

中国数智化发展与减污降碳耦合协调及其驱动机制研究

边 靛^{1,2,3}, 卢天圆¹, 刘天利¹, 朱雄伟¹, 折磊磊¹

1. 西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710055
2. 陕西(高校)哲学社会科学重点研究基地-陕西省房地产业绿色发展与机制创新研究中心, 陕西 西安 710055
3. 西安建筑科技大学, 绿色建筑全国重点实验室, 陕西 西安 710055

摘要: 在新一轮科技革命和产业变革背景下, 促进数智化发展与减污降碳协同增效深度融合对我国生态保护和可持续发展目标的实现至关重要。基于 2011—2023 年我国 30 个省份的面板数据 (不包含西藏自治区和港澳台地区数据), 采用主成分分析法和超效率 SBM 模型测算数智化发展水平与减污降碳绩效水平, 并借助耦合协调度模型、Dagum 基尼系数法和二次指派程序 (QAP) 深入分析二者耦合协调水平、空间差异及驱动机制。结果表明: ①2011—2023 年, 我国省域数智化发展水平快速提升, 年均增长率为 11.48%; 减污降碳绩效则呈波动上升趋势, 平均值从 0.955 逐步增至 1.014, 但区域差异明显。②我国省域数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度总体处于初级协调阶段, 年均值范围为 0.601~0.670, 呈现从东部地区向中西部地区递减的分布格局, 高耦合协调性主要集中于东部地区。③我国数智化发展与减污降碳绩效的耦合协调度总体差异呈阶段性波动下降趋势, 区域间差异是影响耦合协调度总体差异的主要因素, 年均贡献率达 56.68%。④从内部结构驱动来看, 数智化发展差异是影响数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度空间差异的主要来源; 从外部环境驱动来看, 对外开放差异与金融发展差异则是其主要驱动力。研究显示, 数智化发展和减污降碳绩效耦合协调发展水平总体保持稳定, 但区域发展不均衡问题仍较为突出, 需依托区域协同治理, 坚持精准施策、因地制宜推进区域整体协调发展。

关键词: 数智化发展; 减污降碳; 耦合协调; 驱动机制

中图分类号: X321; F49 文章编号: 1001-6929(2026)03-0521-12
文献标志码: A DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2026.01.02

Coupling Coordination and Driving Mechanisms between Digital Intelligence Development and Pollution and Carbon Reduction in China

BIAN Jing^{1,2,3}, LU Tianyuan¹, LIU Tianli¹, ZHU Xiongwei¹, SHE Leilei¹

1. School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China
2. Shaanxi (University) Philosophy and Social Science Key Research Base-Research Center of Green Development and Mechanism Innovation of Real Estate Industry in Shaanxi Province, Xi'an 710055, China
3. State Key Laboratory of Green Building, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

Abstract: In the context of the new round of scientific and technological revolution and industrial transformation, promoting the deep integration of digital intelligence development with the synergistic reduction of pollution and carbon emissions is essential for achieving China's ecological protection and sustainable development goals. Using panel data from 30 Chinese provinces between 2011 and 2023 (excluding the data of Xizang Autonomous Region, Hong Kong, Macao and Taiwan), this study employs principal component analysis and super-efficiency SBM model to measure levels of the digital intelligence development and pollution and carbon reduction performance. The coupling coordination degree model, Dagum Gini coefficient, and quadratic assignment procedure (QAP) are then applied to examine coupling coordination levels, spatial disparities, and driving mechanisms. The results indicate that: (1) From 2011 to 2023, provincial digital intelligence development in China increased rapidly, with an average annual growth rate of 11.48%, while

收稿日期: 2025-09-07 修订日期: 2025-11-17

作者简介: 边靛(1993-), 女, 陕西铜川人, 副教授, 博士, 主要从事可持续城镇化建设管理研究, bianjing@xauat.edu.cn

基金项目: 陕西省社会科学基金项目 (No.2023SJ09); 教育部人文社科青年基金项目 (No.24YJC630003); 陕西省自然科学基金面上项目 (No.2020JM-497)

Supported by Special Programme of the Social Science Fund of Shaanxi Province, China (No.2023SJ09); Youth Fund Project of Humanities and Social Science of Ministry of Education, China (No.24YJC630003); General Programme of the Natural Science Basic Research Fund of Shaanxi Province, China (No.2020JM-497)

pollution and carbon reduction performance showed a fluctuating upward trend, increasing on average from 0.955 to 1.014, with pronounced regional disparities. (2) Over the same period, the overall coupling coordination degree between digital intelligence development and pollution and carbon reduction performance remained at a primary coordination stage, with average values ranging from 0.601 to 0.670, displaying a declining spatial pattern from eastern to central and western regions, and with high coordination levels mainly concentrated in the eastern region. (3) The overall disparity in coupling coordination degree between digital intelligence development and pollution and carbon reduction performance in China exhibited a downward trend of phased fluctuations, and interregional differences constituted the main factors affecting the overall disparity in coupling coordination degree, with an average annual contribution rate of 56.68%. (4) From the perspective of internal structural drivers, disparities in digital intelligence development are the main source of spatial disparities in coupling coordination between digital intelligence development and pollution and carbon reduction performance. From the perspective of external environmental drivers, disparities in openness and financial development constitute the main driving force. Overall, the coupling coordination between digital intelligence development and pollution and carbon reduction performance in China is generally stable. However, persistent regional disparities underscore the need for governance strategies that emphasize regional collaboration, precise policy making, and action according to local conditions in order to achieve higher-level coordinated development.

Keywords: digital intelligence development; pollution and carbon reduction; coupling coordination; driving mechanisms

当前,全球正共同面临气候变化带来的严峻挑战^[1],推动绿色低碳转型、遏制温室气体排放已成为国际社会的普遍共识^[2]。作为全球绿色发展的重要参与者,中国在持续推进生态文明建设的同时,仍面临生态环境保护结构性、根源性、趋势性压力尚未根本缓解的现实困境^[3]。环境污染物与碳排放具有高度的同根同源性,使得减污降碳协同增效成为新发展阶段经济社会发展全面绿色转型的必然选择^[4]。2022年《减污降碳协同增效实施方案》的发布,为系统推进相关工作提供了系统设计和行动指引。与此同时,以人工智能、物联网、区块链为代表的数字智能技术正在深刻重塑产业结构和环境治理模式。2023年,习近平总书记在全国生态环境保护大会上强调:“深化人工智能等数字技术应用,构建美丽中国数字化治理体系,建设绿色智慧的数字生态文明”。因此,系统解析数智化发展与减污降碳的耦合协调机理,不仅是推动绿色转型与高质量发展的核心议题,更对破解资源环境约束、助力实现中国式现代化具有重要意义。

数智化发展与减污降碳涉及复杂的多维研究领域,当前学界相关研究可归纳为3个主要方向:一是数智化发展的研究。相关研究多采用主成分分析法测度数智化发展水平^[5-6],并探讨数智化发展对绿色发展^[7]、企业创新^[8]等因素的影响。二是减污降碳的研究,主要聚焦于概念内涵、测度方法及影响因素等方面。在概念内涵方面,基于污染物与碳排放“同根同源”特性,减污降碳协同增效强调通过产业结构与能源系统的深度优化,以最低成本协同控制污染物与碳排放,实现系统绩效的整体提升,形成“1+1>2”的协同效应^[9]。在测度方法方面,现有文献主要划分为两类,一类是采用情景预测法来评估减污降碳协同效

应^[10],另一类则主要依托实际观测或统计数据,采用定量分析手段对减污降碳进行测度与成本分析。具体测度方法包括运用回归分析法来证明碳减排和污染减排之间存在协同效应^[11];采用交叉弹性系数法^[12]、耦合协调度模型^[13]等方法对减污降碳协同效应进行测度;部分学者采用非径向方向距离模型测算污染物与碳排放的边际减排成本,进而实现对减污降碳协同效应的量化评估^[14]。在影响因素方面,现有研究多基于宏观经济数据,关注数字经济^[15]、数字技术^[16]以及国家节能减排财政政策^[17]等因素对减污降碳的影响效应。三是针对数智化发展与减污降碳关系的研究,多数侧重于考察数智融合发展对减污降碳协同治理的单向影响^[18-19]。

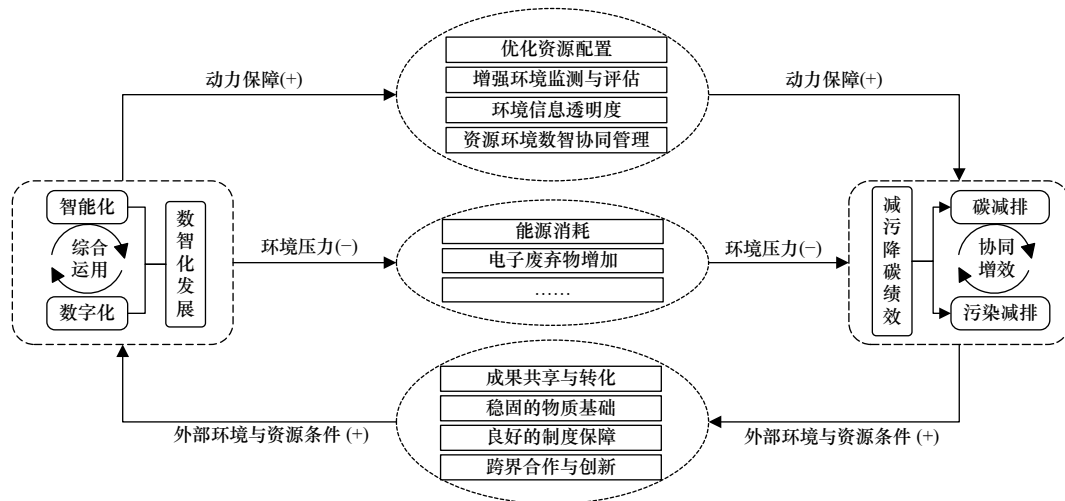
总体来看,尽管已有研究为数智化发展与减污降碳的探讨提供了有益基础,但目前该领域仍存在进一步深化和完善的空间:首先,多数文献局限于终端排放“量”的协同控制,少有文献从绩效视角对“质”的协同,即系统效率的整体提升开展深入测度与评价;其次,现有研究多聚焦于数智化发展对减污降碳的单向影响,缺乏对二者耦合协调关系的系统识别与量化分析;最后,既有驱动机制实证分析主要基于“属性数据”进行局部回归,未能引入“关系数据”范式,难以从全局视角揭示区域间耦合协调差异的空间关联与驱动机制。据此,本研究利用2011—2023年我国30个省份的面板数据(不包含西藏自治区和港澳台地区数据),从绩效视角构建多维减污降碳绩效评价指标体系以精确量化“质”的协同,将数智化发展与减污降碳绩效纳入统一研究框架,深度剖析二者耦合协调的内在机理并定量评估其协调水平,同时引入关系数据分析范式,借助二次指派程序

深入剖析二者耦合协调度区域差异的内外部驱动机制, 以为协同促进区域数智化发展与减污降碳绩效耦合提供有益借鉴。

1 数智化发展与减污降碳绩效耦合协调机理

数智化发展是数字化发展到人工智能更高阶的产物, 是数字化和智能化的融合与应用^[20]。减污降碳

绩效是指通过优化资源配置, 实现社会、经济和环境效益最大化与污染物和碳排放最小化的综合绩效。数智化发展与减污降碳绩效二者具有内在关联性和交互耦合特征, 实现数智化发展与减污降碳绩效的良好耦合, 发挥二者间的互馈增强效应, 进而促进系统整体效能最大化提升 (见图 1)。



注: 加号 (+) 代表该系统对另一系统存在正向促进作用, 减号 (-) 代表该系统对另一系统存在负向抑制作用。

图 1 数智化发展与减污降碳绩效耦合协调机理分析框架

Fig.1 Analytical framework for the coupling coordination mechanism of digital intelligence development and pollution and carbon reduction performance

一方面, 数智化发展为减污降碳绩效提供动力和保障。首先, 数智化发展通过优化算法, 实现能源、水资源等领域的高效利用, 从而优化资源配置。其次, 数智化发展运用多源数据融合分析对碳排放、污染排放等环境数据进行动态监测与分析, 增强环境监测与评估能力。再次, 数智化发展可以打破信息孤岛, 推动政府、企业、公众等多元主体之间实现信息的互联互通, 增加环境信息的透明度^[21]。最后, 数智化发展利用人工智能、大数据等新一代数字技术赋能资源环境数智协同管理, 助力实现资源高效绿色开发^[22]。

另一方面, 减污降碳绩效为数智化发展创造良好的外部环境 with 资源条件。首先, 提升减污降碳绩效为数智化发展营造更好的发展环境, 促进数智化发展成果共享与转化。其次, 减污降碳绩效为数智化发展提供了稳固的物质基础, 不断完善数字化、智能化发展基础条件, 促进数智化的广泛应用与深度融合。再次, 随着减污降碳协同增效目标的不断推进, 中央和地方政府相继出台了一系列政策文件, 包括加大资金支持力度、落实税收优惠政策等, 为数智化发展提供了良好的制度保障^[23]。最后, 减污降碳绩效推动数智化发

展实现跨行业、跨领域的合作与创新, 跨界合作不仅促进了新技术的融合与应用, 也催生了新的商业模式和服务模式。但值得注意的是, 数智化发展也带来能源消耗和电子废弃物增加等环境压力, 若能源结构未及时转型, 可能削弱减污降碳效果。为此, 应强化绿色能源利用和循环经济, 确保数智化发展与减污降碳绩效协同共赢。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 超效率 SBM 模型

Tone^[24] 于 2001 年构建了一种基于松弛变量的 SBM 模型, 该模型可以实现评价决策单元整体效率, 为减污降碳绩效的综合评价提供了科学基础。遵循源头治理的实践要求^[25], 需全面考虑资本、劳动、能源等关键投入要素的缩减对提升减污降碳绩效的作用。因此, 本研究采用投入导向规模报酬可变的非期望产出超效率 SBM 模型, 进行减污降碳绩效评价。具体计算方法参考文献 [26]。

2.1.2 耦合协调度模型

为科学刻画数智化发展与减污降碳绩效两系统间的互动关系, 本研究引入耦合协调度模型进行分

析。该模型能有效量化系统间的协同发展态势与整体功效^[27],具体计算方法参考文献[28]。由于二者在耦合协调过程中同等重要,故将其系统权重均设定为0.5。此外,借鉴Chen等^[29]的研究,本研究构建耦合协调度的判别标准与类型划分(见表1)。

表1 耦合协调度(D)的判别标准与类型划分

Table 1 Discrimination criteria and type division of coupling coordination degree (D)

耦合协调度	耦合类型	耦合协调度	耦合类型
$0.00 \leq D < 0.10$	极度失调	$0.50 \leq D < 0.60$	勉强协调
$0.10 \leq D < 0.20$	严重失调	$0.60 \leq D < 0.70$	初级协调
$0.20 \leq D < 0.30$	中度失调	$0.70 \leq D < 0.80$	中级协调
$0.30 \leq D < 0.40$	轻度失调	$0.80 \leq D < 0.90$	良好协调
$0.40 \leq D < 0.50$	濒临失调	$0.90 \leq D \leq 1.00$	优质协调

2.1.3 Dagum 基尼系数法

运用 MATLAB 软件计算 2011—2023 年我国省域数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度的 Dagum 基尼系数,进一步分析其区域内及区域间的差异及来源。具体计算方法参考文献[30]。

2.1.4 二次指派程序 (QAP)

从系统耦合理论视角来看,数智化发展与减污降碳绩效耦合协调差异受到区域内部结构驱动和外部环境驱动的影响,这种影响是各因素相互关联和作用的结果。二次指派程序 (QAP) 作为专门处理关系数据的非参数检验方法,可通过随机置换有效解决关系数据中存在的多重共线性与自相关问题^[31],故利用社会网络分析中的二次指派程序 (QAP) 识别我国省域数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度空间差异的成因。具体计算方法参考文献[32]。

2.2 评价指标体系构建

2.2.1 减污降碳绩效评价指标体系

减污降碳协同效应包含两层含义:一种是指狭义的协同效应,即实施环境相关政策而获得的直接效益(如减少温室气体和污染排放);另一种是被定义为具有协同效应的广义概念,指的是以实现可持续发展为前提,同时保持经济和社会可持续发展^[33]。到目前为止,研究更多地关注协同效应的狭义定义,而忽视了协同效应的广义概念,即实现经济效益、环境效益和社会效益的有机统一。基于此,本研究在考虑环境污染治理以及碳减排措施所产生的经济效益基础上,将与环境污染和碳排放密切相关的环境效益和社会效益纳入分析框架,从而为减污降碳绩效评价指标构建提供科学参考(见表2)。

表2 减污降碳绩效评价指标体系

Table 2 Pollution and carbon reduction performance evaluation index system

指标类别	指标名称	指标含义	指标说明
投入指标	资源投入	资本要素	人均资本存量
		劳动力要素	每万人就业人员数
		能源要素	人均能源消费总量
期望产出指标	效益产出	经济效益	人均实际GDP
		环境效益	建成区绿化覆盖率
		社会效益	人均预期寿命
		碳排放产出	碳排放
非期望产出指标	污染产出	大气污染排放	PM _{2.5} 年均浓度
		水污染排放	人均污水排放量
		固体污染排放	人均一般工业固体废物产生量

本研究借鉴郭沛等^[34]相关研究成果,分别选取资本、劳动力和能源作为投入指标,其中资本存量数据以2000年为历史基期,采用永续盘存法计算得出^[35]。考虑到我国“双碳”目标的核心是减排,且二氧化碳是温室气体的主要组成部分,故选取人均二氧化碳排放量作为碳排放的衡量指标。空气污染造成的健康危害和经济损失已引起社会各界的广泛关注,且PM_{2.5}是大气环境中的主要污染物^[21],因此选取PM_{2.5}年均浓度作为大气污染排放的评价指标。现有研究多重视大气污染物和碳排放相关指标,较少强调水污染与固体污染^[36];此外,国家发展改革委等三部门在2023年联合发布《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》,将污水处理纳入重点关注领域。基于此,本研究选取人均污水排放量和人均一般工业固体废物产生量分别作为水污染和固体污染排放的代理指标。由于经济发展过程中会产生相应的经济效益,故参考Xie等^[37]研究,选取2006年为基期的人均实际GDP作为其衡量指标。植物可以通过光合作用从空气中吸收二氧化碳并将其存储在土壤和植被中,从而增加陆地碳汇,故选取建成区绿化覆盖率作为环境效益的产出指标^[38]。传统的高污染、高碳排放的工业发展模式,给生态环境带来了沉重的负担,严重威胁着居民的身体和经济增长的质量^[39],故选取人均预期寿命作为社会效益的衡量指标,其中人均预期寿命以2010年为基期,按照平均年增长率计算得到^[40]。

2.2.2 数智化发展评价指标体系

考虑到数智化发展数据的可获得性,本研究借鉴张云等^[5]、罗斌元等^[6]、刘亦文等^[19]的研究,从数智基

基础设施水平、数智业务发展水平、数智产业发展水平、数智企业发展水平以及数智人文素养水平 5 个方面对数智化发展评价指标体系进行构建 (见表 3),

并在对原始数据进行极差标准化处理以消除量纲和数量级差异的基础上,运用主成分分析法测算得出数智化发展水平指数。

表 3 数智化发展评价指标体系

Table 3 Digital intelligence development evaluation index system

一级指标	二级指标	三级指标	四级指标
数智化发展	数智基础设施水平	数智基建	互联网宽带接入用户数
			互联网域名数
			互联网宽带接入端口数
			长途光缆线路长度
			移动电话用户数
			移动电话普及率
			移动电话交换机容量
			IPV4比例
			专利授权数
			普惠金融
	数智业务发展水平	软件业务	软件业务收入
		电信业务	电信业务总量
		电子商务	企业电子商务销售额
			快递业务量
	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(城镇非私营单位)
			科学研究和技术服务业就业人数(城镇非私营单位)
		产业规模	信息传输、软件和信息技术服务业固定资产投资
			信息传输、软件和信息技术服务业法人单位数 科学研究和技术服务业法人单位数
	数智企业发展水平	企业数智	上市公司数字化转型程度
		智慧金融	上市金融公司数字化建设程度
数智人文素养水平	人才素养	每十万人人口高等教育平均在校生数	
		人均受教育年限	
		地区教育支出/一般公共预算支出	
	教育投入	地区科学技术支出/一般公共预算支出	
		技术市场成交额/GDP	
		规模以上工业企业R&D经费 规模以上工业企业R&D人员全时当量	

2.3 数据来源及处理

2011 年国务院印发了《“十二五”节能减排综合性工作方案》,明确了我国节能减排的总体要求和重点任务。为此,本研究选取 2011—2023 年我国 30 个省份面板数据 (不含西藏自治区和港澳台地区数据) 为考察对象展开研究。原始数据来自《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国第三产业统计年鉴》《中国互联网络发展状况统计报告》、国泰安数据库以及各省份历年统计年鉴和统计公报,部分缺失数据采用线性插值法予以补充,其中,二氧化碳排放量数据来源于全球大气研究排放数据库 (EDGAR), PM_{2.5} 年均浓度数据来源于国家青藏高原

科学数据中心^[41], 数字普惠金融指数数据来源于北京大学数字金融研究中心与蚂蚁集团研究院共同编制的“北京大学数字普惠金融指数”。此外,为便于后续展开深入分析,参考 2011 年《中国科技统计年鉴》中的区域划分标准,将我国划分为东部、中部及西部地区。

3 结果与讨论

3.1 数智化发展与减污降碳绩效水平分析

3.1.1 数智化发展水平分析

2011—2023 年我国数智化发展水平呈快速增长态势 (见图 2), 由 2011 年的 0.210 增至 2023 年的 0.774, 这一趋势表明随着人工智能、大数据、区块链

等数字智能技术的加速应用,数智化发展已成为驱动经济高质量发展的关键引擎。分区域看,东部、中部、西部地区的数智化发展水平趋势与全国基本一致,但区域间不平衡突出,呈现出东部地区遥遥领先于中部、西部地区的特征。究其原因,东部地区得益于完

备的数字基础设施,较强的数字智能技术应用和创新水平,为东部地区的数智化发展提供了良好的环境和支持;而中部、西部地区人才储备和关键技术创新稍显不足,导致中部、西部地区数智化发展进程相对缓慢。

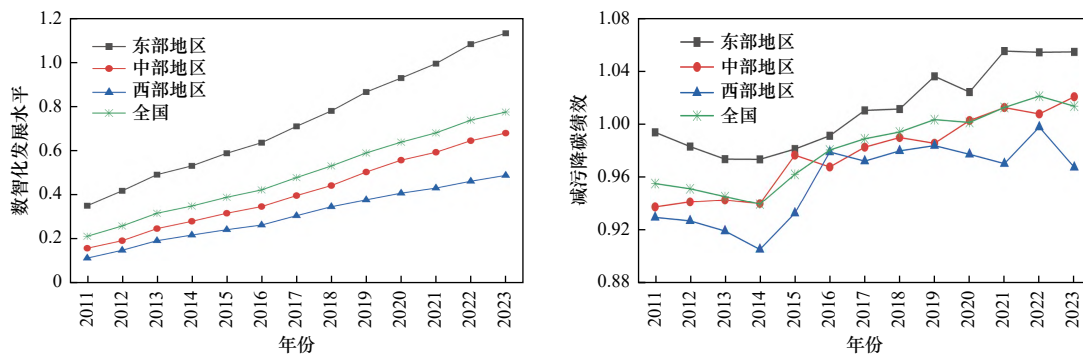


图2 2011—2023年我国数智化发展水平与减污降碳绩效平均变化趋势

Fig.2 Average trend of digital intelligence development level and pollution and carbon reduction performance in China from 2011 to 2023

3.1.2 减污降碳绩效水平分析

研究期内我国减污降碳绩效总体呈波动上升态势(见图2),减污降碳绩效从2011年的0.955提升至2023年的1.014,这也说明随着《减污降碳协同增效实施方案》等政策深入落实,政府部门愈发注重减污降碳协同增效效果,不断引导企业积极开展减污降碳协同治理技术创新。从地区平均值来看,我国各地区减污降碳绩效均呈波动上升态势,总体呈现西部<中部<东部的分布格局,且东部地区显著高于全国平均值,这一现象与发展初期各地的经济基础粗放,产业结构不均衡有关。

3.2 数智化发展与减污降碳绩效耦合协调的时空特征

3.2.1 数智化发展与减污降碳绩效耦合协调的时序特征

由于主成分分析法和超效率SBM模型测算出的数智化发展与减污降碳绩效指数是单个样本在特定时间和区域内的相对值,故无法直接进行比较^[42]。因此,本研究参考苏竣等^[43]研究方法,运用耦合协调度模型测算得出2011—2023年我国30个省份的数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度,并分析其时序演变特征(见图3)。

从我国整体来看,数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度呈现出小幅度波动,其年均值范围为0.601~0.670,处于初级协调时期,这说明我国省域数智化发展过程中要素之间互动关系良好,符合区域发

展实际。从不同区域层面来看,数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度水平存在明显的区域差异,总体上耦合协调度表现为东部>中部>西部,不同发展阶段数智化发展与减污降碳绩效的区域差异是造成二者耦合水平地区分异的主要原因,具体来看:①东部地区耦合协调度呈“小幅波动—整体回落—快速增长”趋势,东部地区数智化发展水平更高,促进减污降碳协同增效优势明显;②中部地区耦合协调度呈“波动—下降—上升”的特征,中部地区政府推动了多项支持数智化与减污降碳的政策,包括资金扶持、技术转移等,这些政策为中部地区的企业提供了强大支持,鼓

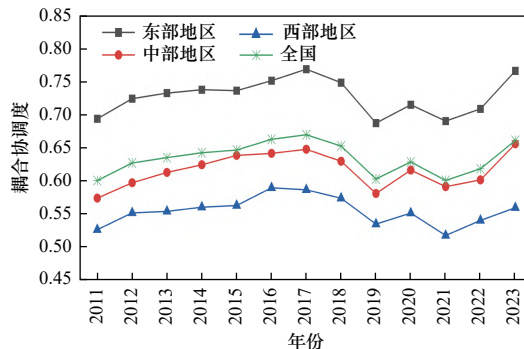


图3 2011—2023年我国数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度平均变化趋势

Fig.3 Average trend of the coupling coordination degree between digital intelligence development and pollution and carbon reduction performance in China from 2011 to 2023

励其向数智化和绿色化方向转型;③西部地区耦合协调度呈先波动后下降再上升态势,相较于东部地区,西部地区的产业结构以重工业、能源产业等传统产业为主,从而面临较大的技术升级和改造压力。

3.2.2 数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度的区域比较分析

按照耦合协调度的判别标准和类型(见表1)将2011—2023年我国30个省份数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度划分为10个等级,并对其进行区域比较分析(见图4)。研究期内,高耦合协调度省份区域集聚效应明显,主要集中于东部地区,形成以北京市、广东省两大优质协调增长极以及上海市、江苏省等次级增长极为核心的格局,逐步形成“东—西梯度

扩散”和“沿海—内陆辐射带动”的协调发展态势,且不同区域间的差异依旧较大。从区域划分层面来看,率先实现耦合协调发展的北京市、广东省等地区主要集中在东部地区;发展较为平稳的山西省、河南省等地区主要集中在中部地区,协调类型也比较丰富;处在轻度失调的新疆维吾尔自治区、宁夏回族自治区等地区主要集中于西部地区,且陕西省、新疆维吾尔自治区等地区耦合协调度均出现小幅回落现象。究其原因在于东部地区数智化硬件设施比较完善,资源配置效率更高,而西部地区受制于产业结构单一、能源消费高碳化、数字基础设施薄弱等多重约束,其数智化发展与减污降碳绩效未能形成良性互动,整体仍处于较低水平耦合协调状态。

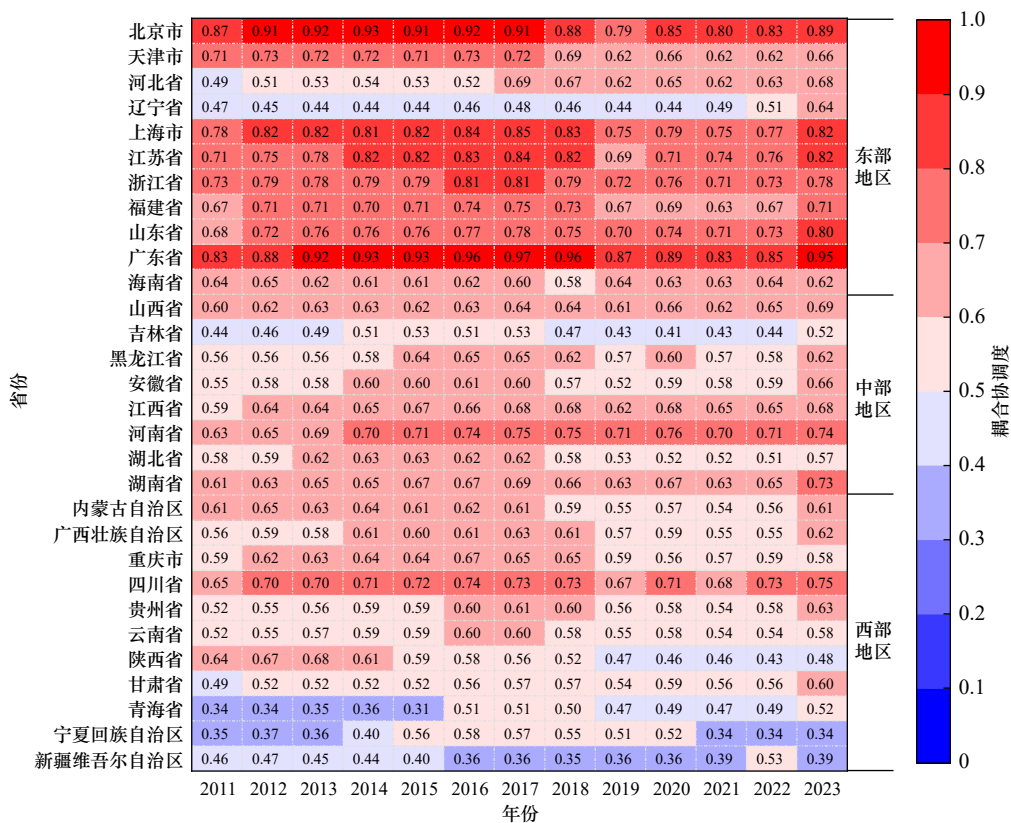


图4 2011—2023年我国数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度的区域比较分析

Fig.4 Regional comparative analysis of the coupling coordination degree between digital intelligence development and pollution and carbon reduction performance in China from 2011 to 2023

3.2.3 数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度的空间差异及分解

为探究数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度的空间差异,本研究进一步采用Dagum基尼系数测度不同区域内及区域间的差异及贡献率,其测算结果见表4。

从总体及区域内差异来看,我国耦合协调度总体

差异呈阶段性波动下降态势,且三大地区内部耦合协调度差异均存在非均衡现象。研究期内,我国数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度的总体Dagum基尼系数平均值为0.112,呈“上升—下降—波动上升”的态势,且整体表现为微弱下降态势,这说明数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度存在空间差异性,但总体上呈现趋同态势。从区域内差异来看,东部地区

表4 2011—2023年我国数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度的Dagum基尼系数及其分解

Table 4 Dagum's Gini coefficient and its decomposition of the coupling coordination degree between digital intelligence development and pollution and carbon reduction performance in China from 2011 to 2023

年份	总体Dagum基尼系数	Dagum基尼系数						贡献率/%		
		区域内差异			区域间差异			区域内差异	区域间差异	超变密度
		东部地区	中部地区	西部地区	东部与中部	东部与西部	中部与西部			
2011	0.114	0.094	0.047	0.107	0.121	0.157	0.088	26.64	56.50	16.86
2012	0.119	0.102	0.050	0.112	0.127	0.161	0.091	27.31	53.36	19.33
2013	0.121	0.107	0.052	0.114	0.125	0.166	0.093	27.63	53.62	18.75
2014	0.118	0.110	0.047	0.103	0.122	0.164	0.086	27.52	54.30	18.18
2015	0.115	0.110	0.043	0.099	0.115	0.162	0.087	27.39	54.03	18.58
2016	0.109	0.110	0.049	0.078	0.121	0.151	0.073	27.15	51.94	20.91
2017	0.106	0.096	0.054	0.077	0.114	0.152	0.077	25.92	59.19	14.89
2018	0.111	0.101	0.068	0.082	0.118	0.153	0.086	26.87	55.54	17.59
2019	0.103	0.083	0.074	0.076	0.109	0.141	0.085	26.10	56.84	17.06
2020	0.111	0.088	0.088	0.082	0.109	0.148	0.102	26.50	54.38	19.12
2021	0.107	0.074	0.072	0.092	0.098	0.153	0.102	25.27	61.94	12.79
2022	0.105	0.075	0.073	0.089	0.101	0.146	0.099	25.64	59.84	14.52
2023	0.111	0.075	0.061	0.107	0.094	0.161	0.107	25.44	65.37	9.19
平均值	0.112	0.094	0.060	0.094	0.113	0.155	0.090	26.57	56.68	16.75

Dagum 基尼系数呈波动下降趋势, 这表明东部地区开始系统地部署并推进数智化转型与减污降碳的协同发展, 进而缩小区域内的发展差异; 中部地区 Dagum 基尼系数呈波动上升趋势, 西部地区 Dagum 基尼系数呈先升后降再回升的波动特征, 这说明中部、西部地区内部耦合协调度差异并未逐渐缩小, 应加强数智化发展与减污降碳绩效的协调作用。

从区域间差异来看, 东部与西部地区的区域间差异最为明显。总体上, 东部与中部地区区域间 Dagum 基尼系数呈波动下降态势, 而东部与西部、中部与西部地区则呈波动上升态势, 这主要是因为西部地区在数智化发展上存在难以短期弥补的“鸿沟”, 且数字要素持续向东部、中部地区虹吸, 进而导致二者分化加剧。具体而言, 东部地区与西部地区的差异最大, 其 Dagum 基尼系数波动幅度为 0.141~0.166, 平均值为 0.155; 中部地区与西部地区的 Dagum 基尼系数升幅较大但差异较小, 由 2011 年的 0.088 升至 2023 年的 0.107, 增幅为 21.59%; 东部地区与中部地区的 Dagum 基尼系数波动幅度呈下降趋势, 由 2011 年的 0.121 降至 2023 年的 0.094, 降幅为 22.31%。

从差异来源及贡献来看, 缩小区域间差异是解决我国数智化发展与减污降碳绩效耦合协调空间不均衡的关键所在。具体而言, 区域内差异对总体差异的

贡献率呈现区间波动特征, 其范围为 25.27%~27.63%, 且略微呈下降趋势; 区域间差异的贡献率始终维持在较高水平, 其平均值达 56.68%, 远超过了超变密度和区域内差异的贡献率, 这一特征充分表明区域间差异是我国数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度总体差异的主要来源; 超变密度的贡献率呈波动下降趋势, 并低于区域间及区域内差异贡献率, 说明不同区域间数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度在实施过程中存在的交叉重叠部分对总体差异的贡献较小。因此, 要提升数智化发展与减污降碳绩效的耦合协调性, 应加强区域间合作, 以实现协调发展。

3.3 数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度空间差异的驱动机制分析

3.3.1 驱动因素选取

为了进一步探究不同驱动因素对我国数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度空间差异的影响, 本研究参考邓宗兵等^[44]的研究, 将我国省域数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度的空间差异划分为内部结构驱动与外部环境驱动。从内部结构驱动来看, 耦合协调度差异由数智化发展差异和减污降碳绩效差异共同驱动; 从外部环境驱动来看, 参考邓宗兵等^[44]、陈佳琦等^[45]的研究, 耦合协调度差异由产业结构差异、工业化水平差异等因素共同驱动, 同时为保证数

量级差距带来的估计偏误,对部分变量取对数处理,具体驱动因素选取如表5所示。此外,数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度差异(CCR)及各驱动因素差异均为两两地区间平均值的差异矩阵。

表5 驱动因素与变量说明

Table 5 Influencing factors and classification

表征类型	驱动因素	变量说明
内部结构驱动	减污降碳绩效差异(CPCRE)	减污降碳绩效
	数智化发展差异(DI)	数智化发展水平
外部环境驱动	产业结构差异(STRUC)	第三产业增加值/第二产业增加值
	工业化水平差异(IND)	规模以上工业企业单位数取对数
	对外开放差异(OPENE)	货物进出口总额/GDP
	金融发展差异(FIN)	金融机构本外币存贷款余额/GDP
	城镇化水平差异(URBAN)	城镇人口/总人口

3.3.2 QAP 相关分析

全样本的QAP相关分析结果如表6所示,耦合协调度差异与各驱动因素差异之间的相关系数均显著为正,这说明耦合协调度差异与各驱动因素差异之间的关系较为密切。此外,耦合协调度差异与数智化

发展差异、对外开放差异的相关关系较为密切,但这并不能说明数智化发展差异和对外开放差异对耦合协调度空间差异的影响最大,需进一步通过QAP回归分析进行确认。

3.3.3 QAP 回归分析

为了进一步探究全国及三大地区数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度空间差异的驱动因素,本研究设定随机置换次数为5000次,并构建二次指派程序(QAP)来进行回归分析(见表7)。由表7可见,调整后决定系数(Adj-R²)均通过了1%的显著性水平检验,这说明各驱动因素差异对耦合协调度差异有较强的解释能力。

全国整体层面数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度空间差异的QAP回归分析结果如表7所示。从内部结构驱动来看,数智化发展差异与减污降碳绩效差异系数分别为0.713($p < 0.01$)和0.429($p < 0.01$),这说明数智化发展差异是导致耦合协调度差异的主导因素,缩小区域间数智化发展差异是提升数智化发展与减污降碳绩效耦合协调性的关键路径和有效策略。从外部环境驱动来看,对外开放差异和金融发展差异的标准化回归系数分别为0.207($p < 0.05$)和0.199($p < 0.01$),

表6 QAP 相关分析结果

Table 6 Results of QAP correlation analysis

变量	CCR	DI	CPCRE	STRUC	IND	OPENE	FIN	URBAN
CCR	1.000***	0.735***	0.313***	0.264*	0.318***	0.586***	0.296**	0.327***
DI	0.735***	1.000***	-0.110	0.465**	0.384***	0.716***	0.417**	0.442***
CPCRE	0.313***	-0.110	1.000***	-0.011	0.074	-0.112	-0.152**	-0.147**
STRUC	0.264*	0.465**	-0.011	1.000***	0.059	0.505***	0.756***	0.479***
IND	0.318***	0.384***	0.074	0.059	1.000***	0.065	-0.016	-0.099
OPENE	0.586***	0.716***	-0.112	0.505***	0.065	1.000***	0.613***	0.801***
FIN	0.296**	0.417**	-0.152**	0.756***	-0.016	0.613***	1.000***	0.631***
URBAN	0.327***	0.442***	-0.147**	0.479***	-0.099	0.801***	0.631***	1.000***

注: *、**、***分别表示10%、5%、1%的显著性水平。随机置换5000次。

表7 QAP 回归分析结果

Table 7 Results of QAP regression analysis

变量	全国		东部地区		中部地区		西部地区	
	标准化回归系数	p值	标准化回归系数	p值	标准化回归系数	p值	标准化回归系数	p值
截距项	0.000		0.000		0.000		0.000	
DI	0.713	0.000	0.657	0.000	-0.033	0.461	0.217	0.045
CPCRE	0.429	0.000	0.620	0.003	0.652	0.001	0.537	0.000
STRUC	-0.280	0.001	-0.176	0.073	0.027	0.413	-0.269	0.008
IND	0.010	0.397	-0.285	0.006	-0.363	0.213	0.490	0.001
OPENE	0.207	0.013	0.186	0.065	-0.164	0.083	-0.110	0.105
FIN	0.199	0.002	0.218	0.049	0.486	0.129	-0.165	0.060
URBAN	-0.080	0.118	-0.129	0.150	0.286	0.090	0.101	0.112
Adj-R ²	0.740(0.000)		0.808(0.000)		0.522(0.000)		0.747(0.000)	

注: 括号内数字表示随机置换产生的判定系数不小于实际观察到的判定系数的概率,为单尾检验的概率。

表明这些因素在各省份的不平衡将会扩大数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度差异。产业结构差异的标准化回归系数为 $-0.280(p<0.01)$,这说明各省份产业结构差异有利于减少数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度差异。究其原因,不同产业对能源需求及污染排放特性各不相同,这促使资源在不同地区和行业之间进行优化配置。此外,工业化水平差异与城镇化水平差异并非驱动耦合协调度差异的主要因素,其影响未通过显著性检验。

东部、中部和西部地区数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度空间差异的 QAP 回归分析结果如表 7 所示。从内部结构驱动来看,数智化发展差异是东部地区耦合协调度差异最重要的驱动因素,而中部、西部地区减污降碳绩效差异则是主要驱动因素。从外部环境驱动来看,东部地区驱动力量有对外开放差异 ($0.186, p<0.1$)和金融发展差异 ($0.218, p<0.05$);中部地区驱动力量仅有城镇化水平差异 ($0.286, p<0.1$);西部地区驱动力量仅有工业化水平差异 ($0.490, p<0.01$)。因此,东部、中部、西部地区在数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度差异方面存在显著差异,亟须因地制宜实施差异化策略。这主要是因为:①全国要素市场尚未完全实现一体化,高级生产要素明显向东部地区集聚;②基础设施分布不均,中部、西部地区在能源、数字基础设施等领域存在突出短板,阻碍了数智技术的深度渗透与跨区域扩散,削弱其整体赋能效用。

4 结论与建议

a) 2011—2023 年,我国数智化发展水平快速提升,减污降碳绩效呈现波动上升态势,但不平衡不充分问题仍然突出,表现出东部地区整体优于中部、西部地区的变化特征,为此应以加快数智化发展为重要契机,推动其与减污降碳绩效实现更高水平的协同演进。一方面,应构建差异化政策支持体系,精准弥合区域发展差距,推动数智化发展与减污降碳绩效协同提质;另一方面,应加强区域间合作,打破要素流动壁垒,促进高级生产要素在中西部地区的合理配置,最终实现区域协调发展目标。

b) 我国数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度呈现平稳趋势,整体处于初级协调时期,但区域发展不平衡问题依然突出,并逐渐形成东部地区向中部、西部地区梯度递减的分布态势。为此,应利用大数据、人工智能等前沿技术,实现对资源利用、技术创新及减污降碳管理的全方面智能化升级,以提高数智化发展对减污降碳绩效的赋能作用。此外,应倡导绿色发展理念,构建精细化的碳排放与污染排放监测与统计

体系,引导高耗能领域节能减排,以此促进数智化发展与减污降碳绩效进入良性耦合协调阶段。

c) 我国数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度总体差异呈阶段性波动下降态势,区域间差异是耦合协调度总体差异的主要来源,其年均贡献率高达 56.68%,其中东部与西部地区间的差异尤为突出。因此,缩小区域间差异成为破解数智化发展与减污降碳绩效耦合协调区域不平衡问题的关键着力点。具体而言,一方面需打破行政界限,建立东部与中部、西部地区的联动机制,促进资源共享和技术交流,以加速数智化发展与减污降碳绩效的全面提升;另一方面应加速数智基础设施建设和全国统一大市场建设,推动行业间要素资源高效融合,并消除地方保护主义和市场壁垒,以优化资源配置,达成数智化发展与减污降碳绩效的时空联动发展。

d) 数智化发展差异是数智化发展与减污降碳绩效耦合协调度空间差异的主要来源,且对外开放差异和金融发展差异对耦合协调度差异具有显著的正向影响。值得注意的是,受区域间发展不均衡的现实约束,产业结构差异的缩小并未充分发挥出应有的积极作用。此外,各驱动因素差异的作用强度存在显著的区域差异特征,需要因地制宜实施差别化协调发展政策。因此,为破解数智化与减污降碳协同发展的区域不平衡问题,精准实施、因地制宜推进整体发展尤为重要。东部地区应发挥技术与资本优势,聚焦绿色低碳技术研发与输出;中部地区需推动数智化赋能传统产业绿色转型,促进城镇化与低碳化协同;西部地区需加强数字基础设施建设和人才引进,依托本地资源禀赋,发展特色绿色产业,实现高质量跨越式发展。

参考文献 (References):

- [1] HAN D R, BI C F, WU H S, et al. Energy and environment: how could energy-consuming transition promote the synergy of pollution reduction and carbon emission reduction in China? [J]. *Urban Climate*, 2024, 55: 101931.
- [2] GAN T Q, ZHOU Z Y, LI S B, et al. Carbon emission trading, technological progress, synergetic control of environmental pollution and carbon emissions in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 442: 141059.
- [3] 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]. *管理学刊*, 2023, 36(4): 26-46.
YUAN X L, XI J H, ZHONG C C, et al. Research on the collaborative driving factors and implementation paths of ‘pollution reduction and carbon reduction’ in China [J]. *Journal of Management*, 2023, 36(4): 26-46.
- [4] 赵燕, 孙慧, 马点圆. 城市绿色金融改革对减污降碳协同增效的影响研究: 基于双重机器学习的因果推断 [J]. *产业经济研究*,

- 2024(3):15-28+58.
ZHAO Y,SUN H,MA D Y.Research on the impact of urban green finance reform on synergizing the reduction of pollution and carbon emissions[J].Industrial Economics Research,2024(3):15-28+58.
- [5] 张云,柏培文.数智化如何影响双循环参与度与收入差距:基于省级-行业层面数据[J].管理世界,2023,39(10):58-83.
ZHANG Y,BAI P W.How digital intelligence affects dual circulation participation and income inequality:based on provincial-industry data[J].Journal of Management World,2023,39(10):58-83.
- [6] 罗斌元,陈艳霞.数智化如何赋能经济高质量发展:兼论营商环境的调节作用[J].科技进步与对策,2022,39(5):61-71.
LUO B Y,CHEN Y X.How can digital intelligence enable high-quality economic development:a study on the regulatory role of business environment[J].Science & Technology Progress and Policy,2022,39(5):61-71.
- [7] 刘亮,阮俊杰,庄海涛.数智化赋能长三角城市群绿色发展的效应研究[J].经济地理,2024,44(9):123-132.
LIU L,RUAN J J,ZHUANG H T.Impact of digital intelligence on green development in the Yangtze River Delta urban agglomeration[J].Economic Geography,2024,44(9):123-132.
- [8] 刘华珂,李旭超,聂禾,等.AI时代:城市数智化转型与企业创新[J].中国软科学,2024(2):38-54.
LIU H K,LI X C,NIE H,et al.AI era:digital and intellectual transformation of cities and enterprise innovation[J].China Soft Science,2024(2):38-54.
- [9] 王敏,李丽平.城市减污降碳协同增效:内涵特征、实践困囿与创新建议[J].环境保护,2024,52(7):13-16.
WANG M,LI L P.Synergies of urban pollution and carbon reduction:connotative characteristics,practical difficulties and innovative suggestions[J].Environmental Protection,2024,52(7):13-16.
- [10] XIAN B T,XU Y L,CHEN W,et al.Co-benefits of policies to reduce air pollution and carbon emissions in China[J].Environmental Impact Assessment Review,2024,104:107301.
- [11] WANG H,GU K Y,SUN H,et al.Reconfirmation of the symbiosis on carbon emissions and air pollution:a spatial spillover perspective[J].Science of the Total Environment,2023,858:159906.
- [12] 刘娜,高新伟.“蓝天保卫战”如何影响减污降碳协同度?[J].中国人口·资源与环境,2024,34(7):66-75.
LIU N,GAO X W.How does the ‘Blue Sky Defense War’ affect the synergy of pollution control and carbon reduction?[J].China Population,Resources and Environment,2024,34(7):66-75.
- [13] HAN D R,SUN P P,BI C F,et al.Whether the development strategy of the Yangtze River Economic Belt can achieve the double welfare effects of synergistic governance of pollution control and carbon reduction?[J].Urban Climate,2024,56:102083.
- [14] 崔连标,李晓,段宏波.长三角地区减污降碳协同效应评估[J].中国人口·资源与环境,2024,34(6):21-32.
CUI L B,LI X,DUAN H B.Synergistic effects of reducing pollution and carbon emissions in the Yangtze River Delta[J].China Population,Resources and Environment,2024,34(6):21-32.
- [15] YIN B B,KUANG P,DENG X H.The effect of synergistic pollution and carbon reduction in the digital economy:quasi-experimental evidence from Chinese cities[J].Frontiers in Energy Research,2023,11:1267355.
- [16] SHEN Y,ZHANG X W.Towards a low-carbon and beautiful world:assessing the impact of digital technology on the common benefits of pollution reduction and carbon reduction[J].Environmental Monitoring and Assessment,2024,196(8):695.
- [17] REN Y Y,HU Y C,YU Y T.Collaborative effect of the energy conservation and emission reduction fiscal policy in China[J].Environmental Research,2024,258:119431.
- [18] 张杰,刘亚琪.数智融合发展对长三角地区减污降碳协同治理的影响研究[J].长江流域资源与环境,2025,34(5):964-975.
ZHANG J,LIU Y Q.Impact of numerical intelligence integration development on collaborative governance of pollution and carbon reduction in the Yangtze River Delta Region[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2025,34(5):964-975.
- [19] 刘亦文,陈熙钧.数智融合发展对中国减污降碳协同治理的影响研究[J].环境科学研究,2023,36(11):2189-2199.
LIU Y W,CHEN X J.Research on the impact of digital intelligence integration development on collaborative governance of pollution reduction and carbon reduction in China[J].Research of Environmental Sciences,2023,36(11):2189-2199.
- [20] 谢家平,赵俊杰,谢吉青.数智化转型与企业新质生产力发展[J].经济经纬,2025,42(1):93-105.
XIE J P,ZHAO J J,XIE J Q.Digital intelligence transformation and the development of new quality productivity of enterprises[J].Economic Survey,2025,42(1):93-105.
- [21] YUE L,HAN L.The digital empowerment promotes synergistic efficiency in regional pollution reduction and carbon emission reduction:analysis of the moderating effects of market structure and government behavior[J].Journal of Cleaner Production,2025,493:144867.
- [22] 陈晓红,欧阳长风,张乘,等.资源环境数智协同管理的研究框架与未来展望[J].资源科学,2024,46(4):657-670.
CHEN X H,OUYANG C F,ZHANG C,et al.Collaborative management of resources and environment enabled by digitalization and intellectualization:research framework and prospects[J].Resources Science,2024,46(4):657-670.
- [23] 熊磊,章琦,严由亮,等.长江中游城市群数智发展水平与碳生产率的耦合协调时空特征及驱动因素[J].经济地理,2024,44(10):46-54.
XIONG L,ZHANG Q,YAN Y L,et al.Spatiotemporal characteristics and driving factors of the coupled coordination between digital intelligence development and carbon productivity in urban agglomerations of the middle reaches of Yangtze River[J].Economic Geography,2024,44(10):46-54.
- [24] TONE K.A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J].European Journal of Operational Research,2001,130(3):498-509.
- [25] 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.
LIU H J,TIAN Z.Quantitative evaluation of co-benefits of

- pollution reduction and carbon emission reduction and improvement path from the perspective of performance[J]. *Resources Science*,2024,46(7):1239-1251.
- [26] 成刚.数据包络分析方法与MaxDEA软件[M].北京:知识产权出版社,2014.
- [27] 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.
- [28] SUN F H,GUO J Y,HUANG X,et al.Spatio-temporal characteristics and coupling coordination relationship between industrial green water efficiency and science and technology innovation:a case study in China[J].*Ecological Indicators*,2024,159:111651.
- [29] CHEN S Y,TAN Z X,MU S Y,et al.Synergy level of pollution and carbon reduction in the Yangtze River Economic Belt:spatial-temporal evolution characteristics and driving factors[J]. *Sustainable Cities and Society*,2023,98:104859.
- [30] SUN B,WANG M X,ZHANG H Y,et al.Assessing spatiotemporal trends and drivers of collaborative governance for air quality and carbon emission control:evidence from typical urban agglomerations in China[J].*Journal of Cleaner Production*,2025,519:146034.
- [31] ZHOU X,CHEN X Z,WANG T,et al.Towards low-carbon and resilient cities:coordinated development and its driving factors in 29 Chinese cities[J].*Sustainable Cities and Society*,2025,131:106790.
- [32] 李华,董艳玲.基本公共服务均等化是否缩小了经济增长质量的地区差距?[J].*数量经济技术经济研究*,2020,37(7):48-70.
LI H,DONG Y L.Does equalization of basic public services narrow the regional gap of the quality of economic growth?[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*,2020,37(7):48-70.
- [33] CAI Z Y, YANG X H, LIN H X, et al.Study on the co-benefits of air pollution control and carbon reduction in the Yellow River Basin:an assessment based on a spatial econometric model[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,2022,19(8):4537.
- [34] 郭沛,王光远.数字经济的减污降碳协同作用及机制:基于地级市数据的实证检验[J].*资源科学*,2023,45(11):2117-2129.
GUO P,WANG G Y.The synergistic effect of digital economy on pollution and carbon reduction and the influence mechanism:an empirical test based on prefecture-level city data[J].*Resources Science*,2023,45(11):2117-2129.
- [35] 张军,吴桂英,张吉鹏.中国省际物质资本存量估算:1952—2000[J].*经济研究*,2004,39(10):35-44.
ZHANG J,WU G Y,ZHANG J P.The estimation of China's provincial capital stock:1952-2000[J].*Economic Research Journal*,2004,39(10):35-44.
- [36] XU Y Y,LIU Z,WALKER T R,et al.Spatio-temporal patterns and spillover effects of synergy on carbon dioxide emission and pollution reductions in the Yangtze River Delta Region in China [J].*Sustainable Cities and Society*,2024,107:105419.
- [37] XIE P,DUAN Z C,WEI T,et al.Spatial disparities and sources analysis of co-benefits between air pollution and carbon reduction in China[J].*Journal of Environmental Management*,2024,354:120433.
- [38] CHEN X L,MENG Q G,WANG K K,et al.Spatial patterns and evolution trend of coupling coordination of pollution reduction and carbon reduction along the Yellow River Basin,China[J]. *Ecological Indicators*,2023,154:110797.
- [39] XU C C,ZHANG H L,LIN B Q.Achieving pollution abatement and carbon reduction synergistically:how can industrial robots play a role?[J].*Journal of Environmental Management*,2025,373:123816.
- [40] 程明梅,杨朦子.城镇化对中国居民健康状况的影响:基于省级面板数据的实证分析[J].*中国人口·资源与环境*,2015,25(7):89-96.
CHENG M M,YANG M Z.Impact of urbanization on the health of Chinese residents:an empirical study based on provincial panel data[J].*China Population,Resources and Environment*,2015,25(7):89-96.
- [41] 韦晶,李占清.中国高分辨率高质量PM_{2.5}数据集(2000—2023)[EB/OL].北京:国家青藏高原科学数据中心,(2024-08-19)[2025-08-25].<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/6168e75d-93ab-4e4a-b7ff-33152e49d0bf>.
- [42] 蒋正云,周杰文.长江经济带土地集约利用与绿色经济效率时空耦合特征及驱动因素[J].*长江流域资源与环境*,2024,33(4):742-757.
JIANG Z Y,ZHOU J W.Spatial-temporal coupling characteristics and driving factors of intensiveland use and green economic efficiency in the Yangtze River Economic Belt[J].*Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2024,33(4):742-757.
- [43] 苏竣,张煜.海南省科技创新与区域经济的耦合协调分析[J].*科技管理研究*,2021,41(14):1-9.
SU J,ZHANG Y.Analysis on the coupling and coordination of science and technology innovation and regional economy in Hainan Province[J].*Science and Technology Management Research*,2021,41(14):1-9.
- [44] 邓宗兵,肖沁霖,王炬,等.中国数字经济与绿色发展耦合协调的时空特征及驱动机制[J].*地理学报*,2024,79(4):971-990.
DENG Z B,XIAO Q L,WANG J,et al.Spatio-temporal characteristics and driving mechanism of the coupling coordination between digital economy and green development in China[J].*Acta Geographica Sinica*,2024,79(4):971-990.
- [45] 陈佳琦,姜海宁,金星星.长三角地区科技创新与绿色发展耦合协调格局及驱动机制[J].*长江流域资源与环境*,2024,33(5):924-936.
CHEN J Q,JIANG H N,JIN X X.Coupling and coordination pattern and driving mechanism of scientific-technological innovation and green development in Yangtze River Delta Region [J].*Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2024,33(5):924-936.

(责任编辑:刘方)