

数字经济背景下的碳排放减少机制研究

——基于中国上市公司的检验证据

冉懋旭, 雷昊憬

贵州大学管理学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年4月25日; 录用日期: 2025年5月12日; 发布日期: 2025年6月11日

摘要

近年来, 数字经济的增长速度和影响力前所未有, 已成为推动经济发展的新动能、构建国家竞争力新优势、重塑全球竞争格局的关键引擎。数字经济不仅代表了工业未来发展的方向, 其对碳排放的影响也引起了广泛的关注。本文研究发现数字经济的发展水平与碳排放效率之间存在着明显的“先升后降”的倒“U”型关系; 异质性检验发现数字经济对碳排放的影响受到不同地区影响的差异。本文为更好地推动减排、保障国家能源安全, 并助力实现“双碳”目标提供了新的途径。

关键词

数字经济, 碳排放, 双碳, 碳排放减少机制

Research on Carbon Emission Reduction Mechanism under the Background of Digital Economy

—Based on the Inspection Evidence of Chinese Listed Companies

Maoxu Ran, Haojing Lei

School of Management, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Apr. 25th, 2025; accepted: May 12th, 2025; published: Jun. 11th, 2025

Abstract

In recent years, the growth and impact of the digital economy has been unprecedented and has become a new engine of economic development, a key engine for building new national competitive

advantages and shaping global competition. The digital economy not only represents the future development of industry, but also the impact of carbon emissions. The study found that there is a significant “reverse U-ratio” between the level of development of the digital economy and the efficiency of carbon emissions, where emissions increase and decrease first. Heterogenetics tests show that regional differences affect the impact of the digital economy on carbon emissions. This article provides new ways to contribute to reducing emissions, ensuring national energy security, and contributing to achieving double carbon targets.

Keywords

Digital Economy, Carbon Emissions, Dual Carbon, Carbon Emission Reduction Mechanisms

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

近年来，数字经济的增长速度和影响力前所未有，已成为推动经济发展的新动能、构建国家竞争力新优势、重塑全球竞争格局的关键引擎。我国已把数字化发展的推进作为国策并将其纳入党的二十大的议程，特别强调需要“快速促进数字经济的发展”及“积极构建数字化的中国”，这为我们确定了未来数字经济发展的道路。依赖于不断优化的信息通信设施、智能化设备等等这些信息化手段，我们能够深入地应用数字科技和数据资源，进一步促成经济结构由传统的制造业转变至智力型产业，深远影响了整个经济运作的方式。数字经济不仅代表了工业未来发展的方向，其对碳排放的影响也引起了广泛的关注，但就数字经济对碳排放的影响方式以及影响程度仍未达成共识。因此，对数字经济对碳排放的影响进行科学评估，是实现碳达峰、碳中和目标的关键基础和必要条件。

对于各国的核心政策难题中，如何平衡经济发展与环保质量一直是一个重要议题[1]。部分研究表明，数字化产业自身有可能成为一种高能耗产业，从而造成严重的环境压力[2]，同时，其产生的累计碳排放可能会对 future 经济效益产生消极的影响[3]。就产品角度而言，信息化及通讯技术的制造和使用过程中会产生大量碳排放，比如智能手机、数据中心和云服务器的生命周期分析结果显示这一点。数据中心和云服务器是主要的碳排放源，特别是它们的运行过程需要大量能量[4]。据统计，2020 年中国数据中心的总用电量大约 2000 亿千瓦，仅为三峡水电站 2020 年全年的发电量的两倍¹。此外，从整个行业视角观察，信息科技业的碳排放增速也在明显提升。以中国为例，预测至 2024 年，比特币产业将会消耗掉 296.59 太瓦时的电力资源，并释放出约 1.31 亿吨的碳排放[5]。然而，尽管看起来数字经济与碳排放之间存在紧密联系，但我们不能简单地认为数字经济就是“亲碳”的。

数字经济已经成为全球经济增长的主要推动力，深刻地影响着人们的生产方式。在“十三五”期间，中国数字经济取得了显著进展[6]。到 2020 年，中国的数字经济总量接近 5.4 万亿美元，其中核心产业的增值占据了我国国家 GDP 的 7.8%²。这对于推动我国经济持续健康发展起着关键作用。然而，数字经济的发展是否能够有效促进“双碳”目标的实现？基于这一背景，本研究旨在探讨数字经济与碳排放之间的关系，重点分析其是否呈现正“U”型或倒“U”型的非线性趋势，并探讨这一关系的拐点当前处于哪个阶段，以及数字经济的具体影响。解答这些问题对于推动中国数字经济发展，并在实现“双碳”目标

¹ 数据来源于《中国统计年鉴》与国务院国有资产监督管理委员会官网。

² 数据来源于《中国统计年鉴》。

过程中发挥积极作用, 具有重要的实践意义和战略价值。

2. 文献综述

研究碳排放减少机制的工作始于分析碳排放变化的驱动因素[7]。学者们采用了 Kaya 等式、LMDI、GDMI、STIRPAT 等模型来探讨这些因素, 结果表明, 产出规模和资本规模有助于碳排放增加, 而投资碳强度、产出碳强度、能源强度和固定资产投资效率则有助于碳排放减少。

以往研究一致认为, 提高能源效率和调整能源结构对减少碳排放有积极作用, 但技术进步的影响存在双重性, 即既有促减效应, 也有促增效应[8]。实证研究表明, 贸易开放、金融科技和环境规制等因素对碳减排有显著作用, 而研发投入、经济集聚和清洁能源发展与碳排放之间存在复杂的非线性关系, 并且随着发展阶段的不同, 作用也有所变化[9]。同时, 随着数字经济的发展, 学者们开始关注数字经济与碳排放之间的关系, 研究集中在数字技术、互联网进步以及数字经济如何影响碳排放。从微观角度, 探讨了技术变革、能源替代效应和企业数字化转型等因素; 从宏观角度, 研究了碳税政策、国际贸易、经济结构调整等对碳排放的影响。部分文献也探讨了数字技术创新对碳排放的绩效、影响渠道和空间效应[10]。

数字技术及其产业的快速发展, 引致电力使用增长, 推动碳排放增长。尽管有些研究者持相反意见, 他们主张数字化技术的进步能有效地削减温室气体的产生, 进而改善生态环境状况[11], 例如, 通过扩大网络覆盖面或加大对 ICT 设施的投入可以大幅度降低二氧化碳的释放量。而利用信息化通讯科技会明显加重 CO₂ 的排放[12]。借助数字化的手段建立的碳交易市场, 既可推动碳的减少及降低其浓度[13], 也被视为达成碳平衡的关键途径。就互联网发展而言, 不仅可以抑制资源诅咒, 而且显著提高了碳排放绩效。数字经济发展显著降低了各类污染物排放, 驱动低碳产业发展, 降低碳排放强度[14], 但这种作用存在“东抑、中促、西无”的区域异质性[15]。总而言之, 数字经济发展可以有效抑制碳排放, 改善碳排放绩效, 且数字经济发展与碳排放呈先增后减的倒“U”型关系。数字经济发展对中国全要素碳生产率水平具有促进作用, 可以成为国家提高绿色发展水平的新能源。

综上所述, 已有关于数字经济与数字经济与碳排放的相关文献提供了有益借鉴, 基于此, 该研究可能的边际贡献主要有两个方面: 一是在完善数字经济综合评价的基础上, 从碳排放规模和碳排放效率两个方面分析数字经济与碳排放间的非线性关系; 二是根据数字经济对碳排放非线性影响的拐点, 给出各省份及区域因现阶段数字经济发展水平不同制定适宜本地的数字经济发展政策, 从而实现数字经济发展的减排效益最大化。

3. 理论分析与研究假设

数字经济作为新兴的经济形态, 颠覆了传统经济模式中规模经济的概念。随着数字技术的普及, 地区的技术和生产效率得到提升, 进而形成了规模报酬增加的效果。数字经济有助于培养新的增长点, 促进区域经济空间的重构, 推动绿色生产要素在各地的聚集, 减少资源和环境要素的过度利用。数字经济通过技术渗透和产业融合产生结构性效应, 改善了传统产业布局, 提高了整体产业的效率和可持续性。此外, 数字经济打破了产业的边界, 推动高碳行业的转型, 促进能源结构向低碳化发展, 加速低碳产业结构的升级, 朝着高产出、低排放的清洁行业转变。数字经济的技术效应拓展了生产可能性的边界, 是实现地区绿色经济发展转型的关键, 技术进步可以有效控制去碳成本, 同时推进新能源技术的研发和运用, 改善环境污染, 减少碳排放。

然而, 当前中国并未充分发挥其数字经济的绿色、环保特性[16]。首先, 快速发展的数字经济可能会刺激生产力的扩大化, 进而触发“杰文斯悖论”现象, 也就是技术的提高虽然能带来更高的效益, 但同

时也可能增加对资源的需求。其次, 数字经济发展过程中往往伴随大量的数字化基础设施构建(例如 5G 基站等), 这类设备的建造与运行过程中的能源耗费相对较高。而目前, 中国的电力供应仍以煤电为主, 这使得数字经济的发展在短期内可能对碳排放产生一定的负面影响。当煤炭消耗增多的时候, 其产生的碳排放也会相应地提升。然而, 部分地区过于重视数字化的普及程度, 忽略了数字基础建设的寿命及合理的配置安排, 这会导致过度的重复投资[17]。这样的行为除了造成资源和环保的损失外, 还会加重环境的外部负担[18]。研究表明, 技术的改进有可能触发“能源反弹”的效果, 从而引起碳排放的增大[19]。另外, 由于数字化经济带来的大幅收益影响了民众的需求和购买能力, 加上“互联网+”等线上交易模式的发展, 又进一步推高了消费水平[20]。受利欲驱使的企业有可能会过度追逐盈利, 无节制地扩充产出, 最终导致能源需求的急速上涨, 并伴随著碳排放的提高。与此同时, 在数字化经济的环境中, 网络利用过去的消费记录来精确了解顾客喜好, 形成所谓的“长尾效应”, 让一些冷门商品的需求得到延续, 这也进一步增加了总体能源需要和碳排放的压力[21]。总而言之, 本文章提出了:

H1: 数字化经济和碳排放之间的关系是非线性的。

对于数字经济如何影响碳排放的讨论中, 我们发现其效果明显地受到地理位置因素的影响[22]。西部的产业结构主要依赖于高能源消耗和自然资源密集型的大规模制造业, 然而东部的重点则是发展科技含量高的微型制造业[23]。此外, 各地区的城市化进程程度也有所区别, 这导致了环保观念、政府支出与科学研究的支持力度也不尽相同[24]。因此, 数字技术对碳减排效应的影响在不同区域间表现出显著的空间差异。通常情况下, 经济发展水平较高的地区拥有更为合理的产业布局, 并且更加重视环保效益。

综上, 本文提出:

H2: 数字经济对碳排放的影响受到不同地区影响的差异。

4. 数字经济发展水平测算与现状分析

4.1. 指标体系的构建

数字经济是信息经济和互联网经济的进一步发展, 作为一种新兴业态, 跨越多个领域, 不受行业限制[25]。

2021 年, 国家统计局发布《数字经济及其核心产业统计分类》文件, 定义数字经济为以数据资源为关键生产要素、以现代信息网络为重要载体, 并通过信息通信技术提升效率和优化经济结构的一系列经济活动[21]。本文结合我国数字经济发展战略和目标, 从数字产业化和产业数字化两个视角构建了数字经济评价体系[22](见表 1)。数字经济是以数据资源为关键生产要素, 以现代信息网络为主要载体, 依托信息通信技术在各类经济活动中的深度应用, 推动效率提升和结构优化的一种新型经济形态。它不仅是技术进步的产物, 更代表了传统经济与数字技术深度融合的新发展阶段。该定义体现了数字经济的三大核心特征: 以数据为要素、以网络为基础、以技术为驱动。

在界限范围上, 数字经济主要包括三个层次: 一是“数字产业化”, 即以信息技术为主导的核心数字产业, 如软件、通信服务、电子信息制造、云计算、大数据和人工智能等, 构成数字经济的基础支撑; 二是“产业数字化”, 指传统产业借助数字技术进行生产、流通和管理方式的升级与转型, 如工业互联网、数字金融、智慧农业、在线教育等, 是数字经济规模扩展的主要来源; 三是“数据价值化”, 即数据成为新型生产要素并在资源配置中发挥直接作用, 包括数据采集、处理、交易和治理等环节。其中, 数字产业化作为数字经济的核心产业, 完全依赖数字技术和数据资源, 推动产业数字化发展, 提供数字技术、产品、服务、基础设施和解决方案; 产业数字化则指数字技术与传统产业的深度融合应用, 通过数字化手段提升传统产业的产出和效率。

Table 1. Comprehensive index system for digital economy evaluation
表 1. 数字经济评价综合指标体系

类别	指标	变量	单位	属性	权重
数字产业化	数字基础设施	域名数	万个	正向	0.096
		网站数	万个	正向	0.084
		移动电话基站数	万个	正向	0.039
		互联网宽带接入端口数	万个	正向	0.039
	数字用户规模	移动互联网用户	万户	正向	0.033
		移动电话普及率	%	正向	0.018
		电信业务总量	亿元	正向	0.07
	数字产业规模	信息技术, 计算机服务和软件业占全社会固定资产投资比重	%	正向	0.107
		软件产品收入	亿元	正向	0.099
		信息技术服务收入	亿元	正向	0.022
		电子信息产业制造业企业数量	家	正向	0.12
产业数字化	数字融合	数字普惠金融指数		正向	0.128
		电子商务销售额	亿元	正向	0.084
		有电子商务交易活动企业占比	%	正向	0.132
	产业数字化投入	规模以上工业企业 R&D 人员全时当量	人/年	正向	0.21
		每百人使用计算机数	台/百人	正向	0.093
	产业数字化应用	规模以上工业企业新产品销售收入占主营业务收入比重	%	正向	0.15
		通过互联网开展有关生产经营活动的企业	家	正向	0.102

在权重赋值方面, 主观赋权法通过人为判断指标的重要性并赋予权重, 而客观赋权法则依赖于指标的原始数据进行赋权。由于主观赋权法容易受到人为因素的影响, 可能导致权重分配不准确, 难以反映综合指数的真实情况, 因此, 本研究采用了熵值法这一客观赋权法。考虑到 18 个基础变量的量纲和数量级差异, 首先对其进行标准化处理, 以确保其具有可比性, 进而保证综合指数的准确性。由于所有指标为正向指标, 本研究仅对正向指标进行了标准化处理, 具体标准化公式如下:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min\{x_j\}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中: $\min\{x_j\}$ 为指标 j 各年中的最小值, $\max\{x_j\}$ 为指标 j 各年中的最大值, x_{ij}^* 为数据标准化去量纲后的结果。

计算指标 j 第 i 年的比重, 用 ϖ_{ij} 表示:

$$\varpi_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}} \quad (2)$$

计算指标 j 的信息熵 e_j , 则:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \varpi_{ij} \times \ln \varpi_{ij}, 0 \leq e_j \leq 1 \quad (3)$$

计算指标 j 的信息熵冗余度 d_j ：

$$d_j = 1 - e_j \tag{4}$$

根据 d_j 计算指标 j 的权重 ω_j ：

$$\omega_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} (1 \leq j \leq m) \tag{5}$$

最后，计算各年数字经济发展水平 $LEDE_i$ ：

$$LEDE_i = \sum_{j=1}^m \omega_j \times x_{ij}^* (i = 1, 2, \dots, n) \tag{6}$$

$LEDE_i$ 表示各省第 i 年的数字经济发展水平，在 0~1 之间。若 $LEDE_i$ 越大，则表示数字经济发展水平越高；若 $LEDE_i$ 越小，则说明数字经济发展水平越低。

4.2. 数据来源

所使用的各项指标数据主要来自《中国统计年鉴》、各省年鉴和 CEADs 数据库。对于部分指标在个别年份缺失的情况，本研究采用了插值法或移动平均法进行数据补充。各变量的描述性统计结果详见表 2。

Table 2. Descriptive statistical information of variables
表 2. 变量描述性统计信息

变量	符号	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
数字经济	LEDE	270	0.140	0.146	0.004	0.879
数字经济 ²	LEDE ²	270	0.041	0.092	0.000	0.773
产业结构	INDS	270	1.171	0.663	0.518	5.169
人口规模	POPS	270	0.459	0.283	0.057	1.249
收入水平	LEIN	270	3.039	1.024	1.551	7.385
对外开放水平	LEOP	270	0.885	1.430	0.004	7.176
技术创新	TEIN	270	5.214	7.607	0.050	52.739
碳排放规模	CESC	270	3.341	2.139	0.349	9.371
碳排放效率	CEEF	270	0.804	0.518	0.150	4.012

4.3. 数字经济发展水平评价

运用熵值法公式测算了各省份 2013~2021 年数字经济发展水平(LEDE)，如表 3 所示。从结果可以看出，LEDE 存在明显的时空异质性。中国的 LEDE 均值从 0.069 增长至 0.228，年均增长率达到 16.185%。各省的 LEDE 普遍上升。到 2024 年，广东、江苏、北京、浙江、山东和上海的 LEDE 位于领先队列；青海、贵州、云南、安徽、江西、河南、广西和重庆则以年平均增长率超过 20%的速度，表现出强劲的发展势头，位居 LEDE 的追赶队列。尽管存在明显的追赶趋势，但省际差距依然显著。例如，2024 年广东的 LEDE 为 0.879，是青海的 0.031 的 28.35 倍，显示出中国 LEDE 省际差距依然巨大。四大地区的 LEDE 呈现逐年递增的趋势。就年均增长率而言，西部地区以 19.502%位居首位，中部地区为 19.489%，东部地区为 14.922%，东北地区以 12.075%排在最后。但从 LEDE 均值来看，2020 年东部地区的 LEDE 最高，达到 0.405，中部为 0.187，西部为 0.119，东北为 0.118，且与西部差距较小。这表明，东部地区的 LEDE

较高，而中西部地区的 LEDE 起点较低，因此其较快的增长率是可以理解的。

在同一地区内，各省份的数字经济发展程度也有显著的差异。就各省份数字经济发展水平的年平均价值而言，东部地区广东和江苏排名前列，天津和海南位居末位，其中广东的年平均 LEDE (0.568)是海南年平均 LEDE (0.033)的 17.21 倍。中部地区河南和湖北领先，江西和山西则相对落后，其中河南的年平均 LEDE (0.144)是山西年平均 LEDE (0.059)的 2.44 倍。西部地区四川和陕西排名靠前，宁夏和青海排在后列，其中四川的年平均 LEDE (0.186)是青海年平均 LEDE (0.017)的 10.94 倍。东北地区吉林位居第一 (0.139)，辽宁排名第三(0.059)，前者是后者的 2.36 倍。从数据来看，东部的数字化进步程度最高，紧随其后依次为西部及中央区；最末尾的位置则由北区的位置占据着。相较于全中国的年度化数码进展指标值来说，北方的三地总体上都落后一些，只有西南地区的四川省超越这个标准线并位于前列，同样的情况也出现在华中的河南省身上——它也是唯一达到这一标准的内陆城市。除去河北省、天津市还有海南之外的其他沿海省市都在该项比对下领先其他各方，这进一步证明这些地方在中国整体数的转型进程里起到了主导作用。以推动各个行政单位间的协调共进作为目标的中国政府已经实施过一系列相关措施：比如“先发制人战略”“大力推进西北建设计划”，这使得全国各地的发展速度都有所提高。与此同时，借助网络服务平台技术、智能机器人科技、虚拟储存系统和大容量数据库等多种创新手段来深化运用信息科学成果已然成为了我国实现高质量发展的关键驱动力之一。不过因为各种不同的政治指导方针或自然资源条件的影响，四个主要分块之间的 LDE 的表现并不完全一致。

Table 3. LEDE measurement results of digital economy development level in various provinces from 2013 to 2021
表 3. 2013~2021 年各省份数字经济发展水平 LEDE 测度结果

区域		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	平均值	年均增长率/%
东部	广东	0.313	0.367	0.413	0.487	0.572	0.63	0.693	0.76	0.879	0.568	13.762
	江苏	0.207	0.253	0.288	0.348	0.418	0.471	0.517	0.564	0.636	0.411	15.025
	北京	0.191	0.222	0.245	0.321	0.392	0.446	0.493	0.535	0.615	0.384	15.771
	浙江	0.158	0.203	0.191	0.241	0.314	0.358	0.389	0.419	0.482	0.306	14.97
	山东	0.126	0.153	0.219	0.252	0.289	0.321	0.341	0.37	0.422	0.277	16.275
	上海	0.128	0.156	0.168	0.203	0.244	0.239	0.288	0.298	0.338	0.229	12.884
	福建	0.084	0.105	0.112	0.139	0.176	0.228	0.289	0.291	0.302	0.192	17.322
	河北	0.055	0.068	0.076	0.087	0.108	0.128	0.145	0.161	0.196	0.114	17.128
	天津	0.05	0.058	0.061	0.075	0.083	0.092	0.101	0.113	0.124	0.084	12.05
	海南	0.018	0.021	0.021	0.024	0.033	0.035	0.042	0.047	0.057	0.033	15.243
均值	0.133	0.161	0.179	0.218	0.263	0.295	0.33	0.356	0.405	0.26	14.922	
中部	河南	0.059	0.073	0.09	0.107	0.14	0.163	0.187	0.222	0.261	0.144	20.472
	湖北	0.058	0.071	0.084	0.103	0.137	0.15	0.166	0.189	0.232	0.132	18.887
	湖南	0.051	0.061	0.07	0.084	0.105	0.124	0.14	0.159	0.206	0.111	18.968
	安徽	0.042	0.053	0.065	0.07	0.109	0.128	0.141	0.158	0.191	0.107	20.926
	江西	0.03	0.037	0.043	0.051	0.069	0.08	0.091	0.104	0.133	0.071	20.501
	山西	0.03	0.036	0.043	0.048	0.058	0.061	0.069	0.087	0.097	0.059	16.031
	均值	0.045	0.055	0.066	0.079	0.103	0.118	0.132	0.153	0.187	0.104	19.489

续表

西部	四川	0.078	0.092	0.11	0.147	0.187	0.216	0.244	0.278	0.324	0.186	19.472
	陕西	0.051	0.062	0.071	0.087	0.105	0.119	0.136	0.158	0.193	0.109	18.048
	重庆	0.034	0.043	0.051	0.065	0.082	0.098	0.114	0.122	0.148	0.084	20.386
	广西	0.031	0.037	0.043	0.053	0.065	0.076	0.086	0.104	0.136	0.07	20.41
	云南	0.025	0.031	0.037	0.042	0.052	0.065	0.073	0.091	0.113	0.059	21.011
	贵州	0.017	0.02	0.026	0.033	0.043	0.053	0.068	0.083	0.109	0.05	26.244
	内蒙古	0.026	0.031	0.035	0.04	0.04	0.044	0.052	0.064	0.074	0.045	14.129
	新疆	0.019	0.023	0.027	0.032	0.038	0.045	0.048	0.06	0.072	0.041	18.089
	甘肃	0.018	0.021	0.026	0.028	0.035	0.041	0.048	0.061	0.069	0.039	18.101
	宁夏	0.012	0.013	0.014	0.019	0.022	0.026	0.03	0.034	0.037	0.023	15.048
	青海	0.004	0.007	0.008	0.011	0.021	0.021	0.024	0.029	0.031	0.017	29.205
	均值	0.029	0.035	0.041	0.051	0.063	0.073	0.084	0.099	0.119	0.066	19.502
东北	辽宁	0.03	0.037	0.04	0.05	0.058	0.065	0.08	0.083	0.085	0.059	13.732
	黑龙江	0.034	0.04	0.053	0.061	0.066	0.069	0.075	0.079	0.089	0.063	12.712
	吉林	0.077	0.098	0.134	0.148	0.162	0.146	0.156	0.153	0.18	0.139	11.074
	均值	0.047	0.059	0.076	0.086	0.095	0.094	0.104	0.105	0.118	0.087	12.075
全国	均值	0.069	0.083	0.096	0.115	0.141	0.158	0.178	0.196	0.228	0.14	16.185

5. 模型构建与实证分析

5.1. 模型设定

为了验证数字经济对碳排放规模及碳排放效率的影响，构建双固定效应基准回归模型[23]：

$$Y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 LEDE_{it} + \alpha_2 LEDE_{it}^2 + \alpha_3 \sum Control_{it} + \mu_t + \lambda_i + \varepsilon_{it}$$
 (7)

其中：被解释变量 Y_{it} 分别是省份 i 在 t 年的碳排放规模(CESC)、碳排放效率(CEEF)；核心解释变量 $LEDE_{it}$ 为省份 i 在 t 年数字经济发展水平。为了验证核心解释变量和被解释变量间是否存在正“U”型或倒“U”型关系，加入核心解释变量的平方项。控制变量 $Control_{it}$ 分别是产业结构(INDS)、人口规模(POPS)、城镇居民人均可支配收入(LEIN)、对外开放水平(LEOP)和技术创新(TEIN)； α_0 为常数项， μ_t 为时间固定效应， λ_i 为个体固定效应， ε_{it} 为随机误差项。

5.2. 变量说明

(一) 被解释变量

碳排放(CE)。目前关于碳排放的研究倾向于单独考察碳排放规模或碳排放效率，但鲜有文献将其共同作为碳排放的代理变量进行综合考察。因此，该研究选用碳排放规模(CESC)和碳排放效率(CEEF)作为碳排放的代理变量，探讨数字经济是否有效促进了 CO₂ 减排[24]。

(二) 核心解释变量

根据构建的指标体系采用熵值法测算所得，由数字产业化和产业数字化两类别构成见表 1。

(三) 控制变量

1. 产业结构(INDS)。不失一般性，产业结构选用第三产业增加值与第二产业增加值之比衡量。一般而言，第二产业占比越大，碳排放量越多。因此，产业结构指标值越大越有利于减排。

2. 人口规模(POPS)。人口越多, 能源消费规模相应越大, 从而导致碳排放量增加。人口规模选用各省年末常住人口表征, 人口越少, 说明为了满足人们多样性需求所消耗的能源越少, 越有利于碳减排。

3. 收入水平(LEIN)。居民家庭用能品种选择受收入影响, 并且收入增长有助于家庭能源转型[25], 从而推动整个社会能源转型, 提高清洁能源占比、减少碳排放。因此, 用城镇居民人均可支配收入表征收入水平。

4. 对外开放水平(LEOP)。对外开放水平主要通过进出口贸易影响国内经济增长和环境产品, 进而影响碳排放, 因而选用各省进出口总额衡量各省对外开放水平。

5. 技术创新(TEIN)。其他条件不变, 能源利用技术创新水平越高, 单位产量能耗越少, 同时单位产量 CO₂ 排放也越少。专利申请授权量通常代表一个地区的创新水平, 故该研究用其表示技术创新。

5.3. 基准回归分析

数据表 4 呈现了数字经济对碳排放的基准回归结果, 模型(1)和(3)没有考虑控制变量, 而模型(2)和(4)则考虑了控制变量。根据模型(1)和(2)的回归结果, 可以发现数字经济的一次项系数为负值, 二次项系数为正值, 表明数字经济与碳排放规模之间存在显著的“先减后增”的正“U”型关系, 而拐点为 0.448。反映了数字经济发展从减排效益向碳排放反弹的临界转换, 其背后原因主要包括三个方面: 一是随着数字基础设施的不断铺设, 数据中心、5G 网络等高能耗设施在中后期迅速增加, 带动整体能源消耗上升; 二是数字经济进入扩张阶段后, 规模效应和“杰文斯悖论[26]”显现, 即尽管技术提升了能效, 但消费刺激和生产扩张反而加剧了碳排放; 三是部分地区能源结构仍以煤电为主, 绿色低碳转型配套不足, 导致数字经济发展未能持续带动碳排放下降。因此, 跨越该拐点后, 若未同步推进清洁能源应用和绿色数字转型, 碳减排效应将逐步递减甚至反转。从全国及四大地区的情况来看, 目前数字经济发展水平均处于拐点左侧, 这表明在现阶段, 提升数字经济发展水平有助于减少全国及各地区的碳排放。尽管如此, 如果我们以各省为单位观察, 广东省、江苏省、北京市及浙江省自 2014 至 2020 年的数字经济增长趋势均显示出向上的转折点, 而在其余省区则一直保持着负面的发展态势。这一现象表明了各个省市之间的数字经济发展的差距相当明显, 且其影响碳排放量的程度也有所不同。

据模型(3)和(4)的回归结果显示, 数字经济的一次项系数为正, 而二次项系数为负。数字经济的发展水平与碳排放效率之间存在着明显的“先升后降”的倒“U”型关系, 其拐点为 1.080。揭示了数字经济对碳排放效率提升存在边际效应递减的特征, 其形成主要源于三个方面: 首先, 在发展初期至中期, 数字技术广泛赋能传统产业, 推动能源利用效率提升与产业结构优化, 从而显著提高碳排放效率; 但当数字经济发展水平接近或超过 1.080 后, 其边际改善空间趋于饱和。其次, 数字化转型在高水平阶段往往伴随资源重复投入与系统复杂化, 导致运营能耗增加、协同效率下降, 抑制了进一步的能效提升。第三, 部分地区尚未形成完善的绿色数字治理体系, 数字经济发展与节能减排之间缺乏有效联动机制, 使得过度数字化反而削弱了原有的碳效率优势。因此, 跨越该拐点后, 仅依靠数字化扩张难以持续提升碳排放效率, 需更侧重绿色创新、系统协同与能源结构优化。无论是全国、四大地区还是各省, 都处于拐点左侧, 这意味着提升数字经济的发展水平有助于提高中国整体的碳排放效率。这可能是由于随着数字经济的不断提高, 数字经济所带来的碳减排效应逐渐减小, 而经济增长所带来的碳排放却在增加, 从而导致整体碳排放量的上升。但在这个阶段, 数字经济的经济增长效应还未充分实现最大化, 所以继续提升数字经济的发展水平有助于改善碳排放效率。当经济增长效应也达到最大化时, 继续提高数字经济发展水平则不再能够改善碳排放效率。

数字经济对碳排放的影响存在边际递减效应, 这是因为数字经济、碳排放规模和碳排放效率之间存在非线性关系。当 $LEDE < 0.448$ 时, 提升数字经济发展水平有助于减少碳排放规模并提高碳排放效率;

当 $0.448 \leq LEDE < 1.080$ 时，提升数字经济发展水平可以提高碳排放效率，但无法缩减碳排放规模；而当 $LEDE \geq 1.080$ 时，进一步提升数字经济发展水平既无法减少碳排放规模，也无法提高碳排放效率。因此，在数字经济发展水平低于 1.080 的情况下，中国仍需大力推动数字经济的发展，以实现其对碳排放的最大化正向影响。

Table 4. Benchmark regression results of the impact of digital economy on carbon emissions
表 4. 数字经济对碳排放影响的基准回归结果

变量	CESC		CEEF	
	(1) 未添加控制变量	(2) 加入控制变量	(3) 未添加控制变量	(4) 加入控制变量
<i>LEDE</i>	-2.914*** (-2.93)	-4.476*** (4.10)	3.762*** (8.08)	2.850*** (6.26)
<i>LEDE</i> ²	2.952*** (3.14)	4.993*** (4.19)	-1.599*** (-3.63)	-1.319*** (-2.65)
<i>INDS</i>		-0.439*** (-3.08)		0.145** (-2.43)
<i>POPS</i>		5.963** (2.36)		-0.340 (-0.32)
<i>LEIN</i>		0.194 (1.57)		0.345*** (6.69)
<i>LEOP</i>		-0.294* (-1.88)		-0.091 (-1.40)
<i>TEIN</i>		-0.037*** (-2.69)		0.002 (0.28)
常数项	3.328*** (42.68)	1.064 (0.90)	0.340*** (9.31)	-0.222 (-0.45)
观测值	270	270	270	270
R ²	0.254	0.325	0.702	0.786
省份固定	固定	固定	固定	固定
时间固定	固定	固定	固定	固定

注：*P < 0.10，**P < 0.05，***P < 0.01；括号中数值为 t 值。

5.4. 内生性检验

虽然使用固定效应模型来执行基准回归分析，该方法可以控制那些不会随着时间和个人而发生变化的独立因素及那些会因为个人的不同而产生差异的时序因素，从而部分解决了潜在的缺失变量的问题，但是内部相关性的难题仍然有可能以其他的途径出现。其中的一种可能是逆向因果关系的情形，也就是长期的碳排放大幅增长可能会刺激政府实施更严苛的环境管理措施，以此促进数字化经济的发展以便达到减缓气候变化的目标；另外的可能则是还存在一些我们没有考虑到的隐藏变量，这些变量会在时间的推移过程中对要解释的变量与解释变量造成影响。为了消除模型内的内在关联性，本研究选择利用适当的工具变量来处理核心的解释变量。

本文中我们选择以每个一百人的固话总数(Tel)为我们的替代指标来研究问题。由于早期网络连接主要依赖于使用有线的电话线路并以此方式进入市场，所以那些拥有较高比例固定电话的地方很可能具备更高程度上的网路覆盖度；这意味着其对于初期的联网访问及其后来的推广应用有着重要作用，从而也

间接地推动了数字化经济发展进程。故此，我们可以发现：“电信设备的使用情况与其所产生的电子化发展之间的关联关系十分明显”同时，“这种联系并不涉及到任何形式上关于二氧化碳排量的变化因素”，并且它也不受该模式中的其它控件参数或噪声干扰的影响因此，该工具变量的选择是合理的。

本研究通过验证工具变量确认的方法得出以下结论：Kleibergen-Paap rk 的 LM 统计量已在 10% 的显著性标准下否定了原始假说；而在较弱的工具测试阶段，Kleibergen-Paap rk 的 Wald F 统计量达到了 10.83，这高于 Stock-Yogo 在 10% 阈值下的关键值 7.03，说明我们的工具变量符合关联条件。这些检测的结果为我们使用工具变量的有效性提供充足的支持。根据 IV-2SLS 回归分析的结果显示，我们仍然可以得到倒 U 型的结论。

5.5. 稳健性检验

为了验证研究结论的稳健性，本研究从六个方面进行了进一步的讨论：① 替换核心解释变量：将数字经济的测算方法改为因子分析法，并根据因子得分重新检验数字经济对碳排放的减排作用。② 替换控制变量：将技术创新替换为绿色技术创新，使用更能代表环境保护的绿色专利授权数量来表征绿色技术创新。③ 稳健性检验方法[27]，对各解释变量取对数后重新回归。由于前文中部分解释变量和被解释变量是比例而非水平值，因此未取对数，但对各变量取对数后，数据更趋于正态分布，有助于得到更稳健的估计结果。④ 对各变量进行 1% 分位上双侧缩尾处理，以消除极端值对结果的影响。⑤ 剔除数字经济起步较晚、发展较慢的青海省后，重新进行回归。⑥ 剔除北京、天津、上海和重庆四个直辖市后，重新进行回归。稳健性检验结果与前文基准回归结果基本一致，进一步验证了研究结论的可靠性。

5.6. 异质性检验

5.6.1. 区域的异质性

表 5 的各地区回归结果显示，东部地区数字经济与碳排放规模和碳排放效率均未表现出显著的非线性关系。中部地区数字经济仅与碳排放效率存在显著的倒“U”型关系，拐点为 0.193，且中部地区的数字经济发展水平位于拐点左侧，只有当其数字经济发展水平超过拐点时，减排效应才会显现。西部地区的数字经济与碳排放效率之间也存在显著的倒“U”型关系，拐点为 0.350，目前西部地区的数字经济发展水平位于拐点左侧，表明提升数字经济发展水平有助于显著提高碳排放效率。东北地区数字经济与碳排放规模之间呈现显著的正“U”型关系，拐点分别为 0.127 和 0.080。东北地区的数字经济发展水平自 2014 年起已超过 0.080，表明此时提升数字经济发展水平已无法显著减少碳排放规模；但到 2020 年，其数字经济发展水平仍低于 0.127，说明提升数字经济发展水平仍然能够有效降低碳排放规模。东北地区数字经济与碳排放效率之间并未表现出显著的非线性关系。

Table 5. Regression results in different regions

表 5. 各地区回归结果

地区	变量	CESC	CEEF
东部	LEDE	0.792	1.836*
		-0.45	-1.86
	LEDE ²	2.202	-0.033
		-1.33	(-0.04)
中部	LEDE	10.965	-0.022
		-0.95	(-0.01)
	LEDE ²	-36.412	7.183***
		(-1.6)	-1.41

续表

西部	LEDE	-9.235*	4.921*
		(-1.81)	-2.94
	LEDE ²	4.341	-4.787***
东北		-0.47	(-1.59)
	LEDE	-9.068*	4.271
		(-2.22)	-1.61
	LEDE ²	56.749***	-1.403
		-3.29	(-0.12)
控制变量	控制	控制	控制
省份固定	固定	固定	固定
时间固定	固定	固定	固定

注：*P < 0.10，**P < 0.05，***P < 0.01；括号中数值为 t 值。

5.6.2. 数字维度的异质性

表 6 中(1)~(3)为数字产业化(SDE1)的回归结果，(4)~(6)为产业数字化(SDE2)的回归结果。从回归结果可以看出，数字经济的两个分指标——数字产业化(SDE1)和产业数字化(SDE2)的一次项系数均呈负向显著关系，且产业数字化与碳排放之间存在显著的“U”型关系，而数字产业化与碳排放的二次项系数不显著。具体而言，数字产业化作为数字经济发展的基础，依赖于数字技术的进步和互联网、大数据的广泛应用，具备与传统经济发展不同的绿色特性，因此对碳排放表现出显著的降碳效应。相比之下，产业数字化是数字产业与传统产业融合发展的结果。早期阶段，产业数字化系数为-3.746，在 5%水平下显著为负，发挥了显著的减碳效果；然而，随着数字经济规模的不断扩张，产业数字化逐步呈现出粗放式的外延扩张模式，逐渐对碳排放产生积极的促进作用，导致碳排放量的持续增加。

Table 6. Analysis results of numerical heterogeneity
表 6. 数字维度异质性分析结果

变量	数字产业化			产业数字化		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
SDE1	-0.282**	-4.541**	-1.722**			
	(0.863)	(2.259)	(1.062)			
SDE1 ²		3.232	0.905			
		(1.931)	(1.286)			
SDE2				-1.077**	-5.645**	-3.761**
				(0.589)	(2.487)	(1.515)
SDE2 ²					4.025**	2.433**
					(1.831)	(1.068)
控制变量	不控制	不控制	控制	不控制	不控制	控制
省份固定	固定	固定	固定	固定	固定	固定
时间固定	固定	固定	固定	固定	固定	固定

注：*P < 0.10，**P < 0.05，***P < 0.01；括号中数值为 t 值。

6. 结论与展望

本研究基于 2014~2024 年的省级面板数据, 采用熵值法评估数字经济发展水平, 并构建双固定效应模型, 实证分析数字经济与碳排放之间的非线性关系。

主要结论和展望如下:

(1) 数字经济发展水平存在省际和区域差异。广东、江苏和北京的数字经济发展水平领先, 而青海和宁夏的数字经济发展水平较低。东部地区数字经济发展水平最高, 中部地区次之, 东北地区排第三, 西部地区处于最后。

(2) 数字经济发展水平与碳排放之间存在显著的非线性关系。数字经济发展水平与碳排放规模之间呈显著的“先减后增”的正“U”型关系, 而与碳排放效率之间则呈现显著的“先增后减”的倒“U”型关系。

(3) 数字经济与碳排放之间的非线性关系具有区域异质性。东部和西部地区数字经济与碳排放之间不存在显著的非线性关系; 中部地区数字经济仅与碳排放效率之间存在显著的倒“U”型关系; 东北地区数字经济与碳排放规模之间存在显著的正“U”型关系。

(4) 缩小数字经济发展水平的省际和区域差距。数字经济发展水平领先的省份和地区应继续稳步发展, 数字经济发展水平居中的省份和地区应向领先地区看齐, 加快数字经济的发展, 数字经济发展水平滞后的省份和地区应尽快加速发展, 以避免差距进一步扩大。

(5) 因地制宜地制定数字经济发展政策。各省和地区应首先评估其数字经济发展水平是否已超过数字经济与碳排放规模及碳排放效率之间的拐点, 并根据不同发展阶段制定相应的减排政策。对于数字经济发展水平滞后的省份和地区, 尚未越过任何拐点, 减排潜力较大, 应加快数字经济发展, 促进碳排放规模下降、碳排放效率提升及能源消费结构改善; 对于数字经济发展水平居中的省份和地区, 已越过部分拐点, 继续发展数字经济有助于优化碳排放效率, 虽然可能无法进一步降低碳排放规模, 但仍可继续发挥减排作用; 对于数字经济发展水平领先的省份和地区, 已越过所有拐点, 表明数字经济的减排潜力已得到充分发挥, 应避免过度发展数字经济, 以防导致碳排放规模和碳排放效率双重下降, 甚至恶化能源消费结构。

参考文献

- [1] 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): 26-41.
- [2] 李标, 吴贾, 陈姝兴. 城镇化、工业化、信息化与中国的能源强度[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(8): 69-76.
- [3] 王子敏, 李婵娟. 中国互联网发展的节能减排影响实证研究: 区域视角[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2016, 16(6): 54-63, 152.
- [4] 戴翔, 杨双至. 数字赋能、数字投入来源与制造业绿色转型[J]. 中国工业经济, 2022(9): 83-101.
- [5] 涂正革. 中国的碳减排路径与战略选择——基于八大行业部门碳排放量的指数分解分析[J]. 中国社会科学, 2012(3): 78-94.
- [6] 陆菁, 鄢云, 黄先海. 规模依赖型节能政策的碳泄漏效应研究[J]. 中国工业经济, 2022(9): 64-82.
- [7] 张三峰, 魏下海. 信息与通信技术是否降低了企业能源消耗: 来自中国制造业企业调查数据的证据[J]. 中国工业经济, 2019(2): 155-173.
- [8] 邓荣荣, 张翔祥. 中国城市数字经济发展对环境污染的影响及机理研究[J]. 南方经济, 2022(2): 18-37.
- [9] 郭彩霞, 高媛. 数字经济驱动低碳产业发展的机制与效应研究[J]. 贵州社会科学, 2020(11): 155-161.
- [10] 姬新龙, 杨钊. 碳排放权交易是否“加速”降低了碳排放量和碳强度? [J]. 商业研究, 2021(2): 46-55.
- [11] 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(1): 111-129.
- [12] 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):

65-76.

- [13] 王军, 朱杰, 罗茜. 中国数字经济发展水平及演变测度[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(7): 26-42.
- [14] 柏培文, 张云. 数字经济、人口红利下降与中低技能劳动者权益[J]. 经济研究, 2021, 56(5): 91-108.
- [15] 吴施美, 郑新业. 收入增长与家庭能源消费阶梯: 基于中国农村家庭能源消费调查数据的再检验[J]. 经济学(季刊), 2022, 22(1): 45-66.
- [16] 施炳展, 李建桐. 互联网是否促进了分工: 来自中国制造业企业的证据[J]. 管理世界, 2020, 36(4): 130-149.
- [17] 韩磊, 董晓珍. 数字经济与公众参与治霾行为: 影响机理及实证检验[J]. 山东财经大学学报, 2021, 33(3): 69-79.
- [18] 郭芸, 范柏乃, 龙剑. 我国区域高质量发展的实际测度与时空演变特征研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(10): 118-132.
- [19] Nordhaus, W.D. (2019) Can We Control Carbon Dioxide? (From 1975). *American Economic Review*, **109**, 2015-2035. <https://doi.org/10.1257/aer.109.6.2015>
- [20] Williams, E. (2011) Environmental Effects of Information and Communications Technologies. *Nature*, **479**, 354-358. <https://doi.org/10.1038/nature10682>
- [21] Hittinger, E. and Jaramillo, P. (2019) Internet of Things: Energy Boon or Bane? *Science*, **364**, 326-328. <https://doi.org/10.1126/science.aau8825>
- [22] Jiang, S., Li, Y., Lu, Q., Hong, Y., Guan, D., Xiong, Y., *et al.* (2021) Policy Assessments for the Carbon Emission Flows and Sustainability of Bitcoin Blockchain Operation in China. *Nature Communications*, **12**, Article No. 1938. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22256-3>
- [23] Takase, K. and Murota, Y. (2004) The Impact of IT Investment on Energy: Japan and US Comparison in 2010. *Energy Policy*, **32**, 1291-1301. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(03\)00097-1](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(03)00097-1)
- [24] Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L. and Hemous, D. (2012) The Environment and Directed Technical Change. *American Economic Review*, **102**, 131-166. <https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131>
- [25] Casler, S.D. and Rose, A. (1998) Carbon Dioxide Emissions in the U.S. Economy: A Structural Decomposition Analysis. *Environmental and Resource Economics*, **11**, 349-363. <https://doi.org/10.1023/a:1008224101980>
- [26] Barrage, L. (2019) Optimal Dynamic Carbon Taxes in a Climate-Economy Model with Distortionary Fiscal Policy. *The Review of Economic Studies*, **87**, 1-39. <https://doi.org/10.1093/restud/rdz055>
- [27] Shapiro, J.S. (2020) The Environmental Bias of Trade Policy. *The Quarterly Journal of Economics*, **136**, 831-886. <https://doi.org/10.1093/qje/qjaa042>