

数智融合发展对中国减污降碳协同治理的影响研究

刘亦文^{1,2}, 陈熙钧^{2,3}

1. 湖南工商大学资源环境学院, 湖南 长沙 410205
2. 湖南工商大学习近平生态文明思想研究中心, 湖南 长沙 410205
3. 湖南工商大学经济与贸易学院, 湖南 长沙 410205

摘要: 新发展阶段中国生态文明建设进入减污降碳协同治理的关键时期。数字化和智能化的新技术、新基础设施、新工艺装备、新场景应用为减污降碳协同增效提供了重大契机与技术支撑。为研究数智融合发展对减污降碳的协同治理作用, 构建2011—2020年我国30个省(自治区、直辖市)数智融合发展指数与减污降碳协同指数评价指标体系(不包括西藏自治区和港澳台地区数据, 下同), 并对二者时空演变特征进行分析, 运用多元线性回归模型分析数智融合发展对减污降碳协同治理的影响。结果表明: 2011—2020年中国数智融合发展呈现明显的上升态势与区域聚集性, 其中2020年广东省数智融合发展水平以0.730领先全国; 减污降碳协同水平呈明显上升趋势。数智融合发展可以显著促进地区减污降碳的协同治理, 但存在较强的区域异质性特征。同时, 数智融合发展可以通过提高科技创新水平、优化能源生产结构对减污降碳的协同治理产生显著的间接影响。因此, 应大力推动中国数智融合发展, 夯实数智融合驱动减污降碳协同治理的理论体系, 有效发挥数智融合这一数字经济新形态对减污降碳的协同治理作用。

关键词: 数智融合; 减污降碳; 新一代信息技术; 能源结构

中图分类号: X321

文章编号: 1001-6929(2023)11-2189-11

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2023.07.27

Research on the Impact of Digital Intelligence Integration Development on Collaborative Governance of Pollution Reduction and Carbon Reduction in China

LIU Yiwen^{1,2}, CHEN Xijun^{2,3}

1. School of Resources and Environment, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China
2. Research Center for Xi Jinping Thought on Eco-Civilization, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China
3. School of Economics and Trade, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

Abstract: At present, China is promoting the great rejuvenation of the Chinese nation with Chinese-style modernization comprehensively, taking 'promoting harmonious coexistence between man and nature' as an important part of the essential requirements of Chinese-style modernization, and promoting green development and harmonious coexistence between human and nature. At the same time, China's ecological civilization construction also faces two strategic tasks of achieving fundamental improvement in the ecological environment, carbon peaking and carbon neutrality, which further highlights the requirements of multi-objective governance of the ecological environment. Coordinated promotion of pollution reduction and carbon emission reduction has become an inevitable choice for the comprehensive green transformation of China's economic and social development in the new development stage. Digital and intelligent new technologies, new infrastructure, new process equipment, and new scenario applications provide major opportunities and technical support for collaborative pollution and carbon reduction. To study the synergistic governance effect of digital and intelligent integration development on pollution reduction and carbon reduction, an innovative evaluation index system for digital and intelligent integration development index and pollution reduction and carbon reduction synergy index in 30 provinces (autonomous regions, municipalities) of China from 2011 to 2020 was constructed (excluding the data of Tibet Autonomous Region, Hong Kong Special Administrative Region, Macao Special Administrative Region and Taiwan Province of China). The spatiotemporal evolution characteristics of the two were analyzed, and a multiple linear regression model was constructed to analyze the impact of digital and intelligent integration development

收稿日期: 2023-05-20 修订日期: 2023-07-17

作者简介: 刘亦文(1981-), 男, 湖南攸县人, 教授, 博士, 主要从事计量建模与环境经济政策研究, ewen_lau@163.com.

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(No.22YJA790040)

Supported by Humanity and Social Science Foundation of Ministry of Education of China (No.22YJA790040)

on pollution reduction and carbon reduction synergistic governance. The research results indicate that during the measurement period, the development of digital and intelligent integration in China showed a significant upward trend and regional agglomeration, with Guangdong Province leading the country in terms of digital and intelligent integration development level by 0.730 in 2020. At the same time, the synergistic effects of pollution reduction and carbon reduction in China are showing a significant upward trend. The integration of digital and intelligent development can significantly promote collaborative governance of regional pollution reduction and carbon reduction, but there are strong regional heterogeneity characteristics. At the same time, the integration of digital and intelligent development can have a significant indirect impact on the collaborative governance of pollution reduction and carbon reduction by improving the level of technological innovation and adjusting the path of energy production structure. Therefore, China should vigorously promote the integration of digital and intelligent development, consolidate the theoretical system of collaborative governance driven by digital and intelligent integration for pollution reduction and carbon reduction, and effectively play the role of digital and intelligent integration as a new form of digital economy in collaborative governance of pollution reduction and carbon reduction.

Keywords: digital intelligence integration; reduce pollution and carbon emissions; new generation information technology; energy structure

作为一个典型的发展中大国,中国肩负着经济发展、民生改善和生态环境治理等多重艰巨任务.党的二十大报告明确要求“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”.但新发展阶段中国减污降碳工作面临着矛盾焦点多元,协同治理能力和韧性不强,条线分割和信息孤岛普遍存在,管理智能化水平不高,以及协调配置机制薄弱等瓶颈和困境.数智化作为数字经济时代最具时代特征的新范式,数字技术的创新和使用所带来的生产方式创新和经济发展方式的改变正影响着经济社会各领域^[1],新一代信息技术与数字经济高度融合发展的经济新形态——“数智融合”也应运而生.随着新一代信息技术的深度融合与应用,数智融合驱动减污降碳实现协同治理的趋势日益明显.因此,探讨数智融合发展驱动减污降碳协同治理的规律,对挖掘中国减污降碳协同治理新动能具有重要实践意义.

目前,减污降碳协同治理实施路径主要分为技术减排路径、结构减排路径和政策因素路径^[2].其中,技术减排路径和结构减排路径是最主要的两大路径,其协同减排效应获得了一定的认可^[3],也有学者指出结构减排效应更显著^[4].在政策因素路径研究上,有学者认为政策因素对大气污染物和温室气体协同减排总体上呈正向协同效应^[5].当前中国的环境治理措施已展现出较为显著的减排效果^[6],但也有学者指出行政命令型环境规制抑制了重点控排对象的减排技术创新^[7].数字经济是继农业经济、工业经济之后的主要经济形态,各项数字技术与智能技术的创新和使用所带来的生产方式创新和经济发展方式的改变正影响着经济社会各领域^[8-9].随着资源环境约束的日益加剧,数字技术和智能技术的融合运用在生态治理、监测、预警等方面均有较好的表现^[10].数字化与智能化交融结合发展,旨在以新一代信息技术为依托实现

技术方法突破,通过促进企业生产数字化转型^[11],推动智慧城市建设、促进城市绿色创新和产业结构优化^[12],进而减少了城市污染^[13].研究表明,数智融合在碳减排上具有一定的潜力^[14-15],数智融合通过有偏技术进步、优化能源结构^[16]、提高资源利用率和增加环境投资,促进了碳减排,但在不同经济圈层、区域内部有所差异^[17].在减污降碳协同治理方面,数智融合可以实现政府与社会之间的信息互通共享,为政府、企业和民众共同践行“美丽中国”建设提供了新方式、新契机^[18],进而构建减污降碳协同多元治理体系.

综合来看,现有研究主要聚焦于数字经济对单一资源环境领域的应用研究和影响评估,缺乏对数智融合新范式的研究及其对减污降碳协同治理的效应分析.目前,数字经济与新一代信息智能技术的深度融合已成为提升多种污染物和二氧化碳排放协同治理效能的新动能和新引擎.鉴于此,本文基于我国30个省(自治区、直辖市)2011—2020年的面板数据(不包括西藏自治区和港澳台地区数据,下同),聚焦数智融合发展对减污降碳协同治理的影响效应、作用机制及实现路径,为释放数智融合新动力,实现减污降碳协同治理应用与实践提供重要参考.

1 机理分析与研究假设

1.1 直接效应分析

可以预见,中国经济的持续稳步增长将带来能源需求的持续增加,这将使中国的碳减排目标面临更大的压力和挑战^[19].在新一轮全球科技和产业变革中,数智融合以新兴信息技术为核心^[20],为环境的智能决策管理提供新的动力.数智融合渗透能源消费和环保领域,能够有利于解决环境承载力下降、能源稀缺等问题.《2030年前碳达峰行动方案》提出,要推进工业领域数字化智能化绿色化融合发展.作为数字经济的

新兴经济形态, 数智融合已成为经济高质量发展的重要抓手和应对气候变化采取行动的迫切要求, 探索新兴信息技术对减污降碳的贡献可为合理提高数智融合发展水平、实现减污降碳的协同治理以及推动绿色低碳发展提供理论指导。据此提出假设 1, 即

H1: 数智融合发展对减污降碳的协同治理具有促进作用。

1.2 中介效应分析

上述直接效应分析认为数智融合发展对减污降碳协同治理具有促进作用, 而数智融合发展对减污降碳协同治理的理论机制分析是后续研究的关键, 本节就数智融合发展促进减污降碳协同治理的中介效应进行分析。

1.2.1 技术创新效应

数智融合具有跨区域、跨市场的资源融合与信息共享特性, 可将新兴信息技术更好地应用到产品生产与创新活动中。智能化将数字由信息要素转变为数据要素, 能够优化微观主体的资源配置, 开拓科技创新的新空间与新资源。因此, 将数智技术应用于技术创新^[21-22], 可以辅助微观主体对绿色创新的方向、资金投入、预期回报、研发时长等因素进行科学判断与预测, 有利于提高微观主体绿色技术创新的成功概率。因此, 数智融合发展, 一方面能够精准调控能源结构与最优的能源投入, 在节约能源的同时可实现减污降碳协同治理; 另一方面, 数智融合发展能够打破技术壁垒, 提高市场信息透明度, 增强微观主体绿色技术创新效率, 提高减污降碳协同治理程度。对于政府而言, 数智融合可以通过新兴技术产品提供更具时效性与准确性的监控手段与工具。如对“漂绿”企业的识别, 数智融合可以通过智能化科技分析手段来帮助政府与社会监督组织识别企业“漂绿”行为。综上, 数智融合可以在政府监管、企业生产与绿色技术创新等环节对提高能源利用效率产生助力, 据此提出假设 2, 即

H2: 数智融合可以通过资源配置效应提高科技创新水平, 进而促进减污降碳协同治理。

1.2.2 能源结构效应

数智融合的快速发展和提高行业生产率的同时会强化市场竞争, 而市场调节机制的作用下落后技术与产能将面临淘汰。因此, 数智融合能够在较大程度上引导产业发展模式向创新驱动转变, 有利于绿色技术的应用推广与能源利用效率的提高, 提高环境友好型与技术密集型产业比重。从能源结构视角来看, 本文主要从能源供给侧出发考虑数智融合发展对减污

降碳的协同治理效应的中介效应。能源供给作为污减排的重要源头, 调整能源生产结构是推进减污降碳的关键环节^[23]。数智化有利于能源生产部门生产流程的智能化改造, 同时对能源企业的生产管理系统进行升级, 提高能源利用效率。数字智能化技术对能源生产环节和排放数据进行实时动态监控, 能够提前预防预警风险, 提升传统化石能源行业的生产效率和排放效率。据此提出假设 3, 即

H3: 数智融合可以通过优化能源生产结构, 进而促进减污降碳协同治理。

2 指标体系构建与模型设定

2.1 数据来源及指标体系

本文选取 2011—2020 年我国 30 个省(自治区、直辖市) 面板数据, 实证考察数智融合发展对减污降碳协同治理的影响和作用路径。数智融合发展指数作为核心解释变量, 尚未有官方公布的相关数据和公认的度量标准, 且目前已有研究大多只对数字经济这种单一的经济形态进行研究^[24-26], 未将智能化相关指标融入指标体系。结合数据的可得性、科学性、客观性, 本文从业务、产业、基础设施、企业、人文以及政务六方面来对地区数智融合发展水平进行度量。其中, 指标体系中“智慧金融”采用上市金融公司报告中“金融科技、组织架构、流程优化、监管监督、技术储备、人才打造、生态创新”等词语频次数来表示, “智慧制造”则主要采用在工业行业中所投入的机器人安装量来对密度值进行测算, 其他各指标度量方式、属性及权重如表 1 所示。

在减污降碳协同指数测度中, 用于度量二氧化碳排放强度的二氧化碳排放量从能源角度进行测算, 主要基于煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气这 9 个能源维度对二氧化碳排放量进行计算, 采用《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》的系数折算转化法进行估算, 基于产量的排放因子法对能源活动过程中的碳排放量进行计算, 如式 (1) 所示:

$$FCE_{t,c} = \sum_{k=1}^n (FC_{t,c,k} \times EF_k) \quad (1)$$

式中, $FCE_{t,c}$ 为 t 时期 c 国家的碳排放总量, $FC_{t,c,k}$ 为 t 时期 c 国家对 k 种类能源的消费量, EF_k 为 k 种类能源的二氧化碳排放系数。由于本文研究对象为我国 30 个省(自治区、直辖市), 因此在对各省(自治区、直辖市) 的碳排放总量进行计算时, 式 (1) 中 $FCE_{t,c}$ 为 t 时期 c 省(自治区、直辖市) 的碳排放总量, $FC_{t,c,k}$ 则为 t 时期 c 省(自治区、直辖市) 对 k 种类能源的消

表1 数智融合发展指数与减污降碳协同指数测算指标体系

Table 1 Calculation index system for the integration of digital intelligence development index and the collaborative index of pollution reduction and carbon reduction

一级指标	二级指标	三级指标	四级指标	指标属性	权重	
数智融合发展指数	数智业务发展水平	软件业务	软件业务收入	正向	0.040	
			信息技术服务收入	正向	0.039	
		电信业务	电信业务总量	正向	0.026	
			通信技术制造业主营业务收入	正向	0.053	
		电商业务	快递业务量	正向	0.049	
			电子商务销售额	正向	0.030	
	数智产业发展水平	产业聚集	(信息传输、软件和信息技术服务业就业人数)/行政区划面积	正向	0.078	
			科学研究和技术服务业就业人数/行政区划面积	正向	0.069	
		产业规模	第三产业增加值占GDP比重	正向	0.006	
			通信设备、计算机及电子设备制造业法人单位数	正向	0.024	
			科学研究和技术服务业法人单位数	正向	0.024	
			互联网宽带接入用户数/常住人口数	正向	0.008	
	数智基础设施水平	数智基建	互联网域名数	正向	0.031	
			互联网宽带接入端口数	正向	0.013	
			长途光缆线路长度	正向	0.008	
			移动电话年末用户数	正向	0.011	
			电话普及率	正向	0.007	
			移动电话交换机容量	正向	0.010	
	数智企业发展水平	普惠金融	北京大学数字普惠金融指数	正向	0.006	
			上市公司报告中“人工智能技术”频次	正向	0.064	
		企业数智	上市公司报告中“区块链”频次	正向	0.077	
			上市公司报告中“云计算技术”频次	正向	0.048	
			上市公司报告中“大数据技术”频次	正向	0.053	
			上市公司报告中“数字技术应用”频次	正向	0.038	
			智慧金融	上市金融公司数字化程度	正向	0.059
			智慧制造	机器人安装密度	正向	0.034
		数智人文素养水平	人力资本	高等学校在校生人数/年末总人口	正向	0.005
				人均受教育年限	正向	0.011
	科教投入		地区教育投入支出占财政支出比重	正向	0.004	
			地区科技投入支出占财政支出比重	正向	0.013	
	数智政务治理水平	数字政务	技术市场成交额占GDP比重	正向	0.026	
			规模以上工业企业R&D经费	正向	0.034	
地方政府城市治理注意力词频数			正向	0.001		
地方政府公共服务词频数			正向	0.001		
减污降碳协同指数	污染物排放强度指数	二氧化硫排放强度	负向	0.5		
		废水排放强度				
		烟粉尘排放强度				
		一般工业固体废物排放强度				
		氮氧化物排放量强度				
	PM _{2.5} 浓度					
碳排放强度指数	二氧化碳排放强度	负向	0.5			

费量. 此外,关于污染物排放强度和碳排放强度的计算,采用各种污染物排放当量、二氧化碳排放总量与国内生产总值的比值来表示,PM_{2.5}浓度则采用所在

省份当年12个月份的月度PM_{2.5}浓度的算术平均值来表示.

考虑到各污染物和二氧化碳具有同根同源性且

存在一定的协同效应, 本文考虑对污染物排放强度指数和碳排放强度指数赋予相同的权重, 以期呼应“协同”二字, 各赋予 0.5 的权重对减污降碳协同指数进行测度. 本文所使用数据来源于 2011—2020 年《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、“政府工作报告”、上市公司报告、CNRDS 数据库、WIND 数据库和 CSMAR 数据库. 各指标的度量方式、属性及权重如表 1 所示.

2.2 所用方法及测度结果分析

关于数智融合发展指数和污染物排放强度指数的测度方法, 在对原始数据进行标准化处理的基础上采用熵值法进行子指标权重的确定, 熵值法的计算步骤及公式如式 (2)~(5) 所示.

首先计算某指标的信息熵:

$$E_j = -\frac{1}{nm} \sum_{x=1}^m p_{xj} \ln p_{xj} \quad (2)$$

$$p_{xj} = \frac{r_{xj}}{\sum_{x=1}^m \sum_{j=1}^n r_{xj}} \quad (3)$$

式中, E_j 为指数子指标的信息熵, r_{xj} 为标准化后的矩阵元素. 如果某个指标的信息熵 E_j 越小, 则表明其指标值的变异程度越大, 提供的信息量也越大, 可认为该指标在综合评价中所产生的作用越大.

在此基础上进一步计算权重:

$$w_{ij} = -\frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (4)$$

得分为

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{xj} \quad (5)$$

作为常见的确定权重的方法之一, 使用熵值法对各个子指标进行赋权可以减少使用单指标进行赋权的片面性, 增强测度客观性以及降低测度结果的偏误性.

关于测度结果的时空演变, 主要采用核密度法和地理空间分布图来对其进行空间演变展示与特征分析. 作为一种研究空间分布的非参数估计方法, 核密度估计可以对随机变量概率密度进行平滑估计得到随机变量的分布形态. 核密度估计的表达式为

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (6)$$

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (7)$$

式中, K 为核函数, h 为宽度, n 为观测值个数, X_i 为独

立同分布的观测值, x 为观测值的均值.

2.2.1 数智融合发展指数测度结果的时空分析

2011—2020 年中国数智融合发展水平核密度分析结果 (见图 1) 显示, 样本期内数智融合发展水平的整体波峰呈现出峰高下降、各波峰趋于分散的逐年右移趋势, 表明各地区数智融合发展水平不断提高、逐渐由收敛格局趋于分散的空间分布特征, 各地区间数智融合发展水平差异不断扩大. 中国总体的数智融合发展水平呈明显上升趋势, 但各地区的数智融合发展水平提升速度存在较大差异, 如何在各地区数智融合发展水平发展不平衡的情况下, 带动低优势地区数智融合发展水平提升是目前面临的主要问题.

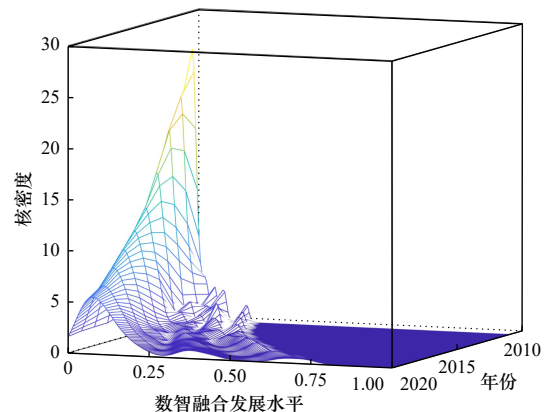


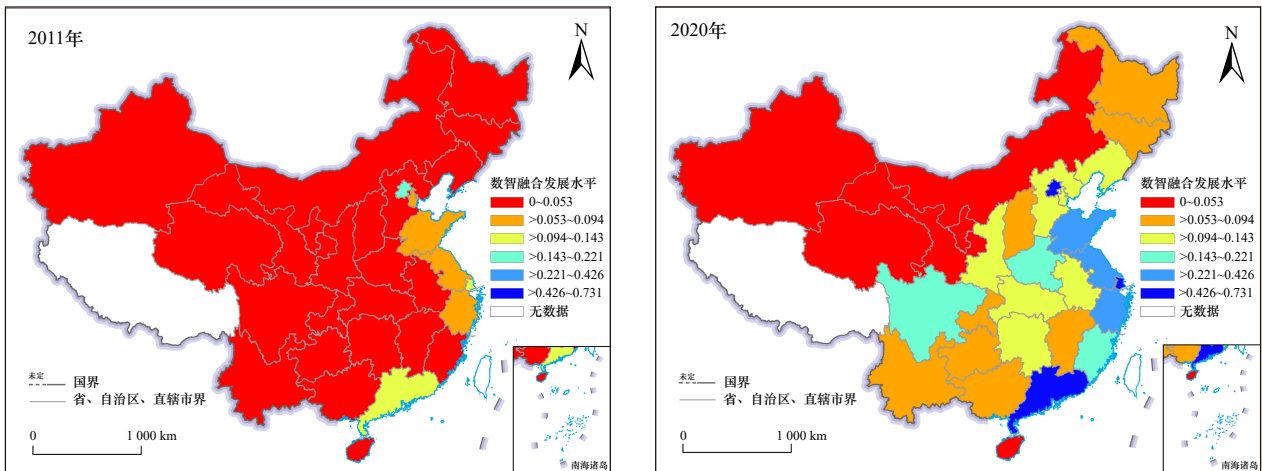
图 1 2011—2020 年中国数智融合发展水平核密度
Fig.1 Nuclear density map of the development level of digital-intellectual integration from 2011 to 2020 in China

从图 2 可以看出, 中国数智融合发展水平整体明显呈“东高西低”且逐年升高的总体趋势. 以广东省、北京市、上海市为中心并辐射周边省份的聚集特征明显, 且高水平数智融合发展的区块与粤港澳大湾区、京津冀地区、长三角地区三大重大战略区域完全吻合.

2.2.2 减污降碳协同指数测度结果的时空分析

从图 3 可以看出, 2011—2020 年中国减污降碳协同治理水平核密度图的波峰明显右移, 表明中国总体减污降碳协同治理水平逐年上升. 近年来各地区减污降碳协同治理水平的提高幅度存在差异, 使得核密度图中多峰状态逐渐显现, 多极化现象明显.

从图 4 可以看出, 中国减污降碳协同治理水平整体呈现出“北低南高”的分布特征, 这与中国“南轻北重”的产业格局基本吻合. 其中, 南方地区减污降碳协同治理水平增长更为明显, 而北方地区的减污降碳协同治理水平则有待进一步加强. 这种分布特征的出现可能是由于在中华人民共和国成立初期基于资



注:审图号 GS 京 (2023)1928 号. 西藏自治区和港澳台地区数据暂缺. 下同.

图 2 2011 年和 2020 年中国数智融合发展水平的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of the development level of digital-intellectual integration in China in 2011 and 2020

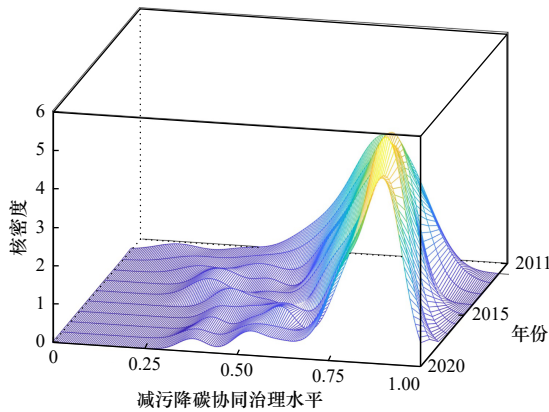


图 3 2011—2020 年中国减污降碳协同治理水平核密度

Fig.3 Nuclear density map of collaborative governance level for pollution reduction and carbon reduction from 2011 to 2020 in China

源的要素禀赋且在地理位置上与苏联更加接近,中国的大部分北方城市承担了矿产资源开采基地及早期重工业生产基地,因此环境污染程度较南方城市而言更为严重,此外南北气候的差异也给北方地区进一步实现减污降碳的协同治理带来了一定压力.

2.3 研究方法 与模型设定

2.3.1 模型设定

确定数智融合发展对减污降碳协同治理的促进作用模型如式 (8) 所示:

$$ISEC_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Digital_{it} + \alpha_2 Controls_{it} + \gamma_i + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

式中: $ISEC_{it}$ 为减污降碳协同指数,分别从“污染物排放强度”和“碳排放强度”两个角度来对减污降碳协同指数进行衡量; i 和 t 分别为省份和年份; $Digital_{it}$ 为数智融合发展指数,测度方式见第 2.1 节; $Controls_{it}$ 为控制变量; γ_i 为个体固定效应,控制其他影响地区

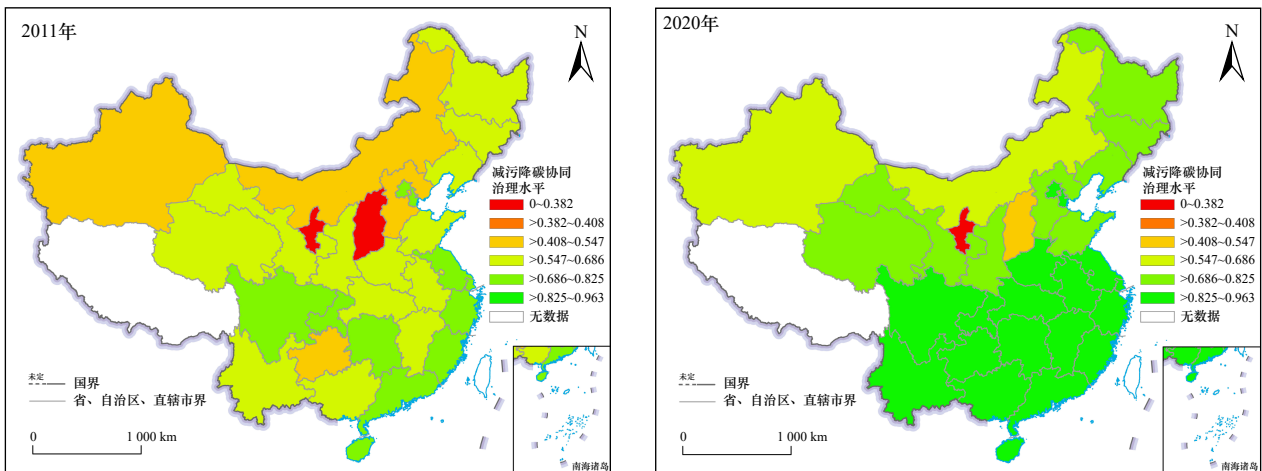


图 4 2011 年和 2020 年中国减污降碳协同治理水平的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of collaborative governance level for pollution reduction and carbon reduction in China in 2011 and 2020

减污降碳协同治理水平但不随时间变动的因素; ε_{it} 为不可观测的随机扰动项. 其中, 控制变量有制造业规模 (Man)、工业增加值 (Ind)、人均城市道路面积 (Rod)、经济增速 (Gdp)、城市人口密度 (Pop)、科研强度 (Sci) 等, 此外将环保税 (Tax) 和是否存在低碳试点 (Exp) 这两个政策因素纳入模型, 是控制其他影响各地区减污降碳协同效应的因素.

2.3.2 各变量的描述性统计.

本文以我国 30 个省 (自治区、直辖市) 为研究对象, 选取 2011—2020 年的面板数据, 被解释变量为碳排放指标体系测度所得, 解释变量由数智融合发展指标体系测度所得. 实证所用各变量的描述性统计如表 2 所示.

表 2 实证所用各变量的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of each main variables in empirical analysis

变量名称	符号	样本量	平均值	标准差	最小值	最大值
污染物排放强度指数	Poll	300	0.172	0.133	0.017	0.715
碳排放强度指数	Carbon	300	2.285	1.732	0.292	8.310
减污降碳协同指数	ISEC	300	0.736	0.147	0.130	0.962
数智融合发展指数	Digital	300	0.093	0.109	0.011	0.730
制造业规模	Man	300	150.8	177.2	7.200	1 020
工业增加值	Ind	300	8.760	8.007	0.415	39.14
人均城市道路面积	Rod	300	15.90	4.798	4.040	26.78
经济增速	Gdp	300	0.090	0.071	-0.280	0.275
人口密度	Pop	300	2 892	1 144	764	5 821
科研强度	Sci	300	1 393	1 057	45	5 621
环保税	Tax	300	64.28	56.74	2.849	358.9
是否存在低碳试点	Exp	300	0.827	0.379	0	1
污水日处理能力	Sew	300	547.4	460.6	32.10	2 749
生活垃圾清运量	Gar	300	665.7	511.2	66.25	3 347
互联网上网人数	Net	300	0.062	0.075	0.001	0.532
移动电话交换机容量	Mob	300	0.242	0.253	0.008	1.662
绿色发明专利申请数	Pat	300	0.746	0.140	0.264	1.038
清洁能源比	Ene	300	0.137	0.032	0.068	0.220

3 实证结果与分析

3.1 基准回归结果分析

基于式 (8) 得到数智融合发展对中国减污降碳协同治理的基准回归结果 (见表 3), 在未控制个体影响因素的情况下, 数智融合发展对减污降碳协同治理的促进作用在 1% 的水平上显著, 基准回归估计系数为 0.580. 在控制省份个体及个体特征因素的情况下, 数智融合发展仍在 1% 的水平上显著促进减污降碳的协同治理, 基准回归估计系数为 0.292. 而后将政策因素纳入模型进行回归发现, 估计系数稍弱化为

0.284, 而显著性仍保持在 1% 的水平. 随着国家对环境问题和经济增长质量的高度重视, 目前中国污染物和碳排放强度皆已处于下行阶段. 而从基准回归结果可知, 数智融合的进一步发展能够有效促进减污降碳的协同治理, 且这一结果在控制省份个体特征因素和政策因素后仍然成立.

表 3 数智融合发展影响减污降碳协同治理的基准回归结果

Table 3 Benchmark regression results of the impact of digital-intellectual integration development on collaborative governance of pollution reduction and carbon reduction

变量	减污降碳协同治理水平		
数智融合发展水平	0.580*** (3.80)	0.292*** (3.25)	0.284*** (3.73)
常数项	0.683*** (48.30)	0.345*** (7.39)	0.344*** (5.72)
特征因素控制	NO	YES	YES
政策因素控制	NO	NO	YES
个体固定效应	NO	YES	YES
观测值	300	300	300
R^2	0.296	0.707	0.722

注: ***, **, * 分别表示在 1%、5%、10% 水平下显著. 括号内数值为标准误. 下同.

3.2 稳健性检验结果分析

3.2.1 替换核心变量的稳健性检验

为进一步验证数智融合发展对减污降碳协同治理的促进作用, 从指数测算方法、替换变量以及结构性三方面进行稳健性检验 (见表 4). 具体而言, 第一, 采用优劣距离解法对数智融合发展水平进行测度, 检验结果表明优劣距离解法下的数智融合发展对减污降碳的协同治理仍然存在显著的促进作用. 再在原熵值法下数智融合发展指数的基础上进行取对数处理来替换原指数进行稳健性检验发现, 该文结论仍然稳健. 第二, 除了从各污染物及二氧化碳排放强度出发衡量地区的减污降碳协同治理水平以外, 污水日处理能力和生活垃圾清运量亦能够反映一个地区的环境、空气质量情况. 本文考虑采用污水日处理能力和生活垃圾清运量替换减污降碳协同指数, 来对所得结论进行稳健性检验. 从检验结果可以看出, 各地区数智融合发展对污水日处理能力和生活垃圾清运量均在 1% 水平上具有显著促进作用, 从该角度来探究数智融合发展对减污降碳协同治理的影响, 进一步证实了本文所得结论可靠. 第三, 根据指标体系的二级指标将减污降碳协同指数分为污染物排放强度和碳排放强度两大维度进行结构稳健性检验. 从回归结果来看,

表4 数智融合发展影响减污降碳协同治理的稳健性检验结果

Table 4 Robustness test results of the impact of digital-intellectual integration development on collaborative governance of pollution reduction and carbon reduction

变量	减污降碳协同治理水平		污水日处理能力	生活垃圾清运量	污染物排放强度	碳排放强度
优劣距离解法	0.431*** (5.41)					
取对数处理	0.132*** (13.55)					
数智融合发展水平			0.377*** (4.58)	0.224*** (3.37)	-0.229*** (-3.76)	-1.069* (-2.00)
常数项	0.345*** (5.92)	1.056*** (26.49)	0.091*** (3.73)	0.028 (1.64)	0.679*** (9.72)	3.806*** (6.79)
特征因素控制	YES	YES	YES	YES	YES	YES
政策因素控制	YES	YES	YES	YES	YES	YES
个体效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
观测值	300	300	300	300	300	300
拟合度	0.734	0.861	0.731	0.820	0.712	0.431

数智融合发展对污染物排放强度的减排作用较碳排放强度更显著,可能原因是目前中国距离2030年“碳达峰”目标还存在一定距离,而污染物排放当量已出现了较为明显的减排效果,“双碳”目标的实现刻不容缓。

3.3 区域异质性检验及阶段异质性检验

当前,“数智鸿沟”现象已成为广泛关注的新不平等现象。数智融合发展为各区域提供了相对平等的受益机会,但由于各区域发展基础不一、发展条件不同,难以获得相对均衡的红利。数智融合发展水平对不同区域所产生的异质性影响可大致归纳为两个方面:一是数智融合发展水平与经济发展水平之间存在紧密联系,经济发展水平较高的地区往往可以为数智融合的发展提供更优渥的培植环境;二是不同地区间的新兴技术推广速度和普及速度存在较大差异,传统信息技术发展较好的地区拥有良好的数字及智能智慧发展环境与条件,更有利于新兴技术的传播和推广。参照国家统计局地域分类标准,将我国30个省(自治区、直辖市)分为东部、中部、西部,对区域异质性问题进行考察,回归结果如表5所示。可以看出,数智融合发展对3个地区的减污降碳协同治理效应存在较为明显的异质性,且对东部地区减污降碳的协同效果最为显著,但对中部地区减污降碳的协同治理效果较弱。究其原因,东部地区的传统高耗能、高污染产业在当地居民宜居环境和成本上升的制约下,不得不将这类产业向更低生产成本和转移成本的内陆地区转移。东部地区作为低碳城市试点、碳排放权交易试点等政策的主要实施区域,在经历了一系列针

表5 数智融合发展影响减污降碳协同治理的异质性检验结果

Table 5 Regional heterogeneity test results of the impact of digital-intellectual integration development on collaborative governance of pollution reduction and carbon reduction

变量	减污降碳协同治理水平		
	东部地区	中部地区	西部地区
数智融合发展水平	0.295*** (4.99)	1.175* (2.15)	0.112 (0.11)
常数项	0.397*** (4.14)	0.299** (3.26)	0.405*** (4.13)
特征因素控制	YES	YES	YES
政策因素控制	YES	YES	YES
个体效应	YES	YES	YES
观测值	110	80	110
拟合度	0.804	0.901	0.790

对性的政策减排措施之后,其减污降碳的潜力得到一定释放,且相对于行政式的减排措施而言,数智融合更多地偏向于市场型减排措施。

3.4 内生性问题

3.4.1 工具变量法的模型设定

式(8)中可能会存在影响减污降碳协同治理的遗漏变量,从而造成模型设定偏误,影响回归结果,且数智融合发展与减污降碳协同治理之间可能存在双向因果关系,由此造成内生性影响。特引入工具变量使用两阶段最小二乘法来降低由内生性带来的估计偏误影响,模型如下:

$$\text{Digital}_{it} = \omega_0 + \omega_1 \text{tools}_{it} + \omega_2 \text{Controls}_{it} + \gamma_i + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

$$\text{ISEC}_{it} = \varphi_0 + \varphi_1 \text{Digital}_{it} + \varphi_2 \text{Controls}_{it} + \gamma_i' + \varepsilon_{it}' \quad (10)$$

借鉴黄群慧等^[27]的处理方法,采用各地区 2001—2010 年移动电话交换机容量 (Mob) 和互联网上网人数 (Net) 作为数智融合发展指数的工具变量构建以上模型. 一方面,互联网作为过去传统通信技术的延续发展,2001—2010 年移动电话交换机容量和互联网上网人数会从技术层面以及通信设备的实用层面影响到后续互联网技术、通信技术等为数智融合发展中的应用,满足了工具变量与核心解释变量的相关性;另一方面,2001—2010 年移动电话交换机容量和互联网上网人数与 2011—2020 年的减污降碳协同指数不存在直接关联,满足了工具变量对核心被解释变量的外生性. 因此,选取 2001—2010 年移动电话交换

机容量和互联网上网人数充当工具变量较为合理.

3.4.2 工具变量检验结果分析

移动电话交换机容量和互联网上网人数这两个工具变量的两阶段最小二乘法的回归结果如表 6 所示. 不可识别检验、过度识别检验和弱工具变量检验均拒绝原假设,工具变量选择合理. 从两个工具变量的两阶段回归结果可知,在考虑了内生性之后,数智融合发展促进减污降碳协同治理的结论仍成立,两个工具变量的回归结果均在 1% 的水平上显著. 总体而言,以上检验说明了选取 2011—2020 年移动电话交换机容量和互联网上网人数作为数智融合发展指数的合理性,且进一步验证了第 1.1 节的直接效应分析.

表 6 数智融合发展影响减污降碳协同治理的工具变量检验结果

Table 6 Test results of instrumental variables for the impact of digital-intellectual integration development on collaborative governance of pollution reduction and carbon reduction

变量	第一阶段	第二阶段	变量	第一阶段	第二阶段
	数智融合发展水平	减污降碳协同治理水平		数智融合发展水平	减污降碳协同治理水平
移动电话交换机容量	0.160*** (7.66)		互联网上网人数	0.708*** (10.07)	
数智融合发展水平		0.483*** (4.43)	数智融合发展水平		0.341*** (3.06)
控制变量	YES	YES	控制变量	YES	YES

3.5 机制检验结果分析

3.5.1 中介变量和中介模型

机理分析部分提到,数智融合发展可通过提高科技创新水平、优化能源结构来促进各地区减污降碳的协同治理水平,故选取绿色发明专利申请数 (Pat) 和清洁能源比 (Ene) 充当中介变量,构建中介模型效应对此机制进行检验. 参考 Baron 等^[28]和江艇^[29]的方法,构建如下中介模型:

$$ISEC_{it} = \rho_0 + \rho_1 Digital_{it} + \rho_2 Controls_{it} + \gamma_i + \varepsilon_{it} \quad (11)$$

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 Digital_{it} + \beta_2 Controls_{it} + \gamma_i + \varepsilon_{it}' \quad (12)$$

$$ISEC_{it} = \delta_0 + \delta_1 Digital_{it} + \delta_2 Controls_{it} + \delta_3 \sum_{j=1}^n M_{it}^j + \gamma_i'' + \varepsilon_{it}'' \quad (13)$$

式中: M_{it} 为绿色发明专利申请数 (Pat) 和清洁能源比 (Ene) 所充当的中介变量,其中清洁能源比采用能源生产总量中清洁能源占比来表示,其他变量同式 (8). ρ_1 用于衡量数智融合发展对减污降碳协同治理的总影响, δ_1 用于衡量在控制了中介变量后的间接影响, β_1 代表数智融合发展对中介变量的影响,数智融合发展对减污降碳协同治理的中介效应为 $\beta_1 \delta_3$.

3.5.2 机制检验结果分析

由机制检验结果 (见表 7) 可知: 第一,当中介变量为绿色发明专利申请数时,回归结果表明数智融合发展可以显著促进科技创新水平的提高,其回归系数为正且在 1% 的水平上显著. 而后将核心解释变量和中介变量均纳入回归模型中进行检验,结果显示数智融合发展对减污降碳协同治理的估计系数为 0.164 且在 1% 的水平上显著,这说明,在引入绿色发明专利申请数这一中介变量后,数智融合发展通过提高科技创新水平作用于减污降碳协同治理这一机理合理. 第二,当中介变量为清洁能源占比时,回归系数为 0.078,在 1% 的水平上显著,表明数智融合发展可以显著促进能源生产结构中清洁能源占比的提高. 而后将核心解释变量和中介变量均纳入回归模型中进行检验,结果显示数智融合发展对减污降碳协同治理的估计系数为 0.204 且在 1% 的水平上显著. 这说明,在引入清洁能源占比这一中介变量后,数智融合发展通过优化能源结构作用于减污降碳协同治理这一机理合理. 综上,数智融合发展可以通过提高科技创新水平以及优化能源生产结构促进减污降碳协同治理.

表7 数智融合发展影响减污降碳协同治理的机制检验结果

Table 7 Mechanism test results of the impact of digital-intellectual integration development on collaborative governance of pollution reduction and carbon reduction

变量	减污降碳协同治理水平	绿色发明专利申请数量	减污降碳协同治理水平	清洁能源比	减污降碳协同治理水平
数智融合发展水平	0.284*** (4.73)	0.223*** (3.45)	0.164*** (3.27)	0.078*** (5.61)	0.204*** (3.35)
绿色发明专利申请数量			0.534** (11.39)		
清洁能源比					1.017*** (4.27)
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES

4 结论与建议

4.1 结论

a) 通过构建数智融合发展指数与减污降碳协同指数的评价指标体系,精准测度了我国2011—2020年30个省(自治区、直辖市)的数智融合发展水平与减污降碳协同治理水平。比较中国数智融合发展水平与减污降碳协同治理水平的测算结果与时空演变特征可知:在测算期间,中国数智融合发展水平呈现出明显的上升态势与区域聚集性,但整体发展仍具有较大的上升空间,“东高西低”的分布格局明显。样本期内中国减污降碳协同治理水平上升态势稳定,多极化现象明显,呈现出基于产业分布特征的“南高北低”的分布格局。

b) 数智融合发展对减污降碳协同治理具有显著的促进作用,这一结论经过更改指数测算方法、替换变量以及结构性检验等稳健性检验后依旧成立,表明所得结论稳健。此外,通过异质性检验发现数智融合发展促进减污降碳协同治理存在比较明显的地区异质性特征。

c) 通过机理分析与假设,推测数智融合发展可以通过提高科技创新水平和优化能源生产结构来间接实现减污降碳的协同治理。机制检验以验证假设间接效应的分析表明,统计结果支持该假设,数智融合创新通过提高科技创新水平和优化能源生产结构促进减污降碳协同治理的机制成立。

4.2 建议

结合以上研究结论,为推动数智融合创新驱动减污降碳协同增效,强化数智融合发展对生态环境治理效用提出以下三点建议:

a) 夯实数智融合驱动减污降碳协同治理基础。随着数字技术应用日益成熟,减污降碳数智化转型进入规模提速增长、结构逐步优化、创新应用场景更加丰富、智能化水平显著提升的发展新阶段,更要科学把握数字经济时代的资源环境管理新特征与新规律,重点研究制定数智融合驱动减污降碳协同治理的中长

期规划,并加强顶层设计。系统明确数智融合驱动减污降碳协同治理的目标框架、标准体系和技术规范,着力提升数智融合驱动减污降碳协同治理基础能力和现代化水平。

b) 统筹数智融合驱动减污降碳协同治理。要开展数字技术支撑的资源环境智慧协同管理创新,有必要通过资源环境数智化转型“一个战场”上打赢资源节约与生态环境保护“两场战役”,实现资源开发、经济发展与生态环境保护“三方共赢”,有效破解资源、环境与经济发展之间长期存在的不协调问题。科学把握数字经济时代资源与环境管理主要发展方向,探索新兴技术新装备与传统要素融合,驱动数智技术融合—业务融合—市场融合—产业融合演化,推进减污降碳数智应用能力与创新能力提升。

c) 高质量实现数智融合驱动减污降碳协同治理。从内生视角构建全要素、全地域、全过程“多元共治”的减污降碳协同治理方案;基于数据支撑、融合创新、开放共享理念,设计“数据互联互通+智能技术支撑”双轮驱动减污降碳数智协同治理手段;更要围绕融合、联动、协同、共生等主题,从战略支撑、重点领域、模式创新等方面形成减污降碳协同治理数智化转型升级保障体系,为相关部门修订和完善数智融合赋能生态文明体制改革提供科学的决策依据。

参考文献 (References):

- [1] LIU H D, LUO Y X, GENG J J, et al. Research hotspots and frontiers of product R&D management under the background of the digital intelligence era: bibliometrics based on CiteSpace and HistCite [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(15): 6759.
 - [2] ZHOU B, ZHANG C, SONG H Y, et al. How does emission trading reduce China's carbon intensity? an exploration using a decomposition and difference-in-differences approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 676: 514-523.
 - [3] 卞锦婷, 黄凌, 李红丽, 等. 上海市PM_{2.5}和臭氧复合污染期多路径减排效果评估 [J]. *环境科学研究*, 2023, 36(2): 314-324.
- BIAN J T, HUANG L, LI H L, et al. Effect evaluation of multi-path emission reduction in Shanghai during PM_{2.5} and ozone combined

- pollution period[J].*Research of Environmental Sciences*,2023,36(2):314-324.
- [4] YANG X H,YANG X Y,ZHU J G,et al.Synergic emissions reduction effect of China's 'Air Pollution Prevention and Control Action Plan':benefits and efficiency[J].*Science of the Total Environment*,2022,847:157564.
- [5] CHEN W Q,TANG H Y,HE L,et al.Co-effect assessment on regional air quality:a perspective of policies and measures with greenhouse gas reduction potential[J].*Science of the Total Environment*,2022,851:158119.
- [6] 姜华,高健,李红,等.我国大气污染协同防控理论框架初探[J].*环境科学研究*,2022,35(3):601-610.
- JIANG H,GAO J,LI H,et al.Preliminary research on theoretical framework of cooperative control of air pollution in China[J].*Research of Environmental Sciences*,2022,35(3):601-610.
- [7] 刘学军,沙志鹏,宋宇,等.我国大气氨的排放特征、减排技术与政策建议[J].*环境科学研究*,2021,34(1):149-157.
- LIU X J,SHA Z P,SONG Y,et al.China's atmospheric ammonia emission characteristics,mitigation options and policy recommendations[J].*Research of Environmental Sciences*,2021,34(1):149-157.
- [8] ISHIDA H.The effect of ICT development on economic growth and energy consumption in Japan[J].*Telematics and Informatics*,2015,32(1):79-88.
- [9] XU Q,ZHONG M R,LI X.How does digitalization affect energy? international evidence[J].*Energy Economics*,2022,107:105879.
- [10] 张争妍,李豫新.数字经济对我国碳排放的影响研究[J].*财经理论与实践*,2022,43(5):146-154.
- ZHANG Z Y,LI Y X.Research on the impact of digital economy on China's carbon emissions[J].*The Theory and Practice of Finance and Economics*,2022,43(5):146-154.
- [11] CHEN X H,ZHOU P,HU D B.Influences of the ongoing digital transformation of the Chinese economy on innovation of sustainable green technologies[J].*Science of the Total Environment*,2023,875:162708.
- [12] CHEN L F,WANG K F.The spatial spillover effect of low-carbon city pilot scheme on green efficiency in China's cities:evidence from a quasi-natural experiment[J].*Energy Economics*,2022,110:106018.
- [13] WU D S,XIE Y,LYU S J.Disentangling the complex impacts of urban digital transformation and environmental pollution:evidence from smart city pilots in China[J].*Sustainable Cities and Society*,2023,88:104266.
- [14] YE C.Digital economy,science and technology innovation and carbon emissions:a dynamic analysis of PVAR based on provincial panel data[J].*Journal of Risk Analysis and Crisis Response*,2023.doi:https://doi.org/10.54560/jracr.v13i1.354.
- [15] DING Y,YANG Y L.The influence of digital development on China's carbon emission efficiency:in the view of economic and environmental balance[J].*Frontiers in Environmental Science*,2023.doi:10.3389/FENV.2023.1075890.
- [16] YI M,LIU Y F,SHENG M S,et al.Effects of digital economy on carbon emission reduction:new evidence from China[J].*Energy Policy*,2022,171:113271.
- [17] CHENG Y,ZHANG Y,WANG J J,et al.The impact of the urban digital economy on China's carbon intensity:spatial spillover and mediating effect[J].*Resources,Conservation and Recycling*,2023,189:106762.
- [18] ZHANG G X,LIU W,DUAN H B.Environmental regulation policies,local government enforcement and pollution-intensive industry transfer in China[J].*Computers & Industrial Engineering*,2020,148:106748.
- [19] 唐湘博,张野,曹利珍,等.中国减污降碳协同效应的时空特征及其影响机制分析[J].*环境科学研究*,2022,35(10):2252-2263.
- TANG X B,ZHANG Y,CAO L Z,et al.Spatio-temporal characteristics and influencing mechanism of synergistic effect of pollution and carbon emission reduction in China[J].*Research of Environmental Sciences*,2022,35(10):2252-2263.
- [20] LIU Y H,SHEN Y,FAN L L,et al.Parallel radars:from digital twins to digital intelligence for smart radar systems[J].*Sensors*,2022,22(24):9930.
- [21] GUO B N,WANG Y,ZHANG H,et al.Impact of the digital economy on high-quality urban economic development:evidence from Chinese cities[J].*Economic Modelling*,2023,120:106194.
- [22] WU J,ZHAO R Z,SUN J S.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.
- [23] DU Z L,WANG Y.Does energy-saving and emission reduction policy affects carbon reduction performance? a quasi-experimental evidence in China[J].*Applied Energy*,2022,324:119758.
- [24] 刘军,杨渊懿,张三峰.中国数字经济测度与驱动因素研究[J].*上海经济研究*,2020,32(6):81-96.
- LIU J,YANG Y J,ZHANG S F.Research on the measurement and driving factors of China's digital economy[J].*Shanghai Journal of Economics*,2020,32(6):81-96.
- [25] 王锋正,刘向龙,张蕾,等.数字化促进了资源型企业绿色技术创新吗?[J].*科学学研究*,2022,40(2):332-344.
- WANG F Z,LIU X L,ZHANG L,et al.Does digitalization promote green technology innovation of resource-based enterprises?[J].*Studies in Science of Science*,2022,40(2):332-344.
- [26] 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.
- ZHAO T,ZHANG Z,LIANG S K.Digital economy, entrepreneurship,and high-quality economic development: empirical evidence from urban China[J].*Management World*,2020,36(10):65-76.
- [27] 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.
- HUANG Q H,YU Y Z,ZHANG S L.Internet development and productivity growth in manufacturing industry:internal mechanism and China experiences[J].*China Industrial Economics*,2019(8):5-23.
- [28] BARON R M,KENNY D A.The moderator-mediator variable distinction in social psychological research:conceptual, strategic, and statistical considerations[J].*Journal of Personality and Social Psychology*,1986,51(6):1173-1182.
- [29] 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.
- JIANG T.Mediating effects and moderating effects in causal inference[J].*China Industrial Economics*,2022(5):100-120.