

中国高技术产业绿色创新效率的空间关联结构与影响机制分析

姚孟超¹, 段进军¹, 张仁杰², 玄泽源¹

(1. 苏州大学东吴商学院, 江苏 苏州 215021; 2. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100037)

摘要: 采用考虑非期望产出的 SBM 模型测算中国大陆 30 省市、自治区(西藏除外)高技术产业绿色创新效率,并借助社会网络分析与空间计量模型分别讨论其空间关联结构与影响因素。结果显示:(1)高技术产业绿色创新关联网络密度明显提升,但演化类型以低层级网络为主,整体网络结构仍处于初级阶段。(2)不同阈值下高技术产业绿色创新关联网络中心度均显著提升,但空间非均衡性特征依然存在且在第四层级网络阈值下更为突出。(3)政府性科技金融、信息化对绿色创新效率具有明显的促进作用,产业集聚在推动绿色创新效率过程中会导致负向的空间溢出,环境规制的影响并不显著,而对外开放水平阻碍了绿色创新效率的提升。应继续稳固京津冀、长三角在高技术产业绿色创新的龙头地位,提升区域一体化水平,加大政府性科技金融投入,提高信息化水平,推动绿色创新正向空间溢出。

关键词: 高技术产业; 绿色创新效率; 空间分布; 关联结构; 社会网络分析; 空间杜宾模型

中图分类号: F323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-8227(2022)11-2345-12

DOI: 10.11870/cjlyzyhj202211002

经济新常态背景下,资源环境不可持续性已成为制约经济高质量发展的关键瓶颈,如何在跨越生态红线的基础上实现经济平稳健康增长是现阶段亟需解决的重要议题。对此,中央相继提出创新驱动发展、深化供给侧结构性改革、加快新旧动能转换等一系列政策措施,旨在降低经济增长的环境附加成本,推动经济发展由“要素领跑”向“创新驱动”模式转变。绿色创新作为绿色发展与创新驱动两大国家战略的重要结合点,因具有环境约束下的科技创新和科技创新过程中环境绩效的双重属性,已成为评价区域科技创新生态化、可持续化的重要标准。而我国高新技术产业存在的投入冗余、区域发展不平衡、成果转化率不高、忽视环境成本等问题阻碍了创新效率的进一步提升因此,明晰高技术产业创新效率空间关联结构、识别制约绿色创新效率提升关键因素对促进绿色创新效率提升、缩小区域间差距具有重要的现实意义。

1 文献综述

绿色创新概念由 FUSSLER 于 1996 年首次提出,其本质是指企业为降低环境污染而进行的具有商业价值的活动^[1],随后引发众多学者对绿色创新的研究热潮,并被广泛应用于各个领域。学术界对绿色创新的研究主要集中于以下几个方面:一是绿色创新的概念边界与测度方法讨论。现有主要观点包括“两段论”和“三段论”。“两段论”通常将企业的创新过程划分为研发阶段与成果转化阶段^[2~4],而“三段论”则将产品市场化、规模化也包含在创新过程中^[5~7]。此外,也有学者将创新过程划分为知识创新、研发创新与产品创新^[8],或是分为科技成果形成、商业价值形成与规模经济效益形成 3 个阶段^[9]。绿色创新效率的测算方面多采用 DEA(数据包络分析)模型^[10~11],但该方法对于数据异常值高度敏感,并且没有考虑创新过程中的非期望产出,往往导致

收稿日期: 2021-11-04; 修回日期: 2022-05-17

基金项目: 国家社科基金项目阶段性成果“创新生态系统视阈下特色小镇演化机制研究”(18BGL157); 教育部人文社科重点研究基地重大项目“城镇化进程中新驱动力研究”的阶段性成果(19JJD79008)

作者简介: 姚孟超(1991~),男,博士研究生,主要研究方向城市与区域发展. E-mail: fredbs@126.com

效率值偏高。而 SFA 模型(随机前沿分析)能够将创新过程中的非期望产出纳入效率测算^[12],但需事先拟定生产函数形式,并且该方法主观性较强,难以精准刻画多投入多产出过程的效率问题。随着研究的深入,有学者采用考虑非期望的 SBM 模型^[13],将非期望产出纳入测算指标,成为目前效率测算的主流方法。二是绿色创新效率的区域差异。从研究范畴来看主要分为宏观层面和微观层面。宏观层面的研究主要包括省域^[14]、城市群^[15]、地级市^[16]等,旨在研究绿色创新效率时序演变规律、空间纹理特征及空间相关性等相关问题。微观层面研究包括行业^[17,18]、企业^[19,20]等方面,主要集中于绿色创新效率的测度与影响因素分析。三是对绿色创新效率影响因素的研究。经济发展水平高的地方因具有完备的研发设施,以及丰富的要素资源能够促进绿色创新效率的提高^[11]。但经济发展水平并不能完全决定一个地区的绿色创新效率,有研究表明中西部地区经济发展相对落后的省市也具有较高的绿色创新效率^[21]。科研经费投入同样是绿色创新效率的关键影响因素,二者之间存在“U”型关系^[22]。通过检验发现企业规模与绿色创新效率也存在类似的关系^[23],而 Jungin^[24]却提出相反的研究结论。绿色创新体制为企业创新提供良好的制度保障,能够减少创新过程中的不确定性,提高资源配置效率^[25],但制度环境对不同创新阶段的影响存在差异性^[26]。除此之外,还有学者从人力资本^[27,28]、产业结构^[29,30]等层面考察对绿色创新效率的影响。

综上,现有学者已针对绿色创新效率进行大量卓有成效的研究,但仍具有一定的提升空间:(1)绿色创新效率指标的选取缺乏合理性,现有研究通常以废气、废水、固废排放量等环境污染指标作为绿色创新效率的非期望产出,忽略创新过程中创新失败、创新无效的风险,不符合高技术产业高风险、高投入的行业特点,导致测算存在偏差;(2)对行业层面的研究有待加强,尤其缺乏对高技术产业等科技研发密集型行业绿色创新效率的研究,结果示范性与指导性不足;(3)现有研究多采用空间分析工具研究绿色创新效率空间集聚与空间纹理特征^[15,18],仅考虑地理空间层面上的“邻近”或“相邻”,难以刻画样本个体间在“关系”层面的联系程度,更无法准确把握高技术产业绿色创新效率的空

间交互作用与网络关联形态;(4)在刻画样本间关系时往往采用平均值或中值作为阈值,在样本分布不满足正态分布的情况下,单一阈值难以充分反映低值样本点在网络中的关联特征。鉴于此,本文运用考虑非期望产出 SBM 模型测算中国大陆 30 省市、自治区(西藏除外)高技术产业绿色创新效率,并运用社会网络分析方法从多个阈值下刻画高技术产业绿色创新关联网络空间结构,并从整体与局部两个维度分析绿色创新效率网络空间结构形态、演化趋势及集聚类型,最后结合空间计量模型探究高技术产业绿色创新效率影响机理,以期提升高技术产业发展与环境保护兼容性,降低发展过程中的环境附加成本。

2 理论与方法

2.1 绿色创新效率关联网络的理论阐释

绿色创新效率关联网络是包含各类主体要素及要素间交互关系的典型复杂巨系统,其复杂性主要体现在主体要素多元化、层次结构差异化与交互关系抽象化。其中,交互关系是导致网络结构复杂性的关键,社会网络分析是对网络中各种关系进行精确量化分析、建立“宏观和微观”之间桥梁的有效方法,侧重于考察网络的拓扑结构并进行可视化处理,对分析绿色创新效率关联网络特征具有良好的适用性。社会网络分析主要采用网络密度、度数中心度和中间中心度等指标对绿色创新效率关联网络空间结构作深层次的特征规律信息挖掘。网络密度反映绿色创新效率关联网络的复杂程度,具体表现在省市间的绿色创新溢出交互量,其值越大则网络中交互关系越复杂,网络结构也就越稳定;度数中心度指标,即某省市与其他省市间存在绿色创新溢出交互关系的数量,用以反映该省市在绿色创新效率关联网络中的地位与影响力,绿色创新效率高的省市对周边地区的溢出效应更加显著;中间中心度指标主要反映某省与其他省市建立交互关系过程中经过某节点的次数,用以反映该节点在整体网络中的控制力,是形成网络连接的关键通道。因此,本文将系统中各主体要素抽象成节点、要素间创新交互关系抽象成边,把复杂的创新巨系统抽象成简单的网络拓扑结构,并借鉴社会网络分析中相关概念与方法考

察其网络结构特征。

区域绿色创新效率空间关联是指绿色创新要素及其溢出在不同区域之间动态流动所产生的地理空间上的联结关系。技术扩散理论和新经济地理学理论都认为地理空间距离是导致创新溢出效应持续衰减的关键因素^[31,32],这也与经济动力学中的经济引力理论相吻合,诸多研究表明,引力模型是量化区域创新空间关联的有效方法^[33~36]。要素间交互关系刻画(边的量化)是考察区域绿色创新效率关联网络特征的前提,因此在定量刻画绿色创新网络交互量过程中必须考虑地理距离的影响。

2.2 考虑非期望 SBM 模型

高技术产业绿色创新不仅包含专利、产品收入等期望产出,还包括环境污染、创新失败等非期望产出。传统的 DEA-CCR 模型忽略非期望产出对效率的影响,导致效率测度存在较大误差。而非期望产出 SBM 模型能够将松弛变量考虑到目标函数中,规避了不能包含非期望产出及传统模型中径向和角度对测量结果的影响,效率测度更加科学合理,具体模型如下:

$$\rho^* = \frac{1 - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{S_k}{x_{k0}}}{1 + \frac{1}{I+J} \left(\sum_{i=1}^I \frac{S_i^d}{y_{i0}^d} + \sum_{i=1}^J \frac{S_i^u}{y_{i0}^u} \right)}$$

$$s.t. \begin{cases} x_{k0} = \sum_{m=1}^M \mu_m x_{km} + s_k^-, k = 1, 2, \dots, K \\ y_{i0}^d = \sum_{m=1}^M \mu_m y_{im}^d - s_i^d, i = 1, 2, \dots, I \\ y_{i0}^u = \sum_{m=1}^M \mu_m y_{im}^u + s_i^u, i = 1, 2, \dots, J \\ 1 = \sum_{m=1}^M \mu_m \\ \mu_m \geq 0, s_k^- \geq 0, s_i^d \geq 0, s_i^u \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ^* 表示高技术产业绿色创新效率,取值范围为 $[0, 1]$; K 、 I 、 J 分别表示高技术产业创新投入、期望产出与非期望产出个数; s_k^- 、 s_i^d 、 s_i^u 分别为创新投入、期望产出和非期望产出松弛变量; x_{k0} 、 y_{i0}^d 、 y_{i0}^u 分别为创新投入、期望产出和非期望产出量; μ_m 为权重系数。

2.3 绿色创新交互关系量化

引力模型能够反映出某属性值随地理空间距离衰减的变化特征,具体计算公式如下:

$$R_{ij} = \frac{P_i \times P_j}{D_{ij}^2} \times K \quad (2)$$

式中: R_{ij} 表示 i 省份与 j 省份之间的引力值(即交互关系量); P_i 、 P_j 分别表示 i 省份与 j 省份高技术产业绿色创新效率; D_{ij} 表示 i 省份与 j 省份之间的地理空间距离,该数据借助 ArcGIS10.0 软件计算中国各省市几何中心及连线得到。 K 表示修正系数,由于绿色创新效率均处于 $[0, 1]$ 区间内,导致计算得到的引力值过小,通过添加修正系数将原数据等比例放大,以便于比较与后续处理。

2.4 特征指标计算

(1) 网络密度是指高技术产业绿色创新效率关联网络中实际存在的关系系数与理论存在最大关系系数的比值。公式如下:

$$C_{RK} = S' / S \quad (3)$$

式中: C_{RK} 表示绿色创新效率关联网络密度值; S' 与 S 分别表示实际存在交互关系系数与最大关系系数。

(2) 度数中心度是指与某省份节点直接相连的其他节点的数量,计算公式如下:

$$C_{RD}(i) = L_i / (n-1) \quad (4)$$

式中: $C_{RD}(i)$ 表示 i 省份在绿色创新效率网络中的度数中心度; L_i 表示 i 省份与其他省份的有效联系数量。

(3) 中间中心度是指在绿色创新效率网络中连接剩余节点时经过某节点的所有路径数量。具体计算公式如下:

$$C_{RB} = \frac{2 \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n s_{jk}(i) / s_{jk}}{(n-1)(n-2)} \quad (5)$$

式中: C_{RB} 表示 i 省份的相对中间中心度; $s_{ij}(i)$ 表示 j 省份与 k 省份之间经过 i 省份的路径数目; s_{jk} 表示 j 省份与 k 省份之间存在的总路径数。 $i \neq j \neq k$, 其 $j < k$ 。

3 指标选取与数据来源

3.1 高技术产业绿色创新效率测度指标体系

本文借鉴已有的研究成果^[2,11]并结合高技术产业创新特点,将绿色创新效率评价体系目标层分为投入、产出两个方面,投入包括自然资源投入、资金投入和劳动力投入,产出包括期望产出与非期望产出(表 1)。其中,自然资源投入指高

技术产业产值占工业总产值比重折算得到高技术产业各类能源消费量；对此，本文以劳动力投入以 R&D 人员全时当量表征；资金投入以 R&D 经费投入表征；期望产出以有效发明专利数量、技术市场成交额、新产品销售收入表征；非期望产出以专利未授权数和环境污染指数表征其中，环境污染指数由工业废水、废气、粉尘排放折算后采用熵权法综合计算得到。考虑到非期望产出 SBM 模型指标选取基本原则（指标数量 $\leq$ 样本数/3），本文将高技术产业绿色创新过程中的能源投入与污染物排放指标进行折算与综合。

表 1 高技术产业绿色创新效率测度指标体系

Tab. 1 Measurement index system of green innovation efficiency of high-tech industry

目标层	准则层	指标层	单位
投入	自然资源投入	能源投入	万吨·标准煤
	资金投入	R&D 经费投入	万元
	劳动力投入	R&D 人员全时当量	人年
产出	期望产出	有效发明专利数量	项
		技术市场成交额	亿元
		新产品销售收入	万元
	非期望产出	环境污染指数	%
		专利未授权量	项

注：为消除价格因素影响，R&D 经费投入按 2010 年不变价固定资产投资价格指数平减后的实际 R&D 经费投入表示；技术市场成交额和新产品销售收入按照 2010 年不变价工业品出厂价格指数平减；专利未授权量为专利申请量与专利授权量差值，专利未授权量为专利申请量与专利授权量差值。

3.2 数据来源

本文选取省域为研究单元，考察高技术产业绿色创新效率网络结构的复杂性。选取 2010~2019 年中国大陆 30 省市、自治区（西藏除外）相关数据测算高技术产业绿色创新效率，各类能源消费量指标来源于《中国能源统计年鉴》，环境污染排放指标来源于《中国环境统计年鉴》，有效发明专利、专利未授权量等指标来源于《中国高技术统计年鉴》，其他指标均来源于国家统计局网站。

4 实证分析

4.1 绿色创新效率测算

根据公式(1)测算 2010、2013、2016 和 2019 年中国大陆 30 省市、自治区（西藏除外）高技术产业绿色创新效率，并对测算结果进行描述性统计（表 2），并将绿色创新效率均等划分为 5 个区间。

研究期内，高技术产业绿色创新效率存在以下 3 个方面特征：一是绿色创新效率均值显著提升，呈现出梯度爬升与递进演化的增长趋势。效率均值由 2010 年的 0.376 0 上升至 2019 年的 0.631 2，中位数由 0.259 3 上升至 0.577 1，增幅均接近一倍，在 [0.2, 0.6] 区间内省份数量变动是导致该变化的主要原因。但值得注意的是，绿色创新效率增长速度趋于滞缓，这意味着绿色创新或将进入发展瓶颈期，即“中等效率陷阱”，具体是指在 [0.4, 0.6] 区间内省份数量进一步增长，但更高效率区间数量增长出现停滞。其原因可能是人力资本、科研资金等基本创新要素供给不足与投入冗余并存，导致低效率省份绿色创新内生动力不足，而中等效率省份出现绿色创新要素过剩，但受要素驱动型创新增长方式的束缚，创新平台建设、制度供给、成果市场化等外部环境难以满足绿色创新效率的进一步提升；二是区域间高技术产业绿色创新效率变异系数由 2010 年的 0.726 0 下降到 2019 年的 0.392 6，极值由 0.911 1 下降到 0.737 8，整体效率差距明显减小并向均值水平收缩；三是随着时间推移，绿色创新效率区间样本数量变化明显。由 2010 年绿色创新效率样本主体主要集中于 [0.2, 0.4] 区间内，转变为 2019 年样本主体集中于 [0.4, 0.6] 与 [0.8, 1.0]，样本数量结构由原来的“一极独大”演变为近似“纺锤形”，进一步佐证“中等效率陷阱”的存在。

表 2 高技术产业绿色创新效率描述性统计

Tab. 2 Descriptive statistics of green innovation efficiency of high-tech industry

年份	均值	中位数	极值	变异系数	不同绿色创新效率区间城市个数(个)				
					[0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1.0]
2010	0.376 0	0.259 3	0.911 1	0.726 0	8	14	2	2	4
2013	0.559 2	0.444 1	0.871 5	0.536 0	3	9	7	2	9
2016	0.621 6	0.536 0	0.806 3	0.423 8	1	5	13	1	10
2019	0.631 2	0.577 1	0.737 8	0.392 6	0	6	10	5	9

4.2 绿色创新效率网络关联结构分析

从整体把握高技术产业绿色创新关联网络结构对合理规划产业布局、推动产业绿色化与可持续发展具有重要作用。对此,本文以引力均值

为阈值构建网络二分矩阵,借助 Ucinet 软件中的 Network 功能模块将绿色创新关联网络划分为核心区与边缘区(表 3),并测算各区域类型网络关联密度矩阵(表 4)。

表 3 高技术产业绿色创新关联网络核心—边缘结构

Tab. 3 Core edge structure of green innovation related network of high-tech industry

	2010 年	2019 年
核心区	京、津、鲁、苏、皖、沪、浙、湘	冀、京、津、晋、鲁、豫、苏、皖、鄂、重、沪、浙、湘、赣、桂、粤
边缘区	蒙、黑、新、吉、辽、陇、冀、晋、秦、宁、青、琼、蜀、鄂、重、赣、滇、黔、闽、桂、豫、粤	黑、蒙、新、吉、辽、陇、秦、宁、青、蜀、滇、黔、闽、琼

表 4 绿色创新效率核心—边缘密度矩阵

Tab. 4 Core edge density matrix of green innovation efficiency

	2010 年		2019 年	
	核心区	边缘区	核心区	边缘区
核心区	0.694	0.122	0.650	0.156
边缘区	0.122	0.069	0.156	0.099

结果显示,高技术产业绿色创新关联网络核心—边缘结构表现出以下两个方面特征:一是绿色创新关联网络呈现出核心区扩张、边缘区缩小的演变态势。相比于期初,核心省份由 8 个增加至 16 个,除北京、天津、江苏、上海、湖南等始终处于核心区外,河北、重庆、广东、广西等省市也加入到核心区行列中。另一方面,山西、江西、贵州等退出边缘区而成为核心节点,但黑龙江、辽宁、新疆、甘肃等省市(自治区)并未发生变化,成为网络结构的绝对边缘节点,也成为制约高技术产业绿色创新关联网络复杂化、均衡化发展的关键。可能原因是该地区产业结构仍以基础农业、采矿、机械加工等粗放型产业为主,对于高技术产业投入不足,导致发展内生动力不足,始终停滞于低水平阶段。核心区省市绿色创新发展往往具有良好的基础优势,例如,京津冀地区人才、技术、资本优势为绿色创新发展提供了充足的物质保障。上海、浙江等省市地缘优势为其创新发展带来先进的技术与管理经验。而核心区省市数量增多意味着绿色创新效率关联网络基础架构的支撑能力有效提升,对提升整体绿色发展效率具有重要意义。然而值得注意的是,福建、海南等省市毗邻位于核心区的广东,而自身始终处于边缘区域。这些省份受制于旅游、服务、餐饮为主导的产业结构,尽管高技术产业创新投入有所增加,但相较于广东、浙江等省份绿色创新差距仍在持续增大,导致其成为局部创新

发展的边缘区域。另一方面,广东作为连接港澳与内陆地区的关键通道,在粤港澳大湾区建设与泛珠江三角洲经济区发展关键期引发的“虹吸效应”一定程度上“压制”了临近地区的绿色创新发展;二是绿色创新关联网络内部核心转移,网络延展性增强。对比期初,核心区网络密度略有下降,而边缘区内部及核心边缘区之间密度不断提升,说明核心区省市节点数量及网络连接基本饱和,网络连接趋向于边缘地区,即网络外向性增强,这一变化对于刺激新的核心节点产生、有效缩小区域间差距具有重要作用。因此,边缘区省份应当积极寻找产业融合与绿色发展新的着力点,加快构建绿色化、生态化高技术产业发展链条。

4.3 节点中心性分析

由于节点中心性测算对网络二分矩阵阈值选择极为敏感,因此,本文分别选取第二、四层级网络联系度作为阈值,尝试讨论不同层级网络联系度下节点中心性演化规律。借助 Ucinet 软件中的 Centrality 功能模块分别测算得到绿色创新关联网络的度数中心度与中间中心度指标,并在 ArcGIS10.0 技术支持下,采用反距离权重对各指标进行空间插值处理,分别得到 2010、2019 年高技术产业绿色创新关联网络在不同阈值下的度数中心度。

4.3.1 度数中心度

由表 5 看出,高技术产业绿色创新关联网络度数中心度具有以下特征:一是不同层级阈值下,高技术产业绿色创新关联网络度数中心度均显著提高。第二层级网络阈值下,绿色创新关联网络度数中心度大于 10 的省份由期初的 3 个上升至 13 个,第四层级网络阈值下,度数中心度大于 1 的省份由 3 个上升至 5 个;二是绿色创新关

联网络度数中心度空间非均衡性极为显著,且东高西低的空间格局依然存在。第二层级网络阈值下,高值区域主要集中于京津冀、长三角、长江中游城市群及珠三角地区,这说明 2010 年高技术产业绿色创新关联网络核心节点省市中心性较弱,辐射带动能力有限。随着时间推移,网络结构开始向中、西部地区延伸,重庆、陕西、湖北等省市也加入到高值行列中,整体上形成以华北、华中及东南沿海地区为主的集中连片的高值区域,说明高技术产业绿色创新关联网络核心节点中心性不断增强,对整体网络控制力进一步增强,同时也促进了中西部地区核心节点的产生。相比于第二层级网络阈值下的度数中心度变化,第四层级网络阈值下的高值区明显缩小,且演化速度较慢,这是因为高技术产业是典型的知识密集型行业,高投入、高风险、长周期的特点决定

表 5 不同层级网络阈值下的度数中心度

Tab. 5 Degree centrality under different levels of network thresholds

地区	第二层级网络阈值		第四层级网络阈值	
	2010 年	2019 年	2010 年	2019 年
黑龙江省	1	1	1	0
内蒙古自治区	1	2	0	0
新疆维吾尔自治区	0	0	0	0
吉林省	3	5	0	0
辽宁省	3	4	0	0
甘肃省	0	2	0	0
河北省	3	6	2	2
北京市	12	13	2	2
山西省	1	6	0	0
天津市	9	12	2	2
陕西省	1	5	1	0
宁夏回族自治区	0	3	0	0
青海省	0	2	0	0
山东省	7	9	0	0
河南省	3	13	0	0
江苏省	6	13	0	2
安徽省	8	16	0	1
四川省	1	5	0	0
湖北省	4	14	0	0
重庆市	7	13	0	0
上海市	8	13	1	2
浙江省	11	14	1	1
湖南省	11	13	0	0
江西省	3	12	0	0
云南省	0	2	0	0
贵州省	3	7	0	0
福建省	5	9	0	0
广西壮族自治区	5	12	0	0
海南省	4	6	0	0
广东省	6	12	0	0

其在跨区域合作过程中趋向于寻找同等或更高水平的地区,这就要求高层级网络的发展必须以区域一体化为支撑。

4.3.2 中间中心度

中间中心度能够揭示省市节点对周围节点的控制强度,值越大则控制力越强,该节点在网络中地位也就越高,而高值节点越多,网络关联通道也就越完善。结果显示,高技术产业绿色创新关联网络中间中心度具有以下两个方面特征:一是绿色创新关联网络中间中心度显著提升。第二层级阈值下,中间中心度值在 10 以上的省市由 9 个上升至 14 个。吉林、湖北、四川、广西、宁夏等均加入到高值行列,结合图 1 来看,新加入省份均形成了大量的第二、三层级网络并成为区域性的“次级”核心节点。第四层级网络阈值下,中间中心值在 0.5 以上的省市由 3 个上升至 9 个,

表 6 不同层级网络阈值下的中间中心度

Tab. 6 Intermediate centrality under different levels of network thresholds

地区	第二层级网络阈值		第四层级网络阈值	
	2010 年	2019 年	2010 年	2019 年
黑龙江省	0	0	0	0
内蒙古自治区	0	0	0	0
新疆维吾尔自治区	0	0	0	0
吉林省	0	27.556	0	0
辽宁省	0	0.5	0	0
甘肃省	0	1.7	0	0
河北省	0	0.4	0	0
北京市	68.418	38.956	0	0
山西省	0	6.205	0	0
天津市	20.027	27.13	0	0
陕西省	0	12.725	0	0
宁夏回族自治区	0	23.589	0	0
青海省	0	3.111	0	0
山东省	4.542	6.025	0	0
河南省	4.239	22.934	0	0
江苏省	0	9.341	0	2
安徽省	18.798	41.242	0	0
四川省	0	28.387	0	0
湖北省	11.477	26.037	0	0
重庆市	24.667	63.031	0	0
上海市	18.921	29.591	0.1	2
浙江省	60.019	22.768	0	0
湖南省	62.759	11.481	0	0
江西省	0	7.891	0	0
云南省	0	0	0	0
贵州省	0	4.665	0	0
福建省	1	1.273	0	0
广西壮族自治区	0.667	41.596	0	0
海南省	0	0.167	0	0
广东省	11.469	9.698	0	0

重庆、山东、江苏等省市中间中心度得到大幅提升,为推动高层级网络建设提供有效支撑;二是绿色创新关联网络中间中心度空间集聚特征明显。第二层级阈值下,高值区在空间上呈现出“块状”分布,主要包括京津冀、长三角及长江中游城市群(湖南)。随着时间推移,各省市趋向于抱团发展,并形成集中连片的高值区域,集聚中心主要发生在沿海地区与长江经济带地区,说明绿色创新关联网络主要通道向西部、北部地区延伸,原本的“单点式”联系逐渐消失,网络结构失衡问题稍有缓解,同时也说明国土开发与经济布局 T 字型空间架构对当前经济发展与产业规划仍具有深远影响。

4.4 绿色创新效率影响因素分析

4.4.1 变量选取与模型构建

在参考文献[6]、[18]基础上,结合高技术产业创新特点,从经济、社会两个维度选取政府性科技金融(Gove_cap)、环境规制(Envir_reg)、产业集聚(Ind_agg)、开放水平(Open)、信息化水平(Internet)五个方面作为高技术产业绿色创新效率影响因素。前文指出,研究期内高技术产业绿色创新效率空间集聚特征显著,即空间关联性始终存在,这就要求在考察绿色创新效率影响因素过程中依然不能忽略空间关联性对检验结果的影响。因此,本文选择空间计量方法构建多组模型进行比较,具体如下:

(1) 空间滞后模型(SAR),即高技术产业绿色创新效率的空间溢出应体现在因变量上,因此,将上一期效率值作为解释变量加入到模型中,具体如下:

$$\ln Eff_{i,t} = \rho W \ln Eff_{j,t} + \beta_i X_i + \mu_i + \eta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (5)$$

式中: $Eff_{i,t}$ 与 $Eff_{j,t}$ 分别表示地区 i 在第 t 期的绿色创新效率与地区 i 的邻近地区 j 在第 t 期的绿色创新效率; β_i 表示回归系数列向量; ρ 表示空间自相关系数; W 表示空间权重矩阵; μ_i 、 η_t 分别表示个体固定效应与时间固定效应; X_i 表示解释变量; $\varepsilon_{i,t}$ 表示随机干扰项。

(2) 空间误差模型(SEM),即空间自相关被定义在具有空间溢出效应的误差项上,模型具体如下:

$$\ln Eff_{i,t} = \beta_i X_i + \mu_i + \eta_t + \varphi_{i,t} \quad (6)$$

$$\varphi_{i,t} = \lambda W \varphi_{i,t} + \varepsilon_{i,t}$$

式中: λ 表示空间自相关系数,其他变量含义不变。

(3) 空间杜宾模型(SDM)既考虑了因变量滞后因子对被解释变量的影响,又考虑不同因素空间溢出效应对被解释变量的作用,具体模型如下:

$$\ln Eff_{i,t} = \rho W \ln Eff_{j,t} + \beta_i X_i + W X_{i,t} \gamma + \mu_i + \eta_t + \varphi_{i,t} \quad (7)$$

式中: γ 表示解释变量空间自回归系数; ρ 表示被解释变量的空间自回归系数,其他变量含义不变。

4.4.2 回归结果分析

为选择最优的空间面板模型,首先通过 Wald 检验和 LR 检验对 SDM 模型进行简化检验,结果显示 SDM 模型不可以简化成 SAR 模型或 SEM 模型,然后通过豪斯曼检验显示通过 1% 的显著性水平检验,即拒绝随机效应模型的原假设,高技术产业绿色创新效率回归应采用时间、个体双固定效应模型。进一步借助 stata 软件对上述模型进行检验(表 7),经检验模型存在组内异方差与组内相关性,校正后根据 AIC 信息准则选择空间杜宾模型(SDM)做进一步分析。

表 7 模型回归结果

Tab. 7 Model regression results

Variable	OLS	SAR	SEM	SDM
Ln(Gove_cap)	0.220 *** (0.057)	0.213 *** (0.061)	0.214 *** (0.061)	0.148 ** (0.069)
Ln(Envir_reg)	-0.856 *** (0.111)	0.027 (0.087)	-0.063 (0.095)	0.020 (0.086)
Ln(Ind_agg)	-0.203 ** (0.094)	-0.429 *** (0.151)	-0.282 ** (0.139)	0.486 *** (0.164)
Ln(Open)	0.284 * (0.163)	-0.691 *** (0.263)	-0.251 (0.228)	-0.588 ** (0.270)
Ln(Internet)	0.414 *** (0.088)	0.935 *** (0.173)	0.758 *** (0.138)	1.093 *** (0.204)
W×Ln(Gove_cap)	-	-	-	-0.617 (0.644)
W×Ln(Envir_reg)	-	-	-	0.202 (0.789)
W×Ln(Ind_agg)	-	-	-	-2.153 * (1.223)
W×Ln(Open)	-	-	-	-8.288 ** (3.453)
W×Ln(Internet)	-	-	-	4.875 ** (2.207)
Time	control	control	control	control
Ind	control	control	control	control
Log-likelihood	-	442.857 7	345.717 4	447.451 0
R ²	0.432 9	0.584 6	0.618 9	0.674 9
AIC	-420.01 6	-871.715 5	-673.434 7	-870.830 1
BIC	-397.793	-825.789	-640.100 7	-826.384 7
Sample	300	300	300	300

注: 括号内为回归结果标准误, *、**、*** 分别表示在 1%、5%、10% 水平下显著。

回归结果显示,政府性科技金融对高技术产业绿色创新具有明显的促进作用。政府性科技金融的进入有效降低高技术企业绿色创新过程中创新失败、创新无效的风险。对于高技术企业而言,绿色创新过程不仅需要大量的资金支持,同时还面临着资金短缺与环境负外部性的多重风险威胁,而政府性科技金融的进入恰可以有效降低企业创新风险,并为其提供强有力的资金支持,同时对减少科技研发带来的环境负外部性起到积极作用,刺激企业加速创新、高效创新。然而,现阶段绿色创新的目标依然是以提高经济效益为主,政府在选择投资目标过程中往往只关注于具有高等研发水平或市场潜力较大的高技术企业,对于中层及基础研发型企业关注度不够。另外,外部政策缺失及企业自我意识不到位通常会导致政府性科技金融无法有效地应用到技术研发中,导致资金成果转化率及政策失灵,同时也会引发企业对政府投资的强依赖性。空间滞后项回归系数为 -0.617 ,但并不显著,可能的原因是本地区政府性科技金融会对临近地区人力资本、资金等产生吸引力,但受行政壁垒与制度供给削弱了这种吸引力,导致其对绿色创新效率影响并不明显。

环境规制对高技术产业绿色创新影响不明显,这一结果与崔蓉等^[37]、杨树旺等^[38]研究结论并不一致。可能的原因包括两个方面:一是政府环境规制工具组合低效性或规制强度较弱,未对高技术产业绿色创新过程中的污染问题产生约束作用;二是由于高技术产业主要包括航空航天、生物工程、信息技术等资本与人才密集型行业,对于煤炭、石油等化石能源消耗依赖性低,污染排放量较低,因而受环境规制影响较小。空间滞后项回归系数为 0.202 ,同样未通过显著性检验,说明本地区环境规制对临近地区绿色创新效率不存在明显的环境约束,普遍认为本地区高强度的环境规制会倒逼企业增加环保成本或导致企业转移,但就现有回归结果而言,环境规制强度仍处于合理区间,并不存在“污染天堂”假说。

产业集聚对高技术产业绿色创新效率有显著的促进作用。产业集聚是工业发展的必经阶段:一方面,产业集聚形成的规模效应与城市化经济大大降低高技术企业在基础设施、公共绿化等方面的投入,极大缓解创新过程中的资金紧张问题;另一方面,产业集聚也为企业间合作提供了良好契机与广阔平台,有利于降低创新过程的风险性,提高创新质量的同时缩短创新周期。空间滞后项回归系数为

-2.153 ,且在 10% 水平下显著,说明本地区产业集聚对临近地区高技术产业绿色创新效率产生负向溢出效应。根据缪尔达尔“回波理论”,本地区产业集聚对高技术产业绿色创新产生正向推动作用的同时会吸引临近地区相关企业发生产业转移,导致临近地区出现技术、人才等基本创新要素流失,造成高技术产业创新发展活力降低,不利于绿色创新效率提升。

对外开放抑制高技术产业绿色创新效率的提升。多数学者认为对外开放可以促使本地区积极接受来自发达地区的正向溢出,不断引进先进技术与人才,有利于推动本地区高技术产业发展^[39]。但本文认为由于逐底竞争的存在,提升开放水平会导致大量被临近地区驱逐的高污染、高能耗产业涌入,加剧本地区生态压力,不利于绿色创新效率的提升。空间滞后项回归系数为 -8.288 ,且在 5% 水平显著,说明本地区的进一步开放对临近地区高技术产业绿色创新效率产生抑制作用,假设本地区绿色创新效率远高于临近地区,由于规模效应的存在,会吸引周边地区发展产业转移,不利于临近地区绿色创新效率的提升。若本地区绿色创新效率远低于临近地区,受制于绿色创新效率差距,导致临近地区绿色创新效率空间溢出受阻,难以进一步拓展创新发展空间。

信息化水平对高技术产业绿色创新效率具有促进作用。创意的产生、实现与信息获取、沟通密切相关,完善的信息系统不仅能够提高创新过程中的沟通效率,也有助于及时、便捷地进行信息共享,降低由于信息闭塞而引发的错误。空间滞后项回归系数为 4.875 ,且在 5% 水平下显著,说明本地区信息化水平提高有助于临近地区绿色创新效率提升。这一结果与黄磊等^[40]研究结论相似,区域间绿色创新效率梯度差会伴随交通、网络通信等基础设施的不断完善逐渐缩小,地区间基础要素流动性与便利性增强,有利于形成跨区域的合作交流平台,进一步加快高效率区域绿色创新的正向溢出,从而推动临近地区绿色创新效率提升。

5 结论与讨论

本文采用考虑非期望产出的 SBM 模型测算 2010~2019 年中国大陆 30 省市、自治区高技术产业绿色创新效率,借助社会网络分析与空间计量模型分别讨论高技术产业绿色创新效率空间关联网形态及影响因素。得出如下结论:

(1) 高技术产业绿色创新关联网络密度明显提升,但结构演化主要集中于较低层级网络,整体仍处于初级阶段。绿色创新关联网络主要分布于东部及东南沿海地区,京津冀与长三角地区成为高层级网络汇聚的核心区域。而西部、西南及西北部地区由于缺乏核心节点支撑,产业发展内生动力不足导致网络层级较低且分布稀疏。因此,京津冀、长三角等核心区域要充分发挥辐射带动作用,依托长江黄金水道、318 沪昆高速等主轴线加快实现高技术产业的正向空间溢出,推动绿色创新关联网络向中、西部地区延伸,引导云南、四川等网络边缘省市向核心区域转移。积极承接核心区省市产业分工与知识转移,打造区域性产业发展战略支撑点,初步构建稳定、高效的网络连接。

(2) 不同阈值下的高技术产业绿色创新关联网络度数中心度与中间中心度均显著提高,但空间非均衡性特征依然显著且在第四层级网络阈值下尤为突出。此外,不同阈值下区域网络演化存在异质性特征,受自身产业结构、经济规模等落差影响导致在接受来自高值区省市空间溢出过程中表现出抵制或低效性。因此,山东、江西、贵州等毗邻高值节点的省份应当做好顶层设计,合理规划高技术产业布局,推动产学研协同发展,提升产业区域一体化水平,打造具有吸引力的高技术产业园区,加强与高值区省市项目合作与技术交流。

(3) 政府性科技金融、产业集聚、信息化水平有利于高技术产业绿色创新效率提升,而对外开放水平对绿色创新效率提升具有抑制作用,环境规制的影响不显著。对此,各地区应在准确把握政府对市场干预程度的基础上,提升政府性科技金融对高技术产业扶持力度,为企业创新提供良好平台,降低企业在创新过程中的风险压力;根据自身实际情况选择适当的环境规制工具与规制强度,另外,积极引进国外先进技术与高素质人才,通过“引进-消化吸收-再创新”模式快速提升自主创新能力,逐步摆脱对外来投资依赖性。加强信息化建设,鼓励高技术产业向规模化、集聚化发展,提升产业集聚高级化、专业化水平以抵消创新过程中的负环境外部性,促进高技术产业绿色、可持续发展。

相比于现有研究,本文创新点在于:(1) 将创新过程中的能源投入按高技术产业产出比重进行折算,并且将专利未授权量纳入到指标体系中,有效降低测算误差;(2) 建立了绿色创新效率空间关联分析范式,综合绿色创新-社会网络-空间表达三个方

面,从多个阈值下考察了中国大陆 30 个省、市(自治区)高技术产业绿色创新效率的网络结构复杂性,弥补现有研究仅关注于地理空间研究的不足。但是,由于绿色创新效率测度涉及的指标及测算方法较多,测算的精度需要进一步提升;再者,绿色创新系统是一个多主体构成的复杂网络,主体之间的影响机理仍需做深入探讨。

参考文献:

- [1] FUSSLER C, JAMES P. Driving Eco-Innovation: A Break Through Discipline for Innovation and sustainability [M]. Pitman Publishing London, 1996.
- [2] 肖仁桥,王宗军,钱 丽. 环境约束下中国省际工业企业技术创新效率研究[J]. 管理评论, 2014, 26(6): 56-66.
XIAO E Q, WANG Z J, QIAN L. Research on the industrial enterprise's innovation efficiency in China considering environmental factor [J]. Management Review, 2014, 26(6): 56-66.
- [3] 罗良文,梁圣蓉. 中国区域工业企业绿色技术创新效率及因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(9): 149-157.
LUO L W, LIANG S R. Green technology innovation efficiency and factor decomposition of China's industrial enterprises [J]. China Population Resources and Environment, 2016, 26(9): 149-157.
- [4] 钱 丽,王文平,肖仁桥. 共享投入关联视角下中国区域工业企业绿色创新效率差异研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(5): 27-39.
QIAN L, WANG W P, XIAO R Q. Research on the regional disparities of China's industrial enterprises green innovation efficiency from the perspective of shared inputs [J]. China Population Resources and Environment, 2018, 28(5): 27-39.
- [5] 刘树林,姜新蓬,余 谦. 中国高技术产业技术创新三阶段特征及其演变[J]. 数量经济技术经济研究, 2015, 32(7): 104-116.
LIU S L, JIANG X P, YU Q. Evolving law of technology innovation in high-tech industry of China [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2015, 32(7): 104-116.
- [6] 王 伟,邓伟平. 高技术产业三阶段创新效率及其影响因素分析——基于 EBM 模型和 Tobit 模型[J]. 软科学, 2017, 31(11): 16-20.
WANG W, DENG W P. Three-stage innovation efficiency of high-tech industry and its influencing factors: Based on EBM model and Tobit model [J]. Soft Science, 2017, 31(11): 16-20.
- [7] TURKENBURG W C. The Innovation Chain: Policies to Promote Energy Innovation, Energy for Sustainable Development [M]. New York: The UN Publication, 2002.
- [8] 吴美琴,肖 慧,樊晓宏,等. 区域绿色创新三阶段效率研究——基于 NSBM 模型的分析[J]. 山西大学学报(哲学社会科学版), 2016, 39(6): 79-86.
WU M Q, XIAO H, FAN X H, et al. Research on three-stage ef-

- iciency of regional green innovation: An analysis based on NSBM [J]. Journal of Shanxi University (Philosophy and Social Science Edition), 2016, 39(6): 79-86.
- [9] 赵玉林, 胡 燕. 高技术产业创新绩效的累积效应——基于阶段性和滞后期的实证分析[J]. 中国科技论坛, 2018(10): 101-110.
- ZHAO Y L, HU Y. The cumulative effect of high technology industry's innovation performance in China: An empirical analysis based on phases and lags [J]. Forum on Science and Technology in China, 2018(10): 101-110.
- [10] 刘心怡. 粤港澳大湾区城市创新网络结构与分工研究[J]. 地理科学, 2020, 40(6): 874-881.
- LIU X Y. Structure and division of urban innovation network in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay Area [J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(6): 874-881.
- [11] 张仁杰, 董会忠. 基于省级尺度的中国工业生态效率的时空演变及影响因素[J]. 经济地理, 2020, 40(7): 124-132, 173.
- ZHANG R J, DONG H Z. Spatial and temporal evolution and influencing factors of China's industrial eco-efficiency based on provincial scale [J]. Economic Geography, 2020, 40(7): 124-132, 173.
- [12] 易 明, 彭甲超, 吴 超. 基于 SFA 方法的中国高新技术产业创新效率研究[J]. 科研管理, 2019, 40(11): 22-31.
- YI M, PENG J C, WU C. Innovation efficiency of high-tech industries based on stochastic frontier method in China [J]. Science Research Management, 2019, 40(11): 22-31.
- [13] 王卉彤, 刘传明, 赵国钦. 多层次资本市场支持高技术产业化的效率测度——基于 SE-U-SBM 模型[J]. 宏观经济研究, 2019(10): 49-61.
- WANG H T, LIU C M, ZHAO G Q. Efficiency measurement of multi-level capital market supports the high-tech industrialization: Based on SE-U-SBM model [J]. Scientific Management Research, 2019(10): 49-61.
- [14] 肖黎明, 高军峰, 韩 彬. 中国省际绿色创新效率的空间溢出效应——同质性和异质性检验[J]. 工业技术经济, 2018, 37(4): 30-38.
- XIAO L M, GAO J F, HAN B. Spatial spillover effects of provincial green innovation efficiency in China: Homogeneity and heterogeneity test [J]. Industrial Technology & Economy, 2018, 37(4): 30-38.
- [15] 李 健, 马晓芳. 京津冀城市绿色创新效率时空差异及影响因素分析[J]. 系统工程, 2019, 37(5): 51-61.
- LI J, MA X F. Comparative analysis of the time-space differences and influencing factors of cities' green innovation efficiency in beijing-tianjin-hebei [J]. Systems Engineering, 2019, 37(5): 51-61.
- [16] 李金滢, 李 超, 李泽宇. 城市绿色创新效率评价及其影响因素分析[J]. 统计与决策, 2017(20): 116-120.
- LI J Y, LI C, LI Z Y. Evaluation of urban green innovation efficiency and analysis of its influencing factors [J]. Statistics and Decision, 2017(20): 116-120.
- [17] 吴传清, 申雨琦. 中国装备制造业集聚对绿色创新效率的影响效应研究[J]. 科技进步与对策, 2019, 36(5): 54-63.
- WU C Q, SHEN Y Q. Effect of equipment manufacturing industrial concentration on green innovation efficiency in China [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2019, 36(5): 54-63.
- [18] 吴 超, 杨树旺, 唐鹏程, 等. 中国重污染行业绿色创新效率提升模式构建[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(5): 40-48.
- WU C, YANG S W, TANG P C, et al. Construction of the efficiency promotion model of green innovation in China's heavy polluted industries [J]. China Population Resources and Environment, 2018, 28(5): 40-48.
- [19] 杨朝均, 刘 冰, 毕克新. FDI 技术溢出对工业企业绿色创新路径演化的影响研究——基于演化博弈模型[J]. 管理评论, 2020, 32(12): 146-155.
- YANG C J, LIU B, BI K X. The impact of FDI spillover on the evolution of green innovation path in industrial enterprises: Based on evolutionary game model [J]. Management Review, 2020, 32(12): 146-155.
- [20] 曲薪池, 侯贵生, 孙向彦. 政府规制下企业绿色创新生态系统的演化博弈分析——基于初始意愿差异化视角[J]. 系统工程, 2019, 37(6): 1-12.
- QU X C, HOU G S, SUN X Y. Evolutionary game analysis of green innovation ecosystem of enterprises under government regulation: Analysis from the perspective of initial willingness differentiation [J]. Systems Engineering, 2019, 37(6): 1-12.
- [21] 徐 皓, 赵 磊, 朱亮亮. 基于创新价值链视角的我国高技术产业创新效率外溢效应研究[J]. 上海大学学报(社会科学版), 2019, 36(5): 67-77.
- XU H, ZHAO L, ZHU L L. Spillover effect of innovation efficiency of China's high-tech industry in the perspective of innovation value Chain [J]. Journal of Shanghai University (Social Science Edition), 2019, 36(5): 67-77.
- [22] FANG Z, RAZZAQ A, MOHSIN M, et al. Spatial spillovers and threshold effects of internet development and entrepreneurship on green innovation efficiency in China [J]. Technology in Society, 2022, 68: 101844.
- [23] LIU P, ZHANG L, TARBERT H, et al. Analysis on spatio-temporal characteristics and influencing factors of industrial green innovation efficiency: From the perspective of innovation value chain [J]. Sustainability, 2021, 14(1): 342.
- [24] JUNGUN K, SOOYOUNG K, HYUNSEOK P. Factors affecting product innovation performance according to dynamics of environment: Evidence from Korean high-tech enterprises in Manufacturing Sector [J]. Int. J. of Technology Management, 2015, Vol. 67 (2/3/4), pp. 269-288.
- [25] ZENG W, LI L, HUANG Y. Industrial collaborative agglomeration, marketization, and green innovation: Evidence from China's provincial panel data [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123598.
- [26] 刘树林, 韩 渭, 韩书成. 我国高技术产业创新效率的制度贡献及其异质性[J]. 科技进步与对策, 2018, 35(17): 75-82.

- LIU S L, HAN W, HAN S C. Institutional contribution and heterogeneity of innovation efficiency of high-tech industry in China [J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2018, 35(17): 75-82.
- [27] 韩先锋, 宋文飞, 李勃昕. 互联网能成为中国区域创新效率提升的新动能吗 [J]. *中国工业经济*, 2019(7): 119-136.
- HAN X F, SONG W F, LI B X. Can the internet become a new momentum to improve the efficiency of regional innovation in China [J]. *China Industrial Economics*, 2019(7): 119-136.
- [28] 魏新颖, 王宏伟, 徐海龙. 高技术产业技术创新的空间关联与溢出效应 [J]. *经济问题探索*, 2019(10): 155-164.
- WEI X Y, WANG H W, XU H L. Spatial relevance and spillover effect of technological innovation of regional high-tech industry [J]. *Inquiry Into Economic Issues*, 2019(10): 155-164.
- [29] 胡 艳, 汪 徐. 长江经济带产业结构优化对区域创新绩效的影响差异分析 [J]. *科技管理研究*, 2019, 39(14): 86-93.
- HU Y, WANG X. Analysis of differences in the impact of industrial structure optimization on regional innovation performance in the yangtze river economic belt [J]. *Science and Technology Management Research*, 2019, 39(14): 86-93.
- [30] 王晓辰, 韩增林, 彭 飞, 等. 中国海洋科技创新效率发展格局演变与类型划分 [J]. *地理科学*, 2020, 40(6): 890-899.
- WANG X C, HAN Z L, PENG F, et al. Development pattern and typical zone of marine scientific and technological innovation efficiency in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(6): 890-899.
- [31] 程 遥, 王 理. 流动空间语境下的中心地理论再思考——以山东省域城市网络为例 [J]. *经济地理*, 2017, 37(12): 25-33.
- CHENG Y, WANG L. Reinterpretation of the theory of central place in a context of space of flow: A study on provincial city network in shandong province [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(12): 25-33.
- [32] 王 赫, 吴朝阳. 经济差距对创新溢出与技术交流的影响——基于经济距离矩阵的空间计量研究 [J]. *经济问题*, 2020(9): 78-84.
- WANG H, WU C Y. How economic gap affect innovation spillover and technology communication: A spatial econometrics research based on economic distance matrix [J]. *On Economic Problems*, 2020(9): 78-84.
- [33] 张建伟, 梁常安, 胡正玉, 等. 黄河流域城市际技术转移网络的时空特征 [J]. *经济地理*, 2020, 40(5): 58-69.
- ZHANG J W, LIANG C A, HU Z Y, et al. Spatiotemporal characteristics of intercity technology transfer network in the yellow river basin [J]. *Economic Geography*, 2020, 40(5): 58-69.
- [34] 张 曦, 郭淑芬. 中国工业技术创新效率空间关联及其影响因素 [J]. *科学学研究*, 2020, 38(3): 525-535.
- ZHANG X, GUO S F. The spatial correlation of the industrial technology innovation efficiency and its determinants in China [J]. *Studies in Science of Science*, 2020, 38(3): 525-535.
- [35] 王文婷, 营利荣, 王迪飞, 等. 国家高新区自主创新效率空间关联网络的实证研究 [J]. *技术经济*, 2020, 39(1): 61-73.
- WANG W T, YING L R, WANG D F, et al. Empirical study on the spatial correlation network of independent innovation efficiency in national high-tech zones [J]. *Technology Economics*, 2020, 39(1): 61-73.
- [36] 张景帅, 唐根年. 基于社会网络分析的浙江省县域创新网络特征研究 [J]. *科技管理研究*, 2020, 40(2): 123-129.
- ZHANG J S, TANG G N. Research on the characteristics of county innovation network in zhejiang province based on social network analysis [J]. *Science and Technology Management Research*, 2020, 40(2): 123-129.
- [37] 崔 蓉, 费锦华, 孙亚男. 中国省际绿色创新生产率的变动及其空间溢出效应研究 [J]. *宏观经济研究*, 2019(6): 132-145.
- CUN R, FEI J H, SUN Y N. Research on the change of green innovation productivity and its spatial spillover effect among provinces in China [J]. *Scientific Management Research*, 2019(6): 132-145.
- [38] 杨树旺, 吴 婷, 李梓博. 长江经济带绿色创新效率的时空分异及影响因素研究 [J]. *宏观经济研究*, 2018(6): 107-117, 132.
- YANG S W, WU T LI Z B. Study on temporal and spatial differentiation and influencing factors of green innovation efficiency in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Scientific Management Research*, 2018(6): 107-117, 132.
- [39] 类 骁, 韩伯棠. 环境规制、产业集聚与贸易绿色技术溢出门槛效应研究 [J]. *科技管理研究*, 2019, 39(17): 220-225.
- LEI X, HAN B T. Research on environmental regulation, industrial agglomeration and trade Ggreen technology spillover threshold effect [J]. *Science and Technology Management Research*, 2019, 39(17): 220-225.
- [40] 黄 磊, 吴传清. 长江经济带城市绿色技术创新效率及其动力机制研究 [J]. *重庆大学学报(社会科学版)*, 2021, 27(1): 50-64.
- HUANG L, WU C Q. Research on the cities' green technology innovation efficiency and its dynamic mechanism in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Journal of Chongqing University (Social Science Edition)*, 2021, 27(1): 50-64.

Spatial Correlation Structure and Influencing Mechanism of Green Innovation Efficiency of China's High-tech Industries

YAO Meng-chao¹, DUAN Jin-jun¹, ZHANG Ren-jie², XUAN Ze-yuan¹

(1. Dong Business School, Soochow University, Suzhou 215021, China; 2. China Aerospace of Systems Science and Engineering, Beijing 100037, China)

Abstract: In this paper, the SBM model considering undesirable output is used to calculate the green innovation efficiency of high-tech industries in 30 provinces and autonomous regions (except Tibet) in China's mainland. Social network analysis and a spatial econometric model discuss the spatial correlation structure and influencing factors. The results show that: (1) The density of green innovation-related networks in the high-tech industry is significantly improved, but the evolution type is mainly low-level network, and the overall network structure is still in the initial stage. (2) Under different thresholds, the centrality of the green innovation correlation network of high-tech industries is significantly improved, but the spatial disequilibrium characteristics still exist and are more prominent under the fourth-level network threshold. (3) Governmental science and technology finance and informatization have a significant role in promoting green innovation efficiency. Industrial accumulation will lead to negative spatial spillover in promoting green innovation efficiency. The impact of environmental regulation is not apparent, and the level of opening up hinders the improvement of green innovation efficiency. We should continue to stabilize the leading position of Beijing-Tianjin-Hebei and Yangtze River Delta in green innovation of high-tech industries, improve regional integration, increase government investment in science and technology finance, improve the level of informatization, and promote the positive spatial spillover of green innovation.

Key words: high-tech industry; green innovation efficiency; spatial distribution; association structure; social network analysis; spatial dubin mode