

数字经济空间关联网络对减污降碳的影响机制研究

王淑贺, 刘世哲, 李晓敏

摘要: 数字经济空间关联发展不仅是弥合“数字鸿沟”的重要举措, 更是重塑经济空间发展格局的关键力量。在环境质量改善与温室气体减排的双重压力下, 研究数字经济空间关联发展如何影响减污降碳具有重要的现实意义。本文基于城市网络视角, 以 2011—2021 年中国 279 个城市为样本, 在考察数字经济空间关联网络时空演变特征的基础上, 实证研究了数字经济空间关联网络对减污降碳的影响。研究发现: 中国城市数字经济整体上呈现出“中心—边缘”的网络形态与“东高西低”的空间分异特征, 污染排放强度、碳排放强度与减污降碳协同水平都有所改善。数字经济空间关联网络显著促进了减污降碳, 且兼具减污降碳协同效应。该结论在采用外生政策冲击、工具变量等方法进行稳健性和内生性检验后仍然成立。机制检验表明, 数字经济空间关联网络能够通过产业结构合理化与高级化、绿色技术创新和经济集聚降低碳排放强度和污染排放强度, 促进减污降碳协同增效。异质性结果表明, 数字经济空间关联网络对资源型地区、中心城市以及数字经济政策试点地区的减污、降碳及减污降碳协同效应更加突出。研究结论为实现减污降碳、加强生态文明建设提供了重要引导。

关键词: 数字经济; 空间关联网络; 网络节点中心性; 减污降碳; 协同效应

中图分类号: F205-39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2025)02-0105-15

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.20250228.003

一、引言

当前, 中国经济社会发展已进入加快绿色化、低碳化的高质量发展阶段, 然而生态环境保护结构性、根源性、趋势性压力总体上尚未根本缓解。生态环境部发布的《2023 中国生态环境状况公报》显示, 2023 年中国仍有 40.1% 的城市环境空气质量未达标。国际能源署发布的《2023 年二氧化碳排放量报告》指出, 2023 年中国的碳排放量达到了 120.4 亿吨。面对环境质量改善与温室气体减排的双重压力与迫切需求, 协同推进减污降碳成为中国全面绿色转型的必然选择。2022 年生态环境部等七部门联合印发的《减污降碳协同增效实施方案》提出, 要协同推进减污降碳。2024 年政府工作报告指出, 要协同推进降碳、减污、扩绿、增长, 加强生态文明建设。

数字经济作为一种新的经济形态, 可以克服行政边界束缚, 使各地域单元不再是“场所空间”环境下的孤岛, 而是成为“流动空间”的节点^[1], 以更多元的方式建立连接, 形成数字经济空间关联网络, 呈现出“牵一发而动全身”的发展格局^[2]。2022 年 3 月, 十三届全国人大五次会议审查的计划报告中提出实施的“东数西算”工程就是典型体现。该项工程是将东部算力需求有序引

基金项目: 国家社会科学基金后期资助项目“绿色转型背景下新能源汽车发展的阻滞与突破路径研究”(21FJYB014)

作者简介: 王淑贺, 河南大学经济学院 (河南 开封 475000); 刘世哲, 河南大学经济学院; 李晓敏 (通讯作者), 河南大学经济学院, 13513787780@163.com。

导到资源丰富的西部地区,形成一条数据在东、算力在西的东西串联动力线,促进东西部数字经济协同联动发展。数字经济空间关联网络是不同地域单元之间因数字技术、数据资源和信息平台等数字资源的流动和共享所形成的关联关系集合^{[2][3]},可以增强技术、数据等生产要素的跨区域流动性,扩展经济活动的互动空间,在弥合区域间“数字鸿沟”的同时重塑经济空间发展格局,为实现减污降碳迎来新的契机。在此背景下,本文探讨数字经济空间关联网络对减污降碳的影响,以期为中国全面绿色转型、建设美丽中国提供理论与实践参考。

二、文献综述

近年来,如何有效实现减污降碳成为学界关注的热点问题。与本文密切相关的文献主要探讨了数字化发展对减污降碳的影响。有学者研究表明,数字经济可以有效抑制污染和碳排放^[4],发挥减污降碳协同效应^[5]。Liu等^[6]从微观企业视角,实证研究发现数字化转型可以显著促进污染和碳排放协同增效。刘耀彬等^[7]基于长江经济带108个城市的数据,研究发现数字产业集聚显著促进了减污降碳,且兼具减污降碳协同效应。韩冬日等^[8]基于中国省级面板数据,研究发现数字技术对减污降碳协同增效存在正向影响。韩先锋等^[9]研究发现数字金融发展具有显著的协同减排效应。

数字化时代,流动空间成为配置资源的底层逻辑^[2]。随着数字要素的空间流动,城市间的数字经济逐渐呈现出相互交织的空间关联形态。目前,已有学者利用探索性空间数据分析和空间计量模型探讨了数字经济的空间相关性和溢出效应^[10]。然而,这两种方法是以“属性数据”为基础展开的研究,仅能反映数字经济在地理邻接地区之间的空间效应,无法揭示数字经济跨边界交互的空间关联形态。因此,学界开始基于“关系数据”,利用社会网络分析法从省域尺度上对数字经济的空间关联网络结构进行刻画,发现数字经济空间关联网络呈“中心-边缘”结构形态,东部地区在空间网络结构中占据优势地位^[11]。此外,还有学者进一步探讨了数字经济空间关联网络的红利效应^[3]。与本文密切相关的文献考察了数字经济空间关联网络对碳排放的影响。徐妍等^[12]研究发现数字经济空间关联网络可以有效减少碳排放强度。徐妍等^[13]研究发现中国城市数字经济现已呈现出明显的网络化发展模式,数字经济空间关联网络会显著提高碳排放绩效水平。

与现有研究相比,本文的边际贡献在于以下方面。(1)既有研究从数字化发展视角对减污降碳的实现路径进行了有益探讨,但均是基于“属性数据”展开的研究,忽视了数字经济发展已突破地理限制,呈现出空间关联发展新格局的事实。与此不同的是,本文立足于网络关系的独特视角,构建可以刻画数字经济空间关联发展的“关系数据”,验证了其对减污、降碳及减污降碳协同的积极作用,不仅丰富和拓展了数字经济空间关联网络与减污、降碳及减污降碳协同实现路径的研究外延,还为推动中国全面绿色转型提供了新思路。此外,党的二十届三中全会指出要构建全国一体化的数据市场和技术,这意味着数字经济协同联动发展未来依然是国家重点关注的方向。本文的研究不仅为当前“东数西算”工程的继续实施增强了信心,还为国家部署全国一体化数据市场和技术的决策提供了经验证据。(2)现有文献主要从省域尺度上对数字经济的空间关联网络结构进行刻画,但是省级层面信息较为宏观,可能会掩盖城市层面的现象。因此,本文在城市层面上测度数字经济的空间关联网络,以挖掘更精细更全面的信息。此外,本文进一步考察了数字经济空间关联网络的时空演变特征,有助于全面认识数字经济协同联动发展现状,为有关数字经济政策的进一步实施提供参考。(3)部分研究评估了数字经济空间关联网络的碳排放效应,但是忽略了污染排放和碳排放的“同根、同源、同过程”特性。本文兼顾污染的多元性与协同的整体性,将数字经济空间关联网络和减污、降碳及减污降碳协同纳入同一分析框架,从理论和实证两个层面探讨了数字经济空间关联网络对减污、降碳及减污降碳协同的影响,为数字经济空间关联

网络环境效应的研究提供了经验证据。(4) 本文从产业结构、绿色技术创新及经济集聚三个角度较完整地考察了数字经济空间关联网络影响减污、降碳及减污降碳协同的传导路径。同时考虑了资源禀赋、行政等级和数字经济政策引致的异质性影响。研究不仅有助于深化对数字经济空间关联网络与减污、降碳及减污降碳协同之间内在关系的理解, 还可以为中国因地制宜部署数字经济发展战略提供经验证据。

三、理论分析和研究假说

(一) 数字经济空间关联网络对减污降碳的直接影响

数字经济空间关联网络反映了不同城市节点间的数字经济链接程度^[14], 可以对减污降碳产生显著的正外部性。首先, 根据“梅特卡夫定律”, 随着各节点城市间数字经济联系加深, 其网络价值会呈爆发式增长, 有效增强规模经济效应和范围经济效应, 实现经济效益的最大化^[3], 进而降低碳排放强度与污染排放强度, 促进减污降碳协同增效。其次, 与侧重单一区域或行业内部数字化活动的传统数字经济相比, 数字经济空间关联网络具有高度的开放性和连接性, 可以有效打破城市节点间的“数字壁垒”, 促进区域间数据资源共享和数字技术合作, 加快资源的优化重组与协同创新, 降低交易成本, 提升生产效率, 进而实现减污降碳。接着, 数字经济空间关联网络可以为数字经济基础薄弱的边缘节点城市提供发展机遇, 帮助边缘节点城市承接核心城市转移的适合本地发展的数字产业和绿色技术, 推动边缘节点城市的高污染、高能耗产业向数字化绿色化转型, 从而实现减污降碳。然后, 在数字经济空间关联网络中, 核心节点城市一般具有更强的资源获取与调配能力, 可以凭借空间关联路径有效打通区域资金、信息、技术和产品的流动障碍, 实现生产要素的高效流动与优化配置, 从而减少资源浪费和环境污染^[13]。最后, 在数字经济的空间关联下, 各节点城市可以通过共享污染治理经验、环境监测数据、减排政策等信息, 加强跨区域环保合作, 促进区域间减排政策协调, 避免“各自为政”导致的重复建设或高碳产业转移, 从整体上提升减污降碳效果。基于上述分析, 本文提出如下假设。

H1: 数字经济空间关联网络能够降低碳排放强度与污染排放强度, 促进减污降碳协同增效。

(二) 数字经济空间关联网络对减污降碳的间接影响

数字经济空间关联网络可以通过优化产业结构影响减污降碳。从产业结构合理化来看, 嵌入数字经济空间关联网络有利于各节点城市降低信息搜索成本, 增强城市之间的经济互动, 形成区域间产业分工和协作体系, 进而不断拓宽和加深区域各产业部门之间的关联度, 促使生产要素更高效地流向具有高效率的部门, 推动产业结构不断趋于合理化^[15]。产业结构合理化会带来要素投入和产出结构的不断调整, 进而提高生产要素配置效率, 避免产业间资源错配和过度竞争, 减少资源过度损耗^[16], 从而实现减污降碳协同增效。从产业结构高级化来看, 数字经济空间关联网络的高连通性、高协同性可以促进各种高新技术在不同城市节点间快速扩散与渗透, 进而对产业链上下游进行升级和再造, 提高生产与研发过程的智能化、柔性化和低碳化水平, 以此推动产业结构高级化发展^[17]。此外, 在数字经济空间关联网络中, 越是处于中心位置的城市越具有更强的资源集聚和辐射能力, 越能通过产业转移等方式带动周边地区产业高质量发展。如北京、上海等城市作为数字经济空间关联网络的中心节点, 汇聚了大量的数字技术创新资源、高端人才和金融资本, 能够吸引上下游产业集聚, 推动产业向高端化、智能化、绿色化方向发展。同时, 这些中心城市的产业升级经验和技术成果也能通过空间关联路径向周边地区扩散, 带动区域整体产业高级化发展。产业结构高级化过程中会逐渐淘汰产能, 使产业重心向低碳低能耗的高端产业转移, 减少对传统能源的需求, 从而实现减污降碳^[18]。此外, 产业结构高级化能够优化生产方式, 使各阶段产业部门间的资源配

置更合理,提升要素资源的利用效率,进而推动减污降碳^[19]。据此,本文提出如下假设。

H2:数字经济空间关联网可以通过促进产业结构合理化与高级化,降低污染排放强度与碳排放强度,实现减污降碳协同增效。

数字经济空间关联网可以通过促进绿色技术创新影响减污降碳。一方面,在数字经济的空间关联下,不同节点城市之间可以更广泛地进行技术合作与交流,推动创新模式由封闭式创新转变为开放式创新,这不仅有助于提升绿色创新资源的流动性和共享性,拓展绿色环保技术研发在节点城市间合作的深度、广度、频度和效度^[20],还有利于发挥技术外溢效应和知识溢出效应对绿色技术和知识的大范围传递功能,提高节点城市的绿色创新资源整合能力和联合创新能力,进而加速绿色技术的研发和应用进程^[21]。另一方面,数字经济的空间关联性可以加速信息在不同节点城市间流通,缓解绿色技术创新投入过程的信息不对称问题,帮助企业及时获取市场信息和用户需求,提高企业绿色技术研发与需求之间的匹配效率与质量,降低企业从事绿色技术创新的风险和成本,激发企业绿色研发创新的积极性^[20]。进一步地,绿色技术创新是解决污染问题的有效手段^[22]。一方面,绿色技术创新在生产流程中的引入可以替代传统高污染的生产方式,提高生产效率和资源利用效率,从而减少生产环节的污染物和温室气体排放^[23]。另一方面,绿色技术创新可以促进太阳能、光伏、风电等清洁能源的开发与利用,减少对传统化石能源的依赖,推动能源消费结构向多元化、清洁化和低碳化转型^[24],从而有效减少污染排放强度和碳排放强度,实现减污降碳协同增效。交通领域的新能源汽车就是典型实践,不仅加速了对传统燃油汽车的替代,还有效减少了尾气排放。据此,本文提出如下假设。

H3:数字经济空间关联网可以通过推动绿色技术创新,降低污染排放强度与碳排放强度,实现减污降碳协同增效。

数字经济空间关联网可以通过促进经济集聚影响减污降碳。在数字经济的空间关联下,各节点城市可以更加清晰地了解地区产业优势和发展潜力,更准确地把握市场需求和资源分布^[25],从而推动企业向更具有竞争优势的地区集中,增强经济集聚效应。此外,在数字经济空间关联网中,越是位于核心节点的城市通常越具有完善的数字基础设施、创新环境和人才优势等,可以吸引更多的优质企业入驻,进一步促进经济集聚。例如,杭州市作为数字经济空间关联网的核心节点城市,具备丰富的产业资源,吸引了大量的数字企业入驻,形成了以电子商务为核心的数字经济产业集群。同时,经济集聚带来了产业的集中和生产的规模化,这种规模效应有助于资源的高效利用和污染的集中处理,进而提高污染治理效率^[26],实现减污降碳协同增效。此外,经济集聚可通过共享生产创新设备、先进技术和科学管理经验等途径有效节约企业的生产成本,促进能源的集中利用,从而降低能源损失、提高能源利用效率^[27],有效减少污染排放强度和碳排放强度,实现减污降碳协同治理。据此,本文提出如下假设。

H4:数字经济空间关联网可以通过促进经济集聚,降低污染排放强度与碳排放强度,实现减污降碳协同增效。

四、研究设计

(一) 模型构建

基于上述理论分析,为实证检验数字经济空间关联网的减污降碳效应,构建如下模型:

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 Cid_{it} + \beta_2 Controls_{it} + \mu_i + \nu_t + \epsilon_{it} \quad (1)$$

其中,被解释变量 Y_{it} 是 i 城市 t 年份的污染排放强度(PR)、碳排放强度(CR)和减污降碳协同

水平 (D), Cid 为数字经济空间关联网节点中心性, $Controls$ 为一系列控制变量, $\beta_i (i=0, 1)$ 为待估计系数, μ_i 为个体固定效应, ν_i 为时间固定效应, ϵ_{it} 为随机扰动项。

为剖析数字经济空间关联网影响减污降碳的机制, 参考江艇^[28]的做法, 构建如下模型:

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 Cid_{it} + \beta_2 Controls_{it} + \mu_i + \nu_i + \epsilon_{it} \quad (2)$$

其中, M_{it} 为机制变量, 分别为产业结构合理化 (Ris)、产业结构高级化 (Ais)、绿色技术创新 ($LnGti$) 与经济集聚 (EA), 其他变量的含义与式 (1) 相同。

(二) 变量定义

1. 被解释变量。污染排放强度 (PR): 参考李俊明等^[29]的研究, 选取 SO_2 和 $PM_{2.5}$ 表示大气污染物, 然后进行归一化处理, 公式如下:

$$PR = (\theta_1 E_{SO_2} + \theta_2 E_{PM_{2.5}}) / GDP \quad (3)$$

式 (3) 中, PR 为大气污染物等效当量排放强度, E_{SO_2} 和 $E_{PM_{2.5}}$ 分别为某城市 SO_2 和 $PM_{2.5}$ 的排放量, GDP 为城市的生产总值, θ_1 和 θ_2 为当量系数。根据《中华人民共和国环境保护税法》中的规定, θ_1 和 θ_2 分别取 $1/0.95$ 和 $1/2.18$ 。

碳排放强度 (CR)。借鉴韩峰和谢锐以及吴建新和郭智勇的方法^{[30][31]}, 城市的碳排放通过加总电能、煤气和液化石油气、交通运输和热能消耗产生的碳排放获得, 最后除以 GDP 得到碳排放强度。

减污降碳协同水平 (D)。为了量化减污降碳的协同水平, 对碳排放强度和污染排放强度进行标准化处理^①, 并引入耦合协调度模型, 具体计算公式如下:

$$X = \frac{\max(CR) - CR}{\max(CR) - \min(CR)} \quad Z = \frac{\max(PR) - PR}{\max(PR) - \min(PR)} \quad (4)$$

$$C = 2 \sqrt{\frac{XZ}{(X+Z)^2}} \quad T = aX + bZ \quad D = \sqrt{CT} \quad (5)$$

其中, X 和 Z 分别为碳排放强度和污染排放强度标准化后的值。 C 为耦合度; T 为综合指数, 由于碳减排和大气污染排放控制同等重要^[8], 取 $a=b=0.5$; D 为耦合协调度, 亦即减污降碳协同水平, 由于对数据进行了负向标准化处理, D 越大表明减污降碳协同水平越强。

2. 核心解释变量。数字经济空间关联网 (Cid)。本文用数字经济空间关联网节点中心性 (以下简称数字经济网络中心性) 进行度量。网络节点中心性可以反映某节点城市在网络中的地位, 其值越高, 该节点城市在网络中的地位越重要, 获取和利用资源的能力会越强, 从而与其他城市的空间互动就会越频繁, 联系也会越紧密^[3]。

首先, 参考赵涛等^[32]的研究, 构建数字经济综合指标体系 (如表 1 所示), 并采用熵值法进行测度。

表 1 数字经济综合指标体系

一级指标	二级指标	指标说明	指标属性
数字经济发展水平	互联网普及率	百人中互联网宽带接入用户数/(户/百人)	+
	相关从业人员	计算机服务和软件业从业人员占比/%	+
	相关产出	人均电信业务总量/(万元/人)	+
	移动电话用户数	百人中移动电话用户数/(户/百人)	+
	数字金融发展	数字普惠金融指数	+

① 标准化过程中会出现 0 的情况, 为避免这种情况对结果的影响, 当结果为 0 时, 进行 0.0001 的平移。

其次, 利用引力模型测算中国城市之间的数字经济关联强度。引力模型的建模思路源于物理学中的“万有引力定律”, 之后学者将其进行修正并广泛应用于区域之间各类关联度的测算^[33]。本文借鉴该思路测算城市之间的数字经济关联强度, 计算公式如下:

$$R_{ij} = K_{ij} \frac{\sqrt[3]{DE_i G_i P_i} \sqrt[3]{DE_j G_j P_j}}{Dis_{ij}^2}, K_{ij} = \frac{DE_i}{DE_i + DE_j} \quad (6)$$

其中, R_{ij} 为城市 i 和城市 j 间的数字经济关联强度, DE 为数字经济发展水平, Dis_{ij} 为城市 i 和城市 j 间的地理距离 (ArcGIS 计算获得), G 为城市生产总值, P 为年末常住人口, K 为修正系数。

接着, 在式 (6) 的基础上, 构建数字经济的空间关联矩阵, 然后对矩阵进行二值化处理。本文参考刘华军等^[33] 的研究, 选取各城市数字经济空间关联强度的均值作为二值矩阵的阈值, 结果如下:

$$R_{matrix} = \begin{Bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \cdots & R_{1,N} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & \cdots & R_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{N,1} & R_{N,2} & \cdots & R_{N,N} \end{Bmatrix}, R_{i,j} = \begin{cases} 1, R_{ij} > \bar{R} \\ 0, R_{ij} \leq \bar{R} \end{cases} \quad (7)$$

其中, \bar{R} 为数字经济空间关联强度的均值, N 为网络节点个数。

最后, 基于上述矩阵, 利用 UCINET 软件可以测得每个城市的数字经济网络中心性。计算公式如下:

$$Cid_i = \sum_{j=1}^N R_{i,j} / (N - 1) \quad (8)$$

其中, Cid 为数字经济网络中心性。

3. 机制变量。(1) 产业结构合理化 (RIS) 和产业结构高级化 (AIS)。参考干春晖等^[34] 的研究, 用泰尔指数测度产业结构合理化水平, 数值越小, 产业结构越合理; 用第三产业产值与第二产业产值之比表示产业结构高级化水平。(2) 绿色技术创新 ($LnGTI$)。参考刘耀彬等^[7] 的研究, 用城市绿色专利申请总量的对数来衡量绿色技术创新。(3) 经济集聚 (EA)。参考邵帅等^[27] 的研究, 用城市非农产出 (第二产业和第三产业增加值之和) 与城市行政面积的比值来度量经济集聚程度。

4. 控制变量。本文参考李俊明等^[29] 和赵晓梦等^[35] 的做法, 引入六个控制变量。(1) 人口密度 (Pop), 用单位面积人口数表示。(2) 财政压力 (FP), 用财政预算支出占财政预算收入的比重来衡量。(3) 科技投入 (Tec), 用科技支出占财政预算支出的比重来衡量。(4) 工业化程度 (Ind), 用第二产业产值占 GDP 的比重衡量。(5) 环境规制 (ER), 借鉴邓慧慧等^[36] 的方法, 用地方政府工作报告中“环保”词频占比来衡量^①。(6) 能源效率 (EE), 用能源消费总量与 GDP 的比值衡量。

(三) 数据来源与描述性统计

本文数据主要源于《中国城市统计年鉴》、EPS 数据平台、中国经济金融研究数据库 (CSMAR) 和《北京大学数字普惠金融指数》, 部分缺失数据采用插值法进行处理。表 2 报告了本文主要变量的描述性统计特征。

^① 本文使用的与环境相关词汇具体包括: 环境保护、环保、污染、能耗、减排、排污、生态、绿色、低碳、空气、化学需氧量、二氧化硫、二氧化碳、PM₁₀ 以及 PM_{2.5} 等。

表2 描述性统计

变量类型	变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	污染排放强度(<i>PR</i>)	3 069	0.002	0.002	0.000	0.015
	碳排放强度(<i>CR</i>)	3 069	0.052	0.060	0.002	0.961
	减污降碳协同水平(<i>D</i>)	3 069	0.953	0.053	0.000	0.995
核心解释变量	数字经济空间关联网(<i>Cid</i>)	3 069	0.361	0.220	0.011	0.996
机制变量	产业结构合理化(<i>RIS</i>)	3 069	0.290	0.240	-0.886	2.011
	产业结构高级化(<i>AIS</i>)	3 069	2.307	0.154	0.000	2.836
	绿色技术创新(<i>LnGTI</i>)	3 069	5.043	1.664	0.000	10.30
	经济集聚(<i>EA</i>)	3 069	0.070	0.196	0.008	3.552
控制变量	人口密度(<i>Pop</i>)	3 069	0.044	0.035	0.001	0.316
	财政压力(<i>FP</i>)	3 069	2.924	1.863	0.649	17.51
	科技投入(<i>Tec</i>)	3 069	0.017	0.017	0.001	0.207
	工业化程度(<i>Ind</i>)	3 069	0.453	0.108	0.000	0.821
	环境规制(<i>ER</i>)	3 069	0.003	0.001	0.000	0.012
	能源效率(<i>EE</i>)	3 069	0.136	0.151	0.008	2.283

五、实证结果与分析

(一) 特征事实

1. 数字经济空间关联网特征。为深入刻画城市数字经济空间关联网的演化特征, 本文利用 ArcGIS 软件将数字经济的网络节点中心度和关联强度进行可视化^①。由数字经济空间关联网图可知, 中国城市数字经济已突破地理边界束缚, 不再局限于对邻近区域产生外部影响, 呈现出多线程、多流向的复杂网络结构。具体而言, 2011年到2021年, 城市数字经济空间关联网节点中心度明显提升, 说明节点城市间的空间互动愈加频繁, 联系愈加紧密。但是, 核心节点城市仍主要位于东部地区, 中西部城市主要位于边缘位置, 呈现出“中心—边缘”的网络圈层结构, 说明东部城市的数字经济网络外部性较强, 在网络结构中起着支配和掌控作用, 这与现有研究结果一致^[11]。此外, 城市间的数字经济关联强度明显增强, 意味着在数字经济的发展过程中, 城市间产生了范围更广、程度更深的数字交流。在辐射扩散效应下, 数字经济空间关联网由东部地区逐渐向中西部地区拓展, 但东部地区的数字经济空间关联网强度仍高于中西部地区, 整体呈现出“东高西低”的非均衡空间特征。可能是因为东部城市拥有较完善的数字基础设施、较强的数字技术创新环境等比较优势, 更易促进数字产业集聚, 在占据核心发展位置的同时不断增强了与其他城市的联系; 而中西部城市的数字基础相对滞后, 与其他城市联系程度较弱, 更易处于网络中的边缘位置。这一发现不仅凸显了数字经济均衡发展的重要性, 也印证了中国构建“全国一体化大数据中心协同创新体系”和实施“东数西算”工程的科学价值。

2. 减污降碳时空演变特征。为深入刻画 279 个城市污染排放强度、碳排放强度及减污降碳协同水平的时空演变特征, 本文利用 ArcGIS 软件对其进行可视化^②。从减污降碳的时空格局图中可得出以下几点发现。(1) 中国城市污染排放强度在空间格局上呈现出由“大范围连片高污染”向“小范围集中低污染”的动态演进特征, 污染排放强度相对较高的城市主要集中于西部地区。此外, 2011—2021年, 中国城市污染排放强度明显下降, 高污染城市数量大幅削减。(2) 2011—2021年, 中国城市碳排放强度显著降低, 在空间格局上呈“分散零星高排放”特征。(3) 2011年, 减

① 由于篇幅限制, 数字经济空间关联网图未列出, 可联系作者索取。

② 由于篇幅限制, 减污降碳的时空格局图未列出, 可联系作者索取。

污降碳协同水平较低的城市在空间格局上呈“小范围零星分布”特征；2021年，中国城市的减污降碳协同水平明显提升，有96.42%城市的减污降碳协同水平超过了0.90。整体来看，研究期内中国城市污染排放强度、碳排放强度与减污降碳协同水平都得到了改善。可能是因为：一方面，随着《中华人民共和国大气污染防治法》等环保法规的接连出台，政府加强了对高污染、高排放、高能耗企业的监管和违规处罚力度；另一方面，数字经济空间关联发展为减污降碳提供了强大助力，不仅可以通过数字平台促进绿色技术的创新和共享，还可以快速传播高效的减污、减排方案，实现区域减污降碳协同增效。

（二）基准回归

表3报告了数字经济空间关联网络分别对污染排放强度、碳排放强度与减污降碳协同水平影响的回归结果。其中，（1）至（2）列的被解释变量是污染排放强度，（3）至（4）列的被解释变量是碳排放强度，（5）至（6）列的被解释变量是减污降碳协同水平。（1）、（3）、（5）列是仅控制城市固定效应与年份固定效应的单变量回归结果，（2）、（4）、（6）列是在单变量回归的基础上加入控制变量后的回归结果。可以看出，无论是否引入控制变量，数字经济网络中心性的回归系数均在1%的置信水平下显著，表明数字经济空间关联网络可以降低污染排放强度与碳排放强度，促进减污降碳协同增效。从经济显著性来看，（2）、（4）、（6）列中，数字经济空间关联网络水平每增加一单位，污染排放强度与碳排放强度分别下降0.3%和3.5%，减污降碳协同水平提高7.7%。本文的假说H1得到了实证支持。原因可能是：数字经济空间关联网络以城市作为互连节点，可以通过大数据等数字技术建立信息、技术等资源传输和共享渠道，使网络节点中心性越高的城市与其他城市的关联性越强，越能有效推动城市间数字要素和创新要素的自由流动，优化资源配置和生产流程以提高生产效率，进而实现减污、降碳及减污降碳协同增效。

表3 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>PR</i>	<i>PR</i>	<i>CR</i>	<i>CR</i>	<i>D</i>	<i>D</i>
<i>Cid</i>	-0.004*** (0.001)	-0.003*** (0.001)	-0.070** (0.035)	-0.035*** (0.008)	0.101*** (0.021)	0.077*** (0.016)
常数项	0.003*** (0.000)	0.003*** (0.001)	0.077*** (0.013)	0.036*** (0.008)	0.916*** (0.008)	0.918*** (0.019)
样本量	3 069	3 069	3 069	3 069	3 069	3 069
R^2	0.866	0.872	0.739	0.966	0.742	0.775
控制变量	否	是	否	是	否	是
城市固定	是	是	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是	是	是

注：***、**、*分别表示1%、5%、10%水平上显著，括号内为城市层面的聚类稳健标准误，下表同。

（三）内生性检验

为了缓解因遗漏变量和反向因果造成的内生问题，本文尝试引入工具变量进行回归分析。关于工具变量的选择，本文借鉴现有研究^{[21][37]}，以各城市到“八纵八横”光缆网络骨干节点城市距离的倒数及政府工作报告中数字经济相关的关键词词频^①的对数作为数字经济网络中心性的工具变量。

首先，选取各城市到“八纵八横”光缆网络骨干节点城市距离的倒数作为工具变量的逻辑在

① 数字经济相关词频为智能（人工智能、智能制造等）、智慧（智慧城市、智慧医疗等）、大数据、云计算、5G、物联网、区块链、上云、云平台、云服务、数据共享、数据安全、数据服务、数字人民币、数字经济、工业互联网、数字化、机器人、数字技术等。

于: 数字经济发展依赖于互联网的普及, 而互联网发展与早期的光缆网络规划和铺设密切相关, 因而历史上能成为光缆骨干网节点城市的地区, 更可能具有布局宽带基础设施的条件。因此, 一个城市距离“八纵八横”光缆网络骨干城市越近, 其数字经济发展水平会越高, 在数字经济网络中的地位也会越重要, 从而满足工具变量的相关性条件。此外, 由于到“八纵八横”光缆网络骨干城市的距离是历史上的地理数据, 不会对城市当前的减污降碳行为产生直接影响, 因此满足了工具变量的外生性要求。值得注意的是, 该工具变量为截面数据, 不能够直接用于面板数据的计量分析。为此, 本文参考Nunn等^[38]的研究, 将各城市到“八纵八横”光缆网络骨干节点城市距离的倒数与上一年全国互联网宽带接入数(与时间相关)进行交互, 构造面板工具变量。其次, 选取政府工作报告中数字经济相关的关键词词频的对数作为工具变量的逻辑在于: 数字经济相关词汇出现的频数能在一定程度上反映地区的数字经济发展活跃度。该地区数字经济活跃度越高, 其在数字经济网络中的地位越重要, 满足工具变量的相关性条件。此外, 政府工作报告中数字经济相关的关键词词频主要是对数字经济发展的一种客观反映和记录, 无法直接影响减污降碳, 从而满足了工具变量的外生性要求。

在此基础上, 本文采用两阶段最小二乘法(2SLS)进行回归分析, 结果如表4所示。列(1)和列(5)是第一阶段的回归结果, 可以发现, 工具变量与数字经济空间关联网络节点中心性相关, 且符号符合预期。此外, Kleibergen-Paap rk LM检验和Cragg-Donald Wald F检验分别拒绝了工具变量识别不足和弱识别的原假设, 说明本文所选工具变量是合理有效的。列(2)至列(4)以及列(6)至列(8)是第二阶段的回归结果, 可以发现, 数字经济空间关联网络仍然能够降低污染排放强度与碳排放强度, 推动减污降碳协同治理。在利用工具变量缓解内生性问题后, 回归结果与基准回归一致, 证明了本文研究结果的稳健性。

表4 内生性检验

变量	(1) <i>Cid</i>	(2) <i>PR</i>	(3) <i>CR</i>	(4) <i>D</i>	(5) <i>Cid</i>	(6) <i>PR</i>	(7) <i>CR</i>	(8) <i>D</i>
<i>IV</i> ₁	0.119***							
	(0.008)							
<i>IV</i> ₂					0.016***			
					(0.004)			
<i>Cid</i>		-0.002***	-0.214***	0.044***		-0.046***	-0.290***	1.045***
		(0.000)	(0.060)	(0.012)		(0.011)	(0.082)	(0.260)
常数项	0.239***	0.000	0.092***	0.100***	0.307***	0.016***	0.122***	0.632***
	(0.023)	(0.003)	(0.022)	(0.010)	(0.030)	(0.004)	(0.031)	(0.098)
Kleibergen-Paap rk LM	188.671[0.000]				14.715[0.000]			
Cragg-Donald Wald F	327.865{16.38}				17.511{16.38}			
样本量	3 069	3 069	3 069	3 069	3 069	3 069	3 069	3 069
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
城市固定	是	是	是	是	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是	是	是	是	是

注: 方括号内的数值为 p 值, 大括号内的数值为Stock-Yogo检验在10%水平下对应的临界值。

(四) 稳健性检验

为确保估计结果的稳健性, 本文进行了四组稳健性检验。(1) 删除特殊样本。为了避免特殊样本对估计结果的影响, 本文剔除了特殊城市(4个直辖市和26个省会城市)和特殊年份(疫情冲击之后2020—2021年的数据)样本, 然后重新进行估计。(2) 排除政策干扰。数字经济政策和环境政策的实施可能会影响估计结果。为保证结论的稳健性, 本文分别将宽带中国和国家级大数据综合试验区两项数字经济政策及碳排放权交易和低碳城市两项环境政策依次纳入基础回归方程

再次进行回归。(3) 替换被解释变量。为确保结论的稳健性, 本文分别用熵值法重新测算的污染综合排放强度、人均碳排放强度及修正后的格鲁贝尔—劳埃德指数^[39]测算的减污降碳协同水平替换原始被解释变量。(4) 为控制城市层面随时间变化的不可观测因素对估计结果的影响, 本文在基准回归模型中加入了城市×时间趋势的交互项。经过上述一系列稳健性检验后, 核心解释变量回归系数的显著性和符号与基准回归一致, 证明了结论的稳健性^①。

(五) 机制检验

基于前文理论分析与研究假说进行如下作用机制检验, 结果如表5所示。第一个机制变量是产业结构。第(1)列中数字经济网络中心性对产业结构合理化的估计系数显著为负, 说明数字经济空间关联网可以增强各产业之间的连通性, 优化资源配置, 有效改善产业结构合理化水平, 而产业结构合理化可以避免某些产业过度发展而带来的能源过度消耗, 为促进减污降碳提供有力支持。第(2)列是数字经济网络中心性对产业结构高级化的回归结果。*Cid*的系数显著为正, 说明数字经济网络中心性越高的城市越有利于吸纳和利用人才、技术等关键资源, 对产业进行智能化改造, 推动产业向高技术、高附加值的方向发展, 而产业结构高级化有助于减少传统高污染、高能耗产业的比重, 降低整个产业的污染排放和能源消耗, 实现减污降碳协同增效。综上分析, 产业结构合理化与高级化是数字经济空间关联网实现减污降碳的重要作用渠道, H2得到验证。

表5 作用机制检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>RIS</i>	<i>AIS</i>	<i>LnGTI</i>	<i>EA</i>
<i>Cid</i>	-0.407*** (0.086)	0.124** (0.051)	0.529*** (0.168)	0.076** (0.032)
常数项	0.479*** (0.074)	2.338*** (0.093)	4.223*** (0.119)	-0.011 (0.032)
样本量	3 069	3 069	3 069	3 069
R^2	0.627	0.765	0.962	0.947
控制变量	是	是	是	是
城市固定	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是

第二个机制变量是绿色技术创新。第(3)列是以绿色技术创新为作用机制的估计结果, 可以发现数字经济空间关联网能够显著促进绿色技术创新。可能是因为: 在数字经济空间关联网中, 节点中心性高的城市通常也是知识和技术传播的关键枢纽, 可以吸引和聚集大量的创新人才和机构, 形成知识和技术高地, 推动绿色技术创新和进步。绿色技术创新可以通过应用新技术、新材料、新工艺, 替代传统高污染的生产方式, 推动太阳能、风能等可再生能源的开发和利用, 有效减少对化石能源的依赖, 从而有效降低污染排放强度和碳排放强度, 实现减污降碳协同治理, H3得到验证。

第三个机制变量是经济集聚。第(4)列结果表明数字经济空间关联网可以有效增强城市间的经济联系和信息流通, 形成紧密的经济网络, 提高经济集聚水平。而经济集聚会使相关产业和企业地理上集中, 形成规模效应, 这种规模效应有利于实现资源的高效利用和污染的集中处理, 进而提升减污降碳的效率^[26], H4得到验证。

(六) 异质性分析

1. 资源禀赋异质性。为考察数字经济空间关联网在不同资源禀赋地区的减污降碳效果是否

① 由于篇幅限制, 具体稳健性检验结果未列出, 可联系作者索取。

存在差异, 根据《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020)》, 将样本划分为资源型城市 ($Resource=1$) 和非资源型城市 ($Resource=0$), 在式(1)的基础上引入数字经济网络中心性与资源禀赋的交乘项 ($Cid \times Resource$), 结果如表6中(1)至(3)列所示。可以发现, 交乘项 ($Cid \times Area$) 对污染排放强度和碳排放强度的影响系数显著为负, 对减污降碳协同水平的影响系数显著为正, 表明数字经济空间关联网在资源型地区的减污、降碳及减污降碳协同效应强于非资源型地区。这可能是由于: 资源型城市通常依托自然资源的开采、加工等实现发展, 产业结构比较单一, 而数字经济空间关联网的发展可以帮助资源型城市更快速、更广泛地获取和应用新技术、新方法, 推动产业结构多元化和绿色化发展, 进而产生更明显的减污、降碳及减污降碳协同治理效果。这一发现为资源型城市的减污降碳工作提供了新思路。

表6 资源禀赋与行政等级异质性检验结果

变量	(1) PR	(2) CR	(3) D	(4) PR	(5) CR	(6) D
Cid	-0.002***	-0.028***	0.048***	-0.004***	-0.042***	0.091***
	(0.000)	(0.008)	(0.017)	(0.001)	(0.011)	(0.024)
$Cid \times Resource$	-0.005***	-0.028**	0.106***			
	(0.001)	(0.014)	(0.032)			
$Cid \times Grade$				-0.002**	-0.023***	0.050***
				(0.001)	(0.007)	(0.006)
常数项	0.003***	0.036***	0.919***	0.003***	0.036***	0.918***
	(0.000)	(0.004)	(0.010)	(0.001)	(0.008)	(0.019)
样本量	3 069	3 069	3 069	3 069	3 069	3 069
R^2	0.873	0.966	0.776	0.872	0.966	0.775
控制变量	是	是	是	是	是	是
个体固定	是	是	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是	是	是

2. 行政等级异质性。为考察数字经济空间关联网在不同行政等级地区的减污降碳效果是否存在差异, 本文参考现有研究^[32], 将直辖市、省会城市和副省级城市划分为“中心城市” ($Grade=1$), 其他城市归类为“外围城市” ($Grade=0$), 在式(1)的基础上引入数字经济网络中心性与地理位置的交乘项 ($Cid \times Grade$), 结果如表6中(4)至(6)列所示。可以发现, 交乘项 ($Cid \times Grade$) 对污染排放强度和碳排放强度的影响系数显著为负, 对减污降碳协同水平的影响系数显著为正, 表明数字经济空间关联网在中心城市的减污、降碳及减污降碳协同效应强于外围城市。可能是因为中心城市在资源配置和顶层政策倾斜等方面具备较大优势, 使其更易在数字经济空间关联网中占据核心位置, 吸引资源和先进技术, 进而产生更明显的减污、降碳及减污降碳协同治理效果。相比之下, 外围城市在数字经济空间关联网中的地位相对边缘, 资源配置和政策支持机会相对较少, 限制了它们在减污降碳方面的能力。

3. 政策异质性。为了推动数字经济发展, 中国启动了一系列数字经济政策。为考察数字经济空间关联网在试点地区与非试点地区、单试点地区与双试点地区的减污降碳效果是否存在差异, 本文以宽带中国和国家级大数据试点政策为例进行分析。首先, 根据试点名单及实施年份分别构建宽带中国 (BD) 与国家级大数据 (TD) 的虚拟变量, 然后在式(1)的基础上分别引入数字经济网络中心性与宽带中国的交乘项 ($Cid \times BD$) 及与国家级大数据的交乘项 ($Cid \times TD$), 结果如表7中(1)至(6)列所示。可以发现, 交乘项 ($Cid \times BD$) 与 ($Cid \times TD$) 对污染排放强度和碳排放强度的影响系数均显著为负, 对减污降碳协同水平的影响系数均显著为正, 表明数字经济空间关联网在数字经济政策试点地区的减污、降碳及减污降碳协同效应强于非试点地区。可能是因为在试点地区, 数字经济政策的实施为数字经济空间关联网提供了有效支撑。其次, 为了分

析双试点政策的异质性效果，本文剔除所有非试点样本，仅保留已成为宽带中国或国家级大数据的样本，以“双试点”城市样本为实验组，以“单试点”城市样本为对照组，然后将数字经济网络中心性与双试点政策的交乘项（ $Cid \times Dual$ ）引入式（1）中，结果如表7中（7）至（9）列所示。可以发现，交乘项（ $Cid \times Dual$ ）对污染排放强度和碳排放强度的影响系数显著为负，对减污降碳协同水平的影响系数显著为正，表明数字经济空间关联网在数字经济政策双试点地区的减污、降碳及减污降碳协同效应强于单试点地区。可能是因为宽带中国与国家级大数据两项政策之间存在“1+1>2”的协同效应，能够为数字经济空间关联网提供更为充分的支持。

表7 数字经济政策异质性检验结果

变量	单试点政策						双试点政策与单试点政策对比分析		
	宽带中国			国家级大数据			(7) PR	(8) CR	(9) D
	(1) PR	(2) CR	(3) D	(4) PR	(5) CR	(6) D			
Cid	-0.004*** (0.001)	-0.035*** (0.008)	0.089*** (0.017)	-0.003*** (0.001)	-0.035*** (0.008)	0.075*** (0.016)	-0.003*** (0.001)	-0.042*** (0.008)	0.071*** (0.016)
$Cid \times BD$	-0.003*** (0.000)	-0.003*** (0.001)	0.029*** (0.004)						
$Cid \times TD$				-0.003*** (0.000)	-0.002*** (0.000)	0.027*** (0.005)			
$Cid \times Dual$							-0.003*** (0.000)	-0.004*** (0.001)	0.021*** (0.004)
常数项	0.004*** (0.001)	0.036*** (0.008)	0.913*** (0.018)	0.004*** (0.001)	0.036*** (0.008)	0.915*** (0.019)	0.002*** (0.000)	0.041*** (0.009)	0.953*** (0.019)
样本量	3 069	3 069	3 069	3 069	3 069	3 069	1 738	1 738	1 738
R^2	0.878	0.966	0.779	0.876	0.966	0.778	0.841	0.955	0.791
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是	是
个体固定	是	是	是	是	是	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是	是	是	是	是	是

六、结论与启示

本文采用修正引力模型和社会网络分析法对2011—2021年中国279个城市的数字经济空间关联网进行了测度，考察了数字经济空间关联网的时空演变特征，进一步实证检验了数字经济空间关联网对减污降碳的影响效果和作用机制。研究发现：中国城市数字经济整体上呈现出“中心—边缘”的网络形态与“东高西低”的空间分异特征，污染排放强度、碳排放强度与减污降碳协同水平都有所改善。数字经济空间关联网既可以促进减污和降碳，又能产生减污降碳协同效应。该结论在采用外生政策冲击、工具变量等方法进行稳健性和内生性检验后仍然成立。机制检验表明，数字经济空间关联网能够通过产业结构合理化与高级化、绿色技术创新和经济集聚降低碳排放强度和污染排放强度，促进减污降碳协同增效。异质性分析结果表明，数字经济空间关联网对资源型地区、中心城市及数字经济政策试点地区的减污、降碳及减污降碳协同效应更加突出。为充分发挥数字经济空间关联网的减污降碳效应，基于上述研究结果，本文提出以下政策启示。

1. 树立“一盘棋”思想和“一体化”发展理念，支持数字经济空间关联网构建，推动区域数字经济协同联动发展，巩固数字经济网络的减污降碳效应。一方面，应加快统筹布局5G、工业互联网等数字基础设施建设，持续加强关键核心技术攻关，培育发展数据要素市场，为数字经济

空间网络发展提供关键支撑。另一方面,以“全国一体化大数据中心”和“东数西算”工程为契机,打破数字经济地方保护与分割,加快全国统一大市场建设,推动各级数据中心集群由中心城市向城市周边转移,以数据流引领带动物资流、资金流、人才流、技术流,构建起城市数字经济互联互通的“桥梁”,打通区域数字经济大动脉,形成跨地域、跨部门协同发展合力,从而充分发挥数字经济空间关联网络对减污、降碳及减污降碳协同的正外部效应。

2. 促进产业结构合理化与高级化发展、推动绿色技术创新和经济集聚,为数字经济空间关联网络发挥减污、降碳及减污降碳协同效应提供畅通渠道。首先,要实现产业结构合理化与高级化发展。建立健全区域合作机制,鼓励区域间产业链上下游企业合作,推动要素流动和资源配置优化,形成优势互补、错位发展的良好局面,以促进产业结构合理化发展。利用高新技术对传统产业进行全方位、全链条的改造,通过制定产业政策鼓励发展高新技术产业、现代服务业等新兴产业,以促进产业结构高级化发展。其次,要促进绿色技术创新。政府出台财政补贴、税收优惠等一系列绿色技术创新政策,增强企业进行绿色技术研发的积极性与主动性。通过政策引导,提高公众对绿色产品和技术认知度,培育绿色消费市场,从而激发企业研发绿色技术的动力。最后,要提升经济集聚水平。鼓励建设产业园区,引导企业和产业向特定地区集中。对产业集聚区内的企业实施税收优惠政策,鼓励企业向集聚区集中。优化集聚区的基础设施,提供技术支持、人才引进等优质的企业服务,提高集聚区的吸引力。

3. 因地制宜制定差异化的数字经济发展战略。首先,对于非资源型城市,可以结合自身产业结构多样化的比较优势,建立创新型、专业型、开放型的数字经济产业园区,吸引高新技术产业入驻,横向错位发展、纵向分工协作,形成跨区域数字产业链,提升数字经济空间网络密度。资源型城市应抓住“数字中国”战略新机遇,积极建设5G基站、工业互联网与大数据中心等新型基础设施,推动形成泛在互联、数据驱动、协同融合的新基建体系;结合地区产业特色,推动建立和数字技术相融合的“人工智能+”“互联网+”产业生态体系,在完善数字经济网络的同时,缓解地区产业结构单一和资源过度依赖问题,减少环境污染。其次,对于中心城市,应根据自身优势构建开放协同、高效互动的数字生态体系,拓展城市间数字经济合作的广度与深度,发挥自身在数字经济发展中的标杆引领作用和“以强带弱”能力。外围城市应立足自身资源禀赋和比较优势,积极与中心城市建立数字经济联系,深入开展企业间和政府间的数字技术协同合作,不断增强自身数字经济竞争力。最后,数字经济政策试点城市应充分利用政策优势,建立数据共享机制,加大数字技术研发投入,打造数字经济产业集群,持续提高自身数字经济发展水平,同时向非试点地区输出先进经验,最大程度发挥自身的示范引领作用。非试点城市可以结合自身实际情况,借鉴试点地区的经验和做法,积极推广大数据中心、工业互联网等新型数字基础设施建设,培育数字经济新兴产业等,提高数字经济发展水平。此外,要建立健全重大政策统筹协调机制,加强政策间的协同联动,形成政策组合拳,以发挥不同政策的叠加效应和联动效应。总之,在因地制宜原则下,城市之间要摒弃以邻为壑、各自为政的地方主义思维,加快全国统一大市场建设,增强数字经济空间关联网络的正外部效应。

参考文献

- [1] 盛科荣,王丽萍,孙威.网络权力、知识溢出对中国城市绿色经济效率的影响[J].资源科学,2021(8).
- [2] 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).
- [3] 张明斗,翁爱华.数字经济空间关联网络的产业结构变迁效应研究——基于网络节点中心性分析视角[J].产业经济研究,2022(6).

- [4] Hu, J. Synergistic effect of pollution reduction and carbon emission mitigation in the digital economy[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 337.
- [5] Liang, C. L., X. L. Chen, Q. B. Di. Path to pollution and carbon reduction synergy from the perspective of the digital economy: Fresh evidence from 292 prefecture-level cities in China[J]. *Environmental Research*, 2024, 252.
- [6] Liu, B., Z. X. Qiu, L. T. Hu, et al. How digital transformation facilitate synergy for pollution and carbon reduction: Evidence from China[J]. *Environmental Research*, 2024, 251.
- [7] 刘耀彬, 邓伟凤, 李硕硕, 等. 数字产业集聚对减污降碳协同的影响——以长江经济带为例[J]. 资源科学, 2024(4).
- [8] 韩冬日, 吕晓丽, 董会忠, 等. 数字技术对降碳减污协同增效的门槛效应[J]. 资源科学, 2023(11).
- [9] 韩先锋, 李佳佳. 数字金融发展的动态减污降碳效应——基于二元环境约束的新视角[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2024(5).
- [10] 吴丹丹, 马仁锋, 郝晨, 等. 数字经济对市域旅游业高质量发展水平的空间效应及机制[J]. 经济地理, 2023(4).
- [11] 孙亚男, 王艺霖. 我国数字经济的空间关联网研究[J]. 统计研究, 2024(6).
- [12] 徐妍, 何禄瑶. 数字经济空间关联网的碳排放效应: 动态演化与作用机制[J]. 环境科学, 2024(9).
- [13] 徐妍, 张玉冰. “促进”还是“阻碍”: 数字经济空间关联网对碳排放绩效的影响[J]. 环境科学, 2025(1).
- [14] 方若楠, 崔兴华, 闫中晓. 中国城市数字经济关联网的结构特征与内生机制分析[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2025(2).
- [15] 王奕淇, 董昊娟. 数字经济与城市碳排放绩效: 作用机制与空间效应[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2024(5).
- [16] 金飞, 徐长乐. 数字经济发展对碳排放的非线性影响研究[J]. 现代经济探讨, 2022(11).
- [17] 罗良文, 张郑秋, 周倩. 产业智能化与城市低碳经济转型[J]. 经济管理, 2023(5).
- [18] 黄海昕, 郭俊华. 国家低碳战略协同的减污降碳效应[J]. 经济问题, 2024(12).
- [19] 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).
- [20] 刘洋, 陈晓东. 中国数字经济发展对产业结构升级的影响[J]. 经济与管理研究, 2021(8).
- [21] 韩峰, 黄敏, 姜竹青. 企业数字化、网络地位与污染减排[J]. 世界经济, 2024(2).
- [22] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. 管理世界, 2022(2).
- [23] 常皓亮. 数字经济、绿色技术创新与碳排放强度——基于我国城市面板数据的经验研究[J]. 商业研究, 2023(2).
- [24] 王帅龙. 数字经济之于城市碳排放: “加速器”抑或“减速带”?[J]. 中国人口·资源与环境, 2023(6).
- [25] 鲁玉秀. 数字经济发展对城市制造业集聚布局的影响和机制研究[J]. 软科学, 2024(9).
- [26] 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(4).
- [27] 邵帅, 张可, 豆建民. 经济集聚的节能减排效应: 理论与中国经验[J]. 管理世界, 2019(1).
- [28] 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).
- [29] 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(12).
- [30] 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(3).
- [31] 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).
- [32] 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).

- [33]刘华军,刘传明,孙亚男.中国能源消费的空间关联网结构特征及其效应研究[J].中国工业经济,2015(5).
- [34]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(5).
- [35]赵晓梦,魏婷,朱俊鹏.从排污费到环保税:绿色税制改革视阈下的减污降碳协同治理研究[J].中国地质大学学报(社会科学版),2024(3).
- [36]邓慧慧,杨露鑫.雾霾治理、地方竞争与工业绿色转型[J].中国工业经济,2019(10).
- [37]周国富,林一鸣.数字经济、制度环境与区域创新效率[J].现代经济探讨,2023(11).
- [38]Nunn, N., N. Qian. US food aid and civil conflict[J]. *American Economic Review*, 2014(6).
- [39]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(3).

Research on the Impact Mechanism of the Digital Economy Spatial Correlation Network on Pollution Reduction and Carbon Reduction

WANG Shu-he, LIU Shi-zhe, LI Xiao-min

Abstract: The digital economy spatial correlation development is not only an important measure to bridge the “digital divide”, but also a key force to reshape the economic spatial development pattern. Under the dual pressure of improving environmental quality and reducing greenhouse gas emissions, it is of great practical significance to study how the spatially linked development of the digital economy generates pollution and carbon reduction effects. From the perspective of urban network, the paper selects 279 cities in China from 2011 to 2021 as samples, examines the spatiotemporal evolution characteristics of digital economy spatial correlation network, and empirically examines the influence of digital economy spatial correlation network on pollution and carbon reduction. The study finds the digital economy of Chinese cities generally presents a network form of “center-periphery” and spatial differentiation characteristics of “high in the east and low in the west”, and the intensity of pollution emission, carbon emission and the level of synergy between pollution reduction and carbon reduction have been improved. Moreover, the digital economy spatial correlation network significantly promoted pollution and carbon reduction, and also had a synergistic effect on pollution and carbon reduction. This conclusion still holds after robustness and endogeneity tests using exogenous policy shocks, instrumental variables, and other methods. Mechanism testing has found that the digital economy spatial correlation network can reduce carbon and pollution emission intensity, and promote the synergy of pollution reduction and carbon reduction through the rationalization and advanced of industrial structure, green technology innovation, and economic agglomeration. Additionally, the heterogeneity results show that the digital economy spatial correlation network presents more prominent effects on pollution reduction, carbon reduction and synergistic effects of pollution reduction and carbon reduction in resource-based regions, central cities, and pilot regions of digital economy policies. The research conclusion provides important guidance for achieving pollution reduction and carbon reduction, and advancing the construction of ecological civilization.

Key words: digital economy; spatial correlation network; network node centrality; pollution and carbon emission reduction; synergistic effect

(责任编辑 孙洁)