

# “双碳”目标引领下城市数实融合的绿色转型效应研究

龚勤林,冷玉婷

(四川大学 经济学院,四川 成都 610065)

**摘要:**在“碳达峰”“碳中和”目标的指引下,推动数字经济与实体经济的深度融合,促进城市绿色低碳转型,是实施制造强国、数字强国以及美丽中国战略的重要议题。利用2011—2022年全国274个地级市面板数据,评估数实融合对城市绿色低碳转型的影响,从多维度检验具体的作用机制。研究发现,数实融合在短期内会增加碳排放,但长期来看,碳排放量在达到峰值后会逐渐下降,而碳排放强度则持续降低,表明数实融合对城市绿色低碳转型具有积极作用。这一结论通过了内生性、替换解释变量、剔除其他政策干扰等一系列稳健性检验。进一步研究发现,数实融合能通过绿色技术创新、降低能源依赖及促进人力资本积累对城市绿色低碳发展产生正面影响,政府干预和市场集聚在其中起调节作用。异质性分析表明,数实融合对中小城市、资源型城市、西部地区城市绿色低碳转型的促进作用更为显著。此外,相较于数字经济和实体经济相对独立的发展,数实融合发展对城市绿色低碳转型的作用更为高效。为此,建议加大对绿色技术创新的支持力度,促进数字人才的流通,以数字技术促进能源结构优化,降低城市能源依赖。推动区域间的数实融合协同发展,加强对中小城市与西部地区的资金、技术与经验支持。积极引导数据要素、数字技术与实体企业的深度交叉,建立健全数实融合促进机制和数据保护机制,推动市场与政府协同发力,共同促进城市绿色低碳转型。

**关键词:**双碳;数实融合;数字经济;低碳转型;绿色发展

**中图分类号:**F015;F062.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-9841(2025)05-0112-12

## 一、引言

数实融合作为一种新经济形态,以数据要素为基础,以数字技术为驱动,高效协调社会生产、交换、分配、消费各个环节<sup>[1]</sup>,成为解放生产力、发展生产力的重要路径。在“双碳”目标的战略指引下,数实融合提供了智能化、绿色化、高端化的方案,加速了新质生产力的形成与培育<sup>[2]</sup>。新质生产力本身就是绿色生产力<sup>[3]</sup>,蕴含着经济绿色发展的必然要求,数实融合也在培育绿色生产力的过程中,驱动城市经济向绿色低碳形态转变。

数字经济与实体经济融合发展是中国经济在新时代发展理念指导下实行的重要战略,是经济质

**作者简介:**龚勤林,四川大学经济学院,教授,博士研究生导师。

**基金项目:**国家社会科学基金项目“成渝地区双城经济圈城乡融合发展研究”(20BJL088),项目负责人:龚勤林;四川省哲学社会科学基金特别委托重大项目“长江黄河上游生态屏障的系统构建及政策支撑体系研究”(SCJJ23WT05)项目负责人:邓玲。

量变革、效率变革、动力变革的基本依托。2011年4月,工业和信息化部等五部委发布《关于加快推进信息化与工业化深度融合的若干意见》<sup>[4]</sup>,指明加强新一代信息技术与工业化的深度融合,促进产业创新发展、绿色发展、智能发展、协调发展。党的二十大报告强调了数字经济与实体经济深度融合的重要性<sup>[5]</sup>。2024年7月,中共中央、国务院发布《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》,提出推进产业数字化、智能化、绿色化的深度融合,突出数字化转型在推动绿色低碳发展中的关键作用<sup>[6]</sup>。系列政策文件说明数实融合是建设现代化产业体系的关键与基础,是顺应历史发展、实现经济全方位升级的必然要求<sup>[7]</sup>。因此,深入分析数字经济与实体经济交叉融合对经济绿色低碳转型的作用机制,对建设和完善现代化产业体系,实现制造强国、数字强国和美丽中国战略,以及推进“碳达峰”“碳中和”目标落实具有重要的现实意义与实践价值。

数字经济和实体经济融合发展的实质是数字技术与实体企业的交互发展和互惠互利<sup>[8]</sup>,两者交融在推动经济绿色低碳发展中展现出强大的协同效应。通过梳理数实融合、绿色低碳发展的相关文献,发现目前的研究主要分为三个方面:一是探讨数实融合的内涵与形成机理<sup>[7]</sup>。研究表明,数实融合不是数字经济在实体部门的简单应用,而是基于新型数字基础设施和大数据要素,具有“破坏性创新”和全产业链特征的融合型新业态<sup>[9]</sup>,是市场需求、科技创新、数字基础设施、人力资本、市场环境和政府行为六个维度共同作用的结果<sup>[10]</sup>。从生产力与生产关系的维度来看,数字经济与实体经济的不断融合,是以新一代信息技术和数据要素为生产资料,以算法和算力为生产力,在新的应用场景和产业生态中重塑生产关系<sup>[1]</sup>。关于数实融合的实现机理,学界普遍认为包括产业数字化、数字产业化、供应链产业链升级、平台经济和数字贸易规则等<sup>[11-12]</sup>,强调对传统产业结构和传统生产模式进行数字化、智能化改造升级<sup>[2]</sup>。二是对数实融合程度进行评估。构建了包含融合基础、融合结构、融合规模、融合效率等方面的综合评价指标体系<sup>[13]</sup>。结果表明我国数实融合仍然处于低融合阶段<sup>[14]</sup>,且区域差异明显<sup>[10,15]</sup>。三是对城市绿色低碳转型驱动因素及影响机制展开了深入研究<sup>[16]</sup>。部分研究从外生事件出发,如低碳试点政策<sup>[17]</sup>、碳达峰目标<sup>[18]</sup>等,还有一部分研究从数字金融<sup>[19]</sup>、绿色技术创新<sup>[20]</sup>、企业数字化转型<sup>[21]</sup>等细分角度论证其对区域绿色低碳转型的影响。

综上,现有研究对数实融合的分析多聚焦于概念阐释、形成机理分析与水平测度,关于数实融合对经济绿色低碳转型的作用及其机理探讨较少,且多基于省级数据展开,无法精确呈现城市数实融合程度与区域差异,也不能深刻反映数实融合与经济绿色低碳转型的关系。因此,本文基于2011—2022年全国274个城市数据,探讨了“双碳”目标背景下城市数实融合发展对经济绿色低碳转型的作用机理,并考虑绿色技术创新、能源依赖和人力资本积累的作用机制,进一步考察城市区位、城市资源禀赋、城市规模等异质性影响,以及政府干预和市场集聚的调节效应。此外,还对比数实融合与数字经济、实体经济单独作用于经济绿色低碳转型的结果,揭示数实融合于经济绿色低碳转型的独特作用与重要价值。

本文的边际贡献在于提供了数实融合与经济绿色低碳转型关系的新见解和实证分析。首先,通过将分析维度细化至城市层面,更精确地揭示数实融合与经济绿色低碳转型之间的关系。其次,构建熵权—修正耦合度模型来测度城市数实融合水平,提高测度的科学性和准确性,并从技术、能源及人力资本多维度考察数实融合对经济绿色低碳转型的作用机制。综上,本文增进了对数实融合推动经济绿色低碳转型机制的理解,为城市在规划和实施绿色发展战略时提供了科学依据,有助于推动数字技术在绿色低碳领域的创新应用,提升城市综合竞争力。

## 二、理论分析与研究假设

### (一)数实融合影响城市绿色低碳发展的理论机理

数字经济凭借其高效性、创新性和广泛渗透性,为实体经济发展以及城市绿色转型提供了新动力。企业可以利用大数据、云计算、人工智能、物联网等尖端技术,实现对生产、流通、分配、消费环节

的精准管理与控制,优化资源配置,提高产品与服务质量,提升生产与管理效率,降低能耗和污染物排放,从而促进城市生产方式、生活方式和治理方式的绿色化与低碳化。

数据、算力及算法与实体经济生产活动的深度渗透融合形成数字生产力,以数据为基础的信息网络则构建起数字生产关系<sup>[22]</sup>,两者结合形成智能化、高效化的生产方式,推动传统产业向低碳化、集成化、智能化和绿色化转型<sup>[23]</sup>。在这一过程中,还催生了新能源、新材料等新兴产业。数实融合带来的生产方式的变革,为城市绿色低碳转型提供了新的经济增长点。在流通环节,数实融合推动了供应链的数字化和智能化,企业可以实现对供应链的全链监控与追溯,优化库存管理与物流配送,极大提高了物流效率,减少了运输过程中的污染物排放。数实融合带来的这种流通方式的优化,为城市绿色低碳转型提供了有力的支持。在分配环节,数实融合有助于资源的优化配置和收入的公平分配。一方面,数字技术应用帮助企业准确地了解市场需求和资源供给情况,实现供需精准匹配;另一方面,平台经济、共享经济等新兴业态的发展,为企业提供了更加智能、灵活和公平的分配方式,减少了资源的过度消耗。数实融合促进了分配方式的改进,为城市绿色低碳转型提供了内在的动力。在消费环节,数实融合推动了消费模式的创新和消费体验的升级,引导消费者形成绿色低碳的消费理念与消费偏好<sup>[24]</sup>,助力绿色低碳生活方式的普及<sup>[25]</sup>。数实融合发展所催生的绿色消费需求又反作用于企业绿色创新和技术变革,为城市绿色低碳转型提供了更广阔的市场需求。

综上,本文提出如下假设:

H1:数字经济与实体经济的深度融合能推动城市绿色低碳化发展。

## (二)数实融合促进城市绿色低碳转型的作用机制

### 1. 绿色技术创新机制

数实融合发展可以发挥信息效应、要素融合效应及技术整合优势,扩大企业研发投入,从而增强企业的绿色创新能力<sup>[14]</sup>,重塑行业绿色生产力。首先,数字技术可以有效改造传统工业企业,激发企业绿色技术创新“增量提质”,增强技术和设备的先进性与环保性,推动高污染、高排放、高耗能企业向低碳化、无碳化转型,加速城市低碳转型进程<sup>[20]</sup>。数实融合可以催生绿色生产模式以及绿色新兴产业,淘汰高成本、高消耗的产业、产品、生产工艺和生产设备,优化城市生产结构。其次,数实融合强化了跨企业、跨部门、跨行业之间以及企业和消费者之间的联系,增强了企业内不同部门之间的绿色创新协同效率。此外,数实融合能降低技术市场交易成本,增强交易活跃度<sup>[14]</sup>。数实融合有效发挥了数字平台经济模式的优势,增强了技术交易市场的竞争力,促进绿色创新生产要素的合理流动,减少技术市场扭曲导致的资源错配,为城市绿色低碳转型提供支持。从知识溢出角度来看,数字经济与实体经济的深度融合会使绿色技术创新理念与成果以更快的速度、更多元的方式传播至行业内其他企业,降低技术和金融准入门槛,提高城市绿色发展竞争力<sup>[26]</sup>。

基于此,本文提出如下研究假设:

H2:数字经济与实体经济融合可以通过提高绿色技术创新水平促进城市绿色低碳转型。

### 2. 城市能源依赖机制

数实融合通过推动生产方式的智能化、绿色化改造,重塑能源生产与消费结构,提升资源利用效率,推动城市绿色低碳化发展。一方面,数实融合不仅仅是对企业创新流程、组织结构和生产模式的简单迭代,而是全产业链的智能化和数字化协同跃升。基于数据挖掘、传感采集、跨工序集控等技术<sup>[27]</sup>,数实融合能提高能源生产、转换、运输和利用等环节的检测、控制与优化能力,改善要素投入结构,降低供应端、生产端和消费端对传统能源的依赖,实现对污染物排放的精细化防控。这些技术的应用提高了非石油能源消费比例,加速了清洁能源和可再生能源的普及,从而改变了能源生产结构。数实融合发展还推动了能源互联网的建设和发展,实现了智能调度,减少了能源错配和损失,提高了能源开发与利用效能。另一方面,数实融合重塑了全供应链管理体系,以大数据和区块链技术助力企业准确地预测市场需求,实现了能源消费的动态管理,确保了碳交易的透明与安全,有利于城市能源

消费结构的不断优化<sup>[28]</sup>。因此,本文提出如下研究假说:

H3:数字经济与实体经济的深度融合能减少城市对能源的依赖度,推动城市绿色低碳发展。

### 3. 人力资本积累机制

高素质的人力资本是城市吸收、转化新技术和新知识的重要载体<sup>[29]</sup>,对催生与转化绿色技术和服 务至关重要,是促进城市绿色低碳发展的关键因素。首先,数实融合能有效推动高技能人才储备。技术变革必然导致现有知识和技能贬值,企业将加大新产品和新服务的研发投入,而技能型劳动者对先进技术具有更强的适应性,因此企业对高技能劳动者的需求也在不断增加,从而推动人力资本结构升级<sup>[30]</sup>,实现“人岗匹配”,进而为城市整体绿色低碳转型储备长期的人力资源。其次,人力资本对碳排放的减少会产生显著的抑制效应<sup>[31]</sup>。数实深度融合使得人才流动和信息交流更加便捷,吸引更多科技人才涌入传统工业以及各类新兴领域,为绿色技术创新奠定要素基础,为城市绿色低碳转型注入新的活力。

因此,本文提出以下研究假设:

H4:数字经济与实体经济的深度融合能通过人力资本积累推动城市绿色低碳转型发展。

## 三、研究设计

### (一)模型构建

#### 1. 数字经济与实体经济耦合度模型

数字经济与实体经济的融合被视为两个系统的协调发展与交织互促,在此借鉴史丹等<sup>[14]</sup>的做法,构建实体经济与数字经济融合程度评价指标体系。运用熵权—修正耦合度模型进行测算,反映数字经济与实体经济子系统之间的耦合程度。一般的耦合度模型如下:

$$C_{ds}^t = \frac{2 \sqrt{u_d^t \times u_s^t}}{(u_d^t + u_s^t)} \quad (1)$$

其中, $C_{ds}^t$ 表示第 $t$ 期数字经济和实体经济的融合水平, $u_d^t$ 表示数字经济第 $t$ 期的发展水平, $u_s^t$ 表示实体经济第 $t$ 期的发展水平。为了防止出现因个别城市耦合度较低带来的测度结果上的偏误,在式(1)的基础上,构建如下数字经济和实体经济的修正耦合度模型:

$$D_{ds}^t = \sqrt{C_{ds}^t \times T_{ds}^t}, T_{ds}^t = \alpha u_d^t + \beta u_s^t \quad (2)$$

在式(2)中, $D_{ds}^t$ 表示 $t$ 年数字经济和实体经济的融合度; $T_{ds}^t$ 表示数字经济和实体经济在 $t$ 年的综合发展水平; $\alpha$ 和 $\beta$ 分别表示数字经济和实体经济的权重, $\alpha + \beta = 1$ 。测度得到的数字经济和实体经济融合值 $D$ 分布在0至1之间,数值越大,表示数字经济和实体经济的融合水平越高。

#### 2. 双向固定效应模型

$$Y_{it} = a_0 + \beta_1 IDR_{it} + \lambda_1 Control_{it} + \delta_i + \varphi_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

在(3)式中, $Y_{it}$ 为本文的被解释变量——城市绿色低碳发展水平; $i$ 与 $t$ 分别代表城市与年份; $IDR_{it}$ 为核心解释变量数字经济与实体经济融合程度; $Control$ 为一系列控制变量; $\beta_1$ 与 $\lambda_1$ 为待估计系数,其中 $\beta_1$ 为关键估计系数,用来衡量数实融合对城市绿色低碳发展的净效应。 $\delta_i$ 、 $\varphi_t$ 与 $\varepsilon_{it}$ 分别表示时间固定效应、个体固定效应与随机扰动项。

### (二)变量定义与说明

#### 1. 被解释变量:城市绿色低碳发展水平

参考已有研究,采用碳排放量( $\ln CO_2$ )和碳强度( $\ln CI$ )作为城市绿色低碳发展水平的测量指标<sup>[32]</sup>,二者均取对数以减少数据偏态分布。其中地级市碳排放数据通过汇总电能、煤气和液化石油气、交通运输和热能消耗产生的碳排放量计算<sup>[33]</sup>。

2. 解释变量:数实融合水平(*IDR*)

结合城市层面相关数据可获得性,从数字基础设施、数字创新要素、数字经济需求、数字融合应用四个方面综合构建数字经济子系统<sup>[34]</sup>。城市实体经济包括农业、建筑业、制造业和除制造业以外的其他工业<sup>[35]</sup>,本文从实体经济规模、实体经济基础、实体企业劳动力以及实体企业数量四个方面来测算实体经济综合发展水平。通过熵权法构建数字经济指数及实体经济综合指数,采用耦合度模型进行测度,最终得到本文的解释变量——数字经济与实体经济融合水平。

3. 机制变量

本文分别以绿色专利申请总量、能源消耗总量、每万人在校大学生数作为衡量绿色技术创新(*gti*)、城市能源消耗(*ecs*)以及人力资本积累(*hca*)机制变量。以WIPO公布的国际通行标准识别国家知识产权库数据,最终获得绿色专利申请总量数据,以反映城市绿色技术创新水平;能源消耗总量统计了原煤、原油等一次能源以及焦炭、煤气等二次能源,能够反映城市能源依赖程度;大学生是重要的人力资本储备,因此以每万人在校大学生人数衡量。以上机制变量均取对数处理。

4. 控制变量

本文选择了多个影响城市低碳转型的因素作为控制变量,包括经济基础(*eco*)、对外开放水平(*ope*)、产业结构特征(*ind*)以及城市绿化水平(*gre*)<sup>[32,36]</sup>。经济基础可反映各城市的经济发展水平;对外开放程度可体现不同城市的外资环境;第三产业占比提升,通常与较低的二氧化碳排放呈正相关;城市绿化水平作为城市生态系统的重要组成部分,对城市碳排放具有显著的吸收中和作用。控制变量均取对数,变量及指标相关说明如表1所示。

表1 变量及指标说明

变量类型	变量名称	符号	指标	变量/指标说明
被解释变量	城市绿色低碳发展水平	<i>Y<sub>it</sub></i>	碳排放量	碳排放总量(万吨)
			碳排放强度	CO <sub>2</sub> 排放总量/GDP(吨/万元)
解释变量	数实融合水平	<i>IDR</i>	数字基础设施	每百人互联网用户数(户) 每百人移动电话用户数(户)
			数字创新要素	计算机服务和软件从业人员占城镇单位从业人员占比(%)
			数字经济需求	人均电信业务总量(元)
			数字金融应用	中国数字普惠金融指数
			实体经济规模	工业增加值占GDP比重(%)
			实体经济基础	规模以上工业企业利润占GDP比重(%)
			实体企业劳动力	实体企业从业数(万人)
			实体企业数量	规上工业企业个数(个)
机制变量	绿色技术创新	<i>gti</i>	绿色专利数量	绿色专利申请总量(件)
	城市能源依赖	<i>ecs</i>	城市能源消耗	能源消耗总量(吨)
	人力资本积累	<i>hca</i>	在校大学生数	每万人在校大学生数(人)
控制变量	经济基础	<i>eco</i>	人均生产总值	人均地区生产总值(万元/人)
	对外开放水平	<i>ope</i>	外资利用率	实际使用外资占GDP比重(%)
	产业结构特征	<i>ind</i>	产业结构高级化	第三产业产值/第二产业产值(%)
	城市绿化水平	<i>gre</i>	城市绿化覆盖率	建成区绿化覆盖率(%)

(三)数据来源

本文的时间跨度为2011—2022年,研究对象为中国274个地级市<sup>①</sup>。经济数据源于历年《中国城市统计年鉴》,数字金融指标来源于北京大学数字普惠金融指数,绿色专利数据检索自中国创新专利研究数据库。为减少异常值的干扰,本文对控制变量进行了1%的上下缩尾处理。运用移动平均

① 删除西藏自治区、巢湖市、三沙市、儋州市、海东市等缺失值较多或撤市的城市样本。

法和类推法对缺失值进行插补。描述性统计结果如表 2 所示。

表 2 描述性统计结果

	均值	标准差	最小值	最大值	观测值
碳排放量( $\ln CO_2$ )	8.080	0.544	6.314	11.643	3 288
碳强度( $\ln CI$ )	3.449	3.325	0.064	28.852	3 288
数实融合水平( $IDR$ )	0.248	0.079	0.000	0.675	3 288
经济基础( $eco$ )	5.691	3.403	0.000	25.691	3 288
对外开放水平( $ope$ )	0.026	0.050	0.000	0.899	3 288
产业结构特征( $ind$ )	0.409	0.613	0.000	9.503	3 288
城市绿化水平( $gre$ )	3.675	0.303	0.022	4.541	3 288
绿色技术创新( $gti$ )	5.049	1.683	0.000	10.301	3 288
城市能源依赖( $ecs$ )	14.015	1.170	9.837	17.545	3 288
人力资本积累( $hca$ )	4.766	0.942	0.477	7.072	3 288

## 四、实证结果分析

### (一) 基准回归结果

数字经济与实体经济融合对城市绿色低碳发展的直接影响情况如表 3 所示。第(1)和第(4)列未加入控制变量,第(2)(3)和第(5)列加入了控制变量,从估计系数来看,数实融合程度每上升一个单位,城市碳排放量则上升 0.176 个单位,城市碳排放强度则下降 3.091 个单位,结果均在 1%的水平上显著。这表明,数实融合发展对城市碳排放总量表现为“加速器”作用,对城市碳排放强度则为“减速带”作用,数实融合能促进经济绿色低碳转型,假设 H1 得以验证。为了探讨数实融合对城市长期碳排放的影响,在基准模型中引入解释变量的平方项,结果如表 3 第(3)列所示,数实融合与城市碳排放量呈倒 U 形关系,表明随着数字经济与实体经济的融合程度加深,碳排放量先增加,到达峰值后开始下降。这一特征可归因于数实融合对城市碳排放产生了抑制与增长双重效应。一方面,数实融合优化了城市能源利用效率和产业结构,有效抑制了碳排放强度。另一方面,数实融合发展必然导致信息等基础设施建设持续扩张和数字产品的快速迭代,引发能源需求增加<sup>[37]</sup>,部分抵消了因效率提高而节约的能源,导致短期内碳排放量不降反升。

表 3 数实融合影响城市绿色低碳发展的基准回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	$\ln CO_2$	$\ln CO_2$	$\ln CO_2$	$\ln CI$	$\ln CI$
$IDR$	0.198*** (0.066)	0.176*** (0.061)	0.581** (0.398)	-3.889*** (0.358)	-3.091*** (0.473)
$IDR \times IDR$			-1.238** (0.582)		
$Cons$	8.031*** (0.017)	7.991*** (0.017)	7.974*** (0.065)	4.415*** (0.090)	4.438*** (0.130)
控制变量	否	是	是	否	是
年份固定效应	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是
$N$	3 288	3 288	3 288	3 288	3 288
$R^2$	0.931	0.970	0.945	0.955	0.969

注:\*\*\*、\*\*和\*分别表示在 1%、5%和 10%的统计水平上显著,括号内数值为稳健标准误,下同。

### (二) 稳健性检验

1. 工具变量法。选取周边城市的数实融合水平均值( $M\_IDR$ )作为工具变量。数字经济具有显著的溢出效应,邻近城市的数实融合程度能一定程度上反映本地数实融合情况;其次,不同地区数字经济与实体经济的发展基础、政策支持等方面存在较大差异,城市减碳减排效益也不同,邻近城市的数实融合发展不会直接影响本城市的绿色低碳转型效果。检验结果显示  $CDW-F$  值和  $KPW-F$  值分别为 90.713、34.461,后者在 1%统计水平显著,拒绝弱工具变量的原假设,说明该工具变量合理可靠。二阶段回归结果如表 4 第(1)(2)列所示, $IDR$  系数仍在 1%水平上显著,基准回归结果稳健。

2. 剔除直辖市和计划单列市。直辖市和计划单列市具有某些政策和经济上的优势,可能会对回归结果产生干扰。为此,本文剔除直辖市和计划单列市后进行回归,估计结果如表4第(3)(4)列所示,基准检验结论稳健。

3. 替换解释变量。考虑到数字经济与实体经济耦合度衡量存在的偏差,本文将原始的指标评价法从熵权法转变为熵权 TOPSIS 法进行检验,结果如表4第(5)(6)列所示,核心解释变量的估计系数方向与显著性与表1结果一致,基准回归结果稳健。

4. 替换回归模型。为避免估计标准误对回归结果产生影响,本文将模型的稳健标准误替换为聚类标准误再次进行了回归检验,表4第(7)(8)列显示数实融合对城市碳排放量的“加速器”作用以及对碳排放强度的“减速带”作用稳定。

5. 排除其他政策干扰。为了排除如低碳试点政策可能带来的影响,设置了试点城市政策和政策实施时间虚拟变量的交互项。表4第(9)(10)列显示,系数与基准回归结果保持一致,说明数实融合在试点政策的影响下,对城市绿色低碳发展的促进作用依然稳健。

表4 内生性与稳健性检验

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>
<i>IDR</i>	7.716*** (0.822)	-8.466*** (2.846)	0.177*** (0.062)	-3.140*** (0.474)			0.176*** (0.059)	-3.091*** (0.840)	0.179*** (0.060)	-5.286*** (1.300)
<i>IDR<sub>1</sub></i>					0.154** (0.064)	-2.323*** (0.496)				
<i>Cons</i>	20.021* (11.493)	226.430*** (48.424)	7.992*** (0.017)	4.422*** (0.127)	7.997*** (0.018)	4.232*** (0.140)	7.891*** (0.017)	5.188*** (0.256)	7.998*** (0.018)	4.962*** (0.415)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
<i>N</i>	3 288	3 288	3 288	3 288	3 288	3 288	3 288	3 288	3 288	3 288
<i>R<sup>2</sup></i>	0.995	0.640	0.970	0.959	0.970	0.959	0.406	0.316	0.970	0.248

### (三) 异质性分析

#### 1. 区域异质性

由于中国各地区数字经济和实体经济发展阶段和融合程度存在差异,对经济绿色低碳转型的影响呈现明显的地域特征,本文将全国274个城市划分为四大板块进行分组回归,具体结果见表5。数实融合对西部地区城市绿色低碳转型的促进作用最显著,这与西部地区近年来新技术、新产业、新模式的快速发展有关。在东部地区,数实融合发展显著抑制碳强度,这与东部城市产业结构偏向服务化、智能化、绿色化有关。数实融合对中部地区的碳排放及碳强度的影响均不显著,这可能与中部地区数字经济与实体经济发展差异较大、融合程度不高,传统制造业占比较大有关。在东北地区,数实融合对城市碳排放的放大效应显著,这与新兴技术流入引致的经济发展高需求相关,也反映出东北地区在绿色低碳转型过程中,亟须加强企业数字技术、数据要素的合理应用,提升数实融合的质量和效益。

表5 区域异质性

	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)		(6)		(7)		(8)	
	东部				中部				西部				东北			
	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>
<i>IDR</i>	0.028 (0.120)	-0.951** (0.421)	0.077 (0.105)	0.030 (0.556)	0.302** (0.138)	-4.565*** (1.188)	0.220* (0.130)	-1.329 (1.418)								
<i>Cons</i>	8.298*** (0.038)	2.584*** (0.131)	7.919*** (0.027)	2.903*** (0.144)	7.726*** (0.037)	6.167*** (0.319)	8.016*** (0.035)	5.254*** (0.382)								
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
<i>N</i>	1 020	1 020	948	924	924	924	396	396								
<i>R<sup>2</sup></i>	0.973	0.975	0.921	0.954	0.968	0.956	0.958	0.966								

### 2. 资源禀赋异质性

资源禀赋差异形成了城市不同能耗结构和产业发展模式,对城市低碳转型产生差异化的影响。依据《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》的标准,将样本划分为资源型和非资源型城市。表6显示,在资源型城市中,数实融合的经济绿色低碳转型效益优于非资源型城市。非资源型城市的资源依赖程度较低,通常拥有更坚实的产业基础与更好的绿色发展条件,已经形成了相对成熟的产业结构和能源利用体系,数实融合降低碳强度的空间相对较小。

表6 城市资源禀赋异质性

	(1)	(2)	(3)	(4)
	资源型城市		非资源型城市	
	$\ln CO_2$	$\ln CI$	$\ln CO_2$	$\ln CI$
<i>IDR</i>	0.171 <sup>*</sup> (0.097)	-4.150 <sup>***</sup> (0.838)	0.179 <sup>**</sup> (0.082)	-1.790 <sup>***</sup> (0.550)
<i>Cons</i>	7.886 <sup>***</sup> (0.025)	5.418 <sup>***</sup> (0.216)	8.061 <sup>***</sup> (0.024)	3.513 <sup>***</sup> (0.159)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
<i>N</i>	1 320	1 320	1 968	1 968
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.951	0.959	0.976	0.957

### 3. 城市规模类型

数实融合对城市绿色低碳发展的影响因城市规模而异。本文分别对大城市和中小城市进行了比较分析,结果列于表7。研究发现,数实融合对中小城市碳强度的抑制作用更为显著。可能的原因如下:大城市各类企业较早开始转型升级,绿色生产模式推广应用范围较广,绿色发展已经取得一定成效,因此数实融合的碳强度控制效果有限。而中小城市产业结构相对简单,经济活动较为单一,且数实融合涉及的产业范围相对较小,为快速推动绿色技术和绿色生产模式的应用提供了便利。

表7 城市规模异质性

	(1)	(2)	(3)	(4)
	大城市		中小城市	
	$\ln CO_2$	$\ln CI$	$\ln CO_2$	$\ln CI$
<i>IDR</i>	0.046 (0.223)	-0.526 <sup>*</sup> (0.272)	0.210 <sup>***</sup> (0.073)	-3.618 <sup>***</sup> (0.608)
<i>Cons</i>	8.363 <sup>***</sup> (0.072)	1.910 <sup>***</sup> (0.087)	7.917 <sup>***</sup> (0.019)	5.154 <sup>***</sup> (0.159)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
<i>N</i>	1 620	1 620	1 668	1 668
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.960	0.970	0.947	0.956

## 五、机制检验与拓展分析

### (一) 机制检验

基于前述分析,数实融合的经济绿色低碳转型效应可以通过推动绿色技术革新、减少城市能源依赖以及优化人力资本积累方面来体现。鉴于中介效应模型难以处理内生性问题,江艇<sup>[38]</sup>建议选择与被解释变量有明显关联的中介变量,直接分析其与解释变量的因果效应。因此,本文构建如下机制检验模型:

$$M_{it} = b_0 + \beta_2 IDR_{it} + \lambda_2 Control_{it} + \delta_i + \varphi_t + \epsilon_{it} \quad (4)$$

上式中,  $M_{it}$  为机制变量,  $b_0$  为截距项,  $\beta_2$  与  $\lambda_2$  均为待估系数, 其余含义与式(3)相同。

机制检验结果如表 8 所示, 其中第(1)列为绿色技术创新机制, 第(2)列为城市能源依赖机制, 第(3)列为人力资本积累机制。结果显示数实融合程度每提升一个单位, 城市绿色技术创新水平上升 0.687 个单位, 能源消耗短期内上升 0.431 个单位, 人力资本积累水平上升 0.391 个单位。究其原因, 绿色技术创新具有双重外部性特征, 一方面在短期内会持续推动城市碳排放量的增加, 一方面又不断抑制城市碳强度的上升, 假设 H2 得到验证。城市能源依赖机制结果表明, 虽然在短期内, 数实融合不能快速降低城市能源依赖, 碳排放量继续增长, 但数实融合发展所带来的绿色发展模式有效抑制了城市碳强度的持续上升, 假设 H3 得到验证。人力资本积累作为长期资源, 当数字经济与实体经济不断交叉融合时, 可以有效促进劳动力的流动与高技能人才的储备, 进而作用于城市绿色低碳转型, 假设 H4 得到验证。

表 8 机制检验

	(1)	(2)	(3)
	<i>gti</i>	<i>ecs</i>	<i>hca</i>
<i>IDR</i>	0.687*** (0.264)	0.431* (0.261)	0.391*** (0.137)
<i>Cons</i>	4.635*** (0.073)	13.730*** (0.072)	10.476*** (0.038)
控制变量	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
<i>N</i>	3 288	3 288	3 288
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.954	0.893	0.978

## (二) 调节作用

### 1. 政府干预(*gov*)

由于不同城市在经济、文化、社会等维度的显著差异, 单纯依靠市场机制可能出现资源分配不均、城乡差距扩大和能源浪费等“市场失灵”现象, 因此, 需要政府这只“有形的手”进行宏观设计与监管<sup>[23]</sup>。本文引入政府干预和核心解释变量的交互项(*gov*), 以检验政府干预在数实融合影响经济绿色低碳发展过程中的调节作用。表 9 列(1)(2)的结果显示, 政府干预能够有效降低城市碳排放量和碳强度, 且在 1% 水平上显著。政府干预在推动数实融合以及城市绿色低碳发展过程中发挥了重要作用, 对碳排放的长期约束效应得到充分体现。地方政府通过加大对市场主体绿色创新的支持力度, 如实施针对性的税收优惠和精准发放研发资助等措施, 缓解创新主体资金、信息和技术等方面的约束, 激发企业绿色创新动力<sup>[39-40]</sup>, 推动城市经济绿色低碳转型。

### 2. 规模集聚(*mas*)

推动数实融合与城市绿色低碳发展的过程中, 市场规模的扩大既带来了节能减排的机遇, 也伴随着碳排放量增加的挑战。本文在基准回归模型中引入市场规模与数实融合的交互项(*mas*), 回归结果如表 9 第(3)(4)列所示, 市场机制在短期内会降低数实融合对城市碳排放量和碳强度的抑制效应。这可能是源于激烈的市场竞争, 企业对数字技术和绿色技术持谨慎态度, 犹豫期较长, 且对传统技术存在路径依赖, 短时间内无法有效降低城市碳排放。再者, 市场规模的扩大意味着经济活动的增加, 虽然部分行业通过数字化手段实现了节能减排, 但其他行业的增长带来的碳排放量的增加, 使得数实融合所带来的节能减排效益被新增的经济活动抵消。

表 9 调节效应分析

	(1)	(2)	(3)	(4)
	政府干预		市场集聚	
	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>
<i>IDR</i>	0.192** (0.076)	-1.397*** (0.372)	-0.406** (0.192)	-4.840*** (1.073)
<i>gov</i>	-0.002 (0.000)	-0.011*** (0.001)		
<i>mas</i>			0.072*** (0.026)	0.242* (0.146)
<i>Cons</i>	7.969*** (0.042)	7.108*** (0.208)	8.005*** (0.038)	7.574*** (0.213)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
<i>N</i>	3 288	3 288	3 288	3 288
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.926	0.955	0.940	0.953

(三)比较分析

为了进一步验证数实融合发展对城市绿色低碳转型的特殊作用,本文分别将数实融合、数字经济、实体经济对城市绿色低碳转型的作用进行了对比分析,结果如表 10 所示。相较于数实融合,数字经济、实体经济单独发展的减碳控碳效果有限。这可能与数字技术的规模效应尚未充分显现,以及数字技术、绿色技术渗透不足有关。因此,在推动经济绿色低碳转型的过程中,相较于注重数字经济的单一增长,数实融合发展能挖掘出数字技术在城市资源配置、生产效率以及生态保护等方面的潜力,促进经济绿色低碳转型。

表 10 数实融合、数字经济、实体经济对城市绿色低碳转型的作用

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	数实融合		数字经济		实体经济	
	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>	<i>lnCO<sub>2</sub></i>	<i>lnCI</i>
<i>IDR/DI/RE</i>	0.176*** (0.061)	-3.091*** (0.473)	0.163* (0.111)	0.012 (0.861)	0.085* (0.046)	-2.983*** (0.351)
<i>Cons</i>	7.991*** (0.017)	4.438*** (0.130)	8.014*** (0.018)	3.581*** (0.130)	8.038*** (0.002)	3.650*** (0.162)
控制变量	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是
<i>N</i>	3 288	3 288	3 288	3 288	3 288	3 288
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.970	0.969	0.970	0.958	0.974	0.960

六、结论与启示

本文基于 2011—2022 年全国 274 个地级市数据,测度了城市数字经济与实体经济融合水平,实证研究了“双碳”目标引领下数实融合对经济绿色低碳转型的内在作用机制,并进行了系列稳健性检验与异质性讨论。研究发现:数实融合通过促进绿色技术创新、降低能源依赖以及增强人力资本积累,协调城市经济扩张、资源环境保护及生态环境治理,对经济绿色低碳转型产生积极影响。异质性分析显示,数实融合在推动西部地区经济绿色低碳转型方面效果更为显著,而在中部和东部地区效果较弱;在资源型城市中,数实融合的绿色低碳转型推动作用更为显著;中小城市在数实融合的过程中会经历一个短期的能源消耗和碳排放增加阶段,但数实融合对碳排放强度的抑制效应较为显著。此

外,政府干预和市场集聚在数实融合影响经济绿色低碳转型的过程中分别发挥了正向和负向调节作用。相较于数字经济、实体经济单独发展,数实融合在推动城市绿色低碳转型方面展现出显著优势。

根据本文的研究结论,为了推动城市绿色低碳转型,实现“碳达峰”“碳中和”战略总目标,本文提出以下政策建议:

(1)增加对绿色科技创新的支持与投资,促进数字技术与数据要素在绿色经济领域的应用。首先,协同不同级别金融机构设立绿色创新转型基金,激励企业在绿色技术研发上合理增资。其次,完善智能化供应链管理,降低单位能耗,提高能源利用效率。再者,加强对城市传统能源生产与消费的追踪,建立负面清单与奖励措施,充分利用大数据、数字技术等实现传统能源消耗及新能源开发的动态监测与智能化引导,促进城市能源结构的转型。

(2)深化区域一体化合作,形成并完善“东西结合、南北共促”的数字资源、绿色要素共享网络。东部地区可将先进的数字技术和低碳管理经验向中西部地区转移,帮助其提高数实融合水平和绿色低碳转型能力;中部地区应进一步加快数字经济与实体经济的融合步伐,提升融合质量,发挥数实融合的减碳降碳效益;西部城市、中小规模城市应加大对新技术、新产业的扶持力度,引导数实融合向绿色低碳方向发展;大城市则应合理规划数实融合与城市发展,注重经济增长与环境保护之间的平衡。

(3)坚持“有为政府+有效市场”的方针,加强监管与引导。优化政府对市场的引导和监管,避免因市场规模扩大导致的无序竞争和资源浪费。鼓励企业通过数字化手段实现产业全链碳排放的核算、监测和管理,推动产业链的绿色低碳转型。此外,进一步完善数字经济与实体经济交叉融合发展的制度环境,引导数据要素市场建设与完善,调控数字经济与实体经济的速度与规模,让数据、绿色技术、新型人才等要素在不同行业与部门之间自由流动。

#### 参考文献:

- [1] 夏杰长. 以新质生产力驱动数实融合[J]. 社会科学家, 2024(2): 38-44.
- [2] 黄先海, 高亚兴. 数实融合加速新质生产力形成的内在逻辑与实践路径[J]. 经济纵横, 2024(10): 46-56.
- [3] 习近平. 发展新质生产力是推动高质量发展的内在要求和重要着力点[J]. 求是, 2024(11): 4-8.
- [4] 中央人民政府网. 《工业和信息化部 科技部 财政部 商务部 国资委关于加快推进信息化与工业化深度融合的若干意见》[EB/OL]. (2011-03-31)[2025-09-29]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2011/content\\_1967421.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2011/content_1967421.htm).
- [5] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[N]. 人民日报, 2022-10-26(1).
- [6] 中共中央国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见[N]. 人民日报, 2024-08-12(1).
- [7] 朱瑞博. 数字经济和实体经济深度融合的核心要义、制度障碍与体制机制创新[J]. 上海经济研究, 2025(1): 5-18.
- [8] 王定祥, 吴炜华, 李伶俐. 数字经济和实体经济融合发展的模式及机制分析[J]. 改革, 2023(7): 90-104.
- [9] 郭晗, 全勤慧. 数字经济与实体经济融合发展: 测度评价与实现路径[J]. 经济纵横, 2022(11): 72-82.
- [10] 张帅, 吴珍玮, 陆朝阳, 等. 中国省域数字经济与实体经济融合的演变特征及驱动因素[J]. 经济地理, 2022(7): 22-32.
- [11] 陈曦. 推动数字经济与实体经济深度融合: 理论探析与实践创新[J]. 人民论坛·学术前沿, 2022(24): 64-76.
- [12] 韩文龙, 晏宇翔, 张瑞生. 推动数字经济与实体经济融合发展研究[J]. 政治经济学评论, 2023(3): 67-88.
- [13] 曾鹏, 覃意哈, 卢玉桂. 中国城市数实融合的区域差异、来源分解及形成机理[J]. 统计与信息论坛, 2024(4): 95-111.
- [14] 史丹, 孙光林. 数字经济和实体经济融合对绿色创新的影响[J]. 改革, 2023(2): 1-13.
- [15] 张晖, 李靖, 权天舒. 数字基础设施建设促进了数字经济与实体经济融合吗? ——基于“宽带中国”战略的准自然实验[J]. 经济问题探索, 2023(10): 1-15.
- [16] 李康, 苏乃芳, 李宏瑾. 绿色低碳转型: 政策路径、影响机制和趋势分析[J]. 金融评论, 2024(5): 13-34.
- [17] 邓世成, 吴玉鸣. 低碳城市试点政策对中国资源型城市绿色转型发展的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2024(6): 65-79.
- [18] 张兵兵, 董安然, 段玉婉. 碳达峰目标如何引领城市低碳转型——来自准自然实验的证据[J]. 数量经济技术经济研究, 2024(7): 177-196.

- [19] 朱悦,张军涛. 数字金融发展对城市经济绿色低碳转型的影响研究[J]. 城市问题,2022(10):64-71.
- [20] 张哲华,钟若愚. 数字经济、绿色技术创新与城市低碳转型[J]. 中国流通经济,2023(5):60-70.
- [21] WANG J L,LIU Y,WANG W L,et al. How Does Digital Transformation Drive Green Total Factor Productivity? Evidence from Chinese Listed Enterprises[J]. Journal of Cleaner Production,2023,406:1-15.
- [22] 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.
- [23] 廖小菲,申雨瑶. 数字经济对中国城市低碳转型的影响机理及效应[J]. 经济地理,2024(6):31-41.
- [24] 李靖,张晖,韩青. 数字经济与实体经济融合对城市经济绿色低碳转型的影响:空间效应与机制检验[J]. 经济体制改革,2025(4):105-114.
- [25] 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.
- [26] SUN G L,FANG J M,LI J N,et al. Research on the Impact of the Integration of Digital Economy and Real Economy on Enterprise Green Innovation[J]. Technological Forecasting and Social Change,2024,200:1-12.
- [27] 张平谈,郝时雨,林琳. 数实融合对碳排放的影响及作用机制研究[J]. 求是学刊,2025(1):88-99.
- [28] 吴传清,邓和顺,夏启炜. 数字技术创新对绿色发展水平的影响研究[J]. 中国软科学,2025(2):66-80.
- [29] 刘晔,徐植钊,马海涛. 中国城市人力资本水平与人口集聚对创新产出的影响[J]. 地理科学,2021(6):923-932.
- [30] 肖土盛,孙瑞琦,袁淳,等. 企业数字化转型、人力资本结构调整与劳动收入份额[J]. 管理世界,2022(12):220-237.
- [31] BANO S,ZHAO Y H,AHMAD A,et al. Identifying the Impacts of Human Capital on Carbon Emissions in Pakistan[J]. Journal of Cleaner Production,2018,183:1082-1092.
- [32] 蒋金荷,丁新兴. 环境政策的“同伴效应”研究:来自低碳城市试点的证据[J]. 中国软科学,2024(4):112-121.
- [33] 吴建新,郭智勇. 基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析[J]. 统计研究,2016(1):54-60.
- [34] 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(10):65-76.
- [35] 黄群慧. 论新时期中国实体经济的发展[J]. 中国工业经济,2017(9):5-24.
- [36] 魏丽莉,侯宇琦. 数字经济对中国城市绿色发展的影响作用研究[J]. 数量经济技术经济研究,2022(8):60-79.
- [37] 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(6):100-111.
- [38] 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.
- [39] BAI Y,SONG S Y,JIAO J L,et al. The Impacts of Government R&D Subsidies on Green Innovation:Evidence from Chinese Energy - Intensive Firms[J]. Journal of Cleaner Production,2019,233:819-829.
- [40] KVĚTOŇ V,HORÁK P. The Effect of Public R&D Subsidies on Firms' Competitiveness:Regional and Sectoral Specifics in Emerging Innovation Systems[J]. Applied Geography,2018,94:119-129.

责任编辑 江娟丽

网 址: <http://xbbjb.swu.edu.cn>