

数字技术创新对碳排放强度的影响

——基于数字技术专利检索的分析

董康银 王建达 蒋庆哲*

摘要:为应对全球气候变化,中国政府出台了系列行动以降低碳排放强度。其中,数字技术创新作为新的“技术-经济范式”,将在履行气候变化责任与义务中发挥突出作用。因此,本文尝试利用专利检索方式衡量中国30个省份2003—2019年数字技术创新水平,并在此数据基础上评估数字技术创新对碳排放强度的直接效应、间接效应以及异质性影响。研究结果表明,数字技术创新不仅可以直接降低碳排放强度,还可以通过结构效应(促进产业结构升级)和效率效应(提升全要素生产率)间接减少碳排放强度。进一步检验发现数字技术创新影响碳排放强度有明显的区域异质性以及行业异质性。最后,本文建议政府加快数字技术发展,推动产业结构升级,提升资源配置效率,以实现快速碳减排。

关键词:数字技术创新;碳排放强度;专利检索;产业结构升级;全要素生产率

一、引言

2020年,在第七十五届联合国大会一般性辩论和气候雄心峰会上,中国政府提出要在2060年前实现“碳中和”目标。该目标的提出不仅展示了中国推动构建人类命运共同体的大国担当,同时也凸显了中国的减碳行动的规划和路线。然而,实现“碳中和”目标同中国的经济发展紧密联系,面临着现实的阻碍。一方面,为了稳固中国在全球气候、经济以及社会的话语权,政府必须坚定不移推进高水平开放的经济增长模式,这对经济增长仍有较高要求(裴长洪、刘斌,2020)。另一方面,中国传统的经济增长模式伴随着大量的化石能源消耗;由煤炭等传统燃料主导的工业化社会面临一定的转型困难,减排任务十分艰巨(林伯强、刘希颖,2010;

*董康银,对外经济贸易大学国际经济贸易学院,邮政编码:100029,电子信箱:dongkangyin@uibe.edu.cn;王建达,对外经济贸易大学国际经济贸易学院,邮政编码:100029,电子信箱:wangjd1993@163.com;蒋庆哲(通讯作者),对外经济贸易大学国际经济贸易学院,邮政编码:100029,电子信箱:jiangqz@uibe.edu.cn。

本文系教育部“春晖计划”合作科研项目“能源减贫实现我国双碳目标的机理、路径与对策研究”(HZ-KY20220005)的阶段性成果。感谢匿名审稿专家的修改建议。文责自负。

任亚运等,2020)。因此,为平衡经济增长和碳减排的关系,中国政府的首要且紧迫的任务是实现碳排放强度的降低。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中要求中国在“十四五”期间内能源强度累计下降13.5%,碳排放强度累计下降18%。在约束性目标设定的背景下,中国政府必须探索实现降低碳排放强度的路径。

为降低碳排放强度,近年来中国政府多措并举,但在维持经济增长与实现碳减排之间难以兼顾,必须借助于现代化的技术革命实现产业经济与低碳协同发展。其中,数字技术创新发展是一条重要途径。《国家能源局关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见》指出,能源数字化智能化的新模式将对能源行业提质增效和碳排放强度降低起到关键作用。《“十四五”工业绿色发展规划》将“加速生产方式数字化转型”作为六大转型行动之一。数字技术可以与电力、工业、能源、交通等行业深度融合,促进全行业的智能化与现代化发展,提高资源配置效率(Gao et al.,2022)。此外,数字技术还能实现产业低碳化转型,降低传统行业以及化石能源使用占比,实现产业清洁替代(Dogan & Pata,2022)。特别是,数字技术利用互联网以及大数据手段可以提供在线监测、可靠的平台、准确的数据和信息,促进产业绿色发展,进而实现减排进程(Zhang et al.,2022)。由此可见,依托于数字技术促进中国清洁化发展、降低碳排放强度从而实现“碳中和”目标,是未来中国经济社会发展的重点。

现有研究中,已有许多学者将数字化与能源以及温室气体排放之间关系进行充分阐述(缪陆军等,2022;孙文远、周浩平,2022),也有学者从信息与通信技术的环境影响角度突出数字技术创新的减排贡献(Hong et al.,2023)。但相关研究还需在以下两个方面进一步探究:一是对于数字技术创新认识不足,尚未较好地度量数字技术创新水平;二是数字技术创新对碳排放强度的影响认识不清,较少充分地评估两者之间的潜在联系。因此,评估数字技术创新对碳排放强度的影响以及内在机制十分必要且具有重要现实意义。本文在利用专利检索方法衡量数字技术创新指标体系的基础上,结合动态面板模型,测度了数字技术创新对碳排放强度的影响。此外,本文还进一步评估了数字技术创新与碳排放强度之间的影响机制、区域异质性以及行业异质性问题,为中国政府未来制定合理的减排计划提供了参考。

本文的边际贡献体现在以下几个方面:第一,利用数字技术相关的国际专利代码检索了数字技术专利信息,并评估了数字技术创新指数,丰富了数字技术创新的衡量手段;第二,创新性地评估了数字技术创新对碳排放强度的影响,为中国实现高质量减排提供了理论依据和事实依托;第三,进一步探索了数字技术创新影响碳排放强度的理论机制,为中国政府实现有效的减排制定了可实施路径与具体方案。

本文余下的结构安排如下:第二部分是文献综述,并提出已有研究不足;第三部分是对数字技术创新影响碳排放强度的理论机制进行阐述;第四部分是主要研究方法和变量介绍;第五部分为实证检验;第六部分是结论和政策建议。

二、文献综述

国内外已经有大量学者对数字经济问题进行了深入研究,但数字技术创新以“技术-经济范式”影响着经济、社会和环境,还存在较多研究空白(张鹏,2019;戚聿东、徐凯歌,2021)。Yoo等(2012)首次界定了数字技术创新,认为其是将数字和物理组件进行组合以产生新产品、服务以及商业模式等的创新过程。随后,不少学者对数字技术创新水平进行了测度与评估。其中,汪海玲(2023)用数字技术覆盖广度、数字技术应用深度以及数字技术服务程度来衡量数字技术创新指数,并利用空间计量模型评估了它与就业技能结构的关系。但上述研究只是用产业研发创新产出专利和被引频次来衡量数字技术创新,不够客观全面。陶锋等(2023)利用国际专利信息代码,识别了有关数字技术创新的发明专利,并评估了数字技术创新对企业市场价值的影响。研究表明,数字技术创新可以通过企业数字化转型、改善生产经营效率以及提高市场获利能力进而促进企业市场价值。这种测度方法有效弥补了传统计算方式中对于数字相关技术识别不足的问题。采用类似做法的还有罗佳等(2023)、Ge等(2023)以及Lo等(2022),可见该方法在近年来已经受到较为广泛的关注。

上述研究针对数字技术创新和经济社会效应的联系进行了充分阐述,随着气候变化问题逐渐引起关注,越来越多的学者将数字化与能源以及温室气体排放相结合进行研究。其中,现有研究表明数字经济能够有效降低能源需求(Gao & Peng, 2023)、减少碳排放(缪陆军等, 2022; 孙文远、周浩平, 2022; 徐维祥等, 2022; Li & Wang, 2022)、抑制碳排放强度(谢云飞, 2022; Jing et al., 2023)等。然而,数字经济的范围相对宽泛,使其碳减排的路径过于模糊,抓手不够突出。数字技术驱动了数字经济的发展,是数字经济最内在的表现形式,也是实现清洁化的重要途径(谢富胜等, 2019; 戚聿东、褚席, 2021)。因此,不少学者也从数字技术角度讨论数字化与清洁化之间的内在联系。例如,部分学者以信息与通信技术作为数字技术的典型代表,探讨了信息与通信技术对于降低能源消耗(张三峰、魏下海, 2019)、增加清洁能源占比(Bano et al., 2022)、提升能源效率(Bastida et al., 2019; Lange et al., 2020)以及降低能源强度(Hong et al., 2023)的影响。能源是二氧化碳等温室气体排放的重要来源,因此也有学者将数字技术对低碳的影响进行了细致探讨。例如,王轩(2010)认为信息与通信技术在自身发展的同时会带来远远超过自身排放的减排贡献。

伴随着中国实现经济高质量增长和“碳中和”目标的需要,越来越多的学者开始关注碳排放强度的影响因素。现有研究认为,信息与通信技术作为数字技术的重要组成部分,是碳排放强度调整的重要手段。例如,Sun和Kim(2021)以中国2000—2017年省级面板数据为例,证实了信息与通信技术对碳排放强度有明显的降低效果。Sun(2022)进一步利用中国2003—2017年城市面板数据,证实了信息与通信技术不仅能直接降低碳排放强度,还能通过提升绿

色技术创新间接降低碳排放强度。Chen等(2019)认为信息与通信技术对二氧化碳排放强度的影响具有区域异质性,具体而言,信息与通信技术在中国东部和中部省份对碳排放强度的负向影响更为显著。另外,还有学者关注某一种数字技术对碳排放强度的影响。例如,Liu等(2022)利用2005—2016年中国工业部门数据研究人工智能对碳排放强度的影响,结果表明,人工智能显著降低了碳排放强度,且其对劳动密集型和技术密集型产业的碳排放强度的降低效果更为明显。

然而,尽管上述研究对数字技术与碳排放强度两者的联系进行了充分的探讨。但是现有研究仅评估了数字技术的某个侧面的减排效应,对于数字技术的定义和测度还存在差距,不能很好地代表数字技术的实际影响。本文还考虑到数字技术相关的产业增长也可能会增加碳排放,不利于碳排放和经济的脱钩效应(Zhou et al., 2019; Wang et al., 2021)。Zhong等(2022a)指出,数字经济的发展对于经济和碳排放脱钩的促进效果会逐渐减弱。Jin和Yu(2022)也指出,尽管数字相关技术有效提升了碳排放效率,但是由于回弹效应的存在,能源消耗的附带增加将可能导致碳排放的增长。因此,全面衡量数字技术创新对碳排放强度的影响至关重要。对此,Wang等(2021b)利用价值链核算和多面板回归方法,探讨了数字技术创新和技术溢出对碳排放强度的影响,结果表明,信息产业技术增加碳排放强度,而跨行业技术溢出对碳排放强度降低有持久作用。然而,由于投入产出表的限制,数字技术相关产业的覆盖范围仍存在遗漏。

通过对现有文献进行回顾和总结,可以发现当前研究存在以下不足。首先,数字技术创新的概念和定义尚处于起步阶段,有关数字技术创新的衡量还存在较多不足,需要更规范的定义和相对较完整的方法对数字技术创新水平进行测度。其次,较多学者仅针对数字技术或数字经济的一个侧面探讨它们的低碳影响,然而,很少有学者从数字技术创新视角分析其对碳排放强度的影响。本文需要更充足的理论以及实证分析探讨数字技术创新与碳排放强度之间的关系。最后,数字技术创新是否真实地减少碳排放强度还存在一定的争议。这是由于经济和碳排放之间的脱钩效果减弱以及回弹效应的存在,造成数字技术创新对碳排放强度影响存在不确定性。上述缺陷为本文提供了继续探讨的空间,本文将针对上述不足进行实证检验和分析,以弥补相关研究空白。

三、作用机制的理论分析

(一)数字技术创新对碳排放强度影响的直接效应

数字技术创新对于碳排放强度的直接影响主要可以从两个方面进行探讨。一方面,从优化角度来看,数字技术创新可以有效促进相关产业的经济产出,加快信息与资源等要素的跨区域流动,提高信息的利用效率,进而实现产业效率、能源效率以及碳排放效率的提升(Gao

et al., 2022)。此外,数字技术创新可有效降低交易成本和运输成本,提高资源配置效率,增强人们的环保意识,减少数字鸿沟,促进能源节约,实现碳排放强度降低(Xu & Zhong, 2022)。

另一方面,从替代角度来看,数字技术可以渗透至其他行业的生产与应用过程,例如产品的制造、运输、设计和运营(Yi & Thomas, 2007; Zhong et al., 2022b)。数字化发展过程有望实现低碳产业对高碳产业的替代(Sun et al., 2023)。例如数字技术实现“书本到字节”的转变,减少了资源消耗;无纸化办公和远程视频会议减少了企业线下办公的需求,降低电力等资源消耗,促进了能源效率的提升(Dogan & Pata, 2022);电子商务快速发展替代了传统零售服务,降低了交通需求以及减少了能源消耗(Sui & Rejeski, 2002)。此外,数字技术还能实现知识的替代,数字技术相关的知识积累会挤出对于传统产业技能的需求,降低传统能源依赖程度,提升清洁能源利用,加快碳排放强度降低(郝宇、李颖, 2022)。因此,本文提出假说1:

假说1:数字技术创新可以直接降低碳排放强度。

(二)数字技术创新对碳排放强度影响的间接效应

1. 结构效应

数字技术的发展可以从两个角度有效推动产业结构升级。从外部环境角度来看,数字技术创新能够加速社会对于互联网、大数据等数字技术的应用广度,降低信息搜索成本,优化资源配置效率,促进产业结构升级。从内部生产运营角度来看,传统制造业面临产业升级与优化的挑战,这迫使传统行业从规模化、标准化向个性化、智能化转型(沈运红、黄彬, 2020)。例如传统制造业加强信息采集与云计算设施平台,提升企业效率,促进产业创新,进而提升智能化、服务化与信息化在全行业的应用范围,促进产业结构优化。产业结构升级可以降低碳排放强度,这主要是由于相比于传统的制造业,智能化与信息化赋能的产业在创造更多经济的同时减少了能源消耗,产业生产效率与能源效率得到大幅提升。因此,本文提出假说2:

假说2:数字技术创新通过优化产业结构,进而降低碳排放强度。

2. 效率效应

数字化技术也能有效地提升社会技术效率。数字化技术在整个经济活动中的应用增加了劳动生产率,它不仅可以合理化工业生产,也可以加快劳动力、资本和自然资源等生产要素供给的有效性(Frey & Osborne, 2017; Lange et al., 2020)。此外,数字技术具有知识的快速传播能力,它能有效地改善市场行为,加速市场交易以降低成本,促进市场消费,降低失业率,从而提升全要素生产率(Ben Lahouel et al., 2021)。进一步,中国经济发展已经由原有的依赖性经济增长模式转变为创新驱动型经济增长模式。在这种模式转变过程中,追求能源节约、碳减排以及可持续发展成为了创新驱动经济增长的重要实现目标。全要素生产率提升也能有

效实现碳排放强度的降低。这是由于,一方面全要素生产率代表了技术进步,它能通过促进产业结构升级和优化间接降低碳排放强度(Cheng et al., 2018)。另一方面,全要素生产率提升是实施有效的研发和绿色增长的前提条件,因而有利于实现碳排放强度的降低(Shen et al., 2019)。根据上述分析,本文提出假说3:

假说3:数字技术创新通过提升全要素生产率,降低碳排放强度。

为使作用机制更为清晰,本文采用图示的形式展现数字技术创新对碳排放强度的直接和间接影响,如图1所示。

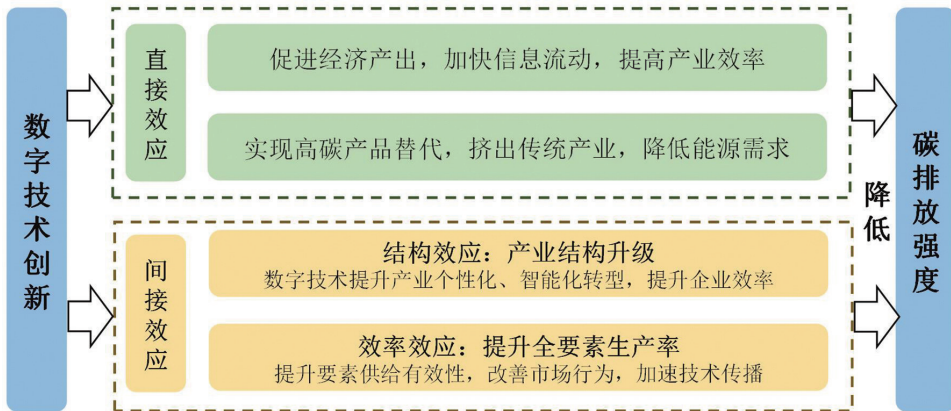


图1 数字技术创新对碳排放强度的直接与间接效应

四、研究设计

(一)模型设定

1. 基准回归模型

对于数字技术创新对碳排放强度的影响,本文构造下列模型(1):

$$\ln CEI_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 \ln DTI_{it} + \sum_{k=2}^5 \gamma_k \ln Control_{it} + \eta_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中, i 代表省份, t 代表年份; γ_0 是截距项, $\gamma_1, \dots, \gamma_5$ 代表待估系数。 $\ln CEI_{it}$ 代表碳排放强度; $\ln DTI_{it}$ 代表数字技术创新指数; $\ln Control_{it}$ 代表控制变量,这里分别包括经济增长 ($\ln PGDP_{it}$)、人均能耗 ($\ln PENE_{it}$)、能源结构 ($\ln COAL_{it}$) 和财政支出 ($\ln FE_{it}$); η_i 为非观测效应; ε_{it} 代表随机扰动项。本文将所有的变量均进行对数化处理以排除潜在的异方差影响。

考虑到上一期的碳排放强度变化会影响本期的碳排放强度大小,本文在静态面板模型的基础上引入被解释变量的滞后一期项 $\ln CEI_{i,t-1}$, 代表碳排放强度的滞后。因此,基准回归的模型被设定为:

$$\ln CEI_{it} = \delta_0 + \delta_1 \ln CEI_{i,t-1} + \delta_2 \ln DTI_{it} + \sum_{k=3}^6 \delta_k \ln Control_{it} + \eta_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中, δ_0 是截距项, $\delta_1, \dots, \delta_6$ 代表待估系数。

2. 机制检验模型

进一步,参考Baron和Kenny(1986)的逐步法,对数字技术创新与碳排放强度的影响机制进行检验,具体模型设定如下:

$$\ln Mediator_{it} = \theta_0 + \theta_1 \ln DTI_{it} + \sum_{k=2}^5 \theta_k \ln Control_{it} + \eta_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$\ln CEI_{it} = \pi_0 + \pi_1 \ln DTI_{it} + \pi_2 \ln Mediator_{it} + \sum_{k=3}^6 \pi_k \ln Control_{it} + \eta_i + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中, θ_0 和 π_0 代表截距项, $\theta_1, \dots, \theta_5$ 和 π_1, \dots, π_6 代表待估系数; $\ln Mediator_{it}$ 代表中介变量,主要指产业结构升级($\ln IND_{it}$)和全要素生产率($\ln TFP_{it}$)。 θ_1 代表关键自变量(数字技术创新)对中介变量的影响弹性大小; π_2 代表中介变量对因变量(碳排放强度)的影响弹性大小。若系数显著,且符号方向符合预期,则机制检验通过。

3. 数字技术异质性检验

本文还进一步将数字技术分为了12种不同的类别(不包括其他项,详见变量介绍部分),并估计每种数字技术创新指数对碳排放强度的影响。具体模型设定如下:

$$\ln CEI_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln CEI_{i,t-1} + \alpha_2 \ln DTI_{it} + \sum_{k=3}^6 \alpha_k \ln Control_{it} + \eta_i + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

其中, $\ln DTI_{it}$ 代表了每种数字技术创新指数; α_0 是截距项, $\alpha_1, \dots, \alpha_6$ 代表待估系数; α_2 是每种技术创新指数影响碳排放强度的弹性大小。

(二) 变量选择

1. 因变量

本文因变量是碳排放强度。碳排放强度指标通常被作为政府设定减排目标的计量单位,因此用碳排放强度来测度数字技术创新的减排效应是合适的。碳排放强度主要指单位经济产出的碳排放量,因此使用碳排放量与地区生产总值的比值来代表因变量。

2. 关键自变量

本文关键自变量是数字技术创新指数。为了计算该指标,需要实行如下步骤。首先,基于Inaba和Squicciarini(2017)提供的ICT技术分类,收集了13个ICT国际专利分类代码,这里用其指代数字技术专利,具体的专利名称、定义和范围见表1。其次,参考已有研究方法(鄢哲明等,2022),建立了基于专利代码的专利检索公式,并在中国专利检索与分析系统中^①,对13个ICT专利代码进行分省份与分年度的检索。本文检索的专利包括发明专利、实用新型专利和外观设计专利三种类别。最后根据Lin和Zhu(2019)提供的专利创新指数计算公式,计算数字技术创新指数。具体公式如下:

^①中国专利检索及分析数据库网址: <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/conventionalSearch>。

$$DTI_{it} = \sum_{j=0}^t DTAT_{ij} \exp[-\beta_1(t-j)] \cdot \{1 - \exp[-\beta_2(t-j)]\} \quad (6)$$

其中, $DTAT_{ij}$ 代表授权的ICT专利数目(这里指代数字技术专利数目); β_1 是折旧率, β_2 是扩散率。

表1 数字技术分类定义与覆盖范围

技术名称	定义	覆盖范围
1. 高速网络 (High-speed network)	通过网络进行的高速通信相关技术	数字传输、网络(协议和架构等)、电话通信广播,以及传输、接收、渠道
2. 移动通信 (Mobile communication)	便携式设备的无线通信	蜂窝系统、无线局域网(LAN)和个人区域网络(PAN)
3. 安全性 (Security)	信息处理和通信的安全	秘密编码、认证和电子支付
4. 传感器和设备网络 (Sensor and device network)	传感器和设备之间的通信	智能传感器的网络
5. 高速计算 (High-speed computing)	高速的数据处理相关技术	计算机结构、硬件的组成、计算机程序和操作系统
6. 大容量与高速存储 (Large-capacity and high-speed storage)	大容量数据的存储和高速存储相关技术	各种存储设备相关技术、网络以及文件系统
7. 大容量信息分析 (Large-capacity information analysis)	处理大量的数据进行分析的相关技术	数据库和数值分析、计算科学以及计算机辅助工程
8. 认知与意义理解 (Cognition and meaning understanding)	高水平的概念理解相关技术	认知计算
9. 人性化接口 (Human-interface)	人机交互相关技术	人机交互技术
10. 成像和声音技术 (Imaging and sound technology)	图像和声音数据的处理和传输相关技术	视频设备、电视、图像处理、声学设备和音频信号处理等相关技术
11. 信息与通信设备 (Information communication device)	实现信息处理或通信功能的电子元件(包括主动和被动装置)	电子电路、通信电缆、半导体激光器等
12. 电子测量 (Electronic measurement)	利用信息处理和通信的电子测量技术	无线电导航、无线电测向等
13. 其他 (Others)	不属于上述任何类别的数字相关技术	数据输入和输出、混合计算机等

另外,在稳健性检验部分,参考Cheng和Yao(2021),利用永续盘存法计算了另一种数字技术创新指数,具体公式如下:

$$DTI_{it} = DTAT_{it} + (1 - \rho)DTI_{i,t-1} \quad (7)$$

其中, ρ 是折旧率,本文设定为10%。

3. 控制变量

本文共选取了四个控制变量。首先,使用人均地区生产总值代表各省的经济增长程度($\ln PGDP$);其次,使用人均能源消耗总量代替能源消耗情况($\ln PENE$);再次,使用煤炭能

源消耗总量占总能源消耗量的比重代替煤炭能源结构变量($\ln COAL$);最后,使用一般财政支出代替财政支出变量($\ln FE$)。

4. 中介变量

本文的中介变量分别是产业结构升级($\ln IND$)和全要素生产率($\ln TFP$)。其中,产业结构升级指数参考徐敏和姜勇(2015)的处理方法,引入产业结构层次系数来衡量各省份的产业结构升级水平;具体而言,利用三个产业增加值占比分别乘层次系数,并加总得到产业结构升级指数(第一产业层次系数为1,第二产业层次系数为2,第三产业层次系数为3)。全要素生产率的计算参考刘秉镰等(2010),采取随机前沿模型进行估计。其中,投入要素分别是劳动力和资本,生产函数形式设定为柯布-道格拉斯形式。其中劳动力参考赵涛等(2020)、蔺鹏和孟娜娜(2020),用城镇单位就业人数与城镇私营和个体就业人员总数来代替。资本用全社会固定资产投资额进行永续存盘法处理后得到。产出用地区生产总值代表,基准年份为2002年。

(三)数据来源

本文包含2003—2019年30个省级行政区(考虑到数据可获性以及面板完整性,不包含西藏和港澳台地区)的面板数据^①。碳排放相关数据来自中国碳核算数据库(CEADs);专利相关数据来自手动整理;能源消耗相关数据来自《中国能源统计年鉴》;其他数据来自《中国统计年鉴》。对上述所有变量进行了描述性统计分析,统计结果见表2。整体上看,各变量中数据均没有较大的偏差情况,这使结果更接近无偏估计。

表2 变量定义及描述性统计

变量类别	变量	定义	均值	标准差	最小值	最大值
因变量	$\ln CEI$	碳排放强度	-3.8947	0.6557	-5.9966	-2.0676
自变量	$\ln DTI$	数字技术创新指数	1.7294	1.2090	-0.9851	4.2113
	$\ln PGDP$	经济增长	0.7813	0.6480	-0.9963	2.3977
	$\ln PENE$	人均能耗	1.0409	0.4930	-0.3211	2.3671
	$\ln COAL$	煤炭能源结构	-0.4854	0.4769	-4.0319	0.5641
	$\ln FE$	财政支出	-1.5767	0.4238	-2.4746	-0.2767
中介变量	$\ln IND$	产业结构升级	0.8498	0.0542	0.7273	1.0416
	$\ln TFP$	全要素生产率	2.281	0.0711	2.0513	2.4193

^① 数据年份范围选取原因是CEADs数据库的碳排放只更新到2019年,为了保证数据来源的一致性,本文数据范围也选取了2003—2019年。

五、实证检验

(一)基准回归

本文分别用静态模型和动态模型估计数字技术创新对碳排放强度的影响。其中静态模型用固定效应(FE)模型检验(表3的列(1)和列(2)),动态模型用系统广义矩估计(SYS-GMM)模型检验(表3的列(3)和列(4))。从静态模型结果来看,无论是否加入控制变量,数字技术创新的系数均显著为负,这表明在静态模型估计下,数字技术创新可以明显降低碳排放强度。具体而言,在列(2)中, $\ln DTI$ 的系数为-0.460,也就是说数字技术创新指数每升高1%,会导致中国碳排放强度平均下降0.460%。动态模型的结果来看,AR(1)检验的结果小于0.1,AR(2)检验的结果大于0.1,这表明扰动项的差分存在一阶自相关,但不存二阶自相关,通过了原假设“扰动项无自相关”的假设。Hansen 检验的结果大于0.1,这表明GMM模型选取的工具变量不存在过度识别问题。因变量的滞后项系数显著为正,这表明碳排放强度有明显的时间滞后效应。换句话说,前一期的碳排放强度增长会明显导致当期碳排放强度的增加。数字技术创新的系数也显著为负,表明在动态模型的估计下,数字技术创新有效减少了碳排放强度。具体而言,列(4)中 $\ln DTI$ 的系数为-0.038,动态模型下,数字技术创新指数每升高1%,导致中国碳排放强度平均下降0.038%。回归结果验证了本文提出的假说1。

表3 基准回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	FE估计	FE估计	SYS-GMM估计	SYS-GMM估计
L. $\ln CEI$			0.991*** (186.35)	0.623*** (12.62)
$\ln DTI$	-0.907*** (-5.81)	-0.460*** (-4.70)	-0.014*** (-5.91)	-0.038*** (-6.37)
$\ln PGDP$		-0.824*** (-14.67)		-0.112** (3.59)
$\ln PENE$		1.061*** (21.57)		0.139*** (7.57)
$\ln COAL$		0.174*** (8.63)		0.190*** (7.57)
$\ln FE$		-0.419*** (-9.37)		-0.129*** (-7.22)
常数项	-2.326*** (-8.62)	-0.263 (-0.68)	-0.076*** (-4.26)	-0.421*** (-2.95)
AR(1)			0.006	0.006
AR(2)			0.138	0.129
Hansen 检验			0.102	0.276

注:①***表示 $p < 0.01$, **表示 $p < 0.05$, *表示 $p < 0.1$; ②回归系数下面括号中表示的是t值,AR(1)和AR(2)的数是p值。下表同。

(二)稳健性检验

本文主要运用4种方法对基准回归结果的稳健性进行验证。(1)替换关键自变量。表4的列(1)展示了利用永续盘存法计算的数字技术创新指数重新估计模型(2)得到的结果。回归结果显示,数字技术创新系数仍旧显著为负,表明数字技术创新能显著降低碳排放强度。(2)替换因变量。表4的列(2)展示了人均碳排放作为因变量的估计结果。人均碳排放用碳排放量与常住人口比值来衡量。结果显示,数字技术创新的系数在回归结果中仍旧显著为负,表明数字技术创新能显著降低人均碳排放量,进一步证实了数字技术创新在减排方面的重要作用。(3)替换动态模型估计方法。表4的列(3)展示了利用另一种动态模型差分GMM(D-GMM)模型估计的结果。相比于系统GMM,其估计效率较低,但放松了假设。结果显示,数字技术创新的提升能够显著降低中国碳排放强度,进一步证实了基准回归结果的稳健性。(4)内生性检验。进一步,当地区碳排放强度提升时,政府会要求企业采用更为全面的数据监测平台评估碳排放水平,分析碳排放强度的驱动因素,提升智能高效的能源管理,不断提升创新和发展新的数字技术解决方案。这时数字技术在平衡经济增长以及绿色低碳提升方面将发挥重要作用。换言之,碳排放强度的提升有可能会促进数字技术的研发。因此不得不考虑数字技术创新和碳排放强度之间潜在的双向因果问题。为此,本文选取两阶段最小二乘

表4 稳健性检验结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	替换关键自变量	替换因变量	D-GMM 估计	2SLS 估计
L.lnCEI	0.594*** (15.69)	0.098** (2.15)	0.632*** (3.16)	
lnDTI	-0.019*** (-2.92)	-0.023*** (-2.75)	-2.518*** (-3.77)	-0.073*** (-2.88)
lnPGDP	-0.172** (-2.56)	0.049* (1.70)	0.227 (1.07)	-0.662*** (-15.83)
lnPENE	0.257*** (4.18)	0.848*** (15.92)	-0.785 (-1.57)	0.703*** (17.56)
lnCOAL	0.208*** (8.64)	0.271*** (9.98)	0.056 (0.52)	0.417*** (10.67)
lnFE	-0.112*** (-5.08)	0.020 (1.44)	0.022 (0.15)	-0.146*** (-10.96)
常数项	-0.635*** (-3.67)	-3.441*** (-15.82)		-2.660*** (-26.06)
AR(1)	0.005	0.058	0.046	
AR(2)	0.140	0.871	0.866	
Hansen 检验	0.410	0.309	0.327	
Kleibergen-Paap rk LM 统计量的 P 值				0.0000
Kleibergen-Paap rk Wald F 统计量				62.632

(2SLS)模型进行估计,工具变量选取1984年每万人电话机数量与年份的交互项(Cao et al., 2021; Wu et al., 2021)。这是因为当地历史电话机数量能侧面表明他们的信息与通信技术的发展基础,对未来数字经济发展有较强的引导作用;另一方面,历史数据不会对如今的碳排放强度产生影响。两阶段最小二乘的第二阶段结果展示在表4的列(4)中。其中, Kleibergen-Paap rk LM 统计量的 p 值小于 0.01, 表明工具变量的秩条件成立。Kleibergen-Paap rk Wald F 统计量大于 Stock-Yogo 统计量在 10% 水平上的临界值 (16.38), 表明可以拒绝“存在弱工具变量”的原假说 (Stock & Yogo, 2005)。数字技术创新的系数在 1% 的显著性水平下显著, 这表明基准回归的结果仍旧是稳健的。

(三) 机制分析

1. 结构效应

本文利用产业结构升级作为中介变量来表征数字技术创新影响碳排放强度的结构效应。其中表5的列(1)是基准回归结果,表明数字技术有效降低碳排放强度。列(2)估计了数字技术创新对产业结构升级的影响。估计结果显示 $\ln IND$ 的系数显著为正,表明数字技术创新能有效促进产业结构升级。具体而言, $\ln DTI$ 的系数为 0.011, 这表明数字技术创新提升 1% 会平均促进产业结构升级 0.011 个百分点。列(3)展示了产业结构升级对碳排放强度的影响,结果显示 $\ln IND$ 的系数显著为负 (-0.502), 这表明产业结构升级与碳排放强度有明显的负向相关关系,换句话说,产业结构升级指数每上升 1%, 会使碳排放强度下降 0.502%。也就是说,数字技术创新可以通过促进产业结构升级降低碳排放强度。此外, Sobel 检验结果证实了中介效应模型的成立。上述结果证实了假说 2 的成立。

2. 效率效应

进一步,本文利用全要素生产率 (TFP) 作为中介变量表征数字技术创新影响碳排放强度的效率效应中介。其中表5的列(4)展示了数字技术创新对全要素生产率的影响,结果显示 $\ln DTI$ 显著为正,也就是数字技术创新可以有效促进全要素生产率提升。具体而言,数字技术创新指数为 0.027, 也就是数字技术创新指数每升高 1%, 会大约促进全要素生产率平均上升 0.027%。紧接着,列(5)中的 $\ln TFP$ 系数显著为负, 这表明了全要素生产率的提升能有效降低碳排放强度。换句话说,全要素生产率每升高 1%, 会导致中国碳排放强度平均下降 1.865%。这个结果也被 Shen 等 (2019) 和 Hu 等 (2016) 学者证实。上述结果表明数字技术创新可以通过提升地区全要素生产率降低碳排放强度。最后, Sobel 检验的结果证实了中介模型的成立。假说 3 得到了充分验证。

表 5

机制检验结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	lnCEI	lnIND	lnCEI	lnTFP	lnCEI
lnDTI	-0.460*** (-4.70)	0.011*** (8.33)	-0.008 (-1.44)	0.027*** (11.69)	-0.007 (-0.67)
lnIND			-0.502*** (-3.08)		
lnTFP					-1.865*** (-10.56)
lnPGDP	-0.824*** (-14.67)	0.054*** (11.71)	-0.815*** (-42.65)	0.097*** (21.24)	-0.832*** (-33.22)
lnPENE	1.061*** (21.57)	0.022*** (5.44)	0.882*** (56.95)	-0.059*** (-10.85)	0.882*** (36.86)
lnCOAL	0.174*** (8.63)	-0.027*** (-7.67)	0.374*** (27.02)	0.066*** (15.12)	0.387*** (18.64)
lnFE	-0.419*** (-9.37)	-0.021*** (-7.85)	-0.048*** (-4.64)	0.048*** (7.67)	-0.214*** (-8.22)
常数项	-0.263 (-0.68)	0.895*** (48.22)	-2.961*** (-18.40)	2.326*** (203.67)	-0.047 (-0.11)
Sobel 检验			0.004		0.000
中介效应占比			42.7%		87.9%

注：Sobel 检验汇报的是 p 值。

(四) 异质性检验

1. 区域异质性

表 6 展现了数字技术创新影响碳排放强度的地区异质性结果,列(1)—(3)分别展示了中国东部、中部和西部样本估计结果^①。结果显示,中国东部地区和西部地区的数字技术发展能有效促进碳排放强度的降低,而中部地区的数字技术创新不能有效减少碳排放强度。这表明在中国东部和西部地区开展数字技术相关的产品研发以及创新活动能有效提升绿色效率降低碳排放影响。其中,东部地区和西部地区的数字技术创新系数分别是-0.102和-0.399,绝对值均显著高于全国平均水平,这进一步证实了两个地区的数字技术创新的绿色效应显著。而中部地区可能是由于承接了大量的东部地区的高碳产业资源,造成了环境效应显著下降。数字技术在当地的发展没有造成明显的减排效果,应当引起当地政府部门关注。

^①根据国家统计局的划分标准,将北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南划分为东部地区;将山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北和湖南划分为中部地区;将内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆划分为西部地区。

表 6 区域异质性估计结果

	(1)	(2)	(3)
	东部地区	中部地区	西部地区
<i>L.lnCEI</i>	0.489* (1.82)	0.123 (0.54)	0.471*** (5.00)
<i>lnDTI</i>	-0.102* (-1.88)	0.885 (0.65)	-0.399** (-2.72)
<i>lnPGDP</i>	-0.192 (-1.07)	-0.108 (-0.24)	-0.070 (-0.43)
<i>lnPENE</i>	0.336 (1.53)	0.802 (1.38)	-0.177 (-0.88)
<i>lnCOAL</i>	0.062 (1.53)	0.464* (2.07)	1.201** (2.46)
<i>lnFE</i>	-0.216* (-1.97)	-0.567 (-1.29)	-0.058 (-1.44)
常数项	-0.343 (-0.79)	-1.025 (-0.36)	-0.458 (-0.91)
AR(1)	0.071	0.039	0.045
AR(2)	0.784	0.205	0.594
Hansen 检验	0.958	0.997	1.000

2. 数字技术异质性

本文将数字技术划分为 12 个类别的技术和其他技术,并分别计算相应的技术创新指数,进行进一步的估计,结果如表 7 所示。其中,大部分数字技术创新均能显著降低碳排放强度。例如信息与通信设备技术创新的估计系数为-0.064,表明了信息与通信设备技术的提升有效降低了碳排放强度。有学者证实,信息与通信设备技术的应用可以压缩可再生能源成本(Moyer & Hughes, 2012),降低煤炭消耗(Sun & Kim, 2021),实现碳排放强度的降低。传感器和设备网络的系数为-0.092,也表明了其有显著降低碳排放强度的能力。传感智能控制技术能实现产品运行工况与系统所需工况的自动匹配,可有效降低产业能源消耗,实现节能减排。

然而,部分数字技术创新也可能有效促进碳排放强度的提升。例如移动通信技术的系数为 0.013,表明移动通信技术创新提升可能将促进碳排放强度的提升。尽管移动通信技术在近年来得到了快速发展,但是随着它们的更新迭代速度加快,废旧通信设备可能造成资源浪费与环境污染,处理过程中也将产生更多的温室气体排放(宋小龙等,2017)。电子测量创新技术的系数也显著为正,这表明无线电导航等新兴技术导致了碳排放强度的提升。这可能是技术提高了相关基础设施建设,进而导致碳排放增加。

表7 数字技术异质性估计结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
	高速网络	移动通信	安全性	传感器和设备网络	高速计算	大容量与高速存储	大容量信息分析	认知与意义理解	人性化接口	成像和声音技术	信息与通信设备	电子测量
L.lnCEI	0.645*** (10.72)	0.645*** (12.01)	0.487*** (19.26)	0.539*** (9.29)	0.542*** (13.22)	0.530*** (10.32)	0.517*** (10.55)	0.536*** (13.23)	0.742*** (12.29)	0.703*** (16.00)	0.566*** (10.42)	0.592*** (12.03)
lnDTI	-0.037*** (-3.17)	0.013* (1.97)	-0.063*** (-4.08)	-0.092*** (-5.57)	-0.039*** (-2.77)	-0.082*** (-4.87)	0.021** (2.55)	0.025** (2.72)	-0.057*** (-3.43)	-0.035** (-2.52)	-0.064*** (-4.70)	0.019*** (4.39)
lnPGDP	-0.029 (-0.66)	-0.321*** (-5.27)	-0.219*** (-3.97)	-0.106** (-2.22)	-0.218*** (-4.14)	-0.063 (-0.97)	-0.413*** (-9.63)	-0.418*** (-12.13)	0.075 (1.60)	-0.020 (-0.52)	-0.097* (-1.72)	-0.322*** (-8.23)
lnPENE	0.106* (2.01)	0.347*** (5.97)	0.304*** (8.12)	0.208*** (3.33)	0.307*** (6.59)	0.227*** (2.92)	0.465*** (7.94)	0.460*** (11.44)	0.003 (0.05)	0.097** (2.61)	0.188** (2.41)	0.381*** (5.94)
lnCOAL	0.223*** (4.80)	0.127*** (4.94)	0.195*** (4.91)	0.227*** (6.99)	0.202*** (3.86)	0.213*** (5.56)	0.192*** (6.28)	0.175*** (6.47)	0.184*** (5.30)	0.185*** (5.64)	0.213*** (8.31)	0.175*** (7.29)
lnFE	-0.153*** (-6.81)	-0.070*** (-5.21)	-0.161*** (-10.04)	-0.181*** (-7.09)	-0.152*** (-8.07)	-0.219*** (-11.42)	-0.104*** (-5.72)	-0.096*** (-3.64)	-0.142*** (-6.00)	-0.132*** (-6.74)	-0.165*** (-7.22)	-0.099*** (-5.12)
常数项	-0.231 (-1.64)	-0.903*** (-5.87)	-0.990*** (-7.77)	-0.519*** (-4.01)	-0.792*** (-4.92)	-0.362** (-2.29)	-1.148*** (-13.99)	-1.099*** (-10.67)	0.051 (0.40)	-0.195** (-2.06)	-0.507*** (-3.69)	-0.879*** (-10.11)
AR(1)	0.006	0.006	0.004	0.007	0.005	0.007	0.006	0.006	0.006	0.005	0.007	0.007
AR(2)	0.137	0.102	0.113	0.131	0.136	0.123	0.121	0.154	0.137	0.133	0.128	0.077
Hansen 检验	0.355	0.394	0.621	0.594	0.393	0.600	0.657	0.585	0.427	0.344	0.654	0.316

六、结论与政策启示

本文的主要研究结论如下:第一,数字技术创新有效降低了中国碳排放强度,提升了环境质量;第二,数字技术创新通过结构效应和效率效应间接降低碳排放强度,具体而言,数字技术创新能有效促进产业结构升级以及提升地区全要素生产率,进而降低碳排放强度;第三,数字技术创新可以明显降低中国东部地区和西部地区的碳排放强度;第四,从多种数字技术来看,大部分数字技术创新均能有效降低碳排放强度,但是移动通信技术、电子测量技术等的新趋势不利于现阶段碳排放强度降低。

根据上述研究结果,本文提出以下政策建议:

第一,积极推动数字技术发展,提升减碳支撑作用。本文结果证实,数字技术创新能有效降低碳强度。因此,政府应当逐渐重视数字技术在低碳经济领域的重要作用,加快提升数字技术发展,尤其应当加强政府对于数字相关产业的技术支撑。此外,政府要注重数字技术在

新能源、节能、能源互联网领域的支持,鼓励能源相关企业开展数字化转型服务,推广智慧能源体系,加强数字技术对碳强度的降低效果。最后,政府也可以通过建立数字技术创新基金、提高税收优惠等举措,刺激数字技术对于低碳发展的重要影响。

第二,推动产业升级优化,加快资源配置效率。机制检验结果显示,数字技术创新能通过优化产业结构以及提升全要素生产率降低碳排放强度。这提示政府应当加强各产业的数字化、智能化以及信息化提升,加强数字技术对产业效率提升的支撑作用。加快传统行业部署大数据、云计算以及互联网技术,构造智能管理信息平台,实现碳排放强度的降低。此外,政府也应当注重数字技术对于资源配置效率的推广,将数字服务融入各行各业,优化产品生产过程,提高产业效率,降低生产成本,进而提高能源利用效率与降低碳排放强度。

第三,因地制宜发展数字技术,优化数字技术服务。本文的异质性结果表明政府应当在东部地区发展数字技术同时,注重对于中部地区的产业替代效应,避免大规模进行产业转移,实现整体的碳强度的降低。另外,政府应当针对不同地区和行业的需求,制定具体的数字技术发展规划。例如促进信息与通信技术设备的大范围推广,加强项目与财政支撑。政府应当明确发展目标和发展路线,提升数字技术对于支持地方和产业低碳发展的重要作用。

参考文献:

- [1] 郝宇,李颖.人力资本对环境质量的影响——实证证据和机制分析[J].环境经济研究,2022,7(04):142-60.
- [2] 林伯强,刘希颖.中国城市化阶段的碳排放:影响因素和减排策略[J].经济研究,2010,8(1):66-78.
- [3] 蔺鹏,孟娜娜.环境约束下京津冀区域经济发展质量测度与动力解构——基于绿色全要素生产率视角[J].经济地理,2020,40(09):36-45.
- [4] 刘秉镰,武鹏,刘玉海.交通基础设施与中国全要素生产率增长——基于省域数据的空间面板计量分析[J].中国工业经济,2010,264(03):54-64.
- [5] 罗佳,张蛟蛟,李科.数字技术创新如何驱动制造业企业全要素生产率?——来自上市公司专利数据的证据[J].财经研究,2023,49(02):95-109+24.
- [6] 马丽梅,司璐.低碳城市与可再生能源技术创新[J].中国人口·资源与环境,2022,32(07):81-90.
- [7] 缪陆军,陈静,范天正,吕雁琴.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(02):45-57.
- [8] 裴长洪,刘斌.中国开放型经济学:构建阐释中国开放成就的经济理论[J].中国社会科学,2020,290(02):46-69+205.
- [9] 戚聿东,徐凯歌.后摩尔时代数字经济的创新方向[J].北京大学学报(哲学社会科学版),2021,58(6):138-146.
- [10] 戚聿东,褚席.数字经济发展,经济结构转型与跨越中等收入陷阱[J].财经研究,2021,47(7):18-32,168.
- [11] 任亚运,程芳芳,傅京燕.中国低碳试点政策实施效果评估[J].环境经济研究,2020,5(01):21-35.
- [12] 沈运红,黄桁.数字经济水平对制造业产业结构优化升级的影响研究——基于浙江省2008—2017年

面板数据[J]. 科技管理研究, 2020, 40(03): 147-154.

[13] 宋小龙, 李博, 吕彬, 陈钦, 白建峰. 废弃手机回收处理系统生命周期能耗与碳足迹分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(06): 2393-400.

[14] 孙文远, 周浩平. 数字经济对中国城市碳排放的影响效应及其作用机制[J]. 环境经济研究, 2022, 7(03): 25-42.

[15] 陶锋, 朱盼, 邱楚芝, 王欣然. 数字技术创新对企业市场价值的影响研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2023, 40(05): 68-91.

[16] 汪海玲. 数字技术创新对就业技能结构优化的影响[J]. 技术经济与管理研究, 2023, 32(03): 50-4.

[17] 王轩, 杨天剑, 舒华英. 信息技术 (ICT) 碳减排贡献研究[J]. 中国软科学, 2010, (S1): 144-8.

[18] 谢富胜, 吴越, 王生升. 平台经济全球化的政治经济学分析[J]. 中国社会科学, 2019, 12: 62-81.

[19] 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(02): 68-78.

[20] 徐敏, 姜勇. 中国产业结构升级能缩小城乡消费差距吗?[J]. 数量经济技术经济研究, 2015, 32(03): 3-21.

[21] 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(01): 111-129.

[22] 鄢哲明, 杜克锐, 张宁. 可再生能源技术创新与碳减排——基于地区经济发展不平衡视角[J]. 环境经济研究, 2022, 7(01): 56-77.

[23] 张鹏. 数字经济的本质及其发展逻辑[J]. 经济学家, 2019, 2(2): 25-33.

[24] 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): 155-73.

[25] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展[J]. 管理世界, 2020, (10): 65-75.

[26] Bano, S., L. Liu, and A. Khan. Dynamic Influence of Aging, Industrial Innovations, and ICT on Tourism Development and Renewable Energy Consumption in BRICS Economies[J]. Renewable Energy, 2022, 192: 431-42.

[27] Baron, R. M. and D. A. Kenny. 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.

[28] Bastida, L., J. J. Cohen, A. Kollmann, A. Moya, and J. Reichl. Exploring the Role of ICT on Household Behavioural Energy Efficiency to Mitigate Global Warming[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 103: 455-62.

[29] Ben Lahouel, B., L. Taleb, Y. Ben Zaied, and S. Managi. Does ICT Change the Relationship Between Total Factor Productivity and CO₂ Emissions? Evidence based on a Nonlinear Model[J]. Energy Economics, 2021, 101: 105406.

[30] Cao, X., M. Deng, and H. Li. How does E-commerce City Pilot Improve Green Total Factor Productivity? Evidence from 230 Cities in China[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 289: 112520.

[31] Chen, X., X. Gong, D. Li, and J. Zhang. Can Information and Communication Technology Reduce CO₂ Emission? A Quantile Regression Analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(32): 32977-92.

[32] Cheng, Y. and X. Yao. Carbon Intensity Reduction Assessment of Renewable Energy Technology Innovation in China: A Panel Data Model with Cross-Section Dependence and Slope Heterogeneity[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110157.

[33] Cheng, Z., L. Li, and J. Liu. Industrial Structure, Technical Progress and Carbon Intensity in China's Provinces[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2935-46.

[34] Dogan, A. and U. K. Pata. The Role of ICT, R&D Spending and Renewable Energy Consumption on Envi-

ronmental Quality: Testing the LCC Hypothesis for G7 Countries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380: 135038.

[35] Frey, C. B. and M. A. Osborne. The Future of Employment: How Susceptible are Jobs to Computerisation? [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2017, 114: 254–80.

[36] Gao, D., G. Li, and J. Yu. Does Digitization Improve Green Total Factor Energy Efficiency? Evidence from Chinese 213 Cities[J]. *Energy*, 2022, 247: 123395.

[37] Gao, W. and Y. Peng. Energy Saving and Emission Reduction Effects of Urban Digital Economy: Technology Dividends or Structural Dividends?[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(13): 36851–71.

[38] Ge, C., W. Lv, and J. Wang. The Impact of Digital Technology Innovation Network Embedding on Firms' Innovation Performance: The Role of Knowledge Acquisition and Digital Transformation[J]. *Sustainability*, 2023, 15(8): 6938.

[39] Hong, J., F. Shi, and Y. Zheng. Does Network Infrastructure Construction Reduce Energy Intensity? Based on the “Broadband China” Strategy[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2023, 190: 122437.

[40] Hu, H., X. Li, F. Yang, and J. Islam. Total Factor Productivity and Energy Intensity: An Empirical Study of China's Cement Industry[J]. *Emerging Markets Fiance & Trade*, 2016, 52(6): 1405–1423.

[41] Inaba, T. and M. Squicciarini. ICT: A New Taxonomy Based on the International Patent Classification[R]. 2017.

[42] Jin, X. and W. Yu. Information and Communication Technology and Carbon Emissions in China: The Rebound Effect of Energy Intensive Industry[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 32: 731–42.

[43] Jing, S., F. Wu, E. Shi, X. Wu, and M. Du. Does the Digital Economy Promote the Reduction of Urban Carbon Emission Intensity?[J]. *Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(4): 3680.

[44] Lange, S., J. Pohl, and T. Santarius. Digitalization and Energy Consumption. Does ICT Reduce Energy Demand?[J]. *Ecological Economics*, 2020, 176: 106760.

[45] Li, Z. and J. Wang. The Dynamic Impact of Digital Economy on Carbon Emission Reduction: Evidence City-level Empirical Data in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 351: 131570.

[46] Lin, B. and J. Zhu. The Role of Renewable Energy Technological Innovation on Climate Change: Empirical Evidence from China[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 659: 1505–12.

[47] Liu, J., L. Liu, Y. Qian, and S. Song. The Effect of Artificial Intelligence on Carbon Intensity: Evidence from China's Industrial Sector[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2022, 83: 101002.

[48] Lo, K. L., J. Zhang, and F. Xia. Does Digital Technology Innovation Work Better for Industrial Upgrading? An Empirical Analysis of Listed Chinese Manufacturing Firms[J]. *Applied Economics Letters*, 2022, (7): 1–6.

[49] Moyer, J. D. and B. B. Hughes. ICTs: Do They Contribute to Increased Carbon Emissions?[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2012, 79(5): 919–31.

[50] Shen, X., B. Lin, and W. Wu. R&D Efforts, Total Factor Productivity, and the Energy Intensity in China[J]. *Emerging Markets Finance & Trade*, 2019, 55(11): 2566–88.

[51] Stock, J. H. and M. Yogo. *Testing for Weak Instruments in Linear IV Regression*[M]. UK: Cambridge University Press, 2005.

[52] Sui, D. Z. and D. W. Rejeski. Environmental Impacts of the Emerging Digital Economy: The E-for-Environment E-Commerce?[J]. *Environmental Management*, 2002, 29(2): 155–63.

[53] Sun, H. What Are the Roles of Green Technology Innovation and ICT Employment in Lowering Carbon Intensity in China? A City-Level Analysis of the Spatial Effects[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 186: 106550.

- [54] Sun, H. and G. Kim. The Composite Impact of ICT Industry on Lowering Carbon Intensity: From the Perspective of Regional Heterogeneity[J]. *Technology in Society*, 2021, 66: 101661.
- [55] Sun, X., S. Xiao, X. Ren, and B. Xu. Time-Varying Impact of Information and Communication Technology on Carbon Emissions[J]. *Energy Economics*, 2023, 118: 106492.
- [56] Wang, J., Q. Jiang, X. Dong, and K. Dong. Decoupling and Decomposition Analysis of Investments and CO₂ Emissions in Information and Communication Technology Sector[J]. *Applied Energy*, 2021a, 302: 117618.
- [57] Wang, L., Y. Chen, T. S. Ramsey, and G. J. D. Hewings. Will Researching Digital Technology Really Empower Green Development?[J]. *Technology in Society*, 2021b, 66: 101638.
- [58] Wu, H., Y. Xue, Y. Hao, and S. Ren. How Does E-commerce City Pilot Improve Green Total Factor Productivity? Evidence from 230 Cities in China[J]. *Energy Economics*, 2021, 103: 105577.
- [59] Xu, Q. and M. Zhong. Shared Prosperity, Energy-Saving, and Emission-Reduction: Can ICT Capital Achieve a “Win-Win-Win” Situation?[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 319: 115710.
- [60] Yi, L. and H. R. Thomas. A Review of Research on the Environmental Impact of E-business and ICT[J]. *Environment International*, 2007, 33(6): 841-9.
- [61] Yoo, Y., R. J. B. Jr, K. Lyytinen, and A. Majchrzak. Organizing for Innovation in the Digitized World[J]. *Organization Science*, 2012, 23(5): 1398-408.
- [62] Zhang, J., Y. Lyu, Y. Li, and Y. Geng. Digital Economy: An Innovation Driving Factor for Low-Carbon Development[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, 96: 106821.
- [63] Zhong, K., H. Fu, and T. Li. Can the Digital Economy Facilitate Carbon Emissions Decoupling? An Empirical Study Based on Provincial Data in China[J]. *Environmental Research and Public Health*, 2022a, 19(11): 6800.
- [64] Zhong, M. R., M. Y. Cao, and H. Zou. The Carbon Reduction Effect of ICT: A Perspective of Factor Substitution[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022b, 181: 121754.
- [65] Zhou, X., D. Zhou, Q. Wang, and B. Su. How Information and Communication Technology Drives Carbon Emissions: A Sector-Level Analysis for China[J]. *Energy Economics*, 2019, 81: 380-92.

The Impact of Digital Technology Innovation on Carbon Emission Intensity: Based on the Analysis of Digital Technology Related to Patent Retrieval

Dong Kangyin, Wang Jianda, Jiang Qingzhe

(School of International Trade and Economics, University of International Business and Economics)

Abstract: To address global climate change, the Chinese government has implemented a series of actions to reduce carbon emissions intensity. Digital technology innovation, as a new “technology-economic paradigm,” will play a prominent role in fulfilling climate change responsibilities and obligations. Therefore, this article attempts to measure the level of digital technology innovation in 30 provinces of China from 2003 to 2019 using a patent retrieval method,

and based on this data, assess the direct effects, indirect effects, and heterogeneity effects of digital technology innovation on carbon emission intensity. The research results show that digital technology innovation can not only directly reduce carbon emission intensity, but also indirectly decrease it through structural effects (increasing industrial structure upgrading) and efficiency effects (improving total factor productivity). Further testing reveals significant regional and sectoral heterogeneity in the impact of digital technology innovation on carbon emission intensity. Finally, this article suggests that the government should accelerate the development of digital technology, promote the industrial structure upgrading, increase the resource allocation efficiency, and achieve rapid emission reduction.

Keywords: Digital Technology Innovation; Carbon Emission Intensity; Patent Retrieval; Industrial Structure Upgrading; Total Factor Productivity

JEL Classification: C33, O31, Q51

(责任编辑:卢 玲)