

数字化对制造业企业碳排放强度的影响研究:理论建模与机制检验

胡雨朦¹, 郭朝先^{1,2}

(1. 中国社会科学院大学 应用经济学院, 北京 102488;

2. 中国社会科学院 工业经济研究所, 北京 100006)

摘要:“双碳”目标背景下,数字化与绿色化协调发展已成为我国经济高质量发展的重要抓手。首先,基于内生增长理论框架,拓展了夏皮罗(Shapiro, 2018)提出的企业污染减排模型,区分了数字化影响制造业企业碳减排强度的技术进步效应和绿色创新效应,并提出相应的理论假设。其次,以2011—2019年沪深A股制造业上市公司数据为基准数据,实证检验了数字化对制造业企业碳排放强度的影响,证实了数字化生产率提升和绿色创新两条机制的存在性。再次,异质性研究发现,区域层面东、中部地区数字化抑制了企业碳排放强度的提升,但在西部地区该抑制作用并不明显;行业层面数字化对于技术和资本密集型制造业减排的影响更深;进一步,绿色创新机制在东部地区、技术和资本密集型制造业企业群都显著存在,但生产率提升机制在分组回归中并未表现出来。研究结论为精准评估数字化的减排效应、统筹制定差异化的数字赋能制造业绿色低碳转型政策提供经验证据。

关键词: 数字化; 制造业; 企业碳排放强度; 理论建模; 机制检验

中图分类号: F426

文献标志码: A

文章编号: 1671-0398(2023)05-0153-16

一、问题提出

面对全球气候变化问题的严峻形势和国际环境治理的多重压力,中国作为世界最大的发展中国家和温室气体排放大国,主动作为,承担环境责任,提出努力争取在2030年实现碳达峰与2060年前实现碳中和的“双碳”目标。“双碳”目标的提出,彰显了中国应对气候变化、走低碳发展道路和构建人与自然命运共同体的坚定决心,也为我国推行产业结构调整和绿色转型指明了方向。党的二十大报告中再次强调“大自然是人类赖以生存发展的基本条件”,要“站在人与自然和谐共生的高度谋划发展”^[1]。生态文明理念已逐渐深入人心,生态文明建设已成为全社会共识,中国政府和各个行业都已经将生态环境保护和绿色转型放在重要位置,坚持走生态优先、绿色发

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 中国社会科学院登峰战略重点学科(产业经济学)项目;中国石油勘探开发研究院委托课题“企业数字化转型发展演化及趋势研究”

作者简介: 胡雨朦(1995—),女,中国社会科学院大学应用经济学院博士研究生;

郭朝先(1971—),男,中国社会科学院大学教授,博士生导师;中国社会科学院工业经济研究所产业组织研究室主任,研究员。

展之路,努力确保“双碳”目标顺利实现^[2]。

作为碳排放量最大的行业和实现“双碳”目标的重点领域,我国制造业产业规模巨大,截至2022年,我国制造业增加值占GDP比重高达27.7%,是我国国民经济最重要的组成部分,已连续13年居世界首位^[3],与此同时,我国制造业“大而不强”的问题依然突出,至今尚未彻底摆脱以“高投入、高消耗、高排放”为特征的粗放式发展模式,产生了巨大的能源消耗和碳排放,资源匮乏、环境污染和生态破坏是当前制约我国制造业高质量发展的瓶颈,亟需进行绿色低碳转型。2016年,工业和信息化部印发《工业绿色发展规划(2016—2020)》,首先提出要加快构建科技含量高、资源消耗低、环境污染少的绿色制造体系^[4]。2020年,《工业领域碳达峰实施方案》再次强调,要以重点行业达峰为突破,着力构建绿色制造体系,推动数字化智能化绿色化融合,加快制造业绿色低碳转型和高质量发展^[5]。因此,寻找制造业低碳转型的主要抓手,探索出兼顾制造业产业发展的减排路径,进而合理制定和有效实施有针对性的行业减排政策,对我国实现制造业和全国整体碳达峰、践行应对气候变化的大国责任具有重要意义^[6]。

与此同时,随着工业互联网、大数据、云计算、人工智能、区块链等数字技术的广泛应用,数字化正在驱动企业的生产方式发生深刻变革。已有研究提出,数字化在重塑产业链价值链、为经济发展注入新动能的同时,也产生了复杂的环境效应,影响了能源消耗和碳排放,但对于是“降碳”还是“增排”,学者研究并未得出一致结论。有文献认为,信息通信技术(ICT)和数字技术发展推动数字化推进是环境改善的福音^[7-10]。全球电信行业协会(Global e-Sustainability Initiative, 2015)在报告中预测到2030年全球ICT的减排潜力为10 Gt CO₂e^[11],其中ICT直接减排1.25 Gt CO₂e,通过跨行业应用可在其他行业间接促进减排9.2 CO₂e。有研究则指出数字化在环境方面存在“双刃剑”效应,数字设备及配套设施对于电力需求较高,可以说整个生命周期内都在持续释放二氧化碳,企业数字化转型过程本身就存在“碳锁定效应(Carbon Lock-in)”,同时数字化带来的能源效率提升引致的“能源回弹效应”也会刺激企业总能耗的增加,最终结果表现为不仅没有“降碳”反而“增排”了^[12-14]。

近年来,在尝试对数字化水平进行测度的基础上,国内文献开始基于计量模型探讨数字化的环境效应。最常见的思路是基于区域层面的时间序列数据或面板数据,构建地区数字化水平或数字经济发展水平指标,将其作为解释变量引入回归模型,考察数字化对地区碳排放的影响。大多数实证研究结论肯定了数字化对于碳排放的负向影响,认为数字化显著促进了地区碳排放水平的降低^[15-16],还有研究提出两者之间存在带门槛的非线性关系^[17-18]。这些研究的考察视角较为单一,往往欠缺行业、企业层面数据的讨论,对制造业部门仅有的研究也从数字金融视角或基于地区层面数据展开^[19-20]。此外,学者还对数字化影响碳减排的作用机制进行了初步探讨,其中,绿色创新、生产率提升和产业结构转型^[21-22]等机制路径被提及得更多。但学者对机制的探讨大多基于单一路径层面,并未将两条甚至多条机制置于可比较的宏观分析框架之中,对于机制细节的讨论更甚少涉及。实际上,很多机制相互之间存在密切的联系,就生产率提升机制和绿色创新机制来说,前者表示给定投入的产出增加,数字化最直接的效果即“机器替人”,企业获得既定的产出量需要投入更少的劳动力,企业的有限资源可被释放至其他环节,如减排中,从而促进企业碳排放强度的降低,但同时更多的产出可能会带来更多的碳排放,即“增排”效应,可能会削弱数字化替代原本的减排效应;后者是指企业将数字化工具应用到企业绿色创新研发中,无论是技术复杂、创新性强、对行业影响较大的绿色发明创新还是技术难度较小、创新性相对较弱、产业影响较小的绿色实用新型创新,绿色创新的加强与低碳技术的进步无疑会促进减排效率的提升,使得单位产出的碳排放量减少,意味着在一定程度上缓解了生产率提升机制所带来的“增排”效应,从另一层面来说,即绿色创新机制加强了生产率提升机制。

当前,就制造业部门而言,探讨数字化环境影响的文献相对匮乏。同时,数字化作用于碳减排的机制路径尚有待明晰。基于此,本文尝试丰富数字化、碳减排与制造业绿色低碳转型的关系研

究,并在3个方面作出边际贡献:(1)研究视角上,本文聚焦企业碳减排,使用上市公司微观数据验证数字化对制造业企业碳排放强度的影响,与既有文献在宏观层面的研究形成有益补充。(2)研究方法上,考虑到数字化影响生产率和减排效率的可能差异,本文基于罗默(Romer,1986)^[23]提出的内生增长理论框架,拓展了夏皮罗等(Shapiro,2018)^[24]提出的企业污染减排模型,引入数字化、劳动生产率和减排效率之间的相互关系,提出“技术进步效应”和“绿色创新效应”两条数字化影响企业碳排放强度的机制,对两条机制的相关关系进行数理推演,并在实证研究中对生产率提升和绿色创新进行路径分析。(3)研究内容上,本文进一步引入企业微观特征和宏观产业环境因素,并进行了丰富的异质性分析,从区域及行业层面分别探讨数字化减排效应的不同影响,为差异化制定数字减排政策提供依据参考。

二、数字化影响制造业企业碳排放强度的理论建模

为从理论视角剖析数字化对制造业低碳转型的影响,本文基于内生增长分析框架拓展了夏皮罗等(Shapiro,2018)^[24]的企业污染减排模型,将减排产出纳入企业生产函数,构建了一个包含企业进入、生产、消费和减排的模型,引入数字化、劳动生产率和减排效率之间的相互作用,通过数理推导出数字化影响企业碳排放强度可能存在的双重效应:技术进步效应和绿色创新效应。

(一) 消费者行为

假定消费者之间不存在异质性,代表性消费者能够消费各类产品。消费者的效用函数为CES函数形式,具体表达式如下:

$$U_s = \left[\sum_{\omega \in \Omega} \int_0^1 q_s(\omega)^{\frac{\sigma_s-1}{\sigma_s}} d\omega \right]^{\frac{\sigma_s}{\sigma_s-1}} \quad (1)$$

式(1)中, ω 表示 s 行业的商品种类,行业内所有商品的合集为 Ω ,式(1)描述了 s 行业所有商品的总效用, $q_s(\omega)$ 表示行业 s 产品 ω 的需求量, σ_s 表示行业 s 不同产品间的替代弹性, $\sigma_s > 1$ 。

设定代表性消费者在 s 行业的固定支出为 E_s ,消费者的预算约束为:

$$p_s(\omega)q_s(\omega) = E_s \quad (2)$$

求解给定预算约束下求解代表性消费者的效用最大化问题,可得消费者效用最大化时对商品 ω 的需求函数为:

$$q_s(\omega) = \frac{(p(\omega))^{-\sigma_s}}{(P_s)^{1-\sigma_s}} E_s \quad (3)$$

此时, s 行业的价格指数 P_s 为:

$$P_s = \left[\sum_{\omega \in \Omega} \int_0^1 p_s(\omega)^{1-\sigma_s} d\omega \right]^{\frac{1}{1-\sigma_s}} \quad (4)$$

(二) 生产者行为

设定每个行业都有且仅劳动力一种无弹性供给的生产要素,且该生产要素有2种用途:一部分用于企业生产产品,另一部分则用于减少排放。设定用于企业生产产品的部分占比为 $(1-a)$,用于减排的部分为 a 。本文设定企业的单要素生产函数形式如下:

$$q_s = (1-a)\varphi l \quad (5)$$

式(5)中, φ 表示生产率。需要明确的是,尽管模型设定企业一定要进行减排,但企业减排被视为一种内生性的选择,企业减排对企业生产率存在依赖, a 是 φ 的函数,从另一个层面来解释即生产要素分配与企业生产率变化有关。考虑到大量已有研究表明企业数字化转型能够影响企业的全要素生产率^[25-28],本文在模型设定中引入企业数字化的概念, λ 表示企业数字化转型程度, λ 的数值越高,表示数字化转型程度越深,设定企业生产率 φ 是数字化程度 λ 的函数。由此,式(5)可被

重新表示为:

$$q_s = (1 - a(\varphi(\lambda)))\varphi(\lambda)l \quad (6)$$

本文使用污染生产技术模型^[29]改写得到碳排放函数表达式,即企业使用以下技术产生碳排放:

$$c_s = \left(\frac{1-a}{\theta}\right)^{1/\alpha_s} \varphi l \quad (7)$$

与原模型相比,本文主要做了3点更新与改进:(1)在模型中纳入了生产率 φ 的作用;(2)设定不同行业部门的污染弹性 α_s 存在差异,实际上可以将 α_s 理解为一个行业的“肮脏”程度,它的大小取决于每个行业的原始属性,一定程度上可以反映该行业的生产技术、投入要素、初始禀赋等特征;(3)引入参数 θ , θ 表示企业其他层面冲击对于碳排放的“扭曲”程度,在模型中可以用来反映企业进行绿色创新对于企业碳排放的负向作用。同样,有大量文献证实了数字化能够激励企业进行绿色创新^[30-32]。因此,本文假定 θ 也是数字化程度 λ 的函数。

联立式(5)和式(7),我们可以将企业产出写成碳排放和生产要素的柯布-道格拉斯函数形式,如式(8)所示:

$$q_s = \theta c_s^{\alpha_s} (\varphi l)^{1-\alpha_s} = \theta \varphi^{1-\alpha_s} c_s^{\alpha_s} l^{1-\alpha_s} \quad (8)$$

式(8)中,碳排放 c_s 可视为企业生产过程中的另一个生产要素, α_s 衡量了碳排放的产出弹性。 $\theta \varphi^{1-\alpha_s}$ 表示企业的绿色全要素生产率(包括劳动生产率代表的技术进步和企业额外的绿色创新)。

根据前述设定,可以求出企业的利润函数如下:

$$\pi_s = p_s q_s - w l \tau - f_s - t_s c_s \tau \quad (9)$$

式(9)中, w 表示企业对单位劳动力要素需要支付的工资, τ 表示 s 行业市场中国企业进行交易的成本, f_s 表示企业进入 s 行业需要支付的沉没成本, t_s 表示 s 行业企业单位碳排放需要支付的环境税,继而求解企业利润最大化的一阶条件,可得式(10):

$$\frac{1-a}{\theta} = \left(\frac{w}{\varphi t} \frac{\alpha_s}{1-\alpha_s}\right)^{\alpha_s} \quad (10)$$

(三) 模型求解与假设讨论

接下来,本文定义企业碳排放强度的概念,即企业单位产出的碳排放量,其表达形式如式(11):

$$ci_s = c_s/q_s = (1-a)^{\frac{1}{\alpha_s}-1} \theta^{-\frac{1}{\alpha_s}} \quad (11)$$

为进一步分解数字化对企业碳排放强度的影响,将企业碳排放强度 ci_s 对数字化程度 λ 进行求导:

$$\frac{\partial ci_s}{\partial \lambda} = \theta^{-\frac{1}{\alpha_s}} \left(\frac{1}{\alpha_s} - 1\right) (1-a)^{\frac{1-2\alpha_s}{\alpha_s}} (-1) \frac{\partial a}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} + (1-a)^{\frac{1}{\alpha_s}-1} \left(-\frac{1}{\alpha_s}\right) \frac{\partial \theta}{\partial \lambda} \quad (12)$$

由式(12)可知, $\partial ci/\partial \lambda$ 的正负与 $\partial a/\partial \varphi$ 、 $\partial \varphi/\partial \lambda$ 、 $\partial \theta/\partial \lambda$ 三项紧密相关,那么就涉及以下3种情形:(1) $\partial a/\partial \varphi \times \partial \varphi/\partial \lambda > 0$ 、 $\partial \theta/\partial \lambda > 0$,数字化的技术进步效应和绿色创新效应同时存在,根据式(12),显然此时 $\partial ci/\partial \lambda < 0$,数字化促进了碳排放强度的降低;(2) $\partial a/\partial \varphi \times \partial \varphi/\partial \lambda > 0$ 、 $\partial \theta/\partial \lambda \leq 0$,数字化的技术进步效应存在且正向,即数字化通过促进企业生产效率的提升抑制了企业碳排放强度的增加,但未对企业绿色创新产生明显刺激,甚至反向抑制了企业绿色创新,此时需比较这两种效应的大小,如果数字化的技术进步效应大于对绿色创新的抑制效应,根据式(11)仍能得到 $\partial ci/\partial \lambda < 0$,数字化促进了碳排放强度的降低,反之则结论相反;(3) $\partial a/\partial \varphi \times \partial \varphi/\partial \lambda \leq 0$ 、 $\partial \theta/\partial \lambda > 0$,数字化的绿色创新效应存在且正向,即数字化通过促进企业进行绿色创新,促进了碳排放强度的降低,但数字化的技术进步效应反而带来了碳排放强度的提升,同样需比较这两种效应的大小,如果数字化的绿色创新效应大于技术进步效应,那么同理仍能得到 $\partial ci/\partial \lambda < 0$,即数字化促进了企业碳排放强度的下降,反之亦然。

根据前人文献研究成果与经验事实依据,本研究认为第一种情形更符合逻辑,但在不同区域、行业层面可能会产生第二种、第三种异质性情形。因此,本文提出如下3条理论假设:

H_1 :数字化显著抑制了制造业企业碳排放强度的提升。

$H_{2.a}$:数字化对制造业企业碳排放强度的影响可通过技术进步效应(企业生产率提升机制)实现。

$H_{2.b}$:数字化对制造业企业碳排放强度的影响可通过绿色创新效应(企业绿色创新机制)实现。

H_3 :数字化对制造业企业碳排放强度的影响效果和作用机制存在区域和行业层面的异质性。

三、数字化影响制造业企业碳排放强度的实证检验

(一) 实证模型设定

根据理论分析,本文设定基准回归模型:

$$\ln ci_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln di_{it} + \beta_2 X_{it} + \mu_i + \vartheta_t + \varepsilon_{it} \quad (13)$$

式(13)中, i 和 t 分别表示企业和年份; $\ln ci$ 表示企业碳排放强度; $\ln di$ 表示企业数字化程度; X 为本文选取的一系列企业层面的控制变量; μ_i 和 ϑ_t 分别表示模型控制了个体固定效应和时间固定效应, ε_{it} 为随机误差项。其中, β_1 是本文重点关注的核心结果,如果 β_1 显著小于零,那么 H_1 将得到验证,意味着数字化能够显著抑制制造业企业碳排放强度的提升。此外,为有效进行稳健性检验和异质性分析,设定以下回归模型:

$$\ln ci_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln di_{it} + \alpha_2 X_{it} + \eta_p + \delta_t + \vartheta_t + \varepsilon_{it} \quad (14)$$

式(14)与式(13)的区别是控制了宏观因素和行业因素对企业碳减排的影响,在模型设定中剔除了个体固定效应 μ_i ,加入了城市固定效应 η_p 、行业固定效应 δ_t 。

(二) 变量选取与数据处理

1. 解释变量:企业数字化水平($\ln di$)

随着文本大数据在经济金融领域的广泛应用,近期文献研究开始尝试使用文本分析方法刻画企业数字化程度,与其他方法相比,文本分析法能够综合性地反映微观企业的数字化转型程度,参考价值较高。因此,本文借鉴吴非等^[33]、赵宸宇等^[25]的研究,使用上市公司年报中“管理层讨论与分析(MD&A)”章节中数字化关键词总词频数的对数,来衡量企业数字化程度。

$$\ln di = \ln(1 + \text{企业数字化关键词词频数}) \quad (15)$$

如式(15)所示,该指标数值越大,表示企业数字化程度越高。

2. 被解释变量:企业碳排放强度($\ln ci$)

本文评估企业碳排放水平时,发现在年报中自愿披露碳排放数据的企业较少,受限于企业微观数据的可获得性,本文借鉴沈洪涛等^[34]的研究方法,通过营业成本占比来使用行业碳排放量估算企业碳排放量。其中,行业碳排放量取自中国碳排放核算数据库(Carbon Emission Accounts & Datasets,简称CEADs),计算公式如下:

$$ci = \left(\frac{\text{企业营业成本}}{\text{行业主营业务成本}} \times \text{行业碳排放量} \right) / \text{企业营业收入} \quad (16)$$

式(16)中,行业主营业务成本数据取自《中国工业统计年鉴》。为减少数据的波动性,本文对碳排放强度作取自然对数处理,即 $\ln ci = \ln(1 + ci)$ 。

3. 机制变量

一是对技术进步效应的机制检验,涉及生产率代理变量的选取。参考任胜钢等^[35]、赵宸宇等^[25]的研究,使用LP方法计算上市公司的全要素生产率。本文使用企业全要素生产率($\ln tfp$)作为衡量企业技术进步水平的代理变量。

二是对绿色创新效应的机制检验,涉及减排效率即绿色创新水平代理变量的选择。参考王馨等的^[36]研究,使用企业绿色专利数据来定量评价企业绿色创新水平。首先,从中国研究数据服务平台(CNRDS)获取上市公司发明专利和实用新型专利的专利分类号信息,再将其与世界知识产权

组织(WIPO)发布的“国际专利分类绿色清单”进行匹配,根据关联结果,将上市公司专利划分为绿色专利(绿色发明专利和绿色实用新型专利)和非绿色专利(非绿色发明专利和非绿色实用新型专利)两类。本文使用企业绿色专利申请数量对数值($\ln green$)作为企业绿色创新水平的代理变量。

4. 控制变量

为进一步提升研究精度,基于前人文献研究成果,本文根据制造业上市公司特点选取了一系列控制变量,包括:(1)企业规模($\ln size$),以企业当年营业收入总额的对数值表示;(2)企业年龄(age),企业成立时长对数;(3)盈利能力(roe),企业当年净资产收益率;(4)偿债能力(lev),企业资产负债率,代表企业财务杠杆水平的高低;(5)股权集中度($top1$),选取上市公司第一大股东持股比例来衡量;(6)股权稳定性($top1_minus_2$),用第二大股东与第一大股东持股比例之差表示,一般来说,该差值越小,第二大股东取代第一大股东的可能性越高,认为上市公司的股权结构越不稳定;(7)研发投入(rdr),选取企业研发投入占营业收入的比例表示。本文涉及的所有变量详见表 1。

表 1 数字化对制造业企业碳排放强度影响研究变量代码与含义

变量类型	变量名称	变量代码	变量含义
解释变量	企业数字化水平	$\ln di$	企业年报数字化词频对数
被解释变量	企业碳排放强度	$\ln coi$	单位营业收入碳排放
控制变量	企业规模	$\ln sale$	企业当年营业收入总额对数
	企业年龄	$\ln age$	企业成立时长对数
	盈利能力	roe	总资产收益率
	偿债能力	lev	资产负债率
	股权集中度	$top1$	第一大股东持股比例
	股权稳定性	$top1_minus_2$	第二大股东与第一大股东持股比例之差
	研发投入	rdr	研发投入占营业收入比例
中介变量	绿色创新	$\ln green$	绿色专利申请量对数
	生产率	tfp	企业全要素生产率(LP 方法测算)

资料来源:作者整理。

5. 数据来源与处理

考虑到工业行业上市公司样本数量相对较多,上市时间较长,相关年报中可获得数据较为丰富和完整,本文选取 2011—2019 年沪深 A 股制造业上市公司^①作为研究对象,并进行了如下步骤的数据处理:(1)剔除 ST、ST* 和 PT 的企业样本;(2)为保证各变量数据的一致性,使用上市公司年度合并报表公布的财务指标数据,同时剔除财务指标存在明显不合理的企业样本;(3)考虑西藏地区数据的可获得性,剔除办公地址在西藏的企业样本;(4)为减少异常值对回归结果造成的影响,对所有企业层面连续变量都进行 1% 和 99% 的缩尾处理。最终,本文研究对象确定为包含 28 个行业,1 825 个企业,共 11 441 个“企业—年份”的观测样本。本文所使用企业层面的原始数据主要来源于 CSMAR 数据库,涉及企业年报数据从深交所和上交所官方网站下载处理后得到,行业、地区层面数据来源于《中国工业统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国区域统计年鉴》。本文主要变量的描述性统计详见表 2。

^① 本文按照中国证券监督管理委员会 2012 年公布的《上市公司行业分类指引》对行业进行编码,使用两位代码进行行业分类。

表2 数字化对制造业企业碳排放强度影响研究变量的描述性统计

变量	观测数	均值	标准差	最小值	最大值
企业数字化水平	11 441	1.729	1.166	0	5.753
企业碳排放强度	11 441	1.738	1.373	0.001	6.044
企业规模	11 441	21.616	1.312	18.542	25.144
企业年龄	11 324	2.057	0.894	0	3.219
盈利能力	11 413	0.061	0.124	-0.703	0.322
偿债能力	11 441	0.41	0.194	0.052	0.876
股权集中度	11 441	35.254	14.529	9.19	75.1
股权稳定性	11 440	25.237	17.357	0.03	73.01
研发投入	11 140	3.878	4.75	0	251.22
绿色创新	11 366	0.357	0.809	0	6.441
生产率	10 270	8.393	0.946	5.09	11.61

资料来源:作者整理。

(三) 基准回归与稳健性检验

表3报告了根据式(13)拟合的数字化对制造业企业碳排放强度影响的基准回归结果。列(1)为只加入核心解释变量的回归结果,可以发现数字化对制造业企业碳排放强度的影响显著为负,意味着企业数字化促进了制造业企业碳排放强度的降低。列(2)为加入一系列企业层面控制变量之后的回归结果,企业数字化变量前的系数仍显著为负,进一步验证了 H_1 ,同时控制变量的表现整体符合预期,除了由于规模效应的存在导致企业规模变量前的影响系数不显著,其余控制变量前的系数均显著。初创期、财务杠杆较低、收益率较高、股权集中度较高、拥有较为稳定的股权结构、研发投入较高的上市公司碳减排的表现较好。分析来看:企业年龄方面,初创企业往往更加注重企业可持续发展和企业核心竞争力提升,且我国证监会近年来进行首次公开募股(IPO)审核时对环保要求愈发严格,本文研究样本中包含的很多上市公司本身即属于环保产业,表现在回归结果中就是企业成立时间越短碳排放强度越低。财务指标方面,当制造业企业的偿债能力和盈利能力都比较强,意味着主营业务发展良好、发展前景较为明晰,此时不必花费大量的精力放在业务发展上,会更加注重企业生命力和绿色低碳转型,将一部分生产要素投入到碳减排之中,必然会取得较好的减排效果。股权结构方面,当上市公司的股权集中度较高且较为稳定时,公司政策和战略的制定与执行会更有效率,一定程度上减少公司面临的外部干扰和短期波动压力,为企业进行碳减排创造良好的内外部环境。研发投入方面,“双碳”目标背景下,企业加大研发投入已经是企业履行环境责任的重要手段,反映到回归结果上即研发投入占比较高的企业碳排放强度较低。

本文主要进行了如下稳健性检验:一是替换被解释变量。考虑到上市公司碳排放强度变化具有一定的滞后性特征,为验证数字化对制造业企业碳排放强度影响的中长期变化,替换被解释变量为滞后一期的碳排放强度指标重新回归。结果如列(3)所示,发现企业数字化程度指标前的系数仍然显著为负,尽管显著性有所降低,但结果并未发生实质性改变。二是改变模型设定。本文依据式(14)在同时控制城市固定效应、行业固定效应和时间固定效应的情况下,重新进行拟合估计,列(4)结果显示,数字化在1%的置信水平上显著抑制了制造业企业碳排放强度的提高。三是内生性检验。本文在实证研究过程中存在一个不可避免的关键问题,即由于解释变量与被解释变量之间的反向因果关系而产生的内生性问题,一方面,数字化促进了制造业企业碳排放强度的降低,另一方面,企业绿色低碳转型也会推动企业数字化进程,即企业绿色低碳转型可能是企业数字化的原因,而不是结果。工具变量法是克服内生性的重要方法,本文尝试通过选取恰当的工具变量缓解实

表 3 数字化影响制造业企业碳排放强度的基准回归和稳健性检验

变量	(1) 企业碳排放 强度	(2) 企业碳排放 强度	(3) 企业碳排放强度 (滞后一期)	(4) 企业碳排放 强度	(5) 企业碳排放 强度
企业数字化水平	-0.015 8*** (0.005 5)	-0.011 1** (0.005 2)	-0.010 0* (0.005 7)	-0.009 4*** (0.002 7)	-1.621 7*** (0.399 0)
企业规模		-0.015 1 (0.015 1)	-0.017 2 (0.015 7)	0.012 1*** (0.002 5)	0.254 9*** (0.097 8)
企业年龄		0.083 4* (0.047 6)	0.078 7 (0.050 6)	0.174 2*** (0.015 7)	-0.167 4 (0.240 7)
偿债能力		-0.222 2*** (0.076 8)	-0.300 6*** (0.105 0)	0.007 0 (0.006 4)	-0.723 1** (0.336 1)
盈利能力		-0.189 5*** (0.042 1)	-0.049 4 (0.044 3)	-0.309 7*** (0.023 5)	0.109 2 (0.161 1)
股权集中度		-0.009 7*** (0.001 8)	-0.007 6*** (0.002 0)	-0.001 9*** (0.000 4)	-0.018 1** (0.008 6)
股权稳定性		0.005 1*** (0.001 5)	0.003 4** (0.001 6)	0.001 4*** (0.000 3)	0.012 5* (0.006 5)
研发投入		-0.001 9** (0.000 9)	-0.004 2*** (0.001 3)	-0.003 4*** (0.001 2)	0.001 2 (0.003 0)
个体固定效应	是	是	是	否	是
行业固定效应	否	否	否	是	否
城市固定效应	否	否	否	是	否
时间固定效应	是	是	是	是	是
样本量	11 385	11 385	11 385	11 385	11 357
拟合优度	0.955 7	0.955 7	0.955 8	0.955 9	0.956 6
Kleibergen-Paap rk LM 统计量					26.704
Cragg-Donald Wald F 统计量					67.783
Kleibergen-Paap rk Wald F 统计量					27.164
Hansen 检验(P 值)					0.000 0

注:***、**、*表示分别在1%、5%、10%的置信水平下通过显著性检验;括号内数值为稳健标准误。

证中可能存在的内生性问题,以确保实证结果的可靠性。本文以同年份同行业其他企业数字化转型水平的均值作为工具变量进行内生性检验。考虑企业数字化转型水平容易受到同行业其他企业的数字化水平的影响,但同行业其他企业的数字化水平很难通过其他渠道影响企业创新,该工具变量基本满足相关性和排他性要求。列(5)结果显示,本文工具变量的选取是有效的,数字化对制造业企业碳排放强度的提升产生了显著的抑制作用,结果具有稳健性。

(四) 机制路径检验

本文使用巴伦等(Baron, 1986)^[37]提出的中介效应模型,考察数字化影响制造业企业碳排放强

度的作用机制。基于前文假设,借鉴温忠麟等(2004)^[38]提出的逐步回归检验法,本文使用的中介效应模型“三步法”如下:

$$\begin{aligned} \text{Inci}_{it} &= \beta_0 + \beta_1 \text{Lndi}_{it} + \rho_2 X_{it} + \mu_i + \vartheta_t + \varepsilon_{it} \\ \text{Inter}_{it} &= \rho_0 + \rho_1 \text{Lndi}_{it} + \rho_2 X_{it} + \mu_i + \vartheta_t + \varepsilon_{it} \\ \text{Inci}_{it} &= \gamma_0 + \gamma_1 \text{Lndi}_{it} + \gamma_2 \text{Inter}_{it} + \gamma_3 X_{it} + \mu_i + \vartheta_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (17)$$

其中,Inter表示中介变量,其余变量含义与式(13)相同。检验结果详见表4。

表4 数字化影响制造业企业碳排放强度的机制检验

变量	(1) 绿色 创新	(2) 企业碳排 放强度	(3) 绿色创新— 单位研发	(4) 企业碳排 放强度	(5) 生产率	(6) 企业碳排放 强度
企业数字化水平	0.016 1** (0.007 3)	-0.010 8** (0.005 2)	0.023 8*** (0.008 7)	-0.010 3** (0.005 2)	0.023 6*** (0.004 9)	-0.013 6** (0.003)
绿色创新		-0.013 6** (0.006 0)				
绿色创新—单位研发				-0.030 6*** (0.005 6)		
生产率						-0.035 6* (0.020 4)
控制变量	是	是	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是
观测数	11 015	11 015	11 013	11 013	9 900	9 900
拟合优度	0.715 7	0.955 5	0.523 7	0.955 7	0.927 2	0.957 1

注:***、**、*表示分别在1%、5%、10%的置信水平下通过显著性检验;括号内数值为稳健标准误;为减少篇幅,此处控制变量的回归结果并未报告,备索。

表4列(1)估计结果表明,随着企业数字化程度加深,企业绿色创新水平显著提升。实际上,数字化促进企业绿色创新主要逻辑较为清晰:一方面,从成本投入视角看,一是运营成本,企业数字化降低了企业的生产经营成本,使得企业得以释放更多资源用于绿色技术研发创新;二是研发成本,大数据、人工智能、数字孪生等数字技术的应用为企业绿色创新提供了支持工具,使得企业进行绿色创新的难度和成本大大降低,企业得以更加高效地迭代开展绿色创新活动。另一方面,从终端产出视角看,数字化丰富了消费者对于绿色产品的体验,市场上消费者将接收到具有吸引力的绿色产品,刺激企业根据用户的消费需求来进行绿色创新,抢占产品市场。表4列(2)报告了绿色创新的中介效应检验结果,可以观察到,绿色专利申请量的估计系数显著为负,同时数字化的估计系数依然显著为负,表明数字化通过促进企业进行绿色创新抑制了企业碳排放强度的提升。同时,为了进一步验证绿色创新机制存在,本文还引入了企业单位研发投入的绿色专利申请量(Lngreen_rd)作为替代变量,来衡量企业绿色创新水平进行拟合回归,结果如表4列(3)~(4)所示。回归结果没有发生明显变化,仍然说明企业数字化的绿色创新效应显著促进了制造业企业实现碳减排,有力回应了假设H_{2.a}。

表4列(5)估计结果表明,企业数字化随之带来了企业生产率的提升。数字化使得数据要素

得以进入企业生产经营过程之中,数据要素本身具备非排他性和非竞争性的特征,任何企业都可以通过信息平台或其他方式手段获得数据要素,企业数据资源的利用不仅不会导致其原有量的减少,甚至还会在不断使用中更加丰富完善,真正实现要素的开放、包容和共享,同时,数据要素能够产生强大的正外部性,能够连接其他各类生产要素、促使制造业企业实现多要素协同运转,实现企业内外部资本、劳动力、技术等资源要素的深度融合,提高企业整体生产率水平。列(6)报告了生产效率的中介效应检验结果,可以看出,全要素生产率指标前的估计系数显著为负,同时数字化指标前的估计系数依然显著为负,意味着数字化通过提升企业全要素生产率带来了制造业企业碳排放强度的降低,至此,假设 $H_{2,b}$ 得到验证。

(五) 异质性分析

为分析数字化对制造业企业绿色低碳转型在区域、行业层面的不同影响,以及探讨 H_3 是否成立,本文对不同区域、行业企业样本进行分组回归。考虑到分组后组内企业样本数量较少、组间差异较小,此处可按照式(14),本文控制城市固定效应、行业固定效应和时间固定效应后回归结果如下。

1. 区域异质性

为考察数字化对处于不同地理区位的制造业企业碳排放强度的差异性影响,我们按照上市公司办公地将企业研究样本分为东部、中部和西部地区3组,分别依据式(14)对样本进行分组估计。结果如表5列(1)~(3)所示。可以看出,东部地区和中部地区样本回归中,企业数字化前的系数显著为负,而西部地区样本回归中,系数虽然为负但在统计上不显著,说明数字化对制造业企业碳减排的积极效应存在于东部和中部地区,在西部地区未发挥出实质性的改善效应。分析来看,东部地区是数字技术研发创新的重要集聚区,数字基础设施完善、数据要素资源丰富、数字技术成果转化率更高,且市场存在良性竞争,东部地区企业样本数庞大,约占总样本数的2/3,数字化对东部地区产业群低碳转型的驱动能力更强。而与东部地区相反,西部地区制造业企业数字化发展缓慢,难以为企业提供广阔的数字化应用空间,且可能迫于经济增速压力,吸收了一批从东中部地区转移而来的高污染、高耗能、高排放制造业产业,导致西部地区整体低碳转型难度增大,以及许多数据中心等排放密集型数字基础设施批量迁移至西部地区,更是加剧了减排压力,因此,在西部地区数字化暂未表现出明显的减排效应。

表5 数字化影响制造业企业碳排放强度的区域异质性检验

变量	(1)	(2)	(3)
	东部地区	中部地区	西部地区
企业数字化水平	-0.0147*** (0.0026)	-0.0182*** (0.0063)	-0.0133 (0.0082)
控制变量	是	是	是
固定效应	是	是	是
观测数	7782	1861	1469
拟合优度	0.9696	0.9760	0.9636

注:***、**、*表示分别在1%、5%、10%的置信水平下通过显著性检验;括号内数值为稳健标准误;为减少篇幅,此处控制变量的回归结果并未报告,备索,本文表6~10与此相同。

资料来源:作者计算整理。

本文进一步探讨数字化影响制造业企业碳排放强度的两条机制在区域层面的异质性表现,表6和表7为两条机制的具体识别情况。结果显示:(1)绿色创新效应在东部地区显著存在,但在中

西部地区还未表现出来,具体而言,数字化通过促进东部地区企业进行绿色创新抑制了东部地区企业碳排放强度的提升;数字化同样明显刺激了中部地区企业进行绿色创新,但这种刺激作用并未表现出明显的减排作用;现阶段数字化对西部地区企业绿色创新的促进作用不显著。(2)技术进步效应在中西部地区同样不显著,但东部地区企业生产率的提升,反而促进了其碳排放强度的增加。究其原因:(1)就绿色创新效应看,东部地区绿色创新基础较好,高校、科研机构聚集使得地区内部产学研合作活跃,同时资本市场发达、中小型研发企业投融资环境优良,企业绿色创新支撑有力。因此,数字化能够较好地发挥绿色创新效应,促使东地区制造业企业碳排放强度降低;相比之下,中西部地区整体绿色创新水平较低,虽然近年来政策设计在有意弥补不足,但仍然进展缓慢,数字化的绿色创新效应较难发挥。(2)就技术进步效应看,东部地区发展速度较快、市场竞争较强,数字化带来的企业生产率提升引致的产出效应大于减排效应,在局部地区表现出的技术进步促进了碳排放强度的提升。在中西部地区,数字化带来的生产率提升,总体表现出对碳排放强度的抑制作用,尽管这种抑制作用在现阶段并不显著。随着企业数字化转型程度的加深,企业发展到一定规模、生产率提升至较高程度时,受环境承载力和地区产能约束,企业生产率提升带来的产出效应将会减弱,当弱于减排效应时,技术进步效应对碳排放强度的抑制作用将显现出来。

表6 数字化影响制造业企业碳排放强度的区域异质性检验(绿色创新机制)

变量	东部地区 绿色创新	东部地区 碳排放	中部地区 绿色创新	中部地区 碳排放	西部地区 绿色创新	西部地区 碳排放
企业数字化水平	0.043 6*** (0.008 6)	-0.013 3*** (0.002 7)	0.042 1** (0.018 3)	-0.007 7 (0.006 8)	0.030 8 (0.021 2)	-0.017 6** (0.008 4)
绿色创新		-0.007 9*** (0.002 9)		-0.013 2** (0.006 6)		-0.005 3 (0.009 3)
控制变量	是	是	是	是	是	是
固定效应	是	是	是	是	是	是
观测数	7 738	7 738	1 841	1 841	1 461	1 461
拟合优度	0.253 4	0.970 8	0.362 5	0.978 2	0.357 9	0.965 9

资料来源:作者计算整理。

表7 数字化影响制造业企业碳排放强度的区域异质性检验(生产率提升机制)

变量	东部地区 生产率	东部地区 碳排放	中部地区 生产率	中部地区 碳排放	西部地区 生产率	西部地区 碳排放
企业数字化水平	0.022 2*** (0.003 0)	-0.013 4*** (0.002 8)	0.002 3 (0.005 2)	-0.006 5 (0.007 4)	0.002 2 (0.006 4)	-0.019 3** (0.008 5)
生产率		0.037 9*** (0.013 5)		0.034 6 (0.031 7)		0.021 5 (0.039 7)
控制变量	是	是	是	是	是	是
固定效应	是	是	是	是	是	是
观测数	6 849	6 849	1 728	1 728	1 385	1 385
拟合优度	0.948 0	0.970 4	0.967 8	0.978 6	0.961 5	0.965 2

资料来源:作者计算整理。

2. 行业异质性

不同类型制造业接入数据要素的条件以及运用数字技术的场景存在差异,而这种异质性往往会传导至数字化的减排效果^[39]。因此,为考察数字化对不同要素密集型制造业碳排放的差异化影响,参考阳立高等^[40]的做法,本文按照上市公司所属行业不同,将企业全样本分为劳动密集型制造业企业群、资本密集型制造业企业群、技术密集型制造业企业群3组,依据式(14)分别回归。结果如表8所示。可以发现,数字化在3组制造业企业群中均对企业碳排放强度表现出了显著的抑制作用,但对劳动密集型制造业企业群的显著性不及另外两组。可能的原因在于,劳动密集型制造业企业需求最多的要素是劳动力,数字化对该类企业的直接影响即“机器替人”,但劳动力本身产生的碳排放量较为有限,而数字化机器设备本身也会产生较大的资源消耗和碳排放,一定程度上削弱了数字化替代在该类企业中的减排红利,因此,相较于另外两类制造业“机器替机器”模式的来说,在劳动密集型制造业企业样本中,数字化对碳排放强度发挥抑制作用的显著性较低。

表8 数字化影响制造业企业碳排放强度的行业异质性检验

变量	技术密集	资本密集	劳动密集
企业数字化水平	-0.012 0*** (0.002 6)	-0.011 2*** (0.004 0)	-0.010 8* (0.006 3)
控制变量	是	是	是
固定效应	是	是	是
观测数	3 616	5 851	1 204
拟合优度	0.877 5	0.968 1	0.961 4

资料来源:作者计算整理。

同样,本文进一步探讨数字化影响制造业企业碳排放强度的两条机制在行业层面的异质性表现,表9和表10为两条机制的识别情况。结果发现:(1)绿色创新效应在技术和资本密集型制造业企业群都显著存在,即数字化通过促进技术和资本密集型制造业企业绿色创新,抑制了企业碳排放强度的提升,但该效应在劳动密集型行业中并未表现出来;(2)技术进步效应在技术密集型行业存在,但该机制是反向作用的,即数字化促进技术密集型制造业企业生产率提升,反而带来了企业碳排放强度的提升,在资本和劳动密集型制造业虽然存在负向影响,但结果并不显著。分析原因:(1)就绿色创新效应而言,相较于劳动密集型制造业来说,技术和资本密集型制造业在绿色创新方面呈现较大优势,两类行业企业更加重视节能减排和污染治理,因而绿色创新效应带来的减排效率提升较大;(2)就技术进步效应而言,技术密集型制造业企业大多采用高新技术和自动化生产装备,推行清洁生产技术和绿色工艺,本身具备生产率高、环保水平高的技术特征,且国家鼓励大力发展技术密集型制造业,不仅未对技术密集型制造业产能设限,而且拥有完备的政策支撑体系,在此情形下,技术密集型制造业企业数字化引致生产率提升的产出效应必然大于减排效应,表现在回归结果中即数字化通过促进技术密集型制造业生产率提升,进而增加了企业碳排放。在资本和劳动密集型制造业中则相反,但由于这两类行业现阶段数字化水平不够高,数字化对生产率提升的促进作用本身就较弱,技术进步效应的减排红利较难释放出来。随着两类行业企业数字化转型程度的加深,数字化技术进步效应引致的减排效果将随之显现。需要提及的是,技术进步效应机制在地区和行业层面的分组回归中均未表现出来,本文认为该效应的存在可能是组间差异导致的,分组之后组内企业之间生产率差异较小,对其减排效果的发挥有较大削弱。

基于以上分析,本文认为,数字化对制造业企业碳排放强度的影响效果和作用机制确实存在区域、行业层面存在明显的差异。由此, H_3 得以验证。

表9 数字化影响制造业企业碳排放强度的行业异质性检验(绿色创新机制)

变量	技术密集	技术密集	资本密集	资本密集	劳动密集	劳动密集
	绿色创新	碳排放	绿色创新	碳排放	绿色创新	碳排放
企业数字化水平	0.0523*** (0.0157)	-0.0112*** (0.0026)	0.0160* (0.0089)	-0.0103*** (0.0040)	0.0094 (0.0089)	-0.0112* (0.0064)
绿色创新		-0.0068*** (0.0024)		-0.0114** (0.0052)		0.0134 (0.0268)
控制变量	是	是	是	是	是	是
固定效应	是	是	是	是	是	是
观测数	3 590	3 590	5 813	5 813	1 201	1 201
拟合优度	0.3128	0.8776	0.2808	0.9681	0.2286	0.9614

资料来源:作者计算整理。

表10 数字化影响制造业企业碳排放强度的行业异质性检验(生产率提升机制)

变量	技术密集	技术密集	资本密集	资本密集	劳动密集	劳动密集
	生产率	碳排放	生产率	碳排放	生产率	碳排放
企业数字化水平	0.0342*** (0.0047)	-0.0133*** (0.0028)	0.0099*** (0.0033)	-0.0110*** (0.0042)	0.0011 (0.0069)	-0.0121* (0.0068)
生产率		0.0647*** (0.0130)		-0.0196 (0.0212)		-0.0153 (0.0400)
控制变量	是	是	是	是	是	是
固定效应	是	是	是	是	是	是
观测数	3 203	3 203	5 288	5 288	1 075	1 075
拟合优度	0.9513	0.8755	0.9592	0.9677	0.9630	0.9622

资料来源:作者计算整理。

四、研究结论与政策启示

(一) 研究结论

首先,本文拓展了夏皮罗等(Shapiro,2018)^[24]的企业污染排放模型,从理论视角剖析了数字化对企业碳排放强度的影响作用,并提出了技术进步效应与绿色创新效应两条机制,区别于以往单一机制识别研究,将两条作用机制置于统一的分析框架中进一步探讨;其次,本文以2011—2019年沪深A股制造业上市公司数据作为研究对象,从实证视角检验了数字化对制造业企业碳排放强度的影响,进一步证实了数字化通过促进生产率提升(技术进步效应)和增强绿色技术创新(绿色创新效应)带来了制造业企业碳排放强度的降低;再次,通过丰富的异质性研究发现,区域层面东、中部地区数字化均抑制了企业碳排放强度的提升,但在西部地区该抑制作用并不明显,行业层面数字化对于技术和资本密集型制造业减排的影响更深。两条机制的识别表现也各有差异,绿色创新机制在东部地区、技术和资本密集型制造业企业群中都显著存在,而生产率提升机制在分组回归中并未表现出来。

(二) 政策启示

基于研究结果,本文得到四方面的政策启示。

第一,重视数字化减排效应,抓住机会利用数字技术手段推动企业降低碳排放水平,赋能制造业绿色低碳转型。充分发挥云计算、大数据、人工智能、工业互联网等数字技术对于企业绿色生产的重要作用,通过智能感知、预警诊断、量化评估等数字化监测手段优化生产管理流程,减少资源损耗与碳排放,加速完成企业清洁化改造。加强数字技术产品研发,不计较一时投入产出回报率,进

一步激发数字化的减排效应,抢占数字化与绿色化协同发展赛道。

第二,充分发挥技术进步和绿色创新路径机制,引导制造业绿色低碳转型。合理配置各种生产要素,提升绿色全要素生产率,避免资源浪费与重复投入,不断提升企业资源利用率和单位产出率。大力推动企业绿色创新,加大绿色低碳技术研发投入,优化研发机制,提升绿色研发成果转换效率,拓宽企业绿色技术研发渠道,充分利用国内外创新资源,实现产业链绿色低碳转型,构建全产业链协作的低碳产业生态体系。

第三,因地制宜制定数字化减排政策,将不同地区之间的异质性特征纳入考量范围,切忌无差别、“一刀切”现象。对于东部地区,要注重关键数字技术突破和重点行业转型升级,发挥数字化示范引领作用,充分释放绿色创新效应的减排红利,激发数字化引致的绿色创新提升,以促进地区碳排放强度的降低。对于中西部地区,应发挥资源禀赋优势,结合区域重大战略、主体功能区战略、新型城镇化战略等国家战略,顺势推动产业数字化和数字产业化,提升数字基础设施建设和数字人才引进,开发适合当地经济发展特点的数字产业,以实现低碳发展弯道超车。同时,加强区域间协调合作,利用“东数西算”等区域产业布局政策,推行碳减排数字共治机制、有效控制全国碳排放。

第四,立足行业本身要素结构和技术主攻方向推行数字化减排,坚决避免政策效果相互抵消或产生“漏斗效应”。对于技术密集型制造业,考虑其技术更新迭代快、产业链较长的特征,要将绿色创新研发应用作为减排的重要途径,着力打造数字协同的绿色低碳发展体系,拓宽数字赋能减排的机会空间。对于资本密集型制造业,考虑在该类制造业中数字化减排效果明显好于传统减排方式,加速数字技术在行业中的推广应用,可通过发展工业机器人、数控机床等新一代智能制造设备构建数字工厂,同时针对钢铁、石化、建材、有色等重污染行业量身定制能效可视、排放可控的数字减排方案,助力其实现节能减排和绿色生产。对于劳动密集型制造业,强化上下游产业协同联动,打通消费端与生产端的数据资源,实现资源循环利用,构建数据驱动的个性化定制、柔性生产和产品溯源体系,最大限度地减少能耗与物耗,推动行业全面绿色低碳发展。

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[N]. 人民日报, 2022-10-26(01).
- [2] 郭朝先. 2060年碳中和引致中国经济系统根本性变革[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(5): 64-77.
- [3] 工业和信息化部. 工业和信息化部部长金壮龙在“部长通道”回应工业稳增长、提升和改造传统产业、5G发展等相关热点问题[EB/OL]. (2023-03-05) [2023-05-06]. https://www.miit.gov.cn/xwdt/gxdt/ldhd/art/2023/art_7c3f2825171644c99c954049dc841bee.html.
- [4] 工业和信息化部. 工业绿色发展规划(2016-2020年)[EB/OL]. (2017-06-21) [2023-05-06]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/201706/t20170621_1196817.html.
- [5] 工业和信息化部, 国家发展改革委员会, 生态环境部. 工业领域碳达峰实施方案[EB/OL]. (2022-07-07) [2023-05-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/01/content_5703910.htm.
- [6] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [7] REXHAEUSER S, SCHULTE P, WELSCH H. ICT and the demand for energy: evidence from OECD countries [J/OL]. *Environmental and Resource Economics*, 2016, 63: 119-146. [2023-05-06]. <https://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp13116.pdf>.
- [8] 张三峰, 魏下海. 信息与通信技术是否降低了企业能源消耗——来自中国制造业企业调查数据的证据[J]. 中国工业经济, 2019(2): 155-173.
- [9] CHEN L. How CO₂ emissions respond to changes in government size and level of digitalization? evidence from the BRICS countries[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(1): 457-467.
- [10] WU H, XUE Y, HAO Y, et al. How does internet development affect energy-saving and emission reduc-

- tion? evidence from China[J/OL]. *Energy Economics*, 2021, 103: 105577. [2023-05-13]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140988321004485>.
- [11] Global e-Sustainability Initiative. SMARTer2030, ICT solutions for 21st century challenges [EB/OL]. (2015-05-30) [2023-05-10]. https://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf.
- [12] LANGE S, POHL J, SANTARIUS T. Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand [J/OL]. *Ecological Economics*, 2020, 176: 106760. [2023-05-22]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800919320622>.
- [13] GOODMAN-BACON A. Difference-in-differences with variation in treatment timing [J]. *Journal of Econometrics*, 2021, 225(2): 254-277.
- [14] 谢云飞. 数字经济对区域碳排放强度的影响效应及作用机制[J]. *当代经济管理*, 2022, 44(2): 68-78.
- [15] 刘婧玲, 陈艳莹. 数字技术发展、时空动态效应与区域碳排放[J]. *科学学研究*, 2023, 41(5): 841-853.
- [16] 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.
- [17] 邓荣荣, 张翱翔. 中国城市数字经济发展对环境污染的影响及机理研究[J]. *南方经济*, 2022, 389(2): 18-37.
- [18] 王香艳, 李金叶. 数字经济是否有效促进了节能和碳减排[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(11): 83-95.
- [19] 王军, 王杰, 王叶薇. 数字金融发展如何影响制造业碳强度[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(7): 1-11.
- [20] 孔令英, 董依婷, 赵贤. 数字经济发展对碳排放的影响——基于中介效应与门槛效应的检验[J]. *城市发展研究*, 2022, 29(9): 42-49, 55.
- [21] 常皓亮. 数字经济、绿色技术创新与碳排放强度——基于我国城市面板数据的经验研究[J]. *商业研究*, 2023, 538(2): 73-80.
- [22] 葛立宇, 莫龙炯, 黄念兵. 数字经济发展、产业结构升级与城市碳排放[J]. *现代财经(天津财经大学学报)*, 2022, 42(10): 20-37.
- [23] ROMER P M. Increasing returns and long-run growth[J]. *Journal of Political Economy*, 1986, 94(5): 1002-1037.
- [24] SHAPIRO J S, WALKER R. Why is pollution from US manufacturing declining? the roles of environmental regulation, productivity, and trade[J]. *American Economic Review*, 2018, 108(12): 3814-3854.
- [25] 赵宸宇, 王文春, 李雪松. 数字化转型如何影响企业全要素生产率[J]. *财贸经济*, 2021, 42(7): 114-129.
- [26] 刘淑春, 闫津臣, 张思雪, 等. 企业管理数字化变革能提升投入产出效率吗[J]. *管理世界*, 2021, 37(5): 170-190, 13.
- [27] 汤萱, 高星, 赖晓冰. 数字化转型对企业劳动生产率的影响研究[J]. *经济纵横*, 2022(9): 104-112.
- [28] 王鹏飞, 刘海波, 陈鹏. 企业数字化、环境不确定性与全要素生产率[J]. *经济管理*, 2023, 45(1): 43-66.
- [29] COPELAND B R. Trade and the environment [M]. London: Palgrave Macmillan UK, 2013: 29-34.
- [30] DE F P, LIMA F, SANTOS R. Cooperation in innovation activities: the importance of partners [J]. *Research Policy*, 2010, 39(8): 1082-1092.
- [31] 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.
- [32] 刘畅, 潘慧峰, 李珮, 等. 数字化转型对制造业企业绿色创新效率的影响和机制研究[J]. *中国软科学*, 2023(4): 121-129.
- [33] 吴非, 胡慧芷, 林慧妍, 等. 企业数字化转型与资本市场表现——来自股票流动性的经验证据[J]. *管理世界*, 2021, 37(7): 130-144, 10.
- [34] 沈洪涛, 黄楠. 碳排放权交易机制能提高企业价值吗[J]. *财贸经济*, 2019, 40(1): 144-161.
- [35] 任胜钢, 郑晶晶, 刘东华, 等. 排污权交易机制是否提高了企业全要素生产率——来自中国上市

- 公司的证据[J]. 中国工业经济, 2019(5): 5-23.
- [36] 王馨, 王莹. 绿色信贷政策增进绿色创新研究[J]. 管理世界, 2021, 37(6): 173-188, 11.
- [37] BARON R M, KENNY D A. The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: conceptual, strategic, and statistical considerations [J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1986, 51(6): 1173-1182.
- [38] 温忠麟, 张雷, 侯杰泰, 等. 中介效应检验程序及其应用[J]. 心理学报, 2004(5): 614-620.
- [39] 杨丹辉, 胡雨朦. 投入数字化对工业碳排放强度影响的实证分析[J]. 城市与环境研究, 2022(4): 77-93.
- [40] 阳立高, 龚世豪, 王铂, 等. 人力资本、技术进步与制造业升级[J]. 中国软科学, 2018, 325(1): 138-148.

Impact of Digitalization on Carbon Emission Intensity of Manufacturing Enterprises: Theoretical Modeling and Mechanism Test

HU Yumeng¹, GUO Chaoxian^{1,2}

(1. School of Applied Economics, University of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 102488, China;
2. Institute of Industrial Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100006, China)

Abstract: In the context of the "dual carbon" goals, the coordinated development of digitization and greenization has become an important driver for high-quality economic development in China. Firstly, based on endogenous growth framework, this study expands upon the enterprise pollution reduction model proposed by Shapiro & Walker (2018), distinguishing between the technological progress effect and green innovation effect on carbon emission intensity reduction in manufacturing companies due to digitization. The corresponding theoretical hypotheses are put forward. Secondly, using the data of manufacturing companies listed on the Shanghai and Shenzhen stock Exchanges from 2011 to 2019 as the benchmark, empirical tests are conducted to examine the impact of digitization on carbon emission intensity in the manufacturing sector. The existence of two mechanisms, namely, productivity improvement through digitization and green innovation, is confirmed. Furthermore, heterogeneity research reveals that at the regional level, digitization inhibits the increase in carbon emission intensity in the eastern and central regions, but this inhibitory effect is not significant in the western region. At the industry level, digitization has a deeper impact on emission reduction in technology and capital-intensive manufacturing industries. Moreover, the green innovation effect is significantly present in the eastern region and in technology and capital-intensive manufacturing clusters, whereas the technological progress effect is not evident in the grouped regression analysis. The research findings provide empirical evidence for accurately assessing the emission reduction effect of digitization and formulating differentiated policies for digital empowerment of the manufacturing industry in its green and low-carbon transformation.

Key words: digitization; manufacturing industry; enterprise carbon emission intensity; theoretical modeling; mechanism test

(责任编辑: 李世红)