

引用格式: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.] DOI: 10.18402/resci.2022.12.02

数字经济对中国城市工业碳生产率的赋能效应

任晓松^{1,2,3},孙莎¹

(1. 山西财经大学管理科学与工程学院,太原 030031;2. 北京理工大学管理与经济学院,北京 100081;3. 北京理工大学能源与环境政策研究中心,北京 100081)

摘要:数字经济作为中国工业绿色低碳转型的重要引擎,能否进一步促进城市工业实现经济和环境双重效益亟待研究。本文以2011—2018年中国284个地级市面板数据为样本,利用非期望超效率EBM模型、探索性空间数据分析法和空间计量模型等方法,对城市工业碳生产率进行测算并分析其时空特征,解析数字经济对城市工业碳生产率的赋能效应。研究结果如下:①中国城市工业碳生产率总体呈波动性增长趋势,空间正相关性和集聚现象十分显著,高高集聚与低低集聚现象并存,空间非均衡现象仍然存在。②数字经济可以赋能城市工业碳生产率,且存在明显的空间溢出效应,即数字经济不仅有利于提升本地工业碳生产率,也会通过溢出效应对邻近城市工业碳生产率释放促增红利,该结论经过一系列稳健性检验和内生性检验后依然成立。③数字经济对城市工业碳生产率的赋能效应主要通过产业结构优化来实现,现阶段绿色技术创新尚未发挥机制作用。④数字经济对城市工业碳生产率的赋能效应因城市区位与创新环境差异而存在空间异质性,如东部地区数字经济对周边城市工业碳生产率具有辐射带动效应,而高人才集聚区则表现为负向溢出效应。未来应重视数字经济的空间溢出效应,破除城市“各自为战”的治理方式,利用数字化技术构建城际绿色协同治理体系,突破地理边界以形成区域工业减碳合力。

关键词:数字经济;工业碳生产率;赋能效应;空间杜宾模型;中介效应;中国

DOI: 10.18402/resci.2022.12.02

1 引言

党的二十大报告强调了加快发展数字经济、促进数字经济与实体经济深度融合的重要性,同时确定了积极稳妥推进碳达峰、碳中和的战略方针。数字经济赋能“双碳”目标的作用场景及实现机制成为目前的热点和难点问题。依托数字基础设施较为完善、国内市场大、数据要素丰富等优势条件,中国数字经济与社会各领域的多维融合程度不断深化,在促进经济增长、优化资源配置、提高能源效率等方面发挥了强有力的激励效应^[1,2]。中国信通院数据显示,2020年中国数字经济规模达35.8万亿元,占GDP比重为38.6%,增长速度远高于GDP,数

字经济已然成为经济社会发展的新形式。随着数字经济时代的到来,传统生产要素结构发生了重大改变,《中共中央、国务院关于构建更加完善的要素市场化配置体制机制的意见》首次将数据这一新兴投入要素与资本、劳动、土地等置于同等重要地位。云计算、大数据、人工智能等前沿数字技术与行业的结合,催生了一系列数字化产业新业态,对传统行业产生颠覆性冲击,当然也为绿色发展提供了新的方式和机遇,为环境治理和节能减排带来了新视角^[3]。2021年9月,首届中国数字碳中和高峰论坛指出,数字化技术将强有力推进中国工业碳达峰与碳中和,数字化技术加持下,工业要素投入产

收稿日期:2022-06-29;修订日期:2022-09-17

基金项目:国家杰出青年基金项目(71925008);山西省高校哲学社会科学研究项目(2021W055);山西省回国留学人员科研教研资助项目(2022-131)。

作者简介:任晓松,男,山西运城人,副教授,研究方向为低碳经济与能源政策。E-mail: renxs@sxufe.edu.cn

通讯作者:孙莎,女,山西平遥人,硕士研究生,研究方向为低碳经济与能源政策。E-mail: s13015433682@163.com

出效率提升显著,能源消费量和碳排放均有效减少,实现了节能降本与提质增效。由此可见,能源革命与数字革命的深度融合,绿色低碳经济与加速推进的数字经济的相互碰撞,为工业新发展格局的构建指明了新方向。从“双碳”目标的提出到碳达峰行动方案正式推出,中国一直将工业领域碳达峰作为重点任务,工业领域要主动适应绿色低碳发展要求,充分挖掘数字经济降碳潜力以使其在工业减碳运动中发挥“乘法”效应,加快实现工业领域数字与低碳转型。

城市是数字经济发展的核心载体,也是工业活动的主要聚集地和CO₂的主要源地。那么,数字经济在城市工业低碳转型发展进程中能否释放降碳促经的双重红利?数字经济能否对城市工业碳生产率发挥赋能效应?如果赋能效应存在,数字经济影响城市工业碳生产率的传导机制是怎样的?针对这些问题的解析与探讨对于丰富数字经济理论体系、实现城市工业节能减碳具有重要意义。

2 文献综述与理论假说

2.1 文献综述

数字经济自提出以来一直是国内外关注的热点议题,现有研究多数集中探讨数字经济对经济增长、技术创新以及环境污染的影响。具体如下:①数字经济的经济效应。早期研究主要从人工智能^[4]、互联网^[5]、电信基础设施^[6]等信息基建角度探究数字经济对经济发展的影响,如荆文君等^[7]从宏观和微观双重视角剖析互联网、移动通信、云计算等多种数字化技术与区域经济高质量增长的关系及影响机制,为后续探讨提供了理论依据。也有研究从数字交易视角,就数字普惠金融与经济发展的关系展开探索,如张勋等^[8]认为数字金融的出现推动农村居民以创业行为改善经济状况,促进中国经济实现包容性增长。考虑到经济活动往往具有一定的空间关联性,赵涛等^[9]将空间因素纳入模型,从城市层面探讨数字经济的空间溢出效应,发现数字经济对本地和邻近城市经济高质量发展均有显著推动作用。②数字经济的创新激励效应。宏观层面的研究主要涉及全国、省际、城市、县域等尺度,如许恒等^[10]基于博弈模型,从理论层面解释了数字经济能够通过技术溢出效应推动传统产业转型升级;韩先锋等^[11]基于梅特卡夫法则,证实了互联网综合发展

水平与区域创新效率的非线性关系;韩璐等^[12]、周青等^[13]分别从地市尺度、县域尺度,验证了数字经济分别对创新水平、创新绩效的重要驱动作用;也有学者从微观企业层面进行探索,认为数字化技术的应用不仅能够有效激励企业通过数字革新等方式进行创新活动^[14,15],也能不断激励企业增加创新要素投入进而提升企业创新能力^[16]。③数字经济的降污减排效应。现有研究关于数字经济与节能减排的关系尚未形成统一的结论。Lin等^[17]认为互联网的发展通过促进产业结构优化效应和技术溢出效应显著提高了能源效率和碳绩效。Yang等^[18]发现互联网发展与环境污染之间的关系呈现倒“U”型曲线,随着雾霾浓度上升,抑制作用越发显著。数字金融作为数字经济的重要组成部分,许钊等^[19]基于城市层面的研究发现数字金融与环境污染间表现为倒“U”型的非线性关系。Cao等^[20]证实了数字金融能够通过绿色技术创新效应促进中国30省能源环境绩效的提升,且在信贷和资本市场不成熟的地区,数字金融带来的环境红利更为显著。

综上所述,现有研究从不同视角对数字经济红利的释放进行了有益探索,但数字经济能否赋能城市工业碳生产率尚未可知,其赋能效应的作用机制有待挖掘。在考虑城市经济活动可能存在空间关联的基础上,首先,利用非期望超效率EBM模型测度中国2011—2018年284个地级市工业碳生产率,运用探索性空间数据分析法分析其时空特征;其次,基于空间杜宾模型解析数字经济对城市工业碳生产率的赋能效应,并采用广义空间两阶段最小二乘法(GS2SLS)控制内生性问题,以增强结论稳健性;随后,从结构优化效应和绿色创新效应两方面评估数字经济赋能城市工业碳生产率的潜在影响机制;最后,对其赋能效应的空间异质性进行了探讨,为数字经济赋能城市工业领域减污降碳和提质增效提供经验证据。

2.2 理论假说

2.2.1 数字经济对城市工业碳生产率的影响

数字经济催生了新业态,释放了经济增长新动能,尤其是工业互联网、云计算等数字基础设施的建设,为城市工业经济绿色高质量发展开辟了新路径。那么工业领域如何借助数字经济浪潮实现提质增效与减污降碳?首先,依托数字化技术搭建环

2022年12月

境信息平台,可以实时收集工业全过程污染物排放信息^[21],实现精准监测与污染信息透明化,加强了政府与公众对工业污染的规制效应,督促工业领域提高能源利用效率与污染物综合处理率;其次,数字经济通过信息和资源的共享,动态收集工业资源要素投入信息^[22],提高资源集约利用水平与配置效率,加快工业全要素生产率提升以获取经济效益^[23],同时极大地减少了能源浪费和损失^[24],规避了高耗能、高污染和低附加值的发展模式引发的高碳排放问题;再次,数字金融作为数字经济的重要组成部分,能够依托数字化技术降低信息不对称^[19],发挥资本配置效应限制资源向高污染高排放行业流动,通过提高融资效率、加大绿色研发扶持力度等方式推进企业节能技术改造^[25],一定程度上倒逼工业部门绿色转型;最后,数字经济的出现打破了城市间传统时空距离的桎梏^[9],通过数字化技术构建城市虚拟信息网络,增加了城市间经济活动紧密性,提升城市间资源优化配置^[26],实现区域工业协同减排与绿色高质量发展。伴随着政府对数字经济赋能效应的高度重视,可能引发城市间“争上游”现象^[27],即周边城市数字经济的发展会使城市间以及工业企业间出现“逐顶竞争”行为,促进本地工业碳生产率改善的同时,也可能通过示范效应和警示效应促使周边地区加快发展数字经济以助力工业碳减排^[28]。据此,提出假说:

H1:数字经济能够提升城市工业碳生产率,并存在显著的空间外溢效应。

2.2.2 数字经济赋能城市工业碳生产率的影响机制

数字经济的迅猛发展能够有效推动产业结构优化变革,促进工业化与信息化深度融合^[29],进而实现工业领域低碳转型升级。一方面,数字经济的崛起加快了要素配置合理性、生产流程的高效性以及产业间的协同性^[29],加之便利的信息交流与传递网络,为传统企业发展带来低成本与高效率优势;另一方面,数字技术的广泛使用以及新型基础设施的快速布局衍生出一系列新业态,高耗能、高污染的传统企业由于难以突破桎梏逐步被淘汰^[30],促使产业结构向高水平与清洁化方向不断演进。在中国,以工业为主导地位的第二产业发展造成了严重的碳排放问题,产业结构优化布局带来的“结构红利”有效提升了单位投入的产出效能,不仅为本地工业

发展带来经济效益,缓解工业化进程造成的资源损耗和能源浪费^[31],也有助于激发周边地区企业的竞争意识,提高其与本地企业交流合作的紧密性,促进相邻区域工业碳减排,推进工业经济绿色低碳发展。因此,提出假说:

H2:数字经济能够通过产业结构升级赋能城市工业碳生产率。

数字经济降碳红利的释放需以绿色技术创新为“底座”。首先,数字经济依托数字平台建设有效缓解银行企业间的信息不对称现象,信息透明度的加深提高了银行对企业状况判断的准确性,增加企业获取信贷融资机会,为绿色技术创新提供了资金保障^[32];其次,数字化技术的应用冲破资源流动与共享的时空壁垒,使得许多隐性知识趋于显性化,促进绿色信息、低碳技术等资源在供应链上下流动与融合的同时,可能会衍生出新的思想,为城市绿色技术创新提供信息支撑^[33];最后,数字经济的发展加强了各地区企业与科研机构等主体间的合作^[34],激发各主体绿色技术创新动力并形成技术合力,进而对城市绿色技术创新产生积极影响。绿色技术创新在工业领域的广泛应用能够改善能耗结构,提高清洁能源使用比重,加快工业向清洁集约方向转型步伐。此外,绿色技术创新促进了节能技术、末端处理技术等工业领域的运用^[35],推动企业开展绿色生产与研发,并且改善末端治理能力,技术红利下城市工业碳生产率有所提高。因此,提出假说:

H3:数字经济能够通过绿色技术创新赋能城市工业碳生产率。

由于中国在资源禀赋、经济条件和政策环境等方面存在区位差异^[35,36],数字经济兴起所释放的经济与环境效益可能存在异质性。具体而言:①东部地区经济发展起步较早^[37],拥有先进的基础设施和较好的减碳技术,加之工业企业间的相互激励和约束机制^[38],极大促进了数字经济对工业碳生产率的改善。同时,通过城际间技术流动等方式,周边城市数字经济的空间减碳红利得到充分释放。②中西部地区作为中国工业集聚地和化石能源消费高地^[37],具有较大的降碳空间。现阶段地区数字经济尚处于迅猛发展期^[34],各城市致力于依托本地有限资源及虹吸周边要素等方式推动工业数字化,在确

保经济红利的基础上加快实现本地工业减碳,对周边区域尚无法产生溢出带动效应。因此,数字经济对工业碳生产率的空间溢出效应可能会受到区位因素的限制。

人力资本是体现创新环境的关键要素之一^[12],是数字经济红利释放的重要支撑。但由于现阶段中国科创人才分布失衡、流动性偏低等现象严重^[39],数字经济赋能城市工业碳生产率也可能受到地区创新环境的影响。一方面,相较于低人才集聚区,人才集聚水平相对较高的城市不仅满足了数字经济突破式发展对创新环境的需求,更有利于数字经济成果转化^[40],为数字经济依托创新要素实现工业经济与环境双赢局面提供了动力支持;另一方面,高人才集聚区拥有更多的交流、学习与提升机会,吸引大批人才自愿从周边城市流入^[41],集聚效应下数字经济的潜力释放更加充分,但虹吸效应下周边城市创新环境逐渐弱化,因此未能带动城际间协同发展。综上,提出假说:

H4:受城市区位与创新环境的影响,数字经济对城市工业碳生产率的赋能效应存在空间异质性。

3 研究方法 with 数据来源

3.1 模型设定

考虑到城市间交流与合作的紧密性,因此有必要将空间效应纳入模型,进一步揭示数字经济对城市工业碳生产率的空间外溢效应,具体设定如下:

$$cp_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 \sum_{j=1}^n W_{ij} cp_{j,t} + \alpha_2 dige_{i,t} + \alpha_3 \sum_{j=1}^n W_{ij} dige_{j,t} + \alpha_4 X_{i,t} + \alpha_5 \sum_{j=1}^n W_{ij} X_{j,t} + \mu_i + \eta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{i,t} = \psi \sum_{j=1}^n W_{ij} \varepsilon_{j,t} + v_{i,t}$$

式中: $cp_{i,t}$ 表示城市 i 第 t 年的工业碳生产率; $dige_{i,t}$ 表示城市 i 第 t 年的数字经济水平; W_{ij} 表示城市 i 和 j 的空间权重矩阵,分别采用邻接矩阵^[42]、地理距离矩阵^[43]、经济距离矩阵和经济地理复合矩阵^[44]进行回归以保证实证结果的稳健性; $X_{i,t}$ 表示控制变量; $\alpha_0 - \alpha_5$ 均表示待估计参数; μ_i 和 η_t 分别表示城市固定效应和年份固定效应; $\varepsilon_{i,t}$ 和 $v_{i,t}$ 均表示随机误差项; ψ 表示空间残差自回归系数。

基于此,参考彭山桂等^[45]的研究,构建中介效应

模型探究数字经济赋能城市工业碳生产率的作用机制,具体如下:

$$M_{i,t} = \phi_0 + \phi_1 dige_{i,t} + \phi_2 X_{i,t} + \mu_i + \eta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

$$cp_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \sum_{j=1}^n W_{ij} cp_{j,t} + \beta_2 dige_{i,t} + \beta_3 \sum_{j=1}^n W_{ij} dige_{j,t} + \beta_4 M_{i,t} + \beta_5 \sum_{j=1}^n W_{ij} M_{j,t} + \beta_6 X_{i,t} + \beta_7 \sum_{j=1}^n W_{ij} X_{j,t} + \mu_i + \eta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

式中: $M_{i,t}$ 表示中介变量产业结构升级(is)和绿色技术创新($green$); $\phi_0 - \phi_2$ 、 $\beta_0 - \beta_7$ 均表示待估参数;其余变量含义与公式(1)一致。

3.2 变量说明

(1)被解释变量:工业碳生产率(cp)。鉴于全要素框架能够反映出多要素高效配置下,工业领域是否能够实现经济效益最大化与污染排放最小化的双赢局面,将工业投入产出要素纳入分析框架,运用考虑非期望产出的超效率EBM模型测算城市工业碳生产率。其中,投入要素为工业资本存量、工业劳动力、工业土地利用、工业能源投入和工业水资源投入情况^[46-48]。①工业资本存量(K)。根据固定资产投资价格指数对固定资产投资总额与房地产投资额的差值进行平减得到不变价工业固定资产投资额,随后采用永续盘存法对284个地级市的工业资本存量进行估算。②工业劳动力(L)。以第二产业从业人员与建筑业从业人员的差值来衡量。③工业土地利用(A)。选取工业用地面积进行表征。④工业能源投入(E)。以各地级市工业用电量为代理指标。⑤工业水资源投入(S)。采用城市供水总量减去居民用水量估算得到。产出要素方面,以平减后的各地级市工业生产总产值(GDP)作为期望产出,碳排放量(TC)和环境损害指数(ER)作为非期望产出。其中,碳排放量通过城市工业天然气消耗量、工业液化石油气消耗量以及工业电力消耗量与各自的碳排放系数乘积之和得到;环境损害指数基于工业废水排放量、工业 SO_2 排放量和工业烟粉尘排放量指标,采用熵权法进行综合测算得到^[49]。

(2)解释变量:数字经济($dige$)。由于数据获取等方面的局限性,城市层面数字经济的测量尚未有统一标准,多数学者运用赵涛等^[9]的评价体系和测算方法对城市数字经济水平进行测度。基于此,结

2022年12月

合欧盟数字经济指标体系、财新中国数字经济指标体系、中国(苏州)数字经济指数、赛迪中国数字经济指数指标体系等多个国内外测度体系,构建中国城市数字经济水平评价体系(表1),并利用熵权TOPSIS法进行测度。

(3)中介变量:①产业结构升级(*is*)。产业结构高级化不仅限于产业比例的改变,更需关注劳动生产率提升。因此,参考袁航等^[50]的研究,采用产业结构高级化的质量加以测度。②绿色技术创新(*green*)。鉴于专利申请数比授权数更能准确反映城市的创新水平^[51],以各地级市绿色专利申请数取对数来表征。

(4)控制变量:①城市规模(*lnps*)。采用城市人口密度取对数表征^[52],城市规模扩张虽然一定程度上促进了城市经济运行效率改善,但也会因能源消耗增多、消费需求扩大等现象城市环境产生下行压力。②工业企业规模(*lnfirm*)。用城市工业企业数目取对数衡量^[53]。城市工业企业数目增多会带来严重的环境污染问题,阻碍城市经济高质量发展。③工业集聚水平(*lnae*)。采用工业密度取对数衡量城市工业集聚水平^[54]。工业集聚产生的“虹吸效应”能够加强要素在工业领域流动与共享,降低过度消耗引发的污染问题,但过度集聚也会造成“拥挤效应”,引发环境负外部性。④对外开放水平(*fdi*)。利用历年实际使用外资占GDP的比重。对外开放为高污高耗企业向环境规制较为宽松的地区转移提供了渠道,不完备的环境规制政策无法约束进入企业对资源的依赖,致使碳排放问题加剧。⑤财政分权(*fin*)。以城市财政支出占GDP的比重衡量。财政分权程度被认为是影响经济与环境效益的重要因素^[55]。⑥科技投入(*te*)。用城市科技教

育支出占财政支出的比重表示。科技创新有助于提高工业科技进步水平与效率,控制污染物排放。

3.3 数据来源与描述性统计

本文以2011—2018年中国284个城市的面板数据为研究样本(因数据缺失,不含西藏自治区、港澳台地区)。其中,数字普惠金融指数来自北京大学数字金融研究中心,数字经济相关的专利数据取自国家知识产权局专利检索网站,绿色专利数据通过识别世界知识产权组织(WIPO)公布的《绿色专利清单》中的IPC代码统计而得,其余指标均取自2012—2019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》、部分省市统计年鉴和CSMAR数据库。所有变量的描述性统计见表2。

4 结果与分析

4.1 城市工业碳生产率演变特征

2011—2018年,中国工业碳生产率总体呈现出波动性增长趋势,年均增长1.04%。分时期来看,2011—2014年和2015—2018年工业碳生产率年均增长率分别为-4.16%和11.54%。分城市来看(如表3所示),中国各城市工业碳生产率的平均水平存在着较大差异。工业碳生产率高值城市(年均值>0.900)中,西北地区的陇南市(1.091)和固原市(1.069)年均值最高,可能源于两市产业类型以特色农业、文化旅游等为主,工业对城市碳排放的影响相对较小;黄河中游的安康市、鄂尔多斯市和商洛市年均值位列第5、7、8名;其余4个城市为黑河市、三亚市、张家界市和丽江市,分别来自不同的区域。近1/3的城市工业碳生产率年均值颇低(不足0.100),以北部沿海、东部沿海、长江中游居多(因篇幅原因未列出)。从增长率来看,尽管东莞市、深圳市、枣庄市、娄底市、三门峡市、珠海市和孝感市7个

表1 城市数字经济发展水平评价体系

Table 1 Evaluation indicator system of urban digital economy development level

一级指标	二级指标	三级指标	指标属性	
数字经济综合发展指数	数字基础设施	每百人移动电话用户数/(户/百人)	正向	
		每百人互联网用户数/(户/百人)	正向	
	数字产业基础	人均电信业务收入/(万元/人)	正向	
		数字创新能力	计算机和软件从业人员占单位从业人员占比/%	正向
	数字化应用		每万人数字经济相关专利数/(件/万人)	正向
			数字普惠金融指数	正向

表2 变量描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of variables

变量	观测值	最小值	最大值	均值	标准差
<i>cp</i>	2272	0.007	1.574	0.213	0.238
<i>dige</i>	2272	0.025	0.614	0.200	0.080
<i>lnps</i>	2272	1.629	7.882	5.750	0.915
<i>lnfirm</i>	2272	2.996	10.631	6.574	1.092
<i>lnae</i>	2272	2.457	11.856	7.525	1.546
<i>fdi</i>	2272	0.001	0.773	0.020	0.029
<i>fin</i>	2272	0.015	6.041	0.247	0.272
<i>te</i>	2272	0.016	0.372	0.196	0.042
<i>is</i>	2272	0.001	3.430	0.276	0.211
<i>green</i>	2272	3.689	11.007	8.358	1.191

表3 2011—2018年城市工业碳生产率均值

Table 3 Average urban industrial carbon productivity, 2011-2018

城市	均值	排名	增长率/%	城市	均值	排名	增长率/%
陇南市	1.091	1	-0.81	东莞市	0.166	110	62.76
固原市	1.069	2	-8.12	深圳市	0.672	19	54.64
张家界市	0.998	3	6.17	枣庄市	0.111	167	41.17
三亚市	0.975	4	0.42	娄底市	0.159	116	33.68
安康市	0.972	5	2.51	三门峡市	0.417	35	32.35
丽江市	0.935	6	-10.13	珠海市	0.209	91	31.35
鄂尔多斯市	0.920	7	6.89	孝感市	0.108	176	30.49
商洛市	0.916	8	5.68	宣城市	0.294	50	-27.97
黑河市	0.907	9	0.56	宜春市	0.233	75	-26.48

注:由于篇幅限制,此处只列出工业碳生产率均值高于0.900、增长率大于30.00%和负增长率大于20.00%的3类城市。

城市的工业碳生产率均值未达到0.90以上,但均实现了30.00%以上的年均增长。此外,宣城市、宜春市等个别城市的工业碳生产率年均增速超过20.00%,可能是工业资本投入及用电投入不合理造成碳排放等非期望产出冗余量增多所致,因此,工业低碳转型发展应以提高资源利用率和环境保护力度为前提。综上,中国城市工业碳生产率存在较大提升潜力,区域间的协同减排力度亟需加强。

4.2 空间相关性检验结果

表4展示了基于全局Moran's *I*指数的城市工业碳生产率空间相关性检验结果,可以看出2011—2018年间,中国城市工业碳生产率的全局莫兰指数均在1%水平下显著为正,因此在工业碳生产率相关研究中有必要将空间因素纳入考量范围。而且,从指数值大小来看,样本期内城市工业碳生产率Moran's *I*指数呈现波动性降低态势,表明工业碳生

表4 2011—2018年城市工业碳生产率全局自相关检验结果

Table 4 Global autocorrelation test results of urban industrial carbon productivity, 2011-2018

年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Moran's <i>I</i>	0.048***	0.064***	0.049***	0.047***	0.054***	0.049***	0.034***	0.031***
Z值	10.083	13.219	10.469	9.897	11.375	10.422	7.349	6.766
P值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注:***表示1%的水平上显著,下同。

2022年12月

产率相似地市的空间集聚水平有所下降。

为进一步探究城市工业碳生产率的局部空间自相关特征,选取2011和2018年作为研究的时间截面,绘制Moran's I 散点图(图1)。可以看出,中国城市工业碳生产率空间分布并非随机,而是表现

出较强的空间集聚性,即存在高度的空间自相关性,呈现出碳生产率水平高值城市集聚或低值城市集聚的空间分布态势。相较2011年,2018年高高集聚区的空间格局与城市数量进一步扩大,而低值区域面积与城市数量随工业碳生产率的提升明显缩小。

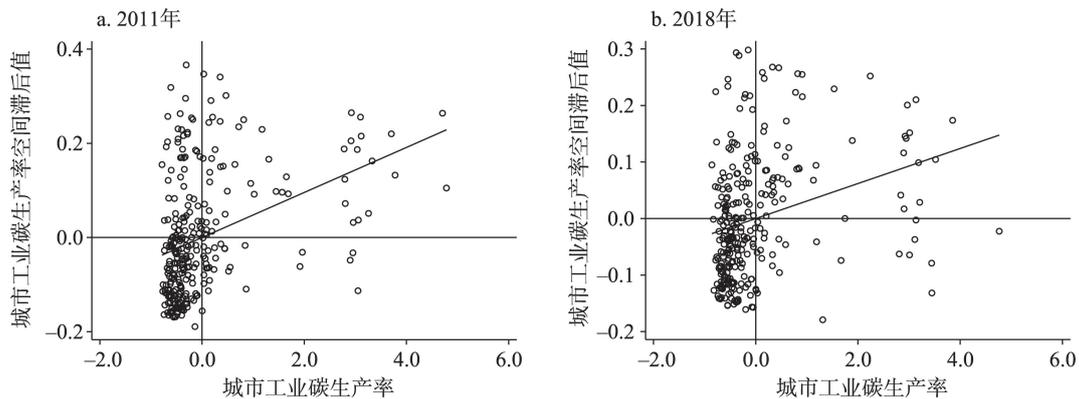


图1 2011和2018年城市工业碳生产率Moran's I 散点图

Figure 1 Moran's I scatter plots of urban industrial carbon productivity, 2011 and 2018

4.3 数字经济赋能城市工业碳生产率的基准回归结果

4.3.1 空间溢出效应分析

借鉴Elhorst^[58]、韩峰等^[59]的检验思路,对模型的适配性进行估计(表5)。LM检验、稳健性LM检验结果均在1%水平下显著为正,表明工业碳生产率空间关联性的存在,证实了引入空间计量模型的合理性。Wald检验、LR检验均在1%的水平上显著拒绝原假设,故选取SDM模型。Hausman检验的统计值为133.410, P 值为 $0.000 < 0.01$,通过了1%的显著性检验,拒绝原假设,故选取固定效应模型较合适。因此,最终选取固定效应SDM模型进行分析。

选取SDM的空间固定效应、时间固定效应和双固定效应分别进行回归估计,以探究数字经济对工业碳生产率的赋能效应。表6回归结果显示,城市工业碳生产率的空间自相关系数 $Spatial\ rho$ 显著为正,表明中国城市工业碳生产率的正向空间外溢效应显著,意味着本地工业碳生产率的改变会对周边城市工业碳生产率产生显著影响,因此城市工业碳排放治理过程中不能只针对单一城市展开,应该采取城际联防联控的减排策略,避免出现城市间工业

碳排放“泄露现象”,分析结果进一步佐证了研究工业碳生产率时加入空间因素考虑的必要性^[58]。表5中LR_SDM_ind和LR_SDM_time的统计值均通过了1%的显著性检验,拒绝原假设,故应选取时空双固定效应模型进行后续分析。结果显示,加入空间因素后,数字经济的回归系数为0.433,且在1%水平下显著为正;数字经济的空间交互项系数($W \times dige$)亦显著为正,表明样本城市在空间上存在外生的数字经济交互效应,数字经济对工业碳生产率的影响

表5 空间计量模型适配性检验结果

Table 5 Suitability test results of spatial econometric model

检验方法	统计值	P 值
LM-lag	27.431***	0.000
Robust-LM-lag	127.320***	0.000
LM-error	314.251***	0.000
Robust-LM-error	414.139***	0.000
Wald_spatial_lag	24.670***	0.001
Wald_spatial_error	23.240***	0.002
LR_spatial_lag	23.290***	0.002
LR_spatial_error	24.830***	0.001
Hausman检验	133.410***	0.000
LR_SDM_ind	25.830***	0.004
LR_SDM_time	2629.040***	0.000

表6 数字经济对城市工业碳生产率的赋能效应估计结果

Table 6 Estimation results of the enabling effect of digital economy on urban industrial carbon productivity

	<i>cp</i>			
	(1)普通面板模型	(2)空间固定效应	(3)时间固定效应	(4)时空双固定效应
<i>dige</i>	0.507*** (3.33)	0.448*** (3.11)	1.128*** (9.74)	0.433*** (3.01)
<i>lnps</i>	-0.060 (-0.85)	-0.052 (-0.73)	-0.064*** (-7.05)	-0.056 (-0.79)
<i>lnirm</i>	-0.057*** (-4.58)	-0.044*** (-3.31)	-0.141*** (-23.63)	-0.048*** (-3.60)
<i>fin</i>	-0.043** (-3.08)	-0.044*** (3.29)	0.107*** (5.77)	0.046*** (-3.38)
<i>fdi</i>	0.051 (0.44)	0.002 (0.01)	-0.162 (-1.06)	-0.009 (-0.08)
<i>lnae</i>	0.023*** (2.94)	0.025*** (3.40)	-0.006 (-1.03)	0.026*** (3.42)
<i>te</i>	-0.105 (-0.81)	-0.025 (-0.20)	-0.158 (-1.23)	0.020 (0.16)
<i>W×dige</i>		-0.188 (-1.08)	0.491* (0.55)	5.231*** (3.28)
<i>W×lnps</i>		0.243 (0.51)	0.287*** (3.24)	0.365 (0.65)
<i>W×lnfirm</i>		-0.128 (0.07)	0.213*** (3.13)	-0.074 (-0.77)
<i>W×fin</i>		-0.081 (-0.92)	0.382* (1.75)	-0.024 (-0.16)
<i>W×fdi</i>		2.251** (2.07)	-5.622*** (-3.21)	1.681 (1.42)
<i>W×lnae</i>		-0.046 (-1.44)	0.011 (0.18)	-0.033 (-0.44)
<i>W×te</i>		0.465 (1.13)	-0.412 (-0.38)	-3.957*** (-3.25)
<i>Spatial rho</i>		0.644*** (7.12)	0.556*** (4.58)	0.342** (2.12)
Loglikelihood		1969.607	668.003	1982.523
<i>N</i>	2272	2272	2272	2272

注：*、**、***分别表示10%、5%、1%的水平上显著，括号中数值为*t*值；下同。

具有明显的空间溢出效应。综上，在考虑了城市空间关联后，数字经济对城市工业碳生产率的促进作用依然成立。

表7为效应分解后的估计结果。其中，直接效应反映了数字经济等变量的变动对本地工业碳生产率的影响，间接效应则用于描述本地数字经济等变量的变动对其他城市工业碳生产率的空间外溢情况，总效应则揭示了数字经济等变量的变动对全

部城市工业碳生产率的影响。可以看出，无论是直接效应、溢出效应还是总效应，数字经济的系数均显著为正，说明数字经济不仅能显著提升本地工业碳生产率，而且能够通过空间溢出效应间接带动邻近城市工业碳生产率的提升，即对中国城市工业碳生产率总体上起到积极的改善作用。

就控制变量来看，城市规模(*lnps*)的直接效应系数为负但不显著，人口密度增长引发了严重的城

2022年12月

表7 数字经济对工业碳生产率的赋能效应影响估计

Table 7 Impact of the enabling effects of digital economy on industrial carbon productivity

	直接效应	间接效应	总效应
<i>dige</i>	0.453*** (3.15)	8.437*** (2.63)	8.891*** (2.77)
<i>lnps</i>	-0.062 (-1.05)	0.560 (0.60)	0.498 (0.54)
<i>lnfirm</i>	-0.048*** (-3.33)	-0.147 (-0.80)	-1.195 (-1.08)
<i>fin</i>	-0.045*** (-3.07)	-0.062 (-0.20)	-0.106 (-0.34)
<i>fdi</i>	-0.026 (-0.21)	-2.762 (1.16)	2.735 (1.15)
<i>lnae</i>	0.026*** (3.49)	-0.047 (-0.38)	-0.021 (-0.17)
<i>te</i>	0.009 (0.07)	-6.189** (-2.34)	-6.180** (-2.35)

市拥挤效应,不断扩大的市场需求加快了工业生产活动,一定程度上城市工业污染问题并未得到改善。工业企业规模(*lnfirm*)和财政分权(*fin*)对本地工业碳生产率的直接效应显著为负,部分原因是本地庞大的工业规模加之周边城市高污高排企业的流入,给本地造成了严重的污染排放;而财政分权程度的提升虽然能够发挥“看得见的手”在城市工业资源配置中的引导作用,但也会由于“政治锦标赛”等因素,过度注重经济绩效而忽视了减污降碳的重要性。对外开放水平(*fdi*)的间接效应和总效

应均为负,在中国对外开放战略背景下,各城市都积极引进外资,但地方政府出于政绩考核,盲目追求经济增长,致使环境规制政策及环保规范让位于招商引资,为了广泛吸引外资放低了环境规制和碳排放门槛,外商投资质量无法得到保证,整体上不利于工业碳生产率发展,并对周边城市工业碳生产率产生抑制作用^[59]。工业集聚(*lnae*)促增了本地工业碳生产率,对周边城市工业碳生产率的影响为负,但不显著,原因在于工业集聚产生的“虹吸效应”超过了“拥挤效应”,促进了创新要素在本地工业企业间流动与共享,降低过度消耗引发的污染问题。科技投入(*te*)对本地工业碳生产率的作用并不显著,可能源于在中国以工业为主导的城镇化进程中,用于能源效率改进、绿色环保技术方面的科技投入资本占比较少^[59],且具有针对性不足、使用效率低下、市场扭曲等缺陷,因此尚未发挥降碳效应。

4.3.2 稳健性检验

为确保赋能效应的可靠性,采用以下几种方法进行稳健性检验:①替换空间权重矩阵。考虑到空间权重矩阵选择差异对空间分析结果可靠性的影响,进一步构建邻接矩阵、经济距离矩阵和经济地理复合矩阵证实数字经济对工业碳生产率空间外溢效应的稳健性,结果如表8列(1)-(3)。可以发现,不同空间矩阵下,数字经济对城市工业碳生产率的直接效应、间接效应和总效应在1%水平下显著为正,3种效应的作用方向与表7中的估计结果完全一致。从效应大小来看,间接效应水平均高于直接效应。②替换被解释变量。利用各城市人均GDP与工业CO₂的比值取对数(*lnce*)作为工业碳生

表8 稳健性检验

Table 8 Robustness test

变量名称	效应类型	<i>cp</i>			<i>lnce</i>	<i>cp</i>
		(1)邻接矩阵	(2)经济距离矩阵	(3)复合矩阵	(4)替换Y	(5)1%缩尾处理
<i>dige</i>	直接效应	0.920*** (7.82)	0.944*** (8.58)	0.719*** (6.08)	4.593*** (14.73)	0.637*** (4.29)
	间接效应	0.930*** (4.98)	1.751*** (6.34)	2.064*** (7.92)	18.294* (1.65)	11.733*** (3.10)
	总效应	1.850*** (10.96)	2.695*** (10.29)	2.782*** (12.16)	22.987** (2.06)	12.370*** (3.27)
控制变量		是	是	是	是	是

产率替代指标,回归结果见表8列(4)。③缩尾处理。列(5)为经过1%缩尾处理后的样本回归结果。可以发现,经过一系列稳健性检验,不论是直接效应、间接效应还是总效应,数字经济可以有效提升城市工业碳生产率,且空间溢出效应明显。

4.3.3 内生性检验

数字经济的迅猛发展为传统产业营造了合理高效的绿色发展机制,有助于实现工业领域经济增长与减排双赢,然而工业碳生产率水平较高的城市,可能具有更完备的基础设施与技术条件,更易推动数字经济发展,故可能存在反向因果关系。此外,尽管控制了影响工业碳生产率的其他因素,但仍无法避免遗漏变量问题。因此,考虑到以上现象可能导致的内生性问题,参考邵帅等^[60]的研究,采用广义空间两阶段最小二乘法(GS2SLS)进行回归估计,该方法以各解释变量及其空间滞后项为工具变量,能够同时控制城市工业碳生产率的空间外溢效应及内生性问题。表9呈现了以三阶空间滞后项作为工具变量的GS2SLS估计结果,城市工业碳生产率的空间滞后项在1%水平上显著,数字经济对城市工业碳生产率的影响显著为正。此外,空间GMM模型的回归结果显示,城市工业碳生产率的空间滞后项以及数字经济的系数均显著为正,再次证实了基准回归结果的稳健性,H1得到验证。

表9 内生性检验结果

Table 9 Results of endogeneity tests

	(1)GS2SLS	(2)SPGMM
<i>dige</i>	0.117*** (3.12)	0.300*** (4.97)
<i>Spatial rho</i>	1.098***	0.021***
控制变量	是	是
Loglikelihood	1055.381	514.868
<i>N</i>	2272	2272

4.4 数字经济赋能城市工业碳生产率的影响机制

4.4.1 中介效应分析

为验证H2和H3,参考彭山桂等^[45]的研究,进一步探讨数字经济赋能城市工业碳生产率的传导机制,表10展示了地理距离矩阵下的机制检验结果。其中,列(1)-(3)为结构优化效应检验结果,列(1)已经证实了数字经济(*dige*)对城市工业碳生产率(*cp*)的赋能效应;列(2)中,数字经济(*dige*)的系数在1%水平下显著为正(0.308),表明数字经济带动了城市产业结构的优化与升级,加快产业内部要素与结构调整,同时产业间的耦合协调性显著提升。列(3)显示,产业结构升级(*is*)对城市工业碳生产率(*cp*)的影响系数为0.082,且在 $P<0.01$ 水平下显著,此外,数字经济(*dige*)的系数为0.411<0.433,表明产业结构升级在数字经济降碳促经红利释放过程中起到传导作用。数字经济通过技术渗透、集约资

表10 传导路径检验结果

Table 10 Test results of indirect paths

	<i>cp</i>	<i>is</i>	<i>cp</i>	<i>cp</i>	<i>green</i>	<i>cp</i>
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>dige</i>	0.433*** (3.01)	0.308*** (2.20)	0.411*** (2.86)	0.433*** (3.01)	0.098 (0.44)	0.437*** (3.03)
<i>is</i>			0.082*** (3.63)			
<i>green</i>						-0.025 (-1.20)
<i>Spatial rho</i>	0.342** (2.12)		0.342** (2.12)	0.342** (2.12)		0.339** (2.10)
控制变量	是	是	是	是	是	是
<i>dige</i> 空间滞后项	是		是	是		是
控制变量空间滞后项	是		是	是		是
Loglikelihood	1982.523		1989.092	1982.523		1983.963
<i>N</i>	2272	2272	2272	2272	2272	2272

2022年12月

源、产业协同等方式促进了产业结构向资源节约、绿色低碳等高级化方向转型^[34],有效改善工业部门的产出效益与能源结构,促进产业结构降碳效应的发挥,至此H2得到验证。列(4)–(6)为绿色创新效应的检验结果,可以看出,数字经济(*dige*)对绿色技术创新(*green*)的影响为正但不显著,意味着数字经济尚未能通过绿色技术创新来提升城市工业碳生产率,这与H3并不完全一致。绿色技术创新风险与成本较高,短期内无法覆盖城市工业经济的遵循成本,创新驱动效应还未显现。表11列示了邻接矩阵下的传导机制稳健性检验结果,产业结构升级(*is*)的部分中介效应仍然显著有效,而绿色技术创新(*green*)尚未发挥显著机制作用,证实了传导机制结论的稳健性。

4.4.2 异质性分析

(1)城市区位异质性。由于各地区基础设施、数字经济发展水平均存在显著差异,因此不同区域的数字经济红利也表现出较大差异。据此将284个样本城市划分为东部和中西部两组,分析不同区域数字经济对城市工业碳生产率的作用效果异质性,结果如表12列(1)和(2)所示。直接效应和间接效应显示,东部地区数字经济对本地和邻地工业碳生产率均有显著的正向促进作用。东部地区数字经济发展较早且水平较高,这一优势条件不仅有助于本地数字经济发挥降碳效应,也对周边城市工业碳生产率具有显著辐射带动效应,数字红利得到充分释放。而中西部地区工业化特征显著,城市在基础设施、技术水平、经济发展等方面相对较弱,一方面

表11 传导路径稳健性检验结果

Table 11 Robustness test results of indirect paths

	<i>cp</i>	<i>is</i>	<i>cp</i>	<i>cp</i>	<i>green</i>	<i>cp</i>
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>dige</i>	0.505*** (3.53)	0.308*** (2.20)	0.477*** (3.34)	0.505*** (3.53)	0.098 (0.44)	0.505*** (3.53)
<i>is</i>			0.083*** (3.62)			
<i>green</i>						-0.048 (-1.78)
<i>Spatial rho</i>	0.105*** (3.71)		0.101*** (3.59)	0.105*** (3.71)		0.106*** (3.77)
控制变量		是	是		是	是
<i>dige</i> 空间滞后项			是			是
控制变量空间滞后项			是			是
Loglikelihood	1978.873		1987.022	1978.873		1980.508
<i>N</i>	2272	2272	2272	2272	2272	2272

表12 异质性分析结果

Table 12 Heterogeneity analysis

变量名称	效应类型	<i>cp</i>			
		(1)东部地区	(2)中西部地区	(3)高人才集聚区	(4)低人才集聚区
<i>dige</i>	直接效应	0.868*** (8.23)	0.395 (1.55)	0.955*** (8.01)	0.350* (1.88)
	间接效应	1.132** (2.52)	0.363 (0.98)	-1.239*** (-6.51)	0.392 (1.13)
	总效应	2.000*** (4.93)	0.758*** (2.89)	-0.284* (-1.89)	0.742** (2.61)
控制变量		是	是	是	是

需要向周边城市汲取资源,另一方面向周边城市转移高污染工业企业,以此谋求自身低碳发展,因此尚未表现出显著的溢出效应。

(2)城市创新环境异质性。创新环境在促进经济增长和改善环境质量等方面具有重要作用,而人才环境是评价区域创新环境的重要维度之一。因此,参考韩璐等^[12]的研究,选用人才集聚水平表征城市创新环境,据此将样本城市划分为高值和低值两组,分析数字经济对城市工业碳生产率的作用效果异质性,结果见表12列(3)和(4)。直接效应显示,人才集聚水平高值和低值区域,数字经济对本地工业碳生产率均有显著的促增效应,但高值区域作用效果更大。间接效应显示,高人才集聚区数字经济对周边城市工业碳生产率的影响存在显著虹吸效应,而低人才集聚区该溢出效果不显著,原因在于:高人才集聚区数字经济的发展吸引了更多周边城市人才流入,致使外围形成创新洼地,工业降碳面临人才短缺等瓶颈,因此表现出负向外溢效应;低人才集聚区本身创新环境相对较弱,数字经济的发展使研发人员等高知在本地得到重视与充分利用,致力于本地工业低碳转型,短期内无法产生外溢效应。

5 结论和政策建议

5.1 结论

数字经济作为一种以数字化技术为载体的新型经济形态,在催生数字化产业新业态、形成经济增长新动能的同时,也为工业绿色治理、节能减排提供了新机遇和新视角。以中国2011—2018年284个地级市面板数据为样本,揭示数字经济对工业碳生产率的赋能效应及其影响机制,并进一步探究数字经济红利释放的空间异质性。研究结论如下:

(1)中国城市工业碳生产率总体呈波动性提升态势,但仍存在显著异质性,约1/3的城市年均值颇低,存在巨大的碳减排潜力与空间。空间特征方面表现出高度空间自相关性,高高集聚和低低集聚现象显著,2018年高高集聚区范围进一步扩大,低值区域面积与城市数量明显缩小。

(2)数字经济可以赋能城市工业碳生产率,且存在明显的空间溢出效应,即本地数字经济水平的提升会通过溢出效应促进周边城市工业碳生产率

增加。

(3)数字经济能够通过产业结构优化间接释放经济与环境的双重红利,然而绿色技术创新在此过程中尚未发挥机制作用。

(4)城市区位与创新环境异质性条件下,数字经济对城市工业碳生产率的赋能效应存在空间异质性。具体来讲,数字经济的正向外溢效应只在东部地区得到体现,高人才集聚区表现为负向外溢效应,而中西部和低人才集聚区尚未表现出数字红利的外溢效应。

5.2 政策建议

为了充分发挥数字经济对城市工业碳生产率的赋能效应,加快形成区域工业减碳合力,基于以上结论得到如下政策建议:

(1)充分考虑空间特征,因地制宜制定工业绿色减排方针。各城市应立足于自身发展优势与产业模式,增强效率高值城市的辐射带动作用,通过数字化、绿色化手段引导高排低效城市加快产业转型升级,以消除区域发展不均衡现象。同时,工业领域要加大绿色技术投入,激发与培育减碳新动能以加快区域协同减碳,从而逐步缩小工业碳生产率差距,促进工业绿色协同发展。

(2)挖掘数字经济减排潜力,助力城市工业低碳转型。强化工业互联网、工业大数据中心等新型基础设施建设,深化数字经济与传统工业领域的相互融合与渗透,推动工业完成变绿计划与减碳目标。另外,利用数字经济催生的新动能助力工业数字化与低碳化转变,依托数字化技术通过优化要素配置与能源消费结构等方式缓解工业对生态环境的压力,充分释放数字降碳红利。

(3)完善数字经济赋能结构与创新机制,提高城市工业降碳增量。充分发挥数字经济发展在优化生产流程、提高产能效率、加快信息传递等方面的潜力,合理优化布局城市产业体系,在保证产业质量与可持续性的前提下,引导产业结构向智能化、信息化等高级化方向转型。以数字技术为支撑,聚焦开展减碳节能技术研发工作,促进数字经济绿色技术创新红利的释放,激发创新在城市工业碳生产率改善中的赋能作用。

(4)破除数字经济与工业减碳城市壁垒,加强

2022年12月

空间联动机制构建。利用数字经济环境红利的空间溢出效应,提升其在工业碳生产率方面的空间贡献。基于城市地理背景、创新环境等特点,加强城市间的交流合作机制,高数字化城市充分发挥其辐射带动作用,而低数字化城市调动自身主观能动性,积极探寻工业增绿提效先进措施与经验,探索合适的工业低碳转型路径,促进城市工业碳生产率协同提升。

参考文献(References):

- [1] 余海华. 中国数字经济空间关联及其驱动因素研究[J]. 统计与信息论坛, 2021, 36(9): 23-34. [Yu H H. Study on spatial correlation of digital economy and its driving factors in China[J]. Journal of Statistics and Information, 2021, 36(9): 23-34.]
- [2] Acemoglu D, Restrepo P. Automation and new tasks: How technology displaces and reinstates labor[J]. Journal of Economic Perspectives, 2019, 33(2): 3-30.
- [3] Zhou J, Lan H L, Zhao C, et al. Haze pollution levels, spatial spillover influence, and impacts of the digital economy: Empirical evidence from China[J]. Sustainability, 2021, DOI: 10.3390/su13169076.
- [4] 陈彦斌, 林晨, 陈小亮. 人工智能、老龄化与经济增长[J]. 经济研究, 2019, 54(7): 47-63. [Chen Y B, Lin C, Chen X L. Artificial intelligence, aging and economic growth[J]. Economic Research Journal, 2019, 54(7): 47-63.]
- [5] 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.]
- [6] Datta A, Agarwal S. Telecommunications and economic growth: A panel data approach[J]. Journal of Applied Economic, 2004, 36(15): 1649-1654.
- [7] 荆文君, 孙宝文. 数字经济促进经济高质量发展: 一个理论分析框架[J]. 经济学家, 2019, (2): 66-73. [Jing W J, Sun B W. Digital economy promotes high-quality economic development: A theoretical analysis framework[J]. Economist, 2019, (2): 66-73.]
- [8] 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.]
- [9] 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, entrepreneurship, and high-quality economic development: Empirical evidence from urban China[J]. Journal of Management World, 2020, 36(10): 65-76.]
- [10] 许恒, 张一林, 曹雨佳. 数字经济、技术溢出与动态竞争政策[J]. 管理世界, 2020, 36(11): 63-84. [Xu H, Zhang Y L, Cao Y J. Digital economy, technology spillover and dynamic competition policy [J]. Journal of Management World, 2020, 36(11): 63-84.]
- [11] 韩先锋, 宋文飞, 李勃昕. 互联网能成为中国区域创新效率提升的新动能吗?[J]. 中国工业经济, 2019, (7): 119-136. [Han X F, Song W F, Li B X. Can the internet become a new momentum to improve the efficiency of regional innovation in China?[J]. China Industrial Economics, 2019, (7): 119-136.]
- [12] 韩璐, 陈松, 梁玲玲. 数字经济、创新环境与城市创新能力[J]. 科研管理, 2021, 42(4): 35-45. [Han L, Chen S, Liang L L. Digital economy, innovation environment and urban innovation capabilities[J]. Science Research Management, 2021, 42(4): 35-45.]
- [13] 周青, 王燕灵, 杨伟. 数字化水平对创新绩效影响的实证研究: 基于浙江省73个县(区、市)的面板数据[J]. 科研管理, 2020, 41(7): 120-129. [Zhou Q, Wang Y L, Yang W. An empirical study of the impact of digital level on innovation performance: A study based on the panel data of 73 counties (districts, cities) of Zhejiang Province[J]. Science Research Management, 2020, 41(7): 120-129.]
- [14] Caputo F, Cillo V, Candelo E, et al. Innovating through digital revolution: The role of soft skills and big data in increasing firm performance[J]. Management Decision, 2019, 57(8): 2032-2051.
- [15] 周文辉, 王鹏程, 杨苗. 数字化赋能促进大规模定制技术创新[J]. 科学学研究, 2018, 36(8): 1516-1523. [Zhou W H, Wang P C, Yang M. Digital empowerment promotes mass customization technology innovation[J]. Studies in Science of Science, 2018, 36(8): 1516-1523.]
- [16] 杨德明, 刘泳文. “互联网+”为什么加出了业绩?[J]. 中国工业经济, 2018, (5): 80-98. [Yang D M, Liu Y W. Why can internet plus increase performance?[J]. China Industrial Economics, 2018, (5): 80-98.]
- [17] Lin B Q, Zhou Y C. Does the internet development affect energy and carbon emission performance?[J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 28: 1-10.
- [18] Yang X D, Wu H T, Ren S Y, et al. Does the development of the internet contribute to air pollution control in China? Mechanism discussion and empirical test[J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2021, 56: 207-224.
- [19] 许钊, 高煜, 霍治方. 数字金融的污染减排效应[J]. 财经科学, 2021, (4): 28-39. [Xu Z, Gao Y, Huo Z F. Research on pollution reduction effect of digital finance[J]. Finance & Economics, 2021, (4): 28-39.]
- [20] Cao S P, Nie L, Sun H P, et al. Digital finance, green technological innovation and energy-environmental performance: Evidence from China's regional economies[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129458.

- [21] ElMassah S, Mohieldin M. Digital transformation and localizing the sustainable development goals (SDGs)[J]. *Ecological Economics*, 2020, DOI: 10.1016/j.ecolecon.2019.106490.
- [22] Cao Y J, Shen D. Contribution of shared bikes to carbon dioxide emission reduction and the economy in Beijing[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, DOI: 10.1016/j.scs.2019.101749.
- [23] 张少华, 陈治. 数字经济与区域经济增长的机制识别与异质性研究[J]. *统计与信息论坛*, 2021, 36(11): 14–27. [Zhang S H, Chen Z. Research on mechanism identification and heterogeneity of digital economy and regional economic growth[J]. *Journal of Statistics and Information*, 2021, 36(11): 14–27.]
- [24] Goralski M A, Tan T K. Artificial intelligence and sustainable development[J]. *The International Journal of Management Education*, 2020, DOI: 10.1016/j.ijme.2019.100330.
- [25] Wang H L, Guo J G. Impacts of digital inclusive finance on CO₂ emissions from a spatial perspective: Evidence from 272 cities in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131618.
- [26] 刘传明, 马青山. 网络基础设施建设对全要素生产率增长的影响研究: 基于“宽带中国”试点政策的准自然实验[J]. *中国人口科学*, 2020, (3): 75–88. [Liu C M, Ma Q S. Research on the influence of network infrastructure construction on total factor productivity growth: A quasi-natural experiment of “Broadband China” pilot policy[J]. *Chinese Journal of Population Science*, 2020, (3): 75–88.]
- [27] 李子豪, 白婷婷. 政府环保支出、绿色技术创新与雾霾污染[J]. *科研管理*, 2021, 42(2): 52–63. [Li Z H, Bai T T. Government environmental protection expenditure, green technology innovation and smog pollution[J]. *Science Research Management*, 2021, 42(2): 52–63.]
- [28] 任亚运, 张广来. 城市创新能够驱散雾霾吗? 基于空间溢出视角的检验[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(2): 111–120. [Ren Y Y, Zhang G L. Can city innovation dispel haze? Evidence from the perspective of spatial spillover[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(2): 111–120.]
- [29] 刘强, 马彦瑞, 徐生霞. 数字经济发展是否提高了中国绿色经济效率?[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(3): 72–85. [Liu Q, Ma Y R, Xu S X. Has the development of digital economy improved the efficiency of China’s green economy?[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(3): 72–85.]
- [30] 韩健, 李江宇. 数字经济发展对产业结构升级的影响机制研究[J]. *统计与信息论坛*, 2022, 37(7): 13–25. [Han J, Li J Y. Research on the influence mechanism of digital economic development on industrial structure upgrading[J]. *Journal of Statistics and Information*, 2022, 37(7): 13–25.]
- [31] 逯进, 李婷婷. 产业结构升级、技术创新与绿色全要素生产率: 基于异质性视角的研究[J]. *中国人口科学*, 2021, (4): 86–97. [Lu J, Li T T. Industrial structure, technological innovation and green total factor productivity: Research in the perspective of heterogeneity[J]. *Chinese Journal of Population Science*, 2021, (4): 86–97.]
- [32] 靳毓, 文雯, 何茵. 数字化转型对企业绿色创新的影响: 基于中国制造业上市公司的经验证据[J]. *财贸研究*, 2022, 33(7): 69–83. [Jin Y, Wen W, He Y. Impact of digital transformation on corporate green innovation: Evidence from China’s manufacturing listed companies[J]. *Finance and Trade Research*, 2022, 33(7): 69–83.]
- [33] 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 digitalization 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.]
- [34] 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.]
- [35] Xu L, Fan M T, Yang L L, et al. Heterogeneous green innovations and carbon emission performance: Evidence at China’s city level [J]. *Energy Economics*, 2021, DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105269
- [36] Feng Y C, Wang X H, Liang Z. How does environmental information disclosure affect economic development and haze pollution in Chinese cities? The mediating role of green technology innovation [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145811
- [37] Xue Y, Tang C, Wu H T, et al. The emerging driving force of energy consumption in China: Does digital economy development matter?[J]. *Energy Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.enpol.2022.112997
- [38] Zhang W, Liu X M, Wang D, et al. Digital economy and carbon emission performance: Evidence at China’s city level[J]. *Energy Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.enpol.2022.112927
- [39] 余博, 潘爱民. 数字经济、人才流动与长三角地区高质量发展[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(6): 1481–1493. [Yu B, Pan A M. Imbalance of talent flow, digital economy and high-quality development of Yangtze River Delta Economic Zone[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(6): 1481–1493.]
- [40] Männasoo K, Hein H, Ruubel R. The contributions of human capital, R&D spending and convergence to total factor productivity growth[J]. *Regional Studies*, 2018, 52(12): 1598–1611.
- [41] 孟宏伟, 赵华平, 张所地. 信息基础设施建设与区域数字化创业活跃度[J]. *中南财经政法大学学报*, 2022, (4): 145–160. [Meng H W, Zhao H P, Zhang S D. Information infrastructure and digital entrepreneurship[J]. *Journal of Zhongnan University of Economics*, 2022, (4): 145–160.]
- [42] 伍国勇, 孙小钧, 于福波, 等. 中国种植业碳生产率空间关联格

2022年12月

- 局及影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(5): 46-57. [Wu G Y, Sun X J, Yu F B. Spatial correlation pattern and influencing factors of China's crop production carbon productivity [J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(5): 46-57.]
- [43] 王东, 李金叶. 财政分权对环境污染的空间效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(2): 44-51. [Wang D, Li J Y. Spatial effect of fiscal decentralization on environmental pollution[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(2): 44-51.]
- [44] 李子豪, 袁丙兵. 地方政府的雾霾治理政策作用机制: 政策工具、空间关联和门槛效应[J]. 资源科学, 2021, 43(1): 40-56. [Li Z H, Yuan B B. Environmental policy mechanism of local governments in the treatment of haze pollution: Policy tools, spatial correlations and threshold effects[J]. Resources Science, 2021, 43(1): 40-56.]
- [45] 彭山桂, 孙昊, 郭正宁, 等. 土地资源空间错配对城市产业转型升级的影响及作用机制[J]. 资源科学, 2022, 44(5): 871-885. [Peng S G, Sun H, Guo Z N, et al. Impact mechanism of land resources spatial mismatch on urban industrial transformation and upgrading[J]. Resources Science, 2022, 44(5): 871-885.]
- [46] 李在军, 胡美娟, 张爱平, 等. 工业生态效率对PM2.5污染的影响及溢出效应[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 737-751. [Li Z J, Hu M J, Zhang A P, et al. Influence and spillover effect of industrial eco-efficiency on PM2.5 pollution[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 737-751.]
- [47] 韩海彬, 牛可萌. 技术异质下中国三大城市群工业用地利用效率评价[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1193-1207. [Han H B, Niu K M. Evaluation of industrial land use efficiency of China's three major urban agglomerations under technology heterogeneity[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1193-1207]
- [48] 邓光耀, 张忠杰. 基于网络SBM-DEA模型和GML指数的中国各省工业用水效率研究[J]. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1457-1470. [Deng G Y, Zhang Z J. The study on industrial water use efficiency of Chinese provinces: Based on network SBM-DEA model and GML index[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(7): 1457-1470.]
- [49] 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 intensity[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(4): 95-106.]
- [50] 袁航, 朱承亮. 国家高新区推动了中国产业结构转型升级吗? [J]. 中国工业经济, 2018, (8): 60-77. [Yuan H, Zhu C L. Do national high-tech zones promote the transformation and upgrading of China's industrial structure?[J]. China Industrial Economics, 2018, (8): 60-77.]
- [51] 占华, 后梦婷, 檀菲菲. 智能化发展对中国企业绿色创新的影响: 基于新能源产业上市公司的证据[J]. 资源科学, 2022, 44(5): 984-993. [Zhan H, Hou M T, Tan F F. Influence of intelligentization on enterprise green innovation: Evidence from listed companies of new energy industry in China[J]. Resources Science, 2022, 44(5): 984-993.]
- [52] 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 difference, distribution dynamics and convergence of eco-efficiency of urban clusters in China[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2021, 38(1): 23-42.]
- [53] 李德山, 张郑秋, 付磊, 等. 中国城市PM2.5减排效率的区域差异及其影响机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(4): 74-85. [Li D S, Zhang Z Q, Fu L, et al. Regional differences in PM2.5 emission reduction efficiency and their influencing mechanism in Chinese cities[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(4): 74-85.]
- [54] 胡志强, 苗健铭, 苗长虹. 中国地市工业集聚与污染排放的空间特征及计量检验[J]. 地理科学, 2018, 38(2): 168-176. [Hu Z Q, Miao J M, Miao C H. Spatial characteristics and econometric test of industrial agglomeration and pollutant emissions in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(2): 168-176.]
- [55] 林江彪, 王亚娟, 张小红, 等. 黄河流域城市资源环境效率时空特征及影响因素[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 208-222. [Lin J B, Wang Y J, Zhang X H, et al. Spatial and temporal characteristics and influencing factors of urban resources and environmental efficiency in the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1): 208-222.]
- [56] Elhorst J P. Matlab software for spatial panels[J]. International Regional Science Review, 2014, 37(3): 389-405.
- [57] 韩峰, 谢锐. 生产性服务业集聚降低碳排放了吗? 对我国地级及以上城市面板数据的空间计量分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2017, 34(3): 40-58. [Han F, Xie R. Does the agglomeration of producer services reduce carbon emissions?[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2017, 34(3): 40-58.]
- [58] 李小平, 余东升, 余娟娟. 异质性环境规制对碳生产率的空间溢出效应: 基于空间杜宾模型[J]. 中国软科学, 2020, (4): 82-96. [Li X P, Yu D S, Yu J J. Spatial spillover effect of heterogeneous environmental regulations on carbon productivity: Spatial Durbin Model[J]. China Soft Science, 2020, (4): 82-96.]
- [59] 刘传江, 胡威. 外商直接投资提升了中国的碳生产率吗? 基于空间面板Durbin模型的经验分析[J]. 世界经济研究, 2016, (1): 99-109. [Liu C J, Hu W. FDI enhances carbon productivity in China? Empirical analysis of Spatial Durbin Model[J]. World Economy Studies, 2016, (1): 99-109.]
- [60] 邵帅, 李欣, 曹建华. 中国的城市化推进与雾霾治理[J]. 经济研究, 2019, 54(2): 148-165. [Shao S, Li X, Cao J H. Urbanization promotion and haze pollution governance in China[J]. Economic Research Journal, 2019, 54(2): 148-165.]

The enabling effect of digital economy on urban industrial carbon productivity in China

REN Xiaosong^{1,2,3}, SUN Sha¹

(1. School of Management Science and Engineering, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030031, China;

2. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. Center for Energy and Environmental Policy Research, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: As an important engine of green and low-carbon industrial transformation in China, the role of digital economy in further promoting urban industry to achieve dual economic and environmental benefits needs to be examined. Based on the panel data of 284 prefecture-level cities in China from 2011 to 2018, this study analyzed the enabling effect of digital economy on urban industrial carbon productivity by measuring and analyzing the spatial-temporal characteristics of urban industrial carbon productivity using the methods of unexpected super-efficiency Epsilon Based Measure (EBM) model, exploratory spatial data analysis, and spatial econometric model. The results are as follows: (1) China's urban industrial carbon productivity showed an overall trend of fluctuating growth, the positive spatial correlation and spatial agglomeration of urban industrial carbon productivity are significant, with high-high and low-low agglomerations coexisting, and spatial disequilibrium still exists. (2) Digital economy can empower urban industrial carbon productivity, and there is an obvious spatial spillover effect. That is to say, digital economy is not only conducive to improving local industrial carbon productivity, but also releases promoting dividends to the industrial carbon productivity of neighboring cities through spillover effect. This conclusion is still valid after a series of robustness tests and endogeneity tests. (3) The enabling effect of digital economy on urban industrial carbon productivity is mainly realized through structural optimization effect. At present, green technology innovation has not played a mechanism role. (4) The enabling effect of digital economy on urban industrial carbon productivity is spatially heterogeneous due to urban location and innovation environment differences. The digital economy in eastern China has a radiative driving effect on the industrial carbon productivity of surrounding cities, while the high talent agglomeration areas showed a negative spillover effect. In the future, we should pay attention to the spatial spillover effect of digital economy, eliminate the governance mode of "each party fighting its own battle", use digital technology to build an inter-city green collaborative governance system, and break through geographical boundaries to form joint force of regional industrial carbon reduction.

Key words: digital economy; industrial carbon productivity; enabling effect; spatial Durbin model; mediation effect; China