

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.04.001

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:马越峰,刘冰冰.数字经济如何影响碳排放强度——基于技术创新和产业链高质量发展链式中介效应的实证[J].西安理工大学学报,2024,40(4):451-460,470.

MA Yuefeng, LIU Bingbing. How the digital economy affects carbon emission intensity: based on the empirical evidence of the chain mediation effect of technological innovation and high-quality development of the industrial chain [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(4): 451-460, 470.

## 数字经济如何影响碳排放强度

——基于技术创新和产业链高质量发展链式中介效应的实证

马越峰, 刘冰冰

(内蒙古科技大学 经济与管理学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 针对数字经济如何促进碳减排问题,本研究基于中国30个(西藏除外)省份的面板数据,引入技术创新和产业链高质量发展两个关键中介变量,实证研究数字经济对碳排放强度的影响及内在机制。研究发现,数字经济对碳排放强度的影响表现为先增后减的倒“U”型变化趋势。传导机制表明,数字经济可以通过技术创新、产业链高质量发展降低碳排放强度,同时体现出明显的链式中介效应。异质性分析表明,高科技投入省域数字经济发展能显著降低碳排放强度,而低科技投入省域这一效应并不显著。本文研究结论为数字经济降碳拓展了多条路径,丰富了碳减排的相关研究。

**关键词:** 数字经济; 碳排放强度; 产业链高质量; 链式中介效应

**中图分类号:** F124; F49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2024)04-0451-10

### How the digital economy affects carbon emission intensity: based on the empirical evidence of the chain mediation effect of technological innovation and high-quality development of the industrial chain

MA Yuefeng, LIU Bingbing

(School of Economics and Management, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** In response to the question of how the digital economy can promote carbon emission reduction, based on the panel data from 30 provinces in China (excluding Tibet), this study empirically studies the impact of the digital economy on carbon emission intensity and its internal mechanism by introducing two key intermediary variables: technological innovation and high-quality development of the industrial chain. The results show that the impact of digital economy on carbon emission intensity shows an inverted “U” shaped trend of first increasing and then decreasing. The transmission mechanism shows that the digital economy can reduce carbon emission intensity through technological innovation and high-quality development of the industrial chains, and that at the same time it can reflect an obvious chain intermediary effect. Heterogeneity analysis shows that the development of high-tech investment in provincial digital economy can significantly reduce carbon emission intensity, while the effect of low-tech investment in provinces is of

收稿日期: 2024-04-23; 网络首发日期: 2024-10-11

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20241010.2051.008>

基金项目: 教育部人文社科资助项目(22YJA630081); 内蒙古自治区规划办资助项目(2021NDB078)

第一作者: 马越峰, 女, 硕士, 教授, 硕导, 研究方向为生态经济管理。E-mail: myf6958@sina.cn

通信作者: 刘冰冰, 女, 硕士生, 研究方向为生态经济管理。E-mail: 13028674585@163.com

no significance. The research conclusions of this paper expand multiple paths for carbon reduction in the digital economy and enrich the relevant research on carbon emission reduction.

**Key words:** digital economy; carbon emission intensity; high quality of industrial chain; chain intermediary effect

二氧化碳的持续排放加速了地球表面温度上升,气候变暖是经济可持续发展中面临的环境问题之一,在气候变化治理的框架内促进碳减排已成为全球共识。由信息技术催生的数字经济作为一种新型经济形态,与实体经济相融合,已经成为经济增长的新引擎,2022年我国数字经济占GDP比重达到41.5%<sup>[1]</sup>,此外,数字经济在环境治理中也扮演着重要角色,为助力碳减排带来了新的发展潜能<sup>[2]</sup>。然而,在数字经济发展初期,基础设施建设及运行信息设备会导致电力等能源需求上升,使得增碳效应凸显。现有文献对“数字增碳”还是“数字降碳”的争论一直存在。因此,本文将探索数字经济对碳排放的影响机制。

探究数字经济的碳减排效应已成为学术界的研究热点之一。已有学者从理论与实证的双重维度验证了数字经济对碳排放的影响机制,研究表明,数字经济水平的提升与碳减排效果呈正向相关关系,即数字经济水平越高,碳减排效应越明显<sup>[3-4]</sup>;也有学者发现,数字经济对碳排放的影响为先促进后抑制的倒“U”型关系<sup>[5]</sup>、倒“N”型关系<sup>[6]</sup>等。还有部分研究聚焦于碳减排的传导路径,其研究表明,数字经济可以通过环境规制<sup>[7]</sup>、能源结构调整<sup>[8]</sup>、产业结构升级<sup>[9]</sup>、技术创新<sup>[10]</sup>、人力资本积累<sup>[11]</sup>等路径降低碳排放量。技术创新是产业链高质量发展的“加速器”,在数字经济影响碳排放强度的机理中,数字经济是否会影响产业链高质量发展的链式中介效应?

现有关于数字经济对产业链影响的研究主要包括:数字经济通过新要素、新模式、新产业、新业态提升产业链韧性<sup>[12]</sup>;数字经济从创新投入和创新利润两个维度促进产业链创新<sup>[13]</sup>;数字经济通过数字技术和实体经济融合,增强产业链关键技术创新与供给能力,赋能产业链现代化发展<sup>[14]</sup>;数字经济通过促进产业链畅通循环、强化产业链关键环节控制力,实现产业链的安全稳定<sup>[15]</sup>。产业链测度方面,较多学者从产业链韧性、产业链创新、产业链协同、产业链可持续发展等维度构建综合指标体系,对产业链现代化进行测度<sup>[16-17]</sup>,目前仅有一篇文献对产业链高质量发展进行了测度<sup>[18]</sup>。

纵观现有文献,主要存在两方面不足:一是学者

们大多从单一维度探讨数字经济对产业链发展的影响,但产业链发展是涉及产业链上下游的多主体、多维、立体的协同发展,仅从单一维度进行探究,不能准确反映产业链发展的全貌,而产业链高质量发展强调整个产业链的协调发展,要求实现产业链效益的最大化;二是现有文献主要探究数字经济通过技术创新、产业结构升级促进碳减排,较少将产业链高质量发展作为中介变量进行研究。此外,有关技术创新和产业链高质量发展在数字经济和碳排放之间的链式中介效应研究也比较少。

因此,本文选取我国2012—2021年30个省份的面板数据,深入探究数字经济对碳排放强度的影响和作用机制。本文的边际贡献在于:1)在产业链现代化测度指标的基础上,基于高质量发展内涵,从创新、协调、绿色、开放和共享五个维度构建产业链高质量发展指标体系,测算省域产业链高质量发展水平,丰富了产业链高质量发展的相关研究;2)探究数字经济对碳排放强度的传导机制,引入技术创新和产业链高质量发展双中介变量,从省域层面验证数字经济和碳排放强度之间可能存在的链式中介效应,为促进碳减排提供了新的思路。

## 1 理论分析与研究假设

### 1.1 数字经济与碳排放强度

数字经济作为一种新的经济形态,为中国经济发展注入了新的活力。但数字经济发展初期可能会呈现“数字增碳”的负外部性特征。首先,企业在数字化转型初期,需通过购置生产设备扩大生产规模,而清洁能源供应难以满足新增需求,导致传统能耗增加,势必会带来碳排放强度的增加<sup>[19]</sup>。其次,以软件和信息技术服务业,计算机、通信和其他电子设备制造业等为代表的数字产业属于典型的电力密集型产业,这些产业发展过程中伴随着大数据的生成、传输和处理,对电力的需求尤为显著,这直接导致了能源消费的增加和二氧化碳排放量的上升<sup>[20-21]</sup>。

随着数字产业化与产业数字化程度的提高,数字技术的发展为中国经济绿色低碳转型和可持续发展提供了强大推动力,其降低碳排放强度的正外部性特征越来越明显。数字经济的发展不仅局限于信息技术领域,它还展现出强大的融合性和渗透能力,能够与工业、建筑、农业等行业深度融合<sup>[22]</sup>。将数

字技术运用于生产实践,可以优化资源配置,控制生产过程中的能耗,实现能源的高效利用,从而减少单位产出的碳排放,赋能企业向环境友好和绿色化转型发展。同时,数字经济推动了互联网、区块链等技术密集型产业的发展,这些产业在国民经济中占比增加的同时,压缩了高耗能、高排放产业在国民经济中的比重,而高新技术产业更倾向于采用清洁能源和新技术,这又推动了产业结构升级和优化,使得碳排放减少。由此可见,数字经济在不同发展阶段会对碳排放强度产生不同的影响,故本文提出研究假设 1:

H<sub>1</sub>:数字经济对碳排放强度的影响表现出先上升后下降的倒“U”型非线性特征。

### 1.2 技术创新的中介效应分析

在全球碳中和时代,技术创新成为实现“双碳”目标的重要抓手。数字经济对技术创新的影响主要表现为:一是随着数字化共享网络平台的应用,加快了信息流通及交换速度,有助于降低企业、高校等创新主体的信息获取和学习成本,促进技术创新。同时,随着数字要素向行业内部渗透、融合,技术创新效率及市场转化能力呈现动态持续提升特征。二是数字经济能够缓解技术创新的融资约束。技术研发等创新活动通常需要投入大量的时间和资源,且因其沉没成本较高、风险较高而面临较严重的融资难题,数字经济能克服传统金融的局限性<sup>[23]</sup>,为企业的技术创新提供资金支持,从而缓解创新活动的融资约束。与此同时,技术创新尤其是绿色技术能够推动节能减排,例如将清洁生产技术应用用于生产过程,可降低单位产品生产能耗,提升绿色产出效率<sup>[24]</sup>,这为降低碳排放强度提供了动力。清洁能源如太阳能、风能等可再生能源技术的应用改变了能源消费结构。充分发挥新能源对传统能源的“挤占效应”,可以推动高耗能、高排放产业向高技术密集型产业转型,以实现技术赋能碳减排。此外,“数字”技术创新能够突破空间、地域、行业约束溢出,促进资源要素跨地区流动,提高资源利用效率。由此,本文提出研究假设 2:

H<sub>2</sub>:数字经济通过技术创新降低碳排放强度。

### 1.3 产业链高质量发展的中介效应分析

在数字经济时代,产业链高质量发展是促进绿色增长的重要驱动因素。数字经济促进了产业链的数字化整合。数字经济通过数据建立无形的现代化信息网络,借助区块链、大数据等数字技术,增加了产业链的透明度,促进了产业链上企业之间的信息共享、紧密合作和协调发展,实现了产业链的深度融

合及多维度增长,提升了供应链的生产和运营效率<sup>[25]</sup>,从而达到降低能耗和废弃物排放的目标。数字经济改变了产业链的发展模式。随着产业链的数字化整合以及数字经济在产业链上的联动,产业链上下游企业将大数据和人工智能技术等新的生产要素、资源应用于生产管理过程,通过促进生产设备更新和生产工艺升级、精确控制生产流程、减少过度生产和库存积压,提升了管理水平和生产效率<sup>[26]</sup>,通过降低因生产和存储过程中的能源消耗而导致的碳排放,促进了高效、低碳生产模式的建立。数字经济降低了产业链中信息传播的成本,减少了因信息不对称产生的经济损失,为企业之间的供需提供了精准匹配路径,提高了资源配置效率。据此,本文提出研究假设 3:

H<sub>3</sub>:数字经济通过产业链高质量发展降低碳排放强度。

### 1.4 技术创新和产业链高质量发展的链式中介效应分析

数字经济通过能源管理和能源新技术双重创新,推动产业链高质量发展并实现降碳目标。在能源管理方面,利用数字化技术如智能电网、能源大数据分析等,可以实时监控和优化能源消耗,提升产业链整体能源利用效率。在能源新技术层面,数字化能够助力新能源技术的研发与应用,如将风能、太阳能等可再生能源的智能调度和储能技术应用用于产业链,可以大幅减少产业链各企业对化石能源的依赖,降低能耗,进而降低碳排放强度。其次,数字经济的核心是信息和数据,云计算、大数据分析、人工智能、信息通信技术(ICT)等数字技术的发展和运用,催生了一批平台经济、共享经济、智能制造和金融科技等新业态产业,这些产业将逐步替代传统生产方式,并促进产业链重构与优化,推动产业链向高附加值、高质量方向发展<sup>[27]</sup>,从而促使整个产业链碳排放强度的降低。最后,技术创新和产业链高质量发展是连接数字经济和碳排放强度的关键环节,数字经济提供了全球范围内的信息共享平台,加速了知识传播和技术扩散,为技术创新提供了丰富资源。同时,将数字创新技术应用用于产业链,可以激发知识溢出效应,使产业链由实体协作拓展到网络空间聚集,促进了跨区域产业链的发展,有助于优化区域产业布局,实现更高效的资源配置,从而降低碳排放水平。技术创新与产业链的高度融合已成为产业链高质量发展的关键要素,研究表明,两者的交互作用能够显著降低碳排放强度<sup>[28]</sup>。因此,本文提出研究假设 4:

H<sub>4</sub>:数字经济通过促进技术创新,推动产业链高

质量发展,进而降低碳排放强度,即链式中介效应。

综上所述,数字经济对碳排放强度的影响机理如图1所示。

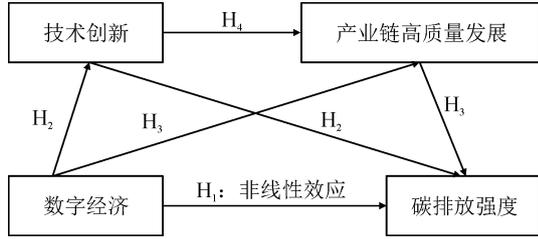


图1 数字经济对碳排放强度的影响机理

Fig. 1 Impact mechanism of digital economy on carbon emission intensity

## 2 研究设计

### 2.1 模型设定

为验证假设  $H_1$ , 构建双向固定效应模型进行分析, 具体模型如下:

$$C_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 S_{it} + \alpha_2 S_{it}^2 + \alpha_3 X_{it} + \delta_i + \gamma_t + \epsilon \quad (1)$$

式中:  $C_{it}$  为  $t$  时期第  $i$  个省份的碳排放强度;  $S_{it}$  为  $i$  省份在  $t$  时期的数字经济发展水平, 为验证数字经济对碳排放强度的非线性影响, 加入数字经济的平方项  $S_{it}^2$ ;  $X_{it}$  为控制变量;  $\alpha_0$  为常数项;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别为数字经济、数字经济平方项以及控制变量的系数;  $\delta_i$  为个体效应;  $\gamma_t$  为时间效应;  $\epsilon$  为随机扰动项。

为检验数字经济的作用路径, 首先需要对两个中介变量分别进行检验。  $M_{it}$  表示中介变量(技术创新和产业链高质量发展)。

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 S_{it} + \beta_2 X_{it} + \epsilon \quad (2)$$

$$C_{it} = c_0 + c_1 S_{it} + c_2 M_{it} + c_3 X_{it} + \epsilon \quad (3)$$

式中:  $\beta_0$ 、 $c_0$  为常数项;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别为数字经济和控制变量系数;  $c$  为各项系数。

式(2)、(3)体现了数字经济通过两个中介变量对碳排放强度产生的作用。但中介变量之间也可能会产生链式中介效应, 所以为阐明具体传导路径, 本文采用逐步回归法建立以下链式中介效应模型:

$$T_{it} = e_0 + e_1 S_{it} + e_2 X_{it} + \epsilon \quad (4)$$

$$Q_{it} = \varphi_0 + \varphi_1 S_{it} + \varphi_2 T_{it} + \varphi_3 X_{it} + \epsilon \quad (5)$$

$$C_{it} = a_0 + a_1 S_{it} + a_2 T_{it} + a_3 Q_{it} + a_4 X_{it} + \epsilon \quad (6)$$

式中:  $T_{it}$  为技术创新;  $Q_{it}$  为产业链高质量发展;  $e_0$ 、 $\varphi_0$ 、 $a_0$  为常数项;  $e$ 、 $\varphi$ 、 $a$  分别为各项系数。若式(1)中  $\alpha_1$  显著, 则根据 Preacher 等<sup>[29]</sup> 提出的链式中介效应验证技术创新和产业链高质量发展在数字经济和碳排放强度之间的链式中介作用。

式(4)检验了数字经济对技术创新的影响; 式(5)是在控制数字经济的情况下, 检验技术创新对产业链高质量发展的影响; 式(6)是在控制数字经济和技术创新的基础上, 检验产业链高质量发展对碳排放强度的影响。

### 2.2 变量选取

1) 被解释变量: 碳排放强度( $C$ )。本文采用二氧化碳排放量与该地区生产总值(GDP)的比值取对数进行衡量, 以此来消除异方差的影响。

2) 核心解释变量: 数字经济发展水平( $S$ )。本文选取数字经济综合指数来表征。参考钱海章等<sup>[30]</sup>、许钊等<sup>[31]</sup>的研究方法, 选取数字基础设施、数字产业化和产业数字化三个维度, 运用熵值法进行测算, 如表1所示。

表1 数字经济评价指标体系

Tab. 1 Digital economy evaluation index system

一级指标	二级指标	权重
数字基础设施	互联网宽带接入端口/万个	0.067 1
	互联网接入用户数/万人	0.065 4
	邮政营业网点/万个	0.043 7
数字产业化	电信业务总量/万元	0.203 7
	软件业业务收入/万元	0.135 4
	域名数/万个	0.146 5
产业数字化	数字普惠金融指数	0.048 5
	电子商务销售额/亿元	0.166 6
	企业拥有网站数/万个	0.123 1

3) 中介变量。技术创新( $T$ )采用发明专利申请授权量来衡量。产业链高质量发展( $Q$ )涉及经济增长、环境保护、社会共享发展等多个维度, 单一维度指标难以全面反映发展目标要求, 故采用多维度指标。新发展理念是推动经济高质量发展的核心指引和动力源泉, 为产业链高质量发展提供了前瞻性引领和支撑。因此, 本文从创新、协调、绿色、开放和共享五个层面构建产业链高质量发展指标体系, 并运用熵权法进行计算, 如表2所示。

表2 产业链高质量发展指标体系  
Tab.2 Index system for the high-quality development of the industrial chain

目标层	准则层	指标层	指标说明	权重
创新发展		R&D人员全时当量/(人·年)	规模以上工业企业 R&D 人员全时当量	0.071 4
		R&D投入强度/元	R&D经费与 GDP 的比值	0.021 4
		技术产出/件	规模以上工业企业专利申请数	0.085 7
		经济产出/万元	规模以上工业企业新产品销售收入	0.072 1
		市场流动/亿元	技术市场成交额	0.101 7
协调发展		产业高级化/%	高技术产业利润占比	0.024 6
		数字普惠金融	北京大学数字普惠金融指数	0.011 9
		上下游协同/个	专精特新小巨人数量	0.183 9
产业链高质量发展	绿色发展	政府支出/亿元	地方财政环境保护支出	0.024 7
		电能使用效率	GDP 与电力消费量的比值	0.036 8
		绿化覆盖率/%	建成区绿化覆盖率	0.007 0
开放发展		全球产业链参与度	外商投资企业数 外商投资出口总额	0.085 9 0.118 7
		外贸依存度	进出口总额与 GDP 的比值	0.045 8
		城乡消费差距	城乡居民消费支出之比	0.015 0
共享发展		网络共享/万户	互联网宽带接入用户数	0.034 2
		交通便利度/万 km	高速公路里程	0.016 8
		社保支出/亿元	地方财政社会保障和就业支出	0.021 4
		数据共享/万 km	长途线缆长度	0.021 0

量作为控制变量:经济水平( $g$ ),采用各地区生产总值取对数来表示;人口密度( $p$ ),采用年末常住人口与地区面积的比值表示;产业结构合理化( $n$ ),采用泰尔指数的倒数来度量;教育水平( $d$ ),采用人均高校在校生人数表示;政府干预( $v$ ),采用地区财政支出与生产总值的比值表示。

## 2.3 数据来源

二氧化碳排放量数据来源于 CEADs 数据库。数字经济发展各指标、中介变量技术创新和产业链高质量发展原始数据来源于中国统计年鉴、各省份统计年鉴等,其中专精特新小巨人企业数量来源于工信部发布的专精特新小巨人企业名单目录。部分缺失值采用线性插值法补齐。

各变量的描述性统计结果如表3所示,碳排放强度的最大值为0.064,最小值为0.002,平均值是0.018;数字经济发展水平最大值为0.811,最小值为0.000,平均值是0.147,说明各地区碳排放强度和数字经济发展水平差异较大,还有待进一步研究。

表3 主要变量的描述性统计结果

Tab.3 Descriptive statistical results for the main variables

变量名称	变量符号	观测值	最大值	最小值	平均值	标准差
碳排放强度	C	300	0.064	0.002	0.018	0.013
数字经济发展水平	S	300	0.811	0.000	0.147	0.138
技术创新	T	300	80.077	0.559	11.041	13.004
产业链高质量发展	Q	300	0.816	0.032	0.135	0.111
经济水平	g	300	11.734	7.332	9.868	0.882
人口密度	p	300	5 541	1 032	2 928.193 1	127.044
产业结构合理化	n	300	122.560	1.312	12.618	15.274
教育水平	d	300	0.042	0.009	0.021	0.005
政府干预	v	300	0.758	0.105	0.263	0.113

## 3 碳排放强度的空间特征分析

数字技术的应用打破了省域的时空壁垒,促进了省域经济的协同发展。相邻区域受空气、风速等自然因素影响会产生二氧化碳扩散,此外,产业转移和集聚效应也可能导致二氧化碳扩散或转移,例如经济发达区域向不发达区域转移高碳产业,导致不

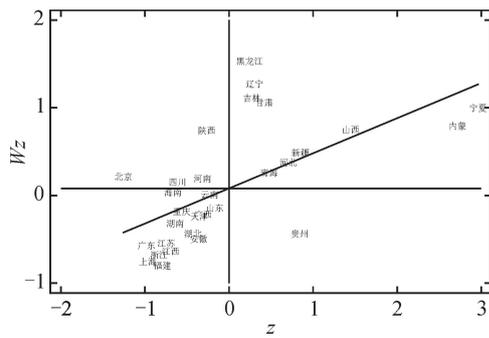
4) 控制变量。参考相关文献<sup>[32]</sup>,使用以下变

发达地区承接了碳转移,因此相邻省份的碳排放强度也存在一定的空间关联。运用全局 Moran's *I* 指数对两者进行空间自相关分析,并以 2012、2021 年为时间截面绘制了碳排放强度的莫兰散点图,如表 4、图 2 所示。由结果可知,在邻接权重矩阵下,碳排放强度和数字经济发展指数的 Moran's *I* 指数均大于 0,且都通过了 1% 的显著性检验,表明研究期内我国碳排放强度和数字经济各自存在正向的空间相关性。

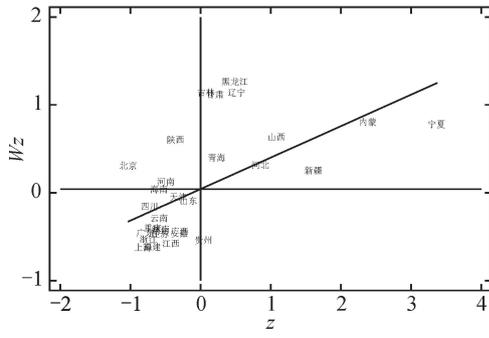
表 4 2012、2021 年数字经济与碳排放强度的莫兰指数

Tab. 4 Moran's index for digital economy and carbon emission intensity in 2012 and 2021

年份	Moran's <i>I</i>	
	碳排放强度	数字经济
2012	0.411	0.192
2013	0.396	0.216
2014	0.418	0.212
2015	0.431	0.218
2016	0.415	0.245
2017	0.393	0.255
2018	0.410	0.240
2019	0.402	0.232
2020	0.385	0.211
2021	0.370	0.192



(a) 2012年(Moran's *I*=0.400)



(b) 2021年(Moran's *I*=0.358)

图 2 2012 和 2021 年我国碳排放强度莫兰散点图  
Fig. 2 Moran scatter plots of China's carbon emission intensity in 2012 and 2021

由图 2 可以看出,2012 年 H-H(高-高)集聚区主要集中在内蒙古、宁夏、黑龙江、新疆等地,这些地区不仅自身碳排放强度高,而且影响到周围其他地区(也是高值),这类省份应推广高效节能技术,大力发展绿色产业,调整产业结构,降低高耗能、高排放行业的比重。L-L(低-低)集聚区主要分布在长江三角洲、珠江三角洲、福建、上海等东部沿海地区,这些区域的碳排放强度较低且在空间上相连,形成了碳排放强度的“冷点”区域。这类地区较少依赖重工业,应大力发展以服务业、信息技术等为主导的低碳产业,应利用大数据、物联网等信息技术,促进智慧城市建设和加强区域合作和示范引领作用,降低区域整体碳排放强度。H-L(高-低)区域仅有贵州一个省份,可能是产业结构中高碳产业占比较高,能源利用率较低所致。L-H(低-高)区域主要分布在北京、陕西、四川等地,这类地区位于高值区附近,而自身碳排放强度较低,易在局部形成多个“洼地”,故应与周边省份积极分享绿色发展经验和技,提高碳交易市场的活跃度,从而带动周边高碳排放省份实现绿色转型。2021 年,H-H、L-L、L-H 区域的省份基本不变,但其内部结构和空间分布形态仍有不同程度的变化,且均向零点附近移动,例如贵州移动到了 L-L 区域附近。说明各地高度重视双碳目标,通过采取综合措施,推动碳排放强度的整体降低。

### 4 实证结果与分析

#### 4.1 基准回归结果

表 5 是数字经济对碳排放强度影响的基准回归结果(据式(1)),由表可知,数字经济发展能显著降低碳排放强度。在未添加控制变量时(列①),数字经济发展水平每提高 1% 会导致碳排放强度降低约 0.882%;进一步,加入控制变量后(列②),数字经济每提高 1% 会使碳排放强度降低 1.006%,这表明数字经济对碳排放强度的影响更为显著。第③列是加入数字经济发展水平平方项后的估计结果,结果显示一次项系数为 0.551,平方项系数为 -1.219,且二者均通过了 1% 的显著性检验。由此,假设 H<sub>1</sub> 成立,数字经济对碳排放强度的影响呈倒“U”型。这是由于在数字经济发展初期,生产过程优化、技术开发和应用都需要投入大量的资源,且数字经济规模较小,高投入和高成本的特点导致碳排放强度增加。当数字经济水平提高到一定程度,资本投入和技术创新的正向净效应逐渐产生,例如,云计算和大数据技术的应用优化了资源配置,提高了能源使用效率,人工智能在能源管理和优化中的应用也大幅减少了

不必要的能耗和碳排放。从控制变量来看,经济发展推动了企业低碳技术的研发与应用,如可再生能源、能源存储等,这些技术的推广和应用可降低单位产品或服务的碳排放,有利于资源的循环利用;政府干预系数为负,说明各级政府对碳减排的重视程度逐渐提高,也说明加大节能环保支出、促进绿色低碳技术的研发应用,有利于节能减排。

表5 基准回归结果

Fig. 5 Benchmark regression results

变量	C		
	①	②	③
S	-0.882*** (0.042)	-1.006*** (0.043)	0.551*** (0.023)
S <sup>2</sup>			-1.219*** (0.012)
g		-0.622*** (0.001)	-0.523*** (0.005)
p		0.000 04*** (0.043)	0.000 03*** (0.182)
n		-0.001** (0.032)	-0.000 8* (0.043)
d		-2.802** (0.054)	-2.966* (0.048)
v		-0.183* (0.076)	0.255* (0.047)
常数项	-3.873*** (0.000)	-4.546*** (0.001)	0.463* (0.089)
地区固定	是	是	是
年份固定	是	是	是
观测值	300	300	300
R <sup>2</sup>	0.854 4	0.867 1	0.907 1

注:\*\*\*、\*\*、\* 分别代表在 1%、5%、10% 的水平下显著;括号内为稳健标准差(下同)。

#### 4.2 链式中介效应检验结果

根据式(2)~(7)进行中介效应检验,检验结果如表6所示,然后利用 Bootstrap 进行链式中介效应检验,结果如表7所示。

根据表6列①分析结果,数字经济对技术创新有显著的正向影响( $\beta_1 = 1.400, P < 0.01$ ),同时列③结果显示,技术创新对碳排放强度具有显著负向影响( $c_2 = -0.001, P < 0.05$ )。进一步,经 Bootstrap 中介效应检验,估计系数为-0.445 且 95%置

信区间不包括 0,因此,数字经济能通过技术创新降低碳排放强度,假设 H<sub>2</sub> 成立。

表6列②中数字经济能促进产业链高质量发展( $e_1 = 0.636, P < 0.01$ ),列④中产业链高质量发展对碳排放强度的统计结果显著( $b_2 = -0.262, P < 0.01$ ),说明技术创新在数字经济与碳排放强度之间存在中介作用。经 Bootstrap 中介效应检验,估计系数为-0.356 且 95%置信区间不包括 0,因此,数字经济能通过产业链高质量发展降低碳排放强度,假设 H<sub>3</sub> 成立。

本文检验了链式中介效应,即数字经济通过影响技术创新促进产业链高质量发展,进而降低碳排放强度。表6列⑤结果显示,技术创新能显著促进产业链高质量发展( $\varphi_2 = 0.012, P < 0.01$ )。经过 Bootstrap 检验,估计系数为-0.677 且 95%置信区间不包括 0,表明数字经济能通过技术创新促进产业链高质量发展,进而降低碳排放强度,假设 H<sub>4</sub> 成立。在这一过程中,数字经济是初始推动力,它通过技术创新促进产业链高质量发展,最终实现降低碳排放强度的目标。这一链式中介效应揭示了从数字经济发展、技术创新到产业链高质量发展,再到环境效益实现的完整路径,为实现“双碳”目标提供了有效途径。

表6 中介效应回归分析

Fig. 6 Regression analysis of mediating effects

变量	T	Q	C	C	Q	C
	①	②	③	④	⑤	⑥
S	1.400*** (0.010)	0.636*** (0.000)	-1.231*** (0.058)	-0.602*** (0.170)	0.197*** (0.000)	-0.909*** (0.074)
T			-0.001** (0.176)		0.012*** (0.000)	0.002** (0.055)
Q				-0.262*** (0.040)		-0.265*** (0.026)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
常数项	5.789 (0.026)	-0.574*** (0.033)	-4.621*** (0.001)	-6.128*** (0.001)	-0.635*** (0.008)	-6.351*** (0.000)
地区、年份固定	是	是	是	是	是	是
观测值	300	300	300	300	300	300
R <sup>2</sup>	0.911 8	0.867 2	0.867 3	0.875 6	0.929 9	0.877 5

表 7 Bootstrap 中介效应检验  
Fig. 7 Bootstrap mediating effect test

变量	中介效应	估计系数	标准误	95%置信区间	
				上限	下限
碳排放强度	S→T→C	-0.445***	0.021	-0.612	-2.138
	S→Q→C	-0.356***	0.014	2.183	0.542
	S→T→Q→C	-0.677***	0.019	1.339	0.126
	总间接效应	-1.468***	0.022	-0.578	-1.278

4.3 稳健性检验

4.3.1 内生性检验

针对可能存在的内生性问题,如遗漏变量或自变量和因变量双向互为因果,本文以数字经济发展水平滞后一期作为工具变量进行回归分析。由表 8 可知,C-D Wald F 统计量的值为 223.47,远大于 10,表明通过弱工具变量检验,即工具变量的选取是合理的,同时最小二乘法回归结果和基准回归结果基本一致,表明在考虑内生性问题后,实证结果依然具有稳健性。

4.3.2 剔除直辖市

由于直辖市在经济发展水平、基础设施建设方面与其他省份存在差异,故剔除 4 个直辖市,结果见表 8。其回归结果与包含直辖市时的基准回归结果基本一致,表明结果具有良好的稳健性,即数字经济能显著降低碳排放强度。

4.3.3 变量缩尾再检验

为避免极端值影响实证结果,本文对所有变量进行 1%分位上的双边缩尾处理(见表 8)。缩尾处理后,数字经济对碳排放强度仍有显著的负向影响,表明基准回归结果具有稳健性。

表 8 稳健性检验  
Fig. 8 Robustness test

变量	C		
	内生性检验	剔除直辖市	变量缩尾
S	-0.611*** (0.000)	-0.774*** (0.000)	-0.557*** (0.000)
常数项	1.445 (0.056)	1.339 (0.036)	1.609*** (0.004)
控制变量	是	是	是
地区固定	是	是	是
年份固定	是	是	是
C-D Wald F	223.47		
观测值	300	260	300
R <sup>2</sup>	0.887 3	0.897 4	0.893 2

注:C-D Wald F 为弱工具变量统计量。

4.4 科技投入异质性

科技投入有助于培育数字经济产业,提升数字基础设施水平,可为人工智能、大数据等软件技术的开发提供关键支撑。为探究不同科技投入省份的数字经济发展对碳排放强度的影响,本文选用各省份科学技术支出与一般预算支出的比值来衡量省域科技投入,将各省份每年加和的平均数作为标准,划分高科技投入地区和低科技投入地区,结果如表 9 所示。在高投入省份,数字经济能显著降低碳排放强度,而在低投入省份,这一结果并不显著。可能原因在于:在高科技投入地区,数字基础设施和技术研发能力较为成熟,能较好地推动数字经济与实体经济融合,实现价值链从低端生产向高端价值输出的攀升,降低碳排放强度;而在低科技投入地区,绿色创新技术尚未得到广泛普及和应用,碳减排效果还未显现,甚至可能因为资金投入、建立和维护基础设施导致碳排放增加,出现逆效果。

表 9 数字经济对碳排放强度影响的异质性检验  
Fig. 9 Heterogeneity test of the impact of digital economy on carbon emission intensity

变量	C	
	高投入地区	低投入地区
S	-0.108** (0.037)	-0.212 (0.103)
控制变量	控制	控制
常数项	-6.453*** (0.004)	-2.716 (0.269)
地区固定	是	是
年份固定	是	是
观测值	300	300
R <sup>2</sup>	0.982 9	0.829 7

5 结论与建议

基于高质量发展内涵,采用中国 30 个(西藏除外)省份面板数据,从创新、协调、绿色、开放和共享五个维度构建了产业链高质量发展指标体系并进行测度。运用固定效应模型、链式中介效应模型等,深入分析了数字经济对碳排放强度的影响。研究发现,数字经济对碳排放强度的作用具有复杂的动态特征,主要表现为先促进后抑制的倒“U”型变化趋势。就传导机制而言,数字经济可以通过技术创新、产业链高质量发展降低碳排放强度,同时体现出明显的链式中介效应。异质性检验表明,高科技投入

省域数字经济发展能显著降低碳排放强度,而低科技投入省域这一效应并不显著。

根据上述结论,提出以下建议。

1) 利用数字经济的强大算力和大数据分析能力,精准把握产业链各环节的能源需求和消耗情况,为技术创新提供方向。促进绿色能源、节能环保、清洁生产等技术与传统产业的深度融合,实现产业链各环节能源的高效利用。通过数字化协作平台推动新能源利用技术在产业链的传播和应用,促进上下游企业的资源共享和协同决策,提升整个产业链的能源利用效率,从而实现高质量发展,降低碳排放强度。

2) 培育和发展新兴业态和新型低碳产业。着力发展5G、集成电路等数字核心技术,推动数字经济底层技术的创新突破,聚焦绿色制造、循环经济、高新技术等新兴领域,促进产业链创新和新业态发展,壮大数字经济领军型企业和“专精特新”企业群,优化产业结构,促进产业链升级,进而达到降低碳排放强度的目的。

3) 发挥高数字经济省份的辐射带动作用。破除行政和行业壁垒,通过建立区域协调发展的领导小组和工作机制,使高数字经济省份在政策制定、资源配置和项目落地等方面能够与邻近省份形成合力,共同解决区域发展不平衡的问题。例如,通过设立跨省界的科技创新中心、数字经济示范区等平台,促进技术和资源的共享,助推产业向智能化、清洁化、低碳化转型。

#### 参考文献:

- [1] 中国信息通信研究院. 中国数字经济发展研究报告(2023年)[R/OL]. (2023-04-27)[2024-04-23]. [http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202304/t20230427\\_419051.html](http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202304/t20230427_419051.html).
- [2] 甘天琦. 数字经济的减碳效应研究——基于要素配置的视角[J]. 华中师范大学学报(人文社会科学版), 2023, 62(6): 60-73.  
GAN Tianqi. On the carbon reduction effect of digital economy-based on the perspective of factor allocation [J]. Journal of Central China Normal University: Humanities and Social Sciences, 2023, 62(6): 60-73.
- [3] 冯兰刚, 阳文丽, 王忠, 等. 中国数字经济与城市碳排放强度:时空演化与作用机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(1): 150-160.  
FENG Lan'gang, YANG Wenli, WANG Zhong, et al. Digital economy and urban carbon emission intensity in China: spatio-temporal evolution and mechanisms [J]. China Population, Resources and Environment, 2023, 33(1): 150-160.
- [4] 王维国, 王永玲, 范丹. 数字经济促进碳减排的效应及机制[J]. 中国环境科学, 2023, 43(8): 4437-4448.  
WANG Weiguo, WANG Yongling, FAN Dan. Effects and mechanisms of the digital economy for carbon emission reduction [J]. China Environmental Science, 2023, 43(8): 4437-4448.
- [5] 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(2): 45-57.  
MIAO Lujun, CHEN Jing, FAN Tianzheng, et al. The impact of digital economy development on carbon emission: a panel data analysis of 278 prefecture-level cities [J]. South China Finance, 2022(2): 45-57.
- [6] 周梦雯, 刘传明. 数字经济的节能减排效应及作用机制——基于空间关联网络溢出模式[J]. 工业技术经济, 2024, 43(1): 13-20.  
ZHOU Mengwen, LIU Chuanming. Effects and mechanism of digital economy on energy saving and emission reduction-based on spatial correlation network overflow mode [J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2024, 43(1): 13-20.
- [7] 郭玥沁, 郭彬, 张荣霞. 双碳背景下数字经济对碳排放强度的影响研究——基于有调节的中介效应检验[J]. 现代管理科学, 2022(6): 138-147.
- [8] 杨林京, 廖志高. 绿色金融、结构调整和碳排放——基于有调节的中介效应检验[J]. 金融与经济, 2021(12): 31-39.  
YANG Linjing, LIAO Zhigao. Green finance, structural adjustment and carbon emissions—a test based on the regulated mediation effect [J]. Finance and Economy, 2021(12): 31-39.
- [9] 黎毅, 蒋青松. 数字经济碳减排效应分析——基于生产与消费端的双重路径分析[J]. 南京审计大学学报, 2023, 20(4): 81-90.  
LI Yi, JIANG Qingsong. Analysis of carbon emission reduction effect of digital economy: based on the dual path analysis of production and consumption [J]. Journal of Nanjing Audit University, 2023, 20(4): 81-90.
- [10] 刘杨洋, 王晶晶. 数字经济驱动碳减排的机理与实证研究[J]. 经济研究导刊, 2024(2): 59-63.  
LIU Yangyang, WANG Jingjing. Mechanisms and empirical studies of carbon emission reduction driven by digital economy [J]. Economic Research Guide, 2024(2): 59-63.
- [11] 张跃. 数字经济、时空动态效应与城市碳排放效率[J]. 河北经贸大学学报, 2023, 44(6): 87-98.  
ZHANG Yue. Digital economy, temporal-spatial dynamic effect and urban carbon emission efficiency [J].

- Journal of Hebei University of Economics and Business, 2023, 44(6): 87-98.
- [12] 陈晓东, 刘洋, 周柯. 数字经济提升我国产业链韧性的路径研究[J]. 经济体制改革, 2022(1): 95-102.  
CHEN Xiaodong, LIU Yang, ZHOU Ke. Research on the path of digital economy to improve China's industrial chain resilience[J]. Reform of Economic System, 2022(1): 95-102.
- [13] 杨晓霞, 陈晓东. 数字经济能够促进产业链创新吗? ——基于 OECD 投入产出表的经验证据[J]. 改革, 2022(11): 54-69.  
YANG Xiaoxia, CHEN Xiaodong. Can digital economy promote the industrial chain innovation? An empirical study based on OECD input-output table[J]. Reform, 2022(11): 54-69.
- [14] 乔涵. 数字经济对我国产业链现代化的影响效应分析[J]. 企业经济, 2023, 42(10): 115-128.  
QIAO Han. Analysis of impact of digital economy on modernization of China's industrial chain[J]. Enterprise Economy, 2023, 42(10): 115-128.
- [15] 陈晓东, 常皓亮. 数字经济可以增强产业链安全吗? ——基于世界投入产出表的研究[J]. 经济体制改革, 2023(3): 15-24.  
CHEN Xiaodong, CHANG Haoliang. Can digital economy enhance the security of industrial chain? -- Research based on world input-output table[J]. Reform of Economic System, 2023(3): 15-24.
- [16] 张虎, 张毅, 韩爱华. 我国产业链现代化的测度研究[J]. 统计研究, 2022, 39(11): 3-18.  
ZHANG Hu, ZHANG Yi, HAN Aihua. Research on the measurement of modernization of industrial chains in China [J]. Statistical Research, 2022, 39(11): 3-18.
- [17] 郑玉雯. “一带一路”产业链现代化的测度研究——兼论“以路强链”的启示及中国因应[J]. 调研世界, 2024(8): 30-44.  
ZHENG Yuwen. Research on the measurement of the modernization of the “Belt and Road” industrial chain - On the enlightenment of “Strengthening the Chain with Roads” and China's response[J]. The World of Survey and Research, 2024(8): 30-44.
- [18] 潘红玉, 任宇新, 潘为华. 数字经济对产业链高质量发展的影响及空间溢出效应[J]. 科学决策, 2024(2): 22-38.  
PAN Hongyu, REN Yuxin, PAN Weihua. Impacting of digital economy on high quality development of industrial chain and spatial spillover effect[J]. Scientific Decision Making, 2024(2): 22-38.
- [19] 邓荣荣, 张翱翔. 中国城市数字金融发展对碳排放绩效的影响及机理[J]. 资源科学, 2021, 43(11): 2316-2330.  
DENG Rongrong, ZHANG Aoxiang. The impact of urban digital finance development on carbon emission performance in China and mechanism[J]. Resources Science, 2021, 43(11): 2316-2330.
- [20] 易子榆, 魏龙, 王磊. 数字产业技术发展对碳排放强度的影响效应研究[J]. 国际经贸探索, 2022, 38(4): 22-37.  
YI Ziyu, WEI Long, WANG Lei. The effect of technological development of digital industry on carbon emission intensity [J]. International Economics and Trade Research, 2022, 38(4): 22-37.
- [21] 金殿臣, 陈昕, 刘帅. 数字经济如何助力“双碳”目标: 基于 275 个地级市的实证检验[J]. 贵州社会科学, 2023, 405(9): 134-143.  
JIN Dianchen, CHEN Xin, LIU Shuai. Digital economy how to assist “dual carbon” goal: empirical test based on 275 prefecture-level cities [J]. Guizhou Social Science, 2023, 405(9): 134-143.
- [22] 胡雨朦, 郭朝先. 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[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2023, 23(5): 153-168.  
HU Yumeng, GUO Chaoxian. Impact of digitalization on carbon emission intensity of manufacturing enterprises; theoretical modeling and mechanism test [J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2023, 23(5): 153-168.
- [23] 霍晓谦, 张爱国. 数字经济对碳排放强度的影响机制及空间效应[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(12): 182-193.  
HUO Xiaqian, ZHANG Aiguo. Mechanisms and spatial effects of the digital economy on carbon emissions intensity[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(12): 182-193.
- [24] CHENG C, REN X H, WANG Z, et al. Heterogeneous impacts of renewable energy and environmental patents on CO<sub>2</sub> emission-evidence from the BRIICS[J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 1328-1338.
- [25] 曹建飞, 韩延玲, 刘慧龙. 数字经济发展如何影响城市碳排放? ——来自中国 283 个地级市的经验数据[J]. 生态经济, 2024, 40(2): 39-51.  
CAO Jianfei, HAN Yanling, LIU Huilong. Can the development of the digital economy affect carbon emissions? An empirical evidence from 288 prefecture-level cities in China [J]. Ecological Economy, 2024, 40(2): 39-51.

- ply chain project[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2017.
- [16] 廖吉林. 基于 Shapley 值的纸品供应链绿色收益分配研究—以中顺洁柔纸业为例[J]. 林业经济, 2018, 40(12): 47-50.  
LIAO Jilin. Research on green income distribution of paper supply chain based on Shapley value—a case study on Zhongshun Jierou paper industry[J]. Forestry Economics, 2018, 40(12): 47-50.
- [17] PAKSERESHT M, MAHDAVI I, SHIRAZI B, et al. Co-reconfiguration of product family and supply chain using leader-follower Stackelberg game theory: bi-level multi-objective optimization[J]. Applied Soft Computing, 2020, 91, 106203.
- [18] CHEN Y, LI Z, YANG B, et al. A Stackelberg game approach to multiple resources allocation and pricing in mobile edge computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 108: 273-287.
- [19] SONG H, GAO X. Green supply chain game model and analysis under revenue-sharing contract[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 170(1): 183-192.
- [20] 李梦婷. 折叠纸盒的生命周期评价研究[D]. 北京:北京印刷学院, 2019.  
LI Mengting. Study on the life cycle assessment of folding carton[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2019.

(责任编辑 周 蓓)

(上接第 460 页)

- [26] 周磊, 龚志民. 数字经济水平对城市绿色高质量发展的提升效应[J]. 经济地理, 2022, 42(11): 133-141.  
ZHOU Lei, GONG Zhimin. The impact of digital economy level on green high-quality development in Chinese cities [J]. Economic Geography, 2022, 42(11): 133-141.
- [27] 张元庆, 刘烁, 齐平. 数字产业协同创新发展对碳排放强度影响研究[J]. 西南大学学报(社会科学版), 2023, 49(3): 114-128.  
ZHANG Yuanqing, LIU Shuo, QI Ping. A research on the impact of collaborative innovation development of digital industry on carbon emission intensity[J]. Journal of Southwest University(Social Sciences Edition), 2023, 49(3): 114-128.
- [28] 尹迎港, 常向东. 科技创新、产业结构升级与区域碳排放强度—基于空间计量模型的实证分析[J]. 金融与经济, 2021(12): 40-51.
- [29] PREACHER K J, HAYES A F. Asymptotic and re-sampling strategies for assessing and comparing indirect effects in multiple mediator models[J]. Behavior Research Methods, 2008, 40(3): 879-891.
- [30] 钱海章, 陶云清, 曹松威, 等. 中国数字金融发展与经济增长的理论与实证[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(6): 26-46.  
QIAN Haizhang, TAO Yunqing, CAO Songwei, et al. Theoretical and empirical analysis on the development of digital finance and economic growth in China [J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2020, 37(6): 26-46.
- [31] 许钊, 高煜, 霍治方. 数字金融的污染减排效应[J]. 财经科学, 2021(4): 28-39.  
XU Zhao, GAO Yu, HUO Zhifang. Research on pollution reduction effect of digital finance[J]. Finance & Economics, 2021(4): 28-39.
- [32] 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.  
XIE Yunfei. The effect and mechanism of digital economy on regional carbon emission intensity[J]. Contemporary Economic Management, 2022, 44(2): 68-78.

(责任编辑 周 蓓)