

数智化赋能城市绿色低碳转型

——基于空间溢出效应研究

刘亚婷

曲阜师范大学经济学院, 山东 日照

收稿日期: 2026年5月20日; 录用日期: 2026年6月12日; 发布日期: 2026年8月12日

摘 要

推动城市绿色低碳转型是实现高质量发展与践行“双碳”战略的必由之路, 充分发挥数智化的赋能作用则是加快这一转型进程的关键引擎。本文选取2014~2023年全国277个地级市的面板数据, 运用熵权法构建数智化指标体系, 通过构建多种计量模型系统检验数智化对城市碳排放强度的影响机制、非线性关系及空间溢出效应。结果表明: 第一, 数智化对城市碳排放强度具有显著的抑制作用, 能有效推动城市绿色低碳转型, 且这一结论具有稳健性; 第二, 数智化的碳减排效应存在显著异质性, 在非资源型城市、大城市及东部地区更加明显; 第三, 数智化主要通过产业结构升级、绿色技术创新、资源配置优化三条路径驱动城市绿色低碳转型; 第四, 数智化对城市碳排放强度的影响存在基于其自身发展水平的门槛效应; 第五, 数智化发展对碳排放强度存在显著的空间溢出效应。本研究为数智化赋能城市绿色低碳转型提供了经验证据, 也为政府制定分层分类的低碳转型政策提供了理论参考与实践依据。

关键词

数智化, 城市绿色低碳转型, 中介效应, 门槛效应, 空间溢出效应

Digital Intelligence Empowers Urban Green and Low-Carbon Transition

—Based on the Study of Spatial Spillover Effects

Yating Liu

School of Economics, Qufu Normal University, Rizhao Shandong

Received: May 20, 2026; accepted: June 12, 2026; published: August 12, 2026

Abstract

Promoting urban green and low-carbon transition is an inevitable path to achieving high-quality

development and implementing the dual carbon strategy, and leveraging the enabling role of digital intelligence is a key engine to accelerate this process. Using panel data of 277 prefecture-level cities in China from 2014 to 2023, this paper constructs a digital intelligence index system via the entropy weight method, and systematically examines the nonlinear relationship and spatial spillover effect of digital intelligence on urban carbon emission intensity through multiple econometric models. The results show that: 1) Digital intelligence significantly inhibits urban carbon emission intensity and effectively promotes urban green and low-carbon transition, and this conclusion is robust. 2) The carbon emission reduction effect of digital intelligence exhibits significant heterogeneity, being more pronounced in non-resource-based cities, large cities, and eastern regions. 3) Digital intelligence drives urban green and low-carbon transition mainly through three channels: industrial structure upgrading, green technology innovation, and resource allocation efficiency optimization. 4) The impact of digital intelligence on carbon emission intensity has a threshold effect based on its own development level. 5) Digital intelligence development generates a significant spatial spillover effect on carbon emission intensity. This study provides empirical evidence for digital intelligence enabling urban green and low-carbon transition, and offers theoretical reference and practical basis for governments to formulate differentiated and categorized low-carbon transformation policies.

Keywords

Digital Intelligence, Urban Green and Low-Carbon Transition, Mediation Effect, Threshold Effect, Spatial Spillover Effect

Copyright © 2026 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

在全球气候变化加剧和生态环境约束日益严峻的双重背景下，绿色低碳转型已成为全球可持续发展的核心议题，同时也是我国实现“碳达峰、碳中和”战略目标、推动经济社会高质量发展与生态文明建设协同共进的关键路径。作为我国经济产出、能源消费与碳排放的集中承载空间，城市在落实这一转型目标中扮演着核心角色。但当前我国城市绿色低碳转型仍面临数据共享机制不完善、市场配置效率不足等现实问题，迫切需要挖掘兼具创新性与可持续性的转型新动力，以破解转型障碍，提升转型质量与效能。

数智化技术的飞速进步为我国发展带来了重要机遇。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》作出要“促进制造业数智化转型”“推进服务业数智化”“推进传统基础设施更新和数智化改造”“加快人工智能等数智技术创新”“推动文化建设数智化赋能”以及“推进全民健康数智化建设”的全方位部署¹，将数智化置于绿色转型的战略高度，为城市绿色低碳转型注入新动力。数智化凭借其广覆盖性、强协同性、高创新性，推动产业结构升级、资源配置效率优化与经济发展动能转换，已成为引领城市绿色发展、推动城市绿色低碳转型的核心引擎[1]，但数智化通过多重路径系统性赋能城市转型的内在机理仍有待深入挖掘。因此，系统探究数智化对城市绿色低碳转型的影响效应与内在作用机制，既是破解当前城市转型面临的数据共享不畅、市场配置效率不足等现实问题，推动“双碳”战略目标在城市层面落地见效的实践刚需，也是弥补现有研究对多重赋能路径剖析不够深入的理论短板、丰

¹中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议[EB/OL].

https://www.gov.cn/zhengce/202510/content_7046050.htm, 2025-10-28.

富数智化与绿色发展相关研究的关键探索，兼具鲜明的现实指导意义与重要的学术价值。

本文的边际贡献可能在于：第一，突破了传统线性回归的假设束缚，系统揭示了数智化水平提升对城市碳排放强度影响的非线性特征，为理解数智化减排的边际效应变化提供了新的理论视角；第二，弥补了现有研究在空间维度的空白。现有相关研究多聚焦数智化与城市碳排放强度的直接关系与作用机制，忽视城市间空间关联性及数智化的空间传导效应。本文将空间因素纳入分析，检验数智化对城市碳排放强度的空间溢出效应，有助于完善该领域空间层面研究框架。

2. 理论分析与假设提出

2.1. 直接效应

数智化技术凭借实时感知、精准调控与动态优化的核心优势，直接渗透到城市能源消费与碳排放的全链条核心环节，构建起全方位的低碳赋能体系。从能源生产端来看，物联网、大数据技术可实现对火电、风电、光伏等多能互补系统的智能化动态调度，通过精准预判能源供需缺口、优化能源输出配比，显著提升清洁能源消纳效率，减少对高碳排放化石能源的依赖，从供给侧筑牢低碳转型基础；从能源消费端来看，数智化水平提高能够优化企业的碳排放末端治理技术，推动企业从“被动减排”向“主动控碳”转变[2]；在城市治理层面，数字孪生、碳监测平台能够整合跨部门、跨区域的碳排放数据，实现对城市碳排放的全周期追踪、可视化呈现与动态预警，有效提升低碳政策制定的精准性、执行的高效性与监管的全面性，为城市绿色低碳转型提供坚实的治理保障。

基于此，本文提出假设：

H1：数智化发展能够直接抑制城市碳排放强度，显著推动城市绿色低碳转型。

2.2. 间接效应

2.2.1. 产业结构升级

在传统产业转型方面，数字孪生、智能制造、工业互联网等技术可对钢铁、水泥、有色金属等高耗能产业进行全方位流程再造，通过精准管控能耗、优化生产工艺、推动清洁能源替代，实现传统产业的节能降碳改造，降低产业整体碳排放强度，推动传统产业从“高碳粗放”向“低碳高效”转型[3]。在新兴产业发展方面，数智化技术的创新应用催生了新能源、储能、绿色建筑、碳服务等一批绿色新兴产业，不仅扩大了城市低碳产业规模，形成新的经济增长极，还能通过产业联动带动上下游产业链的低碳升级，优化城市产业结构布局。产业结构的全方位升级，通过减少高耗能产业占比、提升绿色产业贡献度，从而有效降低城市整体碳排放水平。

基于此，本文提出假设：

H2：数智化可通过推动产业结构升级间接推动城市绿色低碳转型。

2.2.2. 绿色技术创新

数智化技术贯穿绿色技术创新的全生命周期，从研发迭代、场景落地到效能提升形成全链条赋能，全方位加速低碳技术的突破与规模化应用，为城市低碳转型提供核心技术支撑。在绿色技术研发环节，人工智能、大数据分析能够整合跨领域的技术数据、环境数据与产业数据，模拟不同场景下低碳技术的应用效果与优化空间，大幅降低技术研发的试错成本、缩短研发周期[4]，加速核心技术的迭代升级与突破。进入技术落地阶段，工业互联网、数字孪生技术可搭建技术与产业的对接桥梁，将实验室中的低碳技术适配到钢铁、化工、建材等传统高耗能行业的生产场景中，推动技术从实验室走向实际生产。当绿色技术投入实际应用后，进一步在生产流程优化、清洁能源推广以及能源效率提升等方面发挥作用，持

续提升能源利用效率与碳减排效能[5]，同时通过数据反馈反哺研发环节，形成“研发-落地-提效-迭代”的良性循环。

基于此，本文提出假设：

H3：数智化可通过推动绿色技术创新间接推动城市绿色低碳转型。

2.2.3. 资源配置优化

数智化通过重构要素配置逻辑、打破信息壁垒，引导资金与人才等核心生产要素向绿色低碳发展领域精准集聚，为城市绿色低碳转型提供坚实的要素支撑与动力保障。在资金配置层面，绿色信贷平台、碳交易区块链系统等数字金融工具，能够有效破解低碳项目融资中的信息不对称问题，降低信息获取成本，提升项目融资可得性与资金使用透明度[6]，同时通过市场化机制引导社会资本、金融资本向低碳领域倾斜，缓解低碳项目投资周期长、收益回收慢带来的融资约束，让资金在城市绿色低碳转型中发挥最大效能。在人才配置方面，数字人才市场与技能匹配平台可打破地域与行业限制，精准对接人才供需，加速能源互联网、碳捕集、绿色储能等领域专业人才集聚，为绿色低碳技术落地与项目推进提供核心人力支撑。这种全方位的资源配置优化，能够有效减少要素错配、提升全要素生产率，从要素供给层面间接降低城市碳排放强度。

基于此，本文提出假设：

H4：数智化可通过优化资源配置间接推动城市绿色低碳转型。

2.3. 门槛效应

在数字技术应用尚不成熟的发展阶段，数智化对城市碳排放的抑制作用较为有限。技术基础设施投入不足、数据要素流通不畅、关键场景覆盖不全面等问题，制约了数智化在能源管理、生产流程监控与低碳调度中的实际效能，其碳减排作用尚未得到系统性释放。随着数字化与智能化水平的提升，数智化逐渐从局部辅助工具向全流程赋能系统演进。一方面，物联网、大数据与人工智能的深度融合，推动能源系统实现动态优化与实时调控，显著提升了能源利用效率[7]；另一方面，产业互联网、智慧交通、绿色建筑等场景的全面落地，促进了生产方式与生活模式的系统性低碳重构。在数智化深度渗透发展的背景下，数智化技术天然的跨时空协同与网络互联特性，能够显著降低创新主体的信息获取、技术研发成本，压缩区域间产业联动的边际交易成本，使得市场主体参与低碳转型的收益空间持续扩大。

基于此，本文提出以下假设：

H5：数智化对城市碳排放强度的影响存在基于其自身发展水平的门槛效应。

2.4. 空间效应

数智化打破了碳排放治理的空间壁垒，使得低碳技术、数字管理经验和绿色发展模式能够在更大范围内高效流动与扩散。随着区域一体化进程的持续推进，城市间的行政与市场壁垒逐步弱化，技术、资本、人才等生产要素在跨区域间的流动更为顺畅，这使得城市间经济活动与环境行为的空间联动性不断增强，为碳排放与数智化发展的空间溢出效应提供了现实基础。此外，二氧化碳等温室气体的排放具有显著的跨区域扩散属性，不仅会影响本地生态环境质量，还会通过大气环流、产业转移等渠道波及邻近地区，使得城市碳排放水平在空间上呈现出明显的相关性[8]；与此同时，数智化技术的发展也可通过技术扩散、产业协同等路径产生跨区域溢出，对邻近地区的碳排放产生影响。

基于以上分析，本文提出如下假设：

H6：数智化发展对城市碳排放强度能够产生空间溢出效应。

3. 研究设计

3.1. 变量选取

3.1.1. 被解释变量

本文的被解释变量为城市碳排放强度(CI)，为缓解数据异方差对回归结果的干扰，对其进行自然对数处理，记为 $\ln CI$ 。碳排放强度(CI)定义为单位地区生产总值(GDP)对应的二氧化碳排放量(CE)，其中，地区生产总值数据均以 2014 年为不变价基期进行平减处理，消除价格波动与通胀因素的干扰，更精准地刻画城市碳排放效率与低碳发展水平。

3.1.2. 核心解释变量

核心解释变量为数智化水平(SZH)，其操作化定义为：以数字基础设施为底层支撑、以人工智能技术为核心应用代表的智能化发展水平，是数字化建设向智能化升级演进的融合性概念。本文参考国家统计局《数字经济及其核心产业统计分类（2021）》²以及已有研究[9]，从“数字化基础”与“智能化应用”两个维度构建多指标评价体系，综合测度城市数智化转型水平，如表 1 所示。① 数字化基础：侧重测度数字网络、产业要素与普惠服务的覆盖普及水平，反映数智化转型的基础承载能力。借鉴赵涛等[10]的处理方法，选取互联网普及率、互联网相关从业人数占比、人均电信业务收入、每百人移动电话年末用户数以及数字普惠金融指数五项指标刻画数字基础设施建设与服务普及程度。② 智能化应用：侧重测度人工智能技术的产业渗透与落地能力，选取每万人人工智能企业数量、人工智能专利授权数以及工业机器人安装密度三项指标刻画智能技术的产业渗透与创新能力。针对构建的数智化水平评价指标体系，运用熵权法确定各指标的客观权重，并通过加权聚合得到城市数智化转型的综合测度值。

Table 1. Evaluation index system of digital intelligence level

表 1. 数智化水平评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	指标符号	计算方法	权重
数智化水平	数字化基础	互联网普及率	X1	地级市宽带接入用户数/地级市常住人口数	0.157
		互联网相关从业人数占比	X2	信息传输、软件和信息技术服务业就业人数/地区就业总人数	0.089
		人均电信业务收入	X3	电信业务总收入/地区人口数	0.155
		每百人移动电话年末用户数	X4	电信业务量/地区人口数	0.114
		数字普惠金融指数	X5	《北京大学数字普惠金融指数》	0.030
	智能化应用	每万人人工智能企业数量	X6	人工智能企业数量/地区人口数	0.091
		人工智能专利授权数	X7	当年授权的人工智能专利数量	0.073
		工业机器人安装密度	X8	各地工业机器人安装数量/地区人口数	0.168

3.1.3. 机制变量

为揭示城市数智化转型对碳排放强度的影响机制，选取产业结构升级、绿色技术创新、资源配置优化作为机制变量进行进一步研究。以第二产业与第三产业 GDP 的比值衡量产业结构升级(Ins) [11]，反映城市产业结构从工业主导向服务业主导的转型趋势。以每万人绿色专利授权数(Num)来衡量城市绿色技术创新的产出能力。借鉴宋德勇等[12]的研究方法，从资金与人力两个维度衡量地区资源配置的合理性。其中，研发支出强度(Tec)为科技支出占地方政府一般财政支出的比重，反映研发资源的投入力度；人力

²数字经济及其核心产业统计分类（2021）[EB/OL].

https://www.stats.gov.cn/sj/tjbz/gjtjbz/202302/t20230213_1902784.html, 2021-06-03.

资本水平(Hum)为普通高等学校在校学生数占年末总人口的比重，反映潜在创新人才的储备能力[13]。

3.1.4. 控制变量

为控制其他经济社会因素对碳排放强度的干扰，参考包玉香等[14]、薛飞等[15]的做法，本文引入了以下控制变量以控制数智化对碳排放强度影响结果的准确性：(1) 人口规模(Pop)：以年末总人口的对数衡量，反映城市人口集聚效应；(2) 城市化水平(Urb)：以城镇常住人口占总人口的比重衡量，反映城市城镇化进程；(3) 对外开放度(OP)：以进出口总额与地区生产总值的比值衡量，反映城市对外经济联系程度；(4) 经济水平(Edl)：以人均地区生产总值的对数衡量，反映城市经济发展阶段(以 2014 年为不变价基期)；(5) 政府干预(Gov)：以地方政府一般公共预算支出与地区生产总值的比值衡量，反映政府对经济的调控力度；(6) 金融水平(Fin)：以年末金融机构存贷款余额与地区生产总值的比值衡量，反映城市金融发展程度。

3.2. 数据来源及描述性统计

由于地级市碳排放强度核算数据以及部分数智化细分指标数据尚未全部公开，为保证数据的一致性与完整性，本文选取 2014~2023 年中国 297 个地级及以上城市作为初始研究样本。针对数据缺失过多的城市进行剔除，并对部分缺失数据采用线性插值法补全，最终保留 277 个地级市的面板数据进行研究。

其中，碳排放数据来源于全球大气研究排放数据库(EDGAR)；人工智能企业数量来自天眼查；工业机器人安装密度来自国际机器人联盟(IFR)，数字普惠金融指数数据来源于北京大学数字金融研究中心；绿色专利授权数来自国家知识产权局；其他地区生产总值、一般公共预算支出、年末总人口、普通高等学校在校学生数等数据均来源于《中国城市统计年鉴》、各省市统计年鉴、国家统计局等权威数据库。表 2 汇报了主要变量的描述性统计。

Table 2. Descriptive statistics for variables
表 2. 变量描述性统计

变量类型	变量	变量含义	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	lnCI	碳排放强度	0.1897	0.8025	-2.6064	3.4112
	SZH	数智化水平	0.0541	0.0426	0.0126	0.6203
解释变量	Digital	数字化基础	0.2706	0.0645	0.1318	0.5681
	Intell	智能化应用	0.0233	0.0435	0.0000	0.7475
机制变量	Ins	产业结构升级	0.9991	0.4208	0.1566	3.8224
	Num	绿色技术创新	5.0330	1.5720	0.6931	9.8717
	Hum	人力资本	0.0217	0.0263	0.0002	0.1777
	Tec	研发支出	0.0189	0.0198	0.0005	0.2068
控制变量	Pop	人口规模	5.9326	0.6561	3.7835	8.1362
	OP	对外开放度	0.1727	0.2630	0.0000	2.4913
	Urb	城市化水平	0.4105	0.2199	0.0750	1.0000
	Edl	经济水平	10.9115	0.5222	9.4069	12.4864
	Gov	政府干预	0.2057	0.0936	0.0439	0.7414
	Fin	金融水平	2.8086	1.2840	0.7167	21.3015

3.3. 模型设定

3.3.1. 基准回归模型

为检验数智化对于城市绿色低碳转型的影响，采用面板数据的双向固定效应模型进行基准回归分析，

设定以下基本模型：

$$\ln CI_{it} = \alpha_0 + \beta_1 SZH_{it} + \beta_2 Controls_{it} + \gamma_t + \delta_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中， i 表示城市， t 表示年份， SZH_{it} 表示城市 i 在第 t 年的数智化水平， $Controls_{it}$ 表示一系列控制变量， γ_t 表示时间效应， δ_i 表示城市效应， ε_{it} 表示随机扰动项。

3.3.2. 中介效应模型

为深入剖析数智化赋能城市绿色低碳转型的作用机制，本文选取产业结构升级、绿色技术创新与资源配置优化作为核心机制变量，通过中介效应模型检验数智化对碳排放强度影响的间接传导路径。为避免三步法中介效应检验带来的内生性影响，采用江艇[16]的两步法，构建了如下模型：

$$M_{it} = \alpha_0 + \beta_1 SZH_{it} + \beta_2 Controls_{it} + \gamma_t + \delta_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中， i 表示城市， t 表示年份， SZH_{it} 表示城市 i 在第 t 年的数智化水平， $Controls_{it}$ 表示一系列控制变量， γ_t 表示时间效应， δ_i 表示城市效应， ε_{it} 表示随机扰动项。

3.3.3. 门槛效应模型

理论分析表明，数智化对城市碳排放强度的抑制作用可能并非简单的线性关系，而是随其自身发展水平的不同而呈现出结构性转变，即存在基于数智化水平的门槛特征。为识别这一非线性关系并检验其临界门槛值，本文借鉴 Hansen 提出的面板门槛模型进行实证检验，具体模型设定如下：

$$\ln CI_{it} = \alpha_0 + \beta_1 SZH_{it} * I(SZH_{it} \leq \theta_1) + \beta_2 SZH_{it} * I(SZH_{it} > \theta_1) + \beta_3 Controls_{it} + \gamma_t + \delta_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中， SZH_{it} 同时作为门槛变量和核心解释变量，即数智化水平； θ_1 为待估计的门槛值； $I(\cdot)$ 为示性函数，当括号内条件成立时取值为 1，否则为 0；其余变量定义同基准回归模型。利用该模型我们可以检验当数智化水平跨越门槛值 θ_1 时，其系数是否发生显著变化（即 $\beta_1 \neq \beta_2$ ），从而验证数智化对碳排放强度影响的非线性特征。

3.3.4. 空间效应模型

基于前文理论分析，数智化发展不仅会影响本地城市的碳排放强度，还可能对空间相邻或经济关联的城市产生跨区域空间溢出效应。因此有必要充分考虑城市间的空间依赖性，对其可能存在的空间效应进行检验与识别。本文参考缪陆军等[5]的研究，建立空间视角下数智化对碳排放强度影响的计量模型：

$$\begin{aligned} \ln CI_{it} &= \alpha_0 + \rho \sum_{j=1}^N W_{ij} \ln CI_{jt} + \beta SZH_{it} + \theta \sum_{j=1}^N W_{ij} X_{jt} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \\ \varepsilon_{it} &= \delta \sum_{j=1}^N W_{ij} \varepsilon_{jt} + \eta_{it} \end{aligned} \quad (4)$$

其中， W_{ij} 为空间面板权重矩阵，本文采用空间地理距离矩阵， ρ 为空间自回归系数， δ 为空间自相关系数， SZH_{it} 表示城市 i 在第 t 年的数智化水平， ε_{it} 为空间误差自相关项， η_{it} 为随机干扰项。当 $\rho \neq 0$ ， $\theta = 0$ ， $\delta = 0$ 时，表示为 SAR (空间自回归模型)；当 $\rho = 0$ ， $\theta = 0$ ， $\delta \neq 0$ 时，表示为 SEM (空间误差模型)；当 $\rho \neq 0$ ， $\theta \neq 0$ ， $\delta = 0$ 时，表示为 SDM 空间杜宾模型。

4. 实证分析

4.1. 基准回归分析

表 3 报告了基准回归结果，第(1)列为仅控制基础控制变量时的回归结果，第(2)列为进一步加入时间固定效应后的回归结果，系数均显著为负，第(3)列同时加入时间与城市双向固定效应，数智化的系数为

-0.183，依旧在 1%水平上显著为负，即其他条件不变时，城市数智化水平每提升 1 个单位，碳排放强度将显著下降 18.3%，验证了核心假设 H1 成立。

为进一步探究数智化碳减排总效应的来源，本文对数字化基础与智能化应用两个子维度及其交互项分别进行双向固定效应模型估计，结果如表 3 列(4)~(6)所示。列(4)和列(5)的单独回归结果显示，数字化基础与智能化应用的系数均在 1%的统计水平上显著为负，表明平均来看，数字基础设施的完善与人工智能技术的产业落地均能有效抑制城市碳排放强度，且数字化基础的平均减排效应略强于智能化应用，说明当前我国数智化减排仍主要依赖数字基础设施的规模扩张效应。列(6)为在基准回归模型中同时加入数字化基础、智能化应用以及二者交互项的回归结果，可以看到，交互项系数为-8.665，且在 1%水平上显著为负，表明数字化基础与智能化应用存在显著的协同减排效应，二者深度融合能够产生“1+1>2”的碳减排效果。智能化应用的系数显著为正，并不代表智能化会增加碳排放，而是反映了数字化指数为 0 时的边际效应。

Table 3. Results of benchmark regression
表 3. 基准回归结果

变量	X = SZH			X = Digital	X = Intell	X = Digital_Int
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	lnCI	lnCI	lnCI	lnCI	lnCI	lnCI
SZH	-0.800*** (0.128)	-0.817*** (0.132)	-0.183*** (0.036)			
Digital				-0.968*** (0.328)		-0.861** (0.362)
Intell					-0.717*** (0.265)	3.045*** (1.116)
Digital_Int						-8.665*** (2.940)
_cons	3.947** (1.541)	3.743** (1.785)	10.918*** (1.176)	11.777*** (1.332)	10.624*** (1.295)	10.973*** (1.284)
控制变量	是	是	是	是	是	是
控制时间	否	是	是	是	是	是
控制城市	否	否	是	是	是	是
N	2770	2770	2770	2770	2770	2770
adj. R ²	0.269	0.270	0.978	0.977	0.977	0.977

注：***p < 0.01，**p < 0.05，*p < 0.1；括号内为聚类到城市层面的稳健标准误。

4.2. 稳健性检验

为进一步验证基准回归结果的可靠性，本文从缓解内生性、排除特殊干扰与验证指标稳健性三个维度开展稳健性检验，其稳健性检验结果见表 4。

Table 4. Results of robustness test**表 4.** 稳健性检验结果

变量	滞后一期解释变量	缩小样本量	替换被解释变量
	(1)	(2)	(3)
	lnCI	lnCI	lnCE
L.SZH	-0.172*** (0.040)		
SZH		-0.203*** (0.036)	-0.060** (0.029)
_cons	10.186*** (1.495)	11.135*** (1.130)	16.002*** (0.690)
控制变量	是	是	是
控制时间	是	是	是
控制城市	是	是	是
adj. R^2	0.980	0.976	0.979
N	2488	2213	2766

注：*** $p < 0.01$ ，** $p < 0.05$ ，* $p < 0.1$ ；括号内为聚类到城市层面的稳健标准误。

4.2.1. 滞后一期解释变量

为缓解数智化与碳排放强度之间可能存在的双向因果及内生性问题，本文将核心解释变量数智化(SZH)滞后一期(L.SZH)代入模型进行回归，检验结果如表中第(1)列所示。滞后一期数智化的回归系数为-0.172，且在1%的水平上显著为负，调整后的 R^2 为0.980。这一结果表明，数智化对城市碳排放强度的抑制效应具有显著的持续性，即便考虑内生性干扰，基准回归的核心结论依然成立。

4.2.2. 剔除 2020~2021 年样本

考虑到2020~2021年受公共卫生事件冲击等特殊事件影响，城市经济活动与碳排放可能出现异常波动，为排除这类外生干扰对结果的影响，本文剔除该时段样本后再次回归，结果如表中第(2)列所示。数智化(SZH)的回归系数为-0.203，仍在1%水平上显著为负。这说明在排除特殊时段的异常波动后，数智化的减排效应依然显著且稳定，进一步支撑了基准回归结果的可靠性。

4.2.3. 替换被解释变量

为验证被解释变量指标选择对回归结果的影响，本文将被解释变量从二氧化碳排放强度(lnCI)替换为二氧化碳排放量(lnCE)，结果如表中第(3)列所示。数智化(SZH)的回归系数为-0.060，在5%水平上显著为负，这一结果表明，数智化对城市碳排放的抑制效应不受被解释变量指标类型的影响，无论是相对强度还是绝对总量，数智化的减排作用均显著存在，基准回归结果的稳健性得到充分验证。

4.3. 异质性检验

4.3.1. 区域异质性

考虑到我国东不同地区在数字基础设施建设水平等方面存在差异，本文将样本城市划分为东部、中部和西部三大组别进行分组回归检验，结果见表5列(1)~(3)，从回归结果来看，东部地区与中部地区的数智化(SZH)系数为均在1%水平上显著为负，且在中部地区效果更好，可能由于中部地区正处于传统产

业低碳转型关键阶段，高耗能产业占比高，数智化通过推动产业升级与流程优化可直接降低碳排放强度，减排效应最为突出。但西部地区的回归系数并不显著，可能是源于西部地区数字基础设施较为滞后、产业以资源型为主，数智化技术在低碳领域的渗透不足，因此赋能作用尚未有效转化为减排成效。

4.3.2. 资源禀赋异质性

为检验数智化碳减排效应在不同资源禀赋城市的差异，将样本分为非资源型城市和资源型城市两类，结果见表 5 第(4)~(5)列。回归结果表明，城市数智化转型对碳排放强度的抑制作用在两类城市中均显著存在，但在非资源型城市效果更好。非资源型城市的产业结构更加多元灵活，工业、服务业与现代农业协同发展，经济发展水平和数字化转型基础相对较好，有利于数智化技术的发展与渗透，而资源型城市长期以资源开采、高耗能加工产业为主导，产业结构较为单一，且经济发展和数字化转型基础相对薄弱，数智化技术的适配应用场景有限、渗透难度较大，最终导致其减排效应的显著性与作用幅度均弱于非资源型城市。

4.3.3. 城市规模异质性

以市辖区常住人口“100 万人口”作为分界线将我国城市划分为大型城市和中小型城市，检验数智化对碳排放强度影响的规模异质性，回归结果见表 5 第(6)~(7)列，数智化对碳排放强度的抑制作用在不同规模城市中均显著存在，但大城市的效应更稳健、幅度更强，小城市的效应稍弱但仍具统计显著性，反映了城市规模带来的资源禀赋与产业结构差异对数智化减排效应的影响，这一结果可能是由于大城市的高级产业结构与完善基础设施为数智化提供了更优的应用场景，而小城市的产业刚性与基础薄弱则一定程度上削弱了效应幅度。

Table 5. Results of heterogeneity test
表 5. 异质性检验结果

变量	区域异质性			资源禀赋异质性		城市规模异质性	
	东部	中部	西部	资源型	非资源型	大城市	小城市
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	lnCI	lnCI	lnCI	lnCI	lnCI	lnCI	lnCI
SZH	-0.143***	-0.386***	-0.101	-0.154*	-0.162***	-0.162***	-0.132**
	(0.047)	(0.076)	(0.063)	(0.082)	(0.041)	(0.053)	(0.058)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是
控制时间	是	是	是	是	是	是	是
控制城市	是	是	是	是	是	是	是
_cons	12.158***	9.308***	13.349***	10.650***	10.383***	10.176***	10.881***
	(1.066)	(1.581)	(2.315)	(1.138)	(1.250)	(1.403)	(1.522)
N	1000	998	772	1118	1652	1009	1761
adj. R ²	0.987	0.968	0.977	0.975	0.974	0.984	0.972

注：***p < 0.01，**p < 0.05，*p < 0.1；括号内为聚类到城市层面的稳健标准误。

4.4. 机制检验

本文采用江艇[16]的两步法开展机制检验，以规避传统逐步法中介变量内生性引发的估计偏误。第一步沿用基准回归识别策略，检验核心解释变量对中介变量的因果效应，验证机制前半段链条；第二步不

再将中介变量纳入基准回归以避免内生性干扰，转而依托既有理论与文献论证其对被解释变量的作用逻辑，当前半段效应显著且后半段逻辑自洽时，即可判定该作用机制成立。

4.4.1. 产业结构升级

表 6 中列(1)为数智化对产业结构升级(Ins)的回归结果，分析结果可知数智化(SZH)的回归系数为 0.185，且在 1%的水平上显著为正。这表明数智化发展能够显著推动城市产业结构向低碳化、高端化升级，降低高耗能产业占比、提升服务业与高技术产业比重，从而有效降低碳排放强度。而产业结构升级会通过经济效应、技术效应等渠道抑制本地以及周边地区的碳排放强度[17]。由此可见，数智化可通过推动产业结构升级这一路径，间接抑制城市碳排放，验证了假设 H2。

4.4.2. 绿色技术创新

列(2)为数智化对每万人绿色专利授权数量(Num)的影响，数智化的回归系数在 1%水平上显著为正，说明数智化能够显著提升城市绿色技术创新的产出规模，进而降低碳排放水平。邵帅等[18]的研究证明了绿色技术创新能够通过“技术红利”效应有效降低碳排放强度，能够证明数智化通过促进绿色技术创新降低城市的碳排放强度，进而推动城市的绿色低碳转型，验证了假设 H3。

4.4.3. 资源配置优化

列(3)、列(4)展示了数智化对资源配置优化的回归结果，其中列(3)反映的是对于人力资源的配置效率(Hum)，列(4)反映的是对于资本的配置效率(Tec)。结果显示，数智化对人力配置效率以及资金配置效率的回归系数均在 1%水平上显著为正，说明数智化能够显著优化城市人力与资本的配置效率。已有研究[19]指出，资源配置优化可通过减少资源错配、提升生产效率，降低单位产出的碳排放强度，验证了假设 H4。

Table 6. Mechanism test results
表 6. 机制检验结果

	产业结构升级	绿色技术创新	资源配置优化	
变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	Ins	Num	Hum	Tec
SZH	0.186*** (3.218)	2.238*** (4.659)	0.007*** (2.778)	0.011*** (2.937)
控制变量	是	是	是	是
控制时间	是	是	是	是
控制城市	是	是	是	是
_cons	-5.378** (-2.323)	-18.641 (-1.564)	0.169*** (3.614)	-0.182*** (-2.680)
N	2770	2770	2770	2770
adj. R ²	0.792	0.910	0.967	0.800

注：***p < 0.01，**p < 0.05，*p < 0.1；括号内为聚类到城市层面的稳健标准误。

4.5. 门槛效应检验

在进行门槛效应回归前，先采用 bootstrap 进行了 300 次抽样，获得如表 7 所示的门槛效应检验结果。

Table 7. Results of threshold effect test
表 7. 门槛效应检验结果

门槛变量	门槛个数	F 值	P 值	10%临界水平	5%临界水平	1%临界水平
SZH	单门槛	14.27	0.010	14.083	16.299	19.503
	双门槛	5.62	0.843	14.109	17.578	29.092
	三门槛	5.02	0.920	11.254	13.174	17.280

由表 7 门槛效应检验结果可知，门槛变量 SZH 仅单一门槛在 1%统计水平上显著，而双门槛(P 值 = 0.843)与三门槛(P 值 = 0.920)均未通过显著性检验，说明数智化水平对碳排放的影响仅存在单一门槛效应。因此，将基于单一门槛模型进行回归分析，以识别门槛值及不同门槛区间内城市数智化转型对碳排放的异质性影响。

Table 8. Results of threshold model regression
表 8. 门槛模型回归结果

变量	lnCI
SZH ≤ 0.0352	-0.0399
	(-1.02)
SZH > 0.0352	-0.1110***
	(-3.38)
cons	11.2553***
	(26.16)
控制变量	是
控制时间	是
控制城市	是
N	2760
adj. R ²	0.6179

注：***p < 0.01，**p < 0.05，*p < 0.1；括号内为 t 值。

表 8 门槛模型回归结果表明了对于城市数智化水平对碳排放强度的影响，当数智化水平低于第一门槛值(0.0352)时，城市数智化转型的系数为-0.0399，但未通过显著性检验，说明该区间内城市数智化转型对碳排放强度的抑制作用并不显著；当数智化水平超过第一门槛值(0.0352)时，城市数智化转型的系数为-0.1110，在 1%水平上显著为负，表明跨越门槛值后，城市数智化转型对碳排放强度的抑制效应才能得到更好发挥。这一结果验证了本文的假设 H5。

这一非线性特征的可能原因在于，当数智化水平处于较低区间时，城市数智化转型的深度与广度不足，数字基础设施尚未完善、智能技术应用场景较为有限，仅能通过局部优化生产流程实现微弱的减排效果；而随着后期城市数智化水平的日益发展与提高，数智化转型的网络效应与协同效应充分释放，通过推动产业结构向低能耗高附加值升级、赋能绿色技术创新突破、优化资源配置效率等多重路径，大幅提升了减排成效，从而对碳排放强度产生显著且更强的抑制作用[11]。

4.6. 空间溢出效应

4.6.1. 空间自相关检验

在考察数智化对碳排放强度影响的空间效应前，本文采用全局莫兰指数对数智化水平与碳排放强度的空间相关性进行了检验，结果如表 9 所示。从数智化水平的空间分布特征来看，各年份的莫兰指数均为正值，范围在 0.043~0.093 之间，且全部在 1%的水平上显著，说明数智化水平在地理空间上并非随机分布，而是呈现出显著的空间集聚特征。碳排放强度同样展现出显著的空间相关性。2014~2023 年间，其莫兰指数在 0.060~0.111 之间波动，均通过了显著性检验，且随着时间推移，空间相关性整体呈增强趋势，反映出碳排放强度的空间集聚效应在研究期内不断强化。这一结果表明有必要采用空间计量模型进行进一步研究。

Table 9. Global Moran's I for digital intelligence level and carbon emission intensity
表 9. 数智化水平与碳排放强度的全局 Moran's I 指数

年份	数智化水平			碳排放强度		
	Moran's I	Z	p-value	Moran's I	Z	p-value
2014	0.093	19.008	0.000	0.060	12.152	0.000
2015	0.088	17.900	0.000	0.068	13.601	0.000
2016	0.086	17.453	0.000	0.075	14.924	0.000
2017	0.085	17.188	0.000	0.085	16.883	0.000
2018	0.083	16.726	0.000	0.087	17.264	0.000
2019	0.075	15.057	0.000	0.107	21.116	0.000
2020	0.069	13.880	0.000	0.109	21.418	0.000
2021	0.058	11.763	0.000	0.109	21.478	0.000
2022	0.055	11.252	0.000	0.100	19.755	0.000
2023	0.043	8.998	0.000	0.111	21.781	0.000

4.6.2. 空间杜宾模型的结果分析

Table 10. Results of model specification test
表 10. 模型设定检验结果

检验类型	统计量	P 值
LM-error	8552.061	0.000
Robust LM-error	4931.328	0.000
LM-lag	3719.552	0.000
Robust LM-lag	98.818	0.000
LR-SDM-SAR	30.85	0.000
LR-SDM-SEM	63.68	0.000
Wald-spatial lag	82.37	0.000
Wald-spatial error	17.71	0.013

在开展空间计量分析前，需通过一系列检验确定合适的空间计量模型，检验结果如表 10 所示。空间

误差效应与空间滞后效应的 LM 统计量均在 1%水平上显著,表明数据中同时存在空间滞后依赖和空间误差相关。这一检验结果为选择空间杜宾模型提供了实证支持。LR 检验结果均在 1%水平上显著,拒绝了“SDM 可简化为空间滞后模型(SAR)或空间误差模型(SEM)”的原假设,表明 SDM 相较于 SAR 和 SEM 更具拟合优势。Wald 检验进一步拒绝了“空间滞后项和空间误差项系数为 0”的原假设,再次证实了空间杜宾模型的适用性,因此本文最终采用双向固定的空间杜宾模型进行估计。

4.6.3. 空间效应的实证分析

表 11 为空间杜宾模型的回归结果,空间自回归系数 ρ 为 0.650,在 1%水平上显著为正,这一结果说明样本城市的碳排放强度呈现出显著的正向空间依赖特征,呈现出“高-高集聚、低-低集聚”的空间分布规律。从核心解释变量数智化水平(SZH)的空间滞后项($W * X$)来看,其系数为-0.540,在 1%水平上显著为负,证实了数智化发展存在负向的空间溢出效应,表明数智化发展的影响并不局限于本地区,还通过多种渠道对邻近城市的碳排放强度产生抑制作用[20],验证本文假设 H6。

根据偏微分方程将数智化对碳排放强度的空间效应分解为直接效应与间接效应,进行进一步分析。可以看到,直接效应与间接效应系数均在 1%水平上显著为负,且间接效应系数绝对值远大于直接效应,这一特征与我国区域经济一体化纵深推进、城市群协同发展格局加速构建的现实背景高度契合。从传导机制来看,这种负向溢出主要通过三重渠道实现:一是技术知识扩散,区域一体化下要素流动壁垒持续弱化,中心城市积累的绿色数字技术、低碳管理经验会通过人才流动、产业投资、数据共享等途径向周边城市扩散,形成“示范-跟随”的知识溢出效应;二是产业链传导,依托“核心城市研发、周边城市制造”的城市群分工体系,中心城市数智化升级会通过数字化供应链向周边配套企业传导低碳生产标准,推动周边城市低碳技术改造,同时,绿色技术的产业链输出也会推动周边产业低碳转型;三是经验借鉴,在碳减排目标约束下,地方政府会主动学习邻近城市的智慧碳管控、数字环保监管等治理经验,形成政策协同效应,进一步放大空间溢出的减排效果[10]。

Table 11. Results of spatial spillover effect regression

表 11. 空间溢出效应的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	lnCI	W*X	直接效应	间接效应	总效应
SZH	-0.149*** (0.019)	-0.540*** (0.163)	-0.155*** (0.020)	-1.849*** (0.672)	-2.004*** (0.673)
Spatial rho	0.650*** (0.096)				
sigma2-e	0.012*** (0.000)				
控制城市	是	是	是	是	是
控制年份	是	是	是	是	是
控制变量	是	是	是	是	是
Observations	2770	2770	2770	2770	2770
R-squared	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106
Number of id	277	277	277	277	277

注: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$, 括号内为聚类到城市层面的稳健标准误。

5. 结论与启示

5.1. 结论

本文以 2014~2023 年全国 277 个地级市的面板数据为研究样本,在利用熵权法构建数智化指标体系的基础上,实证检验了数智化对城市碳排放强度的影响,构建中介效应模型、门槛效应模型、空间杜宾模型进一步分析其作用机制、非线性特征与空间溢出效应,研究发现:

(1) 数智化发展对城市碳排放强度具有显著的抑制作用,此结论在经过一系列稳健性检验后依然成立;进一步分析表明,数智化可通过产业结构升级、绿色技术创新、资源配置效率优化三条核心路径发挥间接减排效应。

(2) 数智化对碳排放强度的抑制作用存在显著的异质性特征,在东部、中部地区更加明显,对西部地区的碳排放不具有显著的抑制作用,同时,这一效应在非资源型城市和大城市更为突出。

(3) 数智化的对碳排放强度的影响随数智化的发展程度呈现出门槛特征。当数智化水平低于门槛值时,其对碳排放强度的抑制作用并不显著,当达到一定转型深度后,减排效应才会显著增强。

(4) 在纳入空间因素后,数智化发展对城市碳排放强度的负向抑制作用依然显著成立;同时,数智化发展不仅能显著抑制本地城市的碳排放强度,还对邻近城市的碳排放强度存在显著的负向空间溢出效应。

5.2. 启示

基于以上研究结论,为充分释放数智化的减排赋能效应,推动城市绿色低碳转型,本文提出如下政策建议:

(1) 大力推动数智化的发展。根据研究结论,当数智化发展水平跨过临界门槛后,才能更好地发挥碳减排作用,这也是当前部分城市绿色低碳转型效果不及预期的原因。政府应通过财政补贴、税收优惠、专项信贷等政策工具,降低城市数字基础设施建设与企业数字化转型的成本,破解数智化发展前期投入大、回报周期长的现实痛点,推动低水平数智化城市快速跨过有效减排的临界门槛,充分释放数智化的减排赋能效应。

(2) 实施差异化的数智化发展策略。鉴于数智化减排效应的异质性特征,需避免“一刀切”的政策导向,因地制宜、分类施策。针对不同区域、不同类型城市的发展特征,对绿色低碳领域的专业人才与数字化转型企业实施差异化的扶持激励政策,补齐欠发达地区数智化发展短板,从而推动数智化减排红利在区域间均衡释放。

(3) 树立数智化区域协同发展理念。基于数智化减排效应的空间溢出特征,应打破传统属地化治理的局限,树立跨区域协同发展的全局治理理念。一方面,要破除跨区域行政壁垒与数据孤岛,建立区域间数智化赋能绿色低碳转型的协同联动机制,实现减排经验、技术资源、数据信息的跨区域互通共享,充分放大数智化减排效应的正向“涓滴效应”;另一方面,建立区域间利益共享与对口帮扶机制,推动发达地区向欠发达地区输出数智化转型的技术、经验与人才,弱化核心城市对周边欠发达地区的要素“虹吸效应”,让数智化的减排红利惠及更广范围。

参考文献

- [1] 韩先锋,李佳佳.数智化赋能城市包容性绿色增长:来自双重机器学习的因果推断[J].中国人口·资源与环境,2025,35(6):177-189.
- [2] 曹裕,李想,胡韩莉,等.数字化如何推动制造企业绿色转型?——资源编排理论视角下的探索性案例研究[J].管理世界,2023,39(3):96-113,126.
- [3] 刘婧玲,陈艳莹.数字技术发展、时空动态效应与区域碳排放[J].科学学研究,2023,41(5):841-853.

-
- [4] 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.
- [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.
- [6] 邢小强, 周平录, 张竹, 等. 数字技术、BOP 商业模式创新与包容性市场构建[J]. 管理世界, 2019, 35(12): 116-136.
- [7] 许可, 张亚峰. 绿色科技创新能带来绿水青山吗?——基于绿色专利视角的研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(5): 141-151.
- [8] 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.
- [9] 袁亮, 张姝琦, 何伟军, 等. 长江经济带数智化水平对绿色全要素生产率的影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(5): 923-936.
- [10] 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.
- [11] 石大千, 丁海, 卫平, 等. 智慧城市建设能否降低环境污染[J]. 中国工业经济, 2018(6): 117-135.
- [12] 宋德勇, 李超, 李项佑. 新型基础设施建设是否促进了绿色技术创新的“量质齐升”——来自国家智慧城市试点的证据[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(11): 155-164.
- [13] 董依婷, 原珂, 赵贤, 等. 数字经济赋能城市能源转型: 基于政府与公众异质约束视角[J]. 中国人口·资源与环境, 2025, 35(6): 100-111.
- [14] 包玉香, 朱贵增. 低碳城市试点政策对黄河流域城市群绿色全要素生产率的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2025, 35(8): 134-143.
- [15] 薛飞, 陈煦. 绿色财政政策的碳减排效应——来自“节能减排财政政策综合示范城市”的证据[J]. 财经研究, 2022, 48(7): 79-93.
- [16] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济, 2022(5): 100-120.
- [17] 陈加鹏, 刘丹丹, 徐蕊婷. 产业结构升级会降低碳排放强度吗?——基于绿色税收视角的考察[J]. 中国环境管理, 2024, 16(4): 80-90.
- [18] 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, 4-10.
- [19] 郭涛, 孙玉阳, 彭绪庶. 减污降碳压力能否转换为经济高质量发展动力?——环境规制强度与资源错配程度的新证据[J]. 上海经济研究, 2024(11): 39-52.
- [20] 杨玉珍, 唐明富, 许宁. 城乡融合赋能农业新质生产力: 影响机制与空间溢出效应[J]. 商业研究, 2025(6): 75-87.