

引用格式: 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. [Liu Y B, Deng W F, Li S S, et al. The impact of digital industry agglomeration on synergistic pollution reduction and carbon emission reduction: Taking the Yangtze River Economic Belt as an example[J]. Resources Science, 2024, 46(4): 744-760.] DOI: 10.18402/resci.2024.04.07

数字产业集聚对减污降碳协同的影响 ——以长江经济带为例

刘耀彬¹, 邓伟凤¹, 李硕硕^{1,2}, 魏国恩², 李汝资¹

(1. 南昌大学 经济管理学院, 南昌 330031; 2. 南昌大学 资源与环境学院, 南昌 330031)

摘要:【目的】“数字化”与“绿色化”能否协同是高质量发展与高水平保护研究领域的重要科学问题之一。长江经济带作为数字产业重要集群带和减污降碳协同的重点区域, 数字产业集聚能否实现其减污降碳协同增效, 事关美丽中国建设与双碳目标的实现。【方法】基于2010—2020年长江经济带108个城市的数字产业股权投资数据和环境污染与碳排放数据, 刻画其数字产业时空格局及减污降碳时空演化特征, 采用固定效应模型探究数字产业集聚对减污降碳协同的影响及作用机制, 并构建空间杜宾模型分析其空间溢出效应和衰减边界。【结果】研究发现: ①长江经济带数字产业投资网络呈现出“多线程、多极化”的空间演化趋势, 净投资流表现出明显的“郊区化”倾向, 形成“中心流出、外围承接”的分布格局。②数字产业集聚显著地促进了减污降碳, 且兼具减污降碳协同效应, 这一结论在一系列内生性及稳健性检验后仍然稳健。机制检验发现, 数字产业集聚能够通过规模经济效应、产业升级效应和技术创新效应促进区域减污降碳协同增效。③数字产业集聚对减污降碳协同具有显著的正向空间溢出效应, 这种效应随着空间距离的增大呈现“右拖尾U型”特征。同时, 在250 km以内为空间溢出效应的“增强”区域, 250~450 km之间为“衰减”区域, 450 km以外空间溢出效应趋近于0且不再显著。【结论】研究证实了发挥数字产业的集聚效应能够有效地促进区域减污降碳协同增效, 据此建议推进数字产业集聚与网络化发展、鼓励数字产业跨区域投资, 并提出了差异化的减污降碳协同策略。

关键词: 数字产业集聚; 减污降碳; 协同增效; 溢出效应; 空间衰减边界; 空间杜宾模型; 长江经济带

DOI: 10.18402/resci.2024.04.07

1 引言

当前, 中国经济社会发展已进入加快绿色化、低碳化的高质量发展阶段, 然而生态环境保护结构性、根源性、趋势性压力尚未根本缓解。近年来, “蓝天保卫战”取得了显著成效^[1], 但截至2021年, 全国仍有35.7%的城市空气质量尚未达标。同时, 2021年中国碳排放总量达到114.7亿t, 占全球碳排放总量的比重依然可观^[2]。面对环境质量改善与温室气体减排的双重压力, 减污降碳协同治理成为中国全面绿色转型的必然选择。中国生态环境部等七部门于2022年联合印发了《减污降碳协同增效实

施方案》, 致力于加快推进区域减污降碳协同增效。与此同时, 数字经济规模的快速增长促使数字产业经历了由量的扩张到质的提升的转变^[3]。数字产业突破性的生产技术和商业模式为产业绿色转型升级提供了支撑^[4], 而数字产业的电力需求又导致电力消耗加快, 反过来加剧了环境污染与碳排放^[5,6]。此外, 数字技术的高渗透性、规模效应及溢出效应使数字产业发展具备较强的空间关联性, 具体表现在产业向核心区集聚和向外围区扩散的态势^[7]。数字空间网络化与环境治理协同化逐渐呈现出相互促进、融合发展的趋势。因此, 解析数字产业集聚对

收稿日期: 2023-12-04; 修订日期: 2024-01-27

基金项目: 国家科技重点研发专项课题(2022yfd1600603); 国家自然科学基金青年项目(42101168)。

作者简介: 刘耀彬, 男, 湖北麻城人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为生态经济与区域经济。E-mail: liuyaobin2003@163.com

通讯作者: 李硕硕, 男, 山东博兴人, 博士, 助理研究员, 研究方向为生态经济与区域经济。E-mail: lishuoshuo95@163.com

2024年4月

减污降碳协同的影响及其空间溢出效应有助于美丽中国建设和碳中和碳达峰目标的实现。

现有研究多关注政策因素、社会经济因素、能源结构调整、生产流程升级和节能技术等对减污降碳协同的影响^[8-11]。作为一种新经济形态,数字经济通过数字产业化和产业数字化等发展模式,产生了巨大的经济效益和潜在的环境效益^[12,13]。对于数字经济与减污降碳的关系,现有学者主要从以下3个方面展开研究:①从宏观和整体层面探讨数字经济发展对减污降碳的影响。研究发现,数字经济降低了各类污染物的排放,其中对SO₂的减排作用最明显^[14],且通过能源结构改善和有偏技术进步、产业结构合理化和改善等显著降低了碳排放强度^[15,16]。同时,数字经济对城市碳排放的改善效应具有明显的空间异质性和空间外溢效应^[17]。②从微观和产业数字化层面探究企业数字化转型所带来的减污降碳效应。认为企业数字化转型能够通过促进其技术创新和生产经营结构优化来实现节能减排^[18],数字技术的采用降低了企业生产中的能源消耗和污染^[19,20]。③从数字基础设施层面,探究智慧城市或宽带中国建设对减污降碳的影响。研究发现智慧城市和宽带中国建设能够显著减少区域环境污染和二氧化碳排放^[21-23]。

从现有研究来看,数字产业既表现出一般产业集聚的共性,亦有其自身空间分布的独特性^[24-27]。多数学者运用引力模型、GIS空间分析方法等,从关联关系的角度刻画了数字经济的空间关联特征^[28-30]。数字产业集聚对减污降碳的影响并未得到共识。有学者指出,计算机、通信及电子信息制造业等相关数字产业的集聚会导致电力消耗快速增长,且数字技术的采用增加了生命周期中的能源消耗和资源使用,致使环境污染和碳排放显著增加^[5,6]。然而,更多研究发现,数字产业集聚能够推动数字技术的不断创新,且数字技术的应用会影响生产规模、产品结构和流程效率,使得企业节能减排的效率不断提升,从而促进企业生产过程中减污降碳^[31,32]。此外,数字产业集聚会带来人才、技术、数据等要素的流动,可能通过耦联效应^[33]、溢出效应^[34]和扩散效应^[35]等,促进交通、建筑、教育和医疗等传统行业的数字化转型,并减少其能源消耗与碳排放,具有巨大的跨产业减排效应^[4,31]。综合来看,现有研

究为本文解释数字产业集聚对减污降碳协同的影响提供了一定理论支撑和实证经验,但仍存在亟待探索之处。一方面,如何从“现实流”的角度出发揭示数字产业的空间格局和演化规律需要进一步探讨。另一方面,由于数字产业的“双刃剑”作用和集聚外部性,如何揭示数字产业集聚对减污降碳协同的作用机制也是一个值得研究的话题。

长江经济带作为国家重大战略区之一,是推进减污降碳协同的重点区域。长江经济带数字产业和减污降碳表现出什么样的空间特征,数字产业集聚对减污降碳协同的影响及其机制如何,是否存在空间溢出效应和衰减边界,值得探讨。本文基于2010—2020年数字产业股权投资数据刻画长江经济带数字产业的空间格局与演化规律,进而采用固定效应模型和空间杜宾模型探究数字产业集聚对减污降碳协同的影响和空间溢出效应,以期为长江经济带高质量发展与高水平保护提供理论依据。

2 理论框架

数字产业以工业互联网、区块链、云计算、大数据等产业为主,具有“低能耗、高产出、高回报”的特征^[11]。根据产业集聚理论^[30,36]、集聚外部性理论^[36]和核心-边缘圈层理论^[30],数字产业往往通过虹吸效应和极化效应在空间上形成核心集聚区,而后随着时间推移向周围区域扩散,产生空间溢出效应,从而形成了复杂的空间网络结构。数字产业集聚可能通过规模经济效应、产业升级效应和技术创新效应促进区域减污降碳协同,并通过涓滴效应、学习效应和共享效应产生空间溢出效应(图1)。

数字产业集聚与生态环境的互动作用起源于环境地理学中人地关系认识的演变与发展,数字产业因其绿色低碳、融合创新和开放共享的特征可能对环境产生正向效应^[37]。

(1)数字产业集聚激发数据资本、数字技术和数字新基建指数型增长,衍生规模经济效应促进数字经济发展。数字产业集聚加速了数据资本和数字技术涌现,推动了数字新基建空间布局,创造出新的商业模式和业态^[38]。同时,数字产业集聚所带来的新模式与新业态通过影响消费者选择性偏好,改变了消费者出行和消费的方式,对居民生活过程产生替代效应^[24,36],促进绿色生活方式转型。如,通过线上会议、在线购物、3D建模、虚拟仿真以及VR

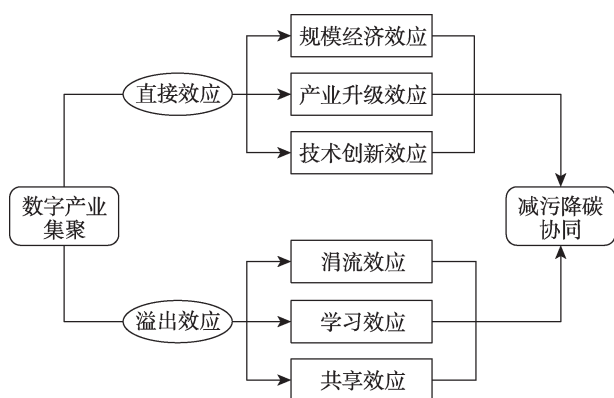


图1 数字产业集聚对减污降碳协同的影响及空间溢出效应

Figure 1 The impact and spatial spillover effects of digital industry agglomeration on pollution reduction and carbon emission reduction synergy

体验降低了居民生活中的资源和能源消耗,进而促进区域减污降碳协同^[39,40]。

(2)数字产业集聚推动数字技术和数据要素赋能传统产业,衍生产业升级效应促进产业数字化转型。作为开放、共享、共生的生态体系,数字产业集聚尤其是网络平台的出现为传统经济注入了新的活力^[38]。数字产业的强连接力加速了产业的跨界融合和协同生产进程,推动产业结构向高级化、数字化和绿色化转型升级^[41],进而提升了高污染、高耗能行业的能源利用效率和资源配置效率,促进节能减排与减污降碳^[42]。一方面,传统产业可以利用数字技术对产品数据和资源数据进行分析和规划重组,提高企业生产率和能源利用效率,避免资源浪费进而达到节能减排的目的^[31,43]。另一方面,企业通过发挥数据要素的替代效应,将其融入到劳动、资本和技术等传统生产要素中,改造或替代传统生产要素,减少高污染、高耗能资源的使用^[4]。

(3)数字产业集聚能够模糊创新阶段边界,衍生技术创新效应促进知识技术高效化共享和产品服务快速化迭代^[38,44]。数字产业集聚带来了数字技术和数据要素的集聚,有效降低了信息搜寻成本和社会交易成本,促使创新资源聚集^[45]。同时,数字产业集聚激发了数字资本的集聚,推动了数字金融的发展,进而降低了金融服务成本和门槛,提升创新资金的可获得性^[46]。此外,互联网、区块链等数字技术在生产领域的应用打破了传统产业内涵边界,以物联网为载体的产业数字化转型加强了产业协同创新效应,实现创新效率的提升^[47]。数字产业通过

推动创新要素集聚、创新资金获取和创新效率提升能够促进绿色技术的研发与应用,进而在生产源头上促进区域减污降碳协同治理。因此,基于上述分析,本文提出如下假设:

H1:数字产业集聚通过规模经济效应、产业升级效应和技术创新效应促进减污降碳协同。

区域相互依赖理论主要体现为区域之间的相互作用,区域“流空间”的发展使得信息流、人流、物流、技术流可以在区域范围内顺畅流动,形成“经济流”和“环境流”,进而产生经济和环境效益^[48]。数字产业集聚进一步强化了网络经济形态,使得社会网络具有明显的网络外部性,产业集聚动力源以“马太效应”触发网络系统的正外部性,推动区域间数据资本和数字技术交互^[20,49],并通过涓滴效应、学习效应和共享效应促进外围区的减污降碳协同。①涓滴效应。当数字产业核心集聚区的规模超过一定阈值,会通过产业转移、对外投资和母子公司的形式向周边地区扩张,促进接收地区的数字产业发展,以“马太效应”触发网络正外部性,激发接收地区的环境效益与经济效益^[41]。②学习效应。传统产业形态追求产业内上下游企业在地理空间上的集聚,而数字技术突破了地理空间界限,极大地拓宽了知识、技术的传播渠道与范围,同时大数据、人工智能和云计算等技术有效促进了知识的扩散、吸收和再创新^[47]。因此,数字产业集聚产生的学习效应能够加速相邻地区的数字产业化和产业数字化进程,进而促进其减污降碳协同^[17]。③共享效应。数字产业集聚加速数字化平台涌现,促进数字新基建空间交互与空间共享,从而为周边地区的产业数字化转型提供关键要素,促进其减污降碳协同^[17,20]。由此,提出以下假设:

H2:数字产业集聚具有空间溢出效应,能够促进邻地减污降碳协同。

3 数据、变量与模型

3.1 数据来源

本文选取2010—2020年长江经济带108个城市的面板数据作为研究样本,研究数据包括社会经济数据、SO₂和CO₂排放数据以及数字产业股权投资数据。社会经济数据和SO₂排放数据均来自《中国城市统计年鉴》和各城市的国民经济统计公报。CO₂排放数据采用IPCC法进行计算,数据来源于中

2024年4月

国能源统计年鉴和中国 CO₂ 核算数据库 (CEADs)。2020 年中国信息通信研究院发布的《中国数字经济发展白皮书 (2020 年)》和 2021 年国家统计局公布的《数字经济及其核心产业统计分类》, 明确提出数字产业包括软件与信息技术服务业、互联网与服务产业、电信业、电子信息制造业。本文使用的数字产业投资数据来源于“企研·中国学术大数据平台”中的数字经济产业专题数据库, 涵盖了投资地、被投资地、投资笔数、投资企业数等特征数据。本文对数据进行筛选, 提取出长江经济带 108 个城市的数字产业股权投资数据。由于本地对本地的投资在空间上难以刻画, 且并非城市间的“流”和空间关联, 故剔除了本地投资数据。因部分变量的某些年份存在缺失, 本文通过线性插值法补齐。为了减少数据异常值对结果的干扰, 对部分变量进行了 99.5% 水平上的缩尾处理。

3.2 变量测度

3.2.1 数字产业集聚指标测度

本文采用节点间的投资笔数来表征数字产业联系程度, 考虑到节点之间产业投资流动的差异性和方向性, 通过分析城市群产业投资网络中各城市的点入度, 可以研判不同行业在城市群内的集聚情况, 也能刻画重要节点城市对城市群的带动和辐射能力^[50]。本文以数字产业集聚水平 ($\ln Gather$) 作为核心解释变量, 以点入度表示, 点入度越大表示该城市接收来自其他城市的数字投资笔数越多。公式如下:

$$\ln Gather_{it} = \sum_{j=1}^n r'_{ji} \quad (1)$$

式中: $\ln Gather_{it}$ 为 t 年城市 i 的数字产业集聚水平; r'_{ji} 为 t 年城市 j 向城市 i 的数字投资笔数; n 为城市数量。

3.2.2 减污降碳指标测度

大气污染防治和温室气体减排是目前中国面临的两大严峻挑战, 基于环境污染物和碳排放高度同根同源的特征, 采取一定的控制措施促进二者协同减排兼具重要性及紧迫性^[8]。分别用 SO₂ 排放强度 (城市 SO₂ 排放量与 GDP 的比值, SEI) 和 CO₂ 排放强度 (城市 CO₂ 排放量与 GDP 的比值, CEI) 来表征大气污染物和温室气体的减排效果。同时, 为表征城市减污降碳的效能, 用 SO₂ 强度和 CO₂ 排放强度的交乘项来衡量减污降碳水平 (PCR), 二者均为逆指标, 交乘项可以反映其整体减排程度, 也符合减

污降碳协同治理的系统性^[51], 具体计算公式为:

$$PCR = SEI \times CEI \quad (2)$$

3.2.3 机制变量

结合前文理论分析, 本文从规模经济效应、产业升级效应和技术创新效应 3 个方面实证检验数字产业集聚影响减污降碳协同的具体机制。参考赵涛等^[16]的指标体系, 采用主成分分析法测算城市数字经济水平 ($Digec$), 以衡量数字产业集聚可能带来的规模经济效应。同时, 以第三产业产值占 GDP 的比重衡量产业结构高级化 (Ind), 以城市绿色专利申请总量的对数值衡量绿色技术创新 (GTI), 分别考察数字产业集聚可能带来的产业升级效应和技术创新效应。

3.2.4 控制变量

选取收入水平、人口密度、技术水平、城镇化水平、产业发展规模和政府干预程度作为控制变量。①收入水平, 采用人均 GDP 的对数表征; ②人口密度, 采用每 km² 百人数来衡量; ③技术水平, 采用地方财政一般预算内科学支出占 GDP 的比重来衡量; ④城镇化水平, 采用市区人口占总人口比重来衡量^[52]; ⑤工业发展规模, 采用规模以上工业企业数的对数来衡量; ⑥政府干预程度, 采用扣除科教支出后的政府财政支出占 GDP 的比重来衡量。本文采用方差膨胀因子 VIF 进行多重共线性检验, VIF 值均小于 4, 由此推断变量间不存在严重的多重共线性问题。进一步采用 LLC 检验方法对变量进行单位根检验, 结果显示所有变量均在 1% 水平下拒绝了单位根存在, 相关序列是水平平稳的, 可以进行计量估计。相关变量描述性统计见表 1 所示。

3.3 模型设计

本文采用固定效应模型评估数字产业集聚对减污降碳协同的影响, 构建模型如下:

$$Y_{it} = \alpha_0 + \beta_1 \ln Gather_{it} + \delta \sum Controls_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中: 被解释变量 Y_{it} 为 i 市在第 t 年的减污降碳水平 (PCR)、SO₂ 排放强度 (SEI) 或 CO₂ 排放强度 (CEI); $Controls$ 为一系列影响环境污染和碳排放的控制变量; μ_i 和 v_t 分别为不可观测的个体固定效应和时间固定效应; ε_{it} 为随机误差项; α_0 为常数项; β_1 和 δ 分别为核心解释变量和控制变量的待估计系数。其中, 本文最为关心的待估计参数是 β_1 , 代表着数字产业

表1 相关变量描述性统计结果

Table 1 Descriptive statistics of variables

变量	符号	样本	均值	标准差	最小值	最大值	多重共线性	单位根
被解释变量								
减污降碳水平	PCR	1188	0.330	0.436	0.006	2.103		-25.850***
SO ₂ 排放强度	SEI	1188	0.214	0.224	0.011	0.816		-15.002***
CO ₂ 排放强度	CEI	1188	1.263	0.549	0.581	2.577		-23.770***
机制变量								
数字经济水平	Digec	1188	0.628	0.024	0.600	0.742		-3.822***
产业结构高级化	Ind	1188	40.640	9.267	20.660	73.150		-9.097***
绿色技术创新	GTI	1188	5.166	1.721	0.000	9.861		-16.930***
解释变量								
数字产业集聚水平	lnGather	1188	2.430	1.174	0.000	4.710	2.850	-14.520***
控制变量								
收入水平	lnpgdp	1188	1.694	0.492	0.542	3.040	3.220	-11.892***
人口密度	poden	1188	3.441	0.563	2.044	4.744	1.100	-12.728***
技术水平	rd	1188	0.350	0.262	0.035	1.996	1.460	-12.053***
城镇化水平	urb	1188	0.348	0.236	0.047	1.686	1.500	-24.589***
工业发展规模	indu	1188	6.920	0.988	4.127	9.722	2.670	-18.968***
政府干预程度	gov	1188	0.160	0.081	0.054	1.456	1.740	-7.423***

集聚对减污降碳协同的影响。

考虑到数字产业集聚对减污降碳协同的影响可能存在空间溢出效应,进一步在基准模型基础上构建空间计量模型予以考察。基于STIRPAT模型,构建公式如下:

$$Y_{it} = \alpha_0 + \rho_1 \sum_{i=1}^n W_{it} Y_{it} + \beta_1 \ln Gather_{it} + \rho_2 \sum_{i=1}^n W_{it} \ln Gather_{it} + \delta \sum Controls_{it} + \theta \sum_{i=1}^n W_{it} Controls_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中: W_{it} 为空间权重矩阵; ρ_1 为被解释变量空间回归系数; ρ_2 和 θ 分别为核心解释变量和控制变量的空间回归估计系数。本文构建经济距离空间权重矩阵 W_{econ} 来进行空间计量分析,并构建技术距离矩阵 W_{tech} 进行稳健性检验,矩阵构建如下:

$$W_{econ} = \frac{\text{diag}\left(\frac{\bar{Y}_1}{\bar{Y}}, \frac{\bar{Y}_2}{\bar{Y}}, \dots, \frac{\bar{Y}_n}{\bar{Y}}\right)}{\frac{1}{d_{ij}^2}}, W_{tech} = \frac{\text{diag}\left(\frac{\bar{T}_1}{\bar{T}}, \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}}, \dots, \frac{\bar{T}_n}{\bar{T}}\right)}{\frac{1}{d_{ij}^2}} \quad (5)$$

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{t_1 - t_0 + 1} \sum_{t=t_0}^{t_1} Y_{it}, \bar{Y} = \frac{1}{n(t_1 - t_0 + 1)} \sum_{i=1}^n \sum_{t=t_0}^{t_1} Y_{it} \quad (6)$$

$$\bar{T}_i = \frac{1}{t_1 - t_0 + 1} \sum_{t=t_0}^{t_1} T_{it}, \bar{T} = \frac{1}{n(t_1 - t_0 + 1)} \sum_{i=1}^n \sum_{t=t_0}^{t_1} T_{it} \quad (7)$$

式中: \bar{Y}_i 为考察期内城市*i*各年份GDP的均值; \bar{Y} 为

长江经济带108个城市GDP的均值;同理, \bar{T}_i 为考察期内城市*i*各年份发明专利申请受理量的均值; \bar{T} 为108个城市发明专利申请受理量的均值; d_{ij} 为城市*i*和*j*之间欧式距离; t_0 为研究基期; t_1 为研究末期。

根据地理学第一定律,数字产业集聚对减污降碳协同的影响可能具有空间地理衰减特征。为了揭示其空间衰减边界,参考既有研究^[53,54],假设两个城市之间的距离区间为 $[d_{\min}, d_{\max}]$, γ 为 d_{\min} 到 d_{\max} 的递进距离。设阈值距离为 d ,当 $d_{ij} \geq d$ 时,地理单元在空间权重矩阵中的元素保持不变,否则为0。通过设置阈值距离 d ,可以将距离在 d 以内的城市从空间权重矩阵中剔除,进而清晰地刻画制造业集聚对减污降碳的距离衰减变化情况。

$$\frac{W_d}{d} = d_{\min}, d_{\min} + \gamma, d_{\min} + 2\gamma, \dots, d_{\max} \quad (8)$$

$$w_{ij,d} = \begin{cases} \frac{1}{d_{ij}^2} & \text{当 } d_{ij} \geq d \\ 0 & \text{当 } d_{ij} < d \end{cases} \quad (9)$$

式中: $W_d = [w_{ij,d}]_{n \times n}$ 为地理距离空间权重矩阵。在长江经济带108个地级市中,最短距离是无锡市到常州市43.5 km。因此,本文将阈值距离空间权重矩阵的初始值设定为50 km,进而距离设定为 $\gamma=100$ km,一直持续到800 km。

4 结果与分析

4.1 数字产业空间格局时空演化特征

分别将各城市数字产业投资关联总量和城市

间投资笔数由小到大分为5级,选取2010年、2015年和2020年3个时间截面,刻画研究区数字产业投资网络。由图2a、2c、2e可看出,2010—2020年,研究区数字产业投资网络以上海和杭州为中心,网络密度由上游至下游逐渐增大,呈现出“东密西疏”的分布特征。其中,长三角城市群的网络联系最为

紧密,以城市群内部联系为主,上海、杭州、苏州、南京和宁波等城市间联系较为广泛。长江中游城市群网络联系较为密切但强度较弱,武汉、长沙和南昌三大省会城市为区域网络核心。成渝城市群内部联系较为稀疏,但成都与重庆之间的联系较为密切,来自长三角城市群的跨区域联系也较多。2010

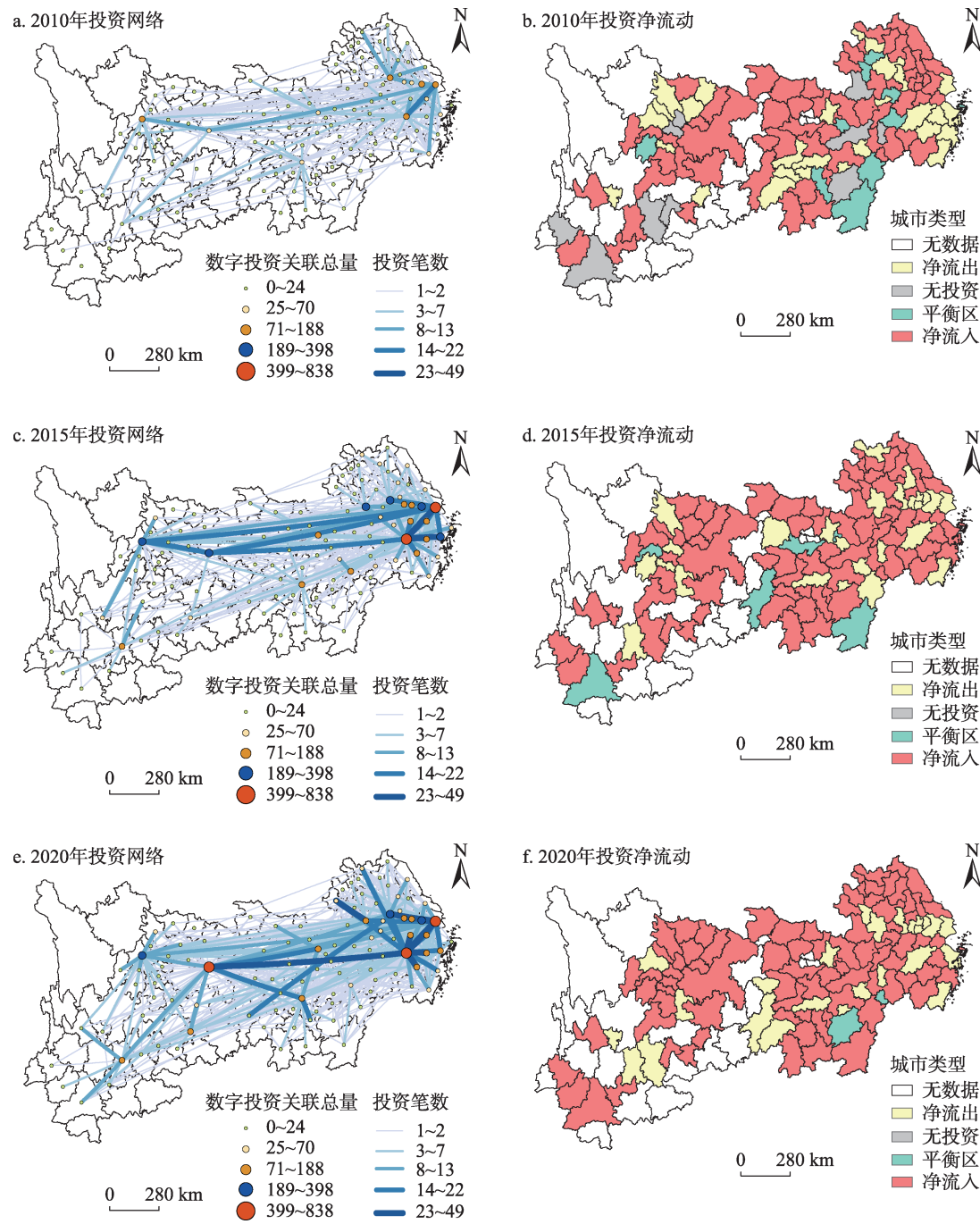


图2 2010—2020年长江经济带数字产业投资网络及投资净流动图

Figure 2 Digital industry investment network and net investment flow in the Yangtze River Economic Belt, 2010–2020

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1605号标准地图制作,底图边界无修改。

年,研究区数字产业投资网络整体较为稀疏,呈右倒的“T”型结构。2010—2020年,数字产业投资网络呈现出“多极化、多线程”的发展趋势,网络密度和联系强度大幅增加,同时,跨区域投资联系愈加密切,其中成渝城市群和长三角城市群的跨区域投资最为显著。长三角城市群数字产业投资网络逐渐形成以上海、宁波、杭州,南京、苏州和徐州为顶点的“北斗七星”格局;长江中游城市群逐渐形成以武汉和长沙为核心的“双核”结构;成渝城市群逐渐呈现出“一主(重庆)一辅(成都)”的空间格局。

根据数字产业投资网络中各城市点入度与点出度的差值,将城市划分为净流入区、净流出区与平衡区(图2b、2d、2f)。研究区数字产业投资流空间非均衡性突出,净流出区主要位于各城市群的中心节点,接收投资的区域主要位于城市群的外围城市,表现出明显的“郊区化”倾向,并形成“中心流出、外围承接”的分布格局。上海、南京、杭州、武汉、长沙、南昌始终有大规模数字产业投资净流出,为“大规模流出型”城市,发挥了省会或中心城市对外投资的辐射作用。值得注意的是,重庆作为成渝城市群的中心城市,融资输入次数明显多于投资输出次数,始终属于净流入型城市。可能原因在于,自2013年一带一路倡议提出后,重庆作为丝绸之路经济带重要支点,以成渝地区双城经济圈建设为引领,以西部陆海新通道建设为支撑,不断释放吸引力,吸收大量跨区域数字产业投资,致力于打造数字经济产业高地。

4.2 减污降碳时空演化特征

长江经济带 SO_2 排放强度在空间上呈现出“自上游至下游逐渐递减”的梯度格局,在时间上由“大范围连片集聚高污染”向“小范围分散高污染”转变,直至2020年呈现出“集中连片低污染”特征(如图3a、3c、3e)。高污染区域集中分布于长江中上游地区,以长江中游城市群、成渝城市群和云南省为主。2010—2020年,研究区 SO_2 排放强度急剧下降,高污染区域大范围削减,多数地区转变为低污染,仅剩余攀枝花和六盘水两个城市为较高污染。这可能是因为,2013年中国颁发了一系列更为严格的环境法规和政策,如《大气污染防治法》《工业企业污染物排放标准》等,加强了对企业的环境监管和违规处罚力度。长江经济带 CO_2 排放强度相较 SO_2

排放强度空间格局更加复杂,在时间上由“集中带状高排放”向“分散点状高排放”转变,至2020年呈现出“分散零星高排放”特征(如图3b、3d、3f)。2010年,高碳强度区域呈块状集中分布于苏北、皖北、皖南、赣东、鄂北、川北、黔南和滇西;低碳强度区域呈点状零星分布于无锡、杭州、长沙、萍乡、新余和川北部分城市。2015年,高碳强度区域显著减少,仅剩滁州、阜阳、六盘水、安顺、丽江和攀枝花6个城市;中碳强度区域呈“小范围块状”零散分布于苏北和鄂北区域;低碳强度区域呈“大范围片状”集聚分布。2020年,高碳强度区域仅剩攀枝花、六盘水和安顺3个城市。

整体来看,研究期间长江经济带 SO_2 排放强度和 CO_2 排放强度均得以改善,空间蔓延广度和深度均显著减少。一方面,随着环境保护法规的接连出台和实施力度的加强,政府加大了对高污染行业的限制和淘汰。另一方面,环保技术和清洁能源的开发与应用显著促进了企业的清洁生产,从源头上减少了污染和二氧化碳的排放。同时,数字产业的发展也为减污降碳带来了强大助力,通过数字技术、数据要素和数字化平台等赋能制造业、服务业、交通和建筑等传统产业的数字化转型,进而促进其节能减排,实现区域减污降碳协同增效。

5 进一步分析

5.1 数字产业集聚对减污降碳协同的影响机制

5.1.1 基准回归

表2列(1)–(3)给出了基于固定效应模型的基准回归结果。数字产业集聚($\ln\text{Gather}$)对减污降碳水平的估计系数为 -0.061 ,且在1%的水平上显著,表明数字产业集聚能够显著地促进区域减污降碳。同时,数字产业集聚对 SO_2 排放强度和 CO_2 排放强度的估计系数分别为 -0.030 和 -0.020 ,均通过了1%水平的显著性检验。这说明,数字产业集聚不仅提升了区域的“减污”强度,还提升了“降碳”强度,表现出减污降碳协同增效的趋势。可见,数字产业集聚极大促进了数字资本、数字技术、数据要素和数字化平台的发展,产生了新模式和新业态。一方面,通过影响消费者偏好促进居民绿色生活方式转型;另一方面,通过产业赋能与融合创新等促进产业数字化与绿色化转型,进而实现了“高效率、低损耗、低污染”的绿色生活方式和清洁生产方式。

2024年4月

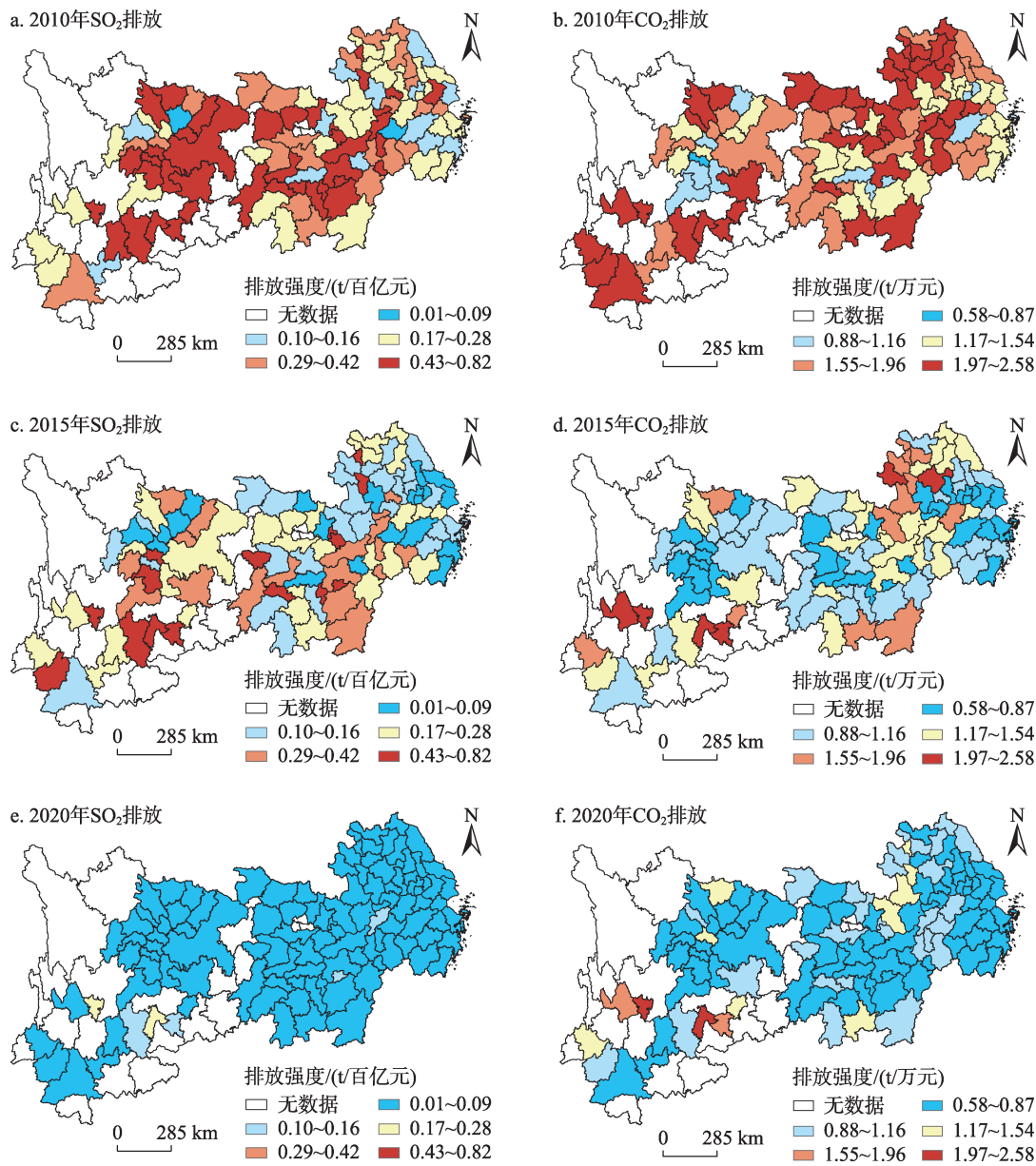


图3 2010—2020年长江经济带减污降碳时空演变格局

Figure 3 Spatial and temporal changes of pollution reduction and carbon emission reduction in the Yangtze River Economic Belt, 2010–2020

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1605号标准地图制作,底图边界无修改。

5.1.2 机制检验

分别将数字经济水平(*Digec*)、产业结构高级化(*Ind*)和绿色技术创新(*GTI*)3个机制变量作为被解释变量纳入实证分析,结果见表2列(4)–(6)。列(4)显示,数字产业集聚对数字经济水平的回归系数为0.004,且通过1%水平上的显著性检验。这表明,数字产业集聚激发了数据资本、数字技术和数字新基建指数型增长,衍生规模经济效应促进了数字经济发展。列(5)结果显示,数字产业集聚对产

业结构的回归系数为0.540,且在1%的水平上显著,表明数字产业集聚推动数字技术和数据要素为传统产业赋能,衍生产业升级效应促进产业结构高级化。列(6)显示,数字产业集聚对绿色技术创新的回归系数为0.101,并通过1%水平上的显著性检验。这说明,数字产业集聚使得知识分享和合作更高效,创新产品和服务迭代更快速,衍生技术创新效应。因此,数字产业集聚创造出了新的商业模式和新业态,推动了数字经济发展,进而改变了人们

表2 基准回归及机制检验结果

Table 2 Benchmark regression and mechanism test results

	基准回归			机制检验		
	(1) <i>PCR</i>	(2) <i>SEI</i>	(3) <i>CEI</i>	(4) <i>Digec</i>	(5) <i>Ind</i>	(6) <i>GTI</i>
<i>lnGather</i>	-0.061*** (0.011)	-0.030*** (0.006)	-0.020*** (0.007)	0.004*** (0.001)	0.540*** (0.185)	0.101*** (0.019)
<i>lnpgdp</i>	-0.870*** (0.038)	-0.450*** (0.021)	-1.283*** (0.025)	-0.014*** (0.003)	16.469*** (0.654)	2.888*** (0.066)
<i>poden</i>	0.094*** (0.033)	0.006 (0.018)	0.005 (0.022)	-0.001 (0.002)	0.820 (0.571)	-0.021 (0.058)
<i>urb</i>	0.320** (0.126)	0.020 (0.069)	0.348*** (0.084)	0.022** (0.009)	2.406 (2.185)	-0.028 (0.220)
<i>indu</i>	-0.322*** (0.038)	-0.127*** (0.021)	-0.260*** (0.025)	0.004 (0.003)	1.185* (0.655)	0.345*** (0.066)
<i>gov</i>	-0.012 (0.141)	-0.142* (0.077)	0.115 (0.094)	0.009 (0.010)	4.487* (2.456)	0.969*** (0.248)
<i>rd</i>	0.095* (0.052)	0.005 (0.028)	0.058* (0.034)	-0.010*** (0.004)	4.290*** (0.897)	0.616*** (0.090)
<i>_cons</i>	3.717*** (0.279)	1.924*** (0.152)	5.112*** (0.185)	0.618*** (0.020)	-2.659 (4.835)	-2.650*** (0.487)
城市固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>N</i>	1188	1188	1188	1188	1188	1188
<i>R</i> ²	0.571	0.547	0.835	0.046	0.604	0.819

注:*表示 $P < 0.10$, **表示 $P < 0.05$, ***表示 $P < 0.01$;括号内数值为*t*统计量;下同。

生活和消费的方式,促进了绿色生活方式转型^[21]。同时,数字产业集聚通过数据要素和数字技术赋能传统产业,促进了传统产业数字化转型,提升了资源利用效率和清洁生产能^[32]。此外,数字产业集聚带来了创新要素集聚、创新资金获取和创新效率提升^[44],为高效率和低耗能的绿色技术创新提供支持,进而促进减污降碳协同增效。这与前文机制分析相一致,印证了H1。

5.1.3 内生性检验

数字产业集聚影响减污降碳协同的同时,也可能受到其反向影响,即产生内生性问题。参考黄群慧等^[55]的思路,选取历史上邮局数作为地区数字产业集聚的工具变量,满足了相关性要求;同时历史上邮局数量对于当今生态环境几乎没有影响,也满足了排他性要求。基于以上逻辑,选取1984年各城市的每百万人邮局数作为地区数字产业发展的工具变量。由于工具变量并不是随时间变化的,借鉴张勋^[56]的做法,将工具变量与全国层面相应的数字产业集聚水平的均值(除本市外)进行交互,作为新的具有时间变化效应的工具变量。本文选择两阶

段最小二乘法(2SLS)回归进行内生性检验(表3)。

首先,从统计学的角度检验了工具变量的相关性。列(1)报告了第一阶段的回归结果,表明历史上邮局数量越多,数字产业集聚水平越高,这是符合预期的。对于“工具变量识别不足”检验,LM统计量的结果分别为41.391,在1%的水平上拒绝原

表3 内生性检验结果

Table 3 Endogeneity test results

	(1) <i>lnGather</i>	(2) <i>PCR</i>	(3) <i>SEI</i>	(4) <i>CEI</i>
<i>IV</i>	0.009*** (0.001)			
<i>lnGather</i>		-0.082** (0.033)	-0.159*** (0.041)	-0.137** (0.055)
<i>_cons</i>	0.855 (1.242)	2.492*** (0.242)	5.949*** (0.349)	4.545*** (0.438)
LM		41.391(0.000)		
Wald		54.953(16.38)		
控制变量		Yes		
城市固定效应		Yes		
<i>N</i>	1180	1180	1180	1180
<i>R</i> ²		0.683	0.902	0.728

假设,满足工具变量的相关性要求。对于“弱识别检验”,Wald统计量为54.953,显著大于10%水平临界值(16.3),表明以历史上邮局数量作为工具变量不存在弱工具变量问题。因此,工具变量的选取具有合理性。列(2)–(4)展示了第二阶段的估计结果。数字产业集聚对减污降碳水平、SO₂排放强度和CO₂排放强度的回归系数均在5%的水平上显著为负,表明在缓解内生性问题后,数字产业集聚依旧可以显著降低二氧化硫与碳排放强度,促进减污降碳协同增效。结果与基准回归一致,证实了本文核心结论的稳健性。

5.1.4 稳健性检验

为了进一步验证结果的可靠性,分别采用增加遗漏变量、剔除特殊样本和剔除首尾年份等方法进行稳健性检验,估计结果见表4。首先,遗漏变量的存在可能会产生内生性问题,对回归结果造成偏误。增加环境规制力度^[57]和能源利用效率^[58]作为控制变量进行重新回归。其次,直辖市和省会城市由于其自身的区位条件和发展特征,与其他城市之间可能存在系统性差异。故剔除上海、重庆2个直辖市和昆明、成都、贵阳、长沙、武汉、南昌、合肥、南京和杭州9个省会城市的样本,保留其他97个样本重新进行估计。最后,参考张明等^[59]的方法,剔除首尾年份的样本数据。综上,数字产业集聚影响减污降碳协同的系数在大小上虽有差异,但其系数的方向和显著性均与基准回归一致,表明实证结果稳健。

5.2 数字产业集聚对减污降碳协同的空间溢出效应

5.2.1 空间自相关检验

研究期间内长江经济带减污降碳水平、SO₂排放强度和CO₂排放强度的全局Moran’s I指数均大

于0,且在1%水平上显著(表5),说明三者空间上均呈现出显著的正相关性,空间集聚特征明显。

5.2.2 模型识别

首先,通过LM检验和Robust LM检验判断是采用空间滞后模型(SLM)还是空间误差模型(SEM),如表6所示,无论是减污降碳水平、SO₂排放强度和CO₂排放强度作为被解释变量,LM-error、Robust LM-error、LM-lag、Robust LM-lag均在1%的水平上显著,表明减污降碳协同受到了来自数字产业集聚的影响。其次,进一步通过LR检验与Wald检验判断空间杜宾模型(SDM)是否可以退化为SLM或SEM形式。可以看到,LR-error、LR-lag、Walds均在1%的水平上显著,拒绝原假设,说明采用SDM更适合估计数字产业集聚对减污降碳协同的影响。随后,进行Hausman检验发现使用固定效应模型更优。同时,为避免不可能观测的城市异质性因素对估计结果的影响,本文采用基于个体固定效应的SDM模型进行估计。

5.2.3 空间溢出效应分析

LeSage等^[60]、陈姝兴等^[61]认为,点估计结果可能会导致结果出现偏差,且无法分解直接效应和间接效应。因而,要探究数字产业集聚对减污降碳协同的空间外溢效应,需要采用偏微分估计其直接效应、间接效应和总效应,结果见表7。数字产业集聚对减污降碳水平、SO₂排放强度和CO₂排放强度的直接效应、间接效应和总效应均显著为负,表明数字产业集聚不仅显著地促进了本地的减污降碳协同,还产生了空间溢出效应,推动了邻近地区的减污降碳协同。可见,数字产业集聚使得网络经济形态进一步得到强化,推动了区域间数据资本和数字技术

表4 基准回归结果的稳健性检验

Table 4 Robustness test for benchmark regression results

	增加遗漏变量			剔除特殊样本			剔除首尾年份		
	(1) PCR	(2) SEI	(3) CEI	(4) PCR	(5) SEI	(6) CEI	(7) PCR	(8) SEI	(9) CEI
lnGather	−0.067*** (0.010)	−0.035*** (0.005)	−0.020*** (0.007)	−0.057*** (0.011)	−0.029*** (0.006)	−0.016** (0.007)	−0.066*** (0.011)	−0.039*** (0.006)	−0.013* (0.007)
_cons	3.529*** (0.284)	1.715*** (0.149)	5.179*** (0.193)	3.744*** (0.291)	1.906*** (0.160)	5.035*** (0.191)	4.201*** (0.303)	1.999*** (0.172)	5.812*** (0.204)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
城市固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
N	1188	1188	1188	1067	1067	1067	972	972	972
R ²	0.592	0.601	0.835	0.575	0.547	0.839	0.566	0.537	0.819

表5 空间相关性检验

Table 5 Spatial correlation test

年份	减污降碳水平		SO ₂ 排放强度		CO ₂ 排放强度	
	Moran's <i>I</i>	<i>p</i> 值	Moran's <i>I</i>	<i>p</i> 值	Moran's <i>I</i>	<i>p</i> 值
2010	0.200	0.000	0.179	0.000	0.239	0.000
2011	0.264	0.000	0.229	0.000	0.227	0.000
2012	0.238	0.000	0.242	0.000	0.196	0.000
2013	0.224	0.000	0.218	0.000	0.215	0.000
2014	0.176	0.000	0.185	0.000	0.203	0.000
2015	0.156	0.001	0.183	0.000	0.180	0.000
2016	0.167	0.000	0.209	0.000	0.178	0.000
2017	0.113	0.001	0.168	0.000	0.212	0.000
2018	0.102	0.004	0.155	0.000	0.221	0.000
2019	0.084	0.021	0.137	0.002	0.181	0.000
2020	0.096	0.012	0.167	0.000	0.178	0.000

表6 空间计量模型检验

Table 6 Spatial econometric model validation

	减污降碳水平		SO ₂ 排放强度		CO ₂ 排放强度	
	统计量	<i>p</i> 值	统计量	<i>p</i> 值	统计量	<i>p</i> 值
LM-error	62.772***	0.000	92.72***	0.000	139.568***	0.000
Robust LM-error	14.175***	0.000	26.362***	0.000	29.699***	0.000
LM-lag	108.732***	0.000	168.957***	0.000	153.123***	0.000
Robust LM-lag	60.135***	0.000	102.598***	0.000	43.254***	0.000
LR-error	88.81***	0.000	78.59***	0.000	127.86***	0.000
LR-lag	66.34***	0.000	47.14***	0.000	77.92***	0.000
Walds	67.85***	0.000	47.99***	0.000	83.55***	0.000
Hausman	76.49***	0.000	80.50***	0.000	66.59***	0.000

表7 空间溢出效应的偏微分估计结果

Table 7 Partial differential estimation results of spatial spillover effects

	减污降碳水平			SO ₂ 排放强度			CO ₂ 排放强度		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
lnGather	-0.050***	-0.379***	-0.429***	-0.028***	-0.202***	-0.230***	-0.014**	-0.128**	-0.142**
	(0.011)	(0.075)	(0.077)	(0.006)	(0.044)	(0.045)	(0.007)	(0.056)	(0.057)
lnpgdp	-0.571***	-0.258**	-0.829***	-0.262***	-0.076	-0.337***	-1.058***	-0.670***	-1.729***
	(0.055)	(0.130)	(0.123)	(0.030)	(0.068)	(0.066)	(0.034)	(0.206)	(0.208)
poden	0.093***	0.165	0.257*	0.007	-0.066	-0.059	0.003	-0.122	-0.119
	(0.029)	(0.128)	(0.133)	(0.016)	(0.075)	(0.078)	(0.019)	(0.139)	(0.145)
urb	0.308***	1.138**	1.446**	0.010	0.003	0.014	0.425***	2.941***	3.366***
	(0.114)	(0.562)	(0.589)	(0.062)	(0.291)	(0.306)	(0.084)	(0.890)	(0.935)
indu	-0.266***	-0.815***	-1.080***	-0.082***	-0.535***	-0.617***	-0.318***	-0.211	-0.529***
	(0.038)	(0.183)	(0.185)	(0.021)	(0.114)	(0.117)	(0.024)	(0.131)	(0.133)
gov	0.181	1.087	1.267	-0.008	0.414	0.406	0.274***	2.366*	2.640**
	(0.135)	(1.024)	(1.076)	(0.074)	(0.592)	(0.622)	(0.101)	(1.220)	(1.283)
rd	0.152***	0.087	0.239	0.036	0.039	0.075	0.102***	-0.273	-0.171
	(0.050)	(0.163)	(0.171)	(0.027)	(0.094)	(0.099)	(0.033)	(0.170)	(0.178)

交互^[20,49],并通过涓滴效应、学习效应和共享效应促进了周边地区减污降碳协同增效。因此,H2得证。

5.2.4 稳健性检验

分别采用增加控制变量、替换空间权重矩阵和

剔除首尾年份方法对空间杜宾结果进行稳健性检验,估计结果见表8。可见,数字产业集聚对减污降碳协同的空间溢出效应与上述结果相一致,表明上述空间计量结果稳健。

表8 空间计量结果的稳健性检验

Table 8 Robustness test for spatial econometric results

	增加控制变量			替换权重矩阵			剔除首尾年份		
	(1) <i>PCR</i>	(2) <i>SEI</i>	(3) <i>CEI</i>	(4) <i>PCR</i>	(5) <i>SEI</i>	(6) <i>CEI</i>	(7) <i>PCR</i>	(8) <i>SEI</i>	(9) <i>CEI</i>
直接效应	-0.053*** (0.010)	-0.030*** (0.005)	-0.012* (0.007)	-0.056*** (0.011)	-0.031*** (0.006)	-0.012* (0.007)	-0.063*** (0.011)	-0.038*** (0.006)	-0.016** (0.007)
间接效应	-0.363*** (0.070)	-0.184*** (0.037)	-0.090* (0.054)	-0.205*** (0.056)	-0.076*** (0.024)	-0.117** (0.051)	-0.372*** (0.097)	-0.259*** (0.063)	-0.206** (0.091)
总效应	-0.416*** (0.072)	-0.214*** (0.038)	-0.102* (0.055)	-0.261*** (0.057)	-0.107*** (0.024)	-0.130** (0.052)	-0.435*** (0.101)	-0.296*** (0.065)	-0.221** (0.094)

5.2.5 空间衰减特征

将地理距离矩阵约束下数字产业集聚对减污降碳的回归系数进行可视化,考察其空间衰减边界,如图4所示。数字产业集聚对减污降碳水平的本地效应(直接效应)始终显著为负,且随着地理距离增加一直保持平稳状态。然而,数字产业集聚对减污降碳水平的空间溢出效应(间接效应)随距离阈值的增加呈现右拖尾的“U”型特征。在[50, 250] km之间,空间溢出效应始终显著为负且效应不断增强。表明在距离相对较短时,外围区受益于核心区

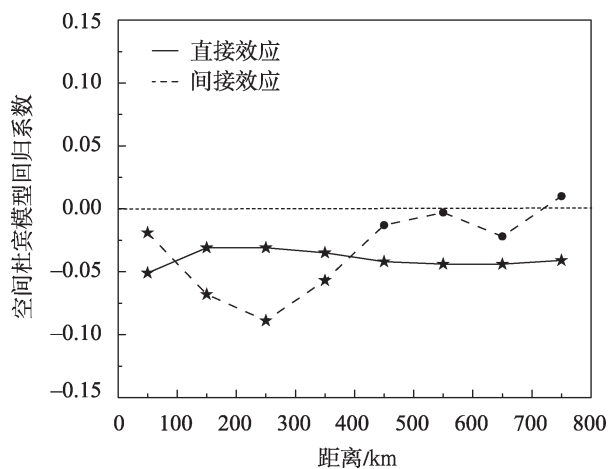


图4 数字产业集聚影响城市减污降碳水平的空间衰减过程

Figure 4 Spatial attenuation process of the impact of digital industry agglomeration and diffusion on urban pollution and carbon emission reduction levels

注:星星符号表示系数在10%的水平内显著,圆形符号表示系数不显著。

的数字产业发展,其生产过程的数字化转型、环境监管的数字化协同治理以及高效精确的资源配置促进了外围区的减污降碳。当距离阈值达到250 km时,数字产业集聚对减污降碳的空间溢出效应达到峰值。这可能是因为中心城市之间跨区域交流,以中心城市为核心的数字产业网络与另一个中心城市形成联系通道,促进了地区之间的交流。因而250 km是数字产业核心区向外围区扩散的最优距离。由于地理范围和环境承载力有限,其容纳的企业数量和资源要素均存在一定阈值,一旦超过产业集聚的合理区间,则区域内的资源配置效率边际呈现衰减特征^[51]。当距离阈值>250 km,空间溢出效应开始逐渐衰减,至450 km后空间溢出效应趋近于0,且没有通过显著性检验。这可能是因为地理距离增加了数字产业合作和技术交流的障碍,数字产业的影响在距离核心集聚区较远的地区减弱,从而减污降碳效应呈现出衰减趋势。因此,数字产业虽然能凭借网络效应跨越空间进行要素配置,但是囿于地理距离障碍、产业发展、基础设施覆盖限制、行政壁垒等,其空间溢出效应仍然存在地理峰值和空间距离衰减特征。

6 结论与政策建议

6.1 结论

本文分析了长江经济带数字产业投资网络与减污降碳的时空演化特征,考察了数字产业集聚对减污降碳协同的影响及作用机制,并验证了其空间溢出效应及衰减边界,得到以下结论:

(1)研究区数字产业投资网络密度由上游至下游逐渐增大,并呈现“多极化、多线程”的时空演化趋势,数字产业投资表现出明显的“郊区化”倾向,形成“中心流出、外围承接”的分布格局。同时,减污降碳的空间蔓延广度和深度均得以显著提升。

(2)数字产业集聚不仅能够显著促进区域减污降碳,还产生了“减污”与“降碳”的协同效应。机制检验发现数字产业集聚能够通过规模经济效应、产业升级效应和技术创新效应促进区域减污降碳协同。

(3)数字产业集聚能够促进邻地减污降碳协同,具有明显的空间溢出效应。同时,这种空间溢出效应随着空间距离的增大呈现“右拖尾U型”特征,在250 km以内为空间溢出的“增强”区域,250~450 km之间为“衰减”区域,450 km以外空间溢出效应趋近于0且不再显著。

6.2 政策建议

依据以上研究结论,提出以下对策建议:

(1)促进数字产业网络化发展,鼓励数字产业跨区域投资。以城市群为空间载体,推动城市群内部数字产业交流,同时鼓励跨城市群间的投资交流,鼓励发达地区城市群对西部城市群中心城市进行投资,通过带动西部城市群中心城市的发展,以点带面带动城市群整体数字产业发展。应继续发挥数字产业集聚效应,为长江经济带的中心城市,如上海、杭州、武汉和重庆等,提供税收优惠、土地资源支持、人才培养等政策措施,吸引数字产业企业集聚,并建设相关的创新园区和产业集群,提升数字产业竞争力和创新能力。此外,应积极引导数字产业投资和发展向长江经济带的中游和下游地区扩散,促进数字产业在更广泛的区域内的发展。

(2)深化数字产业赋能、产业数字化转型以及企业数字化治理。通过制定减排政策、设立碳交易市场、加强环境监管等方式,引导数字产业向低碳、环保方向发展。给予落后地区政策扶持和产业扶持,支持落后地区通过数字产业形成跨区域数字产业链,实现链式融合与协同发展。为了实现减污降碳协同增效,可以加大对重污染和高碳产业的数字技术研发支持力度,加快推进传统产业数字化转型,利用数字化技术提升企业资源利用效率和清洁生产能力。加快应用数字化环境监管技术,建立系

统完善的上下产业链协同和区域一体化的智能环境监测体系和信息共享机制,通过区域化与产业化协同治理,实现减污降碳协同增效。

(3)制定区域性减污降碳政策并搭建跨区域合作平台。根据不同区域的减污降碳特征和发展要求,政府可以制定针对性的区域性减污降碳政策。例如,在长三角地区可以推动企业采用更加清洁的生产工艺和能源,提高资源利用效率;在长江中游地区可以加大对污染物和碳排放的监管力度,强化污染物治理和减排措施;在成渝地区可以推动数字产业与清洁能源产业的协同发展,减少高污染能源的使用。优化数字产业空间布局,促进网络中心城市间交流,以子网络及其中心城市为突破口,打造多个联系密切的子网络和发展先进的中心城市。同时,根据数字产业溢出的边界特征,在城市群与城市群的交界处布局数字产业沟通节点,促进整体交流政府可以建立跨区域的减污降碳合作机制和平台,分享经验和技术,开展联合研究和项目合作。

参考文献(References):

- [1] 原伟鹏,孙慧,王晶,等.中国城市减污降碳协同的时空演化及驱动力探析[J].经济地理,2022,42(10):72-82.[Yuan W P, Sun H, Wang J, et al. Spatial-temporal evolution and driving forces of urban pollution and carbon reduction in China[J]. Economic Geography, 2022, 42(10): 72-82.]
- [2] Li S Y, Wang S X, Wu Q R, et al. Emission trends of air pollutants and CO₂ in China from 2005 to 2021[J]. Earth System Science Data, 2023, 15(6): 2279-2294.
- [3] DeStefano T, Kneller R, Timmis J. Broadband infrastructure, ICT use and firm performance: Evidence for UK firms[J]. Journal of Economic Behavior & Organization, 2018, 155: 110-139.
- [4] Danish. Effects of information and communication technology and real income on CO₂ emissions: The experience of countries along Belt and Road[J]. Telematics and Informatics, 2019, DOI: 10.1016/j.tele.2019.101300.
- [5] Andrae A S G, Edler T. On global electricity usage of communication technology: Trends to 2030[J]. Challenges, 2015, 6(1): 117-157.
- [6] Zhou X Y, Zhou D Q, Wang Q W, et al. How information and communication technology drives carbon emissions? A sector-level analysis for China[J]. Energy Economics, 2019, 81: 380-392.
- [7] 王俊豪,周晟佳.中国数字产业发展的现状、特征及其溢出效应[J].数量经济技术经济研究,2021,38(3):103-119.[Wang J H, Zhou S J. The current situation, characteristics, and spillover ef-

2024年4月

- fects of the development of digital industry in China[J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2021, 38(3): 103–119.]
- [8] 袁晓玲, 郝继宏, 钟楚潮, 等. 中国城市“减污降碳”协同驱动因素及实现路径研究[J]. *管理学报*, 2023, 36(4): 26–46. [Yuan X L, Xi J H, Zhong C C, et al. Research on the collaborative driving factors and implementation paths of “pollution reduction and carbon reduction” in China[J]. *Journal of Management*, 2023, 36(4): 26–46.]
- [9] 易兰, 杨田恬, 杜兴, 等. 减污降碳协同路径研究: 典型国家驱动机制及对中国的启示[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(9): 53–65. [Yi L, Yang T T, Du X, et al. Collaborative pathways of pollution reduction and carbon abatement: Typical countries’ driving mechanisms and their implications for China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(9): 53–65.]
- [10] 姜钰卿, 唐旭, 任凯鹏, 等. 基于双层嵌套SDA的中国减污降碳驱动因素研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(12): 3294–3304. [Jiang Y Q, Tang X, Ren K P, et al. Research on the drivers of pollution and carbon reduction in China based on double-layer nested SDA[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2022, 42(12): 3294–3304.]
- [11] Jiang P, Khishgee S, Alimujiang A, et al. Cost-effective approaches for reducing carbon and air pollution emissions in the power industry in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110452
- [12] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展: 来自中国城市的经验证据[J]. *管理世界*, 2020, 36(10): 65–76. [Zhao T, Zhang Z, Liang S K. Digital economy, entrepreneurial activity, and high-quality economic development: Empirical evidence from urban China[J]. *Journal of Management World*, 2020, 36(10): 65–76.]
- [13] 田秀娟, 李睿. 数字技术赋能实体经济转型发展: 基于熊彼特内生增长理论的分析框架[J]. *管理世界*, 2022, 38(5): 56–74. [Tian X J, Li R. Digital technology empowers the transformation and development of real economy: An analysis framework based on Schumpeter’s endogenous growth theory[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(5): 56–74.]
- [14] 邓荣荣, 张翔. 中国城市数字经济发展对环境污染的影响及机理研究[J]. *南方经济*, 2022, (2): 18–37. [Deng R R, Zhang A X. Research on the impact of urban digital economy development on environmental pollution and its mechanism[J]. *South China Journal of Economics*, 2022, (2): 18–37.]
- [15] 谢云飞. 数字经济对区域碳排放强度的影响效应及作用机制[J]. *当代经济管理*, 2022, 44(2): 68–78. [Xie Y F. The effect and mechanism of digital economy on regional carbon emission intensity[J]. *Contemporary Economic Management*, 2022, 44(2): 68–78.]
- [16] Chen S X, Ding D L, Shi G H, et al. Digital economy, industrial structure, and carbon emissions: An empirical study based on a provincial panel data set from China[J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2022, 20(4): 316–323.
- [17] 徐维祥, 周建平, 刘程军. 数字经济发展对城市碳排放影响的空间效应[J]. *地理研究*, 2022, 41(1): 111–129. [Xu W X, Zhou J P, Liu C J. The impact of digital economy on urban carbon emissions: Based on the analysis of spatial effects[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(1): 111–129.]
- [18] 刘慧, 白聪. 数字化转型促进中国企业节能减排了吗?[J]. *上海财经大学学报*, 2022, 24(5): 19–32. [Liu H, Bai C. Has digital transformation helped enterprises realize the goals of energy conservation and pollution reduction in China?[J]. *Journal of Shanghai University of Finance and Economics*, 2022, 24(5): 19–32.]
- [19] Shahzad K, Zeng J Q, Hashim M, et al. Impact of using information and communication technology and renewable energy on health expenditure: A case study from Pakistan[J]. *Energy*, 2020, DOI: 10.1016/j.energy.2020.117956.
- [20] 杨慧梅, 江璐. 数字经济、空间效应与全要素生产率[J]. *统计研究*, 2021, 38(4): 3–15. [Yang H M, Jiang L. Digital economy, spatial effects, and total factor productivity[J]. *Statistical Research*, 2021, 38(4): 3–15.]
- [21] 边志强. 智慧城市建设对减污降碳协同治理的影响研究[J]. *工业技术经济*, 2024, 43(1): 102–111. [Bian Z Q. Research on the impact of smart city construction on collaborative governance of pollution reduction and carbon reduction[J]. *Journal of Industrial Technology and Economy*, 2024, 43(1): 102–111.]
- [22] Guo Q, Wang Y, Dong X. Effects of smart city construction on energy saving and CO₂ emission reduction: Evidence from China[J]. *Applied Energy*, 2022, DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118879.
- [23] 薛飞, 周民良, 刘家旗. 数字基础设施降低碳排放的效应研究: 基于“宽带中国”战略的准自然实验[J]. *南方经济*, 2022, (10): 19–36. [Xue F, Zhou M L, Liu J Q. The effect of digital infrastructure on reducing carbon emissions: Quasi natural experiment based on “Broadband China” pilot[J]. *South China Journal of Economics*, 2022, (10): 19–36.]
- [24] 袁丰, 魏也华, 陈雯, 等. 苏州市区信息通讯企业空间集聚与新企业选址[J]. *地理学报*, 2010, 65(2): 153–163. [Yuan F, Wei Y H, Chen W, et al. Spatial agglomeration of new firm formation in the information and communication technology industry in Suzhou[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(2): 153–163.]
- [25] 段吕晗, 杜德斌, 黄筱彧. 上海互联网新创企业的时空演化及影响因素[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(3): 383–394. [Duan L H, Du D B, Huang X Y. Spatial and temporal changes and influencing factors of the location of internet start-ups in Shanghai, China[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(3): 383–394.]
- [26] 刘程军, 王周元晔, 李续双, 等. 互联网新创企业空间格局演化及区位选择: 以杭州为例[J]. *经济地理*, 2021, 41(6): 107–115. [Liu C J, Wang Z Y Y, Li X S, et al. Spatial pattern evolution and location choice of internet startups: A case study of Hangzhou[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(6): 107–115.]
- [27] 姚震宇. 区域市场化水平与数字经济竞争: 基于数字经济指数省际空间分布特征的分析[J]. *江汉论坛*, 2020, (12): 23–33. [Yao Z Y. Regional marketization level and digital economy com-

- petition: Based on the analysis of digital economic index inter-provincial spatial distribution feature[J]. Jiangnan Tribune, 2020, (12): 23-33.]
- [28] 田俊峰, 王彬燕, 王士君, 等. 中国东北地区数字经济发展空间分异及成因[J]. 地域研究与开发, 2019, 38(6): 16-21. [Tian J F, Wang B Y, Wang S J, et al. Spatial differentiation of urban digital economic development and its causes in Northeast China[J]. Areal Research and Development, 2019, 38(6): 16-21.]
- [29] 王娟娟, 余干军. 我国数字经济发展水平测度与区域比较[J]. 中国流通经济, 2021, 35(8): 3-17. [Wang J J, She G J. Measurement and regional comparison of digital economy development level in China[J]. China Business and Market, 2021, 35(8): 3-17.]
- [30] 李培庆, 赵新正, 姜永青, 等. 长三角多尺度城市网络联系特征及其对城市高质量发展的影响: 基于企业总部-分支联系视角[J]. 世界地理研究, 2024, 33(3): 147-160. [Li P Q, Zhao X Z, Jiang Y Q, et al. Multi-scale urban network connectivity characteristics in the Yangtze River Delta and its impact on high-quality urban development: A perspective on corporate headquarter-branch connections[J]. World Regional Studies, 2024, 33(3): 147-160.]
- [31] He Q, Xie H L, Zhu Y C, et al. The impact of natural resource, information and communication technology adoption, and economic expansion on financial development in post COVID era[J]. Resources Policy, 2024, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.104548.
- [32] Masanet E, Shehabi A, Lei N, et al. Recalibrating global data center energy-use estimates[J]. Science, 2020, 367(6481): 984-986.
- [33] Charfeddine L, Umlai M. ICT sector, digitization and environmental sustainability: A systematic review of the literature from 2000 to 2022[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, DOI: 10.1016/j.rser.2023.113482.
- [34] 张三峰, 魏下海. 信息与通信技术是否降低了企业能源消耗: 来自中国制造业企业调查数据的证据[J]. 中国工业经济, 2019, (2): 155-173. [Zhang S F, Weng X H. Does information and communication technology reduce enterprise's energy consumption: Evidence from Chinese manufacturing enterprises survey[J]. China Industrial Economics, 2019, (2): 155-173.]
- [35] Heo P S, Lee D H. Evolution of the linkage structure of ICT industry and its role in the economic system: The case of Korea[J]. Information Technology for Development, 2019, 25(3): 1-31.
- [36] 及添正, 邓宏兵, 张天铃. 生产性服务业集聚对碳排放效率的影响: 基于长江经济带108个城市企业数据的分析[J]. 资源科学, 2023, 45(1): 31-47. [Ji T Z, Deng H B, Zhang T L. Impact of producer services agglomeration on carbon emission efficiency: An analysis based on the data of enterprises in 108 cities of the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources Science, 2023, 45(1): 31-47.]
- [37] 魏丽莉, 侯宇琦. 数字经济对中国城市绿色发展的影响作用研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(8): 60-79. [Wei L L, Hou Y Q. Research on the impact of China's digital economy on urban green development[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2022, 39(8): 60-79.]
- [38] 陈晓红, 李杨扬, 宋丽洁, 等. 数字经济理论体系与研究展望[J]. 管理世界, 2022, 38(2): 208-224. [Chen X H, Li Y Y, Song L J, et al. Theoretical framework and research prospects of digital economy[J]. Journal of Management World, 2022, 38(2): 208-224.]
- [39] 王梦菲, 张昕蔚. 数字经济时代技术变革对生产过程的影响机制研究[J]. 经济学家, 2020, (1): 52-58. [Wang M F, Zhang X W. Research on the impact mechanism of technological changes on the production processes in the digital economy era[J]. Economist, 2020, (1): 52-58.]
- [40] 陈建, 邹红, 张俊英. 数字经济对中国居民消费升级时空格局的影响[J]. 经济地理, 2022, 42(9): 129-137. [Chen J, Zou H, Zhang J Y. The impact of the digital economy on the spatial-temporal pattern of resident's consumption upgrading in China[J]. Economic Geography, 2022, 42(9): 129-137.]
- [41] 戴魁早, 黄姿, 王思曼. 数字经济促进了中国服务业结构升级吗?[J]. 数量经济技术经济研究, 2023, 40(2): 90-112. [Dai K Z, Huang Z, Wang S M. Does the digital economy promote the structural upgrading of Chinese service industry?[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2023, 40(2): 90-112.]
- [42] 李腾, 孙国强, 崔格格. 数字产业化与产业数字化: 双向联动关系、产业网络特征与数字经济发展[J]. 产业经济研究, 2021, (5): 54-68. [Li T, Sun G Q, Cui G G. Digital industrialization and industrial digitalization: Two-way linkage, industrial network characteristics, and digital economy development[J]. Industrial Economics Research, 2021, (5): 54-68.]
- [43] Yoo Y, Boland Jr R J, Lyytinen K, et al. Organizing for innovation in the digitized world[J]. Organization Science, 2012, 23(5): 1398-1408.
- [44] 刘洋, 董久钰, 魏江. 数字创新管理: 理论框架与未来研究[J]. 管理世界, 2020, 36(7): 198-217. [Liu Y, Dong J Y, Wei J. Digital innovation management: Theoretical framework and future research[J]. Journal of Management World, 2020, 36(7): 198-217.]
- [45] 宋德勇, 朱文博, 丁海. 企业数字化能否促进绿色技术创新? 基于重污染行业上市公司的考察[J]. 财经研究, 2022, 48(4): 34-48. [Song D Y, Zhu W B, Ding H. Can firm digitization promote green technological innovation? An examination based on listed companies in heavy pollution industries[J]. Journal of Finance and Economics, 2022, 48(4): 34-48.]
- [46] 唐松, 伍旭川, 祝佳. 数字金融与企业技术创新: 结构特征、机制识别与金融监管下的效应差异[J]. 管理世界, 2020, 36(5): 52-66. [Tang S, Wu X C, Zhu J. Digital finance and enterprise technology innovation: Structural feature, mechanism identification, and effect difference under financial supervision[J]. Journal of Management World, 2020, 36(5): 52-66.]
- [47] 王锋正, 刘向龙, 张蕾, 等. 数字化促进了资源型企业绿色技术创新吗?[J]. 科学学研究, 2022, 40(2): 332-344. [Wang F Z, Liu X L, Zhang L, et al. Does digitalization promote green technology innovation in resource-based enterprises?[J]. Studies in Science of Science, 2022, 40(2): 332-344.]
- [48] 王少剑, 高爽, 王宇渠. 基于流空间视角的城市群空间结构研

2024年4月

- 究:以珠三角城市群为例[J]. 地理研究, 2019, 38(8): 1849–1861. [Wang S J, Gao S, Wang Y Q. Spatial structure of the urban agglomeration based on space of flows: The study of the Pearl River Delta[J]. Geographical Research, 2019, 38(8): 1849–1861.]
- [49] Krugman P. Increasing returns and economic geography[J]. Journal of Political Economy, 1991, (99): 483–499.
- [50] 刘骁啸, 吴康. 功能疏解背景下京津冀中部核心区产业投资网络演化研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(12): 1972–1984. [Liu X X, Wu K. Changes of industrial investment networks in the central core area of the Beijing–Tianjin–Hebei region under the background of non-capital function dispersal[J]. Progress in Geography, 2020, 39(12): 1972–1984.]
- [51] 陆敏, 徐好, 陈福兴. “双碳”背景下碳排放交易机制的减污降碳效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(11): 121–133. [Lu M, Xu H, Chen F X. Pollution and carbon reduction effects of the carbon emissions trading mechanism in the context of the ‘dual carbon’ goals[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(11): 121–133.]
- [52] 欧阳晓, 李勇辉, 徐帆, 等. 城市用地扩张与生态环境保护的交互作用研究: 以长株潭城市群为例[J]. 经济地理, 2021, 41(7): 193–201. [Ouyang X, Li Y H, Xu F, et al. Interaction between urban land expansion and ecological environment protection: Case study of Changsha–Zhuzhou–Xiangtan Urban Agglomeration[J]. Economic Geography, 2021, 41(7): 193–201.]
- [53] 袁华锡, 刘耀彬, 封亦代. 金融集聚如何影响绿色发展效率? 基于时空双固定的SPDM与PTR模型的实证分析[J]. 中国管理科学, 2019, 27(11): 61–75. [Yuan H X, Liu Y B, Feng Y D. How does financial agglomeration affect green development efficiency? Empirical analysis of SPDM and PTR models based on spatio-temporal double fixation[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(11): 61–75.]
- [54] 李硕硕, 刘耀彬, 骆康. 环鄱阳湖县域新型城镇化对碳排放强度的空间溢出效应[J]. 资源科学, 2022, 44(7): 1449–1462. [Li S S, Liu Y B, Luo K. Spatial spillover effect of new-type urbanization on carbon emission intensity in counties around the Poyang Lake[J]. Resources Science, 2022, 44(7): 1449–1462.]
- [55] 黄群慧, 余泳泽, 张松林. 互联网发展与制造业生产率提升: 内在机制与中国经验[J]. 中国工业经济, 2019, (8): 5–23. [Huang Q H, Yu Y Z, Zhang S L. Internet development and productivity growth in manufacturing industry: Internal mechanism and China experiences[J]. China Industrial Economics, 2019, (8): 5–23.]
- [56] 张勋, 杨桐, 汪晨, 等. 数字金融发展与居民消费增长: 理论与中国实践[J]. 管理世界, 2020, 36(11): 48–63. [Zhang X, Yang T, Wang C, et al. Digital finance and household consumption: Theory and evidence from China[J]. Journal of Management World, 2020, 36(11): 48–63.]
- [57] 任晓松, 刘宇佳, 赵国浩. 经济集聚对碳排放强度的影响及传导机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(4): 95–106. [Ren X S, Liu Y J, Zhao G H. The impact and transmission mechanism of economic agglomeration on carbon emission intensity[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(4): 95–106.]
- [58] 封亦代, 袁华锡, 刘耀彬. 新型城镇化建设提高城市能源利用效率的机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(5): 138–148. [Feng Y D, Yuan H X, Liu Y B. Mechanisms for improving urban energy use efficiency in China’s new-type urbanization construction[J]. China Population, Resources and Environment, 2023, 33(5): 138–148.]
- [59] 张明, 蓝海林, 陈伟宏, 等. 本土宗教传统与公司避税: 基于我国34100座寺院和8349座宫观的实证研究[J]. 经济学(季刊), 2021, 21(4): 1345–1368. [Zhang M, Lan H L, Chen W H, et al. Indigenous religious tradition and corporate tax avoidance: An empirical study based on 34100 monasteries and 8349 temples in China[J]. China Economic Quarterly, 2021, 21(4): 1345–1368.]
- [60] Lesage J P, Pace K. Spatial econometric model of origin–destination flow[J]. Journal of Regional Science, 2010, 48(5): 941–967.
- [61] 陈姝兴, 付文强, 吴康. 城市收缩对土地价格的影响及其空间溢出效应[J]. 资源科学, 2024, 46(2): 308–320. [Chen S X, Fu W Q, Wu K. The impact of urban shrinkage on land prices and its spatial spillover effects[J]. Resources Science, 2024, 46(2): 308–320.]

The impact of digital industry agglomeration on synergistic pollution reduction and carbon emission reduction: Taking the Yangtze River Economic Belt as an example

LIU Yaobin¹, DENG Weifeng¹, LI Shuoshuo^{1,2}, WEI Guoen², LI Ruzi¹

(1. School of Economics and Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: [Objective] Whether “digitization” and “green” can cooperate is one of the important

scientific issues in the field of high-quality development and high-level protection research. The Yangtze River Economic Belt, as a significant cluster of the digital industry and a key area for pollution reduction and carbon emission reduction coordination, plays a pivotal role in the construction of a beautiful China and the realization of the dual carbon goals. **[Methods]** Based on the equity investment data of the digital industry and the environmental pollution and carbon emission data from 108 cities in the Yangtze River Economic Belt between 2010 and 2020, this study delineated the spatial pattern of the digital industry and the spatial and temporal change characteristics of pollution reduction and carbon emission reduction. A fixed-effect model was employed to explore the impact of the digital industry agglomeration on pollution reduction and carbon emission reduction coordination and mechanism. Additionally, a spatial Durbin model was constructed to analyze its spatial spillover effects and attenuation boundaries. **[Results]** The findings reveal that: (1) The investment network of the digital industry in the Yangtze River Economic Belt exhibits a “multi-pathway, multi-polar” trend of spatial change, with net investment flows showing a clear tendency towards suburbanization, forming a “outflow from the center, receiving by the periphery” distribution pattern. (2) The agglomeration of the digital industry positively drives pollution reduction and carbon emission reduction, also demonstrating synergistic effects for both. This result remains robust after a series of endogeneity and robustness tests. Mechanism tests found that digital industry agglomeration can promote regional pollution reduction and carbon emission reduction coordination through scale economy effects, industrial upgrading effects, and technological innovation effects. (3) Digital industry agglomeration has a significant positive spatial spillover effect on pollution reduction and carbon emission reduction coordination. This effect presents a “right-tailed U-shaped” characteristic with increasing spatial distance. Meanwhile, the area within 250 km of the agglomeration is the “enhancement area” for spatial spillover effects, the area between 250 km and 450 km is the “attenuation area”, and beyond 450 km, the effect approaches zero and becomes insignificant. **[Conclusion]** Research has confirmed that leveraging the agglomeration effects of the digital industry can effectively promote synergistic improvements in regional pollution reduction and carbon emission mitigation. It is recommended to foster the agglomeration and networking development of the digital industry, encourage cross-regional investment in the digital industry, and implement differentiated strategies and cross-regional cooperation platforms.

Key words: digital industry agglomeration; pollution and carbon emission reduction; synergistic effect; spillover effects; spatial attenuation boundaries; spatial Durbin model; Yangtze River Economic Belt