衡性。浙江南部及安徽省大部分城市由于创新资源投入力度不强,产业结构相对单一,距离传统长三角中心城市距离较远等原因,始终为边缘城市且位于第四子群,处于承接其他行政地区城市联系的状态。总体看,网络中4个城市子群成员均有变动,主要表现为第一、三子群成员减少,第二、四子群成员增加。位于第一、二子群的核心城市是绿色创新的技术溢出地,在这些城市的辐射效应下,带动了周围城市的绿色创新发展。

4) 从QAP回归结果看,长三角城市绿色创新空间关联受到高等教育水平差异、对外开放程度差异和信息化水平差异的显著正向影响,差异越大城市间的绿色创新联系越易建立,联系程度越深,正向驱动越明显。金融发展规模差异越小,越有利于加深绿色创新网络的联系程度。此外,政府支持力度差异也是长三角绿色创新空间关联的重要影响因素。

4.2 政策建议

结合上述结论,为促进长三角城市绿色创新协同发展,提出以下政策建议:

1) 制定差异化的发展战略。发挥核心城市对周围城市的辐射带动作用。南京、无锡、上海、常州、苏州等城市作为长三角绿色创新的核心城市,应继续发挥其自身优势,在提高绿色创新能力的同时发挥对周围城市的带动作用,并利用自身的资源优势扩大其辐射范围;中心城市要积极发挥中介与桥梁的作用,加快绿色创新资源在区域间的传送,推动城市间技术的交流与互动,实现区域一体化的高质量发展;对于绿色创新发展相对落后的地区,要借助紧邻核心城市优越的地理位置,接受知识、技术及资金等创新资源要素的外溢,实现均衡发展。

2) 在边缘地带发展中心城市。随着长三角城市群的不断扩容,区域内城市发展呈现不均衡现象,安徽省大部分城市与浙江省南部城市大多处于边缘地带,位于第三、四子群。为促进区域内协同发展,应考虑在第三、四子群内部建设中心城市,不仅能加强子群内部的联系强度,也易与外界城市进行创新资源的合作交流,从而带动城市间的良性交流互动,实现长三角绿色创新发展的均衡性。

3) 完善发展要素驱动策略。QAP回归分析结果表明,区域间金融发展规模差异越小,绿色创新的空间关联程度就越大。因此,各地政府要提高金融政策支持力度,健全跨地区金融产品体系,提升长三角地区整体的金融环境发展水平。此外,还要实现高校间资源共享,完善欠发达地区的人才引进政策,吸引人才的就业创业;增强城市的对外开放能力,对外加强与国际市场的通商合作,对内将吸收的创新资源与其他城市互通共享;提高信息化水平较为落后地区的信息技术基础设施水平,鼓励不同地区建立绿色创新合作机制,形成互补优势。

参考文献:

- [1] 彭文斌,文泽宙,邝嫦娥.中国城市绿色创新空间格局及其影响因素[J].广东财经大学学报,2019,34(1):25-37.
- [2] 刘柏阳.基于生态效率视角的淮河生态经济带绿色创新体系构建研究[D].蚌埠:安徽财经大学,2020.
- [3] 中国环境与发展国际合作委员会.机制创新与和谐发展:中国环境与发展国际合作委员会年度政策报告[M].北京:中国环境科学出版社,2009.
- [4] 王汀汀,贾婧雅,张芳.制造业数字化转型对绿色技术创新的影响:来自沪深A股上市制造业企业的证据[J].工业技术经济,2023,42(4):91-99.
- [5] 许汉友,高一璇.绿色技术创新与企业成本粘性[J].财会通讯,2023(16):29-34.
- [6] 董会忠,曹正旭,张仁杰.中国高技术产业两阶段绿色

- 创新效率及影响因素识别[J]. 统计与决策, 2022, 38(6):44-49.
- [7] 吕岩威, 谢雁翔, 楼贤骏. 中国区域绿色创新效率收敛性研究[J]. 科技进步与对策, 2019, 36(15):37-42.
- [8] 孙博文, 张友国. 中国绿色创新指数的分布动态演进与区域差异[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(1): 51-72.
- [9] BRUNNERMEIER S, COHEN M. Determinants of environmental innovation in US manufacturing industries[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2003, 45(2):278-293.
- [10] CARMEN E, ROBERT L. Environmental innovation and environmental performance[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2010, 59(1):27-42.
- [11] 叶陈毅, 黄灿, 王上. 绿色创新对制造企业价值的门槛效应研究[J]. 会计之友, 2022(19):117-124.
- [12] 何智励, 汪发元, 汪宗顺, 等. 绿色技术创新、金融门槛与经济高质量发展: 基于长江经济带的实证[J]. 统计与决策, 2021, 37(19):116-120.
- [13] 李雪松, 曾宇航. 中国区域创新型绿色发展效率测度及其影响因素[J]. 科技进步与对策, 2020, 37(3):33-42.
- [14] 王婉, 秦艺根. 四螺旋视角下区域绿色技术创新效率提升路径: 基于中国30个省份的模糊集定性比较分析[J]. 科技管理研究, 2023, 43(1):206-214.
- [15] 范德成, 吴晓琳. 中国工业绿色技术创新效率的时空演化特征及协调性研究[J]. 经济问题探索, 2022(12):1-15.
- [16] 邓峰, 陈春香. R&D投入强度与中国绿色创新效率: 基于环境规制的门槛研究[J]. 工业技术经济, 2020, 39(2): 30-36.
- [17] 张熠, 薛雯文, 王先甲. 价值链视角下我国制造业绿色技术创新能力评价: 基于云模型的实证[J]. 生态经济, 2023, 39(1):74-80.
- [18] 曹慧, 石宝峰, 赵凯. 我国省级绿色创新能力评价及实证[J]. 管理学报, 2016, 13(8):1215-1222.
- [19] 孙振清, 陈文倩, 兰梓睿. 基于熵权TOPSIS法的区域绿色创新能力研究[J]. 企业经济, 2019, 38(2):20-26.
- [20] 邹伟勇. 城市绿色创新的时空特征及影响因素分析[J]. 统计与决策, 2023, 39(1):168-172.
- [21] 董会忠, 李旋, 张仁杰. 粤港澳大湾区绿色创新效率时空特征及驱动因素分析[J]. 经济地理, 2021, 41(5): 134-144.
- [22] 赵林, 高晓彤, 吴殿廷. 黄河流域绿色技术创新空间关联网络结构与影响因素[J]. 人文地理, 2023, 38(4): 102-111.
- [23] FREEMAN C. Networks of innovations: a synthesis of research issues[J]. *Research Policy*, 1991(20):499-514.
- [24] 程露. 基于CAS理论的创新网络演化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [25] 刘晓燕, 阮平南, 李非凡. 基于专利的技术创新网络演化动力挖掘[J]. 中国科技论坛, 2014(3):136-141.
- [26] 吴梓华, 周明茜, 郭付友. 山东半岛城市群技术创新网络演化特征及多维邻近性机制[J]. 湖南师范大学学报(自然科学版), 2024, 47(2):90-98.
- [27] 胡悦, 马静, 李雪燕. 京津冀城市群创新网络结构演化及驱动机制研究[J]. 科技进步与对策, 2020, 37(13): 37-44.
- [28] 古惠冬, 杨维光, 陈文捷. 中国-东盟跨境区域创新网络的格局演化及影响机制[J]. 科技管理研究, 2021, 41(14): 25-32.
- [29] 王平平, 金浩, 赵晨光. 区域创新网络演化及其邻近性机理[J]. 技术经济与管理研究, 2020(6):25-30.
- [30] 方大春, 马为彪. 我国区域创新空间关联的网络特征及其影响因素[J]. 西部论坛, 2018, 28(2):50-61.
- [31] BUNNELL T G, COE N M. Spaces and scales of innovation[J]. *Progress in Human Geography*, 2001, 25(4):569-589.
- [32] 宋旭光, 赵雨涵. 中国区域创新空间关联及其影响因素研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2018, 35(7):22-40.
- [33] 邵汉华, 周磊, 刘耀彬. 中国创新发展的空间关联网络结构及驱动因素[J]. 科学学研究, 2018, 36(11):2055-2069.
- [34] 刘佳, 宋秋月. 中国旅游产业绿色创新效率的空间网络结构与形成机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(8):127-137.
- [35] 谢伟伟, 邓宏兵, 刘欢. 绿色发展视角下长三角城市群城市创新网络结构特征研究[J]. 科技进步与对策, 2017, 34(17):52-59.
- [36] 肖黎明, 李洵旭, 肖沁霖, 等. 中国区域绿色创新与绿色发展的协同及互动: 基于耦合协调与PVAR模型的检验[J]. 科技管理研究, 2019, 39(20):9-20.
- [37] 付幅, 卢小丽, 武春友. 中国省域绿色创新空间格局演化研究[J]. 中国软科学, 2016(7):89-99.
- [38] 梁文群, 秦天如, 梁鹏. 中国区域绿色低碳创新效率的分类测度与比较[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(11): 9-16.
- [39] 赵瑞芬, 王小娜. 基于全局熵值法的京津冀区域创新能力比较[J]. 中国流通经济, 2017, 31(4):114-121.
- [40] 杨蕙嘉, 赵振宇. 基于修正引力模型的区域城市群关联强度时空演进特征[J]. 统计与决策, 2021, 37(5):70-73.
- [41] VALVERDE S, CANCHO R F, SOLE R V. Scale-free networks from optimal design[J]. *Europhysics Letters*, 2002, 60(4):512-517.
- [42] 高鹏, 何丹, 宁越敏, 等. 长江中游城市群社团结构演化及其邻近机制: 基于生产性服务企业网络分析[J]. 地理科学, 2019, 39(4):578-586.