陈慧灵,唐元华,翟晓秀,等.绿色技术创新对城市工业碳生产率的影响——基于空间溢出效应视角 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):7059-7069.
Chen H L, Tang Y H, Zhai X X, et al. The impact of green technology innovation on urban industrial carbon productivity——From the perspective of spatial spillover effect [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):7059-7069.

绿色技术创新对城市工业碳生产率的影响
——基于空间溢出效应视角

陈慧灵[1,2],唐元华[1],翟晓秀[1],王振波[2*] (1.湖南工商大学公共管理与人文地理学院,湖南 长沙 410205；2.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘要：基于 2011~2021 年中国 288 个地级市的面板数据,以绿色发明专利和绿色实用新型专利授权量衡量绿色技术创新水平,构建非期望产出超效率 SBM 模型测算城市工业碳生产率,并利用系统广义矩估计方法、空间杜宾模型探讨绿色技术创新对城市工业碳生产率影响及空间溢出效应.研究表明:①我国各城市间绿色技术创新水平与工业碳生产率存在显著的空间相关性,高-高类的城市分布集中且范围不断扩大.②绿色技术创新对城市工业碳生产率具有明显的正向促进作用,这种促进在西部地区、资源型城市和低经济水平城市中表现更为突出,绿色技术创新在这些区域能更有效提升城市工业碳生产率.③在不同空间矩阵下,绿色技术创新对城市工业碳生产率影响的直接效应均显著,说明绿色技术创新能够显著提升本地城市工业碳生产率;绿色技术创新传播这类依赖面对面交流的知识溢出现象,间接效应仅在反距离平方矩阵和经济距离嵌套矩阵下显著,一定程度上通过虹吸效应抑制周边城市工业碳生产率的提升;地理经济距离嵌套是作用于绿色技术创新对城市工业碳生产率影响溢出的最主要因素.据此,应破除城市“各自为政”的治理方式,构建城际绿色协同治理体系,最大程度确保研发投入资金流向最合理的地方,突破地理边界以形成工业碳减排合力.

关键词：超效率 SBM 模型；绿色技术创新；城市工业碳生产率；空间溢出效应
中图分类号：X322;F424;F124.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-7059-11

The impact of green technology innovation on urban industrial carbon productivity——From the perspective of spatial spillover effect.

CHEN Hui-ling[1,2], TANG Yuan-hua[1], ZHAI Xiao-xiu[1], WANG Zhen-bo[2*] (1.School of Public Administration and Human Geography, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China；2.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China). *China Environmental Science*, 2025,45(12)：7059~7069

Abstract：High-quality economic development resides in technological innovation and industrial carbon productivity. Based on the panel data of 288 prefecture-level cities in China from 2011~2021, this paper measured the level of green technology innovation by the number of granted green invention and utility model patents. It then applied an unexpected output super-efficiency SBM model to calculate urban industrial carbon productivity. The system Generalized Method of Moments and the spatial Durbin model were adopted to explore the impact of green technology innovation on urban industrial carbon productivity and spatial spillover effects. Research indicated that: ① There was a significant spatial correlation between the level of green technology innovation and industrial carbon productivity among cities in China, with high to high class cities concentrated and expanding in scope. ② Green technology innovation boosted urban industrial carbon productivity, to a great extent. Such effect was particularly pronounced in western regions, resource-based cities, and lower-income cities. In these cities, green technology innovation helped enhance productivity more effectively. ③ Under different spatial matrices, the direct effects of green technology innovation on urban industrial carbon productivity were significant, which suggested that such innovation clearly improves local urban industrial carbon productivity. What should be noticed is that, the indirect effect of knowledge spillover phenomenon such as green technology innovation dissemination that relies on face-to-face interaction was only significant under the inverse distance square matrix and economic distance nesting matrix. To some extent, these spillovers were weakened by a siphon effect, which inhibited the productivity gains of surrounding cities. Among the factors considered, geographical and economic distance nesting exerted the strongest influence on how green technology innovation affects industrial carbon productivity. Building upon these insights, the country should break away from the governance mode of “self-reliance” in cities, and build an intercity green collaborative governance system. These measures help ensure that R&D investment is channeled to the most efficient locations, breaking through geographical boundaries to form a regional industrial carbon reduction synergy.

Key words：super-efficiency SBM model；green technology innovation；urban industrial carbon productivity；spatial spillover effect

收稿日期：2025-05-06
基金项目：国家自然科学基金项目(42101208);湖南省教育厅优秀青年项目(22B0662);湖南工商大学“数智+”学科交叉研究项目(2023SZJ21)
* 责任作者, 副教授, wangzb@igsnrr.ac.cn

随着气候变化的日益严重,减污降碳已成为全球各国共同关注的重要任务.我国正承载着减轻碳足迹、积极应对气候变化的历史使命,郑重承诺2030年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和[1-2].在此背景下,工业产业部门成为实现“双碳”目标的关键领域,其碳排放量约占总量的 70%,也是推动工业绿色低碳转型的关键.绿色技术创新是将创新驱动与绿色低碳发展相结合的关键结合点,旨在保护环境、协调资源利用和推动经济的可持续性,已成为突破资源环境限制、促进可持续发展的有效途径[3-4].在工业产业领域,绿色技术创新通过优化生产流程、提高能效、减少废弃物和污染物排放等手段,直接推动碳减排;同时还能够通过产业结构调整和区域间的协同效应,实现更广泛和深入的碳减排[5-8].理解绿色技术创新如何发挥作用,对于实现结构性和跨区域的碳减排目标至关重要.

碳生产率的概念最早由 kaya 等[9]提出,反映单位碳排放的 GDP 产出水平,是评估一个国家或地区低碳经济发展状况的核心指标.生产要素的投入和效率导向的技术创新,会通过增加经济产出影响碳生产率;同样,能源结构优化、产业转型和绿色消费拉动等因素通过减少碳排放最终提高碳生产率.2023 年工业碳排放量占我国碳排放总额的 38.18%,为了更好地体现工业经济贡献及低碳发展成效,学者们提出“工业碳生产率”概念,工业碳生产率的提高代表工业经济效益与环境效益的协同提升.已有研究中工业碳生产率的测度基于单要素或全要素框架,其中单要素框架的测算只考虑工业发展的局部特征,不能反映工业生产、资本和技术等多要素的高效配置,而基于全要素框架的工业碳生产率测算能全方位、多角度揭示工业资源集约利用程度及经济环境协同发展水平[10-12].学者们利用 LMDI 分解模型和 IPAT 模型等方法从产业集聚、能源结构、技术研发等方面深入探讨工业碳生产率的影响因素,如产业集聚能通过促进技术进步和优化劳动力配置提升工业碳生产率[13-14];产业生命周期的影响也使工业智能化对碳生产率的作用也表现出“先增后减”的非线性趋势[15-17];绿色技术创新通过产业关联、绿色技术溢出效应、区域合作等推进城市工业碳生产率的提升等[18-19].

绿色技术创新作为具有环境偏向性的技术进步,能够显著降低碳排放,是提升能源效率及实现“双碳”目标的重要途径[20].一方面,面向碳排放的绿色技术覆盖了源头预防、过程控制、存量处理和配套支持的全过程,能够提高能源利用效率,从而促进城市工业碳生产率的提升[21-23];另一方面,追求效率和推动经济发展的过程中,也会带来能源消耗和碳排放量的增加[24].当绿色技术创新水平较低时,相关基础设施和研发资源的投入,会造成碳排放量的增加;而当绿色技术创新水平达到一定程度时,这种促进关系会转变为抑制关系[25-27].考虑到我国各区域间发展不平衡且经济特征存在差异,将可能导致绿色技术创新效应呈现非对称性[28-29].与实物资本受限于特定地理位置不同,绿色技术创新能够借助国内外投资、研发合作以及产学研联动等多种方式实现知识与技术溢出,展现出显著的空间关联性.绿色技术创新的空间溢出效应既可能为正向,也可能为负向[30-32].正向的空间溢出效应主要是示范效应,高收入城市自主研发类的技术创新更多,而中低收入城市主要依靠吸收与模仿高新技术,从而提升周边城市的绿色技术创新水平以及城市工业碳生产率.同时创新要素存在趋利特征且具有虹吸效应,从而抑制周边城市的绿色技术创新加剧以及阻碍其城市工业碳生产率的提升,即负向的空间溢出效应.

现有研究为制定差异化政策以推进“双碳”目标提供了坚实的理论基础和实证依据,也指出绿色技术创新的双重效应、区域发展不平衡等问题仍需进一步探索.多数研究致力于研究绿色技术创新对单一环境污染、经济增长变量或总碳生产率的影响,而具体到工业部门时,绿色技术创新主要通过何种路径影响工业碳生产率?能否实现经济与环境双重红利?这种影响是否存在空间溢出效应?等问题缺乏系统探讨.基于此,本文尝试利用更广泛的全要素工业碳生产率,引入 SBM-GML 方法测算城市工业碳生产率[33-35],探讨绿色技术创新对城市工业碳生产率的影响及空间溢出.

1 研究设计

1.1 模型设定

1.1.1 基准回归模型 为探讨绿色技术创新对工业碳生产率的影响,本文基于 2011~2021 年中国 288 个地级市的面板数据,构建普通固定效应模型分析

绿色技术创新与工业碳生产率间的关系及其异质性影响,模型构建如公式(1)所示.

$$\mathrm{cp}_{it}=\alpha_0+\alpha_1\mathrm{gti}_{it}+\alpha_2\sum X_{it}+\mu_i+\eta_t+\varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中:cp_{it} 表示城市工业碳生产率,gti_{it} 为核心解释变量绿色技术创新,其系数 α_1 为本文关注的重点,X_{it} 表示一系列控制变量,具体变量如表 1 所示,μ_i、η_t 和 ε_{it} 分别代表地区固定效应、时间固定效应与随机扰动项.

表 1　模型变量说明

Table 1　Model variable description

类型	变量	衡量方式
被解释变量	工业碳生产率 cp	超效率 SBM 测算
核心解释变量	绿色技术创新 gti	绿色发明专利+绿色实用新型专利授权数
控制变量	经济发展水平 ed	人均 GDP
	产业结构 is	第三产业增加值/第二产业增加值
	工业企业规模 ln firm	城市工业企业数取对数
	工业集聚水平 ln ae	工业密度[36]
	财政分权 fin	地方财政支出占 GDP 的比重
	科技水平 te	科学教育支出占财政支出的比重

1.1.2　空间杜宾模型　为进一步研究绿色技术创新对其他城市工业碳生产率是否存在空间溢出,构建空间杜宾模型进行分析,如公式(2)和公式(3)所示.

$$\mathrm{cp}_{it}=\alpha_0+\rho\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{w}_{ij}\mathrm{cp}_{it}+\alpha_1\mathrm{gti}_{it}+\theta\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{w}_{ij}\mathrm{gti}_{it}+\delta X_{it}+\gamma\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{w}_{ij}X_{it}+\mu_i+\eta_t+\varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{it}=\psi\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{w}_{ij}\varepsilon_{jt}+\upsilon_{it} \quad (3)$$

式中:cp_{it} 代表城市 i 第 t 年的工业碳生产率,ρ 为空间相关系数,$\boldsymbol{w}_{ij}$ 为空间权重矩阵,本文基于反距离矩阵、反距离平方矩阵、经济矩阵和经济距离嵌套矩阵四种类型进行回归.其中反距离矩阵($\boldsymbol{w}_1$)指的是城市 i 与城市 j 之间直线距离的倒数,说明两者之间距离越远其权重越小;反距离平方矩阵($\boldsymbol{w}_2$)采用城市 i 与城市 j 之间直线距离的倒数的平方衡量;经济权重($\boldsymbol{w}_3$)则是以经济变量差异来反映关系的远近,通常利用城市 i 与城市 j 之间人均 GDP 差值的绝对值的倒数进行计算;经济距离嵌套矩阵($\boldsymbol{w}_4$)则是综合考虑地理距离和经济距离,利用 $\boldsymbol{w}_{4ij}=\varphi\boldsymbol{w}_{1ij}+(1-\varphi)\boldsymbol{w}_{3ij}$ 进行计算,通常将 φ 简化为 0.5.

1.2　工业碳生产率的测度

基于全要素框架将工业投入和产出要素纳入分析体系,以考察在多要素高效配置条件下,工业领域是否能实现经济效益最大化与污染排放最小化的双赢效果.针对传统模型的局限性,创新性引入非期望产出的超效率 SBM 模型,系统评估城市工业碳生产率.具体的指标说明及数据处理情况详见表 2.

表 2　城市工业碳生产率指标构建

Table 2　The index system of urban industrial carbon productivity

指标	衡量方式
资本投入	工业固定资产投资额(固定资产投资总额-房地产投资额,利用固定资产投资价格指数进行平减,以 2011 年为基期)
劳动力投入	工业年末从业人数(第二产业从业人员-建筑业从业人员)
土地投入	工业用地面积
能源投入	工业用电量
水资源投入	工业用水总量(城市供水总量-居民用水总量)
期望产出	工业生产总值(不变价 GDP,以 2011 年为基期)
非期望产出	二氧化碳排放量(清单法[37])
	环境损害指数(利用熵值法对工业废水排放量、工业 SO_2 排放量和工业烟粉尘排放量三个指标进行综合测算得到)

1.3　数据来源

投入要素选取工业固定资产投资额、工业劳动力、工业用地面积、工业用电量和工业用水量,而产出要素则区分为期望产出(工业总产值)和非期望产出

(CO_2 排放量和环境损害指数). 基础数据主要来自2012−2022 年《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及部分省市统计年鉴;绿色技术创新核心指标原始数据来自中国国家知识产权局专利检索与分析系统(http://pss−system.cnipa.gov.cn/)并通过爬虫技术整理专利相关信息包括专利类型、申请公布日、授权公告日、地址、主分类号、分类号等,以世界知识产权组织(WIPO)提供的“国际专利分类绿色清单”为依据,基于每项专利对应的主分类号和分类号筛选绿色专利,专利地址信息一栏中包含邮政编码和详细地址,通过将两者结合起来进而识别专利所属地级市,如果出现部分专利信息存在缺失邮政编码、邮政编码与地址不一致以及地址中并未包含地级市信息等问题则采用人工识别,最后基于地级市按年份根据专利授权公告日进行分类汇总得288 个地级市绿色发明专利授权数量与绿色实用新型专利授权数量相关数据,进而将两者加总以衡量绿色技术创新水平.此外,部分缺失数据则采用插值法进行填补,以保持时序连续性.

2 结果分析

2.1 城市绿色技术创新水平与工业碳生产率特征分析

2.1.1 城市工业碳生产率分布特征 计算得出2011~2021 年全国各城市的工业碳生产率平均值为0.4987,其中高于平均值的城市主要分布在华南、西南以及西北地区,低于平均值的城市主要分布在东北和华北平原地区(图 1);且各区域城市工业碳生产率都存在高低交织特征,而非单一规律性的差异,这与区域内都存在经济发展水平和资源禀赋差异密切相关.东北地区是中国重要的重工业基地,随着经济的发展以及产业结构的转变,东北地区经济增量较少;而东南以及西南地区城市工业碳生产率提升,一方面可能是经济技术的发展,使得要素利用效率得以提升,另一方面可能是由于地理位置优越性,如西南地区资源丰富、产业基础好、政策扶持力度大,而东南地区对外开放程度与信息化水平较高,这些都有助于城市工业碳生产率的提升.

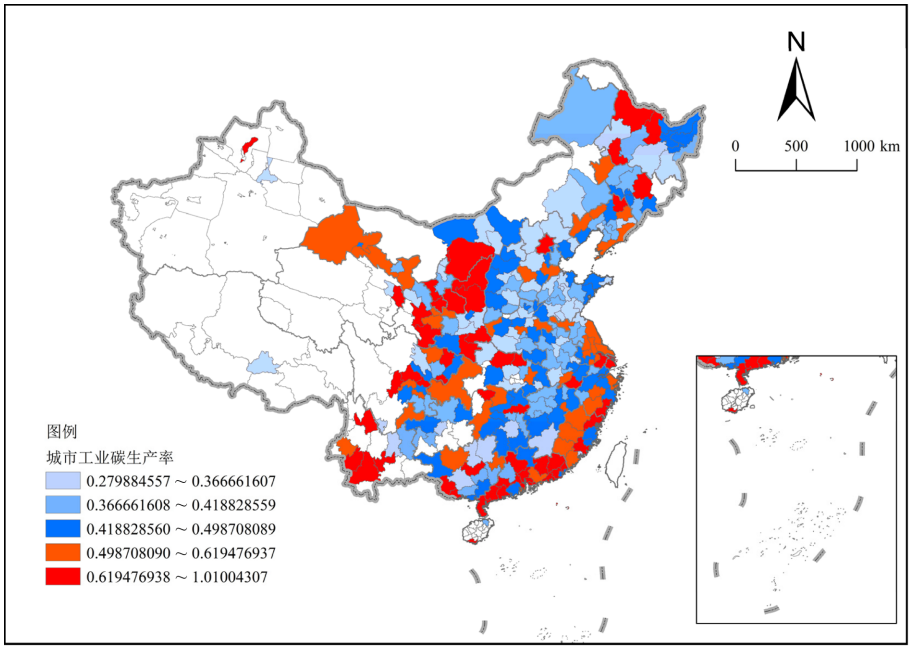


图 1 2011~2021 年中国 288 个地级市城市工业碳生产率的平均值示意

Fig.1 Schematic diagram of the average industrial carbon productivity of 288 prefecture−level cities in China from 2011 to 2021

审图号为 GS(2023)2767

2.1.2 城市绿色技术创新水平分布特征 由图 2 可知,绿色技术创新水平较高的城市主要分布在东部地区,尤其是在京津冀、长三角、珠三角、山东半岛城市群等,且由这些城市群向周边城市向外辐射,主要因为东部沿海城市的经济发展水平较高,在交通运输和要素集聚方面具有显著优势,投入的资金和人才相对较多,绿色专

利的申请和授权数量也较高,绿色技术创新发展快,尤其是在京津冀、珠三角和长三角城市群中,绿色技术创新水平一直处于领先地位.而中西部地区投入规模相对较小,人才资源设备有限,绿色技术创新受限.

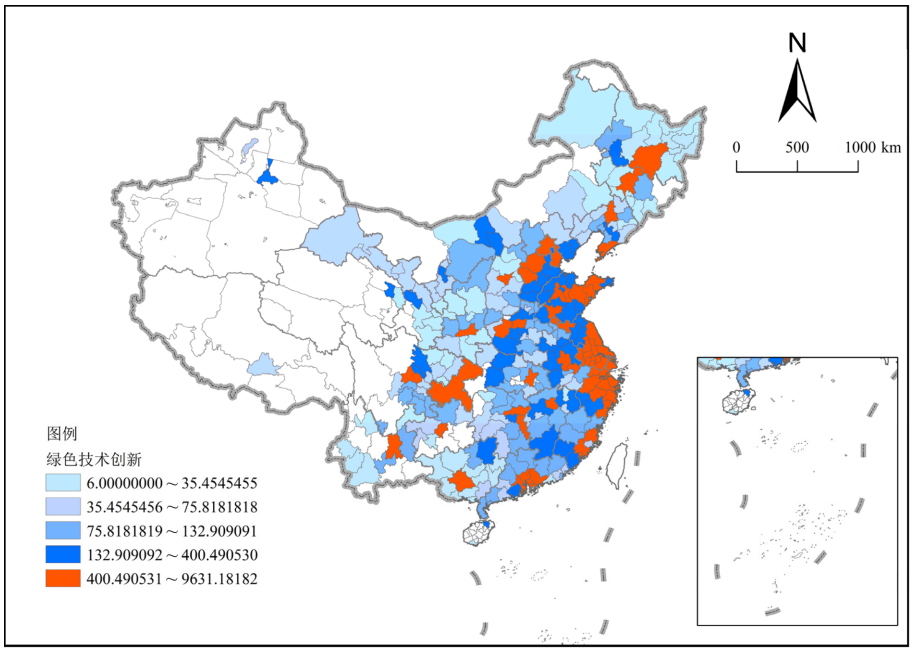


图 2　2011~2021 年中国 288 个地级市绿色技术创新水平的平均值示意

Fig.2　Schematic diagram of the average level of green technology innovation in 288 prefecture-level cities in China from 2011 to 2021

审图号:GS(2023)2767

2.1.3　城市绿色技术创新与工业碳生产率空间相关性　双变量空间自相关分析可揭示绿色技术创新和城市工业碳生产率之间的空间分布关联特征[29],本文选取 2011 年与 2021 年绿色技术创新、城市工业碳生产率数据,利用 GeoDa 与 Arcgis 软件进行双变量局部空间自相关分析(图 3).2011 年 H–H(高高)聚集区数量较少,只有 12 个地级市零散分布于中部和东部地区,而在 2021 年扩大到 40 个地级市,新增城市主要集中在沿海各省.2011 年 L–L(低低)聚集区主要分布在西部地区及东北地区,2021 年 L–L(低低)聚集区变化不大,主要体现在东北地区聚集增多,西部地区聚集减少.L–H(低高)以及 H–L(高低)聚集区空间分布变化较小,随着周边 H–H(高高)聚集区或 L–L(低低)聚集区城市数量的增加而减少,减少而增加.综上可知,随着经济水平的发展,绿色技术创新与城市工业碳生产率高值区域协同性和集中度不断提高.

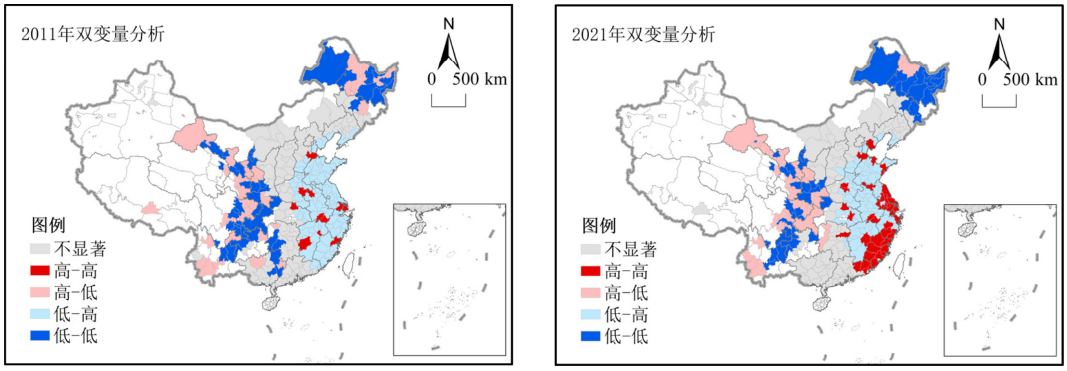


图 3　绿色技术创新与城市工业碳生产率双变量局部空间自相关分析

Fig.3　Bivariate local spatial autocorrelation analysis of green technology innovation and urban industrial carbon productivity

审图号:GS(2023)2767

2.2 绿色技术创新对工业碳生产率的影响

2.2.1 基准回归结果 根据表 3 中不同模型下绿色技术创新影响城市工业碳生产率的基准估计结果可知绿色技术创新的估计系数均显著为正,表明绿色技术创新对城市工业碳生产率的提升具有显著促进作用.控制变量结果表明,经济发展水平和工业集聚的提高将显著提升城市工业碳生产率,因为经济发展可以带来资金、吸引人才聚集,促进科技水平提升的同时带动工业技术效率提升,并且工业集聚所带来的规模效应,可能通过促进减碳技术的升级和创新,以及提高各生产阶段的能源使用效率,来推动工业减排.而工业企业规模的估计系数显著为负,表明企业规模扩大并不一定有利于碳生产率的提高.企业数量的增加可能会加剧企业间的竞争,导致资源供给紧张,并可能在某种程度上增加总的碳排放量.最后,采用系统 GMM 模型缓解内生性问题引入被解释变量的一阶滞后项,结果显示城市工业碳生产率的滞后一期系数为 0.617,且通过了 1%的显著性检验,说明城市工业碳生产率具有动态连续性,前一期工业碳生产率对当期工业碳生产率有明显影响.

表 3 绿色技术创新对城市工业碳生产率影响的回归结果

Table 3 Regression results of the impact of green technology innovation on industrial carbon productivity

变量	基准回归							系统 GMM
绿色技术创新	0.378***	0.330***	0.338***	0.342***	0.204***	0.204***	0.204***	0.158***
	(0.049)	(0.050)	(0.050)	(0.049)	(0.058)	(0.058)	(0.058)	(0.058)
经济发展水平		0.350***	0.275***	0.369***	0.379***	0.385***	0.386***	0.0199
		(0.063)	(0.064)	(0.064)	(0.064)	(0.065)	(0.065)	(0.068)
产业结构			−0.209***	−0.297***	−0.271***	−0.275***	−0.275***	−0.0492
			(0.037)	(0.038)	(0.038)	(0.039)	(0.039)	(0.043)
工业企业规模对数				−0.415***	−0.433***	−0.429***	−0.429***	−0.0439
				(0.049)	(0.049)	(0.050)	(0.050)	(0.036)
工业集聚水平对数					0.492***	0.491***	0.491***	0.165*
					(0.111)	(0.111)	(0.111)	(0.085)
财政分权						0.0419	0.0420	0.0957
						(0.064)	(0.064)	(0.116)
科技水平							−0.00403	−0.00810
							(0.053)	(0.057)
工业碳生产率滞后项								0.617***
								(0.034)
样本量	3168	3168	3168	3168	3168	3168	3168	2880
固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
AR^2	0.647	0.651	0.654	0.663	0.665	0.665	0.665	0.486
Hansen[p]								283.9[0.982]

注:*、**、***分别表示 10%、5%、1% 的显著性水平,括号内为稳健标准误差.

2.2.2 异质性分析

(1)区域异质性

为进一步探究绿色技术创新对城市工业碳生产率的影响,将研究区域 288 个城市划分为东部、中部及西部城市.根据表 4 可知绿色技术创新对西部地区城市工业碳生产率存在明显的促进作用,而东部以及中部地区并不显著.这可能是由于虽然东部经济水平较好,信息化程度较高,绿色技术创新程度较高,工业技术进步与工业技术效率都得到有效提升,但相互间发展协调可能有所欠缺,在某种程度上并未促进工业碳生产率的提升,而中部地区处于发展瓶颈期使得绿色技术创新对城市工业碳生产率的影响不显著.针对西部地区,绿色技术创新水平相对较低,但可能正因为此,该地区绿色技术创新对城市工业碳生产率的促进作用更明显.

表 4 绿色技术创新对城市工业碳生产率影响的区域异质性

Table 4 The regional heterogeneity of the impact of green technology innovation on industrial carbon productivity

变量	总体	东部	中部	西部
绿色技术创新	0.204***	0.108	0.0947	0.396*
	(0.058)	(0.073)	(0.141)	(0.207)
经济发展水平	0.386***	0.0544	0.794***	0.406**

续表 4

变量	总体	东部	中部	西部
	(0.065)	(0.087)	(0.155)	(0.170)
产业结构	−0.275***	−0.261***	0.0154	−0.146**
	(0.039)	(0.092)	(0.054)	(0.061)
工业企业规模	−0.429***	−0.314***	0.136*	−0.305***
	(0.050)	(0.092)	(0.074)	(0.092)
工业集聚水平	0.491***	−0.0433	3.530***	6.791***
	(0.111)	(0.134)	(0.309)	(0.903)
财政分权	0.0420	−1.152***	0.779***	−0.0246
	(0.064)	(0.333)	(0.168)	(0.068)
科技水平	−0.00403	−0.514***	−0.113	0.0602
	(0.053)	(0.165)	(0.101)	(0.068)
固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	3168	1100	1100	968
R^2	0.665	0.679	0.657	0.744

注:*、**、***分别表示 10%、5%、1% 的显著性水平,括号内为稳健标准误差.

表 5　绿色技术创新对城市工业碳生产率影响的经济水平与资源禀赋异质性

Table 5　The economic level and resource endowment heterogeneity of the impact of green technology innovation on industrial carbon productivity

变量	非资源型城市	资源型城市	低经济水平	高经济水平
绿色技术创新	0.270***	1.017**	0.680*	0.277***
	(0.062)	(0.455)	(0.382)	(0.072)
经济发展水平	0.144*	0.712***	0.319	0.295***
	(0.077)	(0.139)	(0.236)	(0.083)
产业结构	−0.353***	−0.141**	−0.132***	−0.591***
	(0.051)	(0.060)	(0.044)	(0.111)
工业企业规模	−0.434***	−0.484***	−0.439***	−0.130
	(0.070)	(0.069)	(0.060)	(0.129)
工业集聚水平	0.188	3.011***	3.687***	0.0947
	(0.120)	(0.390)	(0.373)	(0.135)
财政分权	0.136*	−0.101	0.0792	−1.763***
	(0.072)	(0.149)	(0.087)	(0.493)
科技水平	−0.0648	0.123	0.0417	−0.347*
	(0.065)	(0.093)	(0.056)	(0.209)
固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes
N	1903	1265	2175	993
R^2	0.683	0.652	0.694	0.685

注:*、**、***分别表示 10%、5%、1% 的显著性水平,括号内为稳健标准误差.

(2)经济水平与资源禀赋异质性

经济水平以中位数作为划分标准,高于中位数水平划分为高经济水平城市,低于中位数水平则划分为低经济水平城市.资源禀赋则根据 2013 年国务院发布的《国家资源型城市可持续发展规划(2013−2020)》,将其划分为资源型城市与非资源型城市,其规划范围包括 126 个地级行政区,资源型行政区的比例达到 37.8%,而在本文使用的数据集中,这个比例为 39.9%,其结构与现实情况相似.结合表 5 可知绿色技术创新显著促进了非资源型城市和资源型城市工业碳生产率,但对非资源型城市影响较小.与一般城市相比,资源型城市主要以第二产业为主,容易受到环境调控成本的影响,绿色技术创新加快了企业对落后产能的升级和淘汰,减少资源依赖性,推动城市产业结构的优化调整进而促进城市工业碳生产率的提升.相对于资源型城市,非资源型城市的生态问题发生的频率较低,所适应的污染密集型企业较少.同时可知,绿色技术创新对低经济水平城市的工业碳生产率的促进作用更大,由于经济水平相对较低,绿色技术创新的驱动作用更强,工业碳生产率提升更快.

2.3　绿色技术创新对工业碳生产率影响的溢出

2.3.1　检验分析　在空间计量回归前,需检验绿色技术创新和城市工业碳生产率是否具有空间自相关性.地理距离空间权重矩阵检验结果显示,2011~2021 年绿色技术创新、城市工业碳生产率 Moran's I 指数均在 1%水平显著为正,表明绿色技术创新、城市工业碳生产率空间自相关特征显著(表 6).

表 6　2011~2021 年城市工业碳生产率与绿色技术创新全局 Moran's I

Table 6　Global Moran's I of urban industrial carbon productivity and green technology innovation from 2011 to 2021

年份	城市工业碳生产率		绿色技术创新	
	Moran's I	Z 值	Moran's I	Z 值
2011	0.094***	12.428	0.048***	6.689
2012	0.114***	14.965	0.053***	7.181
2013	0.117***	15.397	0.052***	7.181
2014	0.131***	17.218	0.038***	5.750
2015	0.129***	16.890	0.044***	6.419
2016	0.158***	20.604	0.047***	6.666
2017	0.153***	19.953	0.051***	7.013
2018	0.143***	18.657	0.066***	8.706
2019	0.165***	21.529	0.066***	8.646
2020	0.139***	18.123	0.079***	10.069
2021	0.127***	16.578	0.069***	8.987

注:*、**、***分别表示10%、5%、1%的显著性水平.

在讨论绿色技术创新对城市工业碳生产率的空间溢出效应之前,需要通过多项检验选出合适的空间面板模型,LM 检验中只有一项不显著,因此有必要考虑空间模型,同时 LR 检验两项指标均通过了

1%的显著性检验(表 7),综合考量最终选择空间杜宾模型进行分析.

表 7 空间面板形式检验结果

Table 7 Spatial panel form test results

变量	统计数值	*P* 值
LM-lag	2.863	0.091
Robust LM-lag	0.584	0.445
LM-error	6.504	0.011
Robust LM-error	4.225	0.040
LR-SDM-SAR	34.05	0.000
LR-SDM-SEM	33.59	0.000

2.3.2 空间溢出效应 本文在不同权重矩阵下选取空间杜宾模型的地区固定、时间固定和双固定效应分别进行回归分析,并且分析这三种情况下的最优结果,以探究绿色技术创新对城市工业碳生产率空间溢出效应.基于四种空间矩阵的参数估计结果(表 8),绿色技术创新对城市工业碳生产率的直接影响系数显著为正,说明绿色技术创新对本地的工业碳生产率具有促进作用,而绿色技术创新对城市工业碳生产率的空间滞后项的系数只在反距离平方矩阵和经济距离嵌套矩阵下显著为负,说明各城市绿色创新对邻地城市和周边经济相似城市工业碳生产率的影响为负向,这表明尽管本地工业碳生产率有所提升,但周边地区或周边经济相似地区却可能呈现下降态势,即产生“虹吸效应”,因此城市工业碳排放治理的过程中不能够只考虑单一城市,应将邻地城市与周边经济相似城市加入系统考虑,避免出现提升了本地城市工业碳生产率却降低了其他城市工业碳生产率的情况,因此研究城市工业碳生产率中加入空间要素是很有必要的.

表 8 空间杜宾模型回归结果

Table 8 Spatial Dubin model regression results

变量	反距离矩阵	反距离平方矩阵	经济矩阵	经济距离嵌套矩阵
绿色技术创新	0.216***	0.198***	0.218***	0.198***
	(0.055)	(0.057)	(0.057)	(0.057)
经济发展水平	0.406***	0.217***	0.221***	0.204***
	(0.062)	(0.045)	(0.045)	(0.045)
产业结构	−0.270***	−0.0344	−0.0311	−0.0273
	(0.037)	(0.027)	(0.027)	(0.027)
工业企业规模	−0.451***	−0.168***	−0.180***	−0.169***
	(0.047)	(0.020)	(0.020)	(0.020)
工业集聚水平	0.472***	0.521***	0.538***	0.540***
	(0.105)	(0.056)	(0.056)	(0.056)
财政分权	0.0386	0.399***	0.380***	0.370***
	(0.061)	(0.059)	(0.060)	(0.060)
科技水平	0.00117	0.321***	0.331***	0.344***
	(0.050)	(0.072)	(0.072)	(0.072)
绿色技术创新 1)	0.645	−1.064***	−0.295	−3.839***
	(0.446)	(0.288)	(0.191)	(0.712)
经济发展水平 1)	−1.289***	−0.443**	−0.0825	0.0122
	(0.342)	(0.188)	(0.103)	(0.191)
产业结构 1)	0.567***	0.00203	0.277***	0.439**
	(0.188)	(0.124)	(0.079)	(0.199)
工业企业规模对数 1)	−0.844**	0.206**	0.156***	0.556***
	(0.341)	(0.097)	(0.053)	(0.138)
工业集聚水平对数 1)	3.961***	1.497***	−0.325	1.594**
	(1.238)	(0.286)	(0.277)	(0.669)
财政分权 1)	−1.110**	−0.189	−0.0659	0.632
	(0.543)	(0.286)	(0.162)	(0.405)
科技水平 1)	0.578	−0.0811	0.0784	0.183
	(0.356)	(0.332)	(0.195)	(0.453)
rho	0.138	−0.247***	0.0906***	0.0838
	(0.130)	(0.058)	(0.033)	(0.078)
$sigma^2$	0.00636***	0.0178***	0.0180***	0.0179***
	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
时间效应	No	Yes	Yes	Yes
地区效应	Yes	No	No	No
R^2	0.0670	0.112	0.129	0.0893
样本量	3168	3168	3168	3168

续表 8

注:1)是指变量的空间滞后项,是各地区与其他地区间的空间加权值. *、**、***分别表示10%、5%、1%的显著性水平,括号内为稳健标准误.

进一步通过分解空间溢出效应得直接效应、间接效应以及总效应(表 9).结果显示,绿色技术创新对城市工业碳生产率的直接效应在所有矩阵下均显著,这是因为绿色技术创新能够提高能源利用效率,降低对环境的污染和资源的依赖,直接促进本地城市工业碳生产率的提升,同时直接效应估计系数的大小排序为反距离矩阵(0.219)>经济矩阵(0.217)>反距离平方矩阵(0.213)>地理距离嵌套矩阵(0.191).间接效应在反距离平方矩阵和经济距离嵌套矩阵下显著,一定程度说明了绿色技术创新对工业碳生产率的影响具有空间溢出效应,这类知识溢出现象在反距离平方矩阵下显著但反距离矩阵下不显著的情况,可能是因为技术创新的传播依赖面对面的互动与交流,而交流频率可能随距离平方级衰减(甚至更陡峭);估计系数的大小排序为经济距离嵌套矩阵(−4.203)>反距离平方矩阵(−0.914),这说明地理经

济距离嵌套是作用于绿色技术创新对城市工业碳生产率影响溢出的最主要因素;由于绿色技术创新存在投入成本,城市间由于存在竞争会采取措施来维持市场份额和地位,甚至带来虹吸效应,对周边城市工业碳生产率以抑制为主.

对于其他控制变量,在四种矩阵下,除产业结构变量外,其余均展现显著的直接效应;而间接效应中,只有工业企业规模在所有矩阵下具有明显的空间溢出效应,除反距离矩阵外本城市工业企业规模的扩大在其余矩阵下会增加周边城市工业碳生产率,可能是因为工业企业规模扩大吸引周边城市产业转移至本地,伴随能耗增长、污染排放等也有所转移,周边城市的负效应得到一定缓解.同样,产业结构的升级、工业集聚水平也会对经济地理邻近城市工业碳生产率具有显著促进作用.另外,财政分权和科技水平在多数矩阵中,间接效应都不显著,说明相对于对周边城市工业碳生产率的影响,对本地工业碳生产率影响更大.

表 9　空间杜宾模型效应分解结果

Table 9　Decomposition results of spatial Durbin model effect

变量	反距离矩阵			反距离平方矩阵		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
绿色技术创新	0.219***	0.767	0.986*	0.213***	−0.914***	−0.701***
	(0.057)	(0.503)	(0.505)	(0.059)	(0.224)	(0.228)
经济发展水平	0.402***	−1.403***	−1.001**	0.220***	−0.391***	−0.170
	(0.060)	(0.422)	(0.418)	(0.044)	(0.151)	(0.154)
产业结构	−0.266***	0.605***	0.339*	−0.0324	0.0122	−0.0202
	(0.035)	(0.204)	(0.203)	(0.026)	(0.101)	(0.100)
工业企业规模	−0.451***	−1.073***	−1.523***	−0.172***	0.199***	0.0277
	(0.047))	(0.358)	(0.358)	(0.020)	(0.075)	(0.078)
工业集聚水平	0.477***	4.741***	5.218***	0.504***	1.117***	1.622***
	(0.100)	(1.644)	(1.645)	(0.052)	(0.234)	(0.233)
财政分权	0.0388	−1.317**	−1.278**	0.403***	−0.243	0.159
	(0.059)	(0.616)	(0.620)	(0.056)	(0.232)	(0.240)
科技水平	0.00182	0.695*	0.697*	0.323***	−0.119	0.204
	(0.052)	(0.401)	(0.402)	(0.075)	(0.271)	(0.280)
变量	经济矩阵			经济距离嵌套矩阵		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
绿色技术创新	0.217***	−0.305	−0.0888	0.191***	−4.203***	−4.012***
	(0.059)	(0.198)	(0.207)	(0.059)	(0.835)	(0.842)
经济发展水平	0.218***	−0.0593	0.159	0.201***	0.0443	0.246
	(0.044)	(0.109)	(0.123)	(0.044)	(0.197)	(0.206)
产业结构	−0.0256	0.303***	0.278***	−0.0240	0.495**	0.470**
	(0.026)	(0.085)	(0.091)	(0.026)	(0.227)	(0.232)
工业企业规模	−0.178***	0.151***	−0.0273	−0.168***	0.593***	0.425***
	(0.020)	(0.056)	(0.057)	(0.020)	(0.156)	(0.158)
工业集聚水平	0.535***	−0.285	0.249	0.544***	1.828**	2.372***
	(0.052)	(0.312)	(0.320)	(0.052)	(0.773)	(0.776)
财政分权	0.379***	−0.0379	0.341*	0.371***	0.721*	1.092**
	(0.056)	(0.177)	(0.188)	(0.056)	(0.422)	(0.427)
科技水平	0.333***	0.130	0.463*	0.344***	0.262	0.607
	(0.076)	(0.214)	(0.238)	(0.076)	(0.496)	(0.515)

注:*、**、***分别表示 10%、5%、1%的显著性水平,括号内为稳健标准误差.

3　建议

绿色技术创新是提高城市工业碳生产率的重要途径之一,应持续推动绿色治理、节能减碳等绿色技术创新在工业领域的推广应用,不断增加城市自身绿色知识积累,积极搭建绿色知识城际交流与合作平台,提高工业领域对外溢知识的识别与利用.针对绿色技术创新对城市工业碳生产率的空间外溢所造成的“虹吸效应”,通过改善绿色技术创新配置的有效性,优先考虑亟需提升绿色技术创新水平的

地区,最大程度确保研发投入资金流向最合理的地方,高绿色技术创新水平城市充分发挥其辐射带动作用,而低绿色技术创新水平城市调动自身主观能动性,突破地理边界以形成工业减碳合力,实现城市工业碳生产率整体协同提升.

4 结论

4.1 城市工业碳生产率高于均值的城市主要在华南地区、西南地区以及西北地区,低于均值的主要分布在东北和华北平原地区,且各区域城市工业碳生产率都存在高低交织的情形,而非单一规律性的差异;绿色技术创新水均值高的城市主要分布在东部沿海城市群地区.

4.2 2011 年,高城市绿色技术创新-高工业碳生产率类城市较少且零散分布于东部、中部地区,2021 年高-高类城市大多连片分布在东南沿海,范围分布扩大且集中;2011、2021 年低-低类城市都主要分布在西部及东北地区,变化相对较小.

4.3 绿色技术创新对城市工业碳生产率具有显著的促进作用,同时存在区域异质性,对西部地区存在一个较为显著的促进作用,而东、中部地区并不显著,资源型城市相对于非资源型城市存在更显著的促进作用,同时发现经济发展水平较高地区的促进作用更大.

4.4 在不同空间矩阵下,绿色技术创新对城市工业碳生产率影响的直接效应均显著,间接效应仅在反距离平方矩阵和经济距离嵌套矩阵下显著,说明绿色技术创新能够显著提升本地城市工业碳生产率,但一定程度上会通过虹吸效应抑制周边城市工业碳生产率的提升,反距离平方矩阵更适合绿色技术创新传播这类依赖面对面互动交流的知识溢出现象;地理经济距离嵌套是作用于绿色技术创新对城市工业碳生产率影响溢出的最主要因素.

参考文献:

[1] 陈晓红,周方毅,程继鑫,等.中国城市碳减排边际成本时空演变及不平等特征 [J]. 环境科学, 2025,46(9):5428-5440.
Chen X H, Zhou F Y, Cheng J X, et al. Spatiotemporal evolution and inequality of marginal cost of carbon emission reduction in Chinese Cities [J]. Environmental Science, 2025,46(9):5428-5440.

[2] 陈慧灵,杨雪珂,王振波.数字经济对工业碳排放强度的影响及溢出效应 [J]. 环境科学研究, 2024,37(4):672-685.
Chen H L, Yang X K, Wang Z B. Impact of digital economy on industrial carbon emission intensity and its spillover effects [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(4):672-685.

[3] Liu L, Lv Y, Gao D, et al. Towards a greener future: Assessing the impact of carbon emission trading on urban carbon efficiency in China [J]. Energy & Environment, 2025,36(7):3395-3415.

[4] 汤 瑜,刘 哲,陶小垒.集中式环境执法体制改革的环境治理效应——基于 192 个城市的“准实验”[J]. 中国环境科学, 2025,45(3):1745-1753.
Tang Y, Liu Z, Tao X L. The environmental governance effect of the centralized environmental enforcement system reform: A quasi-experiment based on 192 cities [J]. China Environmental Science, 2025,45(3):1745-1753.

[5] Du M, Zhang Y J. The impact of producer services agglomeration on green economic development: Evidence from 278 Chinese cities [J]. Energy Economics, 2023,124:106769.

[6] 陶长琪,谢 涛,徐 晔.绿色技术创新与减污降碳协同增效——基于联合减排与环境改善的视角 [J]. 统计研究, 2025,42(4):31-47.
Tao C Q, Xie T, Xu Y. Green technology innovation and synergies of reducing pollution and carbon: From the perspectives of joint emission reduction and environmental improvement [J]. Statistical Research, 2025,42(4):31-47.

[7] Hu Z, Lan X, Gong J, et al. Does the low-carbon city pilot scheme enhance urban total environmental quality? Evidence from China [J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2024,68(10):2321-2347.

[8] 石柔刚,徐维祥.新质生产力对绿色创新效率的影响机制与空间溢出效应——来自中国 284 个地级及以上城市的经验证据 [J]. 中国环境科学, 2025,45(5):2941-2951.
Shi R G, Xu W X. The impact mechanism and spatial spillover effect of new quality productivity on green innovation efficiency: empirical evidence from 284 cities at or above the prefecture level in China [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2941-2951.

[9] Kaya Y, Yokobori K, Environment, energy, and economy: strategies for sustainability [M]. Tokyo, Japan: United Nations University Press, 1997.

[10] 丁树芳,王 远,董战峰,等.中国化工产业碳排放效率时空演变及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3508-3521.
Ding S F, Wang Y, Dong Z F, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of carbon emission efficiency in China's chemical industry [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):3508-3521.

[11] 黄和平,周桂明,李国民.产业数字化对绿色全要素生产率的影响机制研究——兼议环境规制的门槛效应 [J]. 中国环境科学, 2025,45(3):1713-1730.
Huang H P, Zhou G M, Li G M. Research on the impact mechanism of industrial digitalization on green total factor productivity:the threshold effect of environmental regulation [J]. China Environmental Science, 2025,45(3):1713-1730.

[12] 徐英启,程 钰,王晶晶.中国资源型城市碳排放效率时空演变与绿色技术创新影响 [J]. 地理研究, 2023,42(3):878-894.
Xu Y Q, Cheng Y, Wang J J. The impact of green technological innovation on the spatiotemporal evolution of carbon emission efficiency of resource-based cities in China [J]. Geographical Research, 2023,42(3):878-894.

[13] Zhang X Q, Yao S J, Zheng W W, et al. On industrial agglomeration and industrial carbon productivity --- impact mechanism and nonlinear relationship [J]. Energy, 2023,283.

[14] 孟凡生,赵 艳.工业智能化、产业集聚与碳生产率 [J]. 科学学研究, 2023,41(10):1789-1799.
Meng F S, Zhao Y. Industrial intelligence, industrial agglomeration, and carbon productivity [J]. Studies in Science of Science, 2023,41(10):1789-1799.

[15] Wang Q ,Wang L . The nonlinear effect of population aging, industrial structure , and urbanization on carbon emissions: A panel threshold regression analys of 137 countries [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,287(1):125381.

[16] Han B. Research on the influence of technological innovation on carbon productivity and countermeasures in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021,28(13):16880−16894.

[17] 任晓松,孙　莎.数字经济对中国城市工业碳生产率的赋能效应 [J]. 资源科学, 2022,44(12):2399−2414.
Ren X S, Sun S. The enabling effect of digital economy on urban industrial carbon productivity in China [J]. Resources Science, 2022, 44(12):2399−2414.

[18] 古惠冬,杨维光,陈文捷.绿色技术创新对城市碳减排的效应研究 [J]. 学术探索, 2022,(3):120−132.
Gu H D, Yang W G, Chen W J. Effect of green technology innovation on urban carbon emission reduction [J]. Academic Exploration, 2022, 3:120−132.

[19] 刘海英,杨　明,王殿武.绿色技术创新促进碳生产率提高的作用机制——基于工业结构升级、循环农业发展和交通运输替代的中介效应分析 [J]. 科技管理研究, 2022,42(10):194−201.
Liu H Y, Yang M, Wang D W. Impact mechanism of green technology innovation on carbon productivity promotion: Based on the mediating effect analysis of industrial structure upgrading, circular agriculture development and transportation substitution [J]. Science and Technology Management Research, 2022,42(10):194−201.

[20] 刘自敏,申　颢.有偏技术进步与中国城市碳强度下降 [J]. 科学学研究, 2020,38 (12):2150−2160.
Liu Z M, Shen H. Biased technological progress and carbon intensity reduction in Chinese cities [J]. Studies in Science of Science, 2020, 38(12):2150−2160.

[21] Zhou P, Abbas J, Najam H, et al. Nexus of renewable energy output, green technological innovation, and financial development for carbon neutrality of Asian emerging economies [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023,58:103371.

[22] 任晓松,马　茜,刘宇佳,等.碳交易政策对工业碳生产率的影响及传导机制 [J]. 中国环境科学, 2021,41(11):5427−5437.
Ren X S, Ma Q, Liu Y J, et al.The impact of carbon trading policy on industrial carbon productivity and its transmission mechanism [J]. China Environmental Science, 2021,41(11):5427−5437.

[23] 赵喜仓,蒋　美,洪　逗.绿色技术创新对减污降碳协同效应的影响 [J]. 科技进步与对策, 2025,42(16):24−36..
Zhao X C, Jiang M, Hong D. The impact of green technology innovation on the synergistic effect of pollution reduction and carbon emission reduction [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2025,42(16):24−36.

[24] Meng S Q, Sun R J, Guo F, et al. The mechanism of renewable energy consumption, technological innovation and carbon productivity−an empirical study of Chinese data. [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022,30(8):20673−20687.

[25] 韩先锋,陈龙涛,宋文飞,等.碳排放对绿色技术创新驱动产业升级的动态调节机制 [J]. 中国人口・资源与环境, 2023,33(12):60−70.
Han X F, Chen L T, Song W F, et al. Dynamic adjustment mechanism of carbon emissions on industrial upgrading driven by green technology innovation [J]. China Population, Resources and Environment, 2023,33(12):60−70.

[26] 徐俊武,陈钊雄.绿色技术创新对碳排放的影响效应——非线性中介效应与调节效应分析 [J]. 科技进步与对策, 2024,8(41):22−32.
Xu J W, Chen Z X. The effect of green technology innovation on carbon emission:An analysis based on nonlinear mediating effects and moderating effects [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2024,8(41):22−32.

[27] 吴　康,耿一睿,郭　涛.城市群绿色技术创新对碳排放的影响——基于人力资本的调节效应 [J]. 自然资源学报, 2024,9(39):2121−2139.
Wu K, Geng Y R, Guo T. The impact of green technology innovation on carbon emissions from the perspective of urban agglomeration: the moderating effect of human capitals [J]. Journal of Natural Resources, 2024,9(39):2121−2139.

[28] 杨　霞,何　刚,张世玉,等.碳减排政策组合使用效能差异及提升策略 [J]. 中国环境科学, 2025,45(3):1699−1712.
Yang X, He G, Zhang S Y, Jiang H Y. Research on the efficiency difference and promotion strategy of combining carbon emission reduction policies [J]. China Environmental Science, 2025,45(3): 1699−1712.

[29] 于　伟,张　鹏,姬志恒.中国城市群生态效率的区域差异、分布动态和收敛性研究 [J]. 数量经济技术经济研究, 2021,38(1):23−42.
Yu W, Zhang P, Ji Z H. Study on regional differences, distribution dynamics, and convergence of Eco−efficiency of urban clusters in China [J]. Quantitative & Technical Economics, 2025,45(3):1699−1712.

[30] Liu C, Tang C, Liu Y. Does the transformation of energy structure promote green technological innovation? A quasi−natural experiment based on new energy demonstration city construction [J]. Geoscience Frontiers, 2024,15(3):101615.

[31] 徐　瑾,单子强.绿色技术创新对城市碳减排的影响研究——基于空间计量模型的实证分析 [J]. 经济问题探索, 2024,9:155−172.
Xu J, Shan Z Q. Research on the impact of green technology innovation on urban carbon emission reduction: Empirical analysis based on spatial econometric model [J]. Inquiry into Economic Issues, 2024,9:155−172.

[32] 程丹亚,曾　刚.长三角区域绿色技术创新对工业二氧化碳排放影响的空间效应研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2023,32(6):1152−1164.
Cheng D Y, Zeng G. Impact on spatial effect of green technology innovation on industrial carbon dioxide emissions in Yangtze River Delta [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(6):1152−1164.

[33] 王　正,周　侃,樊　杰,等.市—县尺度能源消费碳排放核算方法研究进展 [J]. 地理科学进展, 2023,42(7):1406−1419.
Wang Z, Zhou K, Fan J, et al. Progress of research on energy−related carbon emission accounting methods at the prefectural and county levels [J]. Progress in Geography, 2023,42(7):1406−1419.

[34] Pace R K, Lesage J P. A sampling approach to estimate the log determinant used in spatial likelihood problems [J]. Journal of Geographical Systems, 2009,11(3):209−225.

[35] Oh D. A global Malmquist−Luenberger productivity index [J]. Journal of Productivity Analysis, 2010,34:183−197.

[36] 莫惠斌,罗　珂,王少剑,等.广州市中心城区餐饮店空间分异与机制差异研究——基于传统店与外卖店的对比 [J]. 地理研究, 2022, 41(12):3318−3334.
Mo H B, Luo K, Wang S J, et al. Spatial heterogenicity and mechanism difference of restaurant in the central urban area of Guangzhou: Acomparison between traditional restaurant and take−out restaurant [J]. Geographical Research, 2022,41(12):3318−3334.

[37] IPCC.2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [M]. Kanaqawa: The Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

作者简介：陈慧灵(1992−),女,湖南邵阳人,副教授,博士(后),主要研究方向为城市与区域规划.发表论文 10 余篇.yinuo2020@hutb.edu.cn.