

数字化、碳减排成本与城市低碳高质量发展

沈宏亮, 宋思萌*, 李杰

首都经济贸易大学经济学院, 北京 100070

摘要 利用2011—2020年上市公司和地级市匹配数据,探讨了数字化影响碳减排成本的机制、效果及其带来的城市低碳全要素生产率变化。结果表明,数字化通过碳减排成本对城市低碳全要素生产率的影响呈现“先抑制、后促进”特征。机制研究发现,数字化对碳减排成本的影响,因能源需求结构、要素技术效率、绿色技术创新的共同作用而具有非线性。数字化初期,能源需求激增、要素技术效率下降抵消了绿色技术创新的正效应,碳减排成本上升;数字化中后期,随着能源需求结构优化、要素技术效率提升,碳减排成本下降。异质性分析显示,相较于国有和高能耗企业,非国有企业、低耗能企业数字化转型较早降低了碳减排成本,提高了城市低碳全要素生产率;资源依赖度低、经济发达、规模较大、数字化与绿色技术创新耦合协调度较高的城市,数字化对碳减排成本的抑制作用更强,城市低碳全要素生产率也因此得到大幅提升。

关键词 数字化; 碳减排成本; 城市低碳

为应对气候变化和实现经济的可持续发展,越来越多的国家和地区提出碳中和的战略目标。根据英国石油公司(BP)发布的《BP世界能源统计年鉴(2021年)》数据,2020年,中国二氧化碳排放量达98.99亿t,占全球排放量的30.7%,超过17.57%的全球经济占比,单位GDP二氧化碳排放量约为世界平均水平的3倍、发达国家的5~9倍。作为一

个尚未完成现代化和碳达峰的发展中大国,要与发达国家大体同步达成碳中和目标,减排压力巨大,减排成本高昂。根据清华大学气候变化与可持续发展研究院的预测,按照将全球平均气温升幅控制为1.5℃的目标导向的低碳化转型路径,2020—2050年能源系统需要新增投资约138万亿元,相当于每年GDP的3%^[1]。企业生产成本和居民生活成

收稿日期:2023-09-14;修回日期:2024-02-29

作者简介:沈宏亮,教授,研究方向为产业组织理论与政策,电子信箱:shenhl@cueb.edu.cn;宋思萌(通信作者),博士研究生,研究方向为数字经济,电子信箱:12019203042@cueb.edu.cn

引用格式:沈宏亮,宋思萌,李杰. 数字化、碳减排成本与城市低碳高质量发展[J]. 科技导报, 2024, 42(6): 86-102;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.06.010

本将因此而提高,经济增长最终也可能受到影响。鉴于此,找到以尽可能低的成本实现碳中和目标的有效途径尤为迫切。

20世纪90年代后期兴起的数字经济为实现低碳发展提供了可能。数字化不仅可以提升既有能源利用效率,而且通过激励零碳能源技术的开发与应用,推进以零碳能源替代化石能源,能够实现生产与消费的低碳化转型。例如,华为公司发布的数据显示,截至2023年初,华为FusionSolar智能光伏解决方案将数字信息、互联网与光伏技术融合,累计实现绿色发电6850亿kW·h,相当于减少3.3亿t二氧化碳排放。当然,一些数字经济领域发展初期也会提高碳排放和减排成本。基于此,本研究探讨数字化对碳减排成本的影响机理与效应,进而分析带来的城市低碳全要素生产率变动,为协同推进数字化转型和实现经济低碳发展提供政策启示。

1 研究进展

1.1 数字化与低碳全要素生产率

关于数字化对低碳全要素生产率的影响,主要有3种观点。一是认为数字化提高低碳全要素生产率。Zhan等^[2]研究表明,以信息通信技术(ICT)为基础的智能制造、智慧交通和脱碳技术应用等可以提高生产与消费效率、减少电力等能源消耗,有利于减少碳排放。张三峰等^[3]基于中国制造业企业调查数据的研究发现,ICT技术通过促进机器设备更新、提升生产制造柔性化,能够降低企业能源利用强度。ICT投资占比提高1%,企业能源利用强度降低5.88%。白雪洁等^[4]研究表明,互联网发展通过成本效应、技术创新效应、需求引致效应提高了低碳全要素生产率。史丹等^[5]指出,人工智能技术可以实现生产线的自动化控制、智能化管理以及物料需求的精确计算,降低能耗、节约能源。二是数字化降低低碳全要素生产率,与第一种观点相反。Asongu等^[6]基于2000—2012年44个非洲国家数据进行的研究发现,ICT渗透率增加提高了人均二氧化碳排放量。Park等^[7]研究发现,2001—2014年欧盟国家互联网使用增加了电力消耗和二氧化

碳排放。三是数字化对低碳全要素生产率具有非线性影响。Higón等^[8]基于1999—2010年116个发展中国家和26个发达国家样本的研究发现,ICT与二氧化碳排放量之间为倒U型关系,大部分发展中国家处于ICT增加碳排放阶段,发达国家已步入ICT减排阶段。缪陆军等^[9]指出,数字经济通过影响创新效率与碳排放的关系呈现倒U型特征。

1.2 数字化与碳减排成本

数字化能够推动技术进步^[10-11],而技术进步是降低碳减排成本的根本途径。Popp^[12]提出技术进步通过提高能源利用效率、以知识替代能源等方式降低碳排放、节约减排成本。Richels等^[13]研究发现,从低碳排放到零碳排放技术的开发应用,大幅降低了碳减排成本。王兵等^[14]表明,低碳技术减少碳排放量的同时可以降低减排成本,强低碳技术比弱低碳技术的减排成本优势更明显。周丽等^[15]利用减排潜力—成本曲线方法进行减排成本核算后发现,大规模应用发光二极管取代效率较低的照明设备可提高环境与经济效益。Lewis^[16]指出,技术进步通过降低非化石能源开采、存储、运输等成本,促进非化石能源大规模替代化石能源,进而抑制边际减排成本。当然,也有一些研究发现,技术进步可能导致碳减排成本上升。Bauman等^[17]认为,减排成本受到技术进步类型的影响,其中燃料转换等生产工艺进步增加边际减排成本。Baker等^[18]表明,企业为了实现高水平的减排目标,从中等减排技术转向高减排技术带来额外的技术更新成本。茹雪等^[19]研究发现,技术进步初期需要的投入巨大,可能限制新技术的引进及其对旧技术的替代,导致技术进步对减排成本的影响初期微弱,中后期才逐渐增强。

已有文献研究了数字化对低碳全要素生产率的影响,也考察了技术进步对碳减排成本的效应。但是对数字化与碳减排成本关系的探讨有待深入。碳减排成本是影响低碳全要素生产率的基本因素,而在数字经济发展背景下,只有阐明数字化作用于碳减排成本的机理才能找到以最低减排成本实现经济低碳发展的有效路径。基于此,本研究尝试进行如下拓展。第一,理清数字化通过改变能源需求

结构、要素技术效率和绿色技术创新降低碳减排成本的机制,深化数字化影响低碳全要素生产率因果链的理解。第二,企业尤其是上市公司碳排放数据主要反映数字化对企业本身碳减排的影响,难以完全体现碳减排的外溢效应。城市低碳全要素生产率则可以将企业数字化的碳减排外溢性显示出来。本研究将企业数字化与城市低碳全要素生产率结合起来弥补了该不足。第三,通过构建数字化与绿色技术创新耦合协调度指标,考察数字化与绿色技术创新之间的协同发展对碳减排与城市低碳全要素生产率的影响效应。

2 理论分析与研究假设

2.1 数字化对低碳全要素生产率的影响

数字化对低碳全要素生产率存在双重效应。低碳全要素生产率将期望产出GDP和非期望产出碳排放集合在一起,能够较好地衡量地区经济增长与碳减排目标的协调要求^[20-21]。在数字经济发展初期,大规模的数字基础设施建设对钢铁、水泥、化工等高能耗行业的产品需求增加,引发制造业碳排放量增加、低碳全要素生产率下降。同时,收集和处理海量数据的数据处理中心的建设和运营维护引起能耗激增也造成同样的后果^[22]。随着数字经济的进一步发展,碳排放量将逐步下降、低碳全要素生产率将上升,主要原因有以下几点。第一,数字化有助于提高企业能源利用效率。企业引入数字化管理系统对能源利用状况实时追踪,可以避免能源浪费。第二,数字化推动能源产业的低碳化转型^[23]。数字化对能源系统的重构,提高可再生能源的生产、分配、存储和利用效率,推动可再生能源的规模化利用,加速对化石能源的替代,从而减少碳排放。第三,数字化推动形成低碳消费理念和消费模式,诱发企业提高低碳全要素生产率。数字平台为低碳消费提供消费机会和便利^[24]。例如,阿里巴巴发布的“88碳账户”通过汇集消费者在饿了么、天猫、菜鸟等平台上产生的碳减排量,引导用户在衣食住行等方面践行低碳生活方式。互联网技术的普及应用形成了低碳化协同消费模式^[25]。如网

约车等数字平台的发展,有效减少了出租车空驶率,降低能源浪费和碳排放。根据交通运输部的数据,2020年出租车空驶率每下降1%可减少上百万吨碳排放。第四,数字化可以提升政府的碳市场调控水平。政府利用数字技术推动全国统一的碳排放权交易市场建设,鼓励更多企业通过碳交易实现碳减排^[26]。政府运用大数据、云计算等构建碳排放智能监测和动态核算体系,实现对地区、行业、企业的碳排放情况进行实时监测和数据采集,提高碳市场的碳排放配额管理和交易的精准性。利用人工智能等制定符合实际的碳减排政策,提高碳减排政策的精准性和有效性。

据此,本研究提出假设一:数字化对城市低碳全要素生产率具有“先抑制、后促进”的非线性影响。

2.2 碳减排成本对低碳全要素生产率的影响

从中国地区碳排放与经济增长水平的现状来看,大部分地区处于“环境库兹涅茨曲线”拐点左侧,二氧化碳排放量与经济增长仍保持同向增长态势^[27]。换言之,能源要素依然是经济发展的重要支撑。这意味着低碳化必然造成产出损失即产生碳减排成本。当碳减排成本过高甚至超过低碳化带来的产出增长时,将导致产出水平随碳排放减少而下降,不利于低碳全要素生产率提高。

一方面,在短期技术不变的条件下,碳减排需要限制火电、钢铁、化工、水泥等高耗能行业规模。由此产生的后果是投资和就业收缩,不利于经济增长和低碳全要素生产率的提高^[28]。吴施美等^[29]研究发现,碳排放每减少1%,就业数量下降0.10%。另外,高排放行业规模收缩还会通过产业关联效应影响上下游行业的规模,进而造成进一步的收缩效应。另一方面,通过技术进步和结构优化实现碳减排,一定时期也会产生碳减排成本,抑制低碳全要素生产率的提高。例如,企业碳减排需要投资减排设备、开发节能技术、改良生产工艺以及实现低碳能源替代,这些措施将造成企业成本上升,提高经营风险和行业进出壁垒,影响企业绩效^[30-31]。而且,企业向低碳经济转变产生的“结构性阵痛”和资本、人力等要素再配置的摩擦成本,都不利于低碳全要素生产率的提高^[32]。不仅如此,碳减排成本过

高可能引起相关产品和服务价格上涨。价格上升引起的“收入效应”将抑制需求,导致经济增长速度放缓。

据此,本研究提出假设二:碳减排成本对低碳全要素生产率具有负向影响。

2.3 数字化对碳减排成本的影响

基于数字化的强渗透性、广覆盖性与高创新性等特点,本研究认为,数字化主要通过改变能源需求结构、提高要素技术效率和促进绿色技术创新影响碳减排成本。

1) 能源需求结构。碳减排需要付出转型成本和固碳成本,且能源消耗越大成本越高^[33]。在工业经济向数字经济过渡的数字化初期,不仅原有高耗能产业发展速度居高不下,能源利用水平较低,而且主要依赖传统化石能源的基站、数据中心等新兴基础设施的建设及数字产品供应的增加,将造成化石能源消耗量增加,能源需求结构恶化^[34]。到了数字化中后期,企业将数字技术与资本、劳动、能源开发等深度融合,要素利用效率有效提高,能源需求结构将发生改变。一方面,数字技术推动高耗能产业能源利用效率提高,能源消耗弹性系数下降,从而降低碳减排成本。另一方面,诸如云资源储存、大数据处理、高度智能化等功能强大的软件平台,可实现能源供给环节的数据化、精细化管理,为可再生能源安全稳定供应提供保障,从而为替代传统化石能源提供了可能^[35]。能源工业互联网通过构建可感、可见、可知、可控的数据能源资源体系,支撑不同能源设备、系统、企业、区域间实时安全感知与协同交互的应用场景,既推动了可再生能源更广泛的应用,又提高能源利用与配置效率^[34]。因此,数字化的“双刃剑”效应使其对能源需求结构具有“先恶化、后改善”的影响。

2) 要素技术效率。改进要素技术效率是降低碳减排成本的关键途径^[36-37]。企业数字化转型可以提升要素技术效率。例如,自动化、智能化的生产运营方式直接提高劳动生产效率;数字技术的应用促使生产设备的功能升级与使用寿命延长,提升生产设备效率;数字化管理有效提高了能源加工转

换以及运输、分配、储存等环节效率,降低能源成本。然而,数字化提升要素技术效率需要一个过程。企业基于旧技术建立起来的人力资本、生产设备、组织架构往往与数字化转型初期的要求不一定完全匹配,结果对要素技术效率产生抑制作用^[18,38]。不仅如此,由于数字化初期数字产业配套设施建设推进缓慢、新兴数字行业与传统行业的融合度不高,数字化对要素配置效率的促进效应还得不到完全显现^[39]。由此可见,数字化对要素技术效率具有“先抑制、后促进”效应。

3) 绿色技术创新。绿色技术既为企业低碳转型提供了动力,也有利于降低碳减排成本^[16,40]。数字化提高了信息共享和流转速度,不仅企业获取信息的时滞缩短,而且整合利用创新资源进行创新的进程加快^[41]。绿色技术创新涉及能源、化工、环境等多个领域,系统性特征明显。基于数字技术的创新平台,能够引导企业、大学、科研院所等创新主体参与到跨区域、跨领域的创新活动中,由此产生的协同效应将提高绿色技术创新效率^[42]。然而,数字化对绿色技术创新也可能产生负面影响。一方面,企业过度数字化将导致数字化投资挤占本用于绿色技术创新的投入,结果抑制绿色技术创新^[43]。另一方面,过度数字化可能引发信息超载、信息污染和信息安全等问题,迫使企业减少信息获取,从而不利于绿色技术创新^[44]。孙国锋等^[45]指出,短期内数字化对绿色技术创新存在正向效应,长期则呈现负向效应。也就是说,数字化对绿色技术创新的影响具有不确定性。

综合数字化对能源需求结构、要素技术效率和绿色技术创新的影响,提出假设三:数字化推动碳减排成本初期提高、后期下降,进而对城市低碳全要素生产率产生“先抑制、后促进”的动态影响。

3 研究设计

3.1 基准模型构建

基于理论分析,本研究设定如下基准模型识别数字化对碳减排成本的影响:

$$\ln mac_{j,t} = \beta_0 + \beta_1 \ln di_{i,j,t} + \beta_2 \ln dis_{i,j,t} + \beta_3 \ln x_{i,j,t} + \beta_4 \ln w_{j,t} + \mu_i + \delta_j + \xi_t + \varepsilon_{i,j,t} \quad (1)$$

式中, i, j 和 t 分别表示企业、城市和年份; $mac_{j,t}$ 为碳减排成本; $di_{i,j,t}$ 为数字化水平, $dis_{i,j,t}$ 为数字化平方项, 用于检验可能存在的非线性影响; $x_{i,j,t}$ 为企业层面的控制变量, 包括垄断程度、资产负债率、盈利能力和企业成长性; $w_{j,t}$ 是城市层面的控制变量, 包括人力资本、产业多样化、消费水平、对外开放水平、政府干预程度、碳汇能力、人均国内生产总值。 μ_i 、 δ_j 、 ξ_t 分别为企业、城市、年份固定效应, $\varepsilon_{i,j,t}$ 为随机扰动项。

为验证碳减排成本是否为数字化影响城市低碳全要素生产率的主要机制, 本研究进一步设定以下模型:

$$\ln gml_{j,t} = \gamma_0 + \gamma_1 \ln di_{i,j,t} + \gamma_2 \ln dis_{i,j,t} + \gamma_3 \ln mac_{j,t} + \gamma_4 \ln x_{i,j,t} + \gamma_5 \ln w_{j,t} + \mu_i + \delta_j + \xi_t + \varepsilon_{i,j,t} \quad (2)$$

式中, $gml_{j,t}$ 为城市低碳全要素生产率。

3.2 变量说明

1) 城市低碳全要素生产率(gml)。

借鉴邵帅等^[40]的研究, 将二氧化碳排放作为非期望产出、能源消耗作为投入要素纳入传统全要素生产率核算框架测算得到低碳全要素生产率。具体而言, 选取城市生产总值和二氧化碳排放量分别作为期望产出(Y)和非期望产出(C), 资本存量(K)、劳动力(L)和能源消耗量(E)作为投入要素, 采用全局参比的超效率 DEA-SBM 模型测算 Global-Malmquis-Luenberger 指数即城市低碳全要素生产率。城市生产总值用按照 2011 年不变价格计算的实际生产总值表示。资本存量利用永续盘存法测算, 以 2011 年为基期, 折旧率为 9.6%。劳动力为地区年末单位从业人数。能源消耗为城市全年用电量, 根据能源燃烧热值将电力消耗量折算为万吨标准煤。

2) 数字化(di)。

企业数字化: 借鉴张永坤等^[46]的做法, 用上市公司财务报告附注披露的年末无形资产明细项中与数字化转型相关部分占无形资产总额的比例度

量。具体而言, 当无形资产明细项含有“软件”“网络”“系统”“智能平台”等与数字化相关的关键词时, 将该明细项目归为“数字化无形资产”, 然后对同一公司同年度所有数字化无形资产加总, 计算其占无形资产比重, 即为企业数字化程度。

城市数字化: 参考邓荣荣等^[47]的做法, 采用数字化综合发展指数度量。综合考虑数字基础设施、数字产业、数字应用 3 个维度以及数据的可得性, 最终采用互联网用户占比、移动电话用户占比、信息传输与技术服务业就业人员占比、人均电信业务总量和城市数字普惠金融指数 5 个指标作为子维度指标, 将 5 个指标进行标准化处理后采用熵值法测算城市数字化综合发展指数。其中, 互联网用户占比为每百人互联网宽带接入用户数, 移动电话用户占比为每百人移动电话用户数。

3) 机制变量。

碳减排成本(mac): 用二氧化碳边际减排成本表示。二氧化碳边际减排成本为既定技术水平下, 为减少一单位二氧化碳排放而放弃的 GDP 数量。参考陈诗一^[48]的研究, 采用效率技术模型估算法测算二氧化碳影子价格, 表征二氧化碳边际减排成本。核心原理为, 在非径向方向距离函数(Non-radial Directional Distance Functions, NDDF)框架下, 将 GDP 作为期望产出向量, 二氧化碳排放作为非期望产出向量, 资本存量、劳动力和能源消耗量作为投入要素向量, 构造方向性产出距离函数。基于方向距离函数与收益函数的对偶关系, 利用谢泼德引理(Ronald Shephard)求得最优解即二氧化碳影子价格。关于效率技术模型求解方法, 参考 Zhang 等^[49]的做法, 采用 DEA-SBM 模型的非参数方法, 通过 Stata 软件测算中国 230 个城市的碳减排成本。

能源需求结构(ec): 用化石能源消费弹性系数表示, 即化石能源消费量年平均增长速度与地区经济年平均增长速度的比。弹性系数越小, 表明产出增长对化石能源依赖程度越低。同时意味着能源密集型行业收缩, 资本、劳动、技术密集型行业扩张, 换言之, 能源要素需求结构得到优化。

要素技术效率(te): 借鉴丁一兵等^[50]的做法, 采用规模报酬不变的 DEA-SBM 模型, 通过 Matlab 软

件测算 Malmquist 生产率指数,然后将其分解为技术效率指数和技术进步指数,其中技术效率指数代表要素技术效率。在企业生产率指数测算中,投入要素选取劳动投入,用企业员工人数衡量;资本投入,用企业固定资产账面价值衡量;产出用销售收入衡量。

绿色技术创新(*inn*):用企业、城市当年绿色专利授权数量衡量。

4) 控制变量。

为尽可能排除其他因素对城市低碳全要素生产率的影响,本研究引入企业和城市层面控制变量。企业层面包括:垄断程度,用赫芬达尔—赫希曼指数(HHI)表示,为行业内每家公司的主营业务收入与行业主营业务收入合计比值的平方累加;资产负债率(*lev*),用总负债除以总资产表示;盈利能力(*nroa*),用企业净资产收益率表示,为净利润与股东权益平均余额的比值;企业成长性(*gro*),用企业边际利润率表示,为(利润+销售成本)/销售收入。城市层面包括:人力资本(*edu*),用每万人在校大学生数量表示;产业多样化(*div*):用赫芬达尔指数的倒数表示, $div = 1 / \sum_{j=1}^n (l_{ja} / l_i)^2$, 其中 l_{ja} 表示 i 城市 j 产业($j=1,2,3$)在该地区的就业 l_i 占比;消费水平(*consume*),用人均社会消费品零售总额表示;对外开放水平(*open*),用外商直接投资实际使用金额与实际 GDP 的比值表示;政府干预程度(*gc*),用地方财政支出占地区 GDP 的比重表示;碳汇能力(*gre*):用建成区绿化覆盖率表示;人均国内生产总值(real GDP per capita, *rgdp*),用以 2011 年为基期的实际人均 GDP 表示。

3.3 数据来源和描述性统计

通过匹配沪深 A 股上市公司数据与城市二氧化碳排放数据,构建研究期限为 2011—2020 年的非平衡面板数据。所使用的数据主要来源:企业数字资产等各类财务数据源于国泰安数据库(CSMAR)和锐思数据库(RESET);城市二氧化碳排放量数据源于中国碳核算数据库(CEADs);城市数字普惠金融指数源于北京大学数字金融研究中心;企业和城市绿色发明专利信息数据源于中国研究

数据服务平台(CNRDS)中的中国创新专利研究子数据库(CIRD);城市层面变量数据源于历年《中国城市统计年鉴》。

根据研究需要,本研究对样本数据进行处理。首先,根据沪深 A 股上市公司的基本特征、财务数据,对样本进行了如下筛选处理:删除金融类公司样本、资不抵债公司样本、股票受证监会特别处理的公司样本以及主要变量缺失的样本,得到 3595 家公司数据。其次,将二氧化碳排放、数字普惠金融数据与城市面板数据相匹配,剔除变量缺失样本,得到 230 个城市数据。最后,为了避免异常值对实证结果的影响,对所有连续变量进行双侧 1% 的缩尾处理。

4 实证结果与分析

4.1 基准回归

表 1 报告了数字化、碳减排成本与城市低碳全要素生产率之间关系的基准估计结果。列(1)和(2)显示,数字化对碳减排成本的影响呈“先促进、后抑制”的动态变化特征。在列(3)中,碳减排成本对城市低碳全要素生产率的回归系数显著为负,同时数字化一次项与平方项对城市低碳全要素生产率的回归系数均显著,且分别为负和正。这意味着数字化不仅通过改变碳减排成本对城市低碳全要素生产率产生“先抑制、后促进”的非线性影响,还对城市低碳全要素生产率产生直接效应。结果与假设一、二、三相符。随着数字化水平提高,数字化对碳减排成本及城市低碳全要素生产率的影响呈“低碳效率潜能滞后—数字化与低碳化协同,低碳效率潜能释放”的非线性变化轨迹。这可能是由于,在数字化初期数字基础设施建设与数字产业扩张,带来能源消耗和碳排放增加,碳减排压力增大和碳减排成本上升,城市低碳全要素生产率下降。到了数字化中后期,数字行业与其他行业实现深度融合,推动全产业链低碳化,促使相关行业通过数字化转型和技术创新实现节能降碳。这意味着数字化通过降低碳减排成本而对城市低碳全要素生产率具有长效积极影响。

表1 数字化、碳减排成本与城市低碳全要素生产率关系的基准回归结果

变量	(1) 碳减排成本	(2) 碳减排成本	(3) 低碳全要素生产率
<i>ln<i>di</i></i>	-0.005 (-0.17)	0.514*** (3.81)	-0.529*** (-3.50)
<i>ln<i>dis</i></i>		-0.618*** (-2.98)	0.833*** (3.59)
<i>ln<i>mac</i></i>			-0.184*** (-17.17)
控制变量	控制	控制	控制
企业、城市、年份固定效应	控制	控制	控制
样本量	25456	25456	25456
<i>R</i> ²	0.37	0.07	0.18

注：*、**、***分别表示*P*在10%、5%、1%的水平上显著，括号内的数值为*t*值；表内“空白”代表此列估计中无此项。

4.2 稳健性检验

1) 改变核心变量度量方式。本研究使用企业数字化和碳减排成本的替代指标进行稳健性检验。第一,使用国泰安数据库提供的上市公司数字化转型程度表征企业数字化。第二,利用基于径向方向性距离函数理论测算的中国城市二氧化碳边际减

排成本表征碳减排成本。表2列(1)和(2)显示,替换核心变量后,主要研究结论依然成立。

2) 样本数据再选择。为排除样本选择对基准研究结论的影响,使用城市样本对数字化、碳减排成本与城市低碳全要素生产率之间关系进行检验。表2列(3)和(4)显示,替换样本后假设依然成立。

表2 稳健性检验结果

变量	改变核心变量度量方式		城市层面样本	
	(1) 碳减排成本	(2) 低碳全要素生产率	(3) 碳减排成本	(4) 低碳全要素生产率
<i>ln<i>di</i></i>	0.201*** (8.03)	-0.019*** (-10.90)	0.688 (1.29)	-20.37*** (-16.83)
<i>ln<i>dis</i></i>	-0.027*** (-4.40)	0.002*** (4.86)	-2.994** (-2.35)	36.71*** (12.65)
<i>ln<i>mac</i></i>		-0.006*** (-11.12)		-0.175*** (-3.50)
控制变量	控制	控制	控制	控制
城市、年份固定效应	—	—	控制	控制
企业、城市、年份固定效应	控制	控制	—	—
样本量	25456	25456	2300	2300
<i>R</i> ²	0.08	0.30	0.491	0.306

注：*、**、***分别表示*P*在10%、5%、1%的水平上显著，括号内的数值为*t*值；表内“空白”代表此列估计中无此项，“—”代表未发现。

3) 样本数据层级调整。为避免数字化和低碳全要素生产率指标不同层级导致反向因果问题,根据 Ball 等^[5]的做法,对企业层面指标进行加总(企业加总权重为企业员工人数占所在城市总员工

人数的比重),使数字化指标与碳减排成本、低碳全要素生产率指标均处在城市层面。表3列(1)和(2)显示,样本数据层级调整后,主要研究结论依然成立。

4) 内生性控制。理论上,数字化降低碳减排成本,进而促进城市低碳全要素生产率,同时低碳化也倒逼各个行业加快数字化转型与数字技术创新,即数字化与城市低碳全要素生产率可能存在反向因果关系。另外,由于影响城市低碳全要素生产率的因素较多,可能出现遗漏变量问题。因此,基准估计结论一致性识别面临内生性挑战。本研究使用系统 GMM 法对基准模型进行估计。表 3 列(3)中估计结果再次验证了数字化对碳减排成本具

有“先促进、后抑制”的影响。列(4)中,碳减排成本对城市低碳全要素生产率的估计系数显著为负,同时数字化一次项与平方项对城市低碳全要素生产率的回归系数均显著,且分别为负和正。说明数字化不仅通过改变碳减排成本对城市低碳全要素生产率产生“先抑制、后促进”的动态影响,还对城市低碳全要素生产率产生直接效应,即考虑内生性问题后,主要结论依然成立。

表3 数据层级调整与内生性控制估计结果

变量	层级调整		系统 GMM 法估计结果	
	(1) 碳减排成本	(2) 低碳全要素生产率	(3) 碳减排成本	(4) 低碳全要素生产率
<i>L.lngml</i>				-0.578*** (-8.18)
<i>L.lnmac</i>			-0.322*** (-3.15)	
<i>ln di</i>	0.668*** (24.23)	-0.027 (-0.81)	3.099*** (2.88)	-3.730* (-1.81)
<i>ln dis</i>	-0.108*** (-21.28)	0.073*** (12.51)	-4.731*** (-2.95)	10.647*** (3.13)
<i>ln mac</i>		-0.164*** (-15.75)		-0.096*** (-3.39)
控制变量	控制	控制	控制	控制
企业、城市、年份固定效应	控制	控制	控制	控制
样本量	25462	25462	9648	15062
<i>R</i> ²	0.15	0.25	—	—
<i>F</i>	—	—	15764.90[0.00]	303.59[0.00]
<i>hansen</i>	—	—	52.84	390.20
<i>AR</i> (1)	—	—	-4.57[0.00]	-6.88[0.00]
<i>AR</i> (2)	—	—	0.99[0.32]	-0.82[0.41]

注: *、**、*** 分别表示 *P* 在 10%、5%、1% 的水平上显著, 括号内的数值为 *t* 值, 中括号内的数值为 *P* 值; 系统 GMM 法回归方程包含被解释变量的滞后项, 因此, “*L*.” 代表变量的一阶滞后项, 表内“空白”代表此列估计中无此项, “—”代表未发现, “0”代表实测结果为零。

4.3 机制分析

由于数字化对碳减排成本的影响取决于能源需求结构、要素技术效率和绿色技术创新的综合作用,为考察数字化影响碳减排成本的机制,借鉴李治国等^[52]的做法,在基准模型基础上构建两阶段传递效应模型。

第一步,检验数字化对能源需求结构、要素技术效率和绿色技术创新的影响:

$$\ln channel_{i,j,t} = \eta_0 + \eta_1 \ln di_{i,j,t} + \eta_2 \ln dis_{i,j,t} + \eta_3 \ln x_{i,j,t} + \eta_4 \ln w_{j,t} + \mu_i + \delta_j + \xi_t + \varepsilon_{i,j,t} \quad (3)$$

第二步,考察能源需求结构、要素技术效率和绿色技术创新对碳减排成本的影响:

$$\ln mac_{j,t} = \lambda_0 + \lambda_1 \ln ec_{i,j,t} + \lambda_2 \ln te_{i,j,t} + \lambda_3 \ln inn_{j,t} + \lambda_4 \ln x_{i,j,t} + \lambda_5 \ln w_{j,t} + \mu_i + \delta_j + \xi_t + \varepsilon_{i,j,t} \quad (4)$$

式(3)中, *channel*_{*i,j,t*} 依次表示能源需求结构、要素技

术效率、绿色技术创新。

表4为企业层面两阶段回归结果。数字化对企业绿色技术创新的影响显示为“先促进、后抑制”。与之不同,数字化对能源需求结构和要素技术效率的影响表现为“先抑制、后促进”。在数字化初期,绿色技术创新对碳减排成本的抑制作用小于能源需求激增、要素技术效率下降引发的碳减排成本增加,进而对城市低碳全要素生产率产生消极影响。数字化后期,能源需求结构得到优化、要素技术效率不断提升,从而降低了碳减排成本,对城市低碳全要素生产率产生积极影响。这既阐明了数字化短期导致碳减排成本上升的原因,同时也为长期碳减排成本下降、城市低碳全要素生产率提高提供了合理解释。

表4 机制分析:企业层面

变量	(1) 能源需求结构	(2) 要素技术效率	(3) 绿色技术创新	(4) 碳减排成本
<i>ln_{di}</i>	0.012** (2.08)	-0.050** (-1.98)	1.545*** (9.98)	
<i>ln_{dis}</i>	-0.125*** (-2.62)	0.173*** (4.49)	-2.457*** (-10.34)	
<i>ln_{mac}</i>				
<i>ln_{ec}</i>				0.014*** (3.23)
<i>ln_{te}</i>				-0.468*** (-5.62)
<i>ln_{inn}</i>				-0.036*** (-8.79)
控制变量	控制	控制	控制	控制
企业、城市、年份固定效应	控制	控制	控制	控制
样本量	19830	25456	25456	19830
<i>R</i> ²	0.24	0.08	0.05	0.45

注: *、**、***分别表示*P*在10%、5%、1%的水平上显著,括号内的数值为*t*值;表内“空白”代表此列估计中无此项。

表5为城市层面的两阶段回归结果。第一阶段结果表明,城市数字化优化了能源需求结构,但是对要素技术效率、绿色技术创新的影响分别表现为“先抑制、后促进”“先促进、后抑制”特点。第二阶段结果表明,能源需求结构优化、要素技术效率提升以及绿色技术创新均有效降低了碳减排成本。这一结果与企业层面结论基本一致。

4.4 异质性分析

1) 企业所有制。由于国有企业与非国有企业经营目标、治理模式等方面的差异,可能使数字化对碳减排成本、城市低碳全要素生产率的影响效果不同。本研究按照企业所有制性质将样本分为国有企业、非国有企业,同时控制企业规模等干扰因素进行检验的结果如表6所示。国有企业数字化

对碳减排成本的影响为“先促进、后抑制”,对城市低碳全要素生产率的影响相反,表现为“先抑制、后促进”。国有企业数字化的节能减排效应尚未充分显现。与之相比,非国有企业数字化的节能减排效果明显。造成不同类型企业数字化降碳效应差异的可能原因在于,国有企业所处行业利益、承担的特殊经济社会职能、政策导向性等因素,使其对原有生产方式的路径依赖性短期内难以完全改变。此外,国有企业复杂的层层委托代理治理体系也可能造成数字化转型存在滞后性。《2019中国数字企业白皮书——国企与民企对标篇》也印证了这一点,其中,37%的民营企业认为数字化战略重要性不弱于核心业务战略,持有相同看法的国有企业仅有26%。

表5 机制分析:城市层面

变量	(1) 能源需求结构	(2) 要素技术效率	(3) 绿色技术创新	(4) 碳减排成本
<i>Indi</i>	-0.429* (-1.80)	-27.408*** (-14.18)	20.491*** (32.93)	
<i>Indis</i>	0.743 (1.34)	50.861*** (10.98)	-32.001*** (-21.47)	
<i>lnmac</i>				
<i>lnec</i>				0.036*** (4.21)
<i>lnite</i>				-0.043*** (-2.76)
<i>lninn</i>				0.013 (0.63)
控制变量	控制	控制	控制	控制
企业、城市、年份固定效应	控制	控制	控制	控制
样本量	2070	2300	2300	2070
<i>R</i> ²	0.07	0.24	0.63	0.50

注: *、**、***分别表示*P*在10%、5%、1%的水平上显著,括号内的数值为*t*值;表内“空白”代表此列估计中无此项。

表6 企业所有制异质性

变量	国有企业			非国有企业		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	碳减排成本	碳减排成本	低碳全要素生产率	碳减排成本	碳减排成本	低碳全要素生产率
<i>Indi</i>	0.060 (1.23)	1.083*** (4.56)	-0.465* (-1.68)	-0.005 (-0.13)	-0.488*** (-4.31)	0.258 (1.44)
<i>Indis</i>		-1.461*** (-4.06)	0.762* (1.82)		0.787*** (4.50)	-0.317 (-1.15)
<i>lnmac</i>			-0.185*** (-11.26)			-0.227*** (-16.33)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
企业、城市、年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
样本量	10228	10228	10228	15228	15228	15228
<i>R</i> ²	0.29	0.08	0.20	0.43	0.43	0.20

注: *、**、***分别表示*P*在10%、5%、1%的水平上显著,括号内的数值为*t*值;表内“空白”代表此列估计中无此项。

2) 企业耗能。企业的能源密集属性一定意义上决定了其碳减排难度。根据国家统计局公布的数据,2017年六大高耗能行业总能耗占全国能源消费总量的48.7%,二氧化碳排放占比接近80%,这些行业的企业能源利用效率较低,减排压力相比于其他行业更大。根据所处行业性质,将工业企业分为高耗能、低耗能两类进行检验,结果如表7所

示。可以看出,低耗能工业企业数字化不仅通过改变碳减排成本对城市低碳全要素生产率产生影响,还对城市低碳全要素生产率产生直接效应,高耗能工业企业数字化的影响不存在。这可能是由于部分高耗能企业面临的转型成本过高,相对缺乏转型资金、技术和人才,因而转型动力不足且还在尽可能延续原有的生产方式。

表7 企业耗能强度异质性

变量	高耗能工业企业			低耗能工业企业		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	碳减排成本	碳减排成本	低碳全要素生产率	碳减排成本	碳减排成本	低碳全要素生产率
ln <i>di</i>	0.018 (0.15)	0.555 (1.12)	0.271 (0.43)	-0.061 (-1.10)	0.560*** (2.90)	-0.860*** (-3.91)
ln <i>dis</i>		-0.572 (-0.70)	-0.090 (-0.09)		-0.738** (-2.20)	1.621*** (4.25)
ln <i>mac</i>			-0.181*** (-5.87)			-0.198*** (-13.22)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
企业、城市、年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
样本量	4088	4088	4088	14201	14201	14201
R ²	0.34	0.07	0.15	0.40	0.07	0.17

注：*、**、***分别表示*P*在10%、5%、1%的水平上显著，括号内的数值为*t*值；表内“空白”代表此列估计中无此项。

3) 城市资源禀赋。随着碳中和目标的确立，资源型城市面临的经济增长和碳减排压力较大。依据国务院《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》的分类标准，将总样本分为资源型城市和非资源型城市两类进行检验，结果如表8所示。非资源型城市数字化对碳减排成本表现出明显的抑制作用，对城市低碳全要素生产率的影响呈非线性特征，并且碳减排成本对城市低碳全要素生产率的估计系数显著为负。说明非资源型城市数字化不仅通过降低碳减排成本对城市低碳全要素生产率产生促进效应，还对城市低碳全要素生产

率产生直接非线性影响。资源型城市数字化对碳减排成本和城市低碳全要素生产率均无显著影响。这是因为非资源型城市已经初步实现数字化、低碳化，需要依托更高水平数字化推动技术和生产方式变革，以倒逼企业进一步加大碳减排。资源型城市主要通过“关停并转”、利用简单低碳技术或要素替代等途径实现节能减排，对依托数字化转型助推碳减排的重视程度不高。同时，资源型城市对资源型产业存在依赖惯性，导致新兴数字产业发展滞后，数字化的碳减排效应短期内尚未发挥出来。

表8 城市资源密集程度异质性

变量	资源型城市			非资源型城市		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	碳减排成本	碳减排成本	低碳全要素生产率	碳减排成本	碳减排成本	低碳全要素生产率
ln <i>di</i>	-0.022 (-0.22)	0.381 (0.79)	0.353 (0.47)	-0.055* (-1.84)	-0.053*** (-8.69)	-0.502*** (-3.29)
ln <i>dis</i>		-0.765 (-0.99)	0.117 (0.10)		0.017 (0.37)	0.792*** (3.39)
ln <i>mac</i>			-0.140*** (-4.23)			-0.185*** (-16.75)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
企业、城市、年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
样本量	2478	2478	2478	22984	22984	22984
R ²	0.63	0.19	0.21	0.39	0.39	0.17

注：*、**、***分别表示*P*在10%、5%、1%的水平上显著，括号内的数值为*t*值；表内“空白”代表此列估计中无此项。

4) 地理区位。考虑到地区之间数字经济发展水平、碳排放量等存在较大差异,数字化、碳减排成本与城市低碳全要素生产率间的关系可能存在区域异质特征。本研究将总样本分为东、中、西部3个区域进行检验,结果如表9所示。东部地区数字化对碳减排成本的影响为单调抑制效应,中部地区影响呈“先促进、后抑制”的动态变化,西部地区数字化对碳减排成本的影响为单调的促进效应。3个地区碳减排成本增加均不利于城市低碳全要素生产率增长。这说明东部地区数字化通过降低碳减排成本促进了城市低碳全要素生产率增长;中部地区数字化通过碳减排成本对城市低碳全要素生产率的影响呈非线性变化;西部地区数字化通过提

高碳减排成本抑制了城市低碳全要素生产率增长。这可能是由于东部地区经济、科技等水平领先,数字化已产生了积极的减排效应,降低了碳减排成本。中部地区承接了大量东部地区转移的高耗能、高碳排放产业,导致减排压力增大,碳减排成本上升。与此同时,减排潜力大、创新能力强的数字产业转移速度并不够快,因此,中部地区数字化短期内导致碳减排成本上升,随数字产业转移加速,数字化的碳减排长期效应逐渐显现。西部地区的基础设施正处于由“传统基建”向“新基建”转型过程中,数字化发展相对落后,数字化的碳减排效应整体上尚未明显显现。

表9 地理区位异质性

变量	东部地区			中部地区			西部地区		
	(1) 碳减排成本	(2) 碳减排成本	(3) 低碳全要素生产率	(4) 碳减排成本	(5) 碳减排成本	(6) 低碳全要素生产率	(7) 碳减排成本	(8) 碳减排成本	(9) 低碳全要素生产率
Indi	-0.065*** (-9.56)	-0.024*** (-2.74)	-0.437*** (-2.59)	-0.083** (-2.56)	1.300*** (3.86)	-1.006** (-2.16)	0.159** (2.35)	0.186 (0.89)	-0.517 (-1.10)
Indis		-0.024 (-0.37)	0.669*** (2.61)		-2.058*** (-3.74)	1.688** (2.22)		-0.044 (-0.13)	1.059 (1.43)
lnmac			-0.198*** (-16.53)			-0.092*** (-3.88)			-0.095** (-2.17)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
企业、城市、年份 固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
样本量	18423	18423	18423	3957	3957	3957	3082	3082	3082
R ²	0.47	0.32	0.18	0.76	0.14	0.18	0.18	0.18	0.18

注:*,**,***分别表示P在10%、5%、1%的水平上显著,括号内的数值为t值;表内“空白”代表此列估计中无此项。

5) 城市规模。特大型城市具备完善的数字基础设施及配套设施,经济聚集和规模效应显著,为企业数字化转型、生产效率和创新能力提升提供了基础,因此,数字化水平更高的特大型城市节能减排效果应该更明显。根据城市人口规模将总样本分为特大型城市和中小型城市两类分别检验,结果如表10所示。特大型城市数字化显著抑制了碳减排成本,中小型城市数字化对碳减排成本的影响呈

“先促进、后抑制”的特征。同时,特大型城市数字化对城市低碳全要素生产率的影响呈非线性变化轨迹。说明特大型城市数字化不仅通过降低碳减排成本促进了城市低碳全要素生产率增长,还对城市低碳全要素生产率产生直接效应。中小型城市数字化仅通过改变碳减排成本对城市低碳全要素生产率产生非线性影响。换言之,现阶段,特大型城市数字化已显示出减排效应。

表 10 城市规模异质性

变量	特大型城市			中小型城市		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	碳减排成本	碳减排成本	低碳全要素生产率	碳减排成本	碳减排成本	低碳全要素生产率
lndi	-0.055*** (-6.29)	-0.095*** (-3.61)	-0.205*** (-6.40)	-0.004 (-0.11)	0.771*** (4.67)	-0.432 (-1.58)
lndis		0.010 (1.59)	0.026*** (3.53)		-1.083*** (-4.16)	0.588 (1.37)
lnmac			-0.233*** (-20.61)			-0.330*** (-20.23)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
企业、城市、年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
样本量	13655	13655	13655	11807	11807	11807
R ²	0.45	0.45	0.25	0.55	0.12	0.19

注：*、**、***分别表示P在10%、5%、1%的水平上显著，括号内的数值为t值；表内“空白”代表此列估计中无此项。

6) 数字化与绿色技术创新耦合协调度。数字化无论作为创新要素,还是作为绿色信息共享平台都有助于绿色技术创新。反过来,绿色技术创新为数字产业低碳发展提供新的技术和资源要素。数字化和绿色技术创新协同程度越高,对城市低碳全要素生产率的促进效应越强。借鉴赵卉心等^[53]的做法,在测算地区数字化与绿色技术创新耦合协调度的基础上,将地区划分为低耦合协调度和中高耦合协调度地区分别检验,结果如表 11 所示。低耦

合协调度地区数字化对碳减排成本的影响显著为正,中高耦合协调度地区影响呈“先促进、后抑制”的特征,且已处于抑制阶段。这表明,低耦合协调度地区数字化通过提高碳减排成本抑制了城市低碳全要素生产率的增长;中高耦合协调度地区数字化通过降低碳减排成本促进了城市低碳全要素生产率增长。结果表明,数字化与绿色技术创新耦合度越高,越有利于地区低碳转型与经济增长双目标的实现。

表 11 数字化与绿色技术创新耦合协调度异质性

变量	低耦合协调度			中高耦合协调度		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	碳减排成本	碳减排成本	低碳全要素生产率	碳减排成本	碳减排成本	低碳全要素生产率
lndi	0.118 (1.03)	0.466* (1.74)	0.167 (0.21)	-0.054* (-1.83)	0.473*** (3.42)	-0.502*** (-3.29)
lndis		-0.702 (-1.44)	-0.921 (-0.63)		-0.562*** (-2.66)	0.837*** (3.59)
lnmac			-0.275*** (-8.90)			-0.175*** (-15.85)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
企业、城市、年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
样本量	2218	2218	2218	23244	23244	23244
R ²	0.63	0.63	0.23	0.39	0.07	0.17

注：*、**、***分别表示P在10%、5%、1%的水平上显著，括号内的数值为t值；表内“空白”代表此列估计中无此项。

5 结论与建议

在数字经济大背景下,明确数字化、碳减排成本与低碳全要素生产率间的关系有助于以最低的经济成本实现经济低碳发展。本研究首先从理论上阐明了数字化影响碳减排成本的机制与效应及其带来的城市低碳全要素生产率变化,并提出相关假设,进而利用中国经验数据进行了实证检验。主要结论如下。(1) 数字化与碳减排成本之间的关系表现出非线性特征,具体而言:数字化初期,能源需求激增、要素技术效率下降引发的碳减排成本提高效应大于绿色技术创新对碳减排成本的抑制作用,导致碳减排成本上升;数字化中后期,随着能源需求结构的优化和要素技术效率的提升,碳减排成本下降。(2) 碳减排成本提高对城市低碳全要素生产率增长产生负向效应,即数字化通过改变碳减排成本对城市低碳全要素生产率产生“先抑制、后促进”的非线性影响。(3) 数字化、碳减排成本与城市低碳全要素生产率间的关系存在异质性。按企业性质划分时,非国有企业、低耗能企业更早步入数字化节能减排阶段;按城市划分时,资源依赖程度低、经济发达、规模较大、数字化与绿色技术创新耦合协调度较高的城市,数字化对碳减排成本产生了更强的抑制效果,并由此带来这些城市低碳全要素生产率大幅提升。

基于上述研究结论,本研究提出3点建议。

1) 推动数字产业低碳化发展。一是加强低碳发展的管理和监管。政府可制定数字经济领域低碳发展标准,强制数字产业企业披露碳排放信息,引导数字产业企业主动采用低碳技术和节能措施,同时建立数字产业低碳发展监管平台,确保其低碳化发展。二是加快数字基础设施及配套项目建设的同时,通过工艺优化升级、绿色技术研发、采用可再生能源等,对数字基础设施建设与运营过程进行能耗控制和改良,实现数字产品从设计、生产到消费、回收等全生命周期的节能减排。三是培养壮大通信设备、集成电路、电子元器件等基础数字产业,加快对交通、物流、能源、电力等配套基础设施实施

数字化改造升级,提高数字领域能源利用效率。

2) 基于数字化对碳减排成本、城市低碳全要素生产率影响的动态变化特征,构建数字化促进城市低碳全要素生产率的长效机制。一方面,依托数字技术构建“化石能源低碳化和可再生能源规模化”智慧能源体系,促进能源结构优化。通过化石能源与数字技术的不断融合,实现智慧矿山、智慧油田、智慧工厂、智慧储运等,提高生产、运输效率和安全性,促进传统化石能源向低碳转型;同时,利用数字化、智能化技术,推动可再生能源在智慧网络、智慧城市等领域的发展,加快其对化石能源的替代,构建以可再生能源为主体的新型能源系统。另一方面,注重数字化与绿色技术创新的长期匹配性和协调性,适度控制企业的资本投入力度,避免过度数字化引起的创新抑制。保障对数字技术与绿色技术创新的长期资金、政策支持,确保绿色技术创新的持续性,以激活数字化对碳减排成本的抑制效应。

3) 因地制宜地实施数字化、低碳化战略,提高数字化与低碳化协同发展水平。首先,分类引导和充分发挥数字化与低碳化发展的企业主体功能。加快国有企业数字化和碳减排步伐,发挥其低碳化发展的示范功能。通过税收优惠、补贴等措施激励高耗能企业优化能源需求结构,引进绿色技术,提高资源利用效率。其次,立足城市特点发挥城市数字化与低碳化联动效应。结合资源型城市资源禀赋和产业特征,通过财政、金融政策吸引和留住人才、资金、技术要素,克服数字化转型“后发劣势”,加快数字产业培育,实现城市数字化转型,逐步摆脱资源依赖惯性。最后,立足地区优势,制定数字化与低碳化协调发展政策措施。如经济发达的东部地区应重点关注数字技术创新、绿色创新、产业结构升级,以创新引领数字化与低碳化的协同发展。中部地区应围绕承接产业转移的重点和方向,推进重点产业数字化、低碳化。西部地区则要在加快推进数字基础设施建设的同时,强调发挥资源禀赋优势,大力发展可再生能源产业体系,打造数字能源产业基地,优化西部地区能源供应结构。

参考文献 (References)

- [1] 项目综合报告编写组.《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(11): 1-25.
- [2] Zhang C G, Liu C. The impact of ICT industry on CO₂ emissions: A regional analysis in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 12-19.
- [3] 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, 37(2): 155-173.
- [4] 白雪洁, 孙献贞. 互联网发展影响全要素碳生产率: 成本、创新还是需求引致[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(10): 105-117.
- [5] 史丹, 李鹏. “双碳”目标下工业碳排放结构模拟与政策冲击[J]. 改革, 2021, 334(12): 30-44.
- [6] Asongu S A, Le Roux S, Biekpe N. Enhancing ICT for environmental sustainability in Sub-Saharan Africa[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2018, 127: 209-216.
- [7] Park Y, Meng F C, Baloch M A. The effect of ICT, financial development, growth, and trade openness on CO₂ emissions: An empirical analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(30): 30708-30719.
- [8] Higón D A, Gholami R, Shirazi F. ICT and environmental sustainability: A global perspective[J]. Telematics and Informatics, 2017, 34(4): 85-95.
- [9] 缪陆军, 陈静, 范天正, 等. 数字经济发展对碳排放的影响——基于 278 个地级市的面板数据分析[J]. 南方金融, 2022, 546(2): 45-57.
- [10] 郭家堂, 骆品亮. 互联网对中国全要素生产率有促进作用吗[J]. 管理世界, 2016, 277(10): 34-49.
- [11] 谢莉娟, 陈锦然, 王诗桐. ICT 投资、互联网普及和全要素生产率[J]. 统计研究, 2020, 37(9): 56-67.
- [12] Popp D. Entice-br: The effects of backstop technology R&D on climate policy models[J]. Energy Economics, 2006, 28(2): 188-222.
- [13] Richels R G, Blanford G J. The value of technological advance in decarbonizing the U.S. economy[J]. Energy Economics, 2008, 30(6): 2930-2946.
- [14] 王兵, 杜敏哲. 低碳技术下边际减排成本与工业经济的双赢[J]. 南方经济, 2015, 305(2): 17-36.
- [15] 周丽, 陈文颖. 建筑部门典型节能减排技术的成本效益分析[J]. 生态经济, 2015, 31(8): 84-87.
- [16] Lewis N S. Research opportunities to advance solar energy utilization[J]. Science, 2016, 351(6271): aad1920.
- [17] Bauman Y, Lee M, Seeley K. Does technological innovation really reduce marginal abatement costs? Some theory, algebraic evidence, and policy implications[J]. Environmental and Resource Economics, 2008, 40: 507-527.
- [18] Baker E, Clarke L, Shittu E. Technical change and the marginal cost of abatement[J]. Energy Economics, 2008, 30(6): 2799-2816.
- [19] 茹雪, 雷鹏飞, 刘培. 二氧化碳动态边际减排成本及其影响机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(11): 43-57.
- [20] 邵帅, 尹俊雅, 范美婷, 等. 僵尸企业与低碳转型发展: 基于碳排放绩效的视角[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(10): 89-108.
- [21] 张宁. 碳全要素生产率、低碳技术创新和节能减排效率追赶——来自中国火力发电企业的证据[J]. 经济研究, 2022, 57(2): 158-174.
- [22] 渠慎宁, 史丹, 杨丹辉. 中国数字经济碳排放: 总量测算与趋势展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2022(9): 11-21.
- [23] 王山, 余东华. 数字经济的降碳效应与作用路径研究——基于中国制造业碳排放效率的经验考察[J]. 科学学研究, 2024, 42(2): 310-321.
- [24] 时大红, 蒋伏心. 我国企业数字化转型如何促进居民消费升级[J]. 产业经济研究, 2022, 119(4): 87-100.
- [25] 卢东, 刘懿德, Ivan K, 等. 分享经济下的协同消费: 占有还是使用?[J]. 外国经济与管理, 2018, 40(8): 125-140.
- [26] 胡珺, 方祺, 龙文滨. 碳排放规制、企业减排激励与全要素生产率——基于中国碳排放权交易机制的自然实验[J]. 经济研究, 2023, 58(4): 77-94.
- [27] 张庆宇, 张雨龙, 潘斌斌. 改革开放 40 年中国经济增长与碳排放影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(10): 9-13.
- [28] 巴曙松, 吴大义. 能源消费、二氧化碳排放与经济增长——基于二氧化碳减排成本视角的实证分析[J]. 经济与管理研究, 2010, 211(6): 5-11.
- [29] 吴施美, 郑新业, 安子栋. 气候治理与短期经济波动: 气候变化奥肯定律[J]. 经济学动态, 2022, 734(4): 49-66.
- [30] 周鹏, 周迅, 周德群. 二氧化碳减排成本研究述评[J]. 管理评论, 2014, 26(11): 20-27.
- [31] 王勇, 李雅楠, 俞海. 环境规制影响加总生产率的机制和效应分析[J]. 世界经济, 2019(2): 97-121.
- [32] Minihan E S, Wu Z. Economic structure and strategies

- for greenhouse gas mitigation[J]. *Energy Economics*, 2012, 34(1): 350–357.
- [33] 林美顺. 中国城市化阶段的碳减排:经济成本与减排策略[J]. *数量经济技术经济研究*, 2016, 33(3): 59–77.
- [34] 余群芝, 吴柳. 数字经济发展的碳减排效应[J]. *经济经纬*, 2022, 39(5): 14–24.
- [35] 王芳, 董战峰. 数字经济对我国碳排放的影响——基于省级面板数据的实证检验[J]. *改革*, 2023, 349(3): 76–90.
- [36] Färe R, Grifell-Tatjé E, Grosskopf S, et al. Biased technical change and the malmquist productivity index[J]. *Scandinavian Journal of Economics*, 1997, 99(1): 119–127.
- [37] 张伟, 朱启贵, 李汉文. 能源使用、碳排放与我国全要素碳减排效率[J]. *经济研究*, 2013, 48(10): 138–150.
- [38] 何小钢, 王善骞. 信息技术生产率悖论:理论演进与跨越路径[J]. *经济学家*, 2020, 259(7): 42–52.
- [39] 杜传忠, 郭美晨. 信息技术生产率悖论评析[J]. *经济学动态*, 2016, 662(4): 140–148.
- [40] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. *管理世界*, 2022, 38(2): 46–69.
- [41] 韩宝国, 朱平芳. 宽带对中国经济增长影响的实证分析[J]. *统计研究*, 2014, 31(10): 49–54.
- [42] 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.
- [43] Li F, Nucciarelli A, Roden S, et al. How smart cities transform operations models: A new research agenda for operations management in the digital economy[J]. *Production Planning & Control*, 2016, 27(6): 514–528.
- [44] 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.
- [45] 孙国锋, 潘珊珊, 徐瑾. 制造业投入数字化对绿色技术创新的影响——基于静态和动态的空间杜宾模型研究[J]. *中国软科学*, 2022, 382(10): 30–40.
- [46] 张永坤, 李小波, 邢铭强. 企业数字化转型与审计定价[J]. *审计研究*, 2021, 221(3): 62–71.
- [47] 邓荣荣, 张翔祥. 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, 389(2): 18–37.
- [48] 陈诗一. 工业二氧化碳的影子价格:参数化和非参数化方法[J]. *世界经济*, 2010, 33(8): 93–111.
- [49] Zhang N, Kong F, Kung C C. On modeling environmental production characteristics: A slacks-based measure for China's Poyang Lake ecological economics zone[J]. *Computational Economics*, 2015, 46(3): 389–404.
- [50] 丁一兵, 付林. 中美大型企业社会责任对其企业效率的影响机制研究——基于DEA-Tobit两步法的分析[J]. *产业经济研究*, 2015, 79(6): 21–31.
- [51] Ball R T, Gallo L, Ghysels E. Tilting the evidence: The role of firm-level earnings attributes in the relation between aggregated earnings and gross domestic product[J]. *Review of Accounting Studies*, 2019, 24: 570–592.
- [52] 李治国, 王杰, 王叶薇. 经济集聚扩大绿色经济效率差距了吗——来自黄河流域城市群的经验证据[J]. *产业经济研究*, 2022, 116(1): 29–42.
- [53] 赵开心, 孟煜杰. 中国城市数字经济与绿色技术创新耦合协调测度与评价[J]. *中国软科学*, 2022, 381(9): 97–107.

Digitalization, carbon reduction costs and high-quality urban development with low-carbon

SHEN Hongliang, SONG Simeng*, LI Jie

School of Economics, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China

Abstract The emerging digital economy can achieve low-carbon development at a lower cost, and it is an important engine for integrating carbon neutrality and economic development goals. This paper uses the matching data of the listed companies and the prefecture-level cities from 2011 to 2020 to discuss the mechanism and the effect of digitalization on the cost of carbon emission reduction and the changes brought about by urban low-carbon total factor productivity. The results show that the impact of digitalization on urban low-carbon total factor productivity through carbon emission reduction costs shows the characteristics of "first suppression, then promotion". The mechanism study found that the impact of digitalization on carbon emission reduction costs was nonlinear due to the combined effects of energy demand structure, factor technology efficiency and green technology innovation: in the early stage of digitalization, the surge in energy demand and the decline in factor technology efficiency offset the positive effects of green technology innovation, and the carbon emission reduction cost increased. In the middle and late stages of digitalization, with the optimization of energy demand structure and the improvement of factor technology efficiency, the cost of carbon emission reduction decreases. The heterogeneity analysis shows that compared with state-owned and high-energy-consuming enterprises, the digital transformation of non-state-owned enterprises and low-energy-consuming enterprises reduces the cost of carbon emission reduction earlier and improves the low-carbon total factor productivity of cities. Cities with low resource dependence, developed economy, large scale, and high coupling and coordination between digitalization and green technology innovation have a stronger inhibitory effect on the cost of carbon emission reduction, and the low-carbon total factor productivity of cities has been greatly improved.

Keywords digitization; carbon reduction costs; urban low-carbon ●



(责任编辑 卫夏雯)