

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.04.007

数字经济对碳排放强度影响机制研究

——基于我国30个省市的面板数据

许梅, 强群莉

(安徽建筑大学 经济与管理学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 数字经济作为我国经济高质量发展的重要驱动力之一, 研究其对碳排放强度的影响, 对实现我国经济高质量发展具有重要意义。以2013—2020年30个省市(除西藏、港澳台外)的面板数据为样本, 运用面板回归模型与中介效应模型, 实证检验我国数字经济对碳排放强度的影响效果。结果表明, 数字经济能够直接抑制碳排放强度的提升; 我国三大区域之间数字经济对碳排放强度的抑制作用存在较为显著的异质性, 东部最强, 西部次之, 中部最弱; 数字经济对碳排放强度存在以产业结构高级化为中介的抑制作用, 尚未发现以产业结构合理化为中介的抑制作用。基于此, 应继续发展数字经济, 推动数字减排, 提升产业结构升级作用机制。

关键词: 数字经济; 碳排放强度; 产业结构; 异质性; 中介效应

中图分类号: F061.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)04-0040-09

引文格式: 许梅, 强群莉. 数字经济对碳排放强度影响机制研究: 基于我国30个省市的面板数据[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(4): 40-48.

Research on the Impact Mechanism of Digital Economy on Carbon Emission Intensity: Based on Panel Data from 30 Provinces and Cities in China

XU Mei, QIANG Qunli

(School of Economics and Management, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Due to the fact that the study of the impact of digital economy, one of the important driving forces for high-quality economic development in China, on carbon emission intensity is of great significance for achieving high-quality economic development in China, empirical tests have been made of the impact of China's digital economy on carbon emission intensity by using the panel regression model and the intermediary effect model with the panel data samples of 30 provinces and cities (excluding Xizang, Hong Kong, Macao and Taiwan) from 2013 to 2020. The results indicate that digital economy can directly suppress the increase in carbon emission intensity. There is a significant heterogeneity in the inhibitory effect of digital economy on carbon emission intensity among the three major regions of China, with the strongest in the eastern region, to be followed by the western region, and the weakest in the central region. Digital economy exerts an inhibitory effect on carbon emission intensity mediated by the upgrading of industrial structure, with no inhibitory effect by the rationalization of industrial structures to be found. Based on this, it is advisable

收稿日期: 2023-05-19

基金项目: 安徽省教育厅科研基金资助重大项目(2022AH040040)

作者简介: 许梅, 女, 安徽建筑大学硕士生, 主要研究方向为环境经济学, E-mail: 1098306210@qq.com

通信作者: 强群莉, 女, 安徽建筑大学教授, 主要研究方向为会计信息披露, 环境经济, 成本控制, 区域经济, 绩效评价, E-mail: 1055858381@qq.com

to seek a further development of digital economy, a promotion of digital emission reduction, and an enhancement of the mechanism for upgrading the industrial structure.

Keywords: digital economy; carbon emission intensity; industrial structure; heterogeneity; intermediary effect

1 研究背景

经济快速增长导致环境问题日益恶化,中国作为负责任的大国,在国际上做出承诺:提出在2030年前实现“碳达峰”,在2060年前实现“碳中和”的双碳战略目标。在实现经济高质量发展和推动生态文明建设的双重背景下,低碳绿色发展成为我国经济社会发展的核心目标,随着我国经济发展方式的转变,以新兴数字技术为代表的数字经济,逐步成为我国经济发展的重要驱动力之一。

数字经济是当前经济发展的重要方向之一,最早由D. Tapscott^[1]于1996年提出,与我国双碳目标的实现密切相关,对传统经济产生了深刻的影响,其发展不仅带来了经济效益,同时也可能会对碳排放产生重要的影响。在数字经济快速发展和双碳战略目标的背景下,如何充分发挥数字经济的强大优势实现经济发展与生态文明建设的协同推进至关重要。

作为碳排放大国之一,我国始终面临经济社会发展与生态环境保护的双重压力,为尽快实现低碳绿色发展与国际碳脱钩治理,相关学者始终致力于我国碳排放影响的关键因素与作用机制研究。王锋等^[2]发现经济发展水平、人口密度、经济结构转型、家庭平均收入与碳排放之间存在显著正相关关系,而提升能源利用效率是实现降碳的关键;邓吉祥等^[3]分析了我国八大区域的碳排放现状,发现能源强度影响碳排放副作用最强,能源结构影响碳排放波动较大;曹泽等^[4]发现产业结构升级能够通过能源消费与工业智能化两个方面实现碳排放的有效治理。

随着我国双碳目标的提出,数字经济在转变我国经济发展方式、优化经济结构发挥着重要作用,关于数字经济对碳排放的影响方面,相关学者也从低碳绿色发展的角度出发,研究了数字经济与碳排放之间的关系。谢云飞^[5]利用我国2011—2018年省际面板数据,发现数字经济发展能够有效降低区域碳排放强度并且存在较为显著的异质性,数字经济的碳减排效应在中西部及碳排放强度较高的地区表现更明显。郭丰等^[6]使用2011—2019年中国223个城市的面板数据进行实证研究,结果表明数字经济发展能够显著降低城市碳排放水平,能够

通过推动城市绿色技术创新水平的提升降低城市碳排放水平;余群芝等^[7]使用1990—2019年99个国家的面板数据,研究得出数字经济发展能显著降低碳排放,且减排弹性与各国经济发展水平正相关,在中、高收入国家均能通过提高能源效率、改善能源结构实现节能减排。除研究数字经济对碳排放直接影响以外,也有学者基于环境库兹涅茨曲线,对二者间存在的非线性关系进行了研究,如费威等^[8]以我国省级面板数据为研究样本,得出我国的碳排放与数字经济之间存在显著的“倒U”型关系,缪陆军等^[9]以我国278个地级市为研究对象,同样得出了数字经济发展对碳排放的影响具有非线性特征,二者间呈现倒U型关系。

现有研究为研究数字经济促进碳减排提供了判断与思路,但仍存在以下不足:第一,多数研究仅从技术创新与能源结构调整角度分析数字经济减排机制;第二,虽然有部分学者研究了产业结构升级的中介机制,但考虑到产业结构升级分维度中合理化与高级化的差异并不多,因此本文从产业结构合理化与高级化两个层面分别研究对碳排放的内在作用机制,以探索最优路径。鉴于以上分析,本文采用省级面板数据与中介效应模型,实证检验了数字经济对碳排放的影响与作用机制,明确当前我国数字经济实现碳减排的最佳路径,为进一步优化相关政策提供了新视角。

2 理论分析及研究假设

2.1 数字经济对碳排放强度的直接影响

数字互联网是数字经济最显著的特征之一。从数字经济的内涵来看,数据作为数字经济时代下一种全新的生产要素,其独特的非竞争性、即时性和可重复利用等特性,为绿色发展开辟了新的路径^[10]。数字经济以现代信息网络为主要载体,破除了生产资料的传递受时间和空间上的限制,保证了生产资料在时间上和空间上的高效传递^[11],因此具有较强的绿色发展属性。蒋金荷^[12]从动力、途径和路径3个视角分析得出,我国的数字化发展是高质量发展重要动力,低碳绿色转型是高质量发展的根本途径,数字化是实现我国“双碳”目标的主要路径。当前,我国

经济进入绿色高质量发展的关键时期,数字经济以现代化信息网络为主要载体,贯穿社会生产生活的全过程,有效地降低了供需双方之间的交易成本和搜寻成本^[13],是实现经济绿色高质量发展的主要动力之一。微观上看,大规模数字化技术应用,能为传统企业建立智能化生产管理系统,实现生产数据实时采集和生产能耗精准管理^[14]。依托于数字化技术,企业能够更好地组织生产经营过程,减少生产经营过程中产生的非必要能源消耗、污染排放及资源浪费。宏观上看,现代化信息网络的普及催生了大量以互联网为主要载体的新模式和新业态^[15],传统经济的发展主要依赖于实体生产资料,在生产过程中,不可避免地存在资源浪费和配置效率不高等问题^[16]。数字经济以信息通信技术为核心,将社会经济活动转化为标准的数据,催生出新的数字产业,而大部分的数字产业均以电子媒介形态存在,具有可复制、可多次使用不被损耗等特点,实现了交易对象跨时空的交流,降低了实体经济的交易成本,推动了交易市场的电子化和网络化,有效地解决了资源浪费和配置效率不高等问题^[17]。据此,本文提出研究假说 H1。

H1 数字经济的发展能直接降低我国碳排放强度。

2.2 数字经济对碳排放强度的间接影响

技术进步和技术创新是推动产业升级的根本动力,数字经济时代下推动经济增长的主导力量是数字技术创新带动的数字产业^[18]。数字经济通过将数字技术产业化和市场化应用,刺激新型产业蓬勃发展,并基于互联网平台进行资源配置,对产业结构进行重构^[19]。以5G、大数据、云计算等“新技术群”的应用,优化当前生产流程,提高生产效率,形成高效、智能的生产模式^[20],加快传统产业的转型升级步伐,推动制造业与数字化技术的深度融合,实现产业结构向智能化和数字化方向演进^[21]。数字产业的发展也将推动产业结构向先进制造业和生产性服务业占主导的服务经济转型^[22]。同时,数字经济的网络化属性有利于提高资源要素的合理性,推动不同产业之间实现协同分工,并通过产业关联、产业融合和产业创新等途径逐渐淘汰高耗能、高排放和高污染的传统产业^[23],引导产业结构向高级化和合理化方向演进。

产业结构升级能够将经济发展重心从高碳产业向低碳产业转移,推动传统产业向高效、低碳、环保的方向升级。同时产业结构升级可以促进生产方式的转型,推动绿色生产方式,采用更加环保、低碳、节能的生产技术和方法,减少碳排放。基于产业结构升级的两大内涵,陈浩等^[24]的研究认为,产业结构高级化对碳排放强度起抑制作用,产业结构合理化不能直接对碳排放强度产生显著影响,但可以通过促进

产业结构调整间接降低碳排放强度。因此本文从产业结构升级的两大内涵出发,提出研究假说 H2。

H2 数字经济能够以产业结构升级为中介,间接降低我国的碳排放强度。

3 模型构建与变量选取

3.1 模型构建

为检验本文假说 H1,考察数字经济对碳排放的影响机理与作用途径,构建包含数字经济、碳排放强度及控制变量的面板计量模型进行初步的基准回归,模型具体构建如下:

$$V_{ct, it} = \alpha_0 + \alpha_1 V_{dig, it} + \alpha_i \sum_{i=1}^5 V_{lnz, it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中: i 为各省市; t 为时间; $V_{ct, it}$ 和 $V_{dig, it}$ 分别为 i 地区第 t 年的碳排放强度和数字经济发展水平; $V_{lnz, it}$ 为各控制变量; ε_{it} 为随机扰动项; α_0 为截距项; α_1 、 α_i 分别为数字经济回归系数和各控制变量回归系数。

为检验本文假说 H2,研究数字经济对碳排放强度的间接效应,分别将产业结构合理化与产业结构高级化作为中介变量,构建中介效应模型如下。

$$V_{ct, it} = \theta_0 + \beta_i \sum_{i=1}^5 V_{lnz, it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$V_{isa, it} = \theta_1 + \theta_2 V_{dig, it} + \chi_i \sum_{i=1}^5 V_{lnz, it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$V_{ct, it} = \theta_2 + \theta_3 V_{dig, it} + \theta_4 V_{isa, it} + \delta_i \sum_{i=1}^5 V_{lnz, it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

$$V_{isr, it} = \theta_3 + \theta_4 V_{dig, it} + \eta_i \sum_{i=1}^5 V_{lnz, it} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

$$V_{ct, it} = \theta_4 + \theta_5 V_{dig, it} + \theta_6 V_{isr, it} + \gamma_i \sum_{i=1}^5 V_{lnz, it} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

式(2)~(6)中: V_{isa} 为产业结构高级化; V_{isr} 为产业结构合理化; θ 、 β 、 χ 、 δ 、 η 、 γ 为相关系数。

3.2 变量选取

核心解释变量。数字经济(V_{dig}),当前数字经济的测度,尚无明确的方法,主流测算方法有两类,第一是增加值法,通过直接测算与数字经济相关产业或行业的增加值得到数字经济的发展规模^[25-26];第二是构建指标体系,也是最常用的方法,基于数字经济内涵的多个维度,选取相应的指标,构建指标体系采用计量方法降维成一个综合指标来反映数字经济整体的发展水平^[27-29],虽然能够很好地反映出数字经济内涵的各个基本面,但在具体指标的选择上,主观性较强,受学者本身水平限制较大。本文借鉴刘军等^[30]构建的指标体系,从信息化发展、互联网发展与数字交易3个维度共14个指标,综合测度我国各省市数字经济发展指数,具体指标选取如

表1所示,各项数据来源于《中国统计年鉴》、《中国信息产业年鉴》、国家统计局及各省市统计公报。在综合评价方法中,本文选取最常用的熵值法来测度我国各省市数字经济发展水平。

表1 数字经济评价指标体系

Table 1 Digital economy evaluation index system

一级指标	二级指标	权重	属性
信息化发展	光缆密度	0.0619	正向(+)
	移动基站密度	0.0693	正向(+)
	信息化从业人员占比	0.0376	正向(+)
	电信业务总量	0.1024	正向(+)
	软件业务收入	0.1596	正向(+)
互联网发展	互联网端口接入密度	0.0733	正向(+)
	移动互联网普及率	0.0195	正向(+)
	宽带互联网用户数占比	0.0456	正向(+)
	移动互联网用户数占比	0.0217	正向(+)
数字交易发展	每百家企业拥有网站数	0.0073	正向(+)
	企业使用计算机情况	0.0327	正向(+)
	电子商务企业占比	0.0580	正向(+)
	电子商务销售额	0.1304	正向(+)
	网上零售额	0.1806	正向(+)

被解释变量。碳排放强度,根据标准煤折算系数和联合国气候变化专门委员会(IPCC)公布的碳排放系数和刘贤赵^[31]的研究,根据《中国能源统计年鉴》获取煤炭、焦炭、汽油、煤油、柴油、燃料油、原油、天然气8种能源消耗总量,计算得出各省市碳排放总量(V_c),计算各省市碳排放总量与地区生产总值的比值得出碳排放强度(V_{ct}),具体计算如下。

$$V_c = \sum_{i=1}^7 V_{c,i} = \sum_{i=1}^7 E_i \times SCC_i \times CEC_i \times \frac{44}{12} \quad (7)$$

$$V_{ct} = V_c / GDP \quad (8)$$

式(7)(8)中: t 为化石能源; E 为能源消费量; SCC 为标准煤折算系数; CEC 为IPCC碳排放系数。

折算系数 SCC 和 CEC 数值见表2。

表2 碳排放系数和标准煤折算系数

Table 2 Carbon emission coefficients and standard coal conversion coefficients

系数	能源种类							
	煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气
SCC	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4714	1.4571	1.4286	1.2143
CEC	0.7559	0.8550	0.5857	0.5538	0.5714	0.5921	0.6185	0.4483

注:数据来源于《中国能源统计年鉴》。

中介变量。包含产业结构高级化(V_{isa})和产业结构合理化(V_{isr})两方面。

1)产业结构高级化。产业结构高级化描述的是产业由低级向高级过渡的过程,本文借鉴付凌晖^[32]的研究,将各省市三次产业增加值占国民生产总值比例作为3个空间向量,构造向量 $X_0 = (x_1, x_2, x_3)$,计

算 X_0 分别与产业向量 $X_1 = (1, 0, 0)$ 、 $X_2 = (0, 1, 0)$ 、 $X_3 = (0, 0, 1)$ 形成的夹角 θ_j ,其中 $j=1, 2, 3$ 。将式(9) θ_j 结果代入式(10)计算得出各省市产业结构高级化(V_{isa})水平。

$$\theta_j = \arccos \left(\frac{\sum_{i=1}^3 (x_{i,j} \cdot x_{i,0})}{\sum_{i=1}^3 (x_{i,j}^2)^{1/2} \sum_{i=1}^3 (x_{i,0}^2)^{1/2}} \right) \quad (9)$$

$$V_{isa} = \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^k \theta_j \quad (10)$$

2)产业结构合理化。参考干春晖等^[33]的研究,本文的产业结构合理化以泰尔指数进行衡量,具体计算公式如下:

$$V_{isa} = \sum_{i=1}^n (Y_i/Y) \ln \left(\frac{Y_i}{L_i} / \frac{Y}{L} \right) \quad (11)$$

式中: Y_i 为三大产业产值; L_i 为三大产业的就业人数; n 为产业部门数量, $i=1, 2, 3$ 。

控制变量。从人均道路面积(V_{roa})、城镇化率(V_{urb})、能源结构(V_{ene})、创新投入水平(V_{inn})和教育水平(V_{edu})5个方面选取。1) V_{roa} 采用各省市道路总面积与该地区常住人口的比值衡量。2) V_{urb} 参考大多数学者的研究,采用地区城镇人口占总人口的比例衡量;3) V_{ene} 采用煤炭消费占总能源消费量的比例测算;4) V_{inn} 选取统计年鉴中R&D经费支出作为创新投入的代理指标;5) V_{edu} 采用各省市财政支出中的教育支出占财政总支出的比例测算。

3.3 数据说明

本文以我国30个省市(西藏、港澳台除外)2013—2020年的面板数据为研究对象,所有数据均来自于《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、EPS数据库及各省市统计年鉴及统计公报,针对部分年份缺失数据采用指数平滑法补齐,在应用时进行了对数化处理,保证数据的平稳性,数据描述性统计分析结果如表3所示。

表3 各变量描述性统计结果

Table 3 Descriptive statistical results of each variable

Variable	变量含义	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
V_{ct}	碳排放强度	240	2.203	0.728	0.455	3.787
V_{dig}	数字经济	240	0.223	0.124	0.073	0.768
V_{inroa}	人均道路面积	240	2.745	0.350	1.413	3.288
V_{inurb}	城镇化率	240	4.083	0.184	3.635	4.495
V_{inene}	能源结构	240	0.655	0.332	0.018	1.763
V_{ininn}	创新投入	240	14.424	1.351	11.083	17.034
V_{inedu}	教育水平	240	2.120	0.114	1.229	2.503
V_{isa}	产业结构高级化	240	0.252	0.364	-0.407	1.667
V_{isr}	产业结构合理化	240	0.105	0.127	0.018	1.147

4 实证分析

4.1 基准回归结果分析

本文豪斯曼检验的 Z 值为 21.20, 通过了 1% 水平下的显著性检验, 宜采用固定效应模型进行回归分析, 为保证基准回归结果的稳健性, 本文采用逐步添加控制变量进行回归。由表 4 可知, 在逐步增加控制变量后, 数字经济的回归系数逐渐变小, 回归系数稳定在 0.8~0.9 之间, 说明数字经济回归系数受控制变量的影响较小, 我国数字经济的快速发展能够有效降低碳排放强度水平。由模型 6 可知, 数字经济每提高 1%, 我国各省市碳排放强度相应下降 0.878%, 并通过了 1% 水平下的显著性检验。至此, 本文假说 H_1 得以验证。

表 4 基准回归结果

Table 4 Benchmark regression results

变量	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6
V_{dig}	-1.724*** (-21.49)	-1.501*** (-16.73)	-1.039*** (-9.59)	-0.866*** (-9.10)	-0.835*** (-8.58)	-0.878*** (-9.04)
$V_{ln roa}$		-0.303*** (-4.75)	-0.008 (-0.10)	-0.105 (-1.63)	-0.094 (-1.45)	-0.113* (-1.77)
$V_{ln urb}$			-1.155*** (-6.52)	-0.912*** (-5.90)	-0.819*** (-4.88)	-0.737*** (-4.40)
$V_{ln enc}$				0.795*** (8.63)	0.769*** (8.21)	0.759*** (8.22)
$V_{ln inn}$					-0.048 (-1.43)	-0.055* (-1.67)
$V_{ln edu}$						0.120*** (2.73)
C_{on}	2.587*** (136.79)	3.369*** (20.34)	7.169*** (11.91)	5.888*** (10.94)	6.174*** (10.78)	5.764*** (9.88)
O_{bs}	240	240	240	240	240	240
模型选择	Fe	Fe	Fe	Fe	Fe	Fe
R-squared	0.688	0.719	0.767	0.829	0.830	0.836

注: t-statistics in parentheses. *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$, 下同。

控制变量中, 基础设施建设的回归系数为 -0.113, 并在 10% 的水平下显著, 说明交通设施建设水平越高, 碳排放强度水平越低, 交通设施的便利有利于区域间创新、发展资源的流动, 实现碳排放强度的降低。城镇化水平的回归结果为负且显著, 说明城镇化水平的提高能够抑制碳排放强度的提升。当前, 我国正处于城镇化和工业化的关键发展阶段, 自新型城镇化概念提出以来, 我国各省市城镇化建设开始向集约、共享、绿色、协调等方向转变, 城市基础配套设施建设水平不断提高, 有效降低了碳排放。能源结构的回归结果显著为正, 说明能源结构的不合理是导致碳排放强度提高的重要原因之一。创新投入的回归系数为负, 并通过了 1% 水平下的显著性检验, 创新是高质量发展源源不竭的动力, 加大对创新的投入力度能够

有效实现碳排放强度的降低。教育水平的回归系数为正且显著, 说明教育水平在一定程度上能够增加碳排放强度, 可能原因在于我国人口基数较大, 教育水平的提高离不开大量的人力、物力资源的投入, 因此造成了碳排放强度提高。

4.2 稳健性检验

由于我国各个省市间在经济社会发展上存在差异, 且总体上人口分布集中在东中部地区, 因此本文进一步将本文的被解释变量替换为人均碳排放强度, 并采用逐步回归法检验前文基准回归结果的稳健性, 具体结果如表 5 所示。由表可知, 在替换被解释变量以后, 数字经济的回归系数均显著为负。由模型 6 可知, 数字经济的回归系数为 -0.740, 与基准回归相比, 数值略微下降, 表明数字经济不仅能够有效抑制各省市的碳排放强度, 对人均碳排放强度也具有显著的抑制作用, 表明了基准回归结果稳健。

表 5 替换被解释变量检验结果

Table 5 Test results of explained variable replacement

变量	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6
V_{dig}	-1.712*** (-15.94)	-1.479*** (-12.10)	-1.115*** (-7.09)	-0.903*** (-6.23)	-0.704*** (-5.22)	-0.740*** (-5.44)
$V_{ln roa}$		-0.318*** (-3.66)	-0.085 (-0.79)	-0.205** (-2.09)	-0.133 (-1.49)	-0.150* (-1.67)
$V_{ln urb}$			-0.910*** (-3.54)	-0.612** (-2.60)	-0.003 (-0.01)	0.067 (0.29)
$V_{ln enc}$				0.978*** (6.97)	0.812*** (6.26)	0.803*** (6.21)
$V_{ln inn}$					-0.310*** (-6.72)	-0.317*** (-6.86)
$V_{ln edu}$						0.104* (1.68)
C_{on}	-7.280*** (-287.88)	-6.460*** (-28.63)	-3.466*** (-3.97)	-5.043*** (-6.16)	-3.185*** (-4.02)	-3.543*** (-4.33)
O_{bs}	239	239	239	239	239	239
模型选择	Fe	Fe	Fe	Fe	Fe	Fe
R-squared	0.550	0.577	0.601	0.678	0.736	0.740

4.3 区域异质性分析

前文从全国总体上详细分析了我国数字经济对碳排放强度的直接影响作用, 并采用了两种方式进行稳健性检验, 得出数字经济能够抑制我国碳排放强度水平的提高。我国幅员辽阔、地大物博, 不同区域之间经济社会发展水平也存在较大的差异, 为更好地了解我国各区域数字经济对碳排放强度的抑制作用, 本文参考学术界普遍做法, 将全国根据经济发展水平和开发层次水平划分为东部、中部与西部地区三类进行区域异质性分析, 分析结果如表 6 所示。

表6 区域异质性回归结果

Table 6 Regional heterogeneity regression results

变量	东部地区	中部地区	西部地区	全国地区
V_{dig}	-1.032*** (-10.36)	-0.304 (-0.42)	-0.638* (-1.77)	-0.862*** (-8.77)
$V_{ln\ roa}$	-0.207** (-2.58)	0.377 (1.41)	-0.079 (-0.89)	-0.094 (-1.56)
$V_{ln\ urb}$	-0.018 (-0.09)	-0.916 (-1.38)	-0.999*** (-2.80)	-0.635*** (-4.04)
$V_{ln\ ene}$	1.242*** (6.46)	0.154 (1.06)	1.381*** (8.43)	0.860*** (9.75)
$V_{ln\ inn}$	0.053 (1.37)	-0.403*** (-3.44)	0.041 (0.77)	-0.086*** (-2.93)
$V_{ln\ edu}$	0.233*** (4.39)	-0.007 (-0.06)	0.056 (0.93)	0.122*** (2.71)
$C_{on_}$	0.976 (1.05)	10.660*** (4.19)	5.117*** (4.00)	5.666*** (10.03)
$O_{bs_}$	104	48	88	240
R^2	0.890	0.871	0.887	0.834

由表6可知,我国东部省市和西部省市的数字经济回归结果与全国样本一致,对碳排放强度表现出了显著的抑制作用,东部地区数字经济的抑制作用最强,回归系数为-1.032,西部地区的抑制作用次之,数字经济的回归系数为-0.638,中部地区的抑制效果最弱但不显著,回归系数为-0.304。东部地区的产业结构相对清洁,高能耗高碳发展企业较少,主要涉及信息技术、电子商务、云计算等服务型行业,不会象传统制造业一样产生大量的温室气体排放,因此在降低碳排放强度上具有显著的效果。此外,高水平的数字经济发展也使得数字技术能够大规模应用,能够帮助企业和个人更加高效地使用能源,降低碳排放强度。对于中部地区而言,传统行业仍然占主导地位,中部地区经济发展相对滞后,传统制造业和重工业仍然是当地经济的主要支柱,这些行业的碳排放量相对较高,相对于东部沿海地区数字化转型的步伐较慢,数字化转型仍需要一定的时间和投入,因此导致了中部地区数字经济对碳排放强度的抑制作用不显著。西部地区地广人稀,相对于东中部地区,人口密度、城市化程度较低,交通量较少,碳排放也就相对较低,西部地区数字经济的发展也带动了清洁能源的发展。在能源结构上,相对于东中部地区,更加倾向于使用清洁能源,如太阳能和风能等可再生能源,这些清洁能源的使用可有效减少化石燃料的使用,减少了碳排放,因此西部地区数字经济的发展能够显著降低碳排放强度水平。总体上来看,我国三大区域之间,数字经济对碳排放强度的抑制作用存在较为显著的

异质性,东部最强,西部次之,中部最弱。

4.4 中介效应分析

由前文理论分析可知,数字经济的发展能够推动数字技术与传统产业的融合,推动传统产业的转型升级,而产业结构的升级能够有效降低碳排放,因此为检验数字经济是否存在以产业结构升级为中介降低碳排放强度的作用,构建中介效应模型,分别以产业结构高级化、产业结构合理化作为中介变量,进行中介效应分析,具体结果如表7所示。

表7 中介效应模型结果

Table 7 Results of the intermediary effect model

变量	产业结构高级化			产业结构合理化		
	Step1	Step2	Step3	Step1	Step2	Step3
V_{dig}	-1.305*** (-4.89)	1.455*** (8.61)	-0.935*** (-3.08)	-1.305*** (-4.89)	0.292*** (4.58)	-1.288*** (-4.61)
V_{isa}			-0.254** (-2.48)			
V_{isr}						-0.057 (-0.21)
$C_{on_}$	0.651 (0.78)	1.005* (1.90)	0.906 (1.09)	0.651 (0.78)	-0.949*** (-4.74)	0.596 (0.68)
$O_{bs_}$	240	240	240	240	240	240
R^2	0.789	0.663	0.795	0.789	0.607	0.789
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Sobel		-0.370**			-0.167	
Goodman-1		-0.370**			-0.167	
Goodman-2		-0.370**			-0.167	

由模型1可知,数字经济显著抑制了碳排放强度的提升,因此可进行中介效应模型回归。由模型2可知,数字经济的发展能有效提升我国产业结构高级化水平,符合前文的理论分析。进一步分析模型3可得,数字经济的回归系数和产业结构高级化的回归系数均为负值,并通过了1%水平下的显著性检验,中介效应存在。本文在回归过程中提供了3种中介效应显著性检验:Sobel检验、Goodman-1检验和Goodman-2检验,3种检验下,产业结构高级化均通过了1%水平下的显著性检验,证明存在较为强烈的中介效应。由模型1、2、3计算可知,产业结构高级化的直接效应为-0.935,中介效应为-0.370,总效应为-1.305,中介效应占比28.4%,证明了数字经济能够以产业结构升级为中介,降低碳排放强度。由模型4可知,数字经济能够提升我国各省市产业结构合理化水平,且系数在1%水平下显著,可以进行中介效应检验。分析模型5可得,数字经济的回归系数显著为负,并通过了1%水平下的显著性检验,产业结构合理化的系数为负并不显著,且Sobel、Goodman-1和Goodman-2检验的结果也表明不存在中介效应,产

业结构合理化并未通过中介效应检验,说明了数字经济尚未发现以产业结构合理化为中介的降碳机制。以上研究结果表明,数字经济能通过提高产业结构高级化水平抑制我国碳排放强度水平的提高,因此,提高产业结构高级化水平仍是我国实现碳排放总量降低的有效途径,至此,本文假说 H2 得以验证。

为能保证中介效应模型回归结果稳健,借鉴温忠麟^[34]的研究,进一步采用 Bootstrap 法进行稳健性检验,结果如表 8 所示。以产业结构高级化为中介变量,中介效应系数为 -0.370,直接效应系数为 -0.935,均在 1% 的水平下显著,总效应为 -1.305,中介效应占比约为 28.4%,与前文回归结果相同;以产业结构合理化作为中介变量,中介效应系数为 -0.167,但不显著,说明数字经济对碳排放强度尚未发现以产业结构合理化为路径的抑制作用。

表 8 Bootstrap 中介效应检验结果

Table 8 Bootstrap intermediary effect test results

变量	控制变量	效应	效应系数	标准误	95% 置信区间	
					上限	下限
V_{isa}	控制	直接效应	-0.935*** (-3.71)	0.252	-1.428	-0.441
	控制	中介效应	-0.370*** (-2.58)	0.143	-0.650	-0.089
V_{isr}	控制	直接效应	-1.289*** (-4.84)	0.266	-1.809	-0.767
	控制	中介效应	-0.167 (-0.20)	0.085	-0.183	0.150

5 结论及建议

5.1 结论

本文以我国 30 个省市 2013—2020 年面板数据为样本,构建普通面板模型、中介效应模型和空间计量模型,实证研究了我国各省市数字经济对碳排放强度的影响效果及机制,主要结论如下:1) 我国的数字经济能够显著抑制碳排放强度水平的提高,大力发展数字经济,发展数字产业是各省市实现碳排放降低的重要手段。2) 我国三大区域之间,数字经济对碳排放强度的抑制作用存在较为显著的异质性。得益于良好的数字经济基础和大量的数字产业,东部数字经济对碳排放强度的抑制效果最强;西部地区地广人稀,清洁能源使用占比较大,数字经济对碳排放强度的抑制效果次于东部地区;中部地区的产业结构水平较低,传统行业仍然占主导地位,传统制造业和重工业仍然是当地经济的主要支柱,因而数字经济的抑制效果最弱。3) 数字经济能够推动我国的产业结构升级,实现碳排放总量降低,具体而言,数字经济对碳排放强度存在以产业结构高级化为中介的抑制作用,尚未发现以产业结构合理化为中介的抑制作用,提高

产业结构高级化水平,仍然是我国实现碳排放总量降低的有效途径。

5.2 建议

1) 发展数字经济,推动数字减排。数字经济的碳减排效应表明,继续大力发展数字经济,将数字经济作为国民经济发展的核心,是有效降低碳排放,实现低碳高质量发展的重要途径。一方面,要继续深度挖掘数字经济的绿色经济属性,保证经济社会的绿色发展;另一方面,要积极推动 5G、大数据、工业互联网等新型数字化技术的应用,不断扩大数字产业规模,实现数字减排。

2) 优化产业结构,实现数智发展。数字经济对碳排放强度的中介效应表明,推动产业结构不断向高级化演进,是实现碳减排的有力手段,依托于数字经济,要积极推进传统产业或制造业与现代化数字技术和信息网络的深度融合,实现产业结构向更数字化、智能化的方向升级,实现数智发展,降低碳排放。

3) 依托数字技术,区域联动治理。数字经济时代下,政府治理也应走向数字化,形成数字治理,政府部门要积极引入大数据、云计算等数字技术对环境污染进行实时监控,同时积极推动数据共享,打破行政区域的限制,形成协同治理。企业要积极采用数字技术,提高资源利用效率和能源利用效率,采用物联网、人工智能、大数据等数字技术,优化生产过程,实现智能化和自动化,减少碳排放和环境污染。

参考文献:

- [1] TAPSCOTT D. The Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence[M]. New York: McGraw-Hill, 1996: 6-10.
- [2] 王 锋, 吴丽华, 杨 超. 中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究[J]. 经济研究, 2010, 45(2): 123-136.
WANG Feng, WU Lihua, YANG Chao. Driving Factors for Growth of Carbon Dioxide Emissions During Economic Development in China[J]. Economic Research Journal, 2010, 45(2): 123-136.
- [3] 邓吉祥, 刘 晓, 王 铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解[J]. 自然资源学报, 2014, 29(2): 189-200.
DENG Jixiang, LIU Xiao, WANG Zheng. Characteristics Analysis and Factor Decomposition Based on the Regional Difference Changes in China's CO₂ Emission[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(2): 189-200.
- [4] 曹 泽, 程 毅. “双碳”背景下我国产业结构升

- 级与碳排放关系研究[J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(2): 56-64.
- CAO Ze, CHENG Yi. Research on the Relationship Between China's Industrial Structure Upgrading and Carbon Emissions Under the Background of "Double-Carbon" Objectives[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2023, 37(2): 56-64.
- [5] 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.
- [6] 郭丰, 杨上广, 任毅. 数字经济、绿色技术创新与碳排放: 来自中国城市层面的经验证据[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 2022, 51(3): 45-60.
- GUO Feng, YANG Shangguang, REN Yi. The Digital Economy, Green Technology Innovation and Carbon Emissions: Empirical Evidence From Chinese City-Level Data[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2022, 51(3): 45-60.
- [7] 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.
- SHE Qunzhi, WU Liu. The Carbon Emission Reduction Effect of Digital Economy Development[J]. Economic Survey, 2022, 39(5): 14-24.
- [8] 费威, 于宝鑫, 王维国. 数字经济发展与碳减排: 理论推演与实证检验[J]. 经济学家, 2022(11): 74-83.
- FEI Wei, YU Baoxin, WANG Weiguo. Digital Economy Development and Carbon Emission Reduction: Theoretical Deduction and Empirical Test[J]. Economist, 2022(11): 74-83.
- [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(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.
- [10] 赵滨元. 数字经济对区域创新绩效及其空间溢出效应的影响[J]. 科技进步与对策, 2021, 38(14): 37-44.
- ZHAO Binyuan. The Impact of Digital Economy on Regional Innovation Performance and Its Spatial Spillover Effect[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2021, 38(14): 37-44.
- [11] 李策划. 数字生产方式变革视角下经济关系重塑研究[J]. 技术经济与管理研究, 2023(2): 12-17.
- LI Cehua. Research on the Reconstruction of Economic Relations From the Perspective of Digital Production Mode Reform[J]. Journal of Technical Economics & Management, 2023(2): 12-17.
- [12] 蒋金荷. 可持续数字时代: 数字经济与绿色经济高质量融合发展[J]. 企业经济, 2021, 40(7): 23-30, 161.
- JIANG Jinhe. Sustainable Digital Era: High-Quality Integrated Development of Green Economy and Digital Economy[J]. Enterprise Economy, 2021, 40(7): 23-30, 161.
- [13] 李三希, 黄卓. 数字经济与高质量发展: 机制与证据[J]. 经济学(季刊), 2022, 22(5): 1699-1716.
- LI Sanxi, HUANG Zhuo. Digital Economy and High-Quality Development: Mechanisms and Evidence[J]. China Economic Quarterly, 2022, 22(5): 1699-1716.
- [14] 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.
- WANG Xiangyan, LI Jinye. Did the Digital Economy Effectively Promote Energy Conservation and CO₂ Reduction?[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(11): 83-95.
- [15] 李三希, 武珣璠, 李嘉琦. 数字经济与中国式现代化: 时代意义、机遇挑战与路径探索[J]. 经济评论, 2023(2): 3-14.
- LI Sanxi, WU Yufan, LI Jiaqi. Digital Economy and Chinese Modernization: Contemporary Significance, Opportunities and Challenges, and Exploration of Paths[J]. Economic Review, 2023(2): 3-14.
- [16] 武宵旭, 任保平. 数字经济背景下要素资源配置机制重塑的路径与政策调整[J]. 经济体制改革, 2022(2): 5-10.
- WU Xiaoxu, REN Baoping. The Path and Policy Adjustment of the Reconstruction of Resource Allocation Mechanism Under the Background of Digital Economy[J]. Reform of Economic System, 2022(2): 5-10.
- [17] 许宪春, 张美慧. 中国数字经济规模测算研究: 基于国际比较的视角[J]. 中国工业经济, 2020(5): 23-41.
- XU Xianchun, ZHANG Meihui. Research on the Scale Measurement of China's Digital Economy: Based on the Perspective of International Comparison[J]. China Industrial Economics, 2020(5): 23-41.
- [18] 史丹. 数字经济条件下产业发展趋势的演变[J]. 中国工业经济, 2022(11): 26-42.
- SHI Dan. Evolution of Industrial Development Trend Under Digital Economy[J]. China Industrial Economics, 2022(11): 26-42.
- [19] 陈晓东. 数字经济影响产业结构演进的方向路径[N]. 经济日报, 2021-05-21(6).
- CHEN Xiaodong. The Direction and Path of the Impact of Digital Economy on the Evolution of Industrial Structure[J]. Economic Daily, 2021-05-21(6).
- [20] 刘强, 马彦瑞, 徐生霞. 数字经济发展是否提高了中国绿色经济效率?[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(3): 72-85.
- LIU Qiang, MA Yanrui, XU Shengxia. Has the Development of Digital Economy Improved the

- Efficiency of China's Green Economy?[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(3): 72-85.
- [21] 尚娟, 王珍梦. 数字经济赋能绿色经济发展的效应研究[J]. *生态经济*, 2023, 39(3): 47-56.
SHANG Juan, WANG Zhenmeng. Research on the Effect of Digital Economy Enabling Green Economy Development[J]. *Ecological Economy*, 2023, 39(3): 47-56.
- [22] 宋培, 白雪洁, 李琳, 等. 数字产业创新对产业结构现代化的影响研究[J]. *科学学研究*, 2024, 42(1): 1-18.
SONG Pei, BAI Xuejie, LI Lin, et al. Research on the Impact of Digital Industry Innovation on the Modernization of Industrial Structure[J]. *Scientific Research*, 2024, 42(1): 1-18.
- [23] 李晓华. 数字经济新特征与数字经济新动能的形成机制[J]. *改革*, 2019(11): 40-51.
LI Xiaohua. New Features and the Formation Mechanism of New Growth Drivers of Digital Economy[J]. *Reform*, 2019(11): 40-51.
- [24] 陈浩, 郑洁. 技术进步和产业结构调整对中国碳排放强度的影响[J]. *商业研究*, 2022(6): 1-12.
CHEN Hao, ZHENG Jie. The Impact of Technical Progress and Industrial Structure Adjustment on China's Carbon Emission Intensity[J]. *Commercial Research*, 2022(6): 1-12.
- [25] 易明, 张兴, 吴婷. 中国数字经济核心产业规模的统计测度和空间特征[J]. *宏观经济研究*, 2022(12): 5-20, 66.
YI Ming, ZHANG Xing, WU Ting. Statistical Measurement and Spatial Characteristics of the Core Industries Scale in China's Digital Economy[J]. *Macroeconomics*, 2022(12): 5-20, 66.
- [26] 韩兆安, 赵景峰, 吴海珍. 中国省际数字经济规模测算、非均衡性与地区差异研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2021, 38(8): 164-181.
HAN Zhaoan, ZHAO Jingfeng, WU Haizhen. A Study on the Scale Measurement, Disequilibrium and Regional Differences of China's Inter-Provincial Digital Economy[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2021, 38(8): 164-181.
- [27] 李顺勇, 张睿轩, 张佳璇, 等. 中国省域数字经济发展水平测度研究[J]. *生产力研究*, 2022(12): 38-42, 90.
LI Shunyong, ZHANG Ruixuan, ZHANG Jiaxuan, et al. A Study on Measuring the Level of Digital Economy Development in Chinese Provinces[J]. *Productivity Research*, 2022(12): 38-42, 90.
- [28] 沈洋, 周鹏飞. 中国数字经济发展水平测度及时空格局分析[J]. *统计与决策*, 2023, 39(3): 5-9.
SHEN Yang, ZHOU Pengfei. Measurement and Spatial-Temporal Pattern Analysis of the Development Level of China's Digital Economy[J]. *Statistics & Decision*, 2023, 39(3): 5-9.
- [29] 金灿阳, 徐蔼婷, 邱可阳. 中国省域数字经济发展水平测度及其空间关联研究[J]. *统计与信息论坛*, 2022, 37(6): 11-21.
JIN Canyang, XU Aiting, QIU Keyang. Measurement of China's Provincial Digital Economy and Its Spatial Correlation[J]. *Journal of Statistics and Information*, 2022, 37(6): 11-21.
- [30] 刘军, 杨渊望, 张三峰. 中国数字经济测度与驱动因素研究[J]. *上海经济研究*, 2020, 32(6): 81-96.
LIU Jun, YANG Yuanjun, ZHANG Sanfeng. Research on the Measurement and Driving Factors of China's Digital Economy[J]. *Shanghai Journal of Economics*, 2020, 32(6): 81-96.
- [31] 刘贤赵. 反腐败、经济增长与碳排放治理: 基于空间EKC模型的检验[J]. *中国社会科学院大学学报*, 2022, 42(4): 79-101, 139.
LIU Xianzhao. Anti-Corruption, Economic Growth and Carbon Emission Governance: A Test Based on the Spatial EKC Model[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Social Sciences*, 2022, 42(4): 79-101, 139.
- [32] 付凌晖. 我国产业结构高级化与经济增长关系的实证研究[J]. *统计研究*, 2010, 27(8): 79-81.
FU Linghui. An Empirical Research on Industry Structure and Economic Growth[J]. *Statistical Research*, 2010, 27(8): 79-81.
- [33] 干春晖, 郑若谷, 余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. *经济研究*, 2011, 46(5): 4-16, 31.
GAN Chunhui, ZHENG Ruogu, YU Dianfan. An Empirical Study on the Effects of Industrial Structure on Economic Growth and Fluctuations in China[J]. *Economic Research Journal*, 2011, 46(5): 4-16, 31.
- [34] 温忠麟, 叶宝娟. 中介效应分析: 方法和模型发展[J]. *心理科学进展*, 2014, 22(5): 731-745.
WEN Zhonglin, YE Baojuan. Analyses of Mediating Effects: The Development of Methods and Models[J]. *Advances in Psychological Science*, 2014, 22(5): 731-745.

(责任编辑: 申剑)