引用格式：綦勇，孟宪慧，白婷婷，等. 城市数实融合能否促进减污降碳协同发展——理论机制和实证检验[J]. 技术经济，2026，45(11)：52-66.

Qi Yong, Meng Xianhui, Bai Tingting, et al. Can urban digital-real integration promote the synergistic development of pollution and carbon reduction: Theoretical mechanisms and empirical test[J]. Journal of Technology Economics, 2026, 45(11): 52-66.

城市数实融合能否促进减污降碳协同发展

——理论机制和实证检验

綦 勇[1]，孟宪慧[1]，白婷婷[2]，肖伯文[1]

（1. 东北大学工商管理学院，沈阳 110167；2. 扬州大学商学院，扬州 225127）

摘 要：在环境污染日益加剧和实现碳达峰碳中和目标的矛盾下，数字经济和实体经济的融合能否成为减污降碳协同发展的新引擎，是当前亟待探究的重要议题。根据2011—2023年中国265个地级及以上城市的面板数据，通过构建双向固定效应回归模型，实证检验了数实融合对减污降碳协同发展的影响效应及作用机制。研究结果表明：数实融合显著促进减污降碳协同发展，在缓解内生性问题和进行稳健性检验后结论仍显著成立。异质性分析部分的结果显示，数实融合对协同减污降碳的影响效果在东部地区、非资源型城市和环境规制力度较弱的地区更明显。机制检验部分，从地区产业层面的结构变化和公众外部监督的角度进行分析，深入探究了数实融合影响协同减污降碳的具体作用渠道，发现数实融合通过促进产业结构升级和提升公众环境关注程度，改善减污降碳协同治理水平。研究结论不仅为实现碳达峰碳中和目标提供实践路径，同时也对强化数实融合的环境治理效应具有一定的指导意义。

关键词：数字经济；实体经济；协同减污降碳；产业结构升级；公众环境关注；耦合协调度模型

中图分类号：F205 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-980X(2026)11-0052-15

DOI：10.12404/j.issn.1002-980X.J26032620

一、引言

如今，世界各国面临着环境恶化的威胁。但是与发达国家相比，发展中国家的环境管制成本更大、绿色技术创新动力匮乏，公众环境意识淡薄，环境治理成效并不显著[1]。作为全球最大的发展中国家和碳排放大国，中国经济增速放缓和环境负担加剧的矛盾较为突出。工业化建设过程中排放出大量污染物和CO_2，导致难以逆转的环境污染和气候变暖问题。对此，中国提出“力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的战略部署。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》也明确要求，坚持源头防治、综合施策，强化多污染物协同控制和区域协同治理。协同减污降碳的可行之处在于，碳排放和污染排放具有“同根同源同过程”的根本属性，因此以“同频同效同路径”协同减少排放将会显著提升环境治理效率[2-5]。

然而，协同减污降碳的现实情况与政策目标之间仍存在一定差距。首先，中国的环境治理体系较为复杂，如政治锦标赛制度导致的分权问题阻碍地区之间协同减排，环境管制的负外部性加剧了行政边界地区的排放，从而减弱了地区整体的减排效果[6]。其次，企业作为减排的关键角色，其进行减污降碳的内生动力

收稿日期：2026-03-26

基金项目：教育部人文社会科学基金规划项目“数字经济背景下数据互通抑制平台限制交易行为的作用机理及规制研究”(23YJA790062)；国家自然科学基金青年科学基金项目“不确定性视角下碳交易与环境税的交互效果评估及协同优化设计”(72304063)；国家自然科学基金面上项目“渠道异质背景下实体零售商再选址的形成机理、应对策略及规制研究”(71873027)

作者简介：綦勇(1969—)，博士，东北大学工商管理学院教授，博士研究生导师，研究方向：数字化转型；(通信作者)孟宪慧(2001—)，东北大学工商管理学院硕士研究生，研究方向：数实融合；白婷婷(1996—)，博士，扬州大学商学院讲师，研究方向：数字经济；肖伯文(1991—)，博士，东北大学工商管理学院讲师，研究方向：环境经济。

不足，可能的原因是减排所需的绿色技术创新成本昂贵，清洁技术的未来收益难以抵消前期研发的投入，并且创新具有高度的不确定性。在此背景下，为了实现环境可持续发展，亟须从技术融合角度探究实体部门减污降碳的可行路径[7]。数字经济与实体经济深度融合所塑造出的新业态和新的低碳技术模式为实现协同减污降碳提供新的可能，成为环境治理的有效手段[8]。

在数字技术的驱动下，数字经济与实体经济如何实现深度融合，以及数实融合能否促进低碳转型，成为学术界广泛探讨的核心议题。党的二十大报告指出，加快发展数字经济，促进数字经济和实体经济深度融合。以数据要素为核心的数实融合凭借其渗透性贯穿并重塑生产、仓储、配送再到销售的各环节，循环效率的提高将促进源头、过程和末端的协同减排，这与减污降碳的治理路径较为契合，使数实融合成为实现减污降碳的关键力量[9]。具体而言，实体部门所产生的排放数据在区块链和物联网技术下形成可视化数据集，有助于精准分析和预测能源消耗，为科学划分企业的碳配额和排污权提供解决方案，助力减污降碳提质增效。尽管碳污同源的特性为协同减排提供了现实基础[10]，但不容忽视的是，污染物分布范围广泛并且极易扩散至其他地区，导致减排责任归属不明晰，增加了部门或地区间统筹管理的难度。通过智能设备和数据交易平台追溯污染来源，可以明确减排职责，从而提升协同减污降碳的治理效果。面对日益恶化的环境问题对社会造成的负面影响，探究实现减污降碳的可行路径显得尤为迫切。统筹谋划减污降碳协同治理的基本方略，是当前必须解决的现实难题，也是降低环境管控成本和建设美丽中国的核心要义。然而，学术界尚缺乏对数实融合与协同减污降碳之间因果关系的实证检验，因此本文提出如下亟待回答的问题：数字经济和实体经济的融合能否促进减污降碳协同发展？数实融合通过哪些影响渠道实现协同减污降碳效应？分别对不同情况进行探讨，是否会得出异质性结论？

本文的边际贡献可能体现在以下方面：其一，研究视角方面，立足中国碳达峰碳中和战略导向，为深入推进美丽中国建设提供学理支撑。通过将数实融合与协同减污降碳纳入同一分析框架，拓宽了数字经济的研究边界，指明实现协同减污降碳的可行路径。其二，影响机制方面，解构了数实融合影响减污降碳的“机制黑箱”。不同于以往文献，本文分别从地区产业结构升级和公众环境关注的影响渠道，探讨产业转型和外部利益相关者如何强化数实融合的减污降碳效应，从而证实了数实融合对环境治理的现实意义。其三，通过对不同地理区位、资源禀赋及环境规制力度的城市进行分组回归，拓展分析数实融合影响减污降碳的异质性效果，旨在为企业和政府制定环境治理政策提供有益启示。

二、文献回顾

（一）数实融合的研究现状

数实融合指的是大数据、物联网等数字技术全方位渗透并重塑实体经济的过程，从而颠覆传统的经济发展范式，形成不同于传统意义的新型实体经济[11]。一方面，学者认为数实融合可以理解为数字技术和实体经济的融合，即依托于网络平台，信息技术使产业链上的企业由地理集聚向虚拟集聚转变，形成线上与线下融合的新形态[12]。另一方面，还可以理解为数字经济和实体经济的融合，数字经济逐渐成为实体经济转型升级的动力源泉，为实体经济提供新技术、新模式和新业态，拓宽生产可能性边界；实体产业也为发展数字经济提供了大量数据和基础设施支撑。从微观到宏观，数实融合的表现形式可以分为：数据要素与传统要素的融合、企业数字化转型、产业数字化和数字产业化，以及数字经济和实体经济的融合。由于分析角度的差异，数实融合也可以采用不同的方法进行计算。从微观层面，根据企业引用“数字产业”专利的次数衡量数实产业技术融合程度，此方法精准捕捉了数字产业知识在实体产业融合扩散的特征，为深入分析企业层面的数实融合行为提供了新的思路[13]。学者还采用文本分析法，将企业年报里企业数字化转型词频作为企业数字化转型的代理指标[14-15]。Meng 等[16]利用投入产出法测算工业行业的数实融合程度，并将数实融合分为数字产品部门与工业部门融合、数字服务部门与工业部门融合，进一步探讨了不同类型的数实融合对工业绿色转型的异质性影响。张帅等[17]构建了数字经济和实体经济评价指标体系，通过熵值法计算不同指标对系统的贡献程度，并测算数字经济系统和实体经济系统的耦合协调度，从而反映出中国各省的数实融合发展水平。

与本文相近的一支文献探讨了数实融合对绿色转型的影响,发现数实融合助力企业[18]和地区[19]实现绿色创新,对工业行业的绿色转型具有正向促进作用[16],还改善了各省绿色发展效率[20]。不仅如此,数实融合的影响还将波及其他地区,Guo等[21]通过实证分析发现,数实融合不但提升本地区的绿色全要素生产率,还通过空间溢出效应增加了邻近地区的绿色全要素生产率。

数字经济和实体经济的融合可以优化能源表现,从而影响减污降碳水平。已有文献发现网络或数字基础设施建设[22-23]和数字经济[24-27]有助于降低能源强度并改善能源效率。Wang等[28]发现数实产业技术融合通过促进技术进步和人工智能发展,显著提高全要素能源生产率。Shi等[29]通过实证分析表明,人工智能通过增强R&D活动、优化资源配置和增加融资机会来驱动能源技术创新。除此之外,作为排放主要来源的制造业如果能够实现绿色转型,将促进减污降碳协同增效。既有文献证实了制造业企业数字化转型有助于减少污染排放[30]和降低碳排放量[31]。

(二)协同减污降碳的研究现状

2001年,联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)首次提出"协同效益",即缓解气候变化的同时还应该解决其他环境问题。"降碳"指的是降低CO_2等温室气体排放;"减污"指的是减少环境污染(NO_x、SO_2和$PM_{2.5}$等污染物);"协同"减污降碳指的是减污的过程中减少碳排放,或在降碳的同时实现污染物的减排。已有文献认为单一政策不仅能够减少特定排放,还应协同控制目标之外的其他类型排放[2],实现减污降碳协同发展。一方面,"降碳"政策协同实现"减污"效应。Goforth和Nock[32]发现温室气体的管制政策达到显著的减污效果。Yan等[33]借助双重差分法进行实证分析,认为碳排放权交易机制不仅减少碳排放,还将协同减少$PM_{2.5}$浓度。另一方面,"减污"政策协同实现"降碳"效应。Qian等[34]指出,治理大气污染的同时还将降低碳排放量。

从减污降碳的实现路径来看,数字经济[35]和数字金融[4]通过促进技术创新和产业结构升级,实现减污降碳协同发展。减污降碳协同治理涉及源头、过程和末端的全过程,数字经济从源头降低能源消耗强度、促进公众环境参与,还有助于在末端加强排放管控[36]。另外人工智能通过发挥技术效应和替代效应,达到协同减污降碳的效果[37]。微观层面的分析发现,数据要素集聚所导致的技术效应和结构效应显著影响减污降碳的协同程度[38]。公共数据开放通过增加生产效率、驱动数字化转型及提高公众环境关注程度,为协同实现减污降碳提供新的渠道[39]。还有学者指出,数字经济与碳排放并不只是简单的线性相关,可能还具有倒U型关系和空间溢出效应[40-41],可能的原因是数字技术的建设和应用会导致大量的能源需求和电力消耗,从而引发的增碳效应和降碳效应的相对强弱将影响环境治理效果[42]。

也有文献从环境规制政策的角度探究了协同减污降碳的实现路径。已有研究论证了环境权益交易[2]、低碳城市试点[43]及新能源示范城市[44]等政策在协同降低碳排放和污染排放方面的影响效果。孙博文和郑世林[45]将历年实施的清洁生产标准作为一项准自然实验,从源头预防、过程控制和末端治理的作用渠道分析了该项环境政策的减污降碳效应。不仅如此,近年来,自愿性环境规制政策对减污降碳的作用效果得到学术界的证实,其核心内容是通过市场机制激励企业自愿参与某项环境规制政策。步晓宁和赵丽华[46]实证发现政府节能采购政策通过改善能源投入结构、实现技术创新和提升污染处理能力,使得企业的污染排放明显降低。

(三)数实融合的减污降碳效应研究现状

鲜有文献对数实融合和减污降碳之间的逻辑关系进行直接探讨,但其他相关文献为本文提供了理论基础。数字产业化和产业数字化是数实融合在产业层面的表现形式[11]。学者从地理空间的角度厘清数字产业化与减污降碳协同治理的内在联系,发现随着地理距离的增加,数字产业化对减污降碳的影响效果逐渐减弱[47]。不仅如此,Xu等[8]发现城市层面的数实融合改善了低碳生产、生活和生态水平,从而实现城市低碳发展。作为数实融合核心支撑体系的数字基础设施不但可以促进经济增长,还有助于降低碳排放强度[48]。减排效率是衡量环境表现的重要指标,Yang等[49]实证检验了数实融合对碳排放效率的提升效果,其中的作用渠道是产业结构升级和缓解自然资源约束。Pang等[9]则从绿色技术创新、产业结构升级和能源消耗强度的影响路径,证实了数实融合对绿色减排效率的正向影响。在环境污染方面,Wang等[28]基于企业、

政府和公众协同治理的理论框架，分析了数实产业技术融合通过拓宽知识宽度、增强技术吸收能力和技术扩散能力，显著降低企业污染排放。王薇和梁超[50]认为企业的人工智能投入将有效减少污染排放，且在东部地区和大规模企业的减排效果更明显。

（四）文献评述

已有文献对数实融合的环境效应展开了深入研究，但仍存在如下不足之处：学者证实了数实融合对单独碳排放或者污染排放的影响效应[6,9]，但是忽略了不同排放物之间的相互影响对实证结果可能造成的偏误。对此，本文通过构建耦合协调度模型将“减污”“降碳”整合为耦合系统，量化了“减污降碳”的协同发展水平。除此之外，尽管部分文献关注到了数字经济[40]、市场机制和环境政策[51-52]对减污降碳协同发展的促进效果，然而鲜有文献将数字经济和实体经济融合作为切入点论证减污降碳的驱动路径，这为本文提供了拓展分析的空间。

三、理论分析与研究假设

（一）数实融合对减污降碳协同发展的直接影响

随着数字经济和实体经济融合程度的持续加深，数实融合逐渐融入生产、分配、流通和消费等经济循环各环节[53]，实现从源头防控、过程控制和末端治理协同减少碳排放和污染排放。在生产环节，数字技术助力企业精准捕捉消费者偏好，还提高了其柔性生产能力，使各部门能够根据市场情况动态调整策略，从而减少库存冗余所造成的能源浪费[54]。不仅如此，数据要素的迭代性为产品设计、改进生产工艺提供了数据支撑，优化了资源利用效率，实现从源头减少能源消耗和各类排放[16]。

通过大数据技术智能规划产品配送路径，将有效降低尾气排放，从而在一定程度上缓解地区的空气污染。事实上，碳排放和污染排放贯穿供应链的各个环节[55]，借助智能设备对采购、产品制造和销售、废物处置全过程的排放情况进行实时监测，将驱动传统供应链向绿色化、低碳化转型[56-57]，还可以实现碳足迹的精细化管理。数字交互平台将增强供应链上下游之间的协作水平和排放信息透明度，极大地缓解供应链的“牛鞭效应”，从而规避了供应链下游需求信息向上游传递过程中逐级放大的偏差，减少供需错配导致的额外排放[58]。

基于此，本文提出假设：

数实融合促进减污降碳协同发展（H1）。

（二）数实融合、产业结构升级和协同减污降碳

产业结构理论指出，产业结构升级指的是原有要素或资源从配置效率低的产业转移到配置效率高的产业的过程[59]，本文将其分为“产业内部效率提升”和“产业结构转型”两个维度。在产业内部，数实融合重塑传统产业的发展模式，形成智慧农业、低碳制造和线上消费等数字化应用场景[9]，从源头缓解排放问题。具体而言，通过物联网实时采集分析土壤墒情和农作物养分含量等数据，为精准施肥、精准灌溉提供决策支撑，从而最大限度地降低土壤污染，加快农业的绿色化转型；低碳工厂通过算法模型识别无效能耗，实时调整不同工序的能源分配方案，显著提升能源利用效率；电商直播和移动支付等数字消费新业态，不仅可以优化商品配置效率，还通过供需匹配改善了资源浪费现象。

在产业结构转型的过程中，数实融合通过发挥资源配置和调控的作用，引导能源、劳动力等关键生产要素向低碳产业转移[60]。高污染和低附加值的企业由于低效率而被迫退出市场，地区产业体系逐渐向低能耗和低排放的清洁产业转型，从而为协同减污降碳提供新的动能。另外，数字技术应用所形成的数据融通和价值交换等效果，不但加速了不同产业之间的融合，还促进第二产业向第三产业演化[61]。在此情况下，制造业逐步实现智能化、精细化和服务化生产，颠覆传统的粗放型发展模式，从而使得碳排放量和污染排放量明显降低。第三产业的要素资源和底层技术渗透到传统产业，引导传统产业摆脱对化石能源的依赖，最后促进产业低碳转型[62]。除此之外，数实融合通过将资源有序引导到具有比较优势的地区或产业，优化产业空间布局，促进产业协同集聚，使得不同城市可以共享低碳技术、环境管制政策和人力资本等信息，进一步提升减污降碳治理效果[8]。

基于此,本文提出假设:

数实融合通过促进产业结构升级,实现减污降碳协同发展(H2)。

(三)数实融合、公众环境关注和协同减污降碳

在互联网尚未普及时,公众对环境情况的获取渠道较为有限,缺乏对环境污染负外部性的深度了解,因此难以依托公众环境关注对企业排放进行约束。数字经济和实体经济的深度融合重塑了公众的消费偏好[63],线上媒体平台通过宣传环境相关知识使得公众认识到低碳消费的意义,树立资源节约型的消费理念,并主动制定绿色低碳的消费决策[43],从需求侧实现协同降低碳排放和污染排放。从利益相关者的角度来看,社会监督能够对企业违法排放产生威慑效果,消费者对绿色产品的强烈需求及环境信息披露对企业融资的重要程度,将激励污染企业开发清洁技术并提高能源利用效率,助力实现减污降碳协同增效[39]。

中国致力于构建"政府为主导、企业为主体、社会组织和公众共同参与的环境治理体系",公众参与逐渐成为环境治理体系的重要组成部分,可以和正式环境规制形成互补效应[36],协同强化对碳排放和环境污染的惩治力度。数字基础设施和通信设备的普及使得公众可以实时获取空气质量信息和排放数据,线上政务服务平台则为公众的环境诉求提供了便捷的渠道,从反馈污染情况到实施管制的效率显著提升,因此激发了公众参与环境治理的积极性。由此可见,公众环境关注不仅通过倒逼机制促进企业绿色转型,还将督促各级政府履行环境治理职责,政府、企业和公众将形成完善的环境治理体系,通过多方协作缓解碳排放和污染排放[28]。

基于此,本文提出假设:

数实融合通过提升公众环境关注,实现减污降碳协同发展(H3)。

四、研究设计

(一)模型构建

1. 基准回归模型

为了探究数实融合与减污降碳协同发展之间的因果关系,构建回归模型如式(1)所示。

$$SRPC_{it}=\alpha_0+\alpha_1 DRI_{it}+\sum_j \gamma_j Controls_{jit}+\mu_i+\delta_t+\varepsilon_{it} \tag{1}$$

其中:i 和 t 分别为城市和年份;j 为控制变量数;被解释变量 $SRPC$ 为减污降碳协同水平;核心解释变量 DRI 为数实融合;$Controls$ 为控制变量组;μ_i 和 δ_t 分别为城市固定效应和年份固定效应;ε_{it} 为随机扰动项;α、γ 为待估系数。

2. 中介效应模型

借鉴江艇[64]提出的中介效应检验方法,通过理论分析阐明中介变量如何影响被解释变量后,构建回归模型如式(2)所示,实证分析自变量和中介变量之间的因果关系,从而证实所提出的研究假设。

$$M_{it}=\omega_0+\omega_1 DRI_{it}+\sum_j \tau_j Controls_{jit}+\mu_i+\delta_t+\varepsilon_{it} \tag{2}$$

其中:M_{it} 为中介变量,分别表示产业结构升级和公众环境关注。如果上述模型中数实融合的回归系数显著为正($\omega_1>0$),则表明中介效应成立,即数实融合通过促进产业结构升级和提升公众环境关注程度,实现减污降碳协同发展。

3. 耦合协调度模型

数实融合是数字经济与实体经济相互渗透、相互作用的长期动态过程,反映了数字经济系统和实体经济系统之间协调发展的程度[17]。减污系统和降碳系统分别是环境治理的子系统,并且两者之间具有动态耦合的关系。因此,可以通过耦合协调度模型计算中国各城市的数实融合程度和减污降碳协同发展水平[4,9],耦合协调度的计算方法如式(3)~式(5)所示。

$$C=2\times\sqrt{\frac{Z_a Z_b}{(Z_a+Z_b)^2}} \tag{3}$$

$$T=aZ_a+bZ_b \tag{4}$$

$$D = \sqrt{CT} \tag{5}$$

其中：数实融合耦合协调度模型的 Z_a 为数字经济系统；Z_b 为实体经济系统；C 为数字经济系统和实体经济系统的耦合值，取值范围为[0,1]；T 为数字经济和实体经济的综合评价指数；a 和 b 为待定权重系数，且满足 $a+b=1$。已有文献指出，数字经济和实体经济在经济发展中可以看作同等重要的领域，因此 a 和 b 的取值都设为 0.5[17]。D 为数字经济系统和实体经济系统的耦合协调程度，此数值可以衡量本文的核心解释变量数实融合，D 的数值越大，表明数字经济和实体经济的协同发展程度更深。

在减污降碳耦合协调度模型中，Z_a 为降碳系统；Z_b 为减污系统。借鉴已有文献的做法[4]，规定待定权重系数 $a=b=0.5$。D 为降碳系统和减污系统的耦合协调度，用来衡量减污降碳协同水平（*SRPC*），D 的数值越大，该城市的减污降碳协同治理效果越显著。

（二）变量选取

1. 被解释变量

减污降碳协同水平（*SRPC*），即降碳系统和减污系统的耦合协调度值。首先，计算城市碳排放强度，并对其进行正向标准化处理，以此衡量降碳系统。不同地区的碳排放规模、经济基础具有明显差异，因此与碳排放总量相比，碳排放强度更能反映该城市碳排放的真实情况[65]。天然气、液化石油气和电力是碳排放的主要来源，因此将这三类能源消费量折算为碳排放量[66-67]。为了增强结论的可信性，在稳健性检验部分选取中国碳核算数据库（CEADs）的碳排放数据重新进行回归分析。计算方法如式（6）所示。

$$CO_2 = C_1 + C_2 + C_3 = kE_1 + vE_2 + \varphi\eta E_3 \tag{6}$$

其中：CO_2 为碳排放总量；E_1 为天然气消费量；E_2 为液化石油气消费量；E_3 为全社会用电量；k、v 和 φ 分别为天然气的 CO_2 排放因子（2.1622 $kgCO_2/m^3$）、液化石油气的 CO_2 排放因子（3.1013 $kgCO_2/kg$）和煤电燃料链温室气体排放因子（1.3203 $kgCO_2/kW \cdot h$）；η 为煤电在总发电量中的占比，具体数据来源于《中国电力年鉴》。

通过计算碳排放总量和地区 *GDP* 的比值得出碳排放强度，再采用式（7）对其进行正向标准化。

$$C = \frac{\max CI - CI}{\max CI - \min CI} \tag{7}$$

其中：*CI* 为各城市的碳排放强度；*C* 为标准化后的碳排放强度；max*CI* 和 min*CI* 分别为碳排放强度的最大值和最小值。

其次，计算减污综合评价指数。本文将标准化处理后的工业 SO_2 排放量、工业废水排放量和工业烟尘排放量整合成减污系统，通过熵值法得出各城市的减污程度[3,68]。

最后，借助耦合协调度模型计算降碳系统和减污系统的协同发展水平。

2. 解释变量

本文的核心解释变量为数实融合（*DRI*）。熵值法可以客观衡量不同指标对系统的贡献程度，因此通过熵值法测算数字经济系统和实体经济系统的综合评价指数[21,69-70]，具体指标见表 1。随后，使用耦合协调度模型计算数字经济和实体经济的融合水平。具体地，数字经济系统选取了互联网用户数、电信业务总量和数字普惠金融等变量，这些指标综合反映了数字经济发展情况；从规模、结构和效率的角度较为全面地评价该地区的实体经济现状，从而为准确计算数实融合水平提供基础。

3. 中介变量

产业结构升级（*indus*）：借鉴相关文献[71]的方法，使用第二、第三产业的增加值之和占地区生产总值的比值测度产业结构升级。如果第二产业和第三产业在地区生产总值所占的份额更大，则意味着地区产业结构升级效果更明显。

公众环境关注（*ea*）：采用百度雾霾搜索指数进行衡量[72]。以“雾霾”为关键词的百度搜索频次可以反映公众对环境的关注程度，环境污染严重的地区，公众对雾霾的搜索可能更频繁，即公众环境关注度更高。并且雾霾是影响空气质量的关键因素，相对于其他污染物而言，有更强的环境感知度，因此将百度雾霾搜索指数作为代理指标具有合理性。

表1　数实融合指标体系

	维度	一级指标	二级指标	指标属性
数实融合指标体系	数字经济系统	互联网普及率	每百人互联网用户数	正向
		互联网相关从业人员数	信息传输、计算机服务和软件业从业人员数量占比	正向
		互联网相关产出	人均电信业务总量	正向
		移动互联网用户数	每百人移动电话用户数	正向
		数字金融普惠发展	中国数字普惠金融指数	正向
	实体经济系统	实体经济规模	规模以上工业企业数量	正向
			人均社会消费品零售总额	正向
		实体经济结构	除金融业和房地产业外的实体经济从业人数占比	正向
			第二产业增加值占GDP的比值	正向
		实体经济产出效率	规模以上工业企业利润总额	正向

4. 控制变量

本文还控制了可能影响回归结果的其他变量：经济发展水平（*pgdp*），使用人均地区生产总值衡量；政府干预程度（*gid*），使用地方一般公共预算支出占地区生产总值的比值衡量；基础设施水平（*area*），使用城市人均道路面积衡量；劳动力规模（*labor*），使用单位从业人员数的对数衡量；金融发展水平（*fina*），使用年末金融机构贷款余额与地区生产总值的比值衡量；科技支出水平（*tech*），使用地方一般公共预算支出中科学技术支出占比衡量。变量定义见表2。

表2　变量定义

变量类型	变量名称	变量符号	变量定义
被解释变量	减污降碳协同水平	*SRPC*	构建降碳和减污系统的耦合协调度模型
解释变量	数实融合	*DRI*	构建数字经济和实体经济系统的耦合协调度模型
控制变量	经济发展水平	*pgdp*	人均地区生产总值
	政府干预程度	*gid*	地方一般公共预算支出占地区生产总值的比值
	基础设施水平	*area*	城市人均道路面积
	劳动力规模	*labor*	ln（单位从业人员数）
	金融发展水平	*fina*	年末金融机构贷款余额占地区生产总值的比值
	科技支出水平	*tech*	地方一般公共预算支出中科学技术支出占比
中介变量	产业结构升级	*indus*	第二、第三产业的增加值之和占地区生产总值的比值
	公众环境关注	*ea*	百度雾霾搜索指数

（三）数据来源和描述性统计

由于数据可获取性和连续性的限制，将中国265个地级及以上城市在2011—2023年所形成的面板数据作为研究样本，数据来源于《中国城市统计年鉴》《中国电力年鉴》、各地区统计年鉴和CEADs数据库。数字普惠金融指数来源于北京大学数字金融研究中心。本文对样本的缺失数据采用插值法填补。

从表3可以看出，不同城市之间的减污降碳协同发展水平差距明显。数实融合的均值为0.3302，最大值仅为0.7447，表明大部分城市的数实融合尚处于初级阶段，融合水平有待提升。

表3　描述性统计

变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
SRPC	3445	0.9730	0.0276	0.0989	0.9970
DRI	3445	0.3302	0.0804	0.1485	0.7447
pgdp	3445	5.8097	3.3024	0.1163	26.3514
gid	3445	0.1962	0.0919	0.0439	0.9155
area	3445	19.0403	7.9176	2.4000	60.0700
fina	3445	1.1118	0.6454	0.1322	7.4502
labor	3445	3.6730	0.8709	0.9300	7.0188
tech	3445	0.0183	0.0185	0.0001	0.2068

五、实证分析

（一）基准回归结果

为了探究数实融合能否促进减污降碳协同发展，对基准回归模型进行实证检验。表4展示了逐步加入不同控制变量的基准回归结果。（1）列没有加入任何控制变量，可以发现数实融合的回归系数为0.1138，且

表 4　基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	SRPC	*SRPC*	*SRPC*	*SRPC*	*SRPC*	*SRPC*	*SRPC*
DRI	0.1138***	0.0833***	0.0722***	0.0716***	0.0743***	0.0734***	0.0732***
	(0.0140)	(0.0163)	(0.0168)	(0.0168)	(0.0169)	(0.0169)	(0.0171)
pgdp		0.0011***	0.0009***	0.0009***	0.0008***	0.0008**	0.0008**
		(0.0003)	(0.0003)	(0.0003)	(0.0003)	(0.0003)	(0.0003)
gid			−0.0275***	−0.0308***	−0.0331***	−0.0287***	−0.0287***
			(0.0105)	(0.0105)	(0.0106)	(0.0108)	(0.0108)
area				−0.0002***	−0.0002***	−0.0002***	−0.0002***
				(0.0001)	(0.0001)	(0.0001)	(0.0001)
labor					−0.0025*	−0.0023*	−0.0023*
					(0.0014)	(0.0014)	(0.0014)
fina						−0.0029**	−0.0029**
						(0.0012)	(0.0012)
tech							0.0035
							(0.0356)
_cons	0.9354***	0.9391***	0.9491***	0.9546***	0.9633***	0.9660***	0.9661***
	(0.0046)	(0.0047)	(0.0061)	(0.0064)	(0.0080)	(0.0081)	(0.0081)
年份固定	是	是	是	是	是	是	是
城市固定	是	是	是	是	是	是	是
样本量	3445	3445	3445	3445	3445	3445	3445
R^2	0.6363	0.6378	0.6386	0.6394	0.6398	0.6404	0.6404

注：***、**、*分别表示 1%、5%、10%的显著性水平；括号内为标准误。

在 1%的水平上显著为正。(2)列~(6)列为逐步加入其他控制变量的结果，数实融合的回归系数仍显著为正，表明数实融合能够正向促进减污降碳协同发展。(7)列是基准模型的回归结果，数实融合的回归系数是正向显著的，证实了数实融合对减污降碳协同发展的正向影响，研究假设 H1 成立。基准回归结果为后续分析提供了一定的基础。

(二)内生性检验

尽管使用的双向固定效应模型能够缓解模型的内生性，并且在回归模型中控制了可能影响实证结果的其他变量，但是仍需进一步处理潜在的内生性问题。使用工具变量法是解决内生性问题的可行途径，工具变量需要满足相关性和排他性。相关性指的是工具变量和解释变量显著相关；排他性要求工具变量不直接影响被解释变量。

首先，选取的工具变量 IV_1 是 1984 年各地区每百人固定电话数和上一年电信业务总量的交乘项[69,73]。固定电话是互联网技术发展的基础，前期固定电话使用频繁的地区，说明用户对通信的需求更大，为数实融合提供了用户基础，因此历史固定电话数和当期数实融合水平具有相关性。另外，现代通信技术更迭迅速，历史固定电话数难以影响当前减污降碳协同水平，表明工具变量满足排他性要求。由于该工具变量为横截面形式，需要引入一个随时间变化的变量形成面板数据[74]，本文引入的时间变量是上一年电信业务总量。从表 5 的(1)列可以看出，在第一阶段回归中，IV_1 显著正向影响数实融合水平。第二阶段的回归结果见(2)列，数实融合的回归系数在 1%的水平上显著为正，说明在缓解内生性问题后，数实融合仍能显著促进减污降碳协同发展。

其次，选取的工具变量 IV_2 是 1984 年各地区每百万人邮局数量和上一年电信业务总量的交乘项[75]。在互联网尚未得到应用的情况下，邮局系统是通信往来的重要渠道。邮局的分布情况可能影响后期数字基础设施建设，而数字基础设施是数实融合的典型表现形式，因此历史邮局数量和数实融合水平具有较强的相关性。另外，当前互联网通信逐渐取代邮局的作用，历史邮局数量对现阶段减污降碳的影响非常微弱，符合排他性要求。从表 5 的(3)列可以看出，IV_2 正向促进数字经济和实体经济的深度融合。(4)列是该工具变量第二阶段的回归结果，说明在考虑内生性问题后，数实融合对协同减污降碳的影响仍然是正向显著的，研究结论具有稳健性。

最后，选取同年度其他城市的数实融合平均水平和滞后一期数实融合的交乘项，作为工具变量 IV_3[53]。同年度其他城市的数实融合将会形成空间溢出效应和示范学习效应，从而显著促进该城市的数实融合水平，前期的数实融合基础也影响当期数实融合程度，因此 IV_3 满足相关性。与此同时，其他城市的数实融合水平并不直接改善本地区减污降碳治理效果，所以工具变量具有外生性。表5的(5)列和(6)列的回归结果可以证明结论是稳健的。

(三)稳健性检验

1. 替换被解释变量

已有文献认为，构建碳排放量和污染排放量的交乘项可以反映减污降碳协同治理的整体性和系统性，并符合“碳污同源”理论[44]。首先，将基准回归中的被解释变量替换为降碳系统和减污系统的交乘项（$SRPC_1$），重新进行回归。其次，由于降碳和减污被视为环境治理体系中同等重要的组成部分[4]，本文对降碳系统和减污系统赋予相同的权重（$a=b=0.5$），再对加权后的数值求和，作为新的被解释变量（$SRPC_2$）。最后，考虑到碳排放数值是根据不同能源折算得出，为排除测算误差对回归结果的影响，重新更换碳排放的数据来源为CEADs数据库，并通过熵值法计算减污指数（变量同前文）[3]，减污系统和降碳系统的耦合协调度值可以衡量减污降碳协同水平（$SRPC_3$）。稳健性检验结果见表6的(1)列~(3)列，可以发现数实融合的回归系数都通过了显著性检验，证实本文的研究结论。

表5　内生性检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	DRI	*SRPC*	*DRI*	*SRPC*	*DRI*	*SRPC*
IV_1	0.0122*** (0.0015)					
IV_2			0.0001*** (0.0000)			
IV_3					1.3528*** (0.0409)	
DRI		0.4137*** (0.1265)		0.3725*** (0.0805)		0.2252*** (0.0347)
pgdp	0.0076*** (0.0003)	−0.0018* (0.0010)	0.0076*** (0.0003)	−0.0015** (0.0007)	0.0036*** (0.0003)	−0.0005 (0.0004)
gid	−0.1402*** (0.0108)	0.0198 (0.0212)	−0.1347*** (0.0107)	0.0140 (0.0159)	−0.0806*** (0.0098)	0.0007 (0.0121)
area	−0.0000 (0.0001)	−0.0002** (0.0001)	−0.0000 (0.0001)	−0.0002** (0.0001)	0.0001 (0.0001)	−0.0001* (0.0001)
labor	0.0056*** (0.0014)	−0.0044*** (0.0017)	0.0050*** (0.0014)	−0.0042*** (0.0015)	0.0013 (0.0013)	−0.0038** (0.0015)
fina	−0.0023* (0.0013)	−0.0023* (0.0013)	−0.0019 (0.0013)	−0.0024* (0.0013)	−0.0034*** (0.0012)	−0.0030** (0.0013)
tech	0.3042*** (0.0363)	−0.0999* (0.0536)	0.2822*** (0.0358)	−0.0874** (0.0442)	0.1009*** (0.0336)	0.0014 (0.0395)
Kleibergen-Paap rk LM	28.292 <0.000>		48.583 <0.000>		228.337 <0.000>	
Kleibergen-Paap rk Wald *F*	24.192 {16.38}		31.323 {16.38}		284.974 {16.38}	
年份固定	是	是	是	是	是	是
城市固定	是	是	是	是	是	是
样本量	3445	3445	3445	3445	3180	3180

注：***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平；( )内为标准误，< >内数值为Kleibergen-Paap rk LM统计量的 P，{ }内数值为Stock-Yogo弱识别检验10%水平上的临界值。

表 6　稳健性检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	$SRPC_1$	$SRPC_2$	$SRPC_3$	$SRPC$	$SRPC$	$SRPC$
DRI	0.2338***	0.1212***	0.0732*		0.0519***	0.0708***
	(0.0378)	(0.0196)	(0.0374)		(0.0170)	(0.0187)
DRI_1				0.0034**		
				(0.0017)		
$pgdp$	0.0015**	0.0008**	0.0016***	0.0010***	0.0008**	0.0007*
	(0.0007)	(0.0004)	(0.0006)	(0.0003)	(0.0003)	(0.0004)
gid	−0.1071***	−0.0547***	−0.0035	−0.0367***	−0.0201*	−0.0347***
	(0.0238)	(0.0124)	(0.0245)	(0.0106)	(0.0105)	(0.0131)
$area$	−0.0010***	−0.0005***	−0.0002	−0.0002***	−0.0002**	−0.0001*
	(0.0002)	(0.0001)	(0.0002)	(0.0001)	(0.0001)	(0.0001)
$labor$	−0.0046	−0.0023	−0.0085**	−0.0020	−0.0003	0.0018
	(0.0031)	(0.0016)	(0.0036)	(0.0014)	(0.0014)	(0.0015)
$fina$	0.0045*	0.0024*	0.0029	−0.0031**	−0.0033***	−0.0024*
	(0.0027)	(0.0014)	(0.0024)	(0.0012)	(0.0012)	(0.0013)
$tech$	0.0157	0.0031	−0.0629	0.0224	0.0223	0.0440
	(0.0787)	(0.0409)	(0.0621)	(0.0353)	(0.0346)	(0.0361)
$_cons$	0.8654***	0.9300***	0.9555***	0.9816***	0.9640***	0.9453***
	(0.0180)	(0.0093)	(0.0190)	(0.0071)	(0.0079)	(0.0230)
年份固定	是	是	是	是	是	是
城市固定	是	是	是	是	是	是
省份×年份固定	否	否	否	否	否	是
样本量	3445	3445	1824	3445	3393	3445
R^2	0.7658	0.7666	0.8584	0.6388	0.6331	0.3746

注：***、**、*分别表示 1%、5%、10%的显著性水平；括号内为标准误。

2. 更改解释变量计算方法

在基准回归模型中，通过熵值法计算数字经济系统和实体经济系统的综合评价水平。为了检验回归结果的准确性，借助主成分分析法进行降维，重新测度数字经济和实体经济指数[69]，再对两者赋予相同的权重并求和，以此计算数实融合水平（DRI_1）。从表 6 的（4）列可以看出，采用不同方法测度解释变量并未改变本文结论，说明数字经济和实体经济的融合显著促进减污降碳协同增效。

3. 剔除特殊样本

选取的样本为中国 265 个地级及以上城市，但是在经济发展水平、环境管制力度和创新环境等方面，其他城市和 4 个直辖市可能存在显著差距，从而导致数实融合程度和减污降碳治理情况也明显不同。对此，剔除 4 个直辖市的样本重新进行回归[76]，相应的回归结果见表 6 的（5）列。结果显示，数实融合仍然在 1%的水平上显著促进减污降碳协同增效，表明基准回归模型是稳健的。

4. 增加交互固定效应

基准回归模型控制了年份固定效应和不随年份变化的城市固定效应，旨在控制不可观测因素对实证结果的影响。为了增强模型的稳健性，在控制双向固定效应的基础上，进一步设定省份与年份交互固定效应，以排除省份层面的系统性变化[77]。表 6 的（6）列展示了增加固定效应的回归结果，数实融合的回归系数仍显著为正，再次证实了数实融合对协同减少碳排放和污染排放的正向影响效应。

（四）异质性分析

1. 区域异质性

各地区的经济基础和发展模式不同，因此数实融合对减污降碳协同发展的影响效应也可能存在异质性。根据官方的地区分类标准，将样本分为东部地区和中西部地区进行异质性分析。表 7 的（1）列和（2）列为区域异质性的回归结果，通过对比分析发现数实融合回归系数的显著性水平并不相同，组间系数差异检验的结果表明东部地区和中西部地区具有显著差异。出现此结果可能的原因是东部地区的数实融合建设情况较为完善，先进的污染处理技术和丰厚的资金支持为协同实现降碳和减污创造了有利条件。山西等中

西部地区煤炭等资源丰富,能源开采导致大量碳排放和污染排放,因此数实融合对这些地区的环境治理效果稍显不足。

2. 资源禀赋异质性

资源禀赋决定着地区的能源结构和资源利用方式,从而影响碳排放和污染排放水平。为深入分析不同资源禀赋属性能否对数实融合的减污降碳效应造成异质性影响,根据《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》所规定的城市类别,将样本分为资源型城市和非资源型城市进行分组回归[78]。从表7可以看出,(3)列的数实融合回归系数在1%的水平上显著为正,表明数实融合能够正向促进非资源型城市的减污降碳协同水平。但是表7的(4)列中,数实融合对资源型城市未能达到减污降碳效果。对此可能的解释是非资源型城市的资源相对匮乏,绿色转型的内生动力不足。在此情况下数字经济和实体经济的深度融合助力挖掘潜在的可利用资源,并促使资源开采和使用的全过程实现绿色化、清洁化转型。而资源型城市由于自身资源基础良好,在产业转型的过程中形成了特有的资源利用模式,能源利用效率长期处于较高的水平,数实融合对协同减污降碳的影响效应并不显著。

3. 环境规制强度异质性

环境规制力度的强弱将影响城市的环境治理情况,所在地区的环境规制力度越强,企业越有可能约束自身碳排放和环境污染行为。借鉴胡洁等[79]的研究方法,测算城市所属省份的工业污染治理投资完成额占第二产业的比值来衡量环境规制强度,将样本根据中位数分为环境规制力度较弱和环境规制力度较强两组。从表7的(5)列和(6)列可以发现,在环境规制力度较弱的地区,数实融合有利于碳排放和污染排放的协同减少,且回归系数在1%的水平上显著为正。在环境规制力度较强的地区,尽管数实融合对减污降碳为正向影响,但未通过显著性检验。出现上述情况的原因在于,如果环境规制政策宽松,可能导致企业和个人的低碳意识较差,其浪费能源的行为将会增加排放,更会“吸引”其他城市的污染转移,因此数实融合对这类地区减污降碳的边际效应更强。在环境规制力度较强的地区,碳排放和污染排放即将达到最低限度,数实融合难以影响减污降碳的协同发展程度。综上所述,数实融合可以补充环境规制方面的不足,在环境规制力度较弱的地区发挥的减污降碳效应更明显。

表7　异质性分析

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	东部地区	中西部地区	非资源型城市	资源型城市	环境规制较弱	环境规制较强
DRI	0.1020***	0.0519**	0.1184***	−0.0022	0.0957***	0.0482
	(0.0199)	(0.0251)	(0.0259)	(0.0130)	(0.0144)	(0.0380)
pgdp	−0.0003	0.0011**	0.0019***	0.0002	−0.0000	0.0017**
	(0.0004)	(0.0005)	(0.0006)	(0.0002)	(0.0003)	(0.0007)
gid	−0.0553***	−0.0296**	−0.0389**	−0.0183***	−0.0281***	−0.0369*
	(0.0190)	(0.0138)	(0.0185)	(0.0070)	(0.0101)	(0.0213)
area	−0.0003***	−0.0001	−0.0004***	−0.0000	−0.0002***	−0.0002
	(0.0001)	(0.0001)	(0.0001)	(0.0001)	(0.0001)	(0.0002)
labor	0.0036**	−0.0047**	−0.0026	0.0007	−0.0021**	−0.0028
	(0.0018)	(0.0019)	(0.0021)	(0.0011)	(0.0010)	(0.0037)
fina	0.0005	−0.0049***	−0.0085***	0.0020***	−0.0010	−0.0038*
	(0.0017)	(0.0017)	(0.0023)	(0.0008)	(0.0015)	(0.0021)
tech	−0.0043	0.0275	−0.0231	0.0094	0.0225	−0.1064
	(0.0391)	(0.0542)	(0.0509)	(0.0306)	(0.0236)	(0.1522)
_cons	0.9339***	0.9824***	0.9561***	0.9731***	0.9624***	0.9699***
	(0.0102)	(0.0116)	(0.0129)	(0.0058)	(0.0066)	(0.0191)
年份固定	是	是	是	是	是	是
城市固定	是	是	是	是	是	是
样本量	1300	2145	2171	1274	2223	1222
R^2	0.6957	0.6259	0.6280	0.8007	0.6997	0.6010
组间系数差异检验	0.0500*		0.1206***		0.0475*	

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平;括号内为标准误。

（五）影响机制分析

1. 产业结构升级效应

产业结构升级作为中介变量的回归结果见表 8 的（1）列和（2）列。（2）列在（1）列的基础上控制年份固定效应和城市固定效应，可以发现数实融合的回归系数均显著为正，表明研究假设 H2 成立，即数实融合通过促进产业结构升级，实现减污降碳协同发展。数字经济和实体经济的深度融合，不仅带动低端产业向服务业转型，还培育出一系列低碳产业和绿色产业集群，从而降低了碳排放和污染排放。

2. 公众环境关注效应

为证明研究假设 H3，将公众环境关注作为中介变量进行机制检验。从表 8 的（3）列和（4）列可以看出，数实融合通过提升公众环境关注，促进减污降碳协同发展。大数据、互联网等平台，不仅为公众搜索和了解环境污染情况提供新的方式，还增加了环境信息透明度，从而吸引更多社会组织和公众关注环境治理问题，从外部监督的角度倒逼企业和政府各司其职地履行减污降碳责任。

表 8　机制检验结果

变量	（1）	（2）	（3）	（4）
	indus	*indus*	*ea*	*ea*
DRI	22.7355***	9.8192***	8.0892***	1.7035***
	（2.5466）	（1.5681）	（0.4360）	（0.2543）
pgdp	0.3900***	0.1673***	−0.0585***	−0.0106**
	（0.0505）	（0.0290）	（0.0087）	（0.0047）
gid	−33.1255***	−21.7674***	0.0181	−1.1678***
	（1.2511）	（0.9892）	（0.2142）	（0.1604）
area	−0.0038	0.0156**	0.0009	−0.0025**
	（0.0125）	（0.0077）	（0.0021）	（0.0012）
labor	−0.3032*	0.4026***	0.5054***	0.0834***
	（0.1691）	（0.1267）	（0.0290）	（0.0206）
fina	1.7934***	−0.3077***	0.1481***	0.0176
	（0.1627）	（0.1134）	（0.0279）	（0.0184）
tech	27.5878***	8.4122**	−6.4663***	0.8530
	（6.5060）	（3.2664）	（1.1138）	（0.5298）
_cons	83.6076***	86.6615***	−1.0861***	2.6030***
	（0.7097）	（0.7466）	（0.1215）	（0.1211）
年份固定	否	是	否	是
城市固定	否	是	否	是
样本量	3445	3445	3445	3445
R^2	0.5283	0.9622	0.4662	0.9616

注：***、**、*分别表示 1%、5%、10%的显著性水平；括号内为标准误。

六、结论与政策建议

（一）结论

本文在测度 2011—2023 年中国 265 个地级市数实融合程度和减污降碳协同发展水平的基础上，深入分析了数字经济和实体经济的融合对协同减污降碳的影响效应。研究结论如下：数实融合显著促进碳减排和污染减排的协同增效。在进行中介效应分析后发现，产业结构升级和公众环境关注是数实融合促进减污降碳的影响渠道。从所属地区、资源禀赋情况和环境规制力度方面的异质性分析发现，在东部地区、非资源型城市和环境规制力度较弱的城市，数实融合对减污降碳协同治理的影响效果更显著。

（二）政策建议

第一，着力通过数字经济和实体经济的深度融合实现减污降碳协同发展。激发数据要素活力，使其深度嵌入到供应链的全链条和生产的各环节，通过发挥数据要素的乘数效应和溢出效应提升资源配置效率，从而减少能源浪费。有效利用数实融合释放的红利，从源头、过程和末端对碳排放和污染排放实施精准控制，以达到减污和降碳协同治理的目标。从源头限制企业和个人的排放行为，尤其对重污染企业应该加强排放监管，还必须从生产的源头优化能源配置结构和能源利用效率，从而降低碳排放和污染排放。同时，通过科学合理利用能源、开发清洁能源促进绿色转型，并最大限度地减少化石能源的投入。从过程角度来看，应该对大气污染物和温室气体实施精细化管理，制定具体的排放限额规定。还可以通过市场机制重新分配碳排放权和排污权，激励企业的自发减排行为。在末端环节，通过碳捕集、碳利用和碳封存技术实现温室气体的资源化再利用，并结合数字技术对大气污染、土壤污染等其他类型污染物进行处置。

第二，政府应该谋篇布局、统筹协调，因地制宜、精准施策。为了强化各级政府的环境责任意识，将地区环境质量和数字化发展水平纳入官员绩效表现评价体系，促使各级政府根据具体情况制定数实融合战略规划和减污降碳治理方略。根据本文异质性分析得出的结论，数实融合对东部地区减污降碳的影响效应更明显，因此应该借助“东数西算”工程加强低碳技术和清洁生产技术的协同研发，并通过向中西部地区分享可行的减排经验，提升区域之间的协同减排成效。除此之外，亟须加快互联网和其他数字技术的应用普及，扩大数实融合对环境和经济的综合影响效应。

第三,倡导通过多方协作拓宽协同减污降碳的有效路径。强化大气污染物和温室气体的综合治理、系统治理和协同治理,既发挥减污政策的降碳效应,又兼顾降碳政策的减污效应,实现政策组合之间的相互促进。构建政府、企业和公众协同治理体系,通过内部管制和外部监督提升减污降碳治理效率。同时,引导各部门加强绿色技术创新力度,对企业开展绿色转型提供技术和融资支持,并为跨部门乃至跨行业的技术协同研发提供平台。此外,积极塑造绿色产业和低碳产业,从而形成减污降碳的新业态和新模式,还应该注重传统产业的转型升级,淘汰落后产业和高能耗产业。还应切实提升公众环境关注程度,带动社会组织和公众参与环境治理,使得企业主动降低排放,从而促进减污降碳协同增效。

参考文献

[1] HU J, ZHANG H, IRFAN M. How does digital infrastructure construction affect low-carbon development? A multidimensional interpretation of evidence from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 396: 136467.

[2] 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.

[3] 陆敏, 徐好, 陈福兴. "双碳"背景下碳排放交易机制的减污降碳效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(11): 121-133.

[4] ZHANG Y X, CHEUNG A, QU X D. Can digital financial inclusion promote the coupling coordination between pollution reduction and low-carbon development? Evidence from China[J]. Economic Analysis and Policy, 2024, 82: 1113-1130.

[5] GUAN Y, XIAO Y, RONG B, et al. Assessing the synergy between CO_2 emission and ambient PM2.5 pollution in Chinese cities: An integrated study based on economic impact and synergy index[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 99: 106989.

[6] 余典范, 龙睿, 王超. 数字经济与边界地区污染治理[J]. 经济研究, 2023, 58(11): 172-189.

[7] 朱俏俏, 靳春丽, 李征帛. 数实融合能否助推工业减污降碳协同增效? ——基于信息产业与工业的前后向关联考察[J]. 南方经济, 2025(2): 68-96.

[8] XU Z H, XU W H, XIN D L. Digital-real economy integration and urban low-carbon development in China[J]. Economic Analysis and Policy, 2025, 86: 606-621.

[9] PANG G G, LI L, GUO D. Does the integration of the digital economy and the real economy enhance urban green emission reduction efficiency? Evidence from China[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 122: 106269.

[10] 孙博文, 杨霄斐. 竞争政策的减污降碳协同效应——基于《反垄断法》实施的准自然实验[J]. 数量经济技术经济研究, 2025, 42(2): 172-194.

[11] 陈雨露. 数字经济与实体经济融合发展的理论探索[J]. 经济研究, 2023, 58(9): 22-30.

[12] 王如玉, 梁琦, 李广乾. 虚拟集聚: 新一代信息技术与实体经济深度融合的空间组织新形态[J]. 管理世界, 2018, 34(2): 13-21.

[13] 黄先海, 高亚兴. 数实产业技术融合与企业全要素生产率——基于中国企业专利信息的研究[J]. 中国工业经济, 2023(11): 118-136.

[14] 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.

[15] 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.

[16] MENG X N, XU S C, HAO M G. Can digital-real integration promote industrial green transformation: Fresh evidence from China's industrial sector[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 426: 139116.

[17] 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, 42(7): 22-32.

[18] 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, 2023, 200: 123097.

[19] 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.

[20] LIU B L, HUANG Y J, CHEN M M, et al. Towards sustainability: How does the digital-real integration affect regional green development efficiency?[J]. Economic Analysis and Policy, 2024, 83: 42-59.

[21] GUO D, LI L, PANG G G. Does the integration of digital and real economies promote urban green total factor productivity? Evidence from China [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370: 122934.

[22] HONG J J, SHI F Y, ZHENG Y H. Does network infrastructure construction reduce energy intensity? Based on the "Broadband China" strategy [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2023, 190: 122437.

[23] WANG L H, SHAO J. The energy saving effects of digital infrastructure construction: Empirical evidence from Chinese industry[J]. Energy, 2024, 294: 130778.

[24] 冯兰刚, 阳文丽, 王忠, 等. 中国数字经济与城市碳排放强度: 时空演化与作用机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(1): 150-160.

[25] SONG M L, PAN H T, VARDANYAN M, et al. Evaluating the energy efficiency-enhancing potential of the digital economy: Evidence from China [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 344: 118408.

[26] WANG L H, SHAO J. Digital economy, entrepreneurship and energy efficiency[J]. Energy, 2023, 269: 126801.

[27] LEI P, LI X Y, YUAN M K. The consequence of the digital economy on energy efficiency in Chinese provincial and regional contexts: Unleashing

the potential[J]. Energy, 2024, 311: 133371.
[28] WANG Y F, SHI M, LIU J N, et al. Environmental pollution management effects of technological convergence between digital and real economy industries: A perspective of tripartite co-governance by company, government, and public[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 501: 145201.
[29] SHI R B, SHAN W, EVANS R, et al. Artificial intelligence-driven energy technology innovation: Dynamic impact and mechanism exploration [J]. Energy Economics, 2025, 147: 108541.
[30] ZHAO S, ZHANG L Q, PENG L, et al. Enterprise pollution reduction through digital transformation? Evidence from Chinese manufacturing enterprises[J]. Technology in Society, 2024, 77: 102520.
[31] CHEN J, GUO Z G, LEI Z J. Research on the mechanisms of the digital transformation of manufacturing enterprises for carbon emissions reduction [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 449: 141817.
[32] GOFORTH T, NOCK D. Air pollution disparities and equality assessments of US national decarbonization strategies[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 7488.
[33] YAN Y X, ZHANG X L, ZHANG J H, et al. Emissions trading system (ETS) implementation and its collaborative governance effects on air pollution: The China story[J]. Energy Policy, 2020, 138: 111282.
[34] QIAN H Q, XU S D, CAO J, et al. Air pollution reduction and climate co-benefits in China's industries[J]. Nature Sustainability, 2021, 4(5): 417-425.
[35] 李俊明, 魏雯琪, 张鹏, 等. 中国市域数字经济发展对减污降碳协同的促进效应及其空间分异[J]. 经济地理, 2023, 43(12): 169-180.
[36] GUO L X, YUE S J. Impact of digital economy on co-benefits of air pollution reduction and carbon reduction: Evidence from Chinese cities[J]. Urban Climate, 2024, 58: 102189.
[37] 张秀武, 沈洋. 人工智能对减污降碳协同治理的影响效应及作用机制研究[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2025, 45(5): 77-94.
[38] 石虹, 余少龙. 数据要素聚集的减污降碳效应及空间溢出效应研究[J]. 软科学, 2025, 39(1): 108-115.
[39] WU D S, XIE Y. Unveiling the impact of public data access on collaborative reduction of pollutants and carbon emissions: Evidence from open government data policy[J]. Energy Economics, 2024, 138: 107822.
[40] XIE B, LIU R, DWIVEDI R. Digital economy, structural deviation, and regional carbon emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 434: 139890.
[41] ZHENG R J, WU G, CHENG Y, et al. How does digitalization drive carbon emissions? The inverted U-shaped effect in China[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 102: 107203.
[42] 屠西伟, 张平淡. 企业数字化转型、碳排放与供应链溢出[J]. 中国工业经济, 2024(4): 133-151.
[43] WANG P, HAN W, RIZVI S K A, et al. Is Digital Adoption the way forward to Curb Energy Poverty?[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2022, 180: 121722.
[44] 姜浩, 邓峰. 新能源示范城市建设的减污降碳协同治理效应研究[J]. 软科学, 2025, 39(7): 60-69.
[45] 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.
[46] 步晓宁, 赵丽华. 自愿性环境规制与企业污染排放——基于政府节能采购政策的实证检验[J]. 财经研究, 2022, 48(4): 49-63.
[47] PENG J C, ZHOU M, YI M, et al. Unveiling the impact of digital industrialization on synergistic governance of pollution and carbon reduction in China: A geospatial perspective[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 31(25): 36454-36473.
[48] ZHANG W K, FAN H X, ZHAO Q W. Seeing green: How does digital infrastructure affect carbon emission intensity?[J]. Energy Economics, 2023, 127: 107085.
[49] YANG X H, WANG H J, YAN T, et al. The road to inclusive green growth in China: Exploring the impact of digital-real economy integration on carbon emission efficiency[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370: 122989.
[50] 王薇, 梁超. 人工智能对企业污染排放的影响效应研究[J]. 改革, 2024(11): 72-83.
[51] 王娇, 孙慧, 廖振良, 等. 碳减排"双试点"政策能否发挥"减污降碳试验田"效能[J]. 技术经济, 2024, 43(10): 124-139.
[52] 程时雄, 陈慧, 汤李琛, 等. 绿色金融试点政策与企业碳排放——来自重污染企业的证据[J]. 技术经济, 2025, 44(9): 111-125.
[53] 张洪胜, 杜雨彤, 张小龙. 产业数字化与国内大循环[J]. 经济研究, 2024, 59(5): 97-115.
[54] 蒋为, 倪诗程, 彭淼. 数实融合与企业出口产品策略优化: 基于柔性生产视角[J]. 世界经济, 2024, 47(5): 3-33.
[55] MALACINA I, KIMPIMÄKI J, ARMINEN H, et al. Decoupling firm growth from carbon emissions: A supply network role perspective[J]. Journal of Operations Management, 2025, 71(8): 1143-1164.
[56] 刘海建, 胡化广, 张树山, 等. 供应链数字化的绿色创新效应[J]. 财经研究, 2023, 49(3): 4-18.
[57] LIN B Q, TENG Y Q. Synergistic disparities of pollution reduction and carbon mitigation in the industrial chain: Evidence from China's industrial sector[J]. Environmental Research, 2024, 248: 118226.
[58] WANG S, LI J Y. How carbon emission trading mechanism and supply chain digitization affect manufacturing enterprises' competitiveness? Evidence from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 452: 142164.
[59] 干春晖, 郑若谷, 余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. 经济研究, 2011, 46(5): 4-16,31.
[60] 李秋香, 李泽阳, 王宗宪. 抑制还是促进? 数字经济赋能生产性服务业与制造业融合发展研究[J]. 技术经济, 2026, 45(1): 1-18.
[61] 戴魁早, 黄姿, 王思曼. 数字经济促进了中国服务业结构升级吗?[J]. 数量经济技术经济研究, 2023, 40(2): 90-112.

[62] 王宏森，周辉，何冬妮. 制造业服务化对碳强度的影响研究[J]. 技术经济，2022，41(2)：96-107.
[63] ZHAO F，LI R R，WU Z Y，et al. Can the integration of digital and real economies stimulate residents' consumption?[J]. International Review of Financial Analysis，2025，103：104260.
[64] 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.
[65] BAI T T，QI Y，LI Z H，et al. Digital economy，industrial transformation and upgrading，and spatial transfer of carbon emissions：The paths for low-carbon transformation of Chinese cities[J]. Journal of Environmental Management，2023，344：118528.
[66] 韩峰，谢锐. 生产性服务业集聚降低碳排放了吗？——对我国地级及以上城市面板数据的空间计量分析[J]. 数量经济技术经济研究，2017，34(3)：40-58.
[67] 任晓松，刘宇佳，赵国浩. 经济集聚对碳排放强度的影响及传导机制[J]. 中国人口·资源与环境，2020，30(4)：95-106.
[68] 肖挺，叶浩. 洋垃圾进口禁令与区域环境污染[J]. 经济学(季刊)，2025，25(4)：1035-1052.
[69] 赵涛，张智，梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据[J]. 管理世界，2020，36(10)：65-76.
[70] 罗意，汤志伟，贺宇. 大数据综合试验区建设能否促进数实融合——基于中国227个城市的实证分析[J]. 技术经济，2026，45(1)：19-29.
[71] 徐胜，赵欣欣，姚双. 绿色信贷对产业结构升级的影响效应分析[J]. 上海财经大学学报，2018，20(2)：59-72.
[72] 吴力波，杨眉敏，孙可哿. 公众环境关注度对企业和政府环境治理的影响[J]. 中国人口·资源与环境，2022，32(2)：1-14.
[73] 孙倩，李国祥，薛进军. 数字经济发展缓解碳排放不平等——来自偏向性技术进步的证据[J]. 中国人口·资源与环境，2025，35(6)：16-26.
[74] NUNN N，QIAN N. US food aid and civil conflict[J]. American Economic Review，2014，104(6)：1630-1666.
[75] 黄群慧，余泳泽，张松林. 互联网发展与制造业生产率提升：内在机制与中国经验[J]. 中国工业经济，2019(8)：5-23.
[76] 谢谦，金才淇，刘维刚. 数实技术融合与企业出口韧性[J]. 管理世界，2025，41(12)：21-37，72，38-48.
[77] 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.
[78] 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，2024，34(6)：45-55.
[79] 胡洁，于宪荣，韩一鸣. ESG评级能否促进企业绿色转型？——基于多时点双重差分法的验证[J]. 数量经济技术经济研究，2023，40(7)：90-111.

Can Urban Digital-real Integration Promote the Synergistic Development of Pollution and Carbon Reduction：Theoretical Mechanisms and Empirical Test

Qi Yong[1]，Meng Xianhui[1]，Bai Tingting[2]，Xiao Bowen[1]
(1. School of Business Administration，Northeastern University，Shenyang 110167，China；
2. Business School，Yangzhou University，Yangzhou 225127，China)

Abstract：Facing the contradiction between increasing environmental pollution and China's "carbon peaking and carbon neutrality" targets，whether digital-real integration (DRI) can become a new engine for synergistic reduction of pollution and carbon emissions (SRPC) is an important issue that needs to be explored urgently. Based on panel data from 265 Chinese cities at or above prefecture level from 2011 to 2023，the Two-Way fixed effects model was constructed to analyze the influence and mechanisms of DRI on SRPC. The results show that DRI significantly promotes SRPC，and the conclusion remains significantly valid after addressing potential endogeneity issues and conducting robustness tests. Heterogeneity analysis indicates that the positive effects of DRI on SRPC are more pronounced in the eastern regions，non-resource-based cities，as well as areas with weak environmental regulation. In the part of mechanism tests，the specific channels through which DRI affects SRPC are deeply explored from the perspectives of structural changes at the regional industrial level and public external supervision，and it is found that DRI improves SRPC by upgrading industrial structure and enhancing public environmental attention. The research conclusions not only provide a practical path to achieve "carbon peaking and carbon neutrality" goals，but also have guiding significance for deepening the environmental governance effects of digital-real integration.

Keywords：digital economy；real economy；synergistic reduction of pollution and carbon emissions；industrial structure upgrading；public environmental attention；coupling coordination degree model