

城市数智化转型的碳减排效应

——基于“宽带中国”和“智慧城市”试点政策的协同效应

海梅红¹, 张自然²

(1.中国社会科学院大学 经济学院, 北京 102488; 2.中国社会科学院 经济研究所, 北京 100836)

摘要: 立足于中国城市数智化转型和绿色低碳发展的新时代背景, 基于2007—2022年277个城市的面板数据, 以“宽带中国”和“智慧城市”双试点政策作为准自然实验, 采用多期双重差分法对城市数智化转型的碳减排效应进行检验。实证分析表明: 相较于非试点城市和单试点城市, “宽带中国”和“智慧城市”双试点城市具有更强的碳减排协同效应, 说明城市数智化转型可以促进绿色低碳发展, 该结论经过多种稳健性检验后仍然成立。其中, 城市数智化转型主要通过优化产业结构、资源合理配置、促进技术创新等途径发挥其碳减排效应。进一步研究发现: 数智化转型的碳减排效应因地理区位、资源禀赋和发展水平等城市特征的不同而不同。此外, 双试点政策的碳减排效应具有逐年增强的趋势, 且该效应并不以牺牲经济增长为代价。

关键词: 数智化转型; 绿色低碳; “宽带中国”; “智慧城市”; 协同效应

中图分类号: F294

文献标识码: A

文章编号: 1009-2013(2025)05-0094-10

Carbon reduction effects of urban digital-intelligent transformation: Evidence from the synergistic implementation of the “Broadband China” and “Smart City” pilot policies

HAI Meihong¹, ZHANG Ziran²

(1.School of Economics, University of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 102488, China;

2. Institute of Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100836, China)

Abstract: Against the backdrop of China’s urban digital-intelligent transformation and the pursuit of green and low-carbon development in the new era, this study employs the panel data from 277 cities spanning 2007 to 2022 to examine the carbon reduction effects of urban digital-intelligent transformation. A Multi-period Difference-in-Differences (DID) approach is adopted by using the dual pilot programs of Broadband China and Smart City as a quasi-natural experiment. The empirical results indicate that compared with non-pilot and single-pilot cities, the dual pilot cities of “Broadband China” and “Smart City” exhibit stronger synergistic effects in carbon reduction. This finding demonstrates that urban digital-intelligent transformation contributes to green and low-carbon development, a conclusion that remains robust across multiple tests. The mechanism analysis further reveals that the carbon reduction effect of digital-intelligent transformation operates primarily through industrial restructuring, more efficient resource allocation, and the promotion of technological innovation. Heterogeneity analysis shows that the magnitude of this effect varies with urban characteristics such as geographic location, resource endowment, and level of development. Moreover, the carbon reduction effects of the dual pilot programs have strengthened over time and are achieved without sacrificing economic growth.

Keywords: digital-intelligent transformation; green and low-carbon; “Broadband China”; “Smart City”; synergistic effects

一、问题的提出

收稿日期: 2025-04-28

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(24AZD074)

作者简介: 海梅红(1997—), 女, 内蒙古通辽人, 博士研究生, 主要研究方向为技术进步与经济增长。

在2030年前实现“碳达峰”、2060年前实现“碳中和”是中国作为敢于担当的负责任大国对全世界

做出的庄重承诺,低碳发展成为“十五五”时期区域协调发展过程中的刚性约束。“双碳”目标的实现是加快生态文明建设和实现高质量发展的重要抓手,对经济结构绿色转型和生产方式绿色变革具有重要意义。随着大数据、人工智能等的不断发展,数字化与智能化融合、升级形成的数智化,是引领新一轮科技革命和产业革命的重要组织形态^[1],城市数智化转型已逐渐成为带动中国经济转型、产业升级以及企业高质量发展的关键部署^[2]。中国政府在促进数智化创新方面实施了一系列积极的政策措施,自2013年实施“宽带中国”战略以来,工信部和国家发改委分三个批次评选出了120个示范城市(城市群),国家信息化水平和数字经济发展日新月异。数字技术与城市治理相结合的智能化城市发展模式成为实现可持续发展的有效途径。与此同时,“智慧城市”概念应运而生。中国于2012年开启了国家“智慧城市”试点工作,促进城市智能化转型,助推可持续发展,以应对城市经济、社会和环境挑战^[3]。城市数智化转型在资源稀缺和高科技创新时期成为城市应对气候变化挑战的重要途径之一,更是“双碳”战略全面展开的有力抓手。城市数智化转型对绿色发展的影响不容小觑,深入考察城市数智化转型和绿色低碳发展之间的关系具有现实意义。

一方面,数字化转型能够提高全要素生产率和能源利用效率^[4],优化产业结构^[5]从而降低碳排放。此外,数字化转型能够减少不必要的经济活动,线上服务可以全部或部分取代线下服务,由此产生的碳排放量也将大幅度减少^[6]。另一方面,人工智能技术本质上是一种技能偏向型技术^[7],广泛应用于人类生产生活,并与行业碳减排技术融合,成为降碳减排的核心技术^[8]。随着人工智能技术的广泛应用,企业需要顺应智能化转型趋势,不断更新先进环保的生产设备,以促进节能减排、实现绿色发展^[9,10]。综上所述,数字与智能技术创新改变了原有的生产方式和经济发展方式,影响着生态治理、监测、预警等经济社会领域^[11,12]。数智化是数字化和智能化的融合、升级,数智融合有利于改善地区之间的资源配置效率,提高科技创新能力和优化能源生产结构,对减污降碳^[13]产生积极影响。

现有文献就数智化转型对碳排放的影响进行

了实证检验,但还未涉及数智化政策的影响^[14],且在政策不确定性下分析两者关系的研究更是匮乏。不少研究着力于探究数字经济的节能减排作用,考察“宽带中国”或“智慧城市”的单政策效果。已有学者考察了双试点政策对城市经济发展差异^[15]、产业结构升级^[16]、产业现代化^[17]的协同效应,但这两项试点改革的搭配组合如何影响城市碳排放水平仍是一个亟待回答的问题。鉴于此,笔者基于2007—2022年中国277个城市数据,首次将“宽带中国”和“智慧城市”试点政策分别作为城市数字化和智能化转型的外生冲击,纳入同一分析框架考察其对城市碳排放的影响,以比较两项试点政策效应的差异,识别两项试点政策的协同效应,为政府部门总结试点改革经验、提升政策成效提供理论依据。

二、理论分析与研究假设

(一) 政策视角下城市数智化转型的碳减排效应

数字化与智能化转型是数智化政策支持的重点。数智化政策将进一步完善信息通信技术基础设施,有效促进经济绿色发展。

一是“宽带中国”试点政策的环境效应。“宽带中国”战略推动了数字基础设施优化升级、均衡布局及广泛应用,促进了技术研发与安全保障能力提升,在构建绿色、低碳的能源体系中发挥着重要作用^[18]。首先,数字基础设施有助于降低能源消耗,提升能源管理及利用效率,为能源消耗的低碳化提供了有力支持^[19]。其次,随着数字基础设施的普及,远程办公、在线教育、智能家居等新业态应运而生,这些变化引导人们向更加环保、低碳的生活方式转变^[20]。二是“智慧城市”试点政策的环境效应。智慧城市会提高城市运行效率进而减少碳排放。在城市交通和建筑等领域,智能化转型通过构建智能交通系统、应用智能建筑技术^[21],有效监控和分析能源消耗模式,识别潜在的能源减排点,在技术层面进行智能化升级^[22]。智慧城市通过激发绿色创新活力、推动产业结构升级、降低能耗来降低城市碳排放强度^[23]。三是“宽带中国”与“智慧城市”的协同环境效应。相比数智化驱动政策单试点地区,双试点城市通常具备更好的碳减排现实基础。首先,“双试点”城市具有更为优越的人才政策,能妥善高效解决绿色领域的人才在户口、住房与经费

等方面的难题,为绿色领域的人才集聚提供重要保障。其次,“双试点”城市通常拥有更为灵活的金融政策和丰富的创新禀赋,政府可通过不断加大绿色科技支出、设立低碳专项基金等方式,用财政“小资金”撬动绿色市场“大资本”,有效引导资金持续流入节能环保领域,不断激发企业降碳意愿与绿色发展潜力。最后,“双试点”城市能充分发挥政策协同效应,持续加速引导绿色创新要素汇聚,并能集中优势资源攻关碳减排的关键核心技术,为产业发展实现高端化、低碳化、绿色化转型发挥“1+1>2”的协同效应。

基于上述分析,提出以下研究假设:

H₁: 相比非双试点城市,数智化转型城市具有更强的碳减排效应。

(二) 影响机制分析

城市数智化转型对碳排放具有显著的抑制作用,主要通过以下三种方式实现:一是优化产业结构,二是资源合理配置,三是促进技术创新。这三种途径相互协同,共同推动城市在数智化转型过程中实现碳排放的有效控制与持续降低,为城市的可持续发展奠定坚实基础。

1. 优化产业结构

从产业结构来看,伴随着“宽带中国”示范城市的建设,数字技术快速发展能有效提高各类生产要素资源的配置效率,不断优化城市产业结构^[24],催生出产业发展的新模式、新业态。而“智慧城市”建设带动了新能源、信息材料等新兴产业发展,这类产业往往具有低能耗、高附加值和高产出的特征,为城市低碳发展提供了绿色支撑。数字化与智能化的结合不仅改变了产业结构和产业链,还使得产业体系展现出强大的竞争力^[18]。一方面,数智化的发展对生产性服务业集聚产生积极影响。生产性服务业难以集聚的一个重要原因是高知识含量和专业化的服务供给需要花费较高的交易费用,而智能化技术的发展和普及能够降低服务贸易的交易成本^[25]。另一方面,生产性服务业集聚能够促进城市群的绿色发展。生产性服务业自身的“绿色”属性使得其对自然资源的消耗较低,其集聚本身所形成的规模效应会对绿色发展产生积极影响^[26]。进一步地,产业结构升级可以淘汰落后产能,降低高能耗、高污染和高排放行业的比重,推动产业向高技

术、高附加值方向转变,推动低碳和清洁行业发展,从而显著减少碳排放^[27]。

2. 资源合理配置

从资源配置来看,“宽带中国”试点政策不仅可以大幅降低信息搜索成本,加速知识、资本等要素的跨区域转移与扩散,优化资源配置效率^[28],还为信息通信技术的发展、应用提供坚实基础,提高各类投入要素的效率,在生产生活中减缓能源消费增长趋势^[29]。“智慧城市”建设促进了新能源、新材料等新兴产业的发展,而新市场的扩展将吸引优质资源向这些新兴产业聚集,提高资源配置效率,进而提升能源利用效率。数智化基础设施有效提高了信息流的传送效率、降低交易成本、提高能源利用效率,并促进能源系统的智能化转型,降低可再生能源的不确定性^[30]。数智化创新政策促进了企业数智技术创新和数智化转型,从而改善企业的劳动力技能结构^[31]、拓展企业信息共享网络、提高企业的资源配置效率^[32]。进一步地,随着共享经济和循环经济的兴起,数字化平台和在线市场的发展使得闲置资源得以精准流通,有效降低了资源消耗,为实现资源型城市的低碳转型提供了强力支持^[33]。如大数据、云端计算和5G等数字技术可纳入能源生产消费的各个流程,有效提升能源转化率,最终实现提质增效,去碳治污^[34]。

3. 促进技术创新

从技术创新来看,“宽带中国”示范城市拥有诸多的财政税收和创新补贴等政策支持,这给企业绿色技术创新发展提供了更多的资金支持,缓解了融资约束问题^[35]。“智慧城市”是数字技术及信息通信技术运用的载体,通过引入先进的科技和数字化解决方案,鼓励创新性企业涌现,推动产业升级^[36],进而促进城市低碳发展,实现城市绿色转型。数字化平台的广泛应用,使供应链各环节之间的信息共享与知识交流更为便捷高效,为企业联合研发、技术创新以及新产品的快速迭代提供了有力支撑^[37,38];在此基础上,数智化转型通过增加可用信息量和降低信息获取成本,加快节能减排,进而促进绿色技术创新^[39]。对于企业来说,数智能化能产生规模经济效应,有利于鼓励企业增加创新投资,激发创新行为^[40]。此外,数字基础设施建设促进了研发成果、前沿信息和其他知识的溢出,打破了时间

和空间的限制,并对跨行业、跨区域的创新要素进行有效整合利用,能够有效促进城市创新水平的提高^[41]。进一步地,城市创新水平的提高可以通过构建更加绿色、低碳的能源消费模式^[42]减少碳源,降低碳排放。

基于上述分析,提出以下假设:

H₂: 城市数智化转型主要通过优化产业结构、资源合理配置、促进技术创新等途径降低碳排放。

三、研究设计

(一) 变量选取与衡量

1. 被解释变量

由于对城市边界的界定标准及所使用的测度方法不同,城市碳排放核算目前仍然无法形成一致、可比的体系。笔者所称的城市,是相对国家、省级区域而言的,更侧重行政意义的范畴,因此参考丛建辉等^[43]的研究,采用范围1、范围2和范围3排放加总进行核算。具体标准如下:范围1排放是指城市辖区内的所有直接排放,主要包括交通和建筑、工业生产、农林业与土地利用变化、废弃物处理活动产生的温室气体排放,再乘以IPCC清单指南提供的排放因子。范围2排放是指发生在城市辖区外的城市间接排放,主要包括为满足城市消费而外购的电力、供热或制冷等二次能源产生的排放。范围3排放指由城市内部活动引起,产生于辖区之外,但不包括范围2排放的其他间接排放,包括城市从辖区外购买的所有物品在生产、运输、使用和废弃物处理环节产生的温室气体排放。笔者采用(范围1排放+范围2排放+范围3排放)的对数来衡量城市碳排放量(LNCE)。

2. 核心解释变量

参考周建平等^[17]的研究,分别采用“宽带中国”和“智慧城市”试点政策表征城市数字化转型(DID_KD)和城市智能化转型(DID_ZH)的外生冲击,如果城市*i*在第*t*年及以后成为“宽带中国”或“智慧城市”双试点城市,那么取值为1,否则为0。同时期成为双试点城市的样本作为处理组,用于衡量城市数智化转型(DID_SZ),对照组为非试点城市和单试点城市,该变量系数能够表示双政策的协同效应是因为“宽带中国”战略是构建数字基础设施的核心起点,在推进智慧城市建设的过

程中,提升宽带网络性能是实现功能完善的关键环节,这两项政策在建设目标上存在高度契合性。

3. 控制变量

在肖泉等^[44]的研究基础上,笔者控制了可能影响城市碳排放的其他经济、社会因素。包括人口规模、城市经济密度、金融发展水平、对外开放程度、市场规模、基础设施水平、环境规制和就业结构。

4. 中介变量

鉴于城市数智化转型可能通过优化产业结构、资源合理配置和促进技术创新进而降低碳排放,故选取产业结构、资源配置和技术创新指标作为中介变量进行机制检验。为了结果的稳健性,采用多种衡量方式来表征中介变量。具体而言,分别采用三产比二产、泰尔指数^①、第三产业占比、产业结构整体升级^②、生产性服务业占比来衡量产业结构;采用全要素生产率和能源消耗来衡量资源配置;采用绿色发明专利申请对数、绿色发明专利授权对数、创新指数和创新效率来衡量技术创新。

(二) 模型设定

1. 基准模型设定

为实证检验H₁,笔者设定如下基准模型:

$$LNCE_{it} = \alpha_1 + \beta_1 DID_SZ_{it} + \sum_{k=1}^8 \theta_k X_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

$$LNCE_{it} = \alpha_2 + \beta_2 DID_KD_{it} + \sum \theta X_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$LNCE_{it} = \alpha_3 + \beta_3 DID_ZH_{it} + \sum \theta X_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中,*i*表示城市,*t*表示年份, α_1 、 α_2 和 α_3 为常数项,被解释变量LNCE_{it}是碳排放量的对数,*X_{it}*为一系列控制变量,包含人口规模、城市经济密度、金融发展水平、对外开放程度、市场规模、基础设施水平、环境规制和就业结构, θ_k 对应上述8个控制变量的系数, μ_i 表示城市固定效应, γ_t 表示时间固定效应, ε_{it} 表示随机误差项。式(1)中,核心解释变量DID_SZ_{it}表示城市数智化转型,如果城市*i*在第*t*年及以后实施了“宽带中国”和“智慧城市”双试点政策,则取值为1,否则为0。 β_1 衡量“宽带中国”和“智慧城市”试点政策的协同效应,即城市数智化转型的碳减排效应。式(2)中,核心解释变量DID_KD_{it}表示“宽带中国”试点政策,如果城市*i*在第*t*年及以后实施了“宽带中国”试点政策,那么取

值为1, 否则为0。 β_2 衡量“宽带中国”试点政策的碳减排效应。式(3)中, 核心解释变量 DID_ZH_{it} 表示“智慧城市”试点政策, 如果城市 i 在第 t 年及以后为“智慧城市”试点城市, 则取值为1, 否则为0。 β_3 衡量“智慧城市”试点政策的碳减排效应。通过上文的理论分析, 预设 β_1 、 β_2 和 β_3 均为负数, 且 β_1 大于 β_2 和 β_3 , 说明城市数智化转型的碳减排作用大于单一“宽带中国”或“智慧城市”试点政策的碳减排作用。基准模型的结果主要关注 β_1 、 β_2 和 β_3 的大小及方向。

2. 机制模型设定

为了验证 H_2 , 设定如下机制检验模型:

$$M_{it} = \alpha + \rho_1 DID_SZ_{it} + \sum \theta X_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it}$$

(4)

式(4)中, M_{it} 为机制变量, 分别选取产业结构、资源配置与技术创新, 其他变量的设定与基准模型一致。根据理论分析推测, ρ_1 为显著的正数, 表明城市数智化转型可以优化产业结构和资源配置, 并可以促进技术创新, 进而达到碳减排的效果。

四、数据来源及计量结果分析

(一) 样本说明与数据来源

笔者选取2007—2022年中国277个地级及以上城市作为研究样本。对部分缺失数据采用线性插值法补充, 并剔除数据缺失严重的样本。考察“宽带中国”政策时, 试点城市103个, 非试点城市174个;

考察“智慧城市”政策时, 试点城市120个, 非试点城市157个; 双试点政策城市59个, 非双试点城市218个。

数据主要来源为各级统计年鉴、相关统计资料等。具体而言, “宽带中国”和“智慧城市”试点城市相关数据来自中华人民共和国工信部。在测算碳排放时, 分品种分部门的能源消费数据来源于《中国能源统计年鉴》以及各级统计年鉴; 工业过程和产品使用数据从《中国工业统计年鉴》以及各级统计年鉴获取; 农业、林业和其他土地利用活动数据从《中国农业统计年鉴》《中国畜牧业年鉴》《中国林业和草原统计年鉴》以及各级统计年鉴获取; 废弃物处理的数据通过《中国环境统计年鉴》以及各级统计年鉴获取; 外购电力、供热和制冷数据源于《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及各级统计年鉴; 排放因子以官方公布的相关数据为准, 具体包括《省级温室气体排放清单指南(试行)》、各级政府发布的碳排放清单指南, 缺省数据通过IPCC排放因子数据库进行补充。创新指数选用《中国城市和产业创新力报告2017》中城市层面的创新指数。以国家知识产权局发布的《中国绿色专利统计报告》和世界知识产权组织推出的《国际专利分类绿色清单》等官方文件, 并使用与绿色技术相关的关键词进一步补充识别, 得到绿色专利相关数据。其他控制变量数据来源于历年的《中国城市统计年鉴》。主要变量描述性统计结果见表1。

表1 主要变量及描述性统计结果

变量名称	变量说明	平均值	标准差	最小值	最大值
碳排放量(LNCE)	碳排放量对数	7.979	0.422	6.316	8.782
城市数智化转型(DID_SZ)	“宽带中国”和“智慧城市”双试点政策城市	0.101	0.422	0.000	1.000
人口规模(POP)	年末总人口对数	5.891	0.696	2.898	8.136
城市经济密度(GDP)	GDP/行政区域土地面积(亿元/km ²)	0.295	0.725	0.001	15.360
金融发展水平(FIN)	年末金融机构存贷款余额/GDP	2.363	1.186	0.560	21.300
对外开放程度(OP)	进出口总额/GDP	0.186	0.319	0.000	3.384
市场规模(CON)	社会消费零售总额对数	15.380	1.132	5.472	19.010
基础设施水平(INF)	人均公路运货量对数	3.201	0.627	1.159	6.240
环境规制(INV)	一般工业固体废物综合利用率(%)	79.290	23.120	1.240	156.600
就业结构(EMP)	第三产业就业人数/总就业人数	0.553	0.141	0.154	0.912

(二) 回归结果分析

笔者依次采用城市数智化转型(DID_SZ)、“宽带中国”试点政策(DID_KD)以及“智慧城市”试点政策(DID_ZH)为解释变量, 采用碳排放对数和

碳排放对数前置一期为被解释变量, 进行双重差分回归, 回归结果见表2。

1. 城市数智化转型对碳排放的影响

表2前三列显示的分别是城市数智化转型、“宽

带中国”试点政策以及“智慧城市”试点政策的碳减排效应。可以看出，城市数智化转型能够显著减少碳排放量，且其碳减排效应均大于“宽带中国”和“智慧城市”试点政策的碳减排效应。考虑到政策效果的滞后性，表2后三列报告了碳排放对数前

置一期作为被解释变量的双重差分估计结果，回归结果仍表明双试点政策的碳减排作用优于单试点政策。至此，H₁得以验证，即相比非双试点城市，数智化转型城市具有更强的碳减排效应^③。

表2 基准回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	碳排放对数			碳排放对数前置一期		
<i>DID_SZ</i>	-0.072*** (0.038)			-0.069** (0.034)		
<i>DID_KD</i>		-0.043** (0.018)			-0.038** (0.019)	
<i>DID_ZH</i>			-0.033** (0.015)			-0.027* (0.016)
<i>POP</i>	-0.031* (0.017)	-0.033* (0.017)	-0.030* (0.017)	-0.024 (0.019)	-0.025 (0.019)	-0.022 (0.018)
<i>GDP</i>	0.023*** (0.005)	0.020*** (0.005)	0.019*** (0.005)	0.025*** (0.006)	0.022*** (0.006)	0.021*** (0.006)
<i>FIN</i>	-0.012 (0.009)	-0.013 (0.009)	-0.013 (0.009)	-0.018** (0.009)	-0.019** (0.009)	-0.019** (0.009)
<i>OP</i>	0.114*** (0.017)	0.112*** (0.017)	0.115*** (0.017)	0.118*** (0.018)	0.116*** (0.018)	0.120*** (0.018)
<i>CON</i>	0.140*** (0.012)	0.141*** (0.012)	0.139*** (0.012)	0.134*** (0.013)	0.134*** (0.014)	0.133*** (0.013)
<i>INF</i>	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)
<i>INV</i>	0.001*** (0.000)	0.001*** (0.000)	0.001*** (0.000)	0.001*** (0.000)	0.001*** (0.000)	0.001*** (0.000)
<i>EMP</i>	0.096* (0.058)	0.092 (0.058)	0.090 (0.058)	0.060 (0.062)	0.057 (0.062)	0.054 (0.062)
固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
常数	5.892*** (0.128)	5.897*** (0.128)	5.908*** (0.128)	5.999*** (0.144)	6.000*** (0.139)	6.012*** (0.135)
<i>N</i>	4 432	4 432	4 432	4 155	4 155	4 155
<i>R</i> ²	0.148 1	0.146 6	0.147 0	0.143 6	0.142 9	0.142 6

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%的水平上显著，括号内为标准误差。下同。

2. 其他控制变量分析

人口规模（*POP*）、金融发展程度（*FIN*）对碳排放量具有负向作用，可能的原因是：一方面，人口增多促使技术创新投入增加，新技术可提高能源利用效率，降低单位产出碳排放量；另一方面，人口聚集推动城市基础设施完善，公共交通等共享服务优化，减少人均能源消耗，从而产生碳减排效果；金融发展水平提高，可引导资金投向绿色产业，促进能源结构调整与技术升级，推动经济向低碳转型，从而降低碳排放量，发挥负向作用。基础设施

水平（*INF*）可以降低城市碳排放量，但并不显著，不做进一步分析。城市经济密度（*GDP*）、对外开放水平（*OP*）、市场规模（*CON*）、环境规制（*INV*）、就业结构（*EMP*）具有显著的碳增排作用。可能的原因是：高经济密度通常伴随着工业和商业活动的高度集中，这使得能源消耗和资源利用强度大幅增加，尤其是高耗能产业的集聚，导致碳排放量上升。同时，土地资源的高强度开发也可能破坏生态平衡，削弱碳汇能力。高水平的对外开放虽然有利于技术引进和产业升级，但也可能吸引高污染、高能

耗的产业转移。此外,国际贸易中大量进出口货物的运输,尤其是通过航空、海运等高碳排放的运输方式,会显著增加碳排放量。市场规模的扩大意味着消费和生产活动的增加。大规模的生产活动往往伴随着能源的大量消耗和废弃物的产生,而消费活动的增加则会刺激对能源密集型产品的需求,从而间接推动碳排放量上升。如果环境规制措施不够严格或执行不到位,企业可能会为了追求经济效益而忽视节能减排措施,导致碳排放量增加。第三产业的快速发展带动了餐饮、住宿、物流等相关服务业的繁荣,这些行业增加了电力、燃气等能源消耗,导致碳排放量上升。

(三) 机制检验

1. 产业结构检验

产业结构的转型升级主要考虑三次产业部门比例关系是否合理以及产业间发展是否协调,同时,生产性服务业作为当前新一轮科技革命和产业变革的核心点,也应当纳入产业结构的碳排放评价之中。城市数智化转型对产业结构的影响见表3列(1)至列(5),可以看出,城市数智化转型对产业结构均有积极作用,表明数智化转型通过优化产业结构进而降低碳排放量。这是因为,数智化转型改变了产业结构和产业链,提高企业能源利用效率,降低能源消耗,从而有效减少碳排放量。

表3 产业结构与资源配置检验

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	产业结构				资源配置		
	三产比二产	泰尔指数	第三产业占比	产业结构整体升级	生产性服务业占比	全要素生产率	能源消耗
<i>DID_SZ</i>	0.020** (0.008)	0.021*** (0.003)	0.036*** (0.004)	0.042*** (0.004)	0.011*** (0.002)	0.047*** (0.015)	-0.193** (0.083)
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
常数	-0.863*** (0.206)	-0.329*** (0.063)	-0.362*** (0.086)	1.145*** (0.107)	-0.209*** (0.038)	1.570*** (0.331)	6.448*** (0.408)
<i>N</i>	4 368	4 368	4 368	4 368	4 368	3 647	3 993
<i>R</i> ²	0.175 5	0.391 6	0.487 1	0.420 2	0.451 7	0.088 3	0.323 0

2. 资源配置检验

虽然资源配置指标的直接衡量较为困难,但资源配置效率对全要素生产率的重要影响已被大量学者所证实^[45]。为此,使用全要素生产率来间接衡量资源配置效应。此外,还利用能源消耗量的对数来考察能源消耗情况。城市数智化转型对资源配置的影响见表3列(6)至(7),结果表明,城市数智化转型可以显著提升全要素生产率,且对能源消耗具有显著的抑制作用,说明城市数智化转型可以通过优化资源配置进而降低碳排放量。这是因为,数

智化转型可以精准掌握资源需求与分布,实现资源高效调配,减少资源浪费与碳排放量,推动绿色低碳发展。

3. 技术创新检验

发明专利的申请与授权需要经过严格的审查,其技术含量和创新性相对较高,更能准确地反映创新能力,因此采用绿色发明专利申请数量与授权数量来衡量技术创新。此外,采用创新指数和创新效率来进一步衡量技术创新。城市数智化转型对技术创新的影响结果如表4所示,数智化转型对技术创

表4 技术创新检验

	(1)	(2)	(3)	(4)
	绿色发明专利申请对数	绿色发明专利授权对数	创新指数	创新效率
<i>DID_SZ</i>	0.146*** (0.049)	0.309*** (0.054)	0.004** (0.002)	0.037*** (0.011)
控制变量	YES	YES	YES	YES
固定效应	YES	YES	YES	YES
常数	-25.695*** (1.202)	-23.789*** (1.3676)	-0.387*** (0.047)	0.633** (0.289)
<i>N</i>	3 894	3 360	4 008	4 008
<i>R</i> ²	0.693 0	0.597 5	0.639 3	0.458 7

新具有显著的积极作用,说明数智化转型通过促进技术创新进而降低碳排放量。这是因为,数智化将产生规模经济效应,有利于鼓励企业增加创新投资,激发创新行为。进一步地,技术创新推动能源高效利用,提高生产效率,减少生产过程中的能源消耗和碳排放量。

五、进一步分析

在进行回归分析和中介机制检验后,下文将对数智化转型对碳减排效应的异质性、经济效益和动态效应进行检验^④。

(一) 异质性检验

1. 地区异质性

将样本分为东、中、西3组^⑤和南、北2组^⑥,分别对城市数智化转型的碳排放效应进行回归,实证结果表明:城市数智化转型可以显著降低东部、西部地区和南部地区的碳排放量,而对中部地区和北部地区的碳排放量影响并不显著。可能的原因是,在较发达的东部地区和南部地区,城市数智化转型程度更高,更能发挥技术创新、产业结构升级等正向作用,进而对碳排放有明显的降低作用。而西部地区是中国重要的制造业集群地,依靠城市数智化转型政策能够促进产业结构从以初级加工为主的资源密集型和劳动密集型产业向以深度加工为主的现代化、高附加值的技术密集型产业转变,呈现出一定的后发优势。

2. 城市异质性

根据国务院印发的《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》,将样本分为非资源型城市和资源型城市^⑦,资源型城市包括成长型城市、成熟型城市、衰退型城市、再生型城市。结果表明:城市数智化转型对成长型城市的碳减排作用是最大的,其次是成熟型城市,再次是衰退型城市;而对再生型城市的碳排放具有促进作用,对非资源型城市没有影响。可能的原因是相比非资源型城市,资源型城市通常更加依赖于能源和原材料的开采与加工,而且这些行业往往会产生大量的二氧化碳排放,数智化转型会针对这些行业实施更严格的环保要求和碳减排措施,以降低碳排放,从而双试点政策的实施对资源型城市碳排放的抑制作用要更强。而对于再生型城市来说,随着数字技术的发展,

再加上自身的资源禀赋条件,势必进行更多的生产活动,导致碳排放量增加。

3. 发展异质性

根据城市发展水平,从多维度考察数智化转型对碳排放的影响。具体而言,根据GDP的均值将样本分为GDP高组和GDP低组,根据科技支出均值将样本分为科技支出高组和科技支出低组,根据基础设施建设水平将样本分为基础设施好组和基础设施差组,根据城镇化水平将样本分为城镇化水平高组和低组。研究发现:在发展水平较低组,如GDP低组、科技支出低组、基础设施差组和城镇化水平低组,城市进行数智化转型更能发挥其碳减排作用。原因是,发展水平较低的城市的基础设施建设相对薄弱,绿色创新水平也相对较低,较多的能耗行业导致碳排放总量增加,在双试点政策的制约下,城市通过技术创新和利用环保能源等举措,走绿色低碳化道路来限制城市碳排放。

(二) 经济效益检验

为了考查城市数智化转型是否以牺牲经济增长为代价来促进绿色发展,将被解释变量替换为经济增长(人均GDP对数)、市场开放度(实际利用外资额对数)和金融发展水平(年末金融机构存贷款余额/GDP),对城市数智化转型进行回归。其结果表明:数智化转型对经济增长、市场开放度和金融发展均呈显著的正向作用,表明双试点政策并不是以牺牲经济为代价从而达到绿色低碳发展目标。

(三) 动态效应检验

双试点政策的动态效应表明:城市数智化转型对碳排放量的回归系数在政策实施前为负但没有通过显著性检验,说明政策实施前对照组与实验组的城市碳排放量不存在显著差异,进一步证明样本结构满足平行趋势假设。从动态效应来看,当城市入选“宽带中国”和“智慧城市”试点后,数智化转型对碳排放的系数显著为负,且呈现出逐年增加的趋势,说明双试点政策的碳减排效应在逐年增强。

六、结论与启示

基于2007—2022年中国277个城市的面板数据,本文以“宽带中国”和“智慧城市”双试点作为准自然实验来表征城市数智化转型,通过构建多期双重差分模型实证检验城市数智化转型的碳减

排效应。研究发现：相较于非双试点城市，双试点城市的数智化转型具有显著的碳减排效应，并通过了一系列的稳健性检验；机制检验表明，城市数智化转型主要通过优化产业结构、资源合理配置和促进技术创新对碳排放产生抑制作用；通过异质性检验发现，数智化转型的碳减排效应因地理区位、资源禀赋和发展水平等城市特征的不同而不同。此外，双试点政策的碳减排效应具有逐年增强的趋势，且该效应并不以牺牲经济增长为代价。

上述结论对于更好地发挥城市数智化转型的积极作用和推进绿色发展具有重要的政策启示：

(1) 根据比较优势与资源禀赋，因地制宜推进双试点城市建设。政府需要更加关注区域之间的差异，制定相应的碳减排政策，以促进区域间的协同配合，实现碳减排目标。此外，应合理、有序扩大两大政策的示范城市覆盖范围，运用政策手段激励有优势的城市先行先试，最大程度发挥示范城市建设带来的环境红利，引导其他城市走向绿色低碳发展之路。

(2) 注重政策之间的协同效应，推动城市低碳发展。政府应进一步关注政策之间的协同效应，确保各项政策能够形成合力，共同推动绿色低碳发展。在制定绿色发展政策时，不应仅关注单一政策目标的实现，而应兼顾政策目标、内容及规划等方面，加强政策间的协同联动，形成政策组合拳，以发挥不同政策的协同效应和联动效应，实现“双碳”目标。

(3) 在数智化转型的碳减排效应中充分发挥技术创新、产业结构和资源配置的作用。政府通过加大技术创新投入力度，加强关键核心技术攻关，鼓励企业技术创新，进一步推动产业升级，特别是深入推进传统产业数字化转型，不断降低传统产业的单位能耗，促进资源合理配置，实现碳减排效应的最优化和最大化。

注释：

- ① 泰尔指数代表三大产业之间的耦合度与协调度，用三次产业间从业人员数和产值比例测度，由于是负向指标，在主成分分析中进行取相反数处理。
- ② 产业结构整体升级=1×一产占比+2×二产占比+3×三产占比。
- ③ 以上基准回归结果在经平行趋势检验、内生性检验、安慰剂检验以及多种稳健性检验后仍成立，因篇幅有限，具体分析结果见附录或与笔者联系获取。

- ④ 因篇幅有限，具体回归结果见附录或与笔者联系获取。
- ⑤ 东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南等省（市、区）的97个城市；中部地区包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南等省（市、区）的94个城市；西部地区包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆等省（市、区）的86个城市。
- ⑥ 北方地区包括北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、山东、河南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆等省（市、区）的128个城市；南方地区包括上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、海南、重庆、四川、贵州、云南等省（市、区）的149个城市。
- ⑦ 非资源型城市168个，资源型城市109个，资源型城市包括15个成长型城市、59个成熟型城市、21个衰退型城市和14个再生型城市。

参考文献：

- [1] 张云, 柏培文. 数智化如何影响双循环参与度与收入差距——基于省级—行业层面数据[J]. 管理世界, 2023, 39(10): 58-83.
- [2] 刘华珂, 李旭超, 聂禾, 等. AI时代: 城市数智化转型与企业创新[J]. 中国软科学, 2024(2): 38-54.
- [3] 陆香怡, 赵彦云. 绿色发展目标下智慧城市建设对碳排放效率的影响研究[J]. 经济问题探索, 2024(3): 155-171.
- [4] 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.
- [5] MA D, ZHU Q. Innovation in emerging economies: Research on the digital economy driving high-quality green development[J]. Journal of business research, 2022, 145: 801-813.
- [6] 韩晶, 陈曦, 冯晓虎. 数字经济赋能绿色发展的现实挑战与路径选择[J]. 改革, 2022(9): 11-23.
- [7] ACEMOGLU D, RESTREPO P. The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment[J]. American economic review, 2018, 108(6): 1488-1542.
- [8] 薛飞, 刘家旗, 付雅梅. 人工智能技术对碳排放的影响[J]. 科技进步与对策, 2022, 39(24): 1-9.
- [9] 戴翔, 杨双至. 数字赋能、数字投入来源与制造业绿色化转型[J]. 中国工业经济, 2022(9): 83-101.
- [10] 史丹, 叶云岭. 人工智能、就业结构与高质量发展[J]. 当代财经, 2023(5): 3-14.
- [11] ISHIDA H. The effect of ICT development on economic growth and energy consumption in Japan[J]. Telematics and informatics, 2015, 32(1): 79-88.
- [12] WU J, ZHAO RZ, SUN JS. What role does digital finance play in low-carbon development? Evidence from five major urban agglomerations in China[J]. Journal of environmental management, 2023, 341: 118060.
- [13] 刘亦文, 陈熙钧. 数智融合发展对中国减污降碳协同治

- 理的影响研究[J]. 环境科学研究, 2023, 36(11): 2189-2199.
- [14] 刘家民, 马晓钰. 数智化创新政策如何推动企业新质生产力发展[J]. 西部论坛, 2024, 34(4): 17-34.
- [15] 杨彦宁. 数字基础设施建设与城市经济差距: 基于健康和教育的视角[J]. 求索, 2024(1): 77-84.
- [16] 郭秋秋, 马晓钰. “宽带中国”城市与智慧城市双试点的产业结构升级效应[J]. 经济体制改革, 2024(1): 62-70.
- [17] 周建平, 徐维祥, 刘程军, 等. 中国城市数智化转型对产业现代化的影响[J]. 经济地理, 2024, 44(7): 117-125.
- [18] HONG JJ, SHI FY, ZHENG YH. Does network infrastructure construction reduce energy intensity? Based on the “Broadband China” strategy[J]. *Technological forecasting and social change*, 2023, 190: 122437.
- [19] LI ZG, WANG J. The dynamic impact of digital economy on carbon emission reduction: Evidence city-level empirical data in China[J]. *Journal of cleaner production*, 2022, 351: 131570.
- [20] DONG F, LI YF, QIN C, et al. Information infrastructure and greenhouse gas emission performance in urban China: A difference-in-differences analysis[J]. *Journal of environmental management*, 2022, 316: 115252.
- [21] CHENG ZH, WANG L, ZHANG Y. Does smart city policy promote urban green and low-carbon development? [J]. *Journal of cleaner production*, 2022, 379: 134780.
- [22] 唐珺, 高煜, 李朋林. 智慧城市能否通过智慧能源建设推动“双碳”目标实现?——基于合成控制法的试验证据[J]. 软科学, 2023, 37(7): 90-96, 133.
- [23] ZHANG EY, HE XY, XIAO P. Does smart city construction decrease urban carbon emission intensity? Evidence from a difference-in-difference estimation in China[J]. *Sustainability*, 2022, 14 (23): 3-16.
- [24] 马青山, 何凌云, 袁恩宇. 新兴基础设施建设与城市产业结构升级——基于“宽带中国”试点的准自然实验[J]. 财经科学, 2021(4): 76-90.
- [25] 吴思桐, 李杰伟. “数字经济”时代城市的未来——互联网对中国城市生产性服务业集聚的影响研究[J]. 经济学(季刊), 2024, 24(2): 431-447.
- [26] 李涛, 王曰影. 生产性服务业集聚与城市绿色发展[J]. 北京工商大学学报(社会科学版), 2023, 38(2): 114-126.
- [27] 赵玉焕, 钱之凌, 徐鑫. 碳达峰和碳中和背景下中国产业结构升级对碳排放的影响研究[J]. 经济问题探索, 2022(3): 87-105.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] WEN HW, LIANG WT, Lee C C. Urban broadband infrastructure and green total-factor energy efficiency in China[J]. *Utilities policy*, 2022, 79: 101414.
- [31] 姚加权, 张锬澎, 郭李鹏, 等. 人工智能如何提升企业生产效率? ——基于劳动力技能结构调整的视角[J]. 管理世界, 2024, 40 (2): 101-116.
- [32] 巫强, 姚雨秀. 企业数字化转型与供应链配置: 集中化还是多元化[J]. 中国工业经济, 2023(8): 99-117.
- [33] 骆行, 刘子俊, 田云. 数字经济对资源型城市低碳转型的影响及作用路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(6): 56-64.
- [34] 陶莉, 高岩, 朱红波, 等. 有可再生能源和电力存储设施并网的智能电网优化用电策略[J]. 中国管理科学, 2019, 27(2): 150-157.
- [35] 郭丰, 任毅, 柴泽阳. “双碳”目标下数字基础设施建设与城市碳排放——基于“宽带中国”试点政策的准自然实验[J]. 中国经济问题, 2023(5): 164-180.
- [36] 黄和平, 谢云飞, 黎宁. 智慧城市建设是否促进了低碳发展?——基于国家智慧城市试点的“准自然实验”[J]. 城市发展研究, 2022, 29(5): 105-112.
- [37] 凌润泽, 潘爱玲, 李彬. 供应链金融能否提升企业创新水平? [J]. 财经研究, 2021, 47(2): 64-78.
- [38] 张欣, 董竹. 数字化转型与企业技术创新——机制识别、保障条件分析与异质性检验[J]. 经济评论, 2023(1): 3-18.
- [39] CONLEY T G, UDRY C R. Learning about a new technology: Pineapple in Ghana[J]. *American economic review*, 2010, 100(1): 35-69.
- [40] BAI JC, HAN ZY, RIZVIS K A, et al. Green trade or green technology? The way forward for G-7 economies to achieve COP 26 targets while making competing policy choices[J]. *Technological forecasting and social change*, 2023, 191: 122477.
- [41] LAN MD, ZHU YK. Digital infrastructure construction, carbon total factor productivity, and carbon rebound effect[J]. *Environmental science and pollution research*, 2023, 30(38): 88968-88985.
- [42] ZHANG X, GENG Y, TONG Y W, et al. Spatial characteristics and its driving factors of low-carbon energy technology innovation in China: A gravity movement and exploratory spatial data analysis [J]. *Journal of cleaner production*, 2021, 295: 126481.
- [43] 丛建辉, 刘学敏, 赵雪如. 城市碳排放核算的边界界定及其测度方法[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(4): 19-26.
- [44] 肖泉, 李金生. 土地价格扭曲影响城市绿色全要素生产率研究——基于绿色创新能力视角[J]. 华东经济管理, 2023, 37(5): 62-72.
- [45] 龚关, 胡关亮. 中国制造业资源配置效率与全要素生产率[J]. 经济研究, 2013, 48(4): 4-15, 29.

责任编辑: 曾凡盛