

数实融合对碳排放的影响研究

黄莹莹¹, 孙佳煜¹, 宋钰怡¹, 陈雨², 黄彩净²

¹广西师范大学经济管理学院, 广西 桂林

²广西师范大学数学与统计学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年6月28日; 录用日期: 2026年7月29日; 发布日期: 2026年8月28日

摘要

在“数字化绿色化协同转型”与数字经济迅猛发展的宏观背景下, 探究数字技术与实体经济深度融合对碳排放的影响及内在机制具有重要的现实意义。本文基于2007~2023年中国280个地级及以上城市的面板数据, 采用专利共分类方法测算数实融合水平, 并运用双向固定效用模型, 实证检验了数实融合对碳排放的影响效应、异质性特征及其作用机制。研究发现: 第一, 数实融合能够显著抑制城市二氧化碳排放总量与碳排放强度, 该结论在经过内生性处理与一系列稳健性检验后依然稳健成立。第二, 数实融合的碳减排效应存在显著的城市与区域异质性, 在高人力资本水平的城市以及东部地区, 其对碳排放的抑制作用更为显著, 而在低人力资本及中西部城市则不显著。第三, 机制检验表明, 数实融合主要通过推动绿色技术创新、促进产业结构升级和提升生态承载能力三条路径间接实现碳减排。本文结论为纵深推进数实融合战略、实施差异化精准施策以助力企业与城市减污降碳协同治理提供了经验证据和政策启示。

关键词

数实融合, 碳排放, 绿色转型, 绿色技术创新, 产业结构升级

Research on the Impact of Digital-Real Integration on Carbon Emissions

Yingying Huang¹, Jiayu Sun¹, Yuyi Song¹, Yu Chen², Caijing Huang²

¹School of Economics and Management, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi

²School of Mathematics and Statistics, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi

Received: June 28, 2026; accepted: July 29, 2026; published: August 28, 2026

Abstract

Against the background of China's "Digital and Green Synergistic Transformation" and the digital

文章引用: 黄莹莹, 孙佳煜, 宋钰怡, 陈雨, 黄彩净. 数实融合对碳排放的影响研究[J]. 可持续发展, 2026, 16(8): 428-439. DOI: 10.12677/sd.2026.168304

economy developing rapidly, investigating the impact and internal mechanisms of deep integration between digital technology and the real economy on carbon emissions holds significant practical importance. Based on panel data from 280 prefecture-level cities and above in China from 2007 to 2023, this study measures the level of digital-real integration using a patent co-classification method and employs a two-way fixed-effects model to empirically examine the effects, heterogeneity, and mechanisms through which digital-real integration influences carbon emissions. The study found that: Firstly, digital-real integration reduces both total CO₂ emissions and carbon intensity at the city level in a significant way, and this conclusion remains solidly established after addressing endogeneity and conducting a series of robustness checks. Secondly, the carbon emission reduction effect of digital-real integration exhibits significant urban and regional heterogeneity—its emission-reducing impact is more significant in cities with high human capital, as well as in eastern regions, while it is insignificant in cities with low human capital, and in central and western regions. Thirdly, the mechanism analysis shows that digital-real integration mainly achieves carbon reduction indirectly through three pathways: promoting green technological innovation, facilitating the upgrading of industrial structure, and increasing the ecological carrying capacity. The conclusion of this research provides empirical evidence and policy implications for advancing the digital-real integration strategy and implementing targeted, differentiated policies to support coordinated pollution control and carbon reduction efforts among enterprises and cities.

Keywords

Digital-Real Integration, Carbon Emissions, Green Transformation, Green Technological Innovation, Industrial Structure Upgrading

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

自我国提出“碳达峰、碳中和”目标以来，城市层面的减排问题变得更加突出。工业制造与生产、日常交通出行、人口集聚和公共服务等大多在城市空间中展开，能源消费和碳排放也相对来说较为集中；同时，城市又是数字基础设施建设和产业转型最先实施的地方。近年来，随着工业互联网、云计算、大数据、人工智能等技术进入制造、交通、能源管理和环境治理等环节，数字经济与实体经济的融合已不只是发展数字产业本身，更体现在对生产流程、资源配置和治理方式的改造上。不过，数实融合并不能保证必然实现碳排放下降，数字基础设施建设、算力需求增长以及产业规模扩张同样可能增加能源消耗。因此，数实融合能否真正降低城市碳排放，以及这种作用在不同产业基础、人才储备、科教投入和区域条件下是否存在差异，仍需要结合城市层面的数据做进一步检验。

基于以上背景，本文以 2007~2023 年中国 280 个地级及以上城市为研究样本，采用专利共分类方法测度数实融合水平，并运用双向固定效应模型考察数实融合对城市碳排放的影响。此外，本文还从绿色技术创新、产业结构升级和生态承载能力三个方面分析其作用机制，并考察人力资本、科教支出及区域差异对这一关系的影响。通过上述研究，本文希望为理解数实融合的低碳效应提供城市层面的实证依据，也为不同类型城市推进数字化转型和碳减排协同治理提供参考。

2. 文献综述

近十年来，数字技术快速发展，数字经济逐渐成为推动经济增长的重要动力。数实融合越来越深入，

早已渗透到生产、流通、消费等各个环节。在“双碳”目标的要求下,能够通过数实融合减少碳排放、推动绿色发展,是当前学界和实践领域关注的重点。数实融合作为数字经济与实体经济协同发展的核心模式,其对碳排放的影响并非单一维度,而是与发展阶段、应用场景紧密相关,需结合多层面实际情况综合分析。

第一方面,如何科学量化数字经济与实体经济的融合深度。围绕数实融合的测度方法,学界形成了两类主流研究路径。一类是构建多维度综合评价体系,多以耦合协调度模型为核心,综合考量数字要素渗透程度与实体经济发展水平,兼顾融合的充分性与均衡性(洪银兴和任保平, 2023) [1];也有研究基于省级面板数据,从数字基础设施、技术创新等维度构建评价准则,结合实体产业指标完成融合水平测度(刘军等, 2020) [2];还有研究从数字经济实体化与实体经济数字化双向维度搭建指标体系,采用熵值-TOPSIS法测算中国省域数实融合深度,发现2017年后融合进程显著加速,区域差异逐步缩小(钞小静等, 2025) [3]。另一类则依托专利数据开展技术层面的融合测度,如有学者利用上市公司专利数据与国际专利分类号构建贡献矩阵,通过识别企业专利中对数字技术的引用情况,衡量企业层面的技术融合水平(李晓华, 2024) [4]。整体来看,综合指标法适配宏观区域测度但存在主观性偏差,专利测度客观性更强但应用场景仍局限于企业或省域层面。

第二方面,碳排放的动因与内在关系。学界普遍认为碳排放受经济发展、能源结构、技术水平等多要素共同影响,而非单一因素决定。关于经济发展的影响,已有研究证实经济总量扩张会直接拉动生产生活用能需求增加,是碳排放持续增长的主导动因(周云柯和吴建国, 2025) [5];同时我国人均碳排放与人均GDP之间呈现倒“U”形关系,随着GDP增长碳排放先升后降,到达极值点后经济发展会反哺节能减排(胡留所等, 2023) [6]。关于能源结构的作用,学界形成了较为统一的结论:化石能源尤其是煤炭消费占比偏高会显著抬高碳排放水平,清洁能源替代则能有效缓解碳排放压力(郭文强等, 2025) [7]。关于技术进步的影响,研究普遍认为其存在双向效应:能源利用效率提升、低碳技术推广可抑制碳排放,而技术扩张带来的经济产出规模增长,又会反向助推碳排放量上升(王奕淇等, 2024) [8]。总体而言,各类影响因素并非独立作用,会结合城镇化进程、产业结构等相关要素,共同决定碳排放总量与强度变化。

第三方面是数实融合对碳排放的影响效应与作用特征。现有研究已证实数实融合具备碳减排作用,且呈现出显著的空间异质性与行业异质性。在区域与城市层面,数实融合可以实现城市减污降碳协同增效,且该影响效应在高数字基础设施建设水平城市、大城市和非老工业基地城市表现更强(杨思莹等, 2025) [9];同时数实融合具备正向空间溢出效应,不仅能降低本地碳排放,还能通过技术溢出效应降低邻近地区碳排放,带动区域间减污降碳协同增效(王凯等, 2025) [10];张莉等, 2025) [11]。在行业层面,数实融合的碳减排效果存在明显差异,其对制造业的碳减排效应高于服务业,其中钢铁、化工等传统高耗能制造业的数字化改造效应最明显,核心原因在于不同行业的自身能源消耗情况与数字化改造空间存在区别(沈洁等, 2025) [12];曹增栋和岳中刚, 2024) [13]。总体而言,学界已形成基本共识:数实融合是赋能绿色低碳发展、助力实现“双碳”目标的重要路径。

综上所述,现有研究围绕数实融合测算、碳排放驱动因素、数实融合减排效应形成三条核心主线,为数字经济与绿色低碳发展领域奠定了理论与实证基础,但仍存在一定的研究局限。首先,在数实融合指标测度层面,现有研究主要基于综合指标体系法,虽能宏观呈现区域融合态势,但存在指标赋值主观性强、省级区域尺度难以反映城市差异的缺陷。其次,已有研究从省级、行业层面探讨了数实融合的减排效应,但对城市维度关注相对较少。最后,现有机制分析多零散聚焦技术与产业路径,普遍缺乏对生态治理维度的研究。基于此,本文采用2007~2023年全国280个地级及以上城市面板数据,采用专利共分类方法测度数实融合水平,运用双向固定效应模型实证检验其碳排放影响效应、异质性特征与传导机制,以期政府制定差异化的数实融合政策、引导企业精准降碳提供决策参考。

3. 理论研究与研究假设

3.1. 数实融合对碳排放的影响的直接效应

数实融合通过将数字技术全面渗透到生产生活各领域, 重构资源配置方式, 从多维度系统性降低城市碳排放水平。根据资源配置理论和产业结构演进理论可知, 数实融合降低了信息交易成本, 引导资源向低碳高效产业集聚, 同时推动生产要素向低耗产业转移, 契合城市低碳转型的发展规律。现实中, 数字平台打破碳排放数据“孤岛”为精准减排施策提供数据支撑, 数实融合通过技术赋能构建智慧能源管理体系可使城市综合能源利用效率提高 18%以上(宋锐等, 2024) [14]。同时, 数实融合推动产业结构低碳化转型既对钢铁、化工等高耗能产业实施绿色化改造, 又催生数字产业等低碳新兴业态(赵婷婷, 2024) [15], 实证研究表明城市数实融合水平每提升 1 个百分点, 单位 GDP 碳排放将下降 0.28 个百分点(陈秋月等, 2026) [16]。进一步而言, 数实融合对碳排放的抑制作用通过促进绿色技术创新、推动产业结构升级和增强生态承载能力三条核心路径传导。基于上述分析, 本文提出以下研究假设:

假设 H1: 数实融合可降低城市碳排放水平。

3.2. 数实融合对碳排放的影响的间接效应

3.2.1. 绿色技术创新影响渠道

数实融合通过数字技术的知识外溢效应和平台协同化作用为绿色技术创新提供新模式、开辟新路径, 进而对碳排放量产生显著影响。根据内生增长理论与交易成本理论可知, 数字技术依托知识资本的正向外部性, 推动绿色技术跨域溢出; 同时依托数字平台削减协同创新交易成本, 助力产业链绿色协同研发, 赋能产业低碳转型。在现实数据层面, 首先, 数据要素打破了传统技术创新的空间壁垒、缓解创新资源约束, 从而实现绿色技术知识的跨区域扩散。其次, 数实融合之所以能够提升持续绿色创新能力, 是因为数字技术降低了绿色技术研发的信息不对称性和试错成本(公雯雯和马远, 2025) [17]。同时, 数实融合通过增强产业链韧性、促进制造业企业间的绿色技术协同研发显著提高了绿色技术的转化率(徐盈之等, 2026) [18]。最后, 数字技术对绿色技术的减排效果的实时监测和量化评估为绿色技术市场化定价提供激励, 进而强化企业绿色技术创新投入。基于上述分析, 本文提出以下研究假设:

假设 H2a: 数实融合可通过促进绿色技术创新显著降低碳排放水平。

3.2.2. 产业结构升级影响渠道

数实融合通过数字技术对传统产业的改造升级和新兴产业的培育发展, 不仅重塑了产业结构形态, 还影响了区域碳排放总量和强度。根据结构变迁理论得知, 数实融合能够加速低碳产业转型; 进一步, 依据创造性破坏理论, 数实融合能够淘汰高碳产能、优化要素布局, 双向助力区域减排。在现实数据层面, 首先, 数字技术通过加速传统制造业智能化改造实现生产过程的精准控制和优化管理, 提高了能源利用率。其次, 研究发现, 创新要素流动通过促进数实融合、推动产业结构向节能化方向转型, 从而减少了高耗能产业的比重(周炯岚等, 2026) [19]。进一步, 数实融合还能够培育数字经济、绿色经济等新兴低碳产业, 不断优化产业结构。最后, 研究表明, 数实融合的快速发展能够推动产业结构向第三产业倾斜, 降低经济增长对高耗能产业的依赖(万光彩和杜蒙斐, 2026) [20]。基于上述分析, 本文提出以下研究假设:

假设 H2b: 数实融合可通过推动产业结构升级显著降低碳排放水平。

3.2.3. 生态承载能力影响渠道

数实融合依托数字技术革新生态环境治理模式, 提升区域生态监测、资源配置与生态修复能力, 为

区域低碳可持续发展筑牢生态基础。根据公共产品理论可知,数实融合以数字技术降低环境监测成本与共享门槛,构建准公共品数据基础设施,支撑政府与公众协同治理;并打破行政信息壁垒,促进生态服务功能优化与碳汇能力提升。在现实数据层面,首先,数实融合能够提高生态环境监测的精准性和时效性。其次,学者们利用遥感技术和 GIS 空间分析方法对碳排放时空格局和碳平衡分区进行了精准测度,为流域生态环境管理提供了科学依据(王瑜等, 2026) [21]。进一步地,长三角城市群的经验表明数字化手段提升低碳发展的核心机制在于数字技术优化了生态资源的配置和管理(於孝平等, 2024) [22]。同时,数字技术还能够使城市突破区域界限实现信息共享和协同治理。基于上述分析,本文提出以下研究假设:

假设 H2c: 数实融合可通过增强生态承载能力显著降低碳排放水平。

4. 研究设计

4.1. 计量模型构建

评估数实融合对碳排放的影响,本文构建如下基准计量模型:

$$CO_{2it} = \alpha_0 + \alpha_1 DigMix_{it} + \sum \alpha_2 Controls_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中, CO_2 表示城市二氧化碳排放量,核心解释变量 $DigMix$ 代表数实融合水平; α 表示估计系数; $Controls$ 代表对碳排放影响的一系列控制变量; γ_t 代表年份固定效应, μ_i 表示个体固定效应; ε_{it} 是随机误差项。

4.2. 变量选取与测度

4.2.1. 被解释变量

二氧化碳排放(CO_2)。本文采用 EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) 栅格数据计算得到二氧化碳的排放量。

4.2.2. 解释变量

数实融合($DigMix$)。本文借鉴周密等(2024) [23] 的做法,基于专利共分类方法对数实融合水平进行测算。

4.2.3. 控制变量

本文参考现有研究,选取了以下控制变量: (1) 经济发展($EcoDev$),采用城市实际 GDP 衡量,并且以 2007 年为基期; (2) 政府干预程度($GovInt$),采用财政支出占地区生产总值的比重进行衡量; (3) 对外开放($OpnExt$),以外商直接投资实际利用额与地区生产总值的比例进行衡量; (4) 人口密度($PopDns$),采用城市年末总人口与行政区域面积之比进行测度; (5) 金融发展($FinDev$),将城市年末金融机构存款贷款余额与地区生产总值之比作为金融发展水平的代理变量; (6) 固定资产投资($FixInv$),采用城市固定资产投资总额来表示。

4.3. 样本选取与数据来源

本文选择的研究期间及样本为 2007~2023 年 280 个地级及以上城市,并剔除因数据缺失较多的城市。本文所使用原始数据主要来源于国泰安(CSMAR)、中国研究数据服务平台(CNRDS)及《中国城市统计年鉴》等;其中,碳排放和数实融合数据来源于 RStata 数据中心。描述性统计如表 1 所示。

Table 1. Descriptive statistics

表 1. 描述性统计

类别	变量名称	变量	观测值	均值	标准差
因变量	二氧化碳排放	CO_2	4760	16.8997	0.9588
自变量	数实融合	$DigMix$	4760	2.9149	12.4949

续表

控制变量	经济发展	<i>EcoDev</i>	4760	1.1732	0.7858
	政府干预程度	<i>GovInt</i>	4760	0.1912	0.1015
	对外开放	<i>OpnExt</i>	4760	0.0027	0.0034
	人口密度	<i>PopDns</i>	4760	0.0438	0.0352
	金融发展	<i>FinDev</i>	4760	2.4863	1.2960
	固定资产投资	<i>FixInv</i>	4760	15.6429	1.0055

注：作者根据 CSMAR、WIND、CNRDS 等数据库整理绘制。

5. 实证结果与分析

5.1. 基准回归分析

表 2 报告了数实融合(*DigMix*)对城市 CO₂ 排放的基准回归结果。其中, 第(1)列为仅包含了核心解释变量的个体与时间双固定效应模型, 第(2)~(4)列在此基础上逐步加入控制变量。第(1)~(4)列结果显示, *DigMix* 的估计系数均在 1%的水平上显著为负, 表明数实融合对城市 CO₂ 排放具有显著的抑制作用。这一结论在依次加入经济发展水平、政府干预程度、对外开放程度、人口密度、金融发展水平以及固定资产投资等控制变量后依然稳健。就控制变量而言, 从表 2 第(4)列可以看出, 经济发展水平(*EcoDev*)的系数为负, 在 10%水平上显著, 表明经济增长有助于降低碳排放。政府干预(*GovInt*)的系数在 5%水平上显著为正, 表明当前政府干预模式可能偏向高碳投资或能源消耗, 不利于减排。人口密度(*PopDns*)的系数在 10%水平上显著为负, 说明人口集聚带来的规模效应和基础设施共享有助于降低碳排放。固定资产投资系数(*FixInv*)在 1%水平上显著为正, 说明城市固定资产投资扩张会加剧碳排放。金融发展(*FinDev*)和对外开放程度(*OpnExt*)未通过显著性检验, 其对碳排放的影响尚不明确。综合而言, 数实融合发展显著抑制了城市 CO₂ 排放, 假设 H1 得到验证。

Table 2. Benchmark regression estimation results

表 2. 基准回归估计结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂
<i>DigMix</i>	-0.0015*** (-3.9062)	-0.0016*** (-3.6828)	-0.0014*** (-2.9081)	-0.0013*** (-2.8062)
<i>EcoDev</i>		-0.0424 (-0.5302)	-0.0556 (-0.6961)	-0.1530* (-1.8487)
<i>GovInt</i>		0.1185 (0.9891)	0.1122 (0.9324)	0.2597** (2.1224)
<i>OpnExt</i>			0.7200 (0.4510)	-0.5597 (-0.3510)
<i>PopDns</i>			-0.7249 (-1.5799)	-0.8501* (-1.7964)

续表

<i>FinDev</i>				-0.0125 (-1.2936)
<i>FixInv</i>				0.1192*** (4.8031)
Constant	16.9042*** (1.48e+04)	16.9315*** (167.0872)	16.9774*** (160.3475)	15.2381*** (37.4521)
个体固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
观测值	4760	4760	4760	4760
调整 R ²	0.9762	0.9763	0.9763	0.9775

注：*、**、***表示 10%、5%、1%的显著性水平，括号内为 t 值，Constant 表示常数。

5.2. 稳健性检验

为确保本研究结论的可靠性，拟从以下五个方面展开稳健性分析：(1) 以碳排放强度替换被解释变量；(2) 缩尾处理；(3) 调整控制变量；(4) 剔除直辖市；(5) 内生性检验。

5.2.1. 替换被解释变量

为进一步保证回归结果的稳健性，将被解释变量替换为碳排放强度，从而进一步支持了主回归结果的稳健性。表 3 第(1)列显示，将被解释变量由二氧化碳排放总量替换为碳排放强度后，数实融合(*DigMix*)在 5%统计水平上显著为负，系数方向与基准回归完全一致。结果表明，数实融合对碳排放的抑制效应不受被解释变量度量方式影响，核心结论稳健，即数实融合不仅能降低碳排放总量，也能显著降低碳排放强度。

5.2.2. 缩尾处理

为消除极端值对分析结果的干扰，本文对核心变量进行 1%的缩尾处理，进一步验证了主效应结果的稳健性。表 3 第(2)列显示，数实融合在 1%水平上显著为负。结果表明，极端值未对核心结论产生干扰，数实融合显著抑制碳排放的结论不受异常值影响，基准回归结果稳健可靠。

5.2.3. 调整控制变量

本文进一步通过在基准模型的基础上增加教育支出、科技支出、人力资本水平等三个控制变量，进一步验证了主回归结果的稳健性。表 3 第(3)列显示，在基准模型的基础上加入教育支出、科技支出、人力资本水平等控制变量后，数实融合在 3 个模型中均在 1%水平上显著为负。结果表明，新增控制变量未改变核心变量的影响方向与显著性，数实融合的减排效应不受遗漏变量干扰，基准结论具有较好的稳健性。

5.2.4. 剔除直辖市

由于直辖市的经济发展水平明显领先于全国绝大多数城市，进而可能存在样本异质性导致估计偏误，故剔除直辖市样本进行稳健性检验以表明主回归结果具有稳健性。表 3 第(4)列显示，剔除直辖市样本后，数实融合在 5%水平上显著，估计系数均为负。结果表明，直辖市的特殊政策与发展特征未对核心结论产生偏误，数实融合抑制碳排放的结论在非直辖市样本中依然成立，基准回归结果具有普适性与稳健性。

Table 3. Robustness test estimation results
表 3. 稳健性检验估计结果

变量	(1) 替换被解释变量	(2) 缩尾处理	(3) 增加控制变量	(4) 剔除直辖市样本
数实融合	-0.0018** (-2.5737)	-0.0033*** (-3.6053)	-0.0012*** (-2.7088)	-0.0019** (-2.3100)
Constant	8.9542*** (20.7476)	15.4644*** (37.1518)	15.1986*** (33.9955)	15.2056*** (37.2527)
控制变量	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
观测值	4760	4760	4743	4692
调整 R ²	0.9665	0.9774	0.9776	0.9764

注：*、**、***表示 10%、5%、1%的显著性水平，括号内为 t 值，Constant 表示常数。

5.2.5. 内生性检验

模型估计过程中可能存在遗漏变量、不可观测因素等问题，进而引发内生性偏误，本文借鉴韩峰和阳立高(2020) [24]、马睿等(2026) [25]的做法，采用核心解释变量滞后一期作为工具变量进行回归估计。回归结果如表 4 所示，第一阶段 F 统计量远远大于 10，这说明工具变量的选择是有效且合理的。第二阶段回归中，核心解释变量估计系数在 1%的统计水平显著为负，这意味着在处理内生性问题之后，数实融合依然能够显著抑制碳排放。

Table 4. Endogeneity test estimation results
表 4. 内生性检验估计结果

变量	(1) 第一阶段	(2) 第二阶段
IV	1.0258*** (25.6061)	
<i>DigMix</i>		-0.0012*** (-2.7312)
控制变量	是	是
个体固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
观测值	4480	4480
Cragg-Donald Wald F 值		36863.89
Kleibergen-Paap Wald rk F statistic		655.67

注：*、**、***表示 10%、5%、1%的显著性水平，括号内为 t 值。

5.3. 异质性检验

本文拟从人力资本、东部和中西部这两个方面进行异质性分析。

5.3.1. 人力资本

人力资本支出作为数实融合的重要组成要素，其发展水平的高低会通过数实融合进而对碳排放产生异质性影响。为检验该研究假说，本文以人力资本支出水平的中位数为分组依据，开展异质性分析。其中，人力资本水平不低于中位数的城市为高组，低于中位数的城市为低组。如表 5 所示，按人力资本分组的回归结果显示，数实融合的影响存在显著异质性。高人力资本组数实融合系数在 5%水平上显著为负，说明高人力资本水平下数实融合对被解释变量有显著抑制作用；低人力资本组的系数未通过显著性检验。这表明人力资本是数实融合发挥效应的核心支撑，高人力资本群体能高效承接数字技术与实体产业的融合，推动效应落地。

Table 5. Estimation results of heterogeneity test based on human capital
表 5. 基于人力资本的异质性检验估计结果

变量	(1)	(2)
	低人力资本	高人力资本
数实融合	0.0023 (0.3036)	-0.0009** (-2.2447)
Constant	14.3295*** (28.1342)	16.6924*** (43.6262)
控制变量	是	是
个体固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
观测值	2359	2381
调整 R ²	0.9676	0.9833

注：*、**、***表示 10%、5%、1%的显著性水平，括号内为 t 值，Constant 表示常数。

5.3.2. 东部和中西部

Table 6. Heterogeneity test results based on eastern and central and western regions
表 6. 基于东部和中西部的异质性检验结果

变量	(1)	(2)
	东部	中西部
数实融合	-0.0013*** (-2.9459)	-0.0025 (-1.5176)
Constant	15.9372*** (21.9021)	14.8471*** (30.7693)
控制变量	是	是
个体固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
观测值	1683	3077
调整 R ²	0.9773	0.9743

注：*、**、***表示 10%、5%、1%的显著性水平，括号内为 t 值，Constant 表示常数。

考虑到我国各区域在发展基础与地理区位上存在显著差异，本文进一步分析数实融合对不同区位城市碳排放的作用差异。参考国家统计局划分标准，将样本分为东部和中西部城市。由表 6 回归结果可见，从区域维度看，数实融合对被解释变量的影响存在显著区域异质性。东部地区数实融合系数在 1%水平上显著为负，说明东部地区数实融合对被解释变量有显著抑制作用；中西部地区数实融合系数为负，但未通过显著性检验。这一差异可能源于东部地区数字与实体产业融合度更高、资源配置更成熟，数实融合的边际效应更易显现，而中西部地区融合基础薄弱，尚未形成显著影响。

5.4. 机制检验

本文机制检验从绿色技术创新、产业结构升级、生态承载能力三个维度，验证数实融合影响被解释变量的传导路径，如表 7 所示，回归结果均通过显著性检验，模型拟合度良好。由表 7 列(1)可知，绿色技术创新路径中，数实融合的回归系数在 1%水平上显著为正，表明数实融合能显著推动绿色技术创新，数字技术与实体经济深度融合，可加速绿色专利等创新成果的研发与转化，为绿色发展提供技术支撑，是数实融合发挥作用的核心传导渠道之一；由表 7 列(2)可知，产业结构升级路径中，数实融合系数在 5%水平上显著为正，说明数实融合可有效促进产业结构升级，数字技术赋能传统产业转型、催生新兴服务业态，推动三产占比提升，优化产业结构，成为数实融合影响经济发展的重要中间机制；由表 7 列(3)可知，生态承载能力路径中，数实融合系数在 1%水平上显著为正，表明数实融合助力区域生态资源统筹配置、生态环境精细化治理，有效提升城市生态承载能力，是数实融合实现绿色发展的重要传导路径。三组回归均控制了个体与年份固定效应，模型稳健性良好，充分验证了三条作用机制的有效性，假设 H2 得到验证。

Table 7. Mechanism regression analysis results
表 7. 机制回归分析结果

变量	(1)	(2)	(3)
	绿色技术创新 (<i>GrnTec</i>)	产业结构升级 (<i>IndUpg</i>)	生态承载能力 (<i>EcoCap</i>)
数实融合	0.0187*** (24.0393)	0.0040** (2.0535)	0.2492*** (3.8283)
Constant	0.5212*** (3.9349)	2.8017*** (4.6656)	26.4603*** (2.7830)
控制变量	是	是	
个体固定效应	是	是	
年份固定效应	是	是	
观测值	4751	4466	4402
调整 R ²	0.9493	0.8474	0.9048

注：*、**、***表示 10%、5%、1%的显著性水平，括号内为 t 值，Constant 表示常数。

6. 结论与建议

6.1. 研究结论

本文在梳理数实融合与碳排放相关理论及文献基础上，利用 2007~2023 年我国城市面板数据，实证

检验了数实融合对碳排放的影响效应与作用机制。研究发现：

其一，数字经济与实体经济深度融合能够切实推动城市碳减排。本文先后开展基准回归分析，并进行多种稳健性检验，包含内生性问题、核心指标替换、数据缩尾处理、增加控制变量、剔除直辖市样本等方式，各类检验所得结论均保持统一。数实融合发展既能够减少城市碳排放总体规模，也有助于压低单位产出碳排放强度，是助推城市向绿色低碳模式转型的关键支撑。

其二，数实融合带来的减排效果存在区域、城市资源条件层面的差异化特征。分样本回归结果显示，东部城市、人力资本储备充足的城市，数实融合降低碳排放的作用能够充分显现；反观中西部地区、科教资源供给不足的城市，这一减排作用并未得到统计层面的支撑。该结果说明，充足的人才储备与科研教育投入，是数字产业赋能降碳减排的重要基础，同时也反映出国内各区域数字化建设、产业融合发展程度不均衡的现实问题。

其三，数实融合主要依托技术、产业、生态三条传导渠道共同实现碳减排目标。从机制检验结果能够看出：首先，数字化发展能够激励绿色技术创新，数字工具深度融入研发环节，加快各类绿色专利的研发落地与实际应用，为碳减排提供技术层面的支撑；其次，数字与实体产业融合能够推动区域产业结构优化，一方面改造高耗能传统行业，另一方面培育数字新业态，推动产业向高端化转型，提高服务业在整体经济中的占比，优化区域产业布局；最后，数字化手段可以提升生态环境治理效率，借助智慧环保管控、绿色生产方式统筹调配各类生态资源，进一步提升区域生态承载能力与环境治理容纳水平。

6.2. 政策建议

基于上述结论，本文提出如下政策建议：

第一，实施“区域分级 + 靶向补短”的差异化推进策略：在东部及高人力资本城市先行建设“数实融合绿色转型示范区”，重点部署智慧能源管理平台和数字碳账本系统，并与碳交易市场实时对接。针对中西部和科教资源不足城市，由中央财政设立“数实融合碳减排专项转移支付”按该城市年度单位 GDP 能耗下降率给予阶梯式补贴，同时启动“东部数字绿色结对帮扶”行动，由东部示范区对口支援中西部城市搭建基础数据采集系统和低碳云平台，缩小区域间的“数字绿色鸿沟”。

第二，构建“绿色技术专利快审 + 应用场景示范”双轮驱动的创新激励体系：国家知识产权局设立“绿色技术专利快审通道”，将碳捕集、智能电网调度与工业数字孪生节能等细分领域专利的平均审查周期压缩至六个月内，并对授权专利前三年年费予以全额减免。财政部与工信部联合设计“数字绿色技术改造专项基金”，对采用数字化节能改造且实际节能量超过基准年耗能 10% 的企业，除按规定享受研发费用加计扣除外，额外给予部分改造投资额的税收抵免。同时，将数字化节能改造的达标情况纳入“绿色工厂”与“绿色园区”认定硬性指标，未达标企业不得享受差别化电价优惠。

第三，实施“数字绿色复合型人才强基计划”，并将科教投入纳入地方政府考核硬约束：教育部和人力资源社会保障部联合启动“数字绿色交叉学科建设计划”，增设“数字经济与低碳管理”“环境大数据分析”等专业方向，同时规定上述专业毕业生在当地绿色产业就业满两年的，企业可申领每人每年一定的岗位补贴。同时，将“科学技术支出占一般公共预算支出比重”和“环保数字化培训覆盖率”列为城市年度高质量发展考核的约束性指标，对达标城市在绿色信贷风险补偿、碳减排支持工具额度等方面给予优先倾斜。

基金项目

自治区级广西师范大学大学生创新创业训练计划项目资助：“数智化驱动企业减污降碳协同治理的机制及实验路径研究” (编号：X2025106020094)。

参考文献

- [1] 洪银兴, 任保平. 数字经济与实体经济深度融合的内涵和途径[J]. 中国工业经济, 2023(2): 5-16.
- [2] 刘军, 杨渊璧, 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(6): 81-96.
- [3] 钞小静, 王意萱, 王宸威. 中国数字经济与实体经济融合的再测算——来自融合深度的新发现[J]. 贵州财经大学学报, 2025(2): 12-21.
- [4] 李晓华. 新发展格局下提升产业链供应链韧性与安全的难点与着力点[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2024, 45(5): 67-76, 2.
- [5] 周云柯, 吴建国. 中国碳排放影响因素分析与碳中和路径探寻[J]. 中国国土资源经济, 2025, 38(4): 12-24.
- [6] 胡留所, 胡健, 卢山冰. 数字经济赋能低碳发展的机理分析与实证检验[J]. 济南大学学报(社会科学版), 2023, 33(5): 69-80.
- [7] 郭文强, 于忠萍, 雷明, 等. 我国碳排放驱动因素分解及脱钩努力效应研究[J]. 环境科学研究, 2025, 38(2): 209-219.
- [8] 王奕淇, 黄涵祝. 中国碳排放脱钩效应、时空特征与驱动因素[J]. 生态学报, 2024, 44(6): 2228-2243.
- [9] 杨思莹, 王汉磊, 陈佳馨. 数实融合对城市减污降碳协同增效的影响研究[J]. 财经问题研究, 2025(8): 87-99.
- [10] 王凯, 白书州, 谭佳欣, 等. 中国数实融合发展对减污降碳协同增效的影响[J]. 环境科学研究, 2025, 38(8): 1668-1677.
- [11] 张莉, 聂荣, 张杨. 数字经济对碳排放的影响及空间溢出效应[J]. 统计与决策, 2025, 41(12): 113-117.
- [12] 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.
- [13] 曹增栋, 岳中刚. 数字经济与实体经济融合对碳排放强度的影响: 理论模型与经验证据[J]. 经济问题探索, 2024(12): 1-16.
- [14] 宋锐, 陈胡嵘, 刘赞, 等. 能源企业智慧共享财务管理体系统建机制——基于电网企业 RPA 矩阵机器人业务的探索性案例研究[J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(5): 124-131.
- [15] 赵婷婷. 数字经济对产业绿色低碳转型的影响研究: 基于长江中下游经济带的分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2024.
- [16] 陈秋月, 许诺, 曾小桃, 等. “双碳”目标下江苏省城市群碳排放趋势及差异化碳减排路径[J]. 资源节约与环保, 2026(1): 113-117.
- [17] 公雯雯, 马远. 数实融合对企业持续绿色创新的影响研究——来自中国 A 股上市公司的经验证据[J]. 金融理论与实践, 2025(10): 78-86.
- [18] 徐盈之, 李益, 刘京怡. 数实融合、产业链韧性与制造业低碳转型[J/OL]. 研究与发展管理: 1-17. <https://link.cnki.net/doi/10.13581/j.cnki.rdm.20251224>, 2026-07-27.
- [19] 周炯岚, 黄永春, 邹晨. 创新要素流动能否促进地区数实融合?——基于产业结构转型的视角[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2026, 28(1): 144-162.
- [20] 万光彩, 杜蒙斐. 供应链金融对企业绿色创新的影响及作用机制——基于资源获取和资源配置双重视角[J]. 福建农林大学学报(哲学社会科学版), 2026, 29(2): 45-59.
- [21] 王瑜, 赵宇鸾, 卢泓杏, 等. 北盘江流域碳排放时空格局及碳平衡分区[J]. 环境科学与技术, 2026, 49(6): 237-247.
- [22] 於孝平, 张振龙, 吕连宏, 等. 长三角城市群低碳发展效率测度及时空格局演变[J]. 环境科学研究, 2024, 37(7): 1470-1482.
- [23] 周密, 王雷, 郭佳宏. 新质生产力背景下数实融合的测算与时空比较——基于专利共分类方法的研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2024, 41(7): 5-27.
- [24] 韩峰, 阳立高. 生产性服务业集聚如何影响制造业结构升级?——一个集聚经济与熊彼特内生增长理论的综合框架[J]. 管理世界, 2020, 36(2): 72-94, 219.
- [25] 马睿, 肖振红, 赫博文. 生产性服务业集聚对减污降碳协同治理的影响研究[J]. 管理学报, 2026, 23(6): 1099-1107.