

数字技术创新对绿色发展水平的影响研究

吴传清^{1,2,3}, 邓和顺¹, 夏启炜¹

(1. 武汉大学经济与管理学院, 湖北 武汉 430072;

2. 武汉大学中国发展战略与规划研究院, 湖北 武汉 430072;

3. 武汉大学区域经济研究中心, 湖北 武汉 430072)

摘要: 基于 2015—2022 年 273 个地级市样本数据, 利用关键数字技术专利数据衡量数字技术创新水平, 综合考虑“减污”与“降碳”之间的动态影响效应, 从绩效角度测算减污降碳协同效应来表征城市绿色发展水平。以能源结构、产业结构、数智融合水平等 3 个角度为切口, 考察数字技术创新对城市绿色发展水平的影响机制。研究发现: ①数字技术创新对城市绿色发展水平存在显著正向影响; ②数字技术创新主要通过优化能源结构、促进产业结构升级、推动城市数智融合来影响城市绿色发展水平; ③基于城市类型、政策试点和地理区位进行异质性分析, 数字技术创新显著提升资源型城市、大气污染防治重点城市、非低碳城市试点、智慧城市试点以及西部、东北地区的绿色发展水平。为充分发挥数字技术创新对城市绿色发展水平的促进效应, 以数字技术创新带动经济社会全面绿色转型, 提出应重点关注: 加强数字技术创新投入, 拓展减污降碳协同推进路径; 强化数字技术应用, 重塑能源结构; 深化数实融合, 助力产业结构升级; 加强城市数智融合, 推动智慧城市建设; 结合地理区位特征, 实施区域差异化政策。

关键词: 数字技术创新; 绿色发展; 协同效应; 绩效

中图分类号: F062.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0566(2025)02-0066-15

Research on the impact of digital technology innovation on the level of green development

WU Chuanqing^{1,2,3}, DENG Heshun¹, XIA Qiwei¹

(1. School of Economic and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Institute of Development Strategy and Planning, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Regional Economic Research Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on sample data from 273 prefecture-level cities between 2015 and 2022, this study utilizes key digital technology patent data to measure the level of digital technology innovation. It comprehensively considers the dynamic interaction effects between “pollution reduction” and “carbon reduction,” and calculates the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction from a performance perspective to represent the level of urban green development. The impact mechanism of digital technology innovation on the level of green development in cities is examined from three aspects: energy structure, industrial structure, and the level of digital and intelligent integration.

收稿日期: 2024-12-29 修回日期: 2025-01-31

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目“基于开放知识网络的区域产业趋势分析与风险预警”(U23A20316); 武汉大学区域经济研究中心自主科研项目“新型工业化理论与政策研究”(WHDXY01)。

作者简介: 吴传清(1967—), 男, 湖北石首人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为区域绿色转型、区域经济高质量发展。

Heterogeneity analysis is conducted based on city type, policy pilot status, and geographical location. The findings are as follows: ① Digital technology innovation has a significant positive impact on the level of green development in cities. ② Digital technology innovation influences the level of green development in cities mainly by optimizing energy structures, promoting industrial structure upgrades, and driving digital and intelligent integration in cities. ③ Based on heterogeneity analysis conducted by city type, policy pilot status, and geographical location, digital technology innovation significantly enhances the level of green development in resource-based cities, key cities for air pollution prevention and control, non-low-carbon city pilots, smart city pilots, as well as cities in western and northeastern regions. To fully leverage the promotional effects of digital technology innovation on the level of green development in cities, and to drive comprehensive green transformation in both the economy and society through digital technology innovation, the following key areas should be focused on: strengthening investment in digital technology innovation to expand the pathways for synergistically advancing pollution reduction and carbon emission decrease; enhancing the application of digital technology to reshape the energy structure; deepening the integration of digital technology with the real economy to facilitate the upgrading of industrial structures; intensifying the integration of digital intelligence with urban development to promote the construction of smart cities; and implementing differentiated regional policies in combination with geographical location characteristics.

Key words: digital technology innovation; green development; synergistic effect; performance

近年来,国际社会对温室气体与大气污染物的排放控制给予了前所未有的重视。根据世界气象组织(WMO)发布的最新一期《温室气体公报》数据显示,自1750年以来,大气中CO₂浓度持续上升,全球表面平均温度较1850—1990年上升了0.99℃。同时,空气污染问题亦不容忽视,2023年全球超过90%的人口生活在PM_{2.5}浓度高于世界卫生组织标准的环境中,空气污染已成为全球第四大早逝风险因素。为应对多重环境挑战,各国政府和国际机构纷纷出台相关政策,如联合国将气候行动和城市PM_{2.5}浓度控制纳入可持续发展目标,美国、欧盟、中国和日本等国家和地区则通过立法、设立排污权和碳排放权、规定行业排放标准等方式加强管控。减污降碳协同增效是推动经济社会全面绿色转型的关键途径。党的二十大报告指出“协同推进降碳、减污、扩绿、增长,推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展”。2024年7月18日,《中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定》再次强调“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”,中国“减污降碳”工作已全面融入经济社会发展全局。

数字技术作为经济高质量发展的新引擎,其在促进能源消费结构优化、推动产业结构升级等方面展现出独特优势。据中国信息通信研究院发布的《2024年中国数字经济发展研究报告》统计,

2023年中国数字经济体量达到53.9万亿元,其对GDP增长的贡献比例高达66.45%,数字经济有效支撑经济平稳增长。在此背景下,数字技术创新在减污降碳工作中的应用也日益广泛,如通过大数据分析优化能源分配、利用人工智能提高生产效率、运用物联网技术实现精准治污等。这些技术的应用不仅有效降低了污染物和温室气体的排放,更促进了经济社会全面绿色转型。本文试图综合考虑“减污”与“降碳”之间的动态影响效应,基于绩效角度测算减污降碳协同效应水平,以此表征城市绿色发展水平,实证考察数字技术创新影响绿色发展水平的路径机制,为构建更加科学、高效的减污降碳协同治理体系提供有力支撑。

一、文献综述

(一) 数字技术的环境治理效应

作为推动环境保护与可持续发展的新兴力量,数字技术以其独特的优势在环境治理中发挥着日益重要的作用。学术界关于数字技术重塑环境治理体系的相关研究主要集中在3个方面:环境信息整合效应、“人工替代”效应以及治理效率提升效应^[1]。

第一,目前学术界主流观点认为数字技术创新赋予政府以更加全面、综合的环境信息整合能力^[2]。传统意义上,环境数据的收集往往依赖于

人力现场监测或定期采样^[3],这种方式不仅耗时耗力,同时难以实现全方位的覆盖与即时更新。依托遥感卫星、无人机等现代数字技术赋能,能够全天候、不间断地采集各类环境数据,对生态环境进行实时监测,为政府环境决策提供环境信息库。第二,数字技术促进了环境信息的整合与共享。在数字技术的支持下,政府可以建立统一的环境信息平台,将不同来源、不同格式的环境数据进行整合、清洗和标准化处理,形成统一的环境信息数据库,不仅促进了政府各部门间的信息互通与高效协作^[4],还能够为科研机构、企业和社会公众提供开放的数据接口,促进环境信息的全社会共享利用。通过数据的整合与共享,政府能够更全面地掌握环境状况,更精准地识别环境风险,为科学决策提供更加坚实的基础。第三,数字技术还提升了政府的环境信息分析能力^[5]。传统的数据分析方法往往受限于数据量、处理速度和分析能力,难以充分挖掘环境数据的潜在价值。而大数据分析、人工智能、机器学习等现代数字技术,能够对庞大的环境数据集进行深度处理与智能解析^[6],揭示环境变化的规律和趋势,预测环境风险的发生和发展,为政府提供科学、精准的环境治理规划,提高环境治理效率。

随着数字技术的不断发展,越来越多的学者开始关注其在环境治理中的“人工替代”效应^[7]。多数学者认为数字技术的全面普及,使得自动化监测设备遍布环境治理的各个环节^[8]。从空气质量监测站、水质自动监测站到土壤污染监测网络,这些智能设备能够不间断地收集环境数据,并通过物联网技术实时传输至数据处理中心。基于大数据分析的预警系统能够迅速识别环境异常,为及时应对环境问题提供了可能,进一步强化了环境治理的预见性和主动性。此外,有研究认为随着数字技术的深入应用,环境治理的决策过程也日益智能化。通过整合多源环境数据,利用人工智能算法进行深度挖掘与分析,可以更加科学地评估环境状况,预测环境变化趋势,为制定环境治理策略提供有力支持^[9]。这种基于数据驱动的决策方式,不仅提高了决策的精准度和稳定性,还排

除了人为因素的影响,确保了环境治理措施的针对性和实效性^[10]。许多研究在分析环境治理中的数字技术“人工替代”效应时,重点关注监管模式创新^[11]。通过构建智能化监管平台,实现环境数据的集中管理和实时共享,不仅提高了监管工作的透明度和公信力,还增强了监管部门之间的协同作战能力^[12]。同时,利用无人机、卫星遥感等远程监测技术,可以实现对关键区域、污染源的全方位、全天候监测,有效弥补了人工监管的不足。这种非现场监管与远程执法的模式创新,不仅控制了监管代价,还使得监管效率和监管范围得到有效提升,为环境治理的持续优化提供了有力保障^[13]。

数字技术的运用、创新与变革能够显著促进污染气体和温室气体排放量的减少,推动环境决策向更加科学与有效的方向发展,为环境监管模式的优化及效率提升拓宽发展思路^[14]。数字技术应用如何提升环境治理效率同样是目前学术界的一大热点话题。许多研究认为,数字技术的广泛应用,如智能监测设备与物联网系统的部署^[15],使得对工业排放、农业面源污染及城市生活污染等关键污染源的实时监测效率极大提升。此外,大数据分析技术能够挖掘历史排放数据中的规律,预测未来排放趋势,为制定前瞻性的减排策略提供科学依据,从而有效提升环境决策的有效性^[16]。目前环境决策过程正逐步向科学化、精准化迈进,高级计算模型与人工智能算法的引入,使得环境模拟与预测能力大幅提升,能够更准确地评估不同政策或项目对环境的影响,从而使得环境治理效率得到指数级提升。

(二)减污降碳协同效应的影响因素

减污降碳协同效应的达成是一个多维度、复杂交织的过程,受到经济、社会和技术等多个层面的因素影响。当前,学术界的研究热潮主要聚焦于特定的政策冲击,如碳交易市场机制、绿色税收政策以及政府环境规制等,深入剖析这些政策如何对减污降碳的协同效应产生直接或间接的促进作用。此外,也有部分研究聚焦于产业结构等经济社会因素和绿色生产方式等技术因素。

(1)政策因素^[17]。关于政策冲击对减污降碳协同效应的影响,主要聚焦于绿色金融改革创新试验区政策^[18]、环境权益交易^[19]、清洁生产标准^[20]、环境保护税^[21]、环保约谈^[22]等环境相关政策。第一,有研究发现二氧化硫排污权交易试点具有显著的减污降碳协同效应^[23];碳交易政策能够显著地降低碳污排放之间的耦合度和协调度,产生减污降碳效果^[24];用能权交易制度具有经济和环境的综合效应,能够协同推进降碳、减污、扩绿、增长^[25]。第二,除了环境相关专项政策外,减污、降碳协同政策体系对于深入推动减污降碳协同意义重大^[26]。有研究从减污政策的降碳效果和降碳政策的减污效果两个角度开展研究,分析两种政策的协同效应^[27]。第三,环境与经济目标的制定也对减污降碳协同管理的效果有着明显的影响^[28-29]。有研究发现,PM_{2.5}/PM₁₀浓度目标的设定与减污降碳协同管理的成效呈正相关关系,而经济增长目标的设定则与减污降碳协同管理的成效表现出负相关趋势^[30];碳达峰目标对碳排放损益偏差与大气污染损益偏差均产生了明显的负向作用,有效释放了其在减少污染与降低碳排放方面的协同效果^[31]。此外,新型城镇化建设^[32]、自由贸易试验区、创新驱动政策等其他相关政策的减污降碳效应也是学术界的研究热点。

(2)经济社会因素。现有研究主要聚焦产业结构^[27]、能源消费结构^[33]、公众环保意识、消费结构^[35]和用地规模等。产业结构的升级与能源消费模式的转变是达成减污降碳协同效应的关键要素。具体而言,当大气污染物排放量有所减少时,会明显带动碳排放量的下降,而能源利用效率、能源消费构成、产业布局以及投资规模则构成了影响两者协同效应的重要调节因子^[36]。有研究发现建设用地规模对减污降碳产生负向协同效应,但产业空间集聚有助于产生减污降碳正向协同效应^[37]。从社会因素视角来看,公众环境关注的提高可以推动社会各界积极参与环境治理,形成共治共享的良好局面^[38],从而推动减污降碳协同效应的提升。此外,有研究基于部门视角发现消费结构对电力、热力生产和供应业的减排协同效应

最强^[39]。

(3)技术因素。绿色技术和数字技术等与城市环境治理密切相关的技术因素同样是学术界密切关注的对象。作为推动减污降碳协同的核心引擎,绿色生产技术正加速重塑城市环境治理格局^[40]。有研究从环境规制的角度出发,认为企业绿色技术创新力度的显著提升,从根本上减少了企业污染排放^[41-42]。随着数实融合的加速演进,越来越多学者认为数字技术的发展为减污降碳协同效应的实现提供了有力支撑^[43]。通过大数据、人工智能等技术的应用,可以深入挖掘环境数据的价值,提升环境治理的智能化水平^[44]。同时,数字技术的快速发展也进一步推动了绿色低碳技术的研发和应用,为企业减污降碳进程提供了更多技术手段和解决方案。此外,绿色技术与数字技术的深度融合,为城市环境治理注入新的活力与动力。绿色技术通过提供清洁、低碳的解决方案,从根本上减少了污染物的产生与排放;而数字技术则以其强大的数据处理与分析能力,为环境治理提供了精准化、智能化的管理工具。两者相辅相成,共同推动了城市环境治理向更加精细化、科学化的方向发展。

综合来看,国内外学者对数字技术创新与减污降碳协同之间的内在联系开展了相关研究,但仍存在以下不足:一是现有研究主要聚焦对碳排放或污染物排放的影响,将“减污”与“降碳”割裂开来,鲜有研究统筹考虑减污与降碳两者的相互关系,探讨对减污降碳协同效应的影响;二是现有研究在衡量减污降碳协同水平时,多采用存量数据来进行测算,未考虑“减污”与“降碳”之间的动态影响效应;三是当前研究多聚焦于数字经济或者数字化水平的环境治理效应,鲜有研究将数字技术创新作为切口,从专利要素层面分析数字技术创新的环境治理效应。

二、理论分析与研究假设

(一)数字技术创新对绿色水平的直接影响

(1)技术赋能。数字技术创新通过引入云计算、区块链和量子计算等先进信息技术手段,为城市环境治理提供了前所未有的技术支撑,显著提

升了环境监测、数据分析、决策制定及执行等各个环节的效率与精确度。物联网技术构建的实时监测系统为环境管理提供了即时、准确的数据基础;大数据技术则通过深度挖掘环境数据中的价值信息,为科学决策提供了有力支撑;人工智能技术进一步实现了基于数据驱动的智能化管理与控制,推动了环境治理向精细化、高效化方向发展。这一过程不仅加速了环境治理响应速度,还提高了资源利用效率与污染防控效果,从而正向促进了绿色发展水平的提升。

(2) 机制变革。数字技术的深度应用,引发了环境治理机制与模式的根本性变革。通过构建基于大数据、云计算等技术的智能化管理平台,实现了环境治理信息的全面整合与共享,促进了跨部门、跨领域的协同合作与联动响应。这种机制创新与模式变革,打破了传统环境治理的壁垒与限制,推动了环境治理体系的现代化转型。促进环境治理资源的优化配置与高效利用的同时,为减污降碳协同效应的形成提供了强大的机制保障与模式支撑。

据此,提出研究假设 H1:数字技术创新能够显著促进城市绿色水平的提升。

(二) 数字技术创新对绿色水平的作用机制

1. 能源结构优化效应

(1) 能源生产结构重塑。物联网(IoT)、大数据分析和人工智能等数字技术应用,能够显著提高能源生产过程中的监测、控制和优化能力。例如,在石油和天然气开采中,应用先进的地球探测传感器和数据处理模型,能够进行精准定位,控制资源损耗的同时,增强环境污染的可控性。一方面,数字技术创新持续推动能源生产方式的去中心化和低碳化转型。如智能电网能够更好地匹配能源需求与可再生能源的发电高峰时段,减少对传统化石燃料的依赖。区块链技术则促进了分布式能源的发展,如太阳能发电和光伏发电等,使得能源生产更加灵活和高效。另一方面,数字技术应用使得能源生产过程中的成本可以显著降低。在煤炭行业中,数字技术用于地质建模、流程优化、自动化和预测性维护,显著提高生产效率的同

时,降低了生产成本和环境污染。

(2) 能源消费结构转变。在能源消费端,借助智能传感装置与数据解析等先进技术,实现了对能源消耗的即时监控与精细调控,大幅提升了能源的使用效能。一方面,数字技术催化能源消费模式的智能化和低碳化转型,推动传统能源消费模式的蝶变升级。另一方面,数字技术为绿色技术的创新和应用提供了有力支持。通过物联网实现设备使用效率的最大化,利用大数据分析预测和规划可再生能源的部署,以及使用区块链技术确保碳交易的透明性和安全性,共同推动了绿色技术的快速发展和广泛应用,持续优化能源消费结构。

据此,提出研究假设 H2:数字技术创新通过优化能源结构促进城市绿色水平的提升。

2. 产业结构升级效应

(1) 生产技术渗透。数字技术创新通过其独特的渗透性与融合性,深刻影响了产业结构的演变路径。一方面,数字技术以其高效、精准、智能的特点,深度嵌入传统产业的生产、管理、营销等各个环节,推动了传统产业的转型升级与效率提升;另一方面,数字技术与其他产业领域的跨界融合,催生了诸如智能制造、绿色物流、绿色能源等新兴产业,这些新兴产业以其独特的竞争优势与增长潜力,逐步成为产业结构中的新增长点与引领力量。技术渗透与产业融合是数字技术创新促进产业结构优化的重要途径。

(2) 资源配置优化。数字技术具备强大的数据处理与分析能力,显著提升了资源配置的效率与精准度。在大数据、云计算等技术的支撑下,企业能够实现对市场需求的精准预测与资源供给的高效匹配,从而避免了资源的无效配置。此外,数字技术的应用加强了不同产业间的信息互通与资源共享,有效减少了交易费用和信息偏差,从而提升了产业链的整体协作效能。这种资源配置效率的提升与产业链协同的增强,共同推动了产业结构的优化升级。

据此,提出研究假设 H3:数字技术创新通过优化产业结构促进城市绿色水平的提升。

3. 数智融合赋能效应

(1)数据资源整合。数字技术创新作为城市数据资源整合的关键驱动力,通过大数据、云计算等技术的广泛应用,实现了对城市数据资源的深度整合与高效利用。这一过程不仅打破了传统数据孤岛现象,促进了数据的跨部门、跨领域流动与共享,还通过构建统一的数据标准与协议,确保了数据的互操作性与一致性。同时,数字技术创新还推动了数据治理体系的建立与完善,包括数据质量管理、数据安全防护、数据隐私保护等方面的制度规范,为数据资源的可持续利用提供了有力保障。整合后的数据资源成为城市数智化决策的重要基础,推动了城市管理模式的创新与优化,显

著提升了城市的数智化治理效能。

(2)应用场景拓展。数字技术创新在提升城市数智化水平的另一个重要方面体现在应用场景的不断拓展与创新上。随着技术的不断进步,数字技术在城市治理、产业创新、生态保护等各个领域的应用场景日益丰富多样。通过引入人工智能、物联网、区块链等前沿技术,城市能够构建出更加智能、便捷、高效的服务体系。各类应用场景的拓展与创新,不仅提升了城市的管理效率和服务质量,还促进了城市经济的可持续发展,进一步提升了城市的数智化水平(见图1)。

据此,提出研究假设 H4:数字技术创新通过提升城市数智化水平促进城市绿色水平的提升。

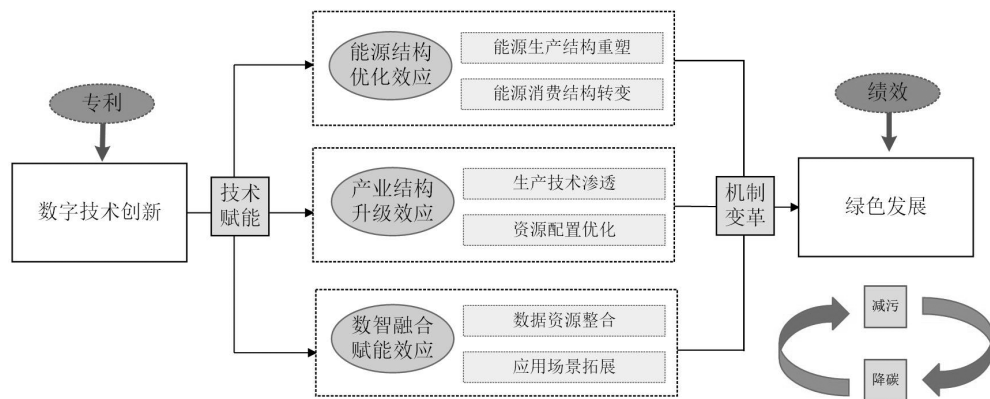


图1 数字技术创新影响城市减污降碳协同效应的路径机制

三、模型设定与数据选取

(一)模型设定

建立双向固定效应模型分析数字技术创新对城市绿色发展水平的影响。基准回归模型为:

$$SDCL_{it} = \beta DTL_{it} + \gamma X_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式(1)中,下标*i*代表城市,*t*代表年份。 $SDCL_{it}$ 为被解释变量,表征城市绿色发展水平; DTL_{it} 为数字技术创新水平, X_{it} 为一系列控制变量; μ_i 代表个体固定效应, v_t 代表年份固定效应; ε_{it} 为随机扰动项。

为进一步检验数字技术创新影响城市绿色发展水平的作用路径,引入机制检验模型,检验数字技术创新对相关机制变量的影响。具体模型为:

$$MED_{it} = \alpha_0 DTL_{it} + \alpha_1 X_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式(2)中, MED_{it} 表示机制变量; α_0 为核心解

释变量“数字技术创新水平”的待估参数,若 α_0 显著,则表示数字技术创新通过机制变量影响城市绿色发展水平; α_1 为控制变量集合的带估参数。其余变量含义见公式(1)。

(二)变量定义

1. 被解释变量

被解释变量为绿色发展水平。综合考虑“减污”与“降碳”两个复杂而动态的相互影响过程。环境污染物的减排措施与温室气体排放的降低策略相互交织,形成了一种协同增效的机制。在这一过程中,针对污染源的治理不仅直接减少了有害物质的排放,还通过技术革新、能源结构优化等途径间接促进了碳减排;反之,旨在降低碳排放的政策和技术应用,如清洁能源的推广和能源效率的提升,也显著减少了伴随能源生产和消费过程

产生的污染物,从而体现了两者间深刻的相互依赖与动态平衡。本文在构建全局非径向方向性距离函数框架内,依托 DEA 效率评估方法,创新性地设计了一种减排绩效测度指数,旨在通过量化效率改进的比例来反映协同效应水平。研究深入探索了单独实施减排策略与协同减排措施下绩效变动的对比,基于这一对比分析,构建了一个旨在评估减污与降碳双重目标下协同效应的模型,测算城市绿色发展水平。此模型能够有效评估不同减排路径的协同效果,为政策制定和环境保护策略提供科学依据。

本文确立了投入—产出分析框架,其中,资本存量、劳动力投入及能源消耗量被界定为投入要素。资产投入采用城市固定资产投资来衡量;劳动力投入采用城镇单位从业人员期末人数来衡量;能源投入选取全社会用电量、人工煤气和天然气供气总量、液化石油气供气总量 3 种城市主要能源消耗量,并根据标准煤折算系数进行转化。选取地区生产总值作为期望产出指标,在非期望产出方面,本研究聚焦于环境污染问题,特别是大气污染及温室气体排放,具体选取了 $PM_{2.5}$ 、 NO 、 SO_2 3 类代表性大气污染物,以及 CO_2 这一主要的温室气体作为研究对象。这些非期望产出的纳入,旨在揭示经济发展过程中伴随的环境成本,进而评估经济发展的可持续性。在此基础上,引入全局非径向方向距离函数,构建绩效测算模型。借鉴 Färe 等^[45] 纳入环境技术的分析框架,并参考 Oh^[46] 提出的全局基准技术概念,在规模报酬不变假设下,构建函数模型为:

$$\begin{aligned} \vec{D}(K, L, E, Y, P_1, P_2, P_3, C; V) = & \\ \max & \left\{ \begin{aligned} & w_K \beta_K + w_L \beta_L + w_E \beta_E + w_Y \beta_Y + w_{P_1} \beta_{P_1} + \\ & w_{P_2} \beta_{P_2} + w_{P_3} \beta_{P_3} + w_C \beta_C \end{aligned} \right\} \\ s. t. & \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \gamma_t^i K_t^i \leq K - \beta_K v_K, \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \gamma_t^i L_t^i \leq L - \\ & \beta_L v_L, \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \gamma_t^i E_t^i \leq E - \beta_E v_E, \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \gamma_t^i Y_t^i \leq \\ & Y + \beta_Y v_Y, \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \gamma_t^i P_{1t}^i \leq P_1 - \beta_{P_1} v_{P_1}, \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \gamma_t^i P_{2t}^i \leq \\ & P_2 - \beta_{P_2} v_{P_2}, \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \gamma_t^i P_{3t}^i \leq P_3 - \beta_{P_3} v_{P_3}, \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \gamma_t^i C_t^i \leq \end{aligned}$$

$$C - \beta_C v_C, \gamma_t^i \geq 0, t = 1, 2, 3 \cdots T; \beta_K, \beta_L, \beta_E, \beta_Y, \beta_{P_1}, \beta_{P_2}, \beta_{P_3}, \beta_C \geq 0 \quad (3)$$

式(3)中, $W^T = (w_K, w_L, w_E, w_Y, w_{P_1}, w_{P_2}, w_{P_3}, w_C)$ 为权重向量,表示各变量在模型中的相对重要性; $B = (\beta_K, \beta_L, \beta_E, \beta_Y, \beta_{P_1}, \beta_{P_2}, \beta_{P_3}, \beta_C)^T$ 为松弛向量,表示保持产出(投入)不变的情况下,投入(产出)可以减少(增加)的最大量,反映了决策单元(DMU)在现有技术水平下,相对于最佳生产前沿的冗余或不足。 $V = (v_K, v_L, v_E, v_Y, v_{P_1}, v_{P_2}, v_{P_3}, v_C)$ 为方向变量,表示在投入和产出空间中期望的移动方向,可以指导决策单元(DMU)在投入和产出方面的改进方向,从而实现效率的提升。

参考刘华军等^[47]的研究方法,在生产系统各指标同等重要的前提下设置基准模型各指标权重。考虑到本文采用产出导向的 DEA 模型,所以将投入系统的权重设置为 0。计算协同效应时,产出系统中的期望产出(Y)与非期望产出($PM_{2.5}$ 、 NO 、 SO_2 和 CO_2)的权重均为 1/2,其中非期望产出的各个指标权重为 1/8 ($1/2 \times 1/4$)。计算单独减污效应时,非期望产出仅考虑 $PM_{2.5}$ 、 NO 、 SO_2 等 3 类大气污染物,各个指标权重为 1/6 ($1/2 \times 1/3$);同理,计算单独降碳效应时,非期望产出仅考虑 CO_2 ,指标权重为 1/2。

$$\begin{cases} V = (-K, -L, -E, Y, -P_1, -P_2, -P_3, -C) \\ W_{SE}^M = (0, 0, 0, \frac{1}{2}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}) \\ W_{PRE}^M = (0, 0, 0, \frac{1}{2}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, 0) \\ W_{CRE}^M = (0, 0, 0, \frac{1}{2}, 0, 0, 0, \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, V 为方向向量, K 、 L 、 E 、 Y 、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 C 分别代表资本投入、劳动投入、能源投入、地区生产总值以及 $PM_{2.5}$ 、 NO 、 SO_2 、 CO_2 排放量; W_{SE}^M 为同时考虑减污效应和降碳效应时的权重向量, W_{PRE}^M 为仅考虑减污效应时的权重向量, W_{CRE}^M 为仅考虑降碳效应时的权重向量。

本文定义减污效应为同时考虑减污降碳时的效率相较于仅考虑减污效应时效率的提升比例,

降碳效应为同时考虑减污降碳时的效率相较于仅考虑降碳效应时效率的提升比例,即:

$$\Delta E_p = \frac{SE - PRE}{PRE} \quad (5)$$

$$\Delta E_{co_2} = \frac{SE - CRE}{CRE} \quad (6)$$

式(5)、式(6)中, ΔE_p 和 ΔE_{co_2} 分别代表减污效应和降碳效应; SE 代表考虑减污降碳时的效率; PRE 代表仅考虑减污时的效率; CRE 代表仅考虑降碳时的效率。

前文假定减污和降碳地位同等重要,因此本文定义绿色发展水平为:

$$SDCL = 0.5\Delta E_p + 0.5\Delta E_{co_2} \quad (7)$$

2. 解释变量

本文以《关键数字技术专利分类体系(2023)》为依据,测算中国 273 个城市的数字技术创新水平。该分类体系聚焦国家战略需求,针对新兴数字产业和前沿技术领域,将关键数字技术创新专利划分为人工智能、高端芯片、量子信息等七大类别,并运用线分类法对各项技术进行 3~5 级细分,通过相应的国际专利分类号(IPC)实现对数字技术专利的精准识别。具体测算步骤如下:首先,根据《关键数字技术专利分类体系(2023)》中的 IPC 分类号在国家知识产权局官网手工下载数字技术专利数据集;其次,借助 Python 软件根据专利公开号筛选出数字技术专利授权量;最后,根据数字技术专利授权的地理位置信息,按年度统计各城市数字技术专利授权量,并对所得数据进行加 1 取对数处理,以此衡量城市数字技术创新能力。这个方法充分利用了 IPC 分类体系在识别关键数字技术突破方面的优势,同时采用官方统一标准进行专利筛选,既确保了研究过程的规范性,也保持了与同类研究结果的可比性。

3. 控制变量

为减少模型估计偏误,参考学术界相关研究,引入如下控制变量:财政投资水平(FIL),以各地固定资产投资与地方一般公共预算支出的比值表征;金融发展水平(FDL),以年末金融机构存贷款余额占地区 GDP 比例表征;人力资本水平(HCL),以高等院校在校学生与城市年末总人口的比值表

征;环境规制水平(ERL),以各地政府工作报告中“环境保护”相关词汇出现的频率表征;经济发展水平(EDL),以地区 GDP 的对数值表征。

(三)数据来源

选取 2015—2022 年中国地级及以上城市样本数据。专利数据来源于国家知识产权局的专利检索平台。本文采用 Python 和 c++ 编写的分布式爬虫程序从该网站收集 2015—2022 年的专利授权数据。 CO_2 排放量测算方法参考郭沛等的研究^[48],数据来源于历年《中国城市建设统计年鉴》等, $PM_{2.5}$ 、 NO 、 SO_2 数据来源于中国研究数据服务平台(CNRDS),控制变量中的城市统计数据来源于历年《中国城市统计年鉴》。考虑到各个指标的可用性,最终选取了 273 个城市的面板数据。

四、实证结果分析

(一)全国绿色发展水平评估

图 2 为 2015—2022 年全国绿色发展水平评估。由图 2 可得到以下结论。①减污效应。从 2015—2022 年,中国 273 个城市的平均减污效应呈现出一定的波动性,但整体呈下降趋势。2015—2017 年间略有下降,2018 年后下降趋势更为明显,2020—2022 年间减污效应略有回升。尽管可能采取了多项环境治理措施,但各地的污染减少效果在逐渐减弱。这可能是由于污染源的复杂性增加、治理难度加大或经济发展带来的新污染源等因素所致。②降碳效应。降碳效应在同期

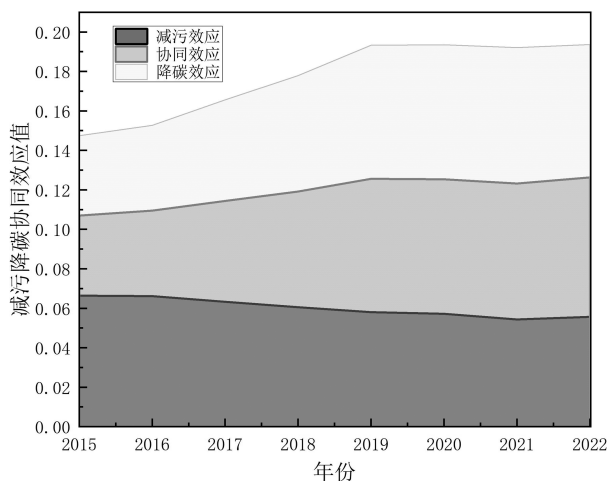


图2 全国绿色发展水平评估

内持续上升,显示出中国在应对气候变化、减少碳排放方面的积极成效。特别是 2018 年之后,降碳效应显著提升,可能是由于中国在能源结构调整、产业结构优化等方面取得了显著进展,从而加速了碳减排步伐。③绿色发展水平(协同效应)。减污降碳协同效应均为正值,且呈现出波动上升趋势,这表明在减污和降碳方面存在一定的相互促进关系,即减少污染物排放的同时也有助于降低碳排放,两者协同减排效应持续释放。

(二)基准回归

表 1 为基准回归结果。列(1)为仅加入核心解释变量(*DTL*)的回归结果,列(2)在原有基础上控制了年份和个体固定效应,*DTL* 的回归系数仍然显著为正。列(3)为控制年份固定效应并加入控制变量回归结果,列(4)控制年份和城市固定效应并加入控制变量,所有结果中 *DTL* 的回归系数均显著为正,且通过了 1% 的统计显著性检验。实证分析结果表明,数字技术创新能力的增强对城市绿色发展水平的提升具有显著推动作用,这一发现为研究假设 1 提供了有力支撑。

表 1 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>SDCL</i>	<i>SDCL</i>	<i>SDCL</i>	<i>SDCL</i>
<i>DTL</i>	0.049 *** (0.000)	0.017 *** (0.000)	0.030 *** (0.000)	0.017 *** (0.000)
<i>FIL</i>	—	—	0.004 *** (0.000)	0.001 *** (0.003)
<i>FDL</i>	—	—	0.008 *** (0.000)	0.000 (0.709)
<i>HCL</i>	—	—	1.792 *** (0.000)	0.710 *** (0.000)
<i>ERL</i>	—	—	-0.610 *** (0.000)	-0.036 (0.942)
<i>EDL</i>	—	—	0.232 * (0.086)	-0.151 (0.195)
常数项	0.826 *** (0.000)	0.796 *** (0.000)	0.740 *** (0.000)	0.778 *** (0.000)
年份固定效应	否	是	是	是
个体固定效应	否	是	否	是
<i>N</i>	2 184	2 184	2 184	2 184
<i>R</i> ²	0.287	0.669	0.557	0.674

注: *、*** 分别表示在 $p < 0.10$ 、 $p < 0.01$ 时有统计学意义。

(三)稳健性检验

(1)替换数字技术创新指标。一方面,本文采用工业机器人的存量密度来衡量数字技术创新^[49]。工业机器人作为数字化与自动化技术高度集成的产物,其数量的增加直接反映了制造业在

数字化、智能化转型上的投入与进展,能够有效捕捉到数字技术创新在生产实践中的应用深度和广度,从而验证模型结论的稳健性和可靠性。表 2 为稳健性检验结果,列(1)中 *DTL_2* 的系数显著为正,前文结论稳健。另一方面,本文借鉴学术界相关研究^[50],依据数字技术关键词对各单位专利申请文件的内容进行文本分析,识别数字专利,然后根据上市公司的地理位置信息识别城市数字专利申请数量,并加 1 取自然对数。列(2)中 *DTL_3* 的系数显著为正,前文结论稳健。

(2)删除极端样本。为了确保基准回归分析的准确性,免受极端数据值的潜在干扰,本文采取了数据截尾处理策略,即依据数字技术创新水平的量化指标,分别截尾 1% 和 5% 的数据点,随后在此基础上重新执行了回归分析。估计结果见列(3)和列(4),剔除极端值后,系数估计值均显著为正,且与基准回归系数值相差不大,稳健性检验通过。

(3)加入省份和年份的交互固定效应。本文加入省份与年份交互效应,以控制省份层面随年份变化因素的影响。列(5)中 *DTL* 的系数显著为正,前文结论稳健。

表 2 稳健性检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	<i>SDCL</i>	<i>SDCL</i>	<i>SDCL</i>	<i>SDCL</i>	<i>SDCL</i>
<i>DTL</i>	—	—	0.056 *** (0.000)	0.108 *** (0.000)	0.018 *** (0.000)
<i>DTL_2</i>	0.001 *** (0.000)	—	—	—	—
<i>DTL_3</i>	—	0.002 * (0.001)	—	—	—
常数项	0.775 *** (0.000)	0.782 *** (0.000)	0.687 *** (0.000)	0.690 *** (0.000)	0.542 *** (0.000)
控制变量	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是	是
<i>N</i>	2 184	2 184	2 184	2 184	2 184
<i>R</i> ²	0.678	0.663	0.482	0.459	0.612

注: *、*** 分别表示在 $p < 0.10$ 、 $p < 0.01$ 时有统计学意义。

(四)内生性分析

数字技术创新与绿色发展之间可能存在互为因果的内生性问题。在研究两者之间的影响时,解决内生性问题是一个重要的环节。工具变量需要满足两个关键条件:一是与数字技术创新具有较强的相关性,二是与误差项不相关。本文从历

史政策变量和区域特性变量两个方面入手,分别构建工具变量。

首先,本文以“宽带中国”示范城市构建工具变量。2013年8月17日,国务院正式发布《国务院关于印发“宽带中国”战略及实施方案的通知》,并于随后3年建立起“宽带中国”示范城市建设梯队(120个示范城市)。选择该工具变量理由如下:一方面,“宽带中国”战略的实施有助于推动我国宽带基础设施快速健康发展,是中国各个城市经济社会数字化转型具有重要支撑,对于企业积极开展数字技术创新意义重大。另一方面,“宽带中国”战略是基于当时中国宽带网络存在基础设施建设较为薄弱、城乡发展相对不均衡等问题而出台的一项宏观经济决策,其与企业的生产经营策略相互独立,使得工具变量的排他性条件得以较好地满足。因此,本文设置了工具变量 IV_BRO :当城市属于“宽带中国”示范城市,并且时间处于示范城市设立年度及之后时, IV_BRO 取值为1,若不满足上述条件,则 IV_BRO 的值为0。

其次,本文引入城市建成区供水网络密度构建工具变量。理由如下:一是城市建成区供水网络健全往往意味着该城市的地下光缆线路网络成熟,与数字技术创新高度相关。各地政府出台加强城市地下管线建设管理相关规范性文件时,均强调城市管线建设应当服从城市规划和信息的集中统一管理,并遵循统一规划、统筹建设、科学管理的原则。这意味着在城市基础设施建设过程中,各类管线(包括供水管道和光缆管道)都需要按照城市规划进行统筹规划和设计。以上海为例,上海市自来水公司和天然气公司在进行管道建设时,均充分考虑到与包括光缆管道在内的其他管线之间的协调关系,避免重复建设和资源浪费。二是城市建成区供水网络与减污降碳协同效应不存在“反向因果”引发的内生性问题,满足外生性假定。基于上述,本文设置了工具变量 IV_WPSD 。

表3中列(2)和列(4)的 *Kleibergen - Paap rk LM* 值均在1%的水平上显著, *Cragg - Donald Wald F* 统计量超过了10%显著性水平下 Stock - Yogo

弱工具变量检验的临界值,这些统计检验结果充分证实了本文工具变量的合理性与可靠性。列(1)和列(2)是工具变量为“宽带中国”政策(IV_BRO)时的回归结果,可以看出第一阶段工具变量 IV_BRO 与自变量 DTL 显著正相关,第二阶段中 DTL 依然显著为正,与基准回归结果一致。列(3)和列(4)是工具变量为建成区供水网络密度(IV_WPSD)时的回归结果。列(3)显示第一阶段工具变量 IV_WPSD 与自变量 DTL 显著正相关,列(4)显示 IV_WPSD 系数显著为正,与基准回归结果一致。综上所述,本文所采用的两个工具变量均通过了有效性检验,并通过两阶段最小二乘法得到的结果与前述分析结论相吻合,进一步验证了研究结果的可靠性。

表3 内生性分析结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	第一阶段	第二阶段	第一阶段	第二阶段
	DTL	$SDCL$	DTL	$SDCL$
IV_BRO	0.256 *** (6.527)	—	—	—
IV_WPSD	—	—	0.010 *** (5.057)	—
DTL	—	0.047 *** (6.224)	—	0.074 *** (6.175)
常数项	-0.040 (-0.597)	0.790 *** (193.091)	-0.147 ** (-2.111)	0.791 *** (156.896)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是
<i>Kleibergen-Paap rk LM</i> 值	—	40.822 [0.000]	—	26.957 [0.000]
<i>Cragg-Donald Wald F</i> 值	—	97.37 [16.38]	—	33.798 [16.38]
N	2 184	2 184	2 184	2 184
R^2	0.365	0.452	0.297	0.469

注: **、*** 分别表示在 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 时有统计学意义。

(五) 机制检验

(1) 能源结构优化效应。选取能源利用效率(MV_EE)和能源消耗强度(MV_EI)作为机制变量。参考史丹等^[51]的方法,利用数据包络法测算能源利用效率(MV_EE),该方法能够全面而准确地衡量能源在转化为有效输出过程中的效率水平;能源消耗强度(MV_EI)则采用单位GDP能耗来表征,参考杨刚强等^[33]的研究,依托省级数据,利用城市层面的夜间灯光反推城市层面的能源消耗量,这一指标直接反映了经济体对能源的依赖程度及其能源使用的经济效率。表4为机制检验

结果,列(1)检验了数字技术创新对能源利用效率(MV_{EE})的作用效果,结果显示 DTL 的回归系数在 1% 的显著性水平上呈现正向特征,表明数字技术创新对提高能源利用效率具有显著的促进作用。这表明数字技术创新能够优化能源分配、监控和管理,减少能源浪费,提高能源使用的精确度和效率。列(2)为数字技术创新对能源消耗强度(MV_{EI})的检验结果, DTL 的估计系数在 1% 水平上显著为负,数字技术创新对能源消耗强度有显著负向影响。这是因为随着数字技术的不断发展和应用,单位经济活动或产出的能源消耗量在减少,从而提高了能源使用的经济性。

(2)产业结构升级效应。选取产业结构合理化(MV_{ISU})和产业结构高级化(MV_{ISR})作为机制变量。参考学术界相关研究^[1],利用泰尔指数衡量产业结构合理化水平(MV_{ISU}),利用第三产业产值与第二产业产值之比衡量产业结构高级化水平(MV_{ISR})。表 4 为机制检验结果,列(3)检验的是数字技术创新对产业结构合理化的影响, DTL 的估计系数显著为正,这说明数字技术的引入,促进产业间的融合与协作,提高产业的整体效率和竞争力,从而推动产业结构的合理化。列(4)检验的是数字技术创新对产业结构高级化的影响, DTL 的估计系数显著为负;这可能是由于当前数字技术创新往往更集中工业领域,通过自动化、智能化等技术升级,显著提升了生产效率和产品竞争力,从而促进了第二产业产值的快速增长。机制检验结果表明,数字技术创新在推动产业结构优化升级中发挥着关键作用。

(3)数智融合赋能效应。本文选取城市人工智能发展水平(MV_{AI})和城市数字化转型水平(MV_{DT})作为机制变量。利用人工智能应用相关的内容进行关键词模糊匹配,获取城市人工智能企业数量的面板数据,取对数来衡量人工智能发展水平(MV_{AI})。城市数字化转型水平(MV_{DT})的测度参考袁淳等^[52]的研究,首先计算得到企业数字化转型相关词汇频数,然后根据企业的地理位置将其匹配到城市层面,从而衡量城市数字化转型水平(MV_{DT})。机制检验结果见表 4,列(5)

检验的是数字技术创新对人工智能发展水平的影响, DTL 的估计系数显著为正;列(6)检验的是数字技术创新对数字化转型水平的影响, DTL 的估计系数显著为正,验证了数字技术创新在促进城市人工智能发展和数字化转型中的核心作用,为实现减污降碳目标提供更为有效的路径选择。

表 4 机制检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	能源结构优化效应 MV_{EE}	能源消耗强度 MV_{EI}	产业结构升级效应 MV_{ISU}	产业结构升级效应 MV_{ISR}	数智融合赋能效应 MV_{AI}	数智融合赋能效应 MV_{DT}
DTL	0.062 *** (0.000)	-0.023 *** (0.000)	0.024 *** (0.000)	-0.012 *** (0.000)	0.222 *** (0.000)	0.858 *** (0.000)
常数项	0.329 *** (0.000)	0.136 *** (0.000)	0.691 *** (0.000)	0.112 *** (0.000)	7.309 *** (0.000)	0.029 (0.333)
控制变量	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是	是	是
N	2 184	2 184	2 184	2 184	2 184	2 184
R^2	0.137	0.662	0.459	0.571	0.388	0.673

注:***表示在 $p < 0.01$ 时有统计学意义。

五、进一步研究

(一)城市类型异质性

依据《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020 年)》,将研究样本分为资源型城市和非资源型城市。通过此类样本划分,能够深刻揭示数字技术创新在不同经济结构、技术应用与政策环境下的城市中所产生的减污降碳协同效应的差异性,为制定针对性的政策措施、促进城市可持续发展提供了重要依据。表 5 为城市类型异质性分析结果,根据列(1)和列(2)结果可知, DTL 系数在资源型城市中显著为正,在非资源型城市中不显著。这可能是由于资源型城市的经济结构主要依赖于自然资源开采和加工等传统产业,数字技术直接应用于这些行业的生产全流程中,通过提高资源利用效率、优化生产流程、减少废弃物排放等方式,直接促进了绿色发展水平的提升。而非资源型城市中,产业结构相对多元,环境压力相对较小,数字技术的创新、应用并未直接聚焦于环境治理,其对于绿色发展水平的正面影响尚未充分显现。

根据国务院于 2023 年 11 月 30 日发布的《空气质量持续改善行动计划》中关于大气污染防治重点城市数量(82 个)的调整方案,对研究

样本进行分组,探讨数字技术创新水平在不同大气污染防治类型城市中对减污降碳协同效应的影响。大气污染防治重点城市通常面临更为严峻的空气质量问题和更大的环境治理压力,其环境治理策略和成效对于全国乃至全球的环境保护具有重要意义。根据表5列(3)和列(4)结果可知,相比于非大气污染防治重点城市,数字技术创新对大气污染防治重点城市的绿色发展水平的影响更为显著。这可能是因为这些城市面临的环境治理压力较大,会将更多的资源用来数字技术的创新与推广,推动产业结构优化和绿色升级。相比之下,非大气污染防治重点城市的面

临环境压力较小,数字技术创新的环境治理效应还未完全释放。

果更为突出,对绿色发展水平的促进作用也更加显著。

将住房和城乡建设部于2012年、2013年和2014年公布的智慧城市试点政策作为城市划分依据,考察数字技术创新水平对不同类型城市绿色发展水平的影响。智慧城市试点政策旨在通过数字化手段提升城市管理和运行效率,优化资源配置,减少污染排放。将研究样本划分为智慧城市试点城市和非试点城市,能够对比分析数字技术创新在不同政策支持和资源投入背景下的实施效果,揭示其在提升城市绿色发展水平方面的差异。根据表6中列(7)和列(8)可知,相较于非智慧城市试点,数字技术创新在智慧试点城市中对于促进绿色发展水平提升的作用更为显著。这可能是由于在智慧城市试点中,数字技术创新能够更有效地被应用于环境监测、污染源追踪、节能减排等方面,从而更显著地促进绿色发展水平的提高。

表5 城市类型异质性分析

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	资源型城市	非资源型城市	大气污染防治重点城市	非大气污染防治重点城市
DTL	0.191 *** (0.000)	0.015 (0.167)	0.292 *** (0.000)	0.015 *** (0.000)
常数项	0.779 *** (0.000)	0.778 *** (0.000)	0.776 *** (0.000)	0.777 *** (0.000)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是
组间差异检验	0.000		0.001	
N	880	1 304	664	1 520
R ²	0.705	0.729	0.698	0.678

注:***表示在 $p < 0.01$ 时有统计学意义。根据交互项模型的 Chow 检验的估计结果计算组间差异系数 P 值。

(二)政策试点异质性

根据城市是否为低碳城市试点进行政策试点异质性分析。低碳城市试点政策旨在通过一系列创新措施和策略,推动城市在经济发展过程中实现低碳转型,减少温室气体排放。表6为政策试点异质性分析结果,根据列(1)和列(2)可知,相较于低碳城市试点,数字技术创新对非低碳试点城市的绿色发展水平的影响更为显著。这可能是由于非低碳试点城市面临的减排压力相对较大,这些城市在推动能源结构转型、产业升级和绿色发展的过程中,更加注重数字技术的融合与创新,形成了数字技术与低碳发展深度融合的良性循环。因此,数字技术创新在非低碳试点城市中的应用效

表6 政策试点异质性

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	低碳城市试点	非低碳城市试点	智慧城市试点	非智慧城市试点
DTL	0.014 *** (0.000)	0.150 *** (0.000)	0.199 *** (0.000)	0.016 *** (0.000)
常数项	0.772 *** (0.000)	0.783 *** (0.000)	0.779 *** (0.000)	0.778 *** (0.000)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是
组间差异系数	0.000		0.000	
N	960	1224	816	1 368
R ²	0.666	0.714	0.655	0.692

注:***表示在 $p < 0.01$ 时有统计学意义。根据交互项模型的 Chow 检验的估计结果计算组间差异系数 P 值。

(三)地理区位异质性

根据《中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报》将中国划分为东、中、西和东北四大区域,检验不同地理区位城市数字技术创新(DTL)对绿色发展水平的影响。四大区域在经济发展水平、产业结构、资源环境状况等方面存在显著差异,这些差异直接影响了数字技术创新成果在各区域的推广和应用效果,以及它们对绿色发展水平的贡献程度。根据表7中第(1)~(4)列结果可知,各地区的影响程度存在显著差异。东部

和中部地区的 DTL 系数较小,这可能是因为东部和中部地区是中国经济相对发达、且具备较强科技创新实力的地区,在数字经济发展上起步较早,积累了大量的技术储备和实践经验,数字技术创新对绿色发展水平提升的边际贡献相对较小;西部地区虽然起步较晚,但正处于快速发展的阶段,在数字技术创新促进绿色发展水平方面的潜力巨大。相比之下,东北地区作为传统的老工业基地,面临经济转型和环境污染的双重压力,因此更迫切地需要借助数字技术创新推动产业转型升级。同时,由于长期的资源开采和工业粗放式发展导致了其环境污染问题严重,数字技术创新在赋能该区域绿色发展水平提升时展现出巨大的边际贡献潜力。

表 7 地理区位异质性

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	东部地区	中部地区	西部地区	东北地区
DTL	0.006 ** (0.035)	0.036 *** (0.000)	0.068 *** (0.000)	0.291 *** (0.000)
常数项	0.781 *** (0.000)	0.769 *** (0.000)	0.782 *** (0.000)	0.772 *** (0.000)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是
N	672	632	616	264
R ²	0.695	0.742	0.628	0.803

注: **、*** 分别表示在 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 时有统计学意义。根据交互项模型的 Chow 检验的估计结果计算组间差异系数 P 值,结果留存备案。

六、研究结论与政策启示

(一) 研究结论

(1)从基准回归结果来看,数字技术创新对城市绿色发展水平存在显著正向影响,通过采用不同的核心指标构建方式、剔除异常值、引入省份与年份的交互固定效应以及工具变量回归等多种方法进行稳健性和内生性检验后,这一研究结论仍然保持稳健。

(2)以能源结构、产业结构、数智融合水平等 3 个角度为切口,考察数字技术创新对城市绿色发展水平的影响机制。机制分析结果表明,数字技术创新主要通过重塑能源结构、优化产业结构和推动城市数智融合来影响绿色发展水平。

(3)从城市类型、政策试点和地理区位等 3 个层面对样本进行划分,深入分析数字技术创新在

不同城市背景下的作用差异。异质性分析结果表明,数字技术创新可以显著提升资源型城市、大气污染防治重点城市、非低碳城市试点、智慧城市试点以及西部、东北地区的绿色发展水平。

(二) 政策启示

第一,加强数字技术创新投入,拓展减污降碳协同推进路径。政府应加大对数字技术创新的投入,包括资金、人才和研发平台的建设等,以推动数字技术在环保和能源领域的广泛应用,为实现精准治污和科学减排提供强有力的技术支撑。同时,完善相关政策体系,为数字技术创新提供立法保障和激励机制,鼓励企业和社会各界积极参与数字技术创新,形成产学研用紧密结合的创新体系,共同推动减污降碳目标的实现。

第二,深化数字技术应用,重塑能源结构。能源生产结构层面,强化大数据、人工智能等技术在传统能源开采与新能源开发中的应用。通过大数据分析,能够实现对地质结构、资源分布及开采条件的精准预测,优化开采方案,减少资源浪费与环境破坏。在新能源开发领域,人工智能技术可以智能优化发电效率,根据天气变化、光照强度等实时数据调整发电策略,最大化利用自然资源,提高能源生产效率。能源消费结构层面,运用物联网、区块链等技术,推动能源消费智能化转型,实现能源消费的精细化管理,促进能源消费向低碳、高效方向转变。引导社会资本投向能源数字化项目,激励企业探索能源结构转型实践,共同推动减污降碳协同效应的持续提升。

第三,强化数实融合,助力产业结构升级。依托云计算、大数据等数字技术,重塑传统生产方式,降低污染物排放和碳排放强度。通过构建云端数据中心和智能分析平台,企业可以实时获取生产过程中的各类数据,并运用先进的算法模型进行优化分析,从而实现对生产流程的精准控制和资源的高效利用。鼓励发展数字经济新业态、新模式,如智能制造、绿色物流等,通过技术创新和模式创新,引领产业结构向低碳、环保方向加速转型,推动经济社会的可持续发展。加强产学研用协同创新,推动数字技术与传统产业深度融

合,培育绿色低碳发展新动能。

第四,加强城市数智融合,推动智慧城市建设。利用大数据的精准分析能力、量子计算的超高速运算能力以及数字孪生的实时模拟与预测技术,提升城市治理的智能化与精细化水平。进一步优化城市资源的配置效率,确保各项服务能够精准对接需求,同时有效减少不必要的资源错配,促进城市的可持续发展。通过智慧环保、智慧交通、智慧能源等项目的实施,提高城市运行效率和减污降碳能力,推动智慧城市建设不断走深向实。

第五,结合地理区位特征,实施区域差异化政策。针对不同区域和城市的实际情况,实施差异化的减污降碳政策。对于资源型城市、大气污染防治重点城市、非低碳城市试点以及东北地区等特定区域,应给予更多的政策支持和资源倾斜,更加精准、高效地推进全国的减污降碳工作。同时,鼓励这些区域和城市积极探索适合自身特点的减污降碳路径和模式,注重总结和推广各地的先进经验,推动各地之间开展交流合作,形成优势互补、协同发展的良好局面。

参考文献:

[1]邓慧慧,刘宇佳,王强.中国数字技术城市网络的空间结构研究:兼论网络型城市群建设[J].中国工业经济,2022(9):121-139.

[2]吴树义.信息工具赋能碳市场的功能定位及效能保障[J].中国人口·资源与环境,2024,34(3):30-38.

[3]杜龙政,赵云辉,陶克涛,等.环境规制、治理转型对绿色竞争力提升的复合效应:基于中国工业的经验证据[J].经济研究,2019,54(10):106-120.

[4]张华.地区间环境规制的策略互动研究:对环境规制非完全执行普遍性的解释[J].中国工业经济,2016(7):74-90.

[5]上官绪明,葛斌华.科技创新、环境规制与经济高质量发展:来自中国278个地级及以上城市的经验证据[J].中国人口·资源与环境,2020,30(6):95-104.

[6]赵云辉,张哲,冯泰文,等.大数据发展、制度环境与政府治理效率[J].管理世界,2019,35(11):119-132.

[7]薛澜,张慧勇.第四次工业革命对环境治理体系建设的影响与挑战[J].中国人口·资源与环境,2017,27(9):1-5.

[8]盛丹,卜文超.机器人使用与中国企业的污染排放[J].数量经济技术经济研究,2022,39(9):157-176.

[9]杨思莹,李政,李嘉辰.工业智能化转型的环境效应及其机制研究[J].南开经济研究,2023(11):186-209.

[10]杜雯翠,毛赢.人工智能背景下环境治理与社会保障的协同推进研究[J].中国工业经济,2024(6):42-60.

[11]张国兴,邓娜娜,管欣,等.公众环境监督行为、公众环境参与政策对工业污染治理效率的影响:基于中国省级面板数据的实证分析[J].中国人口·资源与环境,2019,29(1):144-151.

[12]许宪春,任雪,常子豪.大数据与绿色发展[J].中国工业经济,2019(4):5-22.

[13]王钰,王建新.“震慑”还是“依靠”:地理距离对企业环境信息披露质量的影响[J].中国人口·资源与环境,2024,34(4):91-102.

[14]李肆,赵静.环境治理中的数字赋能与监管效率提升:基于人工替代的视角[J].中国人口·资源与环境,2023,33(8):130-137.

[15]张琦,邹梦琪.环境治理垂直改革的效果、基层机制与影响因素[J].经济研究,2022,57(8):172-190.

[16]贾俊雪,罗理恒,顾嘉.地方政府环境规制与经济高质量发展[J].中国工业经济,2023(5):99-117.

[17]易兰,杨田恬,杜兴,等.减污降碳协同路径研究:典型国家驱动机制及对中国的启示[J].中国人口·资源与环境,2022,32(9):53-65.

[18]马莹莹,姚文艳,姜玲,等.绿色金融改革创新试验区政策对城市减污降碳的影响及作用机制[J].中国人口·资源与环境,2024(6):45-55.

[19]张雪纯,曹霞,宋林壕.碳排放交易制度的减污降碳效应研究:基于合成控制法的实证分析[J].自然资源学报,2024,39(3):712-730.

[20]孙博文,郑世林.环境规制的减污降碳协同效应:来自清洁生产标准实施的准自然实验[J].经济学(季刊),2024,24(2):624-642.

[21]刘亦文,邓楠.环境保护税是否有效释放了四重红利效应?[J].中国人口·资源与环境,2023,33(10):35-46.

[22]李子豪,赵元,夏子谦.环保督政与地区减污降碳协同治理绩效提升:基于环保约谈的准自然实验估计[J].中国软科学,2023(12):198-207.

[23]宋德勇,陈梁,王班班.环境权益交易如何实现减污降碳协同增效:理论与经验证据[J].数量经济技术经济研究,2024,41(2):171-192.

[24]罗良文,雷朱家华.中国碳市场政策的减污降碳协同效应[J].资源科学,2024,46(1):53-68.

- [25]王芝炜,孙慧,张贤峰,等.用能权交易制度能否实现减污降碳的双重环境福利?[J].产业经济研究,2023(4):15-26.
- [26]于贵瑞,郝天象,朱剑兴.中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J].中国科学院院刊,2022,37(4):423-434.
- [27]张瑜,孙倩,薛进军,等.减污降碳的协同效应分析及其路径探究[J].中国人口·资源与环境,2022,32(5):1-13.
- [28]袁晓玲,郝继宏,钟楚潮,等.中国城市“减污降碳”协同驱动因素及实现路径研究[J].管理学报,2023,36(4):26-46.
- [29]余泳泽,孙鹏博,宣烨.地方政府环境目标约束是否影响了产业转型升级?[J].经济研究,2020,55(8):57-72.
- [30]李红霞,郑石明,要蓉蓉.环境与经济目标设置何以影响减污降碳协同管理绩效?[J].中国人口·资源与环境,2022,32(11):109-120.
- [31]王慧,孙慧,肖涵月,等.碳达峰约束下减污降碳的协同增效及其路径[J].中国人口·资源与环境,2022,32(11):96-108.
- [32]马彦瑞,刘强.新型城镇化建设的减污降碳效应[J].中国人口·资源与环境,2024,34(1):33-45.
- [33]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.
- [34]ALBRIZIO S, KOZLUK T, ZIPPERER V. Environmental policies and productivity growth: evidence across industries and firms[J]. Journal of environmental economics and management, 2017(81):209-226.
- [35]陈晓红,张嘉敏,唐湘博.中国工业减污降碳协同效应及其影响机制[J].资源科学,2022,44(12):2387-2398.
- [36]钟顺昌,焦怡萌,闫程莉,等.建设用地资源空间集聚对减污降碳协同的影响机制[J].地理学报,2024,79(3):688-711.
- [37]于潇,林建鑫.公众环境关注是否促进减污降碳协同增效?:来自居民与企业的机制考察[J].西安财经大学学报,2024,37(3):55-67.
- [38]姜钰卿,唐旭,任凯鹏,等.基于双层嵌套SDA的中国减污降碳驱动因素研究[J].系统工程理论与实践,2022,42(12):3294-3304.
- [39]陶锋,赵锦瑜,周浩.环境规制实现了绿色技术创新的“增量提质”吗:来自环保目标责任制的证据[J].中国工业经济,2021(2):136-154.
- [40]刘金科,肖翊阳.中国环境保护税与绿色创新:杠杆效应还是挤出效应?[J].经济研究,2022,57(1):72-88.
- [41]张娟,耿弘,徐功文,等.环境规制对绿色技术创新的影响研究[J].中国人口·资源与环境,2019,29(1):168-176.
- [42]董直庆,王辉.环境规制的“本地—邻地”绿色技术进步效应[J].中国工业经济,2019(1):100-118.
- [43]LIU H, ZAFAR M W, SINHA A, et al. The path to sustainable environment: do environmental taxes and governance matter? [J]. Sustainable development, 2023,31(4):2278-2290.
- [44]SHARIF A, KARTAL M T, BEKUN F V, et al. Role of green technology, environmental taxes, and green energy towards sustainable environment: insights from sovereign Nordic countries by CS-ARDL approach[J]. Gondwana research, 2023(117):194-206.
- [45]FÄRE R, GROSSKOPF S, PASURKA C A. Environmental production functions and environmental directional distance functions[J]. Energy, 2007,32(7):1055-1066.
- [46]OH D H. A metafrontier approach for measuring an environmentally sensitive productivity growth index [J]. Energy economics, 2010,32(1):146-157.
- [47]刘华军,田震.绩效视角下减污降碳协同效应的量化评估及提升路径[J].资源科学,2024,46(7):1239-1251.
- [48]郭沛,梁栋.低碳试点政策是否提高了城市碳排放效率:基于低碳试点城市的准自然实验研究[J].自然资源学报,2022,37(7):1876-1892.
- [49]许健,季康先,刘晓亭,等.工业机器人应用、性别工资差距与共同富裕[J].数量经济技术经济研究,2022,39(9):134-156.
- [50]黄勃,李海彤,刘俊岐,等.数字技术创新与中国企业高质量发展:来自企业数字专利的证据[J].经济研究,2023,58(3):97-115.
- [51]史丹,李少林.排污权交易制度与能源利用效率:对地级及以上城市的测度与实证[J].中国工业经济,2020(9):5-23.
- [52]袁淳,肖土盛,耿春晓,等.数字化转型与企业分工:专业化还是纵向一体化[J].中国工业经济,2021(9):137-155.

(本文责编:希文)