

青岛大学学报(自然科学版)
Journal of Qingdao University(Natural Science Edition)
ISSN 1006-1037,CN 37-1245/N

《青岛大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目：数字经济发展、产业结构合理化与城市碳排放

作者：辛旭，姜吉坤，王威昊，史存晰

收稿日期：2026-07-08
网络首发日期：2026-11-10
引用格式：辛旭，姜吉坤，王威昊，史存晰．数字经济发展、产业结构合理化与城市碳排放[J/OL]．青岛大学学报(自然科学版).
https://link.cnki.net/urlid/37.1245.N.20261110.1329.002



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2026-11-10 13:52:06　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/37.1245.N.20261110.1329.002

数字经济发展、产业结构合理化与城市碳排放

辛旭，姜吉坤，王威昊，史存晰

（青岛理工大学管理工程学院，青岛 266520）

摘要：基于 2010—2023 年中国 280 个地级市的平衡面板数据，采用城市和年份双向固定效应模型，考察数字经济发展对城市人均碳排放的影响。研究发现，数字经济发展能够显著降低城市人均碳排放，且在东部和中部地区表现出显著的碳减排效应。数字经济能够降低产业结构合理化泰尔指数，缩小产业产出结构与就业结构的偏离，并通过产业结构合理化间接降低人均碳排放；数字经济门槛效应分析表明，城镇化率存在70.26%的单一门槛：低于该门槛时，数字经济对碳排放具有显著的促进作用；超过该门槛后，数字经济转而表现出显著的碳减排效应。数字经济的碳减排效应具有产业结构传导机制、区域表现差异和城镇化阶段特征。

关键词：数字经济；城市碳排放；产业结构合理化；泰尔指数；城镇化门槛

中图分类号：F49；X196　　**文献标志码**：A

Digital Economy Development, Industrial Structure Rationalization and Urban Carbon Emissions

XIN Xu, JIANG Ji-kun, WANG Wei-hao, SHI Cun-xi

(School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: Based on a balanced panel dataset of 280 prefecture-level cities in China from 2010 to 2023, the impact of digital economy development on urban per-capita carbon emissions was examined using a two-way fixed-effects model. The results show that digital economy development significantly reduces urban per-capita carbon emissions, with significant emission-reduction effects observed in the eastern and central regions. Mechanism analysis indicates that the digital economy lowers the Theil index of industrial structure rationalization, reduces the deviation between industrial output and employment structures, and indirectly decreases per-capita carbon emissions through industrial structure rationalization. The threshold analysis shows that urbanization has a single threshold of 70.26%. Below this threshold, digital economy development significantly increases carbon emissions. Above this threshold, the digital economy exhibits a significant emission-reduction effect. These findings indicate that the carbon-reduction effect of the digital economy operates through industrial-structure transmission and varies across regions and stages of urbanization.

Keywords: digital economy; urban carbon emissions; industrial structure rationalization; Theil index; urbanization threshold

气候变化已成为全球可持续发展面临的重要挑战。工业化和城市化在推动经济增长、改善居民生活水平的同时，也带来了能源消耗增加和温室气体排放增长等问题。作为世界上最大的发展中国家，中国长期处于

收稿日期：2026-07-08

基金项目：国家自然科学基金青年基金(批准号：72304161)资助；山东省自然科学基金青年(批准号：ZR2022QG029)资助。

第一作者：辛旭，女，硕士研究生，主要研究方向为数字经济与碳排放。E-mail: 1044644970@qq.com

通信作者：姜吉坤，男，副教授，主要研究方向为管理系统模拟、数字经济与绿色发展。E-mail: jjk@qut.edu.cn

经济结构转型和发展方式变革的关键阶段，如何实现经济增长与碳减排的协调推进，已成为高质量发展进程中的重要议题。2020 年，中国提出“2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”的目标，绿色低碳转型由此上升为国家发展战略的重要组成部分。在此背景下，以互联网、大数据、人工智能和云计算为代表的数字技术加快向生产、流通、消费和治理等领域渗透，为经济社会绿色低碳转型提供了新的技术条件。《中国数字经济发展研究报告（2024 年）》显示，2023 年中国数字经济占国内生产总值的比重达到 42.8%[1]。《数字碳中和白皮书》预计，到 2030 年，数字技术赋能全社会减碳量约占当年排放量的 12%至 22%[2]。相关测算表明，数字产业化与产业数字化持续扩展，数字经济已成为经济增长和产业转型的重要动力[3]。与此同时，通信网络、数据中心和数字终端的建设与运行会增加电力需求[4]，针对中国数字经济碳排放的测算也表明，数字化扩张可能带来新的能源消耗压力[5]。因此，数字经济能否通过效率提升和结构优化实现碳减排，仍需要结合具体区域和发展阶段进行经验检验。现有研究主要从数字经济的总体效应、作用机制和区域差异等方面展开。研究发现，数字经济能够通过技术进步、资源配置优化和产业结构升级降低碳排放[6]，数字基础设施扩张可能引致能源反弹效应，从而削弱数字经济的减排作用[7]。数字经济发展能够显著影响区域碳排放强度[8]，数字技术与产业发展的融合有助于推动区域产业绿色转型[9]。在作用机制方面，产业结构升级是解释数字经济碳减排效应的重要路径之一[10]。然而，部分研究以省级数据为主要样本，难以充分反映同一省份内部不同城市在数字基础设施、产业结构和城镇化水平方面的差异；且将人均碳排放与碳排放强度混用，未能同时区分居民平均排放负担和单位经济产出的排放效率；以第三产业占比衡量产业结构，主要反映产业结构的服务化程度，难以说明产业产出结构与就业结构之间是否协调；数字经济减排效应可能受到城镇化发展阶段的影响，但相关非线性特征仍有待进一步检验。基于此，本文以 2010—2023 年中国 280 个地级市为研究对象，采用城市和年份双向固定效应模型，考察数字经济发展对城市人均碳排放的影响，并以碳排放强度作为替代指标进行稳健性检验；以产业结构合理化泰尔指数刻画产业产出结构与就业结构的协调程度，检验其传导作用；同时结合区域分组回归、组间系数联合检验和城镇化率门槛模型，考察数字经济碳减排效应的区域样本表现与阶段性特征。

1　理论分析与研究假说

1.1　数字经济与城市碳排放

数字经济以数据要素和数字技术为基础，通过重组信息流、资金流和物流影响城市能源利用与碳排放。从生产环节看，工业互联网、智能传感和数字化管理能够提高生产流程的可视化程度，及时识别高耗能环节并优化设备运行，从而降低单位产出的能源投入；从流通环节看，平台匹配和供应链信息共享能够缩短交易链条，提高车辆、仓储和原材料的利用效率；从公共治理环节看，数字技术有助于提高环境监测、交通调度和公共服务供给的精准性。数字经济赋能“双碳”战略的相关研究表明，数字技术能够通过改善资源配置和环境治理促进低碳转型[11]。

与此同时，数字基础设施建设及其运行也会形成新的能源需求。数据中心、通信基站和数字终端具有较高的电力消耗，电子商务扩张还可能增加物流配送和包装需求，由此形成能源反弹效应。数字经济减碳的理论研究也指出，其最终环境效应取决于技术进步、产业升级与能源消耗扩张等多种力量的共同作用[12]。随着数字技术与实体经济融合程度不断提高，生产效率改善、产业结构优化和环境治理能力提升所产生的减排效应将逐步增强。据此，提出假说：

H1：数字经济发展能够显著降低城市人均碳排放。

1.2　产业结构合理化的中介作用

产业结构合理化反映三次产业产出结构与就业结构之间的协调程度。当某一产业吸收较多劳动力却未形成相应产出，或者高产出产业未能获得与其发展相匹配的劳动和资本要素时，容易造成要素错配和低效率扩张，并增加不必要的能源消耗。产业结构调整具有显著的节能减排潜力[13]。绿色技术进步与产业结构调整的协同推进也有助于促进低碳转型[14]，技术进步和产业结构调整均会影响碳排放强度[15]。考虑到产业结构变迁会影响经济增长和资源配置，本文采用泰尔指数刻画产业结构合理化程度[16]，与单一产业占比相比，泰尔指数同时考虑各产业的产出份额与就业份额，能够反映产业间资源配置状况。

数字经济发展能够降低信息搜寻和交易成本，缓解市场分割及信息不对称，促进劳动力、资本和技术等生产要素在不同产业间流动，通过技术创新和产业链高质量发展影响碳排放强度[17]，企业数字化转型也有助于降低碳排放强度[18]。由此，数字经济有助于缩小产业产出结构与就业结构之间的偏离，降低产业结构合理化泰尔指数；产业间资源配置效率的提高进一步减少高耗能、低效率部门的要素沉淀，从而降低碳排放。据此，提出假说：

H2：数字经济通过促进产业结构合理化间接降低城市碳排放。

1.3 城镇化率的门槛效应

城镇化水平会影响数字基础设施的使用密度、数字技术的扩散范围以及公共服务数字化的应用场景。在城镇化水平较低的城市，人口和产业分布相对分散，数字网络、云服务和智能设备的固定投入难以充分摊薄，数字技术也尚未深入工业能源管理、城市交通和公共治理等领域。国际比较研究表明，数字经济对碳排放的影响受不同发展条件约束[19]，数字经济的节能减排作用也可能通过空间溢出和区域联动而呈现差异[20]，而数字基础设施建设产生的新增能源需求可能超过其效率改善效应，进而削弱数字经济的碳减排作用。

随着城镇化水平提高，人口和经济活动的空间集聚能够提升数字基础设施利用率，并为智慧交通、智慧能源、数字政务和绿色供应链等应用提供更完善的配套条件。数字技术与产业生产、交通运输和公共服务体系的融合程度随之加深，其资源配置和能源利用效率改善效应将更加明显。数字经济对城市碳排放的影响可能存在门槛特征[21]，数字经济与碳排放效率之间可能呈现非线性关系[22]。据此，提出假说：

H3：数字经济对城市碳排放的影响存在城镇化率门槛。

2 研究设计

2.1 模型设定

为考察数字经济发展对城市碳排放的影响，构建城市和年份双向固定效应模型

$$\mathrm{CE}_{it}=\beta_0+\beta_1\mathrm{DIG}_{it}+\beta_2 X_{it}+\mu_i+\lambda_t+\varepsilon_{it} \tag{1}$$

其中，CE_{it}为城市 i 在 t 年的人均碳排放自然对数，DIG_{it}为数字经济发展水平，X_{it}为控制变量，μ_i 和 λ_t分别表示城市固定效应和年份固定效应，ε_{it}为随机扰动项。标准误在城市层面进行聚类。

为检验产业结构合理化的中介作用，在基准模型基础上构建中介效应模型

$$M_{it}=\alpha_0+\alpha_1\mathrm{DIG}_{it}+\alpha_2 X_{it}+\mu_i+\lambda_t+\varepsilon_{it} \tag{2}$$

$$\mathrm{CE}_{it}=\theta_0+\theta_1\mathrm{DIG}_{it}+\theta_2 M_{it}+\theta_3 X_{it}+\mu_i+\lambda_t+\varepsilon_{it} \tag{3}$$

其中，M_{it}为城市 i 在 t 年的产业结构合理化泰尔指数。系数 α_1 反映数字经济对产业结构合理化的影响，系数 θ_2 反映产业结构合理化对城市人均碳排放的影响，$\alpha_1\times\theta_2$ 为数字经济通过产业结构合理化影响城市人均碳排放的间接效应。本文采用城市层面聚类的 bootstrap 方法检验间接效应的显著性。为检验数字经济碳排放效应随城镇化率变化的非线性特征，进一步构建如下门槛模型：

$$\mathrm{CE}_{it}=\beta_1\mathrm{DIG}_{it}I(q_{it}\le\gamma)+\beta_2\mathrm{DIG}_{it}I(q_{it}>\gamma)+\delta X_{it}+\mu_i+\lambda_t+\varepsilon_{it} \tag{4}$$

其中，q_{it}为城镇化率，γ为待估计的门槛值，$I(\cdot)$为示性函数。采用 bootstrap 方法检验门槛效应的显著性。

2.2　变量定义与测度

2.2.1　被解释变量　　基准被解释变量为人均 CO_2排放量的自然对数，记为 CE，即城市 CO_2排放量除以常住人口后的自然对数，刻画人口口径下的城市排放水平。稳健性检验以碳排放强度的自然对数为替代被解释变量，记为 CI，碳排放强度按 CO_2排放量与地区生产总值之比计算。

2.2.2　核心解释变量　　核心解释变量为城市数字经济发展水平，记为 DIG。关于数字经济规模的测算水平、地区数字经济发展水平的综合测度，既有研究已形成较为成熟的核算思路[23-24]。本文参照相关文献的指标构建思路[25]，并结合地级市数据的可得性，从邮政通信、移动通信、数字产业就业和数字金融等方面选取人均邮政业务收入、人均电信业务收入、每百人移动电话用户数、信息传输、计算机服务和软件业从业人员占城镇单位从业人员比重、城镇单位从业人员占户籍人口比重以及数字普惠金融指数 6 项正向指标，见表 1。

表 1　中国地级市数字经济综合发展水平评价指标体系

指标	计算方法	属性	权重
人均邮政业务收入	邮政业务收入/年末户籍人口	＋	0.370 0
人均电信业务收入	电信业务收入/年末户籍人口	＋	0.165 7
每百人移动电话用户数	移动电话年末用户数/年末户籍人口×100	＋	0.094 4
数字产业就业比重	信息传输、计算机服务和软件业从业人员/城镇单位从业人员	＋	0.127 9
城镇单位就业比重	城镇单位从业人员/年末户籍人口	＋	0.172 1
数字普惠金融指数	北京大学数字普惠金融指数	＋	0.070 0

在指数测算过程中，首先对 6 项基础指标进行 1%和 99%分位缩尾处理，再采用极差标准化法消除量纲差异。设 x_{ijt}为城市 i 在年份 t 的第 j 项指标，标准化值为 $z_{ijt}=(x_{ijt}-\min x_j)/(\max x_j-\min x_j)$。在此基础上，依次计算指标比重 p_{ijt}、信息熵 e_j、差异系数 d_j 和指标权重 w_j，并据此加权得到数字经济综合指数 DIG_{it}，最后将综合指数归一化至 0～1 区间。熵值法依据各指标的信息差异度进行客观赋权，指标离散程度越高，所包含的信息量越大，相应权重也越高。

2.2.3　中介变量　　中介变量为产业结构合理化泰尔指数，记为 THEIL，为使公式表达更加简洁清晰，先定义第 k 产业的产出份额和就业份额分别为：$p_{kit}=Y_{kit}/Y_{it}$，$q_{kit}=L_{kit}/L_{it}$，产业结构合理化泰尔指数为

$$\mathrm{THEIL}_{it}=\sum_{k=1}^{3}p_{kit}\ln\left(\frac{p_{kit}}{q_{kit}}\right) \tag{5}$$

其中，Y_{kit}和 L_{kit}分别表示城市 i 在 t 年第 k 产业的增加值和就业人数；Y_{it}和 L_{it}分别表示三次产业增加值之和与就业人数之和；p_{kit}和 q_{kit}分别表示第 k 产业的产出份额和就业份额。泰尔指数越低，表明三次产业的产出结构与就业结构越协调，产业结构合理化程度越高。

2.2.4　门槛变量与控制变量　　门槛变量为城镇化率（URB，城镇常住人口占常住总人口的比重），城镇化能够改变人口和经济活动的空间集聚程度，并影响数字基础设施利用效率及数字技术的应用范围。在基准回归中，城镇化率作为控制变量纳入模型；在门槛模型中，城镇化率用于划分数字经济影响碳排放的不同区间，不再重复加入其线性项。控制变量包括经济发展水平（PGDP，人均地区生产总值的自然对数）、政府干预（GOV，地方财政一般预算内支出占地区生产总值的比重）、对外开放（OPEN，货物进口额与出口额之和占地区生产总值的比重）、人力资本（HUM，普通高等学校在校学生数占常住人口的比重）和金融发展

（FIN，年末金融机构贷款余额占地区生产总值的比重）。

2.3　数据来源与样本

研究样本为 2010—2023 年中国 280 个地级市的平衡面板，共 3 920 个城市—年份观测。城市碳排放、经济、人口、邮政通信、产业增加值、产业就业、财政金融和对外开放等数据主要来源于历年《中国城市统计年鉴》，并结合各城市统计年鉴和国民经济与社会发展统计公报进行整理；数字普惠金融指数来源于北京大学数字金融研究中心[26]。按照变量完整性和城市行政区划口径进行匹配与筛选后，形成 2010—2023 年 280 个地级市的平衡面板。主要变量的描述性统计结果见表 2。

表 2　主要变量的描述性统计

变量	符号	观测数	均值	标准差	最小值	最大值
人均碳排放	CE	3 920	1.871	0.847	-0.450	7.087
碳排放强度	CI	3 920	0.294	0.806	-2.640	2.668
数字经济	DIG	3 920	0.153	0.127	0.000	1.000
人均 GDP	PGDP	3 920	10.773	0.592	8.576	12.486
政府干预	GOV	3 920	0.198	0.095	0.044	0.809
对外开放	OPEN	3 920	0.204	0.357	0.000	4.381
城镇化率	URB	3 920	0.641	0.125	0.375	0.998
人力资本	HUM	3 920	0.019	0.029	0.000	1.408
金融发展	FIN	3 920	1.082	0.661	0.132	12.817
产业结构合理化泰尔指数	THEIL	3 592	0.294	0.215	0.000	1.720

3　实证结果与分析

3.1 基准回归结果

数字经济对人均碳排放的基准回归结果见表 3。其中，列（1）未加入控制变量，DIG 系数为−0.290 4，在 1%水平上显著；列（2）加入控制变量后，系数为−0.399 5，同样在 1%水平上显著，表明数字经济发展能够显著降低城市人均碳排放，H1 得到支持。

表 3　基准回归结果

变量	（1） 不加控制变量	（2） 加入控制变量
DIG	−0.290 4***	−0.399 5***
	（0.111 5）	（0.086 9）
_cons	1.730 8***	0.169 9
	（0.019 2）	（0.484 9）
控制变量	否	是
N	3 920	3 920
组内 R^2	0.1763	0.2812

注：***代表 1%的显著性水平，括号内为城市层面聚类标准误，城市和年份效应均已固定。

数字经济指数取值提高 0.1 时，人均碳排放对数平均下降约 0.040，在其他条件不变的情况下，大致对应人均碳排放下降 3.9%。由于数字经济指标为 0 至 1 之间的综合指数，该结果反映的是数字化水平发生较明显

变化时的平均关联。城市固定效应控制了地理区位、资源禀赋和长期产业基础等不随时间变化的城市特征；年份固定效应吸收了宏观经济波动、全国性减排政策和共同技术进步的影响。因此，核心系数主要由同一城市在样本期内数字经济与碳排放的共同变化识别。

在依次控制经济发展、财政干预、对外开放、人力资本和金融发展等因素后，数字经济的估计系数仍显著为负，表明核心结论具有较强稳定性。由此，H1 得到验证，即在控制城市固定效应、年份固定效应及相关控制变量后，数字经济发展能够显著降低城市人均碳排放。

3.2 内生性与稳健性检验

为检验数字经济碳减排结论的稳健性，并缓解数字经济与城市碳排放之间可能存在的反向因果关系，本文首先采用滞后一期数字经济作为工具变量进行两阶段估计，继而从滞后两期、替换被解释变量和缩尾处理三方面开展稳健性检验，结果见表 4。

表 4 内生性与稳健性检验结果

	工具变量法：DIG 滞后一期			稳健性检验	
变量	（1）	（2）	（3）	（4）	（5）
	第一阶段	第二阶段	滞后两期	替换被解释变量	2%缩尾回归
DIG		−0.646 1***（0.138 0）		−0.605 9***（0.120 7）	−0.358 3*** （0.107 3）
L.DIG	0.677 6***（0.029 7）				
L2.DIG			−0.391 6***（0.088 4）		
_cons	−0.117 3**（0.045 6）	0.534 6（0.502 7）	0.873 5*（0.477 5）	7.061 3***（0.575 0）	0.664 3（0.452 7）
R^2	0.760 9	0.192 5	0.223 5	0.678 8	0.239 2
N	3 640	3 640	3 360	3 920	3 920

注：*、**和***分别代表 10%、5%和 1%的显著性水平，括号内为城市层面聚类标准误；各列均加入控制变量，并控制城市固定效应和年份固定效应。

表 4 第（1）列为第一阶段回归，滞后一期数字经济的系数为 0.677 6，并在 1%水平显著，表明其与当期数字经济具有较强相关性。第（2）列为固定效应工具变量估计结果，数字经济系数为−0.646 1，并在 1%水平显著，说明在利用滞后一期数字经济缓解潜在反向因果后，数字经济的碳减排效应依然成立。第（3）列将数字经济滞后两期纳入模型，估计系数为−0.391 6，第（4）列以碳排放强度替代人均碳排放，数字经济系数为−0.605 9，两列均在 1%水平显著。第（5）列对人均碳排放、数字经济及控制变量进行 2%缩尾处理，数字经济系数为−0.358 3，在 1%水平上显著。总体来看，工具变量估计、滞后两期、替换被解释变量和缩尾回归的系数方向均与基准回归一致，数字经济发展显著降低城市碳排放的结论具有较好的稳健性。

3.3 中介效应分析

基准回归结果表明，数字经济发展能够显著降低城市人均碳排放，但其影响碳排放的具体传导渠道仍有待进一步识别。产业结构合理化反映产业产出结构与就业结构之间的协调程度，数字经济可能通过降低信息搜寻成本、改善要素匹配效率和推动传统产业数字化转型，促进劳动力、资本等要素向生产率较高、能源利用效率较好的部门流动，进而降低碳排放。为此，本文以产业结构合理化泰尔指数为中介变量，依次检验数字经济对泰尔指数的影响，以及泰尔指数纳入人均碳排放方程后的中介作用，并采用城市聚类 bootstrap 方法检验间接效应的显著性。产业结构合理化的中介效应检验结果见表 5。

表 5　产业结构合理化中介效应检验

变量	THEIL	CE
DIG	−0.2901***	−0.3648***
	（0.0751）	（0.1186）
THEIL		0.1846***
		（0.0551）
N	3 592	3 592
组内 R^2	0.1037	0.2938

注：***代表 1%的显著性水平，括号内为城市层面聚类标准误；各列均加入控制变量，并控制城市固定效应和年份固定效应。

在以泰尔指数为被解释变量的方程中，数字经济系数为−0.290 1，并在 1%水平显著。泰尔指数越低，代表三次产业的产出份额与就业份额越接近，说明数字经济发展伴随着产业间要素配置协调程度的提高，数字经济能够通过需求牵引和供给优化推动产业结构升级，企业数字化转型还可通过网络协同效应影响碳排放[27]，数字技术嵌入供应链有助于促进企业间低碳技术扩散[28]。这些变化有助于劳动力、资本和技术从低效率部门流向生产率较高的部门，从而减少产出结构和就业结构错位。

在结果方程中，泰尔指数对人均碳排放的系数为 0.184 6，并在 1%水平显著，表明产业产出结构与就业结构偏离越大，城市人均排放越高。其原因可能是要素错配会使劳动力和资本沉淀在生产率较低或能源消耗较高的部门，企业难以通过专业化分工和规模配置充分利用清洁技术，最终表现为更高的能源投入和排放。将泰尔指数加入模型后，数字经济系数仍显著为负，表明产业结构合理化并非数字经济影响碳排放的唯一渠道。

城市层面聚类的 bootstrap 检验结果见表 6。人均碳排放的间接效应为−0.049 9，95%置信区间为[−0.095 0，−0.004 8]，区间未跨越 0，说明“数字经济—产业结构合理化—人均碳排放下降”的传导路径具有统计支持。由于直接效应仍然显著，本文将其界定为部分中介，而不是完全中介。

表 6　泰尔指数间接效应的城市聚类 Bootstrap 检验

因变量	间接效应	Bootstrap 标准误	*p*	95%置信区间
CE	−0.0499	0.0230	0.030	[−0.095 0，−0.004 8]

注：间接效应的标准误和 95%置信区间采用城市层面聚类的 Bootstrap 方法估计，重复抽样 500 次。

相较于单一产业占比，泰尔指数同时纳入三次产业的产出份额与就业份额，能够更全面地反映产业间要素配置的协调程度。数字经济通过降低泰尔指数进而减少碳排放的间接效应获得统计支持，表明产业结构合理化是数字经济发挥减排作用的重要传导渠道。与此同时，数字经济的直接效应仍然显著，说明除产业结构调整外，能源管理数字化、绿色技术扩散和环境治理效率提升等路径也可能共同发挥作用。

3.4　区域异质性分析

考虑到不同区域的经济基础、产业构成和数字基础设施条件存在差异，参照国家统计局东、中、西部地区划分标准[29]，结合地级市实证研究的传统三分口径与本文样本覆盖情况，进行如下划分：东部样本包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南；中部样本包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北和湖南；西部样本包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆。随后分别进行分组回归，结果见表 7。东部地区数字经济系数为−0.356 4，在 1%水

平显著；中部地区系数为−0.605 7，在 5%水平显著；西部地区系数为−0.218 1，但未通过显著性检验。表明数字经济的减排效应在东部和中部城市样本中表现得更为清晰，而西部地区可能受到数字基础设施利用效率、产业结构和能源禀赋等因素约束，现阶段尚未形成稳定的统计关联。

表 7　区域分组回归与组间系数检验

变量	东部	中部	西部
DIG	−0.356 4***	−0.605 7**	−0.218 1
	(0.090 9)	(0.249 8)	(0.428 9)
N	1 400	1 400	1 120
城市数	100	100	80
组内 R^2	0.298 6	0.327 5	0.283 2

注：**和***分别代表 5%和 1%的显著性水平，括号内为城市层面聚类标准误；各列均加入控制变量，并控制城市固定效应和年份固定效应。

东部城市数字基础设施建设较早，企业数字化应用、人才集聚和绿色治理体系相对成熟，数字技术更容易嵌入工业生产、交通管理和公共服务，因而其减排效应较为稳定。中部地区的系数绝对值最大，可能与该地区承接产业转移并同步推进传统产业技术改造有关。数字技术向制造业生产环节渗透后，能够通过设备管理、供应链协同和能耗控制提高资源利用效率。西部地区估计系数虽为负但未达到统计显著水平，可能受到资源型产业比重较高、数字基础设施利用效率不足以及城市间发展差距较大等因素的影响。

从样本构成看，东部和中部各包含 100 个城市、1 400 个观测，西部包含 80 个城市、1 120 个观测。西部地区城市数量相对较少，且经济结构、能源禀赋和数字化发展基础差异较大，导致估计标准误较大。分组回归结果反映出数字经济碳减排效应在不同区域的表现存在差别，其中东部和中部地区的负向效应较为显著，西部地区的减排潜力尚未充分释放。

为检验区域间数字经济系数是否存在显著差异，在全样本中加入数字经济与区域虚拟变量的交互项。中部和西部相对于东部的交互项分别为−0.114 2 和−0.033 1，联合检验的 $p=0.838\ 3$，未能拒绝区域间系数相等的原假设，说明分组回归所呈现的显著性差异主要反映各区域内部的估计精度和样本特征，尚不足以证明东、中、西部的数字经济减排效应存在显著的组间差异。

综合分组回归与交互项检验结果，数字经济在东部和中部地区呈现显著的碳减排效应，西部地区的估计系数为负但统计上不显著，而区域间系数差异未通过联合检验。由此可见，各地区在推进数字化与低碳化协同发展时，应充分考虑本地产业结构、能源禀赋和数字基础设施利用条件，增强数字技术与实体经济、绿色治理之间的适配性。

3.5　城镇化率门槛效应

城镇化率的门槛效应检验结果见表 8。单阈值检验的 $F=60.618$，bootstrap $p=0.030$，在 5%水平上拒绝不存在门槛效应的原假设；双阈值检验的 bootstrap $p=0.433$，未达到常用显著性水平。因此，本文采用单门槛模型进行后续估计。单一门槛估计值为 70.26%，其 95%置信区间为[68.525%，70.400%]。

表 8　城镇化率门槛效应检验

门槛变量	门槛数	*F*	Bootstrap *p*	10%临界值	5%临界值	1%临界值	结论
URB	单阈值	60.618	0.030	44.056	53.201	73.204	显著
URB	双阈值	24.870	0.433	45.680	54.813	78.785	不显著

注：门槛效应的 *F*、*p* 和临界值采用 Bootstrap 方法获得；单阈值检验重复抽样 500 次。

单门槛回归结果见表 9，可见，数字经济对城市碳排放的影响具有明显的城镇化发展阶段特征，H3 得到支持。

表 9　城镇化率单阈值回归结果

变量	CE
DIG×I（URB≤70.26%）	0.378 6***（0.123 2）
DIG×I（URB＞70.26%）	−0.455 1***（0.066 7）
组内 R^2	0.292 2
N	3 920

注：***代表 1%的显著性水平，括号内为城市层面聚类标准误；各列均加入控制变量，并控制城市固定效应和年份固定效应。

当 URB≤70.26%时，数字经济系数为 0.378 6，并在 1%水平显著，表明在城镇化程度较低的阶段，数字基础设施建设、终端普及和平台业务扩张所增加的能源需求，可能暂时超过能源管理和资源配置效率的改善。较低城镇化城市的人口与产业分布相对分散，数字网络的固定投入难以充分摊薄，数字技术也可能主要应用于基础连接和商业扩张，尚未广泛进入工业能耗管理、交通调度和公共治理场景。因而，数字化初期可能表现出一定的排放增加效应。

当 URB＞70.26%时，数字经济系数转为−0.455 1，并在 1%水平显著。较高城镇化率意味着人口和经济活动更加集中，数字基础设施的使用密度提高，智慧交通、智慧能源和数字政务等应用也具备更完整的配套条件。数字技术能够在更大范围内协调生产、运输和公共服务，减少拥堵、空载和重复投入，效率收益更可能覆盖数字设施自身的能源消耗。该结果与数字经济碳排放效应可能存在门槛特征的研究结论相呼应。

门槛估计揭示了数字经济碳排放效应随城镇化水平变化的阶段性特征。城镇化率较低时，应重视数字基础设施扩张带来的新增能耗，通过提高设施能效、扩大清洁电力供给和深化产业数字化应用降低环境成本；城镇化率越过门槛后，应进一步推动数字技术向工业生产、交通调度和公共治理等高耗能场景渗透，充分释放规模经济和资源配置效应。由此，H3 得证，基准回归中的平均减排效应也获得了更为具体的适用条件。

4　结论与建议

基于 2010—2023 年 280 个地级市的面板数据，本文采用城市和年份双向固定效应模型，考察数字经济发展对城市碳排放的影响，并进一步分析其作用机制、区域差异和城镇化门槛特征。研究发现，数字经济发展能够显著降低城市人均碳排放；在采用工具变量法、滞后两期解释变量、替换被解释变量和缩尾处理后，结论依然稳健。产业结构合理化是数字经济发挥碳减排作用的重要渠道，数字经济能够降低产业结构合理化泰尔指数，缩小产业产出结构与就业结构之间的偏离，并通过改善产业间资源配置间接降低城市人均碳排放。区域异质性检验表明，数字经济的减排效应在东部和中部城市样本中显著，西部城市样本中系数为负但未通过显著性检验，且区域间系数差异未通过联合检验。门槛效应检验表明，城镇化率存在 70.26%的单一门槛，低于该门槛时数字经济对人均碳排放具有促进作用，超过该门槛后则表现出显著的碳减排效应。

据此，应推动数字经济与绿色低碳发展深度融合，完善城市数字基础设施建设，提升数据中心、通信基站等设施的能源利用效率，扩大清洁电力使用比例，并促进工业互联网、大数据和人工智能在能源管理、交通调度和环境治理中的应用。同时，应发挥数字经济对产业结构合理化的促进作用，完善劳动力、资本、技术和数据等要素的跨产业流动机制，推动传统高耗能产业数字化改造，提高资源配置效率。还应结合区域经

济基础和城镇化阶段实施差异化政策：东部和中部地区应进一步拓展数字技术在生产和治理领域的应用深度，西部地区应提高数字基础设施与资源禀赋及产业结构的适配程度；城镇化率较低的城市应重视数字基础设施扩张带来的新增能耗，城镇化率较高的城市则应依托人口和产业集聚优势，扩大智慧能源、智慧交通和数字政务等应用场景。

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（2024 年）[R]. 北京：中国信息通信研究院，2024.

[2] 中国信息通信研究院. 数字碳中和白皮书[R]. 北京：中国信息通信研究院，2021.

[3] 蔡跃洲,牛新星. 中国数字经济增加值规模测算及结构分析[J]. 中国社会科学, 2021(11): 4-30.

[4] Andrae A S G, Edler T. On global electricity usage of communication technology: Trends to 2030[J]. Challenges, 2015, 6(1): 117-157.

[5] 渠慎宁, 史丹, 杨丹辉. 中国数字经济碳排放：总量测算与趋势展望[J]. 中国人口 资源与环境, 2022, 32(9): 11-21.

[6] 杨刚强, 王海森, 范恒山, 等. 数字经济的碳减排效应：理论分析与经验证据[J]. 中国工业经济, 2023(5): 80-98.

[7] Peng H R, Zhang Y J, Liu J Y. The energy rebound effect of digital development: Evidence from 285 cities in China[J]. Energy, 2023, 270: 126837.

[8] 郑冰, 赵彦云. 数字经济发展如何影响区域碳排放强度？——基于省级面板数据的实证分析[J]. 统计研究, 2026, 43(1): 85-97.

[9] Wang X X, Huang J Q, Zheng K C, et al. Digital economy and green transformation of regional industries: New insights from sustainability[J]. Science Progress, 2024, 107(4): 00368504241291351.

[10] 纪园园, 朱平芳. 数字经济赋能产业结构升级：需求牵引和供给优化[J]. 学术月刊, 2022, 54(4): 63-77.

[11] 刘莉雯, 王谋. 数字经济赋能“双碳”战略研究——影响机理及实现路径[J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(4): 440-453.

[12] 朱迪星. 数字经济减碳的理论机制及空间溢出效应——基于国家数字经济创新发展试验区的检验[J]. 环境经济研究, 2025, 10(2): 21-45.

[13] 王文举, 向其凤. 中国产业结构调整及其节能减排潜力评估[J]. 中国工业经济, 2014(1): 44-56.

[14] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. 管理世界, 2022, 38(2): 46-69.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 刘媛媛, 殷悦. 制造业企业数字化转型对碳排放强度的影响——基于 A 股上市公司的实证研究[J]. 信阳师范大学学报（哲学社会科学版）, 2026, 46(1): 47-53.

[19] Dong F, Hu M Y, Gao Y J, et al. How does digital economy affect carbon emissions? Evidence from global 60 countries[J]. Science of the Total Environment, 2022, 852: 158401.

[20] Li C Y, Zheng C J, Liu M X, et al. Digital economy spillover on energy saving and emission reduction: Evidence from China[J]. Energy, 2024, 308: 133055.
[21] 陈镜宇, 李卫东, 刘延平, 等. 数字经济、要素作用转变与城市碳排放——基于调节效应和门槛效应的检验[J]. 北京交通大学学报（社会科学版）, 2024, 23(2): 137-151.
[22] Du W H, Liu X N, Liu Y Y, et al. Digital economy and carbon emission efficiency in three major urban agglomerations of China: A U-shaped journey towards green development[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 373: 123571.
[23] 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.
[24] 唐先滨. 中国数字经济发展水平测度及区域异质性[J]. 江汉论坛, 2025(4): 28-37.
[25] 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.
[26] 郭峰, 王靖一, 王芳, 等. 测度中国数字普惠金融发展：指数编制与空间特征[J]. 经济学（季刊）, 2020, 19(4): 1401-1418.
[27] 沈洁, 杨飞洋, 张可云. 数实融合对中国企业碳排放的影响及其机制——基于网络协同效应视角[J]. 资源科学, 2025, 47(9): 2047-2061.
[28] 屠西伟, 张平淡. 企业数字化转型、碳排放与供应链溢出[J]. 中国工业经济, 2024(4): 133-151.
[29] 国家统计局. 东西中部和东北地区划分方法 [EB/OL]. [2026-06-19]. https://www.stats.gov.cn/zt_18555/zthd/sjtjr/dejtjkfr/tjkp/202302/t20230216_1909741.htm.