



胡琰欣,李郑涛,舒海诚,等.数字产业集聚对城市绿色经济效率提升的影响及其空间溢出效应[J].中国人口·资源与环境,2026,36(2):161-172.[HU Y X,LI Z T,SHU H C,et al.Impact of digital industry agglomeration on urban green economic efficiency and its spatial spillover effects[J].China population,resources and environment,2026,36(2):161-172.]

数字产业集聚对城市绿色经济效率提升的影响及其空间溢出效应

胡琰欣¹,李郑涛²,舒海诚³,骆海燕⁴

(1. 陕西科技大学经济与管理学院,陕西 西安 710021; 2. 浙江财经大学经济学院,浙江 杭州 310018; 3. 西南财经大学经济学院,四川 成都 611130; 4. 西安体育学院体育经济与管理学院,陕西 西安 710068)

摘要 数字产业集群建设成为推进发展方式绿色转型的关键路径。然而,传统产业长期面临“集聚悖论”——过度集中导致要素配置失衡与创新衰减。那么,数字产业集聚通过何种机制影响城市绿色经济效率?其空间效应呈现何种特征?为系统解答上述问题,该研究整合空间经济学与技术溢出理论,构建“技术-经济-制度”三维分析框架,提出“本地促进-邻域抑制”的双重效应假说,并重点解析绿色技术创新的中介作用与人才虹吸的空间传导路径。该研究基于2006—2022年中国282个城市的平衡面板数据,以动态空间杜宾模型(SDM)为主模型,辅以空间自回归模型(SAR)、空间自相关模型(SAC)、空间误差模型(SEM)4类模型进行实证分析。研究表明:①本地促进效应显著。数字产业集聚度每提高1个单位,本地绿色经济效率平均增长4.42%(SDM估计)。②空间虹吸效应凸显。本地数字产业集聚对邻域城市产生显著负向溢出。人才要素流动是空间负溢出的关键载体,核心城市数字产业高度集聚导致周边城市高技术人才加速流出,进而抑制其绿色技术创新能力。③绿色技术创新是核心中介路径。知识溢出虚拟化、创新成本集约化、政策市场协同化等是形成该路径的微观机制。基于此,该研究提出差异化治理路径:构建数字产业集群与绿色技术创新的协同发展机制;优化区域数字产业布局以缓解虹吸效应;深化数字基础设施与绿色技术应用场景融合;健全绿色技术创新的市场化支撑体系。该研究通过量化“本地-邻域”双重效应、解析三重微观机制、揭示虹吸传导路径,为数字经济时代的产业集群理论提供新证据;提出的“区域补偿-技术共享-制度协同”政策体系,可为破解绿色转型中的区域失衡困境提供操作范式。

关键词 产业集聚;数字产业;绿色经济效率;空间溢出效应

中图分类号 F49 文献标志码 A 文章编号 1002-2104(2026)02-0161-12 DOI:10.12062/cpre.20250628

提升绿色经济效率是城市实现可持续发展的核心目标。与此同时,以数字技术为核心驱动力的数字经济正深刻重塑全球产业格局与经济增长模式。党的二十大报告明确提出“加快发展数字经济,促进数字经济和实体经济深度融合,打造具有国际竞争力的数字产业集群”,标志着数字产业集群建设已上升为国家战略。截至2022年,中国数字经济规模占GDP比例突破40%,展现出强劲的发展势头^[1]。然而,传统产业在发展中长期面临“集群病”的困扰——过度集聚往往导致要素配置失衡、环境污染加剧与创新能力的衰减^[2]。数字产业集群的

兴起,凭借其技术赋能、网络协同与知识溢出等特性,被视为破解传统集群困境、驱动绿色转型的重要新路径^[3]。在此背景下,亟待厘清的关键现实问题是:数字产业的空间集聚是否必然成为提升城市绿色经济效率的“绿色引擎”?其内在机制为何?其发展在促进本地效率提升的同时,是否会对邻近区域产生复杂的空间效应(如虹吸效应)?科学回答这些问题,对于优化国家数字产业战略布局、协调区域绿色协同发展、最终实现经济增长与生态保护的双重目标具有重大现实意义,为政府制定差异化集群政策、构建跨区域创新协同网络提供实证依据。

收稿日期:2024-11-04 修回日期:2025-07-24

作者简介:胡琰欣,博士,讲师,主要研究方向为环境经济、区域经济。E-mail:woshihuyanxin@163.com。

通信作者:舒海诚,博士,教授,博导,主要研究方向为宏观经济、货币经济、能源经济。E-mail:haicheng.shu@swufe.edu.cn。

基金项目:国家社会科学基金一般项目“人工智能作用碳回弹效应的宏微观影响分析及应对策略研究”(批准号:24BJY124);国家自然科学基金地区科学基金项目“宏观经济中的长期通货膨胀趋势——基于金融期限结构的视角”(批准号:72463028);陕西省社会科学基金项目“城乡联动视角下劳动力、土地要素市场化协同推进陕西省绿色发展水平提升研究”(批准号:2021D053);西安市社会科学规划基金项目“西安市县域经济高质量发展的驱动机制和实现路径研究”(批准号:23JX35);西安体育学院校级教改项目“高等教育质量提升视角下的数理统计底层逻辑教学:以体育经济为例”(批准号:XTJY2411)。

1 文献综述

产业集聚对绿色发展的影响是学术界长期关注的重要议题。随着数字经济的崛起,数字产业作为一种新兴的产业形态,其空间集聚特征及其对绿色经济效率的影响呈现出不同于传统产业的独特性,相关研究也呈现出新的演进趋势和关注焦点。

1.1 产业集聚与绿色发展关系的理论演进与方法深化

早期研究主要聚焦于制造业及生产性服务业等传统产业领域,探讨产业集聚对绿色发展的整体影响。多数研究肯定了产业集聚的积极效应,并从不同维度阐释其作用机理。Yoon等^[4]提出的集群闭环生产理论揭示了空间邻近性降低环境治理成本的作用机制。后续研究进一步拓展了理论视角:Wang等^[5]从能源要素重组角度论证了产业集聚提升资源效率的路径;He等^[6]通过制造业样本验证了技术溢出对绿色全要素生产率(GTFP)的驱动作用。针对不同产业类型,学者也进行了差异化探讨:Wang等^[7]证实高新技术产业存在双向协同效应;Liu等^[8]则补充指出高污染产业集聚也可能带来效率提升;Xie等^[9]则系统比较了专业化与多样化产业集聚对GTFP的不同影响;张雪梅等^[10]、何宜庆等^[11]、王锋等^[12]、王志祥等^[13]的研究均支持产业集聚对绿色经济效率具有直接正向促进作用的观点。

随着研究的深入,学者逐渐认识到产业集聚与绿色发展的关系并非简单的线性模式,而是呈现出复杂的非线性特征,具体可表现为倒“N”形、“U”形及“N”形曲线,表明集聚效应随规模变化呈现阶段性波动^[14-16]。例如,林伯强等^[17]、陈阳等^[18]的研究均指出两者间遵循倒“U”形曲线关系;而岳书敬等^[19]、胡安军等^[18]、张治栋等^[20]则观察到“U”形关系模式。此外,在方法层面,空间计量经济学的引入是一项重要进展。它促使学者关注经济活动的地理关联性及其空间溢出效应^[21-22],从而为理解集聚的外部性提供了新的分析工具。

1.2 数字产业集聚与绿色经济效率:新兴议题与深化方向

近年来,随着数字经济飞速发展,数字产业化和产业数字化成为经济发展的新方向。数字产业集聚对绿色经济效率的促进作用迅速成为研究热点。学者开始关注数字产业集聚区别于传统产业的作用路径。研究表明,可通过技术创新(如颠覆式技术)、要素优化(如数据要素驱动资源高效配置)和空间溢出等机制显著提升城市及区域绿色经济效率。焦焘等^[23]基于中国285个城市数据,发现数字产业集聚通过推动生活方式线上化和生产方式集约化赋能绿色效率提升,其效应在一二线城市、非资源型城市

更显著,并受地方政府竞争的影响而强化;辛璐璐^[3]则聚焦颠覆式技术创新的中介作用,并发现其效应在高产业结构水平和智慧城市试点条件下更强;刘耀彬等^[24]以长江经济带为例,验证了数字产业集聚具有减污降碳协同效应,其通过规模经济、产业升级和技术创新三重机制实现,并具有右拖尾“U”形的独特空间溢出特征。

进一步研究不仅深化了对数字产业集聚绿色效应复杂性的认知,更揭示了其显著的区域异质性及边界条件。Li等^[25]对比中国东中西部发现,东部核心集聚对GTFP提升作用更突出,且专业化集聚在东部产生负向空间溢出,而中西部仅专业化集聚有效。赵放等^[26]指出,数字产业集聚对绿色技术创新的赋能效应在政府数字支持力度大、市场化水平高的地区更显著,但高度依赖创新要素汇聚和环境规制强化。王彦杰等^[27]发现数字经济产业集聚对绿色技术创新的影响呈倒“U”形,且环境规制对此具有调节作用;同时,其研究指出,由于多数中西部省份尚处于曲线左侧,需警惕过度集聚可能产生的抑制效应。资源依赖和区域政策协同被识别为关键边界条件。Jiang等^[28]提出资源依赖存在阈值效应,超过临界值会显著削弱数字产业集聚的绿色促进作用,而环境规制和数字基建可提高阈值效应。Ma等^[29]发现数字经济集聚虽整体净效应为正,但存在抑制邻近城市包容性绿色增长的负向空间溢出,需通过产业优化和技术创新来弥合差异;Yuan等^[30]则强调产业协同集聚可能因路径依赖阻碍绿色高质量发展,而数字经济独立发展能有效抵消此负面影响。

尽管传统产业集聚与绿色发展的研究已形成较为丰富的理论体系和方法基础,但现有成果多聚焦于制造业与服务业整体的集聚效应,对数字产业这一以数据为核心要素、高度依赖网络协同和技术创新的新业态关注相对不足,其集聚模式和作用机理具有独特性。综观现有关于数字产业集聚与绿色经济效率的研究,虽然已初步揭示了其多维驱动机制并开始关注空间异质性与边界条件,但仍存在深化空间:①空间效应认知尚不系统,对数字产业集聚“本地-邻域”双重空间效应(特别是负向虹吸效应)的量化检验和机理剖析仍显薄弱;②微观作用机制有待细化,对数字技术如何具体改变知识溢出模式、降低创新成本等微观传导链条的实证支撑和理论提炼不足;③跨区域协调策略缺乏探讨,针对如何优化数字产业空间布局以最大化绿色正效应、最小化负向溢出,缺乏基于实证的政策设计。

基于此,本研究旨在系统探究数字产业集聚对中国城市绿色经济效率的影响效应、作用机理及空间外溢效应,重点回应数字产业集聚通过何种微观机制影响本地

绿色经济效率?其空间效应,尤其是对邻近区域的潜在制约如何?本研究通过融合空间计量方法与机制检验,力图在厘清“本地-邻域”双重效应的基础上,构建促进数字产业集聚赋能区域绿色协调发展的政策支持体系。

2 理论分析与研究假说

与传统产业不同,数字产业集聚对城市绿色经济效率的影响具有其独特性。本部分基于数字产业的技术属性、组织形态与政策环境,构建数字产业集聚影响绿色经济效率的理论框架,重点剖析本地促进机制与空间抑制效应,并据此提出研究假说。图1展示了本研究的核心理论机制。

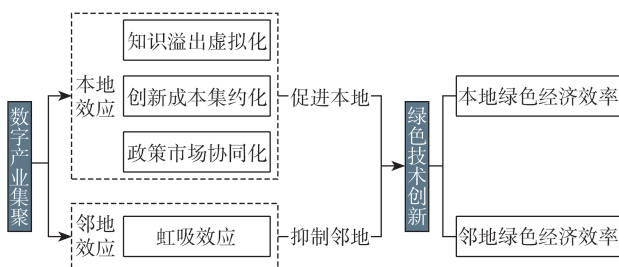


图1 数字产业集聚影响城市绿色经济效率的理论机制

2.1 数字产业集聚、绿色技术创新与本地绿色经济效率提升

数字产业以数据为核心生产要素,依托互联网、云计算、区块链和人工智能等技术构建高效协同网络。其空间集聚通过以下三重机制系统性加速绿色技术创新,从而最终提升了本地绿色经济效率。

2.1.1 知识溢出虚拟化:突破地理与知识类型约束

传统产业集群的知识溢出受限于缄默型知识的面对面传播^[31],而数字产业集聚则通过平台化工具与虚拟化技术,重构了知识溢出路径,显著提升绿色技术的扩散效率^[32-33]。①编码化知识高效共享。开源社区(如GitHub)、云数据库与在线知识库等极大提升了绿色技术编码化知识的传播速度与覆盖范围;企业通过共享生产数据(如能耗、排放等信息),利用机器学习算法协同优化绿色技术方案。②缄默型知识虚拟化传递。虚拟现实(VR)技术可模拟设备操作场景,用于远程培训清洁能源设备的维护技能;工业互联网平台(如西门子MindSphere)也支持工程师跨地域协作调试碳捕集系统,从而实现缄默型技术经验的实时共享。这有效降低了绿色技术的学习与应用门槛。

2.1.2 创新成本集约化:基础设施赋能研发与应用

数字产业集聚区依托先进的新型基础设施,为绿色技术研发与应用提供了低成本试验场和规模化支持,显

著降低了创新的边际成本与风险^[34]。①算力共享与模拟优化。云计算平台(如阿里云、AWS)允许企业以极低成本进行绿色生产工艺模拟和优化设计,从而减少实物试验的投入与风险。②区块链构建可信环境。在碳排放权交易、绿色金融等领域,区块链技术能够确保碳排放数据、绿色认证等关键信息的不可篡改性和可追溯性,降低了绿色技术商业化过程中的信任成本和交易风险。③SaaS模式降低应用门槛。数字服务商(如SAP、金蝶等)提供模块化的节能减排SaaS工具,使中小企业不必承担高昂的独立研发固定成本,通过按需订阅获得智能监测、能效管理等绿色技术应用服务。

2.1.3 政策市场协同化:强化创新激励与资源配置

中国政府的定向政策与市场机制设计,与数字产业集聚形成协同效应,并进一步放大其对绿色技术创新的促进作用^[33]。①基础设施定向支持。“东数西算”等国家工程引导数据中心向可再生能源富集地区布局,不仅直接降低了数字产业自身的碳足迹,也为绿色技术研发提供了清洁、低成本的算力基础。②数据要素市场化改革。建立绿色技术交易平台(如北京绿色交易所等),推动数据确权与交易,鼓励企业通过共享或出售绿色技术相关数据(如新能源预测算法数据)获取创新收益,形成正向激励。③财税金融精准激励。高新技术企业税收减免、研发费用加计扣除等政策优先覆盖数字化减排项目(如腾讯的AI控碳系统研发),绿色金融工具(如绿色信贷、债券)也向数字赋能的绿色创新项目倾斜,共同引导资源实现高效配置。

绿色技术创新作为上述机制的核心产出,是提升绿色经济效率的关键驱动力。它通过绿色技术进步,从优化资源利用(如智能电网降低传输损耗、工业物联网精准调控能耗)、减少污染排放(清洁技术应用)、促进资源循环(推动循环经济模式)等路径,系统提升资源环境效率,最终体现为城市绿色经济效率的改善^[35-36]。基于以上分析,提出研究假说H1。

H1:数字产业集聚通过加速绿色技术创新,间接提升本地城市的绿色经济效率。

2.2 数字产业集聚的空间虹吸效应与邻域绿色经济效率有关

数字产业作为技术密集型产业,是高端技术人才的主要汇聚地。当某一城市的数字产业高度集聚时,可能对周边城市产生显著的虹吸效应^[37-38]。具体表现为:核心集聚城市凭借更优越的发展机遇、薪酬体系、研发条件和工作环境等多方面优势,持续吸引周边城市的创新人才(特别是高端技术人才)流入^[39]。这种人才的单向流动会导致双重后果:①核心城市获益,通过人才流入进一步强化了核心城市的创新能力和竞争优势;②周边城市受

损,面临人才(尤其是绿色技术创新所需的关键人才)的持续流失,导致其创新基础被削弱,绿色技术研发与应用能力下降。

鉴于人才是绿色技术创新的核心投入要素,周边城市因虹吸效应导致的人才流失,直接阻碍了其绿色技术创新的进程。而绿色技术创新的滞后,又直接制约了其绿色经济效率的提升。因此,某一城市数字产业的高度集聚,在提升自身效率的同时,可能通过人才虹吸这一空间作用机制,对邻近城市的绿色经济效率产生抑制性影响。基于以上分析,提出研究假说H2。

H2:本地城市的数字产业高度集聚会对邻近城市的绿色经济效率产生抑制作用,该效应主要通过人才虹吸来阻碍周边城市绿色技术创新。

3 研究设计

3.1 计量模型

3.1.1 模型构建

由于相邻城市具有相似的经济结构特征及文化生态,加之生产要素的跨地域流动和环境污染的空间外溢,可以推断这些邻近城市在经济增长态势、绿色经济效率指标及产业结构部署上存在一定程度的空间依赖性。鉴于此,本研究采用空间计量经济模型深入探究数字产业集聚对城市绿色经济效率的直接影响,以及该影响在地域间的扩散机制。为了增强实证分析的稳健性与全面性,采用4种典型的空间计量模型(空间杜宾模型、空间自回归模型、空间自相关模型和空间误差模型)进行估计,并为每种模型配套使用了3类不同的空间权重矩阵(地理邻接矩阵、地理距离矩阵与经济距离矩阵)进行回归。

首先,构建空间杜宾模型(SDM):

$$Y_{i,t} = \beta_0 Y_{i,t-1} + \rho \times \mathbf{W} \times Y_{i,t} + \beta_1 D_{i,t} + \beta_2 \times \mathbf{W} \times D_{i,t} + \beta_3 X_{i,t} + u_i + v_t + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

式中: i,t 分别代表城市和年份; $Y_{i,t}$ 表示城市绿色经济效率; $D_{i,t}$ 表示数字产业集聚; $X_{i,t}$ 为控制变量,包括产业结构、政府干预程度、人力资本积累、信息化发展水平、对外开放程度、技术进步,以及人均地区生产总值; β_0 表示上一期城市绿色经济效率对本期的影响强度; β_1 和 β_3 分别反映核心解释变量数字产业集聚和控制变量对城市绿色经济效率的影响强度; $\beta_2 \times \mathbf{W} \times D_{i,t}$ 表示核心解释变量 $D_{i,t}$ 的空间滞后项; β_2 反映了一个城市数字产业集聚对周围城市绿色生产力的影响强度; \mathbf{W} 为空间权重矩阵; $\rho \times \mathbf{W} \times Y_{i,t}$ 为反映空间效应的关键变量,即被解释变量的空间滞后项,反映周边城市绿色经济效率水平对本城市的溢出效应,其中 ρ 为空间自回归系数; u_i 和 v_t 分别用于捕获城市及时间固定效应; $\varepsilon_{i,t}$ 为随机误差项。

其次,构建空间自回归模型(SAR)如下:

$$Y_{i,t} = \beta_0 Y_{i,t-1} + \rho \times \mathbf{W} \times Y_{i,t} + \beta_1 D_{i,t} + \beta_3 X_{i,t} + u_i + v_t + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

再次,构建空间自相关模型(SAC)如下:

$$Y_{i,t} = \rho \times \mathbf{W} \times Y_{i,t} + \beta_1 D_{i,t} + \beta_3 X_{i,t} + u_i + v_t + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{i,t} = \lambda \times \mathbf{W} \times \varepsilon_{i,t} + \eta_{i,t} \quad (4)$$

式(4)中: $\lambda \times \mathbf{W} \times \varepsilon_{i,t}$ 表示随机误差项的空间滞后项,其中 λ 为空间误差系数;其他变量及参数的含义则与公式(1)一致。

最后,构建空间误差模型(SEM)如下:

$$Y_{i,t} = \beta_1 D_{i,t} + \beta_3 X_{i,t} + u_i + v_t + \varepsilon_{i,t} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{i,t} = \lambda \times \mathbf{W} \times \varepsilon_{i,t} + \eta_{i,t} \quad (6)$$

3.1.2 模型设定的合理性分析

为避免数据非平稳性可能引发的伪回归效应,并维护模型结论及各项检验的可靠性,实施单位根与协整检验是必要的步骤。

(1)单位根检验。运用LLC、Fisher-PP及Fisher-ADF等多种面板平稳性检验方法所得的结果揭示:被解释变量绿色经济效率(Y)、核心解释变量数字产业集聚(D),以及所有控制变量的一阶差分序列,结果均通过了显著性检验,证实了面板数据序列的一阶单整性质。

(2)协整检验。Kao检验与Pedroni检验均根植于Engle和Granger提出的两步法框架,但在细节处理上存在差异^[40]。具体而言,Kao检验在初步分析阶段采取了异于Pedroni的方法,允许每个横截面单元拥有独立的截距项,而系数部分则保持一致;在第二阶段的分析中,Kao检验借鉴了DF(Dickey-Fuller)及ADF(Augmented Dickey-Fuller)检验逻辑,针对首阶段残差序列开展稳定性验证。Kao检验结果显示,DF统计量值为-6.678,拒绝了无协整关系的原假设,证实变量间存在协整关系,进一步验证了模型建构的合理性和有效性。

(3)多重共线性检验。当变量间出现多重共线性关系时,可能会对估计系数的精确性构成影响。为此,实施多重共线性检验显得尤为重要。由表1可知,所有解释变量的方差膨胀因子(VIF)值均显著低于10,这一结果有力地证明了模型中并无显著的多重共线性问题。

3.2 变量设定

3.2.1 被解释变量:绿色经济效率(Y)

采用地级市绿色全要素生产率度量城市绿色经济效率。此指标在传统全要素生产率测算框架之上,融入了能源消耗与环境污染的考量,力图在衡量经济增长速度与技术进步的同时,充分考虑到绿色发展的需求,成为评判绿色经济效率的一个优选标准。因此,采用Super-SBM



表1 多重共线性检验结果

变量		VIF	1/VIF
数字产业集聚	<i>D</i>	1.418	0.705
人均地区生产总值	<i>K</i>	2.595	0.385
技术创新	<i>R</i>	2.667	0.375
对外开放程度	<i>F</i>	2.453	0.408
信息技术普及程度	<i>N</i>	2.427	0.412
人力资源	<i>H</i>	1.558	0.642
产业结构	<i>I</i>	1.328	0.753
政府介入度	<i>G</i>	1.159	0.862
Mean VIF		1.951	

模型进行该指标的量化计算。该指标的具体投入产出变量如下。

(1)投入要素:劳动力投入以年末就业人员数量来衡量;资本投入则通过资本存量来衡量;能源投入选取各城市的能源消费总量来度量;土地投入采用各城市建成区面积来度量。

(2)产出指标包含两方面:一是期望的正面经济产出,通过地区生产总值来衡量,并运用以2006年为基准年的地区生产总值缩减指数来调整,以剔除通货膨胀的影响;二是非期望的负面环境影响,用工业SO₂排放量、工业废水排放量及烟尘排放量3种污染物排放量的加总来衡量。

3.2.2 核心解释变量:数字产业集聚(*D*)

数字产业涵盖了诸如数字设备制造、数字信息传输、数字技术服务以及数字内容与媒体相关的各类服务等领域^[41]。本研究选取了各城市中从事电信服务与其他信息传输业务、计算机服务行业、软件开发行业的劳动力所构成的区位熵指标,以此来衡量各城市的数字产业集聚程度。具体而言,计算该指标的数学公式如下所示:

$$D_j = \left(S_j / Q_j \right) / \left(S / Q \right) \quad (7)$$

式中: S_j 代表城市 j 内数字产业的就业人员数量; Q_j 则表示城市 j 所有产业的总就业人数; S 为全国范围内数字产业的总就业人数; Q 为全国的总就业人数; D_j 表示某一城市数字产业占比相对于全国平均水平的偏差程度,其数值越大,象征着该城市的数字产业集中度越高。

3.2.3 控制变量

(1)产业结构(*I*):以第二产业增加值占比来量化。这是因为,第二产业占比上升往往伴随能源消耗加剧及污染物排放增多,可能对绿色经济效率产生不利影响。

(2)政府介入度(*G*):采用地方财政一般预算内支出水平来衡量,并采用2006年为基期的地区生产总值平减

指数来消除物价变动的影响。普遍观点认为,政府支出的增加往往意味着其对经济活动干预强度的上升,可能加剧经济运行的非市场化扭曲,从而对经济效率及生产力提升构成阻碍。然而,政府通过实施环境保护法规能有效限制企业污染行为,削减污染物排放,故政府介入对绿色经济效率的实际影响仍是一个待明确的问题。

(3)人力资源(*H*):借鉴了詹新宇等^[42]的方法,采取普通高等教育机构在读学生数量与登记户籍人口的比例来量化表征,对该指标取自然对数。

(4)信息技术普及程度(*N*):通过每百人互联网宽带接入用户数量来衡量。

(5)对外开放程度(*F*):通过实际吸纳的外资金额来衡量,数据经由美元转换为人民币,并采用2006年为基准年的地区生产总值平减指数来消除物价变动的影响。对该指标取自然对数。

(6)技术创新(*R*):采用研发经费的内部支出来衡量,并利用2006年为基准年的国内生产总值平减指数消除物价变动的影响。对该指标取自然对数。

(7)人均地区生产总值(*K*):采用各城市人均地区生产总值来衡量,并采用2006年为基准年的地区生产总值平减指数来消除物价变动的影响。

数据来自各类统计年鉴,包括《中国城市统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国劳动统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》,以及各地方政府统计部门的官方网站与国家知识产权局等。部分缺失数据采用线性插值技术和ARIMA模型预测技术两种方法进行补充。

研究期界定为2006—2022年。排除若干存在较明显数据缺失的城市,最终纳入考量范围的是282个地级及以上的城市^①。关于各变量的描述性统计见表2。

表2 变量的描述统计

变量	个数	均值	标准差	极小值	极大值
<i>Y</i>	4 794	0.322	0.133	0.021	1.177
<i>D</i>	4 794	0.700	0.519	0.000	7.467
<i>I</i>	4 794	0.462	0.113	0.000	0.910
<i>G</i>	4 794	0.209	0.201	0.035	6.041
<i>H</i>	4 794	4.586	1.154	-1.980	7.975
<i>N</i>	4 794	20.957	19.125	0.398	189.865
<i>F</i>	4 794	2.551	1.568	0.000	7.517
<i>R</i>	4 794	9.817	1.598	3.526	15.298
<i>K</i>	4 794	3.890	2.800	0.009	40.207

①样本未包含的地级市为绥化市、钦州市、三沙市、儋州市、毕节市、铜仁市、拉萨市、日喀则市、昌都市、林芝市、山南市、那曲市、海东市、吐鲁番市、哈密市;同时,限于数据可得性,研究也未涉及香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾省。

4 实证结果

4.1 空间相关性检验

应用空间计量模型的前提是确认变量之间存在着空间相关性。为确保所得检验结果的稳健性,采用全局莫兰指数(Moran's I)与吉里指数(Geary's C)来分析变量的空间关联特性。其中,Moran's I 指数取值介于-1~1之间,其值趋近于0表征空间独立性,取正值和负值分别指示正向与负向空间自相关。相反,Geary's C 指数取值位于0~2之间,当指数等于1时表示无空间关联,取值在0~1之间表明正向空间依赖,在1~2之间则表明负向空间依赖。表3展示了绿色经济效率(Y)变量的全局空间自相关

性的双边检验结果。

根据表3数据,变量 Y 的Moran's I 值均显著为正,且Geary's C 系数均小于1。同时,多数检验的 Z 值统计显著,有力地拒绝了“无空间相关性”的原假设。这些结果共同证实了变量 Y 存在显著的正向空间自相关,因而采用空间计量模型进行分析是合理的。为进一步确证城市绿色经济效率的空间关联性,绘制了2006—2022年度的城市绿色经济效率(Y)Moran散点分布图。如图2所示,绿色经济效率测量值的散点显著聚集于第一及第三象限,表明城市间的绿色经济效率具有正向空间依赖关系,即某一城市绿色经济效率的提升会对周边城市产生积极的外溢效应。

表3 Moran's I 与 Geary's C 指数检验

空间权重矩阵	Moran's I 指数					Geary's C 指数				
	I	$E(I)$	$Sd(I)$	Z	P	C	$E(C)$	$Sd(C)$	Z	P
地理邻接权重矩阵	0.204	-0.004	0.037	5.554	0.000	0.689	1.000	0.063	-4.948	0.000
地理距离权重矩阵	0.057	-0.004	0.005	11.755	0.000	0.912	1.000	0.013	-6.875	0.000
经济距离权重矩阵	0.091	-0.004	0.032	2.925	0.003	0.910	1.000	0.040	-2.236	0.025

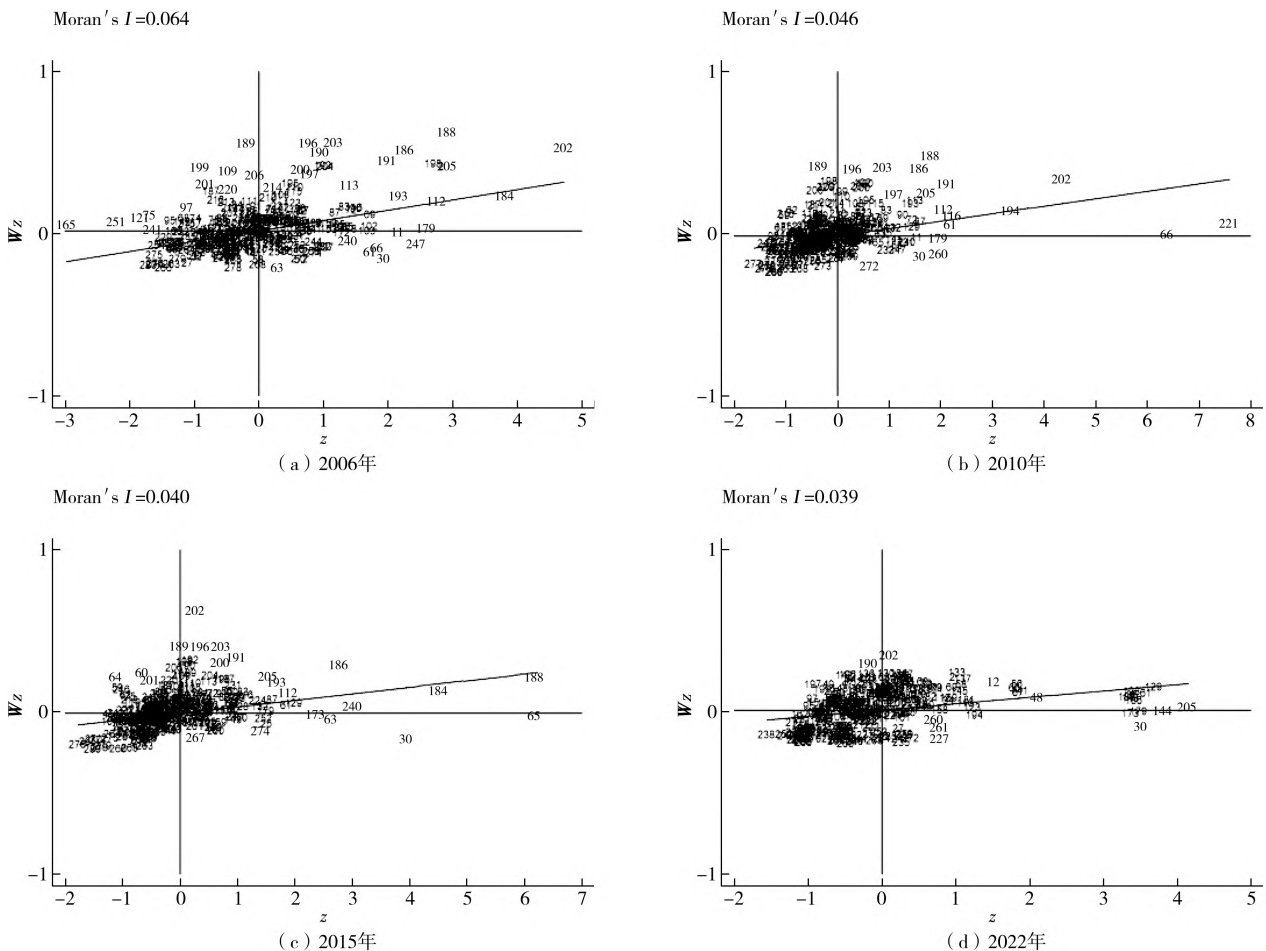


图2 中国城市绿色经济效率的莫兰散点图



4.2 基准回归结果

基于前文空间关联性检验,各城市间绿色经济效率水平显现出空间关联特性,因而采用空间计量模型更为准确,选择空间杜宾模型(SDM)、空间自回归模型(SAR)、空间自相关模型(SAC)及空间误差模型(SEM),并借助最大似然估计方法(MLE)进行参数估计。在构建空间权重矩阵时,采用地理邻接矩阵。表4展示了空间面板回归的具体分析结果。

表4 空间面板模型回归结果

变量	空间杜宾模型(SDM)	空间自回归模型(SAR)	空间自相关模型(SAC)	空间误差模型(SEM)
Y_1	1.038*** (115.64)	0.804*** (66.30)		
D	0.044*** (22.43)	0.009*** (3.19)	0.020*** (5.77)	0.021*** (6.03)
I	0.222*** (21.59)	0.060*** (3.02)	0.079*** (3.01)	0.070*** (2.81)
F	-0.036*** (-35.83)	0.001 (0.31)	0.008*** (4.02)	0.008*** (4.00)
G	0.127*** (22.15)	-0.031*** (-5.02)	-0.021** (-2.63)	-0.021** (-2.60)
R	-0.046*** (-37.26)	0.001 (0.37)	-0.001 (-0.19)	-0.001 (-0.51)
H	0.052*** (48.49)	-0.007*** (-2.76)	-0.019*** (-6.04)	-0.019*** (-6.15)
N	0.001*** (17.48)	-0.000** (-2.06)	-0.001*** (-5.11)	-0.001*** (-5.56)
K	-0.001 (-1.35)	0.002* (1.83)	0.024*** (17.82)	0.023*** (17.47)
$W \times D$	-0.081*** (-95.56)			
ρ	0.809*** (140.11)	0.010** (2.47)	-0.045*** (-3.99)	
λ			0.062*** (6.63)	0.023*** (5.18)
样本量	4 512	4 512	4 794	4 794

注:* $P < 0.10$,** $P < 0.05$,*** $P < 0.01$;括号内数值为z值。

由表4可知,数字产业集聚(D)的系数为正,且通过了统计上的显著性检验,证明数字产业集聚对推动城市绿色经济效率增长的积极作用显著。该实证结论与前期理论分析结果相契合。绿色经济效率(Y)的一阶滞后项(Y_1)系数在1%水平上显著为正。这表明,一个地区前期的绿色经济效率对其当期表现具有显著的延续性影响,体现了绿色发展的路径依赖特征。空间杜宾模型显示,数字产业集聚的空间滞后项($W \times D$)系数在1%水平上显著为负。这表明本地区高水平的数字产业集聚,可能通过人才、技术等要素的“虹吸效应”,对周边地区的绿色经

济效率产生抑制性空间溢出。空间杜宾模型与空间自回归模型的空间自回归系数(ρ)分别在1%和5%水平上显著为正。这证实了绿色经济效率存在正向的空间外溢,即一个地区会被其邻近地区的高绿色效率水平所带动,呈现“高水平集聚”的特征。空间误差模型的空间误差系数(λ)显著为正,表明模型中的误差项同样存在正向的空间相关性。

4.3 内生性检验

数字产业集聚与城市绿色经济效率之间,可能存在因果关系的双向影响,这一状况可能导致内生性问题。本研究采取工具变量法和动态空间面板模型两种方法来缓解内生性问题,以确保估计结果的准确性与可靠性。

4.3.1 工具变量

选择1984年各地邮局的数量作为工具变量来解决内生性问题。选择该工具变量是基于其能有效度量区域通信基础设施的发展程度,这对高层次的数字经济活动具有较大影响,契合工具变量的相关性要求。同时,绿色经济效率指标的时间跨度为2006—2022年,意味着当前绿色经济效率几乎不受20世纪80年代中期邮局数量的影响,保证了该工具变量的外生性。为适应平衡面板数据分析,本研究对这一工具变量进行调整,即采用每百万人中1984年邮局数量与各年份虚拟变量的交乘项作为最终的工具变量^[43]。此外,本研究还运用广义矩估计(GMM)进行回归分析,具体回归结果见表5。

表5 内生性检验结果

变量	GMM	第一阶段回归结果
D	0.085** (2.28)	
O		0.003*** (2.80)
I	0.063*** (2.92)	0.032 (0.38)
F	0.005* (1.89)	0.058*** (7.40)
G	-0.003 (-0.51)	-0.082*** (-2.90)
R	0.010*** (4.67)	-0.035*** (-5.14)
H	-0.001 (-0.14)	-0.033*** (-2.96)
N	0.000 (1.18)	-0.005*** (-9.48)
K	0.033*** (9.74)	0.010** (1.99)
R^2	0.222	0.102

注:* $P < 0.10$,** $P < 0.05$,*** $P < 0.01$;括号内数值为z值。 O 代表1984年每百万人的邮局数量。

4.3.2 动态空间面板

基本的静态空间模型在评估中未能充分考虑绿色经济效率的长期稳定性,可能导致评估偏差。因此,本研究纳入了绿色经济效率的一阶时间滞后项与空间滞后项,构建动态空间面板模型进行分析。在此前阐述的模型序列中,空间杜宾模型与空间自回归模型均属动态空间面板模型范畴,估计结果分别见表4列(1)、列(2)。

表4和表5的结果显示,在采用工具变量和动态空间面板等方法缓解内生性对模型检验结果的影响后,数字产业集聚(D)对绿色经济效率的估计系数依然显著为正,基准回归结果得到进一步验证。

4.4 稳健性检验

表4揭示了运用地理邻接权重矩阵作为空间权重矩阵的回归结果。为确保结论稳健,本研究扩展了空间权重矩阵的构建方法,采用地理距离权重矩阵及经济距离权重矩阵作为替代,并将这些矩阵应用于空间杜宾模型、空间自回归模型、空间自相关模型以及空间误差模型,以保证回归结果的一致性。回归分析结果见表6。

由表6可知,不论采取地理距离或是经济距离权重矩阵,数字产业集聚(D)的估计系数均显著为正,并且所有模型的产业集聚系数均通过了显著性检验。这一发现与表4的估计结果高度契合,进一步证实了回归结果的稳健性。在空间杜宾模型中,数字产业集聚的空间滞后项($W \times D$)的系数为负向,并且通过了显著性检验,与表4中 $W \times D$ 系数的估计结果一致,表明了该结论的强稳健性。此外,多数模型中绿色经济效率的空间滞后项系数 ρ 及空间误差项系数 λ 也通过了显著性检验,有力证明了所构建空间计量模型的合理性。

5 作用机制分析

前文从理论层面探讨了数字产业集聚影响绿色经济效率的作用机制,即数字产业集聚通过推动技术进步间接促进城市绿色经济效率提升。在此基础上,构建空间自相关模型(SAC)方法进行实证验证:

$$T_{i,t} = \eta \times W \times T_{i,t} + \alpha_1 D_{i,t} + \alpha_2 X_{i,t} + u_i + v_t + \varepsilon_{i,t} \quad (8)$$

表6 稳健性检验结果

变量	空间杜宾模型(SDM)		空间自回归模型(SAR)		空间自相关模型(SAC)		空间误差模型(SEM)	
	地理距离权重矩阵	经济距离权重矩阵	地理距离权重矩阵	经济距离权重矩阵	地理距离权重矩阵	经济距离权重矩阵	地理距离权重矩阵	经济距离权重矩阵
Y_t	0.926*** (105.48)	0.806*** (66.87)	0.817*** (67.26)	0.806*** (66.46)				
D	0.284*** (141.32)	0.006** (2.23)	0.006** (2.26)	0.009*** (3.16)	0.020*** (5.83)	0.014*** (4.14)	0.020*** (5.82)	0.021*** (6.09)
I	2.436*** (230.18)	-0.005 (-0.27)	0.079*** (3.95)	0.059*** (2.96)	0.074*** (3.00)	0.015 (0.81)	0.074*** (2.98)	0.062** (2.53)
F	-0.334*** (-330.32)	-0.000 (-0.13)	0.001 (0.47)	0.001 (0.42)	0.009*** (4.35)	0.006*** (3.27)	0.009*** (4.41)	0.008*** (4.09)
G	1.002*** (172.22)	-0.042*** (-8.06)	-0.038*** (-6.13)	-0.031*** (-5.00)	-0.024*** (-3.00)	-0.015*** (2.85)	-0.024*** (-3.00)	-0.021*** (-6.17)
R	-0.194*** (-160.43)	0.001 (0.46)	0.002 (1.08)	0.001 (0.42)	-0.000 (-0.06)	0.007*** (4.60)	-0.000 (-0.00)	-0.002 (-0.67)
H	0.373*** (351.50)	-0.006** (-2.53)	-0.003 (-1.27)	-0.007*** (-2.75)	-0.018*** (-5.86)	-0.010*** (-3.64)	-0.018*** (-5.88)	-0.019*** (-6.17)
N	-0.017*** (-209.35)	-0.000 (-0.46)	-0.000 (-0.54)	-0.000** (-2.22)	-0.001*** (-5.19)	-0.000 (-1.30)	-0.001*** (-5.16)	-0.001*** (-6.09)
K	-0.014*** (-24.31)	0.002 (1.62)	0.000 (0.00)	0.002* (1.81)	0.022*** (17.09)	0.019*** (15.06)	0.023*** (17.31)	0.022*** (17.40)
$W \times D$	-16.300*** (-632.1)	-0.016** (-2.20)						
ρ	125.202*** (1828.50)	0.102*** (4.97)	1.922*** (22.19)	0.038 (1.70)	0.196 (1.33)	0.503*** (13.87)		
λ					0.537*** (4.70)	-0.426*** (-9.11)	0.626*** (8.45)	0.052** (2.02)
样本量	4 512	4 512	4 512	4 512	4 794	4 794	4 794	4 794

注:* $P < 0.10$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$;括号内数值为 z 值。

$$\varepsilon_{i,t} = \lambda \times W \times \varepsilon_t + v_{i,t} \quad (9)$$

构建空间误差模型(SEM)如下:

$$T_{i,t} = \alpha_1 D_{i,t} + \alpha_2 X_{i,t} + u_i + v_t + \varepsilon_{i,t} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{i,t} = \lambda \times W \times \varepsilon_t + v_{i,t} \quad (11)$$

式(8)—式(11)中: $T_{i,t}$ 代表绿色技术进步,采用绿色专利申请数来衡量; $\eta \times W \times T_{i,t}$ 代表被解释变量 T 的空间滞后项; η 代表空间自回归系数; W 为空间权重矩阵; α_1 和 α_2 分别代表核心解释变量 D 和控制变量 X 对被解释变量绿色技术进步(T)的影响程度;其余变量的含义与公式(1)相同。

由表7可知,数字产业集聚对绿色技术发展的促进效应显著,其在所有模型中的估计系数均为正向且通过了显著性检验。这表明,数字产业的集聚发展能有效提升区域绿色专利的申请数量,加速绿色技术革新进程。这一结果证实了理论分析中关于作用机制的假说,即数字产业集聚对城市绿色经济效率的促进作用可能源于数字产业集聚对绿色技术的推进作用。根据理论分析,数字产业集聚通过技术路径重构、基础设施降本与政策市场协同三重机制,系统性加速绿色技术进步,并最终全面提升城市绿色经济效率。这三重机制产生的原因可归结于:一是数字产业集群内,数字技术使得企业知识和技术的传递突破地理与知识类型的限制,实现绿色技术的高效共享和虚拟化传递;二是数字产业集聚区依托数字基础设施,为绿色技术研发提供低成本试验场和规模化支持;三是中国政府针对数字产业集聚区的定向政策与市场机制设计进一步强化数字产业集聚对绿色技术的促进作用。绿色技术的进步是增强区域绿色经济效率的关键驱动力。因此,数字产业的集聚发展通过促进绿色技术创新这一机制,对城市绿色经济效率产生了间接但强有力的提升作用。

6 结论和对策建议

本研究基于2006—2022年中国282个城市的面板数据,运用空间计量经济学方法,系统考察了数字产业集聚对城市绿色经济效率的影响效应、作用机理及空间溢出效应,得出如下研究结论。

(1)数字产业的高度集聚对本城市的绿色经济效率具有显著的直接提升作用。这一结论在多种空间模型设定(SDM、SAR、SAC、SEM)及不同空间权重矩阵(邻接、距离、经济)下均得到一致验证。针对潜在的内生性问题,本研究综合采用了工具变量法(以1984年邮局密度作为工具变量)和动态空间面板模型(纳入被解释变量滞后项)进行修正。稳健性检验结果表明,在控制内生性干扰后,核心结论(本地促进效应、空间抑制效应及绿色技术

表7 作用机制的实证结果

变量	空间自相关模型(SAC)	空间误差模型(SEM)
D	145.965*** (6.69)	141.490*** (6.47)
I	144.207 (0.98)	135.139 (0.87)
F	-0.026 (-0.17)	-0.020 (-0.13)
G	25.893 (0.53)	0.576 (0.01)
R	0.004*** (68.72)	0.004*** (70.35)
H	-0.056 (-0.64)	-0.035 (-0.40)
N	0.825 (0.89)	1.046 (1.10)
K	26.358*** (3.36)	26.746*** (3.24)
η	0.039*** (6.91)	
λ	0.010 (1.20)	0.055*** (13.74)
R^2	0.624	0.612

注:*** $P < 0.01$;括号内数值为 z 值。

创新的中介作用)依然稳健成立,证明了研究发现的可靠性。

(2)数字产业的集聚发展对周边城市绿色经济效率产生了显著的负向空间溢出效应(虹吸效应),即本地数字产业集聚度增强会抑制邻近地区的绿色经济效率增长。该效应的核心传导机制为人才虹吸阻碍创新。机制检验与理论分析共同表明,这一负向空间溢出的核心传导路径是人才要素的单向流动。高度集聚的数字产业中心凭借综合优势,持续吸引周边城市的高端技术人才流入,导致邻域创新人才(特别是绿色技术研发人才)流失,进而显著阻碍了周边城市的绿色技术创新进程(T),最终抑制其绿色经济效率(Y)的提升。这为理解数字时代区域发展不平衡提供了微观机制解释。这一结论突破空间依赖局限,系统量化了“本地—邻域”双重空间效应:显著的正向本地促进效应(H1得到验证)与显著的负向空间溢出效应(H2得到验证)。这一发现突破了传统研究忽视空间依赖性的局限,为理解数字产业集群的空间局部性提供了严谨的实证证据。

(3)机制分析表明,绿色技术创新是数字产业集聚影响城市绿色经济效率的关键中介路径。数字产业集聚通过重构知识溢出路径(虚拟化)、降低绿色创新成本(集约化)以及强化政策市场协同(协同化)三重微观机制,有效加速了本地绿色技术进步,进而提升了本地绿色经济效

率。同时,其对周边城市的抑制效应主要通过人才虹吸来阻碍邻域的绿色技术创新进程。该机制分析构建了“技术-经济-制度”融合的机制框架,不仅验证了绿色技术创新的核心中介作用,更从知识溢出虚拟化、创新成本集约化、政策市场协同化三重视角,深入揭示了数字产业集聚促进绿色技术创新的微观机理。这一融合框架深化了对数字产业赋能绿色效率提升内在逻辑的理解,补充和完善了相关理论。

本研究揭示的数字产业集聚的“双刃剑”效应——强劲的本地绿色效率提升与显著的邻域虹吸抑制,具有一定的现实意义。①要警惕区域发展失衡加剧风险,若缺乏有效协调,数字产业的过度集中可能加剧“强者愈强、弱者愈弱”的马太效应,拉大区域间绿色发展的差距,不利于共同富裕目标的实现和全国统一大市场的构建。②为优化国家战略布局提供关键依据,为优化“东数西算”等国家重大工程布局提供了实证支撑。在引导数据中心等设施西移的同时,需配套强有力的措施吸引和留住中西部人才,扭转单向虹吸,促进区域间创新要素的良性互动。③构建跨区域协同发展新范式,破解虹吸困境需要创新区域协调机制。例如,创新资源协同机制,建立跨区域的“数字+绿色”技术共享平台、人才联合培养与柔性引进机制、研发合作网络,促进知识在区域间双向溢出;在国家级战略(如“东数西算”)中统筹布局,引导数字基础设施与关联产业梯度转移,并在承接地区配套人才政策,缓解单向虹吸。

针对以上研究结论,本研究提出以下对策建议。

(1)构建数字产业集群与绿色技术创新的协同发展机制。强化绿色技术研发的定向支持:基于数字产业集聚对绿色技术创新的促进作用,建议设立国家级绿色技术专项基金,重点支持数字产业集群内的共性技术攻关(如清洁能源算法优化、碳捕集区块链平台等)。通过税收抵免、研发费用加计扣除等政策,激励企业将数字技术应用于节能减排场景。完善“政产学研用”协同创新网络:依托数字产业集群建立绿色技术孵化器,推动龙头企业联合高校、科研机构组建创新联合体。例如,在京津冀、长三角等数字产业密集区试点“数字+绿色”技术共享平台,促进绿色专利跨区域转化应用。

(2)优化区域数字产业布局以缓解虹吸效应。实施梯度化数字产业转移政策:针对中西部城市因人才外流导致的绿色技术滞后问题,通过“东数西算”工程引导数据中心等数字基础设施向中西部布局,配套专项人才引进计划(如“数字绿领”工程),鼓励东部数字企业在中西部设立研发分支机构并给予用地、融资支持。建立跨区域绿色技术补偿机制:对因虹吸效应导致绿色经济效率受损的周边城市,可通过横向财政转移支付或碳排放权

交易收益分成,补偿其技术研发投入。同时,推动数字产业集群与周边城市签订技术溢出协议,定期举办绿色技术路演与人才交流活动。

(3)深化数字基础设施与绿色技术应用场景融合。加速新型数字基建的绿色赋能:在5G基站、算力中心建设中强制嵌入绿色标准,推广AI能效优化系统;支持数字产业园率先建设“零碳园区”,通过物联网实时监测能耗与排放数据,形成可复制的绿色运营模式。拓展数字技术驱动的绿色应用场景:在重点行业(如制造业、交通)实施“数字+绿色”示范工程,鼓励企业利用工业互联网优化生产工艺流程,对应用数字技术实现能效提升超20%的企业给予阶梯式奖励。

(4)健全绿色技术创新的市场化支撑体系。创新绿色金融工具:依托数字产业集群试点“绿色技术银行”,为中小微企业提供基于区块链的绿色技术质押融资服务;鼓励金融机构发行绿色数字债券,重点支持智慧能源、循环经济等领域的创新项目。构建全国性绿色技术交易平台:整合现有区域交易所资源,建立统一的数据确权与交易规则,推动绿色算法、碳核算模型等数字知识产权市场化流通,并通过智能合约确保技术交易透明可信。

参考文献

- [1] 中国信息通信研究院. 中国数字经济发展研究报告(2023年)[R]. 北京:中国信息通信研究院,2023.
- [2] BROERSMA L, OOSTERHAVEN J. Regional labor productivity in the Netherlands: evidence of agglomeration and congestion effects [J]. *Journal of regional science*, 2009, 49(3): 483-511.
- [3] 辛璐璐. 数字产业集聚、颠覆式技术创新与城市绿色经济效率 [J]. *学习与实践*, 2023(10): 71-80.
- [4] YOON S, NADVI K. Industrial clusters and industrial ecology: building “eco-collective efficiency” in a South Korean cluster [J]. *Geoforum*, 2018, 90: 159-173.
- [5] WANG N, ZHU Y M, YANG T B. The impact of transportation infrastructure and industrial agglomeration on energy efficiency: evidence from China's industrial sectors [J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 244: 118708.
- [6] HE Z W, CHEN Z Y, FENG X. Different types of industrial agglomeration and green total factor productivity in China: do institutional and policy characteristics of cities make a difference? [J]. *Environmental sciences Europe*, 2022, 34(1): 64.
- [7] WANG M X, LI Y L, LIAO G K. Spatial spillover and interaction between high-tech industrial agglomeration and urban ecological efficiency [J]. *Frontiers in environmental science*, 2022, 10: 829851.
- [8] LIU W, YANG X, ZHANG J X, et al. The spatiotemporal evolution of the effect of industrial agglomeration on industrial green economic efficiency: empirical evidence from pollution-intensive industries in China [J]. *Environment, development and sustainability*, 2024, 26



- (4):9945-9972.
- [9] XIE R, YAO S L, HAN F, et al. Land finance, producer services agglomeration, and green total factor productivity[J]. *International regional science review*, 2019, 42(5/6): 550-579.
- [10] 张雪梅, 罗文利. 产业集聚对区域生态效率的影响研究: 基于西部的省际数据[J]. *南京航空航天大学学报(社会科学版)*, 2016, 18(3): 23-26.
- [11] 何宜庆, 陈林心, 焦剑雄, 等. 金融集聚的时空差异与省域生态效率关系研究[J]. *数理统计与管理*, 2017, 36(1): 162-174.
- [12] 王锋, 李紧想, 张芳, 等. 金融集聚能否促进绿色经济发展: 基于中国 30 个省份的实证分析[J]. *金融论坛*, 2017, 22(9): 39-47.
- [13] 王志祥, 张洪振, 龚新蜀, 等. 物流产业集聚、市场分割与区域绿色经济效率[J]. *经济经纬*, 2018, 35(5): 87-93.
- [14] CHEN C F, SUN Y W, LAN Q X, et al. Impacts of industrial agglomeration on pollution and ecological efficiency: a spatial econometric analysis based on a big panel dataset of China's 259 cities [J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 258: 120721.
- [15] CHEN H, LI L, LEI Y L, et al. Public health effect and its economic loss of PM_{2.5} pollution from coal consumption in China[J]. *Science of the total environment*, 2020, 732: 138973.
- [16] HOU H, GUO H H, YUN X F. Exploring the impact of environmental regulation and economic agglomeration on ecological efficiency in China[J]. *Polish journal of environmental studies*, 2022, 31(2): 1109-1124.
- [17] 林伯强, 谭睿鹏. 中国经济集聚与绿色经济效率[J]. *经济研究*, 2019, 54(2): 119-132.
- [18] 陈阳, 唐晓华. 制造业集聚和城市规模对城市绿色全要素生产率的协同效应研究[J]. *南方经济*, 2019(3): 71-89.
- [19] 岳书敬, 邹玉琳, 胡姚雨. 产业集聚对中国城市绿色发展效率的影响[J]. *城市问题*, 2015(10): 49-54.
- [20] 胡安军, 郭爱君, 钟方雷, 等. 高新技术产业集聚能够提高地区绿色经济效率吗?[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(9): 93-101.
- [21] 张治栋, 秦淑悦. 产业集聚对城市绿色效率的影响: 以长江经济带 108 个城市为例[J]. *城市问题*, 2018(7): 48-54.
- [22] 孙绪芹, 陆雪艳. 新质生产力赋能的产业协同集聚、技术创新与绿色经济效率: 基于空间计量模型的中介效应分析[J]. *西南大学学报(社会科学版)*. 2024, 50(5): 42-55.
- [23] 焦焘, 郭金花, 赵国浩. 数字产业集聚、地方政府竞争与城市绿色经济效率[J]. *经济经纬*, 2023, 40(6): 51-60.
- [24] 刘耀彬, 邓伟凤, 李硕硕, 等. 数字产业集聚对减污降碳协同的影响: 以长江经济带为例[J]. *资源科学*, 2024, 46(4): 744-760.
- [25] LI P, FU H Y, LI Y T. Core industry agglomeration of digital economy and green total factor productivity: evidence from China [J]. *E&M economics and management*, 2022, 25(4): 40-57.
- [26] 赵放, 蒋国梁, 徐熠, 等. 数字产业集聚赋能区域绿色技术创新: 创新要素与创新环境双重视角[J]. *科技进步与对策*, 2024, 41(18): 1-11.
- [27] 王彦杰, 高启杰. 数字经济产业集聚对绿色技术创新的影响: 基于环境规制的调节效应分析[J]. *技术经济*, 2023, 42(2): 20-30.
- [28] JIANG G H, CHEN F Z. Digital industry agglomeration, resource dependence and urban green economy efficiency [J]. *Applied economics*, 2024: 1-14.
- [29] MA R L, LIU H, LI Z P, et al. Promoting sustainable development: revisiting digital economy agglomeration and inclusive green growth through two-tier stochastic frontier model [J]. *Journal of environmental management*, 2024, 355: 120491.
- [30] YUAN D, DU J J, PAN Y G, et al. The collaborative agglomeration of industries and the realization of the digital economy on the green high-quality development of cities [J]. *Business process management journal*, 2025, 31(4): 1222-1245.
- [31] CICCONE A, HALL R E. Productivity and the density of economic activity [J]. *American economic review*, 1996, 86(1): 54-70.
- [32] 师磊, 阳镇, 钱贵明. 数字产业集群政策与关键核心技术突破式创新[J]. *中国工业经济*, 2025(1): 100-117.
- [33] 李天健, 李伟. 数字产业集群发展: 竞争优势重塑与政策范式重构[J]. *经济学家*, 2025(2): 35-44.
- [34] 赵放, 张森. 数字产业地理集聚与虚拟集聚融合推进中国式现代化[J]. *山西大学学报(哲学社会科学版)*, 2025, 48(1): 27-35.
- [35] 王俊豪, 谢倩莹, 史丹. 绿色技术创新对能源效率的影响研究 [J]. *财贸经济*, 2024(6): 143-159.
- [36] 谢荣辉. 绿色技术进步、正外部性与中国环境污染治理[J]. *管理评论*, 2021, 33(6): 111-121.
- [37] 王震, 谢赤. 绿色技术创新如何突破同质壁垒和虹吸效应? [J]. *科学学研究*, 2024, 43(5): 1014-1026.
- [38] 柳卸林, 王宁, 吉晓慧, 等. 中心城市的虹吸效应与区域协调发展[J]. *中国软科学*, 2022(4): 76-86.
- [39] 王迪, 张芷媛, 汪小龙. 高技术产业集聚何以促进区域绿色技术创新: 基于知识溢出与市场双重视角[J]. *科技进步与对策*, 2025, 42(12): 49-58.
- [40] KAO C. Spurious regression and residual-based tests for cointegration in panel data [J]. *Journal of econometrics*, 1999, 90(1): 1-44.
- [41] 关会娟, 许宪春, 张美慧, 等. 中国数字经济产业统计分类问题研究[J]. *统计研究*, 2020, 37(12): 3-16.
- [42] 詹新宇, 刘文彬. 中国式财政分权与地方经济增长目标管理: 来自省、市政府工作报告的经验证据[J]. *管理世界*, 2020, 36(3): 23-39.
- [43] 李治国, 王杰. 数字经济发展、数据要素配置与制造业生产率提升[J]. *经济学家*, 2021(10): 41-50.

Impact of digital industry agglomeration on urban green economic efficiency and its spatial spillover effects

HU Yanxin¹, LI Zhengtao², SHU Haicheng³, LUO Haiyan⁴

- (1. School of Economics and Management, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710021, China;
2. School of Economics, Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou Zhejiang 310018, China;
3. School of Economics, Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu Sichuan 611130, China;
4. School of Sports Economics and Management, Xi'an Physical Education University, Xi'an Shaanxi 710068, China)

Abstract Digital industry agglomeration has become a key pathway for driving green transformation. However, traditional industrial agglomeration has long faced the “agglomeration paradox,” wherein excessive concentration leads to imbalanced factor allocation and diminished innovation. Through what mechanisms does digital industry agglomeration affect urban green economic efficiency, and what characteristics define its spatial effects? To systematically address these questions, this study integrated spatial economics and technology spillover theory to construct a three-dimensional “technology-economy-institution” analytical framework. It proposed the dual-effect hypothesis of “local promotion–neighboring inhibition,” with a focus on analyzing the mediating role of green technology innovation and the spatial transmission pathway of talent siphoning. Using balanced panel data from 282 Chinese cities from 2006 to 2022, the study employed a dynamic spatial Durbin model (SDM) as the primary analytical tool, supplemented by the Spatial Autoregressive (SAR), Spatial Autocorrelation (SAC), and Spatial Error (SEM) models for empirical analysis. The results showed that: ① The local promotion effect was significant. Specifically, for every one-unit increase in digital industry agglomeration, local green economic efficiency increased by an average of 4.42% (SDM estimate). ② The spatial siphoning effect was prominent, with local digital industry agglomeration exerting significant negative spillover effects on neighboring cities. Talent factor mobility served as a key carrier for this negative spatial spillover, as high concentration in core cities accelerated the outflow of high-tech talent from neighboring cities, thereby inhibiting their green technology innovation capacity. ③ Green technology innovation functioned as the core mediating pathway, shaped by micro-level mechanisms such as the virtualization of knowledge spillovers, the intensification of innovation costs, and policy-market coordination. Accordingly, this study proposes differentiated governance pathways: establishing a mechanism for the coordinated development of digital industry agglomeration and green technology innovation; optimizing regional digital industry layout to alleviate siphoning effects; deepening the integration of digital infrastructure with green technology application scenarios; and improving the market-based support system for green technology innovation. By quantifying the dual “local–neighboring” effects, analyzing triple micro-mechanisms, and revealing the siphoning transmission pathway, this study provides new evidence for industrial agglomeration theory in the digital economy era. The proposed policy framework of “regional compensation–technology sharing–institutional synergy” offers an operational paradigm for addressing regional imbalances in the context of green transformation.

Key words industrial agglomeration; digital industry; green economic efficiency; spatial spillover effect

(责任编辑:王爱萍)