

【碳排放】

数字经济发展对中国工业碳生产率的影响研究

吴传清 邓明亮

【摘要】基于2015-2021年中国省级面板数据,从数字基础设施、数字产业化、产业数字化、公共服务数字化等方面构建指标体系测算中国数字经济发展水平,并从直接效应、空间溢出效应、区域异质性、机制路径等多角度实证考察数字经济对中国工业碳生产率的影响。研究表明:数字经济发展对中国工业碳生产率增长存在正向促进作用,并表现出显著空间溢出效应;受地理区位和经济社会发展等因素影响,数字经济对中国工业碳生产率的影响效应呈现出显著地区差异;数字经济在直接影响中国工业碳生产率的同时,还能通过绿色技术创新和产业结构升级间接促进工业碳生产率提升。充分发挥数字经济对中国工业碳生产率的促进效应,以数字经济发展带动中国工业绿色低碳转型,应充分考虑空间特征,针对性设计工业低碳路径;挖掘数字应用场景,助力工业绿色低碳转型发展;完善创新激励机制,提升工业绿色低碳创新水平;贯彻新发展理念,促进工业经济高质量发展。

【关键词】数字经济;工业碳生产率;空间效应;区域异质性;影响机制

【作者简介】吴传清(1967-),男,湖北石首人,博士,武汉大学经济与管理学院/武汉大学中国发展战略与规划研究院/区域经济研究中心教授、博士生导师,研究方向为区域经济;邓明亮,武汉大学经济与管理学院(湖北 武汉 430072)。

【原文出处】《中国软科学》(京),2023.11.189~200

【基金项目】国家社会科学基金项目“推动长江经济带制造业高质量发展研究”(19BJL061)。

一、问题的提出与文献综述

“加快发展数字经济”和“积极稳妥推进碳达峰碳中和”是党的二十大报告明确提出的决策部署^[1],数字经济是构建现代化经济体系的重要支撑,工业绿色低碳转型是实现碳达峰碳中和目标的必由之路^[2]。促进数字经济加快发展是世界各国加快经济社会绿色低碳转型的重要选择,中国信通院发布的《全球数字经济白皮书(2022)》数据显示,2021年发达国家数字经济规模达到27.6万亿美元,其中美国数字经济规模达到15.3万亿美元;发达国家数字经济占GDP比重达到55.7%,而发展中国家仅为29.8%;英国第一产业数字经济渗透率达到30%,德韩两国第二产业数字经济渗透率超过40%,英德美三国第三产业数字经济渗透率均超过60%,发达国家数字经

济发展具有显著领先优势。以数字基础设施、数据要素、国内市场等为基础,数字经济在中国快速发展,中国信息通信研究院发布的《中国数字经济发展报告(2023年)》数据显示,2021年中国数字经济规模为45.5万亿元(7.1万亿美元)、占GDP比重为39.8%,2022年中国数字经济规模达到50.2万亿元(7.5万亿美元)、占GDP比重提升至41.5%,细分行业中服务业、工业、农业数字经济渗透率分别为44.7%、24.0%、10.5%。以人工智能、云计算、大数据等为代表的数字技术在各领域广泛应用,催生出一系列新产品新业态,传统产业发展模式和产业边界正不断变革,这有效带动了中国经济增长、能源效率提升和资源要素优化配置^[3],也为生态环境治理、节能减排、绿色低碳发展带来新的机遇和路径。

工业是碳减排和碳中和的关键领域,工业领域碳达峰是实现双碳目标的重点任务,工业数字化、绿色化协同转型是制造强国战略的重要内容^[4]。进入工业化中后期阶段的发达国家高度重视数字技术与节能低碳发展深度融合,欧盟委员会在2021年发布更新版《欧洲工业战略》,英国先后发布《数字发展战略》(2017)、《工业脱碳战略》(2021)、《英国能源安全战略》(2022)、《英国能源安全战略》(2022)等战略,美国积极推进先进制造战略、“智能制造振兴计划”,日本则提出《2050年碳中和绿色增长战略》(2020),强调运用数字技术加快工业领域绿色化数字化发展,促进工业产业等重点领域提高能源利用效率,加快实现工业发展与碳排放“脱钩”。中国同样提出要抢抓数字经济发展机遇促进工业绿色低碳发展,《工业领域碳达峰实施方案》(2022)将“推动数字赋能工业绿色低碳转型”作为加快工业领域碳达峰碳中和的重点战略任务,提出加快推进“工业互联网+绿色低碳”发展。加快推进中国新型工业化进程,如何深入挖掘数字经济助力工业领域“双碳”目标实现的作用场景和实现机制,充分激发数字经济赋能工业领域绿色化低碳化转型发展的效能和潜力,实现“降碳”和“增效”双重目标,成为当前数字经济发展和工业绿色低碳转型的热点和难点。

关于数字经济发展的影响效应,国内外学者主要聚焦经济刺激效应、创新激励效应、降污减排效应展开系列探索。一是数字经济的经济刺激效应^[5]。部分学者从数字经济基础设施建设角度出发,重点考察互联网^[6]、人工智能^[7]、云计算、移动通信等基础设施建设对经济社会发展的影响,研究提出数字经济发展有效带动了区域经济高质量发展^[8];也有学者基于对数字化交易手段的考量,从数字金融^[9]、数字普惠金融^[10]等角度分析数字经济发展对中国经济发展的带动作用;鉴于数字要素的空间关联性和流动性,有学者将空间因素纳入数字经济的经济刺激效应分析过程,研究提出数字经济在促进经济社会发展过程中存在显著空间溢出效应^[11]。二是数字经济的创新激励效应。有学者从全国、省域、城市^[12]、县域^[13]等宏观角度出发,综合运用博弈模型^[14]、梅特卡夫法则^[15]等方法考察了数字经济通过技术溢出和创新驱动等途径对经济社会发展的影响

效应;也有学者从微观企业角度出发,研究提出数字技术在企业生产运营过程中的应用,能够有效激发企业投入创新要素^[16-17]、开展创新活动的动力,并不断增强企业创新能力^[18]。三是数字经济的降污减排效应。不同于数字经济发展的经济刺激效应和创新激励效应研究,有学者从互联网、科技创新^[19]、信息化等角度出发^[20],研究提出数字经济发展能够促进能源效率和碳绩效的提升^[21-22],也有学者提出数字经济对环境污染的影响呈现出倒“U”型非线性特征^[23-24],数字经济的节能减排效应尚未形成统一结论。

纵观学术界现有研究成果,国内外学者从不同角度完成了数字经济发展系列探索^[25],但关于数字经济能否有效促进中国工业碳生产率提升、存在何种时空特征和影响机制,仍需进一步挖掘和分析。有鉴于此,本文基于2015-2021年中国省级面板数据,从数字基础设施、数字产业化、产业数字化、公共服务数字化等方面构建指标体系测算中国数字经济发展水平,采用空间计量等模型实证考察数字经济发展影响工业碳生产率的直接效应、空间溢出效应、区域异质性和机制路径。

二、理论模型和研究假设

(一) 理论模型

伴随数字经济快速发展,技术创新水平不断提高、产业结构进一步优化,数字经济的环境效应正逐步显现^[26]。为反映数字经济发展对工业碳生产率的影响,在传统C-D生产函数基础上,引入数字经济、科技创新、产业结构和工业碳生产率等因素,构建数字经济影响工业碳生产率的理论分析模型。首先将能源消费因素纳入C-D生产函数,并进一步计算得到工业碳生产率的表达式。

$$Y_i = A_i L_i^a K_i^b E_i^{1-a-b} \quad (1)$$

$$CP_i = \frac{Y_i}{E_i^{1-a-b} \varepsilon} = \frac{Y_i}{E_i^0 \varepsilon} = \frac{A_i L_i^a K_i^b}{\varepsilon}, \theta = 1-a-b \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, Y_i 表示工业总产出; CP_i 表示工业碳生产率; A_i 表示技术创新水平; L_i 表示劳动力供给; K_i 表示资本投入; E_i 表示能源消耗; ε 表示各能源的碳排放折算系数。数字经济发展以科技创新为支撑和需求,数字经济发展能够促进技术创新水平的提升,因此将技术创新设定为数字经济发展水

平(τ)的正相关函数,并进一步得到数字经济与工业碳生产率的关系式。

$$CP_1 = \frac{Y_1}{\varepsilon_i^0 \varepsilon} = A_i \frac{L_1^a K_1^b}{\varepsilon} = f(\tau) \frac{L_1^a K_1^b}{\varepsilon}, A_i = f(\tau) \quad (3)$$

由式(3)可见,数字经济发展水平越高,技术创新水平越高,工业碳生产率水平越高。为进一步考察数字经济影响工业碳生产率过程中的产业结构影响,将工业产业进一步划分为高碳部门(CP_1)和低碳部门(CP_2),有 $CP_2/CP_1 = \gamma > 1$ 。

$$CP_1 = \frac{1}{\varepsilon} \times \frac{Y}{E} = \frac{1}{\varepsilon} \times \frac{Y_1 + Y_2}{E_1^0 + E_2^0} = \frac{1}{\varepsilon} \times \frac{Y_1 + Y_2}{Y_1/CP_1 \varepsilon + Y_2/CP_2 \varepsilon} \quad (4)$$

采用低碳部门与高碳部门总产出之比反映产业结构,数字经济发展过程中产业数字化和数字产业化的推进,对产业结构升级存在显著影响,将产业结构表示为数字经济的函数形式,即 $is = Y_2/Y_1 = g(\tau)$ 。由此,可进一步得到工业碳生产率与产业结构、数字经济的函数关系式。

$$CP_1 = \frac{1}{\varepsilon} \times \frac{Y_1 + Y_2}{Y_1/CP_1 \varepsilon + Y_2/CP_2 \varepsilon} = \frac{1 + is}{1/CP_1 + is/CP_2} = \frac{1 + is}{\gamma/CP_2 + is/CP_2} = \frac{1 + is}{\gamma + is} CP_2 = \frac{1 + is}{\gamma + is} f(\tau) \frac{L_2^a K_2^b}{\varepsilon} = \frac{1 + g(\tau)}{\gamma + g(\tau)} f(\tau) \frac{L_2^a K_2^b}{\varepsilon} \quad (5)$$

已知 $CP_2/CP_1 = \gamma > 1$,表明伴随数字经济发展水平(τ)的提高,低碳部门占比提升,产业结构(is)数值提高,进一步碳生产率将得到提高。综上所述,数字经济发展能够对工业碳生产率产生正向影响,具体作用路径主要涉及技术创新和产业结构转型升级。

(二) 分析框架

在理论模型分析基础上,进一步从直接效应、空间效应、路径机制3个方面,对数字经济影响工业碳生产率的逻辑关系进行梳理。

1. 数字经济影响中国工业碳生产率的直接效应

伴随新一代信息技术迅猛发展,数字产业化和产业数字化不断推进,新技术新工艺新产品新业态加速形成和推广,为经济社会发展注入新活力。以5G网络、数据中心等为代表的新型基础设施建设,既为中国工业经济发展带来新需求,也为工业经济

领域绿色化低碳化转型发展提供了新思路。具体而言,数字经济发展对工业碳生产率的直接影响主要涉及以下4个方面:一是数字技术应用有助于突破工业产业发展物理距离限制^[11],基于科创飞地、虚拟产业园、工业互联网等新模式新技术,地区间经济社会活动的联系不断加强,促进资源在不同区域的优化配置,进而为工业领域跨区域协同减排增效提供助力^[27],促进整体工业碳生产率提升;二是数字经济发展实现各类数据要素的快速整合与跨区域高度共享,能够优化工业经济发展资源要素投入结构,在减少能源资源浪费的同时,提高能源资源利用效率,实现工业碳生产率提升^[28];三是数字金融等新型交易方式的产生和推广,有效降低了工业领域市场资源配置中的信息不对称,引导资本向低碳高效工业领域集中,为绿色低碳技术研发和新设备新工艺改进提供强大支持,为工业领域绿色低碳转型发展赋能^[29];四是以新型数字技术和平台为依托的工业环境信息监测系统建立,能够有效加强工业领域能源投入和碳排放信息监测与公布,在优化工业低碳发展战略决策的同时,以生产信息透明公开敦促工业企业加强能源资源高效利用,促进碳捕集利用与封存,促进工业碳生产率提升。

基于以上分析,提出假说 H1:数字经济发展能够直接促进中国工业碳生产率提升。

2. 数字经济影响中国工业碳生产率的空间效应

伴随数字经济和工业绿色低碳转型顶层设计不断完善与推进,工业数字化、低碳化、绿色化发展理念广泛形成,各地在推进数字经济发展和工业领域率先“碳达峰碳中和”工作中的“竞争”现象逐步显现^[30]。一是数字经济和工业绿色低碳发展水平较高地区,能够形成典型发展经验,为后进地区提供先进学习经验,数字技术学习效应有效发挥,通过先进示范带动“相邻”地区数字经济和工业绿色低碳转型发展快速推进,以数字经济发展助力“相邻”地区工业碳生产率提升^[31];二是数字基础设施互联互通促进各地区经济社会发展联系更加密切,本地区数字经济和工业绿色低碳转型发展能够通过工业互联网等数字基础设施的关联对“相邻”地区产生溢出影响^[32];三是在区域产业分工和专业化发展过程中,数字经济和工业绿色低碳发展水平较高地区的产业转

移与功能疏解,能够促进产业转入地在短期内实现数字经济和工业绿色低碳的“嵌入式”发展,助力提升工业碳生产率。

基于以上分析,提出假说 H2:数字经济对中国工业碳生产率的影响存在显著空间溢出效应。

3. 数字经济影响中国工业碳生产率的机制

绿色技术创新是数字经济影响中国工业碳生产率的关键基础。首先,数字经济发展能够通过数字产业化和产业数字化,促进新技术新工艺新知识的传播交流,加强区域间、企业间、科研机构间的技术合作交流,充分激发政产学研用各类主体形成技术创新合力^[33],有助于工业领域绿色技术创新发展。其次,绿色技术在工业经济领域的应用推广,既能优化能源投入结构,提升清洁能源占比,也能促进工业领域集约化清洁化低碳化生产,降低工业碳排放,提升能源利用效率和工业碳生产率^[34]。

基于以上分析,提出假说 H3:数字经济发展能够通过绿色技术创新间接影响中国工业碳生产率。

产业结构升级是数字经济影响中国工业碳生产率的重要路径(见图1)。首先,数字技术和数字要素在经济社会各领域广泛应用过程中,现代信息技术快速发展促进数字经济和实体经济的融合不断深化^[35],衍生出一系列新产品、新工艺、新业态,促进产业结构不断向高端化数字化绿色化低碳化方向升级。其次,传统工业企业逐步淘汰产能、退出生产、转型升级,也是工业经济领域破解高污染高耗能高排放困境的必由之路,是产业结构转型升级的典型

特征。数字经济发展过程中的产业结构升级,能够加快工业经济全领域绿色化低碳化发展,实现工业碳生产率提升^[36]。基于以上分析,提出假说 H4:数字经济发展能够通过产业结构升级促进中国工业碳生产率提升。

三、研究方法与数据来源

(一) 模型设定

鉴于数字经济发展、数字要素流动促使各区域经济社会发展联系日益紧密,有必要在数字经济发展影响中国工业碳生产率的研究过程中,引入空间变量,构建包含空间因素的空间计量模型。式(6)中, CP_{it} 为*i*地区在*t*年的工业碳生产率水平, $dige_{it}$ 为*i*地区在*t*年的数字经济发展水平, W_{ij} 为空间权重矩阵, X_{it} 为控制变量, α 为各变量的估计系数, μ_i 为地区固定效应、 η_t 为年份固定效应、 ε_{it} 和 v_{it} 为随机误差项、 ψ 为空间残差自回归系数。

$$CP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \sum_{j=1}^n W_{ij} CP_{jt} + \alpha_2 dige_{it} + \alpha_3 \sum_{j=1}^n W_{ij} dige_{jt} + \alpha_4 X_{it} + \alpha_5 \sum_{j=1}^n W_{ij} X_{jt} + \mu_i + \eta_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{it} = \psi \sum_{j=1}^n W_{ij} \varepsilon_{jt} + v_{it}$$

(二) 变量说明

1. 被解释变量

工业碳生产率(cp)。采用规模以上工业企业主营业务收入与工业碳排放总量之比进行计算,其中工业碳排放总量采用 IPCC(2006)测算方法以煤炭、焦炭、石油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气等能源消费量进行折算。

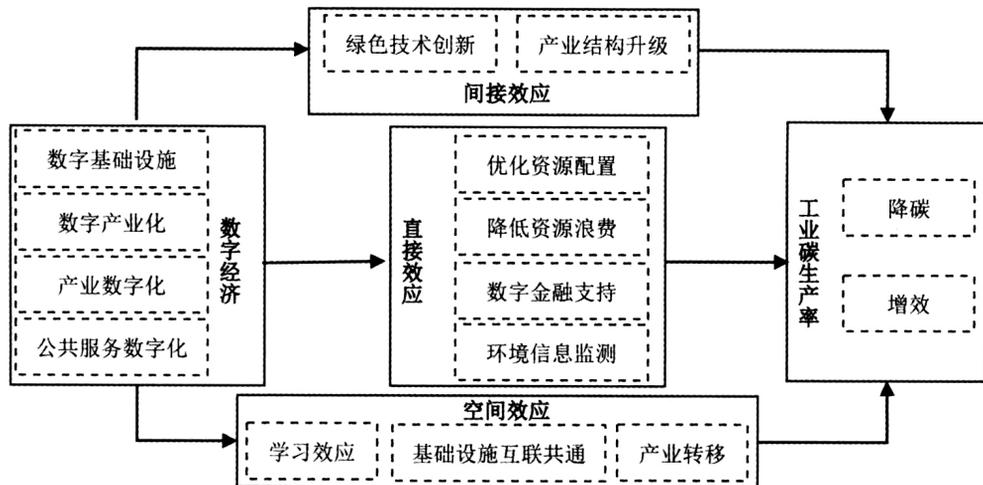


图1 数字经济影响工业碳生产率的机制和路径

2. 核心解释变量

数字经济(dige)。尽管国家统计局已经发布数字经济核心产业统计分类标准,但数据可得性仍是数字经济发展水平测评的核心难点,学术界现有关于数字经济发展水平的测算方法和测算指标尚未形成统一标准^[37-39]。有鉴于此,在借鉴学术界现有研究成果基础上,参照国务院印发的《“十四五”数字经济发展规划》(2021)中8个“十四五”数字经济发展主要指标^[40],从数字基础设施、数字产业化、产业数字化、公共服务数字化4个维度出发,构建数字经济发展水平评价指标体系(见表1)。囿于国务院发布的8个“十四五”数字经济发展主要指标中,部分指标尚无连续性统计,因此根据数据可得性对相关指标进行调整替代,具体方式包括:①采用IPv4地址数和宽带接入用户数作为替代指标,反映数字基础设施发展水平;②国家统计局发布的《数字经济及其核心产业统计分类(2021)》提出,数字经济核心产业主要包括“计算机通信和其他电子设备制造业、电信广播电视和卫星传输服务、互联网和相关服务、软件和信息技术服务业等”,对应《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017),选取“计算机、通信和其他电子设备制造业主营业务收入占工业主营业务收入比重”和“信息传输、软件和信息技术服务业城镇单位就业人数占第三产业从业人员数比重”两个指标反

映数字经济核心产业在国民经济中的地位;③采用软件业务收入水平反映软件和信息技术服务业规模;④采用企业每百人使用计算机数、全国网上零售额、电子商务交易规模反映产业数字化水平,其中电子商务交易规模通过电子商务销售额与采购额之和进行计算;⑤由于在线政务服务实名用户规模主要通过数字政务改革和政策推动,因此以“在线政务”“数字政府”“数字政务”“数字化服务”为关键词在北大法律信息网进行全文政策检索,加总得到数字政务政策关注度数据。方差膨胀因子(VIF)检验结果显示,VIF值均小于10,表明数字经济发展水平评价指标间不存在严重的多重共线性问题,进一步采用熵权法确定各指标权重,完成各地区数字经济发展水平测算。

3. 中介变量

为进一步考察数字经济影响中国工业碳生产率的路径机制,引入绿色技术创新和产业结构升级为中介变量。①绿色技术创新(Ingre),专利申请数充分反映了社会各界对创新的热情和创新产生的规模,相较于专利授权数更能反映创新水平,因此以当年绿色发明专利和绿色实用新型专利申请数量之和取对数完成绿色技术创新水平计算;②产业结构升级(is),由于产业结构升级既包括各产业占比的调整变化,也涉及产业劳动生产率的提升,因此选择产

表1 数字经济发展水平评价指标体系

指标类型	参照指标	选用指标	单位	权重
数字基础设施	IPv6 活跃用户数	IPv4 地址数	亿个	0.111
	千兆宽带用户数	宽带接入用户数	万户	0.104
数字产业化	数字经济核心产业增加值占GDP比重	计算机、通信和其他电子设备制造业主营业务收入占工业主营业务收入比重	%	0.109
		信息传输、软件和信息技术服务业城镇单位就业人数占第三产业从业人员数比重	%	0.103
	软件和信息技术服务业规模	软件业务收入	万亿元	0.126
产业数字化	工业互联网平台应用普及率	企业每百人使用计算机数	台	0.101
	全国网上零售额	全国网上零售额	万亿元	0.117
	电子商务交易规模	电子商务交易规模	万亿元	0.112
公共服务数字化	在线政务服务实名用户规模	数字政务政策关注度	份	0.117

注:“参照指标”整理自国务院印发的《“十四五”数字经济发展规划》(2021)中数字经济发展主要指标,各指标权重采用熵权法确定。

业结构高级化指数对各地区产业结构升级水平进行测度^[41]。

4. 控制变量

为减少模型估计偏误,在实证分析中引入工业密度、人口密度、对外开放水平、财政分权和科技投入等控制变量。①工业密度(de),采用各地区规模以上工业企业主营业务收入与建成区面积之比进行测算;②人口密度(upd),采用各地区城镇常住人口与建成区面积之比进行测算;③对外开放水平(fdi),采用各地区年度实际使用外资占GDP比重进行测算;④财政分权(fin),采用各地区财政支出占GDP比重进行测算;⑤科技投入(te),采用各地区科技教育支出占财政支出的比重进行测算。

(三) 数据来源

本文以全国30个省级行政区(不包括港澳台及西藏)2015–2021年数据为样本,完成数字经济影响中国工业碳生产率的实证研究,相关数据整理自《中国统计年鉴》(2016–2022)、《中国工业统计年鉴》(2016–2022)、《中国能源统计年鉴》(2016–2022)、《中国信息产业统计年鉴》(2016–2022)、EPS数据平台、中经网统计数据库、北大法律信息网、国家知识产权局网站等,部分缺失数据采用移动平均法补齐。

四、实证结果

(一) 空间相关性检验结果

中国工业碳生产率呈现出显著空间正相关特征(见表2)。采用各省地理距离空间权重矩阵,测算2015–2021年工业碳生产率全局Moran's I指数和Geary's C指数。测算结果表明,2015–2021年工业碳

生产率全局Moran's I指数均显著为正,全局Geary's C指数均显著小于1,工业碳生产率存在显著空间相关性,因此有必要将空间变量作为工业碳生产率影响因素检验的变量之一。此外,2015–2021年工业碳生产率全局Moran's I指数和Geary's C指数绝对值呈现出波动变化,自2019年开始全局Moran's I指数呈现出下降趋势,全局Geary's C指数逐年增长,可见工业碳生产率在地理空间上的集聚趋势有弱化趋势,伴随数字经济发展,工业产业发展过程中的时空限制逐步减弱。

(二) 基准回归结果

1. 空间溢出效应分析

采用LM检验、稳健性LM检验、Wald检验、稳健性Wald检验、LR检验、稳健性LR检验、Hausman检验、SDM固定效应检验等方法,完成空间计量模型适用性检验,确定选取基于地理空间权重矩阵的时空双固定效应SDM模型,检验数字经济对中国工业碳生产率的影响。

数字经济发展能够促进工业绿色低碳转型,提升工业碳生产率,同时表现出显著空间溢出效应(见下页表3)。时空双固定效应SDM模型估计结果显示,数字经济(dige)估计系数显著为正,数字要素、数字基础设施、数字技术、数字金融等广泛应用和推广,能够在推动资源要素向低碳排放领域集聚的同时,助力能源资源高效利用与碳捕集和封存,从减增量和去存量两方面助力工业经济降碳增效,促进工业碳生产率提升。实证结果表明,数字经济能够对工业碳生产率提升产生正向促进作用,假设H1成立。数字经济空间滞后项系数为正,且在1%的水平

表2 2015–2021年中国工业碳生产率空间相关性检验结果

年份	Moran's I	Z 值	P 值	年份	Geary's C	Z 值	P 值
2015	0.454	4.528	0.000	2015	0.524	-2.630	0.004
2016	0.477	4.536	0.000	2016	0.547	-3.401	0.000
2017	0.491	4.702	0.000	2017	0.554	-3.079	0.001
2018	0.508	4.898	0.000	2018	0.568	-2.807	0.003
2019	0.539	4.122	0.000	2019	0.492	-3.596	0.000
2020	0.443	4.253	0.000	2020	0.505	-3.570	0.000
2021	0.310	3.078	0.001	2021	0.534	-3.313	0.000

表 3 数字经济发展影响中国工业碳生产率的效应估计结果

变量	(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
dige	0.091*** (5.578)	0.048* (1.947)	0.107** (1.987)	0.045** (2.039)
de	0.031*** (4.477)	0.029*** (4.401)	0.004 (0.630)	0.019*** (2.636)
upd	-0.414*** (-2.774)	-0.342** (-2.334)	-0.073 (-0.843)	-0.335** (-2.249)
fdi	-0.215 (-0.345)	-0.267 (-0.458)	-0.370 (-0.431)	-0.266 (-0.440)
fin	-0.123 (-0.367)	-0.353 (-1.098)	0.829*** (3.424)	-0.765** (-2.104)
te	0.655 (0.720)	1.062 (1.242)	1.645*** (2.826)	1.543* (1.703)
W×dige	-	0.005*** (10.087)	0.017*** (10.017)	0.004*** (10.090)
W×de	-	-0.025 (-0.361)	0.202 (1.175)	-0.258 (-1.359)
W×upd	-	1.374 (0.824)	-7.413** (-2.391)	2.578 (0.912)
W×fdi	-	13.724** (2.084)	6.141 (0.312)	6.698 (0.422)
W×fin	-	2.005 (1.322)	11.753** (2.107)	0.293 (0.056)
W×te	-	25.312*** (2.856)	15.232 (1.173)	24.400* (1.845)
Spatialrho	-	0.030*** (4.832)	0.038* (1.897)	0.038** (2.125)
地区固定	Y	Y	Y	Y
年份固定	Y	Y	Y	Y
N	210	210	210	210

注：***、**、*分别表示在 $p < 0.01$ 、 $p < 0.05$ 与 $p < 0.1$ 时有统计学意义。下同。

通过显著性检验,表明数字经济发展能够通过空间溢出效应,对“相邻”地区工业碳生产率提升产生正向促进效应。此外,工业碳生产率(cp)的空间滞后项系数为正且通过显著性检验,表明工业绿色低碳转型发展促进本地工业碳生产率提升的同时,能够对“相邻”地区工业碳生产率产生正向空间溢出效

应。在以数字经济助力工业绿色低碳转型过程中,应加强区域互联互通、强化工业绿色低碳发展跨区域协同联动。

数字经济发展能够通过空间溢出效应带动“相邻”地区工业绿色低碳转型,提升工业碳生产率(见表4)。对空间效应进行分解,得到数字经济发展的直

表4 数字经济影响中国工业
碳生产率的空间效应分解

变量	直接效应	间接效应	总效应
dige	0.046* (1.791)	0.060*** (2.708)	0.105** (2.125)
de	0.023*** (2.977)	-0.198(-1.115)	-0.175(-0.962)
upd	-0.377** (-2.562)	2.023(0.800)	1.645(0.637)
fdi	-0.341(-0.560)	5.735(0.439)	5.394(0.408)
fin	-0.755** (-2.204)	0.633(0.156)	-0.122(-0.029)
te	1.326(1.381)	17.768(1.176)	19.093(1.221)

下接效应、间接效应和总效应。结果显示,数字经济(dige)的直接效应、间接效应、总效应估计系数为正,且在不同水平下通过显著性检验。数字经济快速发展过程中,“先发”地区既能通过先行先试的典型经验,为“相邻”地区提供参考,也能通过区域产业分工和转移,直接促进“相邻”地区产业变革,形成显著空间溢出影响。此外,数字基础设施的建设和完善,促使各地区经济社会发展联系更加紧密,经济发展模式和成效对“相邻”地区的空间溢出效应在数字经济作用下更加显著。由此可见,数字经济在发展过程中,能够显著促进本地工业绿色低碳转型,助力工业碳生产率提升,还能通过空间溢出效应的发挥,对“相邻”地区工业绿色低碳转型产生正向溢出影响,促进“相邻”地区工业碳生产率的提升,假设H2成立。

各控制变量在中国工业绿色低碳转型发展过程中的影响效应呈现出显著差异(见表3、表4)。①工业密度(de)的估计系数为正,且在1%的水平下通过显著性检验,但空间交互项系数未通过显著性检验,表明工业产业集聚能够发挥规模效应,促进工业碳生产率提升,但对“相邻”地区工业碳生产率的空间溢出效应尚不明显;②人口密度(upd)的估计系数和直接效应系数显著为负,但空间滞后项系数和间接效应、总效应分解系数未通过显著性检验,可见在城镇人口快速集聚过程中,人力资本作用的有限发挥不利于工业碳生产率提升,工业绿色低碳发展必须改变传统劳动力密集型发展模式;③对外开放水平(fdi)的估计系数为负,在改革开放不断深化背景下,应充分关注与外资引入相伴的全球碳排放转移,

提升外资利用质量,促进高质量开放发展;④财政分权(fin)的估计系数显著为负,可见传统以经济总量为导向的财政支持模式,不利于经济社会发展过程中资源利用效率的提升,同时受行政区域影响,财政对工业绿色低碳发展的影响主要体现在本地,空间溢出效应尚不显著;⑤科技投入(te)及其空间滞后项系数估计值均显著为正,可见科技创新投入不仅能够为本地工业绿色低碳转型和工业碳生产率提供支撑,同时能够发挥空间溢出效应,对“相邻”地区工业碳生产率产生影响。

2. 稳健性检验

参考学术界现有研究,采用3种方式检验数字经济影响中国工业碳生产率的稳健性(见下页表5)。①调整空间权重矩阵,在地理距离空间权重矩阵基础上,采用邻接矩阵、经济距离矩阵和复合矩阵再次检验数字经济对工业生产率的影响效应,估计结果表明使用不同空间权重矩阵得到的直接效应、间接效应和总效应估计系数和显著性水平存在一定差异,但空间效应方向并未改变;②缩尾处理,对研究样本进行1%缩尾处理后的估计结果显示,数字经济影响中国工业碳生产率的估计系数均显著为正;③替换被解释变量,采用GDP与工业碳排放规模的比值重新计算各地区工业碳生产率(cg),估计结果显示,调整解释变量计算方法后估计系数方向未发生改变。综上所述,基于不同方法的稳健性检验结果,数字经济对中国工业碳生产率的直接影响和空间效应检验结果具有稳健性。

3. 内生性检验

一方面数字经济快速发展能够为工业碳生产率增长提供支撑,另一方面工业数字化转型的现实需求也为数字经济发展提供了动力,数字经济和工业碳生产率提升有可能存在双向因果关系。与此同时,尽管已经将控制变量纳入分析模型,但在中国工业碳生产率影响因素研究过程中仍然无法避免存在遗漏变量。因此,在分析数字经济发展对中国工业碳生产率的影响过程中,有必要对模型估计中的内生性问题进行检验。选取各解释变量及其空间滞后项为工具变量^[42],采用广义空间两阶段最小二乘法(GS2SLS)和空间广义矩估计方法(SPGMM)完成内生性检验。估计结果显示,在考虑内生性问题后,数

表 5

稳健性检验

效应类型	ep			ep	cg
	邻接矩阵	经济距离矩阵	复合矩阵	1% 缩尾处理	替换 Y
直接效应	0.059*** (4.094)	0.048* (1.820)	0.028*** (4.384)	0.027*** (4.279)	0.026*** (4.228)
间接效应	0.143*** (3.327)	0.064*** (4.592)	0.164*** (3.223)	0.030*** (4.451)	0.016** (2.503)
总效应	0.134*** (2.676)	0.201* (1.756)	0.161*** (2.701)	0.052** (1.976)	0.092** (2.024)
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y
地区固定	Y	Y	Y	Y	Y
年份固定	Y	Y	Y	Y	Y
N	210	210	210	210	210

数字经济仍然对中国工业碳生产率提升存在显著正向促进作用;与基准回归估计系数相比,在考虑内生性问题后,数字经济估计系数绝对值从 0.045 增长到 0.059 和 0.048,表明如果不考虑数字经济和工业碳生产率的“双向”关系,有可能会低估数字经济在中国工业碳生产率提升过程中正向促进作用。

表 6 异质性分析结果

4. 异质性分析

鉴于各地区资源禀赋、营商环境、经济基础、绿色本底等多方面因素千差万别,数字经济、工业产业发展水平各异,数字经济赋能工业绿色低碳转型的类型和大小同样存在较大差异。因此,基于四大板块、是否沿海、经济规模、创新水平等因素,对全国 30 个省级行政区(不包括港澳台及西藏)进行区域划分,完成数字经济影响工业碳生产率的区域异质性分析。鉴于区域划分后使用空间计量模型可能因样本量有限而产生估计偏差,故采用普通面板模型完成相关实证检验(见表 6)。

地区		dige	控制变量	地区固定	年份固定	N
四大板块	(1) 东部地区	0.053*** (2.961)	Y	Y	Y	70
	(2) 中部地区	0.264*** (4.677)	Y	Y	Y	42
	(3) 西部地区	0.131** (2.413)	Y	Y	Y	77
	(4) 东北地区	0.182*** (3.131)	Y	Y	Y	21
是否沿海	(5) 沿海地区	0.122*** (4.671)	Y	Y	Y	77
	(6) 内陆地区	0.011 (0.001)	Y	Y	Y	133
经济规模	(7) 经济发达地区	0.062*** (3.531)	Y	Y	Y	105
	(8) 经济后进地区	0.098 (0.266)	Y	Y	Y	105
创新水平	(9) 高创新水平地区	0.063*** (3.652)	Y	Y	Y	105
	(10) 低创新水平地区	0.165 (0.429)	Y	Y	Y	105

(1) 四大板块。基于国家统计局的划分标准,将样本划分为东部地区、中部地区、西部地区和东北地区。估计结果显示,数字经济对工业碳生产率的影响系数为正,中部地区估计系数绝对值最大。东部地区数字经济发展起步较早、水平较高,工业绿色化低碳化数字化发展水平较高,中西部地区数字经济发展起步较晚,数字经济对工业绿色低碳转型的影响正逐步发挥,可见数字经济对工业碳生产率提升的赋能效应可能存在边际效应递减的特征。

(2)沿海与内陆地区。以是否沿海为标准,将样本划分为沿海地区和内陆地区。估计结果显示,数字经济对工业碳生产率的影响效应在沿海地区显著为正,但在内陆地区未通过显著性检验。沿海地区改革开放较早,经济发展基础和数字经济发展水平较高,工业数字化绿色化低碳化发展水平较高,数字经济对工业绿色低碳转型的赋能效应更加显著。

(3)经济发展水平差异。以2022年GDP排名为标准,将样本划分为经济发达地区和经济后进地区。估计结果显示,数字经济对工业碳生产率的影响效应系数在经济发达地区显著为正,在经济后进地区的系数为正,但未通过显著性检验。经济发达地区数字经济和工业化水平较高,数字经济在工业绿色低碳转型中的作用更加显著。

(4)绿色创新水平差异。由于技术创新作用发挥可能存在一定时间滞后性,因此以2015年绿色发明专利申请规模为标准,将样本划分为高创新水平地区和低创新水平地区。估计结果显示,数字经济对工业碳生产率的影响效应仅在高创新水平地区通过显著性检验,创新水平较低的地区估计系数尚未通过显著性检验。高创新水平地区数字经济发展水平更高,数字要素更加充足、数字技术更加先进,工业绿色低碳转型新技术新工艺交流学习更加深入,数字经济与实体经济融合更加充分,对工业碳生产率提升的促进效应更加显著。

(三)进一步分析

在直接效应和空间效应分析基础上,引入绿色

技术创新和产业结构升级为中介变量,构建中介效应模型,进一步考察数字经济影响中国工业碳生产率的路径和间接效应(见表7)。

(1)绿色技术创新的间接效应。数字经济(dige)对工业碳生产率(cp)和绿色技术创新(lngre)的影响系数显著为正,可见数字经济发展能够激发绿色技术创新活力,促进绿色技术创新水平的提升;同时,绿色技术创新(lngre)对工业碳生产率(cp)的影响系数显著为正,表明绿色技术创新能够在工业绿色低碳转型过程中发挥正向促进作用。数字经济发展过程中,能够通过数字产业化和产业数字化发展,加快工业领域新技术新知识的研究创新、传播交流和推广应用,助力工业经济加快数字化绿色化低碳化协同转型,实现工业低碳发展,助力工业碳生产率提升,假设H3成立。

(2)产业结构升级的间接效应。数字经济(dige)对产业结构升级(is)的影响系数为正,且通过显著性检验,表明数字经济发展过程中能够加快产业结构高级化;产业结构升级(is)对工业碳生产率(cp)的影响系数显著为正,表明产业结构高级化能够促进工业绿色低碳转型,实现工业低碳化发展,有助于工业碳生产率的提升。产业结构变迁伴随资源配置模式的重构,数字经济发展影响国民经济行业体系变化的同时,能够促进工业产业内部结构的优化和挑战,通过数字产业化和产业数字化加快工业结构向绿色化低碳化方向转型,进而促进工业碳生产率的提升。可见,产业结构升级能够在数字经济

表7 数字经济影响中国工业碳生产率的路径检验结果

变量名	cp	lngre	cp	is	cp
dige	0.091*** (5.578)	0.834*** (13.130)	0.056*** (4.172)	0.081*** (13.824)	0.083*** (4.512)
lngre	-	-	0.087*** (6.524)	-	-
is	-	-	-	-	0.338** (2.131)
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y
地区固定	Y	Y	Y	Y	Y
年份固定	Y	Y	Y	Y	Y
N	210	210	210	210	210

济影响工业碳生产率的过程中发挥部分中介效应,假设 H4 成立。

五、研究结论和政策启示

(一) 研究结论

(1) 数字经济能够有效促进中国工业碳生产率提升,同时表现出显著空间溢出效应,本地数字经济发展能够带动相邻地区工业碳生产率的提升。

(2) 数字经济对中国工业碳生产率的影响表现出显著空间异质性特征,在东中西和东北地区、沿海和内陆地区、不同经济发展水平地区、不同创新水平地区,数字经济的工业绿色低碳转型赋能效应存在差异,在高经济社会发展水平和高创新水平地区更加显著。

(3) 数字经济能够促进绿色技术创新和产业结构升级,并通过绿色技术创新和产业结构升级间接促进工业绿色低碳转型,推动工业碳生产率提升。

(二) 政策建议

(1) 充分考虑空间特征,针对性设计工业低碳路径。立足经济社会发展背景,提升各地区工业领域绿色低碳转型发展路径针对性科学性。一是从各地区资源要素优势和产业发展模式出发,充分发挥高工业碳生产率和高数字经济发展水平地区的辐射带动作用,支持工业企业科学制定减碳增效目标和“变绿”计划,以数字化、低碳化、绿色化等综合性举措,进一步激发低工业碳生产率地区的绿色低碳转型潜力,逐步缩小工业碳生产率地区差异,推动中国工业领域低碳转型从“非均衡”向“均衡”发展。二是强化工业绿色低碳转型区域联动协同,加快建立跨区域交流合作机制,充分发挥数字经济发达地区辐射带动作用,进一步破除区域空间壁垒,促进各区域工业碳生产率协同提升。

(2) 挖掘数字应用场景,助力工业绿色低碳转型发展。充分发挥数字经济在工业领域绿色低碳转型过程中的支撑作用,不断挖掘推广工业数字化低碳解决方案。一是持续加大工业互联网、云计算、人工智能、工业大数据中心等信息基础设施建设投入,不断提升数字经济发展服务和支撑工业领域绿色低碳转型发展的能力和水平。二是不断深化数字经济与工业发展渗透融合,依托数字技术在资源要素配置优化、生态环境治理、能源消费结构转型等各方面的

支撑作用,积极开展数字技术与工业融合发展试点示范,充分释放数字经济发展对工业绿色低碳转型的节能降碳增效作用。三是加快建立工业领域数字化碳管理体系,以数字化手段建立碳排放数据计量、检测、分析体系,提升工业领域碳排放数字化、网络化、智能化管理能力,以数字化管理促进工业绿色低碳发展。

(3) 完善创新激励机制,提升工业绿色低碳创新水平。坚持把创新作为推进工业绿色低碳转型的第一驱动力,继续加强产业创新、技术创新和制度创新,提升工业绿色低碳创新能力和水平。一是顺应新科技革命和产业变革趋势,围绕工业产业绿色低碳发展关键环节,全方位推进低碳工艺、节能装备等核心技术的基础研究和原始创新,缩短基础研究、原始创新从实验室到市场的距离,激发培育工业绿色低碳转型新动能,塑造工业绿色化低碳化发展新优势。二是继续加强工业产业创新,以数字经济与工业产业深度融合为契机,持续促进业态融合与创新,加快构建绿色低碳现代化产业体系,促进产业结构进一步向高级化方向升级。三是探索建立区域数字经济发展合伙人制度,进一步强化数字技术对工业绿色低碳转型的支撑作用和空间溢出效应。四是聚焦工业领域绿色低碳转型技术创新难点,加快完善数字化、绿色化、低碳化研究相关配套机制,有效整合和优化配置各类要素资源,为数字化助力工业绿色低碳转型基础研究、技术创新提供有效支撑。

(4) 贯彻新发展理念,促进工业经济高质量发展。新型工业化是实现中国式现代化的重要内容,提升工业碳生产率是加快实现新型工业化、促进工业经济高质量发展的必由之路。高质量发展是体现新发展理念的发展,促进工业经济高质量发展应全面贯彻新发展理念,充分发挥数字经济的赋能作用。一是要坚持创新发展理念,发挥技术创新在数字经济赋能工业碳生产率提升中的间接作用,以数字经济新模式促进技术创新和应用,进而促进工业经济高质量发展;二是坚持协调发展理念,发挥数字要素、数字技术突破物理距离限制的作用,加强工业经济发展的区域联合互动,实现工业经济区域协调发展,促进工业经济发展质量的整体提升;三是坚持绿色发展理念,发挥数字平台、数字技术、数字基础设

施在资源配置、高效利用、环境监测、信息披露等方面的独特优势,以数字经济赋能工业减污降碳协同增效,提升工业碳生产率,实现工业经济高质量发展;四是坚持开放发展理念,抢占数字经济发展新领域全球竞争制高点,在工业产业转移和产品贸易过程中,强化产业产品筛选,提升工业领域开放发展质量;五是坚持共享发展理念,发挥互联网、电子商务、数字化公共服务等数字经济新优势,促进工业生产数据要素、数据信息跨区域跨行业共享共通,消除工业产品消费区域和人群壁垒,实现工业经济高质量发展成果共享。

参考文献:

[1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗[M]. 北京:人民出版社, 2022:30-51.

[2] 洪银兴,任保平. 数字经济与实体经济深度融合的内涵和途径[J]. 中国工业经济, 2023(2):5-16.

[3] 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.

[4] 孙智君,文龙. 制造强国战略的重要维度:理论阐释与政策实践[J]. 经济评论, 2023(5):3-16.

[5] 张微微,王曼青,王媛,等. 区域数字经济发展如何影响全要素生产率:基于创新效率的中介检验分析[J]. 中国软科学, 2023(1):195-205.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 王军,刘小凤,朱杰. 数字经济能否推动区域经济高质量发展?[J]. 中国软科学, 2023(1):206-214.

[11] 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.

[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.

[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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] CHEN Li, LU Yuanquan, MENG Yuan, et al. Research on the nexus between the digital economy and carbon emissions evidence at china's province level[J]. Journal of cleaner production, 2023(413):137484.

[20] 吴传清,邓明亮. 信息化水平促进中国全要素碳生产率增长的路径研究[J]. 中国软科学, 2023(4):177-188.

[21] LIN Boqiang, ZHOU Yicheng. Does the internet development affect energy and carbon emission performance? [J]. Sustainable production and consumption, 2021(6):1-10.

[22] CAO Shaopeng, NIE Liang, SUN Huaping, et al. Digital finance, green technological innovation and energy-environmental performance: evidence from china's regional economies[J]. Journal of cleaner production, 2021(327):129458.

[23] YANG Xiaodong, WU Haitao, REN Siyu, 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.

[24] WANG Qiang, SUN Jiayi, PATA Ugur Korkut, et al. Digital economy and carbon dioxide emissions: examining the role of threshold variables[J]. Geoscience frontiers, 2023:101644.

[25] 杨刚强,王海森,范恒山,等. 数字经济的碳减排效应:理论与经验证据[J]. 中国工业经济, 2023(5):80-98.

[26] 余姗,樊秀峰,蒋皓文. 数字经济发展对碳生产率提升的影响研究[J]. 统计与信息论坛, 2022, 37(7):26-35.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 费越,张勇,丁仙,等.数字经济促进我国全球价值链地位升级:来自中国制造业的理论与证据[J].中国软科学,2021(S1):68-75.

[30] 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.

[31] 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.

[32] 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.

[33] 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.

[34] 姜南,李鹏媛,欧忠辉.知识产权保护、数字经济与区域创业活跃度[J].中国软科学,2021(10):171-181.

[35] 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.

[36] 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.

[37] 樊轶侠,徐昊,马丽君.数字经济影响城乡居民收入差距的特征与机制[J].中国软科学,2022(6):181-192.

[38] 潘为华,贺正楚,潘红玉.中国数字经济发展的时空演化和分布动态[J].中国软科学,2021(10):137-147.

[39] 许宪春,张美慧.中国数字经济规模测算研究:基于国际比较的视角[J].中国工业经济,2020(5):23-41.

[40] 国家发展和改革委员会.《“十四五”数字经济发展规划》学习问答[M].北京:人民出版社,2022:6.

[41] 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.

[42] 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.

Impact of Digital Economy Development on Industrial Carbon Productivity in China

Wu Chuanqing Deng Mingliang

Abstract: Based on the provincial panel data of China from 2015 to 2021, an index system was constructed to estimate the development level of China's digital economy from the aspects of digital infrastructure, digital industrialization, industrial digitalization, and public service digitalization, and the impact of digital economy on China's industrial carbon productivity was empirically investigated from multiple perspectives such as direct effect, spatial spillover effect, regional heterogeneity, and mechanism path. The results show that digital economy has a positive effect on China's industrial carbon productivity growth, with significant spatial spillover effect. Due to geographical location, economic and social development and other factors, the impact of digital economy on China's industrial carbon productivity shows significant regional differences; While directly affecting China's industrial carbon productivity, digital economy can also indirectly promote the improvement of industrial carbon productivity through green technology innovation and industrial structure upgrading. To give full play to the promoting effect of digital economy on China's industrial carbon productivity and drive China's industrial green and low-carbon transformation with the development of digital economy, it is necessary to consider the spatial characteristics and design the industrial low-carbon path. Mining digital application scenarios to help industrial green and low-carbon transformation development; improve the innovation incentive mechanism, enhance the level of industrial green and low-carbon innovation; We will implement the new development philosophy and promote high-quality development of the industrial economy.

Key words: digital economy; industrial carbon productivity; spatial effect; regional heterogeneity; influence mechanism