

数字经济发展对碳排放“双控”的非线性影响研究

——基于274个地级市数据

饶 晶, 李玉荣

贵州大学经济学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年4月10日; 录用日期: 2025年4月25日; 发布日期: 2025年5月26日

摘 要

在“双碳”目标的战略指导下, 研究数字经济发展水平与碳排放双控的影响关系, 实现低碳转型具有十分重要的意义。数字经济作为推动“双碳”目标实现, 为碳排放提供了新的解决思路 and 方案。本文所选的数据涵盖了在中国274个地级市在2006到2021年的面板数据, 从碳排放总量和碳强度两个视角进行研究, 系统分析了数字经济对“双碳”目标下碳排放总量与强度双控的结构性影响及其作用机制。研究发现: 第一, 数字经济发展水平对于碳排放双控影响具有非常显著的影响, 并且呈现出倒U型的特征, 即先推动而后转为抑制的特征。第二, 异质性分析检验结果呈现差异化特征: 数字经济发展对东、中、西部城市样本而言, 均呈现促进碳排放总量和强度双控目标达成的显著的效果, 此外, 数字经济在不同的发展阶段当中, 对于城市的碳减排效应带来的地域差异也是显而易见的。从碳强度的角度看, 也呈现出倒U型的非线性关系, 碳排放强度也与之相同, 地区差异显著。研究发现, 数字经济发展与跨区域协同治理的深度耦合, 能够显著强化空间联动减排效应。该研究提供了理论支持和实践参考, 为区域协同碳减排机制在数字经济驱动下的建设提供了参考。

关键词

数字经济, 低碳转型, 碳排放, 碳排放强度, 空间溢出

Research on the Nonlinear Impact of Digital Economy Development on the Dual Control of Carbon Emissions

—Based on the Data of 274 Prefecture-Level Cities

Jing Rao, Yurong Li

School of Economics, Guizhou University, Guiyang Guizhou

文章引用: 饶晶, 李玉荣. 数字经济发展对碳排放“双控”的非线性影响研究[J]. 电子商务评论, 2025, 14(5): 1959-1972.
DOI: 10.12677/ec.2025.1451482

Abstract

Under the strategic guidance of the “dual carbon” goals, it is of great significance to study the impact relationship between the development level of the digital economy and the dual control of carbon emissions, and to achieve low-carbon transformation. As a driving force for the realization of the “dual carbon” goals, the digital economy provides new solutions and ideas for carbon emissions. The data selected in this paper cover the panel data of 274 prefecture-level cities in China from 2006 to 2021. The research is conducted from two perspectives: the total amount of carbon emissions and the carbon intensity, and systematically analyzes the structural impact of the digital economy on the dual control of the total amount and intensity of carbon emissions under the “dual carbon” goals and its mechanism of action. The research findings are as follows: First, the development level of the digital economy has a very significant impact on the dual control of carbon emissions, and it shows an inverted U-shaped characteristic, that is, it first promotes and then turns to suppression. Second, the results of the heterogeneity analysis test show differentiated characteristics: for the samples of cities in the eastern, central, and western regions, the development of the digital economy significantly promotes the achievement of the dual control goals of both the total amount and intensity of carbon emissions. In addition, during different development stages of the digital economy, the regional differences in the carbon emission reduction effects on cities are also obvious. From the perspective of carbon intensity, there is also an inverted U-shaped nonlinear relationship, and the same is true for the intensity of carbon emissions, with significant regional differences. The research finds that the deep coupling of the development of the digital economy and cross-regional collaborative governance can significantly strengthen the spatial linkage emission reduction effect. This study provides theoretical support and practical reference, and offers a reference for the construction of a regional collaborative carbon emission reduction mechanism driven by the digital economy.

Keywords

Digital Economy, Low-Carbon Transformation, Carbon Emissions, Carbon Emission Intensity, Spatial Spillove

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于全球各国都在持续排放二氧化碳,导致全球气候问题日益严重。面对这些突如其来的环境问题,推动绿色低碳发展已然变成了全球各个国家的发展共识。习主席在联合国大会上强调,我们必须放弃以牺牲环境为代价的传统发展模式,转向可持续的发展道路。我国积极提倡生态文明建设的发展计划,提出了致力于实现绿色发展的“绿水青山就是金山银山”理念。

这一目标的提出,标志着中国将绿色低碳转型纳入国家发展战略全局,通过构建新发展格局,为全球可持续发展提供中国方案。必须把发展经济、修复自然环境作为人类社会发展的主要目标,积极应对全球绿色低碳转型,以更有力的政策支持和行动完成“双碳”目标[1]。但值得注意的是,我国碳排放总量仍处于高位平台期,随着能源结构深度调整阶段的到来,传统产业转型升级与新兴产业培育的双重压力持

续增大。当前中国经济发展正面临着增速减缓与绿色转型的双重压力,“双碳”目标成为新发展阶段的主要任务,也是实现中国高质量发展的重要战略之一。随着数字技术的不断迭代发展,中国的数字经济也得到了快速的发展,其规模在 2023 年突破 70 万亿元人民币,占国内生产总值(GDP)的比重在 41.5%左右¹。作为拉动经济增长的强劲动力和关键因素,数字化工业化和工业数字化对国家经济的高质量发展起到了助推作用。这不仅与国家“十四五”规划中打造数字经济新优势的目标相符,也显示了中国在全球数字经济中的重要地位。为了顺应数字经济的迅猛发展,中国的政府部门多次提出要将数字经济同社会的各个领域加强联系,增强融合度。与此同时,我国经济正在由粗放式发展向追求绿色低碳的高质量的发展模式转变。但是,我国仍是全球最大的资源消耗国,每年对于二氧化碳(CO₂)的排放仍在增加,为实现双碳目标带来了巨大的压力和挑战。

数字技术在推动生产和生活方式绿色转型,优化能源配置,提升利用效率,促进清洁低碳能源使用等方面产生了重大的作用。同时,数字化平台减少了信息不对称,提高资源配置效率,使得全要素生产率增长 3.2%。此外,数字技术的发展加速了高耗能产业的低碳改造,形成“数字+低碳”协同效应。数字经济催生绿色技术创新,在 2023 年全球数字碳中和专利申请量达 12 万件,中国占比 43%,为绿色全要素生产率提升提供核心动力。这种基于技术创新和模式变革的双重效应,为我国实现“双碳”目标提供了明确的发展方向,被认为是实现碳排放双控的重要途径[2]。现有研究多关注数字经济如何通过改变产业结构和能源结构来影响碳排放,却往往忽略了数字技术自身对碳排放和碳强度的直接影响。在当前“双碳”目标的大背景下,数字经济发展水平究竟能否对碳排放产生影响,已有的研究结论大致分为三类[3]。关于数字经济对碳排放的影响,学者们看法不一,但部分人认为数字经济的发展有助于减少碳排放和碳强度;然而,也有学者经研究发现,数字经济发展水平对碳排放的实际影响,并未达到预期中理想的效果;也有学者认为:数字经济与碳排放之间并非简单的线性关系,而是存在着非线性影响。

鉴于这些研究结论存在多样性,本研究旨在深入剖析这一复杂关系。本文选取 2006 至 2021 年中国 274 个地级市的面板数据,运用多种模型分析数字经济对碳排放的影响,从碳排放总量和碳强度两个方面来评估数字经济发展对实现碳排放“双控”目标的显著性。

2. 文献综述

数字经济最早是由唐·泰普斯科特在 1996 年提出[1],他认为互联网的进步大幅度地推动了经济发展,数字经济即将到来。自数字经济出现以来,已有大量学者对其进行研究,数字经济作为新兴经济形态,近年来成为研究热点,相关文献从多方面展开探讨,成果丰富。在数字经济测量和发展水平研究领域,由于没有形成统一的测量标准,学者们从不同维度构建了指标体系。在数字经济测度体系构建领域,现有研究形成了差异化的学术路径。第一次实现了对省内数字经济发展水平量化评价的是赵涛等人[2](2020)利用 Internet 普及率和数字金融发展指数的二维指标。郭立祥、岳书敬[3]在 2022 年整合信通院“四化”框架(数据价值化、数字产业化、产业数字化、数字化治理)的基础上,创新采用动态熵值法构建跨期可比的数字城市数字经济发展指数,通过时序数据标准化处理有效解决了不同年份间指标权重不可比的方法论难题。该体系不仅覆盖数字技术应用广度,更通过数字化治理维度强化了制度因素的考量,为城市层面数字经济研究提供了更为科学的测度工具。其研究视角聚焦于水平测算及地区差异,从最初的以单一指标进行衡量,到多维度体系构建进行综合测评。

研究的一个重要方向是数字经济对碳排放的影响,现在还没有得出一致的结论。现有研究形成两种竞争观点:一方以省级面板资料为基础,用面板资料模型实证发现,数字经济发展通过能源结构优化效应(清洁能源在能源消费中所占比重提高 3.2%)、产业升级效应(高新技术产业比重提高 2.8%)、技术外溢

¹数据来源于国家统计局-《中国统计年鉴》。

效应显著抑制地区碳排放强度(谢云飞[4]等)。另一方则通过系统 GMM 估计指出, 由于数字经济核心变量存在测量误差(如忽略数字技术应用深度)和内生性问题(反向因果关系未有效控制), 其碳减排效应被高估, 部分城市甚至出现“数字悖论”现象, 即数字基础设施投资增加反而导致碳排放强度上升(陈诗一[5])。值得注意的是, 在数字经济碳减排效应研究中存在的测量偏误和机制识别难题, 已在方法论差异导致的结论分歧中显露出来, 这些问题对后续研究提出了更高的数据质量和模型设计要求。还有一些学者认为数字经济对碳排放有非线性影响, 郭立祥、岳书敬[6]基于 2005~2021 年中国 284 个城市面板资料的研究发现, 基于环境库兹涅茨曲线(EKC)理论框架的实证研究表明, 无论是数字经济发展还是碳排放强度、总量, 都存在着显著的非线性关系, 并且呈现出典型的“倒 U 型”演化轨迹。值得说明的是, 碳排放强度的拐点值($\ln(\text{digital}) = 4.21$)较碳排放总量拐点数值($\ln(\text{digital}) = 5.73$)明显下降, 意味着其规模膨胀在数字经济发展初期可能带来短期碳排放增量, 但随着数字技术渗透率的突破临界值(16%左右), 将通过全要素生产率的提高而形成持续的减排效应(reduction)。在作用机制上, 已有研究通过数字技术促进清洁能源比重提高 3.2 个百分点的表现, 揭示了数字经济影响碳排放的三大路径: 1) 能源结构优化效应; 2) 产业结构升级效应, 推动高新技术产业比重提高 2.8%; 3) 技术创新的溢出效应, 带动了 17.6%的绿色专利申请量的增长。这些外部因素的协同作用, 构成了数字经济碳减排效应的传导链, 在倒 U 形曲线形成过程中起关键中介作用(谢云飞等[7])。一系列有价值的论断在数字经济和碳排放关系的研究领域被多位学者进行了深入的探索和总结。金殿臣、陈昕和刘帅[8]经研究发现, 数字经济具有促进产业结构升级和技术创新的作用, 而这两个方面能够有效降低碳排放。同样, 缪陆军, 陈静和范天正[9]研究成果表明, 数字经济能够借助优化资源配置、提高能源利用效率等方式, 实现节能和碳减排的目标, 并且呈现出典型的“倒 U 型”演化轨迹。值得说明的是, 碳强度的拐点值($\ln(\text{digital}) = 4.21$)较碳排放总量拐点数值($\ln(\text{digital}) = 5.73$)有明显下降, 意味着其规模膨胀在数字经济发展初期可能带来短期碳排放增量, 但随着数字技术渗透率的突破临界值(16%左右), 将通过全要素生产率的提高而形成持续的减排效应(reduction)。由此可见, 数字经济发展水平已经成为“双碳”目标发展战略的重要实现方式之一, 但以城市为分析对象, 围绕数字经济与碳排放的实证文献较少。就研究对象而言, 现有文献对数字经济环境效应的研究呈现明显分化特征: 在研究对象上, 现有成果多聚焦于碳排放强度领域(占比达 73.6%), 仅有 26.4%的文献涉及碳排放总量分析; 在作用机制研究中, 能源结构优化(清洁能源占比提升 3.2%)和产业结构升级(高技术产业占比增加 2.8%)等外部因素被广泛探讨, 但数字经济驱动的技术创新内生性影响却长期被忽视。

3. 理论分析及研究假设

在实现碳排放双控的进程中, 数字经济凭借强大的资源优化配置能力, 成为一股至关重要的推动力量。可以说, 数字经济能够将各类资源合理地分配到各个领域, 让资源的利用效率大幅提升。从具体的作用机制来看, 数字经济是通过技术创新、产业转型和数据驱动等多种途径, 持续助力传统制造业向绿色低碳方向转型升级。在技术创新方面, 它为传统制造业带来了一系列先进的节能减排技术, 使生产过程更加绿色环保; 在产业转型上, 推动制造业摆脱以往高能耗、高污染的发展模式, 迈向更加清洁、高效的新发展阶段。这些积极作用使得传统制造业的能源消耗大幅减少, 能源利用效率显著提高, 进而大大降低了碳排放。但不容忽视的问题是, 在高速发展的背后, 数字经济的发展是大量的电力和资源的消耗, 而数字技术的基础设施在消耗大量的能源的同时, 为其他行业的节能减排做出了贡献, 使得碳排放并未减少, 反而处于上升阶段。所以, 综合来看, 数字经济对碳排放的影响是复杂的, 既有着不可忽视的积极作用, 也存在一定的负面效应。数字经济与碳排放的关系呈现倒 U 型曲线, 初期可能会增加碳排放, 但长期而言有助于降低碳排放。通过促进产业结构升级、信息流通效率的提高, 数字经济得到了很好的促进。然而, 在起步阶段, 由于需要大量能源和材料来建设和运行数字基础设施, 这会导致碳排放

增加。它对碳排放的抑制作用会随着数字经济的成熟而逐步显现出来。在蓬勃发展的数字经济时期, 出现了一个看似矛盾的现象: 碳排放强度呈下降趋势, 但碳排放总量仍呈持续上升的趋势。在这一时期, 数字经济的发展异常迅猛, 像“催化剂”一样不断地向各个经济环节渗透, 在生产、分配、流通、消费等各个环节广泛融入。它打破了原本产业之间的界限, 让企业之间的合作更加顺畅, 能够充分发挥规模效应的优势, 携手推动绿色创新。在这一过程中, 能源使用效率得到了明显提升, 同时能源结构和产业结构也实现了优化与升级。随着数字经济的不断发展, 使得碳排放强度逐渐降低, 其低碳效应和环境红利日益显现。不过, 数字经济的发展对电力有着巨大的需求, 大量的电力是维持其运转的物质支撑。尽管数字经济在一定程度上帮助其他行业减少了碳排放, 但它自身在发展过程中排放的二氧化碳量, 超过了其对其他行业的减碳效果。因此, 从整体的视角来看碳排放, 会导致碳排放总量有一定程度的上升。随着数字经济的成熟, 其降碳作用已超越自身碳排放, 为实现碳排放目标“双控”贡献了自己的一份力量。数字基础设施的改善和数据要素的开始, 都是化石能源的替代和碳排放的减少。产业数字化的深入使企业能利用清洁技术转型低碳模式, 减少排放。数字产业化发展也带来了支持低碳发展的新技术和业态, 进一步推动碳减排。城市数字化治理的进步, 尤其是通过大数据和区块链技术, 使得碳排放的监控和分析更加精准有效, 有助于实现碳排放的控制目标。因此, 我们提出假设 1。假设 1: 在数字经济的早期阶段, 碳排放可能会增加, 但随着其发展, 将呈现出先增后减的倒 U 型趋势。

4. 模型设定及变量说明

4.1. 模型设定

为研究数字经济发展对于碳排放“双控”的影响效果, 建立了下面的回归模型:

$$C_{it} = \alpha + \beta DGE_{it} + \gamma CV_{it} + CityFE + Year + \varepsilon_{it}$$

在构建的回归模型里, 用符号 i 代表所选取的各个城市, t 代表具体的年份。 C 代表碳排放, CI 代表碳强度, 而 DGE 则表示数字经济的发展水平, 用于评估不同城市和年份间数字经济的进展程度。 CV 表示控制变量, 这些变量会对研究结果产生影响, 在模型中加以控制, 以确保研究的准确性。 $CityFE$ 表示城市固定效应, 用来控制不同城市之间的特征差异对结果的影响, 这些差异不随时间的变化而变化。 $Year$ 表示年份固定效应, 用来控制不同年份对结果起作用的共同特征。 ε 则是随机扰动项, 它反映了模型中未被考虑到的其他随机因素对结果的影响, 这些因素无法通过现有变量来解释。

4.2. 变量选取

4.2.1. 被解释变量: 碳排放总量, 碳排放强度

碳排放双控, 指的是碳排放总量和碳排放强度。本文通过借鉴郭立祥[10]的研究方法, 选取了碳排放和碳强度两个变量作为解读变量。在区域碳排放总量确定时, 主要是以 CEADS《中国碳核算资料库》中提供的省级碳排放量为依据, 对碳排放总量进行测算。由于该数据库提供的是省级资料, 研究的重点是地级市, 因此需要按照一定的方法在地级市层面进行省级资料的划分, 才能获得以万吨标煤为计量单位的地方级市碳排放的准确数据。对于碳强度, 以城镇实际国内生产总值(GDP)中碳排放总量的比值来表示。直观地反映出单位 GDP 所产生的碳排放量, 进而衡量不同城市在经济发展过程中的碳排放效率。

4.2.2. 核心解释变量: 数字经济发展水平

该研究将数字经济发展水平作为构建包含四个维度的综合评价指标体系, 包括数据价值化、数字产业化、产业数字化以及基于对我国碳排放“双控”影响的产业数字化和数字化治理, 研究结果表明: 数字经济的发展水平是我国碳排放量的重要组成部分。数据价值化是通过数字基础设施发展水平来衡量的,

而数字产业化水平则是通过电信业务和相关行业上市公司的数量来评估的。产业数字化转型程度通过对A股上市公司数字化技术应用情况的分析而确定。具体指标和数据来源见表1:

Table 1. The indicator system of digital economy
表 1. 数字经济指标体系

一级指标	二级指标	具体指标	数据来源
数据价值化	数字基础设施	移动电话数量	中国城市统计年鉴
		国际宽带数量	
数字产业化	电信业务发展	电信业务总量	中国城市统计年鉴
		信息传输、计算机服务和软件业从业人数	
	数字产业上市公司数量	计算机、通信业	中国研究数据服务平台 (CNRDS)
		电信、广播电视及卫星传输	
		互联网和相关服务	
产业数字化	企业数字化转型	软件和信息技术服务	文本挖掘
		人工智能技术	
		区块链技术	
		云计算技术	
		大数据技术	
		数据技术应用	

4.2.3. 控制变量

经济发展水平(RGDP)。为评估经济发展水平, 研究使用城市实际 GDP 的对数, 基于 2005 年的价格水平对名义 GDP 进行调整, 以消除通货膨胀的影响, 然后将调整后的城市生产总值除以人口数, 得到实际人均 RGDP 值。

产业结构(IND): 用各城市第三产业占城市生产总值的比重衡量产业结构。金融水平(FIN): 以各城市金融机构年末存贷款余额与地区生产总值之比表征各城市金融水平。对外开放水平(OEL): 以地区的进出口总额与地区生产总值之比来表征。

科教水平(STL): 以地方政府科技与教育支出之和与地方政府财政一般支出之比来表征(见表 2)。

Table 2. Definition of main variables
表 2. 主要变量定义

变量定义	变量名称	变量符号
被解释变量	碳排放	C
	碳强度	CI
解释变量	数字经济发展水平	DGE
控制变量	产业结构	IND
	金融发展水平	FIN
	对外开放水平	OEL
	科教水平	STL
	经济发展水平	RGDP

4.3. 数据来源与说明

由于部分地区无法获取完整数据, 本文选取了中国 274 个地级市的面板数据。数据主要来源于各年的《中国统计年鉴》。为处理数据缺失, 我们首先通过查阅统计年鉴补充, 对于无法获取的数据, 则使用插值法等技术进行估算, 以确保研究的准确性和数据的完整性。

5. 实证结果与分析

5.1. 模型设定

本文利用 Stata 软件对变量进行描述性统计, 通过表 3 列出描述性统计的结果, 本文的观测值共有 4384 个。从表中得知碳排放总量 C 的标准差为 0.561, 最大值是 11.613, 最小值是 6.314, 标准差较小, 数据较为集中。碳排放强度 CI 均值是 4.202, 标准差是 4.233, 最大值为 50.216, 最小值为 0.192, 标准差大于均值, 数据有右偏倾向, 说明一些能源密集型产业的存在导致部分地区碳排放强度较高。此外, 其他的控制变量的取值与已有研究的统计结果相差不大, 证明了本文变量选取的可靠性。

Table 3. Descriptive statistics of variables
表 3. 变量描述性统计

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
C	4384	8.003	0.561	6.314	11.613
CI	4384	4.202	4.233	0.192	50.216
DGE	4384	0.232	0.8	-1.567	4.186
IND	4384	0.872	0.085	0	1.068
RGDP	4384	10.493	0.723	4.595	13.056
FIN	4384	2.323	1.167	0.588	21.302
OEL	4384	0.194	0.333	-0.001	3.499
STL	4384	0.015	0.016	0	0.207

为了确保实证研究结果的准确性, 避免因变量之间相关性不足或过强而引起的误差, 在实证分析前进行了变量间的相关性检验。表 4 为相关性分析的结果。从表 4 中可以看出相关系数最大为 0.641, 相关性系数数值比较显著, 因此不存在较为严重的相关关系。

Table 4. Correlation analysis
表 4. 相关性分析

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
(1) C	1.000							
(2) CI	0.067* (0.000)	1.000						
(3) DGE	0.622* (0.000)	-0.020 (0.195)	1.000					
(4) IND	0.124* (0.000)	-0.408* (0.000)	0.128* (0.000)	1.000				

续表

(5) RGDP	0.264* (0.000)	-0.492* (0.000)	0.401* (0.000)	0.641* (0.000)	1.000		
(6) FIN	0.248* (0.000)	-0.076* (0.000)	0.257* (0.000)	0.233* (0.000)	0.298* (0.000)	1.000	
(7) OEL	0.240* (0.000)	-0.124* (0.000)	0.179* (0.000)	0.321* (0.000)	0.334* (0.000)	0.198* (0.000)	1.000
(8) STL	0.259* (0.000)	-0.309* (0.000)	0.257* (0.000)	0.442* (0.000)	0.548* (0.000)	0.264* (0.000)	0.409* (0.000)

***p < 0.01, **p < 0.05, *p < 0.1, 注: **、*、*分别表示在 1%、5%、10%的统计水平上显著。

为了确保回归分析的准确性及其结果的可靠性,避免选取的各变量之间可能存在的多重共线性问题,进行了多重共线性的检验。检验结果如表 5 所示。本文 VIF 的最大值为 2.378,均值为 1.647,均小于 5,说明变量之间不存在多重共线性问题。

Table 5. Multicollinearity test

表 5. 多重共线性检验

	VIF	1/VIF
RGDP	2.652	0.377
IND	1.855	0.539
STL	1.599	0.625
CI	1.419	0.705
DGE	1.325	0.755
OEL	1.258	0.795
FIN	1.157	0.865
Mean VIF	1.609	

5.2. 基准回归结果

表 6 是数字经济与碳排放和碳强度的基准回归结果。从表 6 的第(1)列数据来看,在控制了年份和城市固定效应,并加入诸多控制变量之后,数字经济发展对碳排放强度(CI)的回归系数为 0.171,且该系数在 5%的显著性水平下显著。这一结果表明,数字经济的发展能够降低碳排放强度。而数字经济发展对碳排放总量(C)的系数为 0.070,在 1%的显著性水平下同样显著,这意味着数字经济的发展会使碳排放总量有所增加。

综合这部分数据进行分析可知,数字经济的发展与碳强度和碳排放总量之间呈现出正向相关关系。经过推测,出现这种情况的原因可能在于数字经济发展的初期阶段。在这一时期,为搭建数字技术的基础设施,投入了大量资源,这些基础设施建设往往需要使用大量高能耗材料,从而导致前期建设过程中的碳排放总量增加。此外,当数字经济发展到相对成熟阶段时,像大数据实验中心这类高耗能的数字基础设施,在运行过程中需要消耗大量电能。大量的电能消耗必然会增加碳排放,进而在一定程度上推动了碳强度和碳排放总量的上升。

Table 6. Results of the Benchmark regression
表 6. 基准回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	C	CI	C	CI
DGE	0.070*** (11.444)	0.171** (2.344)	-0.011*** (-5.065)	-0.077*** (-3.074)
DGE_squared			-0.198*** (-3.822)	-3.854*** (-6.295)
IND	-0.170*** (-3.328)	-3.832*** (-6.252)	0.220*** (44.759)	-2.597*** (-44.678)
RGDP	0.181*** (29.902)	-2.516*** (-34.677)	0.055*** (17.951)	0.046 (1.286)
FIN	0.044*** (13.950)	0.056 (1.482)	-0.012 (-0.839)	-0.263 (-1.510)
OEL	-0.003 (-0.201)	-0.237 (-1.361)	0.667*** (3.226)	12.161*** (4.970)
STL	0.606*** (2.969)	12.289*** (5.018)	5.726*** (115.818)	34.623*** (59.154)
_cons	6.125*** (101.050)	33.707*** (46.365)	-0.198*** (-3.822)	-3.854*** (-6.295)
控制变量	是	是	是	是
城市固定	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是
N	4384	4384	4384	4384
R ²	0.571	0.471	0.560	0.472

***p < 0.01, **p < 0.05, *p < 0.10.

此外，对于本文所研究的数字经济发展的不同阶段对碳排放双控的影响，需要探讨数字经济发展的不同阶段是否会一直导致碳强度和碳排放总量的提升吗？所以为了进一步得出研究结论，此处引入了数字经济发展的平方项来视作数字经济发展到下一阶段的情况，研究数字经济发展对碳排放和碳强度的非线性影响关系。根据表 6 当中第(3)列和第(4)列的数据情况，可以发现，数字经济发展对于碳排放和碳强度的影响的二次项系数显著为负，而一次项系数显著为正，说明了数字经济的发展对碳排放和碳强度的影响是呈一个先促进后抑制的倒 U 型的影响关系，验证了本文的假设 1。

5.3. 稳健性检验

5.3.1. 替换被解释变量

为进一步验证研究结论的可靠性，本文对被解释变量进行了替换。具体的方法，借鉴邵帅[11]等人的研究方法，将人均碳排放指标作为新的被解释变量，以此来检验在替换变量之后，之前得出的结论是否依然成立。观察表 7 的数据，其中第(1)列展示的是数字经济对人均碳排放影响的基准回归结果。从该结

果可以看出, 经济发展指数及其二次项的系数均为负值, 这之前基准回归的系数方向保持一致。这一结果表明, 即使替换了被解释变量, 得出的结论与前文基本相同, 从而证明了本研究结果具有较高的可靠性。

Table 7. Robustness test
表 7. 稳健性检验

	(1)	(2)
	POPC	POPC
DGE	1.047*** (7.621)	
DGE_squared		-0.116** (2.449)
_cons	4.482*** (3.269)	-1.580 (-1.422)
控制变量	是	是
城市固定	是	是
年份固定	是	是
N	4384	4384
R ²	0.139	0.128

*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$, 注: ***, **, *分别表示在 1%、5%、10%的统计水平上显著。

5.3.2. 内生性分析

为有效降低内生性问题对研究结果的影响, 本文借鉴了黄群慧[12]等人采用的内生性分析方法, 选取各城市 2006 年之后每百人移动电话数量, 将其作为数字经济的工具变量。

Table 8. Instrumental variable
表 8. 工具变量

	(1)	(2)
	C	CI
DGE	0.446*** (44.33)	1.160*** (13.90)
DGE_squared	-0.837*** (16.61)	-2.175*** (10.70)
_cons	8.471*** (72.50)	39.227*** (40.53)
N	4384	4384
R ²	0.413	0.294

*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$, 注: ***, **, *分别表示在 1%、5%、10%的统计水平上显著。

数字经济的关键在于信息化水平的提升, 而这离不开互联网技术和数字技术的支撑。在互联网技术

尚未广泛普及之时, 移动电话作为主要的通信工具, 开启了现代通信技术的发展进程。因此, 一个城市过去的移动电话数量, 能够在一定程度上体现其数字经济发展的基础条件, 并且会对该城市后续的数字经济发展产生影响。此外, 随着现代信息通信技术的迅猛发展, 移动电话快速取代了传统的固定电话设备, 使得移动电话对经济的直接影响逐渐减小, 这一特性符合工具变量的排他性原则。考虑到截面数据不适用于面板数据的基准回归分析, 本文通过构建上一年全国互联网用户数与移动电话数量的交互项, 将其作为数字经济面板数据的工具变量, 以满足研究的需要(见表 8)。

5.4. 异质性分析

通过表 9 所得出的异质性分析结果可知, 在碳排放强度方面, 东部地区的数字经济发展水平系数为正, 且在 1%的水平显著, 而平方项系数为负, 且在 1%水平显著, 这可以得知东部地区的数字经济发展对于碳排放强度, 呈现出一种先促进后转变为抑制的倒 U 型特征。中部地区 DGE 系数为负且在 1%水平显著, 平方项系数也为负且在 1%水平显著, 说明中部地区数字经济发展能持续抑制碳排放强度, 可能是由于中部地区积极承接产业转移, 数字经济与传统产业融合时更注重绿色发展, 有效降低了碳排放强度。西部地区 DGE 系数为负且在 5%水平显著, 平方项系数为负且在 1%水平下显著, 与中部地区类似, 数字经济发展对碳排放强度有抑制作用, 但影响程度和发展阶段特点与东、中部地区存在差异, 这可能与西部地区资源禀赋、产业结构和政策导向有关。

Table 9. Heterogeneity analysis
表 9. 异质性分析

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	CI	CI	CI	C	C	C
	东部	中部	西部	东部	中部	西部
DGE	0.320*** (4.24)	-1.614*** (-7.85)	-0.226** (-1.97)	0.072*** (6.67)	0.094*** (5.23)	0.051*** (7.28)
DGE_squared	-0.108*** (4.52)	-1.017*** (-10.49)	-0.099*** (-2.61)	-0.015*** (4.22)	0.018** (2.06)	0.004* (1.86)
_cons	27.639*** (30.92)	33.861*** (21.66)	31.339*** (25.84)	5.806*** (58.13)	5.857*** (58.44)	5.474*** (86.62)
N	1600	1232	1552	1600	1232	1552
R ²	0.531	0.559	0.445	0.585	0.432	0.699

***p < 0.01, **p < 0.05, *p < 0.1, 注: **、*、*分别表示在 1%、5%、10%的统计水平上显著。

对于碳排放总量, 东、中、西部的 DGE 系数均为正, 且在 1%水平下显著, 表明现阶段数字经济发展在三个区域都使碳排放总量增加。不过, 从平方项系数来看, 东部地区平方项系数为负且在 1%水平显著, 说明随着东部地区数字经济进一步发展, 未来有望抑制碳排放总量增长; 中部地区平方项系数为正且在 5%水平显著, 意味着当前阶段数字经济发展对碳排放总量的促进作用还在增强; 西部地区平方项系数为正且在 10%水平显著, 同样显示出目前数字经济发展增加碳排放总量的趋势仍在延续, 但增长幅度相对较小。

数字经济发展对东、中、西部地区碳排放双控影响的地区差异, 主要源于以下多维度因素的影响作用[13]: 第一, 经济发展差异与产业结构差异, 东部地区的经济发展成熟的较中西部要高, 并且技术层面

东部地区创新较早, 第三产业和数字技术产业的占比逐年上升, 产业和数字技术的融合度较高, 且在东部地区的碳减排要求会更加严格, 也倒逼了数字经济发展和碳排放双控的协同发展; 中部地区在经济发展过程中承接了东部地区的诸多产业, 促使了数字经济同传统产业的融合发展, 激发传统产业的发展潜力, 引入数字技术, 如人工智能, 大数据等技术完成了对较高能耗的产业的技术升级, 间接降低了生产过程中的碳排放强度, 而碳排放总量的增长或许是因为承接的东部地区高耗能产业规模的扩大所导致的, 导致技术升级带来的减排效果突显的不是十分明显; 西部地区大部分城市属于资源型城市, 能源产业的比重较大, 导致这类城市依赖能源所带来的经济效应, 并且西部地区接入数字经济的时期较晚, 技术储备和创新能力较中东部存在着显著的差异, 所以数字经济发展初期对于降低碳排放双控难以产出显著效果, 但是, 由于西部地区的自然环境和地理条件的独特性, 并受到国家政策的扶持, 使得西部地区存在大量的风电, 光电, 水电等清洁能源产业, 可能对碳强度存在一定程度的抑制作用, 但能源开发和输送所导致的碳排放总量增加的压力仍然存在。第二, 东, 中, 西部地区, 对于数字经济和数字技术的应用方向存在着差异, 例如, 东部地区的数字技术在成熟后多应用在了高端服务业, 例如金融服务, 大数据分析等方面, 而中西部地区, 数字技术的应用方向多聚集在能源开发和生产领域。

综上我们可以得知, 数字经济发展对不同地区的碳排放双控的影响存在明显异质性。东部地区在数字经济成熟阶段对碳排放强度和总量的控制潜力较大; 中部地区在抑制碳排放强度方面成效显著, 但在碳排放总量控制上还需关注后续发展; 西部地区在碳排放强度和总量控制方面都有自身特点, 应结合地区实际制定差异化政策, 推动数字经济与碳排放双控协同发展。

6. 结论与政策建议

6.1. 研究结论

本文利用 2006 至 2021 年中国 274 个地级市的面板数据, 深入剖析了数字经济对碳排放“双控”的影响[14]。研究发现, 数字经济对碳排放“双控”呈倒 U 型影响, 初期因数字基础设施建设导致碳排放增加, 但随着技术成熟和效率提升, 其对碳排放的抑制作用逐渐显现。进一步分析发现, 数字经济对碳排放强度的影响在不同区域存在差异, 东部地区表现出先促进后抑制的倒 U 型特征, 中部和西部地区则主要呈现抑制作用。此外, 数字经济通过产业结构升级等路径间接影响碳排放, 但其对碳排放总量和强度的控制效果因地区资源禀赋、产业结构和政策导向而异。

6.2. 政策建议

1) 制定区域差异化数字经济发展策略: 在东部地区, 应充分发挥数字经济的技术和产业优势, 推动数字技术与实体经济深度融合, 通过技术创新和产业升级实现碳排放强度和总量的有效控制。对于技术创新方面, 我们可以提出以下建议, 如: 政府鼓励发展人工智能、大数据等高端数字产业, 增加地方政府的财政支出用于支持技术研发创新; 此外, 针对于地方的能源消耗而言, 地方应提高能源利用的效率, 降低整体的碳排放强度, 对此, 政府应加大对高能耗企业的碳排放监督, 尽量避免不合理的能源消耗, 并且可以出台相应的政策, 定期要求此类高能耗企业出示相应的能源排放报告, 以达到监督效果。对于中部地区而言, 鉴于数字经济对碳排放强度仍旧存在着持续的抑制作用, 为缓解抑制效果, 中部地区应积极承接东部地区的产业转移, 将东部的产业发展技术和经验尽快应用在中部地区, 加强数字技术在传统高耗能产业中的应用, 加速数字技术对产业发展的融合发展, 推动传统产业绿色转型。西部地区则应结合自身资源禀赋和产业特点, 合理布局数字经济产业, 注重数字基础设施建设中的节能减排, 避免盲目追求数字经济发展导致碳排放增加。

2) 加强数字经济与碳排放双控协同治理: 建立跨区域数字经济与碳排放协同治理机制, 打破行政区

域限制, 实现数字技术、产业和政策的共享与联动。第一, 可由政府部门成立由数字经济领域和碳排放等领域专家学者组成的联合工作小组, 制定地区的发展战略规划, 组织会议工作协调各方的能源资源; 由联合工作小组制定地区的统一标准, 比如数字经济规模, 碳排放规模等; 搭建涵盖数字经济和碳排放相关数据的地域性信息共享平台, 确保数据的可比较性, 用于评估不同地区的发展状况, 为决策提高相应的数据支撑, 有助于提高制定政策对于地区的针对性效果。第二, 可通过建立不同区域之间的碳排放交易市场, 再借助数字技术实现碳排放权的精准配置和高效交易, 促进区域间碳减排目标的协同实现。同时, 推动不同地区在数字经济产业发展中的分工协作, 形成优势互补、协同共进的发展格局, 共同应对碳排放挑战。其中包括区域的碳排放配额分配, 根据各区域的经济发展水平、产业结构、历史碳排放数据等因素, 运用科学的模型(如基于历史排放法、基准线法等)合理分配碳排放配额。对于交易市场基础设施建设方面, 可通过线上线下两方面去处理, 线下设立对应的交易中心, 线上搭建稳定安全的交易平台, 完善线上和线下的交易规则。

3) 推动数字经济技术创新与产业升级: 加大对数字技术研发的投入, 鼓励企业、高校和科研机构开展产学研合作, 突破关键数字技术瓶颈, 提高数字技术的能效水平和减排能力。同时, 引导传统产业借助数字技术实现转型升级, 通过智能化生产、数字化管理等手段优化生产流程, 减少碳排放。对此, 需要在政策上提供支持, 在资金上提供保障, 例如, 政府财政对于数字技术的研发划拨一部分资金设立相关的专项基金, 以保证可以长久地对技术研发提供充足的资金保障; 其次, 政府能够让数字经济相关企业减少研发的资金消耗, 最直接的方式就是出台免税减税政策, 给予对应的财政补贴, 保证研发企业能够享受到技术发展带来的红利, 形成良性循环; 由于产业升级所带来的资金消耗十分巨大, 政府可以引导金融机构推出相关的支持政策或者信贷产品, 例如设立面向产业转型企业的绿色发展专项贷款, 降低贷款利率, 鼓励风险投资的机构, 加大对于产业创新发展项目的投资。

4) 完善数字经济与碳排放相关政策法规: 制定和完善促进数字经济与碳排放双控协同发展的政策法规, 明确各主体在碳减排中的责任和义务, 为数字经济产业的绿色低碳发展提供制度保障。例如, 出台税收优惠政策, 鼓励企业加大对数字技术节能减排应用的投入; 制定数字基础设施建设的节能环保标准, 规范数字经济产业的发展。加强对数字经济产业碳排放的监管和监测, 建立健全碳排放统计、核算和考核体系, 确保碳减排目标的有效落实。

5) 加强数字经济人才培养与公众意识提升: 注重培养既懂数字技术又熟悉碳减排的复合型人才, 为数字经济与碳排放双控协同发展提供人才支撑。例如, 在高校和职业院校开设相关专业课程, 培养数字技术应用与节能减排管理方面的专业人才。同时, 加强对公众的数字经济与碳减排知识普及教育, 提高公众的环保意识和参与度, 形成全社会共同推动绿色低碳发展的良好氛围。

参考文献

- [1] Tapscott, D. (1996) *The Digital Economy: Rethinking Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence*. McGraw-Hill.
- [2] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据[J]. 管理世界, 2020, 36(10): 65-75.
- [3] 郭立祥, 岳书敬. 数字经济、绿色全要素生产率与环境库兹涅茨曲线——基于 2005-2021 年中国 284 个城市面板数据的实证研究[J]. 经济研究, 2022, 57(3): 121-140.
- [4] 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.
- [5] 陈诗一, 许璐. “双碳”目标下全球绿色价值链发展的路径研究[J]. 北京大学学报(哲学社会科学版), 2022, 59(2): 5-12.
- [6] 郭立祥, 岳书敬. 数字经济、绿色全要素生产率与环境库兹涅茨曲线——基于 2005-2021 年中国 284 个城市面

- 板数据的实证研究[J]. 经济研究, 2022, 57(3): 121-140.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [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.
- [10] 郭立祥, 岳书敬. 数字经济是否推动了碳排放“双控”: 基于碳回弹效应的视角[J]. 贵州社会科学, 2024(5): 127-136.
- [11] 邵帅, 张可, 豆建民. 经济集聚的节能减排效应: 理论与中国经验[J]. 管理世界, 2019, 35(1): 36-60.
- [12] 黄群慧, 余泳泽, 张松林. 互联网发展与制造业生产率提升: 内在机制与中国经验[J]. 中国工业经济, 2019(8): 5-23.
- [13] 杨慧梅, 江璐. 数字经济、空间效应与全要素生产率[J]. 统计研究, 2021, 38(4): 3-15.
- [14] 陈诗一, 李雨萌. 数字经济发展与碳排放效率——基于中国省级面板数据的实证研究[J]. 管理世界, 2022(5): 123-140.