

产业绿色发展的减污降碳协同作用及机制： 以黄河流域为例

徐孝民, 李 伟

摘 要: 减污降碳协同增效是推动中国经济社会全面绿色转型的关键路径。黄河流域作为中国重要的能源和煤化工基地, 其经济发展面临严峻的生态环境治理压力, 亟需通过减污降碳协同增效实现经济高质量发展。本文基于大气污染、水污染和碳排放构建减污降碳协同评价指标体系, 采用复合系统协同模型评估黄河流域减污降碳协同现状, 运用空间自回归模型分析产业绿色发展对减污降碳协同的影响及其作用机制。研究发现: (1) 黄河流域城市减污降碳协同水平整体呈下降趋势, 并出现两极分化; (2) 产业绿色发展可显著提升减污降碳协同水平; (3) 数字化水平、科技投入可以增强产业绿色发展对减污降碳协同的正向作用, 但对对外开放水平的影响并不显著; (4) 产业绿色发展对减污降碳协同的促进作用在中游城市、资源型城市、政策支持城市及环境治理压力较大的城市更为突出。本文研究结果为从产业发展角度提高减污降碳协同、促进黄河流域高质量发展提供了新的见解。

关键词: 产业绿色发展; 减污降碳协同; 黄河流域; 数字化水平; 科技投入

中图分类号: F124.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2025)04-0095-15

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.20250702.001

一、引 言

全球气候变暖与极端天气事件频发促使各国加速推进可持续发展和低碳转型^[1]。中国作为全球第二大经济体, 面临环境污染防治与碳达峰碳中和双重挑战。《2023 中国生态环境状况公报》显示, 中国城市环境空气质量达标率为 59.9%, 城市环境空气质量持续改善, 但形势依然严峻; 《2023 年二氧化碳排放量报告》指出, 中国碳排放量达 120.4 亿吨, 亟需加快绿色低碳转型^[2]。为此, 中国出台了一系列政策方案。“十四五”规划纲要指出, 要深入打好污染防治攻坚战, 推进减污降碳协同增效; 2022 年, 生态环境部等七部门联合印发《减污降碳协同增效实施方案》, 强调把减污降碳协同增效作为促进中国经济社会全面绿色转型的总抓手。

减污降碳自提出后引发了学界的广泛关注, 虽然大量研究探讨了减污降碳协同效应, 但鲜有文献从复杂系统角度考虑减污降碳协同。多数学者采用二氧化硫^[3]、PM_{2.5}^[4] 或氮氧化物^[5] 等某

基金项目: 国家社会科学基金重大项目“我国煤炭消费有序减量替代的多智能体模拟与路径选择研究”(23AGL033); 中央高校基本科研业务费(中国矿业大学(北京)博士研究生拔尖创新人才培养基金)“黄河流域城市减污降碳协同治理研究”(BBJ2024073)

作者简介: 徐孝民, 中国矿业大学(北京)管理学院、决策科学与大数据研究院, xxm@cumtb.edu.cn (北京 100083); 李伟, 中国矿业大学(北京)管理学院、决策科学与大数据研究院

一指标衡量污染排放，虽然也有学者尝试采用二氧化硫、烟粉尘、PM_{2.5}^[6]、PM₁₀^[7]等多种污染指标表征污染排放，但这些指标大都属于大气污染物，缺乏对大气、水等多种类型污染物的综合考虑。此外，协同效应评估方法在学界也存在较大差异，主要包括耦合协调模型、跨弹性系数、熵值综合指数、年度环比变化率和复合系统协同模型等。但耦合协调模型主要进行静态分析，难以捕捉减污降碳协同的动态变化过程^[8]；跨弹性系数法局限于单一维度分析，无法揭示多维度的协同效应^[9]；熵值综合指数法缺乏对时间变化的深入考虑^[10]；年度环比变化率侧重对时间序列数据的趋势分析，难以揭示系统内部协同机制的演化特征^[11]。相比之下，复合系统协同模型基于系统科学理论，强调系统内部各要素之间的非线性相互作用与协同演化机制，能够动态反映系统的演化过程^[12]。因此，利用复合系统协同模型评估减污降碳协同水平，可以更准确地理解减污降碳协同的复杂性，为政策制定提供科学依据。

工业生产既是推动经济增长的核心动力，也是污染物与碳排放的主要来源，这种双重属性加剧了经济增长与生态环境保护之间的矛盾。而产业绿色发展通过推广节能减排技术、优化能源结构、提升资源循环利用效率，推动工业生产逐步摆脱高能耗、高排放的发展模式，并通过培育新能源、环保装备、循环经济及数字化等新兴产业，激发工业经济增长新动能^[13]。因此，推进工业及相关产业绿色发展，可以有效缓解经济增长引发的生态环境压力。

黄河流域作为中国重要的能源和煤化工基地，产业结构偏向于高污染、高能耗的传统产业，其经济发展伴随着污染物与二氧化碳排放增加，导致黄河流域发展面临经济增长与生态保护的三重压力^[14]。为此，习近平总书记强调，黄河流域生态保护和高质量发展是国家重大战略，并于2019年、2021年和2024年分别在郑州、济南、兰州主持召开推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会，进一步突出了黄河流域生态保护的战略意义。因此，系统评估黄河流域减污降碳协同现状，从产业视角探究产业绿色发展对减污降碳协同的影响及作用机制，对从源头推动黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。

基于此，本文以黄河流域为例，首先，利用PM_{2.5}、SO₂、烟粉尘、废水和CO₂构建减污降碳协同评价指标体系，并基于复合系统协同模型计算减污降碳协同水平，分析减污降碳协同特征及存在的问题；其次，利用工业资源利用强度和城市产业结构评估产业绿色发展水平，运用空间自回归模型探究产业绿色发展对减污降碳协同的影响及其作用机制。本文的边际贡献主要在于：（1）利用大气污染、水污染等多种污染物表征污染排放，丰富了以往以大气污染为主的污染排放评价框架，提高了减污降碳协同特征描述的准确性；（2）利用可以动态反映系统演化过程的复合系统协同模型，从大气污染、水污染和碳排放角度，评估减污降碳协同水平，提高了减污降碳协同评估的准确性；（3）基于产业绿色发展视角分析减污降碳协同增效，符合经济发展与生态保护的双重需要，明确了产业绿色发展与减污降碳协同增效之间的作用机理，为实现源头减污降碳和高质量发展提供了理论支撑。

二、理论分析与假设

（一）产业绿色发展与减污降碳协同

产业绿色发展是以生态优先为导向、技术创新为驱动、制度变革为保障的产业系统重构过程，其本质在于重塑产业活动底层逻辑，实现经济增长与生态承载力的动态平衡。然而，传统产业活动在生产过程中产生大量的污染物与碳排放，且企业往往将这些环境成本部分或全部转嫁给社会，导致资源配置扭曲，甚至加剧生态环境退化^[15]。因此，推动环境成本内部化成为产业绿色发展的主要任务。

技术创新和政策干预是推动外部成本内部化，加速产业绿色发展的关键驱动力。其中，清洁能源、节能减排技术的应用，能够有效降低污染物和碳排放强度，减轻企业环境治理压力。碳交

易、绿色税收等政策工具可以通过市场化手段内部化环境成本, 促使企业在追求经济效益的同时主动承担环境责任, 实现经济增长与环境保护的协同推进。

从经济高质量发展视角来看, 产业绿色发展不仅关注经济效率的提升, 更强调环境保护与社会公平之间的动态平衡。而绿色技术研发与应用既提高生产效率又降低资源消耗和污染排放, 有助于促进经济增长与生态保护协调统一。另外, 产业结构优化可以创造绿色就业机会, 减少绿色转型过程中可能引发的社会不公平问题。

由此可见, 产业绿色发展既是应对经济与环境问题的迫切需求, 又是促进社会公平的系统性战略。因此, 本文提出研究假设1。

假设1: 产业绿色发展有助于提高减污降碳协同水平。

(二) 产业绿色发展、数字化水平与减污降碳协同

数字化技术涵盖生产流程优化、能源管理、供应链管理和环境监测等多个领域, 具有跨领域适用性和渗透力。数字经济理论指出, 数字化通过提升生产效率、优化资源配置、增强信息透明度, 推动产业绿色转型, 且数字经济转型理论表明, 数字化可以驱动企业商业模式、管理模式及生产模式的根本性变革, 助力产业绿色转型^[16]。

首先, 传统依赖人工操作和机械设备的生产模式逐步被自动化和智能化技术所替代, 显著提高了生产效率。以煤化工、钢铁等工业制造领域为例, 企业通过数字化和智能化转型, 以及虚拟仿真技术进行产品设计与测试, 减少了实际生产中的试错成本和资源浪费。

其次, 数字化通过物联网、大数据和云计算等技术实现了企业内部生产数据与政府监管数据的互联互通, 有效解决了信息不对称问题^[17]。此外, 企业通过能源管理系统实现设备能耗的实时监控, 并结合历史能耗数据预测未来能源需求, 优化能源采购和分配, 有效减少运营成本, 降低碳排放强度。这种实时的数据分析和需求预测技术, 帮助企业精准控制库存、减少冗余运输, 优化原材料采购和库存管理, 降低能源消耗与物料浪费, 推动供应链绿色化。

由此可见, 数字化技术为产业绿色发展提供了技术基础, 在提升经济效率、减少资源消耗和促进绿色供应链建设等方面发挥积极作用。因此, 本文提出研究假设2。

假设2: 数字化水平会影响产业绿色发展与减污降碳协同之间的关系。

(三) 产业绿色发展、科技投入与减污降碳协同

技术创新理论指出, 科技投入是推动产业绿色发展的核心动力。增加绿色技术研发投入, 可以促进绿色技术产出与应用, 推动整体产业绿色升级, 提高企业市场竞争力, 实现环境保护与经济增长双赢^[18]。

首先, 绿色技术创新是产业绿色转型的关键驱动力, 而充足的资金支持可以推动清洁能源技术、绿色制造技术和废物循环利用技术的研发, 加速绿色技术在企业生产过程中的应用^[19]。因此, 科技投入为企业采用先进绿色技术奠定基础, 帮助产业突破绿色发展瓶颈, 提升整体绿色水平。

其次, 创新扩散理论指出, 受技术壁垒、资金不足及信息不对称等因素的制约, 新技术的普及往往存在一定的时间滞后性。而持续的科技投入, 尤其是补贴、税收优惠及政策激励等手段, 能够有效降低企业采用绿色技术的成本, 加快绿色技术的引进与应用, 促进绿色技术扩散。

由此可见, 持续的科技投入可以为技术研发提供资金支持, 通过政策激励和市场扩散, 加速绿色技术的应用进程, 推动产业绿色发展。因此, 本文提出研究假设3。

假设3: 科技投入会影响产业绿色发展与减污降碳协同之间的关系。

(四) 产业绿色发展、对外开放水平与减污降碳协同

技术创新具有溢出效应, 能够跨越国界并在其他地区产生影响。在国际经济与科技合作日益深化背景下, 先进国家在低碳与环保技术方面的创新成果, 通过外资企业、国际合作等, 扩散至

开放程度较高的国家或地区, 促进绿色技术的应用与创新^[20]。

外商投资和国际合作为国内企业引进国际先进绿色技术、提升产业环保水平提供重要路径。发达国家在清洁能源、污染控制及节能减排领域具有显著的技术优势, 国内企业通过与外资企业合作引进先进技术, 并通过模仿学习, 逐步提升自身绿色技术能力, 通过引进与创新的双向作用, 加速产业绿色发展进程。另外, 较高的对外开放水平可以缩短技术创新的扩散滞后时间, 加速绿色技术向国内企业传播, 为国内市场引入更多的新生产要素和先进技术, 推动国内产业绿色升级。

由此可见, 国内企业可以通过对外开放引进和采用先进绿色技术, 推动产业结构绿色升级。基于此, 本文提出研究假设4。

假设4: 对外开放水平会影响产业绿色发展与减污降碳协同之间的关系。

三、研究设计

(一) 研究方法

黄河流域城市间产业结构、经济水平和资源条件存在较大差异, 邻近城市产业绿色发展难以作用于本地城市, 但污染物和碳排放具有显著的跨界传播特性, 邻近城市的污染物和碳排放对本地城市的减污降碳协同水平有着直接影响, 因此, 本文采用考虑因变量空间滞后项的时间—空间双向固定空间自回归模型 (SAR), 探索分析产业绿色发展对减污降碳协同的影响, 具体公式如下:

$$\ln SPCR_{it} = \beta_0 + \beta_1 W_{ij} \ln SPCR_{jt} + \beta_2 \ln LIGD_{it} + \rho \ln X_{it} + \alpha_i + \theta_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中, $\ln SPCR$ 是减污降碳协同水平的对数; i, j 为黄河流域各城市; t 为年份; W_{ij} 为城市 i 和 j 之间的 0-1 空间权重矩阵; $\ln LIGD$ 为产业绿色发展水平的对数; $\ln X$ 为控制变量的对数, 包括土地使用强度、用水总量、教育水平、经济发展水平、人口数量、绿色技术创新水平和车辆保有量; $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 为待估参数; α_i 是个体固定效应, 控制个体的所有非时变异质性; θ_t 是时间固定效应, 控制由样本的时间变化产生的联合效应; ε_{it} 是误差项。

(二) 变量选择和测量

1. 减污降碳协同水平。

(1) 评价指标体系。本文定义了减污系统和降碳系统, 两者的相互作用形成了减污降碳复合系统。减污系统用 $PM_{2.5}$ 浓度、 SO_2 排放量、烟粉尘排放量和废水排放量衡量, 降碳系统用二氧化碳排放量衡量, 具体指标体系如表 1 所示。

表 1 减污降碳指标系统

复合系统	子系统	指标	指标方向
减污降碳 S	减污 S1	$PM_{2.5}$ 浓度	—
		SO_2 排放量	—
		烟粉尘排放量	—
		废水排放量	—
	降碳 S2	CO_2 排放量	—

(2) 模型构建。为去除量纲影响, 先对数据进行标准化处理。设系统的序参量为 $h_{ji} = (h_{j1}, h_{j2}, \dots, h_{jn})$, 其中 n 为影响该系统运行的指标个数, $n \geq 1, \alpha_{ji} \leq h_{ji} \leq \beta_{ji}, (i=1, 2, \dots, n), \alpha_{ji}, \beta_{ji}$ 分别为序参量 h_{ji} 的最小值和最大值, 为避免因分母为零导致有序度为零的情况, 本文在最值的基础上乘以 $1+b (b=0.1)$ ^[21]。

① 指标有序度模型。有序度反映系统的有序程度。当 $i \in (1, k)$ 时, h_{ji} 为正向指标, 其数值越大系统越有序; 当 $i \in (k+1, n)$ 时, h_{ji} 为负向指标, 其数值越小系统越有序。计算公式如下:

$$u_j(h_{ji}) = \begin{cases} \frac{h_{ji} - \alpha_{ji}}{\beta_{ji} - \alpha_{ji}}, & i \in (1, k) \\ \frac{\beta_{ji} - h_{ji}}{\beta_{ji} - \alpha_{ji}}, & i \in (k+1, n) \end{cases} \quad (2)$$

各指标的序度的取值范围为 $u_j(h_{ji}) \in [0, 1]$, $u_j(h_{ji})$ 的大小与系统的有序程度呈正向关系。

②系统有序度模型。子系统有序度通常采用几何平均法进行计算。其计算公式如下:

$$u_j(h_j) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n u_j(h_{ji})} \quad (3)$$

当子系统有 n 个特征指标时, 其不同时间段的有序度值是由 n 个指标在各个时间段对应的有序度综合而来。

③系统协同度模型。设子系统在初始时刻 t_0 的有序度变化值为 $u_j^0(h_j)$, ($j=1, 2, \dots, k$), 时刻 t_1 的有序度变化值为 $u_j^1(h_j)$, ($j=1, 2, \dots, k$), 利用几何平均法可求得减污与降碳复合系统的协同度 $SPCR$, 系数 ω 表示子系统对协同度的作用方向。计算公式如下:

$$SPCR = \omega \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n [u_j^1(h_j) - u_j^0(h_j)]} \quad (4)$$

其中, $\omega = \prod_{j=1}^n [u_j^1(h_j) - u_j^0(h_j)] / \left| \prod_{j=1}^n [u_j^1(h_j) - u_j^0(h_j)] \right|$, 如果 $\prod_{j=1}^n [u_j^1(h_j) - u_j^0(h_j)] / \left| \prod_{j=1}^n [u_j^1(h_j) - u_j^0(h_j)] \right| > 0$, 意味着子系统朝着同一个方向发展, 如果 $\prod_{j=1}^n [u_j^1(h_j) - u_j^0(h_j)] / \left| \prod_{j=1}^n [u_j^1(h_j) - u_j^0(h_j)] \right| < 0$, 意味着子系统向相反的方向发展。 $SPCR$ 值域为 $[-1, 1]$, 数值越大, 表示系统协同度越高, 反之则协同度越低。协同水平等级如表 2 所示。

表 2 复合系统协同水平等级

协同度	协同水平
$[-1, -0.666)$	高度不协同
$[-0.666, -0.333)$	中度不协同
$[-0.333, 0)$	轻度不协同
$[0, 0.333)$	轻度协同
$[0.333, 0.666)$	中度协同
$[0.666, 1]$	高度协同

2. 核心解释变量。本文核心解释变量是产业绿色发展水平。根据可持续发展理论, 工业生产作为资源密集型活动, 其绿色化程度主要取决于资源的高效利用与环境负担的减少。因此, 工业资源利用强度能够精准反映资源利用的经济效益与环境成本。工业能耗强度指单位工业产值消耗的能源量, 是衡量

能源效率和产业绿色化的关键指标, 高能耗强度可能伴随较高的温室气体排放和环境污染^[22]。而在黄河流域这一水资源紧缺地区, 降低单位工业产值用水量, 可以有效提升水资源的使用效率, 降低水污染负担^[23], 且电力消耗反映产业在电能使用方面的效率, 尤其是在电力消耗对环境的巨大影响下, 降低用电强度成为减少污染、提高能源使用效率的关键手段^[24]。此外, 生态现代化理论指出, 经济发展进程中, 产业结构逐渐从重工业向服务业和技术密集型产业转型, 这一过程有助于减少资源消耗和环境污染。其中, 第三产业比重增加有利于减少资源消耗, 降低污染与碳排放^[25], 而重污染行业规模与资源消耗及污染排放之间存在显著正向关系, 减少高污染行业规模, 对推动产业绿色转型具有重要意义^[26]。

工业资源利用强度侧重于微观生产效率, 产业结构绿色化侧重于宏观结构优化, 二者互为补充, 能够全面反映产业绿色发展过程中的资源利用效率与结构优化。因此, 本文基于工业资源利用强度和城市产业结构绿色化两个维度衡量产业绿色发展水平, 并采用熵值法计算各项指标的综合得分, 以此得到各城市产业绿色发展水平。指标具体情况如表 3 所示。

3. 控制变量。本文参考该领域的相关文献, 确定控制变量如下: (1) 土地使用强度 (lui), 由城市建成区面积与城市面积比值衡量^[27]; (2) 用水总量 (twu), 由供水总量衡量^[28]; (3) 教育水平 (el), 由普通高等学校在校人数与常住人口的比值衡量^[29]; (4) 经济发展水平 (urs), 用城乡居民储蓄年终结余衡量^[30]; (5) 人口 (pop), 由常住人口表征^[31]; (6) 绿色技术创新水平 (gt), 由绿色发明专利申请数衡量^[32]; (7) 车辆保有量 (vo), 由民用汽车拥有量衡量^[33]。

4. 机制变量。理论部分分析了可能影响产业绿色发展水平与减污降碳协同关系的三个核心机

表3 核心解释变量相关指标

变量	指标类别	衡量指标	权重	指标方向
产业绿色发展水平 LIGD	资源利用强度	工业能耗强度	0.045 4	—
		单位工业总产值用水量	0.010 0	—
		单位工业总产值用电量	0.060 4	—
	产业结构	第三产业占比	0.476 4	+
		重污染行业规模	0.407 9	—

制。借鉴前人研究，确定机制变量衡量指标如下。(1) 数字化水平 (dl)，用国际互联网用户数衡量^[34]。(2) 科技投入 ($iest$)，用科技投入支出占财政支出的比重衡量^[35]。(3) 地区开放水平 (ou)，以地区实际利用外资总额与地区 GDP 的比值衡量^[36]。

(三) 研究区域及数据来源

本文研究区域为青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南及山东 8 省，除去各州、盟、示范区和数据缺失单元，共涉及 65 个城市。2007 年 11 月 22 日，国务院发布《关于印发国家环境保护“十一五”规划的通知》，重点强调污染防治和保障城乡饮用水安全，着力解决环境问题对民众健康和可持续发展的影响。黄河流域作为重要的能源、煤化工区域及重要的水资源区域，受到该举措的重要影响。因此，本文将 2008 年作为开始年份，研究 2008—2023 年黄河流域 65 个城市产业绿色发展对减污降碳协同的影响。

本文数据来源于《中国城市统计年鉴》《中国统计年鉴》、各省统计年鉴、各地区统计年鉴、各地区生态环境局的空气质量公报、CSMAR 数据库等，少部分缺失数据采用线性插值法加以补充。

四、结果分析

(一) 减污降碳协同水平及产业绿色发展水平时空演化特征

本文利用复合系统协同模型计算得到黄河流域 2009—2023 年 65 个城市的减污降碳协同水平，其 kernel 核密度分析结果如图 1 左图所示。(1) 减污降碳协同水平核密度曲线出现左移，城市减污降碳协同水平整体下降。(2) 核密度曲线主峰高度逐渐下降，城市间减污降碳合作程度整体降低。(3) 核密度曲线表现出左拖尾现象，城市间协同程度差异增大，部分城市协同能力可能存在问题。(4) 2011 年减污降碳协同水平核密度曲线由单峰变双峰，协同水平趋于两极，“马太效应”显著。

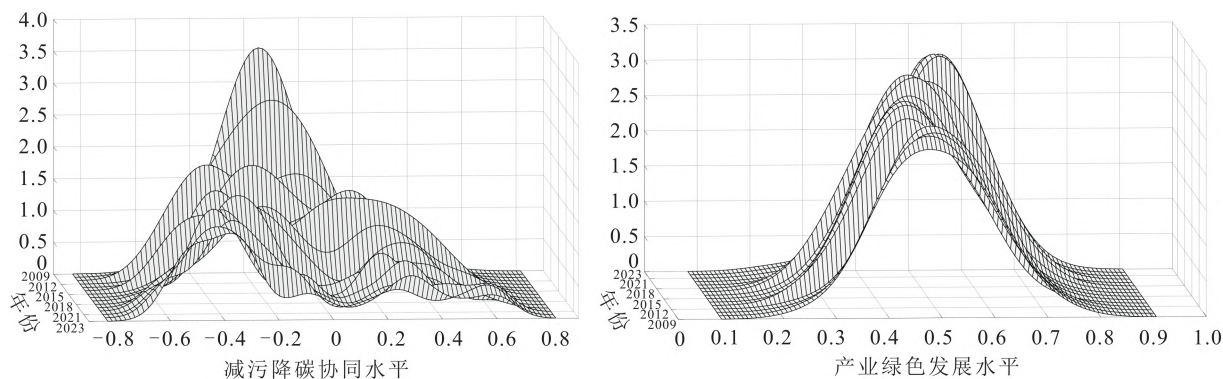


图1 减污降碳协同水平与产业绿色发展水平核密度

为了明确产业绿色发展水平与减污降碳协同之间是否存在明显的线性关系，本文进一步对产业绿色发展水平进行 kernel 核密度分析，如图 1 右图所示。(1) 产业绿色发展水平核密度曲线在

2012年出现左移,可能由于“十二五”期间中国加快淘汰落后产能、推动传统产业升级,导致部分高污染、高能耗企业被迫关停,但新的绿色产业尚未形成足够支撑,导致产业绿色发展水平有所下降。2020年产业绿色发展水平出现右移,可能由于2019年黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家重大战略,各省市加快产业结构优化,强化环境治理,提升绿色技术应用,进而推动产业绿色发展水平提升。(2)核密度曲线主峰高度在2009—2016年间变化不大,产业绿色发展水平相对稳定,2017年后主峰高度开始升高,产业绿色发展水平不断提升。(3)2009—2023年间核密度曲线只有一个主峰,产业绿色发展水平在研究期内发展稳定,没有出现明显分化。

除此之外,本文抽取几个特定年份进行对比分析,以更直观地了解2009—2023年黄河流域城市减污降碳协同水平和产业绿色发展水平的变化。对比2009年、2016年、2023年减污降碳协同水平和产业绿色发展水平可以发现,减污降碳协同水平波动明显,两极分化加强,部分地区产业绿色发展水平提升显著,两者存在一定的区域差异和不均衡现象。

总体而言,随着经济不断发展,黄河流域城市减污降碳协同水平整体下降且差距不断拉大,这与推动减污降碳协同增效,实现黄河流域生态保护和高质量发展的目标相悖。因此,如何在保证经济发展前提下,提高各城市减污降碳协同水平是当下黄河流域城市亟需解决的问题。更重要的是,黄河流域城市经济发展模式及环境基础各异,探究产业绿色发展水平在减污降碳协同中的影响及作用机制,对如何在产业发展中兼顾减污降碳,实现黄河流域生态保护和高质量发展具有重要的现实意义。

(二) 基准结果

本文利用SAR研究了产业绿色发展与减污降碳协同之间的关系。基准回归结果如表4所示。列(1)是模型的主效应结果,列(2)、列(3)、列(4)为基准回归的直接效应、间接效应和总效应结果。在列(4)中,产业绿色发展水平系数显著为正,即产业绿色发展水平每提高1%,减污降碳协同水平将提高0.4102%。假设1得到验证。

表4 产业绿色发展水平对减污降碳协同的影响

	(1)	(2)	(3)	(4)
效应	主效应	直接效应	间接效应	总效应
$\ln LIGD$	0.3535** (0.141)	0.3605** (0.145)	0.0497 (0.037)	0.4102** (0.171)
$\ln Control$	控制			
年份/城市	控制			
Spatial ρ	0.1153* (0.062)			
σ^2	0.0754*** (0.004)			
R^2	0.0065			

注:括号内为聚类稳健标准误,*** $p < 0.01$,** $p < 0.05$,* $p < 0.1$ 。

与此同时,通过列(2)、列(3)结果发现,产业绿色发展水平对减污降碳协同水平的直接效应显著为正,间接效应不显著,说明减污降碳协同水平主要受本地城市产业绿色发展水平的影响。其原因主要如下。(1)地域辐射有限。邻近城市产业绿色发展水平的影响主要通过区域溢出效应作用于本地城市,但这种空间溢出效应存在地域距离衰减,相比本地影响,邻近城市的间接影响有限。(2)源头控制。减污降碳的主要着力点是控制本地工业、能源、交通等排放源头,其清洁生产、节能改造等措施直接影响本地排放强度,而邻近地区的绿色发展主要通过技术溢出、示范

效应等间接途径发挥作用。

（三）稳健性检验

为保证研究结论的可靠性，本文进行了一系列稳健性检验。首先，替换空间权重测试结果的稳健性。本文用地理反距离矩阵替换0-1权重矩阵，对应表5中的列（1），其直接效应、间接效应、总效应均与基准回归结果一致，主要结论依然保持不变。其次，更换样本控制变量，减少其他因素对测试结果的影响。本文将教育水平指标替换为绿化覆盖率，对应表5中的列（2），其空间系数的显著性与方向保持不变，且直接效应、间接效应、总效应均与基准回归结果一致，主要结论依然保持不变。另外，考虑到自变量空间溢出效应可能带来的影响，本文将SAR模型替换为SDM模型，对应表5中的列（3），同样地，直接效应、间接效应、总效应均与基准回归结果一致，主要结论依然保持不变。

表5 稳健性检验结果

效应	(1)			(2)			(3)		
	替换空间权重			更换控制变量			更换SDM模型		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
lnLIGD	0.353 9** (0.144)	0.094 0 (0.090)	0.447 9** (0.205)	0.378 3** (0.150)	0.050 6 (0.038)	0.428 9** (0.176)	0.337 0* (0.184)	0.064 3 (0.275)	0.401 2* (0.213)
lnControl	控制			控制			控制		
年份/城市	控制			控制			控制		
Spatial ρ	0.181 1 (0.119)			0.112 3* (0.063)			0.080 0 (0.057)		
σ^2	0.075 6*** (0.004)			0.076 2*** (0.004)			0.073 3*** (0.004)		
R^2	0.011 8			0.000 2			0.044 1		

注：括号内为聚类稳健标准误，*** $p < 0.01$ ，** $p < 0.05$ ，* $p < 0.1$ 。

（四）内生性检验

为避免可能存在的逆向因果内生性问题，本文采用动态空间计量模型和工具变量法进行内生性检验。具体结果如表6所示。已有研究以杭州作为支付宝等数字支付工具的发源地，利用各城市与杭州的球面距离作为数字金融发展的工具变量，即距离杭州越近，数字金融发展水平可能越

表6 内生性检验结果

效应	(1)			(2)
	直接效应	间接效应	总效应	IV
lnLIGD	0.336 4** (0.142)	0.101 4** (0.046)	0.437 7** (0.185)	0.702 3** (0.295)
弱工具变量检验				35.569[16.38]
不可识别检验				22.816[0.000]
lnControl	控制			控制
年份/城市	控制			控制
Spatial ρ	0.061 1* (0.036)			
σ^2	0.082 9*** (0.004)			
R^2	0.021 7			0.201 0

注：括号内为聚类稳健标准误，*** $p < 0.01$ ，** $p < 0.05$ ，* $p < 0.1$ ，中括号内数值为Stock-Yogo在10%水平上的临界值及K-Paapr LM统计量的P值。

高^[37]。基于这一逻辑, 本文尝试寻找产业绿色发展的空间引领中心——上海。上海是中国经济发展的领头羊, 其推进绿色制造、发展绿色服务业、构建绿色金融体系等政策举措走在全国前列, 对周边地区有一定的示范和溢出效应, 即距离上海越近, 受其绿色发展理念和政策影响越大, 产业绿色化程度可能越高^[38]。因此, 本文采用各城市到上海的地理距离作为工具变量进行内生性检验。

表6第(1)列报告了动态SAR模型结果, 直接效应、间接效应和总效应均显著。第(2)列为工具变量回归结果, 通过了弱工具变量和可识别检验, 结果可靠。在考虑内生性问题后, 产业绿色发展水平对减污降碳协同水平的回归系数均在5%的水平上显著。由此可见, 基准模型结果具有一定的稳健性。

(五) 机理分析

理论分析部分提到, 数字化水平、科技投入及对外开放水平会影响产业绿色发展水平的减污降碳协同作用, 但是否会影响以及如何影响, 还需要进一步验证。为了解决这一问题, 本文在基准回归模型中加入调节效应(公式5), 进一步验证猜想的三种机制。

$$\ln SPCR_{it} = \beta_0 + \beta_1 W_{ij} \ln SPCR_{jt} + \beta_2 \ln LIGD_{it} + \beta_3 \ln M_{it} + \beta_4 \ln LIGD_{it} \times \ln M_{it} + \beta_5 \ln X_{it} + \alpha_i + \theta_i + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

其中, $\ln M_{it}$ 是调节变量, $\ln LIGD_{it} \times \ln M_{it}$ 是产业绿色发展水平与调节变量的交互项。调节效应的总效应结果如表7所示。

表7 调节效应结果

	(1)	(2)	(3)
	数字化水平	科技投入	对外开放水平
$\ln LIGD$	0.3917*** (4.22)	0.2655*** (4.35)	0.3753*** (4.04)
$\ln dl$	0.0737** (2.31)		
$\ln LIGD \times \ln dl$	0.0917* (1.67)		
$\ln iest$		-0.0076 (-0.23)	
$\ln LIGD \times \ln iest$		0.1732* (1.78)	
$\ln ou$			-0.0129 (-1.42)
$\ln LIGD \times \ln ou$			0.0310 (1.20)
$\ln Control$	控制	控制	控制
年份/城市	控制	控制	控制
Spatial ρ	0.0982** (2.33)	0.1273*** (3.10)	0.1176*** (2.84)
σ^2	0.0748*** (22.05)	0.1116*** (22.04)	0.0757*** (22.04)
R^2	0.0321	0.0033	0.0087

注: 括号内为聚类稳健标准误, *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 。

表7列(1)结果显示,产业绿色发展水平显著为正,且产业绿色发展水平与数字化水平的交互项系数显著为正,说明数字化水平可以正向调节产业绿色发展对减污降碳协同的促进作用,假设2得到验证。其原因可能如下。(1)数字化可以促进精准控制、智能优化等数字技术在产业中的应用,有助于提高资源利用效率,减少污染排放。(2)数字化有利于建立污染物智能监测系统、排放在线预警和溯源机制,提高污染防治的精准度和效率。

表7列(2)结果显示,产业绿色发展水平显著为正,且产业绿色发展水平与科技投入的交互项系数显著为正,说明科技投入可以正向调节产业绿色发展对减污降碳协同的促进作用,假设3得到验证。其原因可能如下。(1)较高的科技投入为节能减排、资源循环利用等绿色技术的研发提供资金支持,有助于提高产业绿色发展水平。(2)科技投入可以促进区域内绿色技术转移及技术攻关合作,提升产业绿色转型能力。

表7列(3)结果显示,产业绿色发展水平系数显著为正,而产业绿色发展水平与对外开放水平的交互项系数为正但不显著,说明对外开放水平不会影响产业绿色发展水平对减污降碳协同的促进作用,假设4未得到验证。其原因可能在于,对外开放引进技术可能无法有效适应本地产业的实际需求,或本地企业缺乏足够的技术能力吸收这些外部技术,导致对外开放水平对产业绿色发展的促进作用有限。

因此,本地政府的政策支持、产业转型战略以及绿色创新能力,是推动产业绿色发展减污降碳协同效应的重要因素。

五、进一步讨论

(一) 区域异质性

黄河流域地域广阔,上、中、下游地区经济发展水平和生态环境差异明显,产业绿色发展在不同区域的作用可能存在差异,因此,本文对样本数据进行区域异质性分析,结果如表8列(1)所示,产业绿色发展水平对减污降碳协同的促进作用在中游城市具有统计学上的显著影响,而上游和下游城市结果并不显著。其原因可能在于,中游城市多为工业密集区域,产业结构以重工业为主,绿色技术升级和产业转型能够显著减少污染物和碳排放。相比之下,上游城市以生态保护为主要目标,产业活动较少,污染和碳排放的基础较低;而下游城市以服务业和高技术产业为主,因而产业绿色发展对减污降碳协同的边际效应可能较弱。

(二) 资源异质性

资源差异可能导致产业结构差异,因此,本文基于《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》,将样本数据划分为资源型城市和非资源型城市。资源异质性分析结果如表8列(2)所示。研究表明,产业绿色发展水平在资源型城市中具有统计学上的显著影响,而在非资源型城市中结果并不显著。其原因可能在于,资源型城市以资源开采和初级加工为主导产业,产业过程伴随着较高的污染和碳排放,在资源型城市实行清洁生产技术和资源循环利用措施可以显著减少污染和碳排放。而非资源型城市产业结构多样化,污染和碳排放来源较为分散,绿色发展效果难以集中体现,导致产业绿色发展对减污降碳协同的影响不显著。

(三) 政策异质性

为促进城市发展,中国实施了一系列产业政策,而政策支持力度可能对产业绿色发展产生重要影响。因此,本文基于工业和信息化部、国家发展和改革委员会公布的“宽带中国”示范城市和国家级大数据综合试验区,将样本数据划分为政策试点城市与非政策试点城市^[39]。政策异质性分析结果如表9列(1)和列(2)所示。研究表明,产业绿色发展水平在政策试点城市具有统

表8 区域和资源异质性检验结果

	(1)位置			(2)资源型城市	
	上游	中游	下游	是	否
$\ln LIGD$	0.276 9 (0.200)	0.483 6** (0.192)	0.311 4 (0.400)	0.566 9** (0.249)	0.000 4 (0.150)
$\ln Control$	控制	控制	控制	控制	控制
年份/城市	控制	控制	控制	控制	控制
Spatial ρ	0.096 2* (0.050)	0.073 2 (0.103)	0.168 5 (0.113)	0.180 6** (0.072)	-0.037 1 (0.071)
σ^2	0.050 5*** (0.006)	0.063 4*** (0.005)	0.094 1*** (0.008)	0.071 7*** (0.005)	0.069 3*** (0.009)
R^2	0.021 6	0.010 6	0.027 4	0.082 5	0.298 4

注: 括号内为聚类稳健标准误, *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 。

计学上的显著影响, 而在非试点城市中并不显著。其原因可能在于, 政策试点城市能够获得国家或地方政府在资金补贴、技术指导及基础设施建设等方面的优先支持, 吸引了大量科研机构和创新型企业入驻, 为试点城市创造了良好的绿色发展环境, 促进了绿色技术的快速发展和广泛应用。相比之下, 非试点城市缺乏类似的创新环境, 难以形成推动绿色发展的有效合力, 技术进步和产业转型步伐缓慢, 导致产业绿色发展对减污降碳协同的促进作用不明显。

表9 政策异质性检验结果

	政策异质性			
	(1)“宽带中国”试点		(2)国家级大数据试点	
	是	否	是	否
$\ln LIGD$	0.608 8* (0.331)	0.2977 (0.185)	0.537 9* (0.281)	-0.003 5 (0.211)
$\ln Control$	控制	控制	控制	控制
年份/城市	控制	控制	控制	控制
Spatial ρ	0.122 5 (0.077)	0.078 5 (0.081)	0.052 3 (0.103)	-0.023 0 (0.059)
σ^2	0.080 5*** (0.006)	0.068 2*** (0.006)	0.081 9*** (0.009)	0.069 9*** (0.005)
R^2	0.068 5	0.021 3	0.073 0	0.002 8

注: 括号内为聚类稳健标准误, *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 。

(四) 生态环境异质性

生态环境差异可能影响城市产业绿色发展意愿。因此, 本文基于表1污染与碳排放衡量指标, 利用熵值法计算各城市碳排放、污染排放及碳污综合排放数据, 并根据其年度均值将城市划分为高碳城市、低碳城市, 高污染城市、低污染城市, 以及高碳高污染城市、低碳低污染城市。生态环境异质性分析结果如表10所示。研究结果表明, 产业绿色发展在高碳城市、高污染城市及高碳高污染城市对减污降碳协同效应具有显著的促进作用, 而在低碳城市、低污染城市和低碳低污染

城市中该效应并不显著。其原因可能在于，高碳城市、高污染城市、高碳高污染城市长期依赖高污染、高能耗的传统产业，环境问题突出，绿色发展需求迫切，且这些城市面临更严格的环保法规和激励措施，通过强制或鼓励企业绿色转型，减少污染物与碳排放，增强减污降碳协同效应。相比之下，低碳城市、低污染城市、低碳低污染城市基础设施完善、生产技术较为绿色，因此产业绿色发展边际收益较低，对减污降碳协同的影响不明显。

表 10 生态环境异质性检验结果

	(1)		(2)		(3)	
	高碳	低碳	高污染	低污染	高碳高污染	低碳低污染
$\ln LIGD$	0.419 9*** (0.147)	-0.168 1 (0.448)	0.322 7* (0.184)	0.313 0 (0.192)	0.280 7* (0.151)	0.272 2 (0.179)
$\ln Control$	控制	控制	控制	控制	控制	控制
年份/城市	控制	控制	控制	控制	控制	控制
Spatial ρ	-0.080 9 (0.060)	-0.041 2 (0.123)	-0.029 4 (0.055)	0.230 9*** (0.072)	-0.273 7*** (0.051)	0.097 0 (0.070)
σ^2	0.068 6*** (0.006)	0.048 0*** (0.013)	0.041 3*** (0.004)	0.069 1*** (0.005)	0.052 6*** (0.005)	0.101 1*** (0.008)
R^2	0.000 5	0.207 2	0.100 7	0.001 5	0.000 2	0.052 7

注：括号内为聚类稳健标准误，*** $p < 0.01$ ，** $p < 0.05$ ，* $p < 0.1$ 。

六、结论与政策启示

本文利用 2008—2023 年黄河流域 65 个城市相关数据，基于复合系统协同模型、熵值法和空间自回归模型，分析产业绿色发展与减污降碳协同之间的关系，并探讨了这一关系背后的影响机制。研究结论如下。（1）黄河流域城市减污降碳协同水平整体下降，城市间协同水平差异逐渐加大，形成“强者愈强，弱者愈弱”的局面。（2）产业绿色发展可以提高减污降碳协同水平，且这一影响主要来自本地城市。（3）机理分析结果表明，数字化水平和科技投入可以增强产业绿色发展对减污降碳协同的正向作用，但对外开放水平对这一关系的影响并不显著。（4）异质性分析表明，产业绿色发展在中游城市、资源型城市、政策支持城市和环境治理压力较大的城市对减污降碳协同表现出明显的促进作用。

基于本文研究结论，可为推动减污降碳协同增效，实现黄河流域生态保护和高质量发展提供以下政策启示。

1. 充分考虑城市异质性，实施差异化政策。黄河流域减污降碳协同水平整体下降，城市间差异逐渐加大，形成“强者愈强，弱者愈弱”的局面。因此，政策制定应充分考虑城市异质性，对于协同水平较高的城市，应通过财政奖励、技术推广等激励机制，鼓励其深化减污降碳成效，巩固现有优势；对于协同水平较低的城市，应加大资源倾斜，提供技术援助、资金支持，帮助其缩小差距，提升协同水平。

2. 推动城市自身产业绿色发展。产业绿色发展显著提升减污降碳协同水平，且这一影响主要来自本地城市。因此，地方政府应通过政策引导和市场机制，鼓励本地企业采用清洁生产技术，支持企业技术升级和低碳转型。

3. 提升城市数字化水平与科技投入。机理分析显示, 数字化水平和科技投入会增强产业绿色发展对减污降碳协同的正向作用。因此, 地方政府应加大对数字化基础设施建设的投入, 推动数字技术在企业生产过程的应用。此外, 增加科技研发经费支持, 鼓励产学研结合, 激励企业开发低碳技术和清洁生产工艺, 以技术创新驱动协同增效。

4. 对特定类型城市制定专项政策。异质性分析表明, 产业绿色发展在中游城市、资源型城市、政策支持城市和环境治理压力较大的城市中表现出显著的减污降碳协同效应。因此, 应根据城市特征制定专项政策, 加强中游城市产业结构调整, 推动绿色制造业发展, 平衡经济发展与环境保护; 加速资源型城市产业多元化转型, 减少对资源开采的依赖, 促进循环经济发展; 优化政策资源配置, 确保绿色发展资金和项目落地生效; 强化环境治理压力较大城市的环境监管和治理投入, 利用绿色技术提升环境质量。

参考文献

- [1] Song, M., Q. Xie, Z. Shen. Impact of green credit on high-efficiency utilization of energy in China considering environmental constraints[J]. *Energy Policy*, 2021(22).
- [2] 王淑贺, 刘世哲, 李晓敏. 数字经济空间关联网络对减污降碳的影响机制研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2025(2).
- [3] Chen, S., Z. Tan, J. Wang, et al. Spatial and temporal evolution of synergizing the reduction of pollution and carbon emissions and examination on comprehensive pilot effects—Evidence from the national eco-industrial demonstration parks in China[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 101.
- [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).
- [5] 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(7).
- [6] 李子豪, 王悦. 数字贸易对城市减污降碳协同发展的影响——基于产业集聚与要素配置视角[J]. 经济经纬, 2025(1).
- [7] 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(7).
- [8] Nie, C., C. Lee. Synergy of pollution control and carbon reduction in China: Spatial-temporal characteristics, regional differences, and convergence[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 101.
- [9] Gao, X., N. Liu, Y. Hua. Environmental protection tax law on the synergy of pollution reduction and carbon reduction in China: Evidence from a panel data of 107 cities[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 33.
- [10] 胡森林, 曾刚, 王胜鹏, 等. 长江经济带减污降碳的时空格局演变与技术创新驱动[J]. 地理研究, 2025(1).
- [11] 李新越, 班凤梅, 毕旭, 等. 黄河流域减污降碳协同效应的时空特征及影响因素分析[J]. 环境科学研究, 2024(12).
- [12] Yi, M., Y. Guan, T. Wu, et al. Assessing China's synergistic governance of emission reduction between pollutants and CO₂[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 102.
- [13] 陈晓佳, 徐玮. 数据要素、交通基础设施与产业结构升级——基于量化空间一般均衡模型分析[J]. 管理世界, 2024(4).
- [14] 魏伟, 袁在武, 魏晓旭, 等. 重要生态功能区 GEP 与经济耦合协调关系——以黄河流域为例[J]. 经济地理, 2024(11).
- [15] 冯梅, 闫雅芬, 吴迪. 基于负外部性视角下中国工业环境责任评价体系研究[J]. 宏观经济研究, 2019(4).
- [16] 何琨玟, 张文彬, 张楠. 数智赋能与中国节能降碳效率: 机制与效应[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2025(1).

- [17]宋献中,陈新,龙文滨.数字化环境监测与企业绿色创新——基于环境监测网络建设的准自然实验[J].统计研究,2024(7).
- [18]岑树田,葛扬.创新激励、地方财政科技投入与技术进步[J].当代经济研究,2023(6).
- [19]徐孝民,李伟,黄胜忠.黄河流域环境风险因素的时空演变及影响因素分析[J].中国安全科学学报,2024(3).
- [20]别奥,杨上广.高水平对外开放能否促进企业绿色技术创新——基于自由贸易试验区建设的经验证据[J].国际商务(对外经济贸易大学学报),2024(4).
- [21]邬彩霞.中国低碳经济发展的协同效应研究[J].管理世界,2021(8).
- [22]黄跃,李琳.中国城市群绿色发展水平综合测度与时空演化[J].地理研究,2017(7).
- [23]林焯焱,徐昔保,王维.长江经济带绿色发展水平时空分异特征与影响因素[J].长江流域资源与环境,2023(9).
- [24]乔瑞,董锋,安泰龙.黄河流域绿色发展水平评价及障碍因素分析[J].统计与决策,2021(23).
- [25]滕堂伟,孙蓉,胡森林.长江经济带科技创新与绿色发展的耦合协调及其空间关联[J].长江流域资源与环境,2019(11).
- [26]袁文华,李建春,刘呈庆,等.城市绿色发展评价体系及空间效应研究——基于山东省17地市时空面板数据的实证分析[J].华东经济管理,2017(5).
- [27]Yu, Z., T. Yan, X. Liu, et al. Urban land expansion, fiscal decentralization and haze pollution: Evidence from 281 prefecture-level cities in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 323.
- [28]Li, J., Z. Shen, G. Liu, et al. The effect of social economy-water resources-water environment coupling system on water consumption and pollution emission based on input-output analysis in Changchun city, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 423.
- [29]Cai, Z., X. Ding, H. Lin, et al. Does urban scale borrowing aggravate carbon and air pollution emissions? [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 102.
- [30]Xue, W., Y. Lei, X. Liu, et al. Synergistic assessment of air pollution and carbon emissions from the economic perspective in China[J].*The Science of the Total Environment*, 2023, 858.
- [31]Hong, S., E. C. M. Hui, Y. Lin. Relationships between carbon emissions and urban population size and density, based on geo-urban scaling analysis: A multi-carbon source empirical study [J]. *Urban Climate*, 2022, 46.
- [32]Li, W., X. Xu, S. Huang, et al. Assessment of green technology innovation on energy-environmental efficiency in China under the influence of environmental regulation considering spatial effects [J]. *Scientific Reports*, 2023(1).
- [33]赵春明,潘细牙,李宏兵,等.私人交通、城市扩张与雾霾污染——基于65个大中城市面板数据的实证分析[J].财贸研究,2020(10).
- [34]Pan, M., X. Zhao, K. Lü, et al. Internet development and carbon emission-reduction in the era of digitalization: Where will resource-based cities go?[J]. *Resources Policy*, 2023, 81.
- [35]Chen, J., Y. Li, Y. Xu, et al. The impact of fiscal technology expenditures on innovation drive and carbon emissions in China[J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2023, 193.
- [36]Xu, Y., Z. Liu, T. R. Walker, 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.
- [37]张勋,杨桐,汪晨,等.数字金融发展与居民消费增长:理论与中国实践[J].管理世界,2020(11).
- [38]向云波,王圣云,邓楚雄.长江经济带化工产业绿色发展效率的空间分异及驱动因素[J].经济地理,2021(4).

[39]秦文晋, 刘鑫鹏. 网络基础设施建设对数字经济发展的影响研究——基于“宽带中国”试点政策的准自然实验[J]. 经济问题探索, 2022(3).

Synergistic Effects and Mechanisms of Industrial Green Development on Pollution and Carbon Reduction: A Case Study of the Yellow River Basin

XU Xiao-min, LI Wei

Abstract: The synergistic efficiency in pollution reduction and carbon mitigation represents a critical pathway for promoting comprehensive green transformation of China's economy and society. The Yellow River basin, as an important energy and coal chemical industry base in China, faces severe ecological and environmental governance pressures in its economic development, urgently requiring the achievement of high-quality economic development through pollution reduction and carbon mitigation synergy. This study constructs a comprehensive evaluation index system for pollution reduction and carbon mitigation synergy based on air pollution, water pollution and carbon emissions. It employs a composite system synergy model to assess the current status of pollution reduction and carbon mitigation coordination in the Yellow River basin and utilizes spatial autoregressive models to analyze the impact and mechanisms of green industrial development on pollution reduction and carbon mitigation synergy. The research findings reveal that: (1) The overall level of urban pollution reduction and carbon mitigation synergy in the Yellow River basin shows a declining trend with increasing polarization; (2) Green industrial development can significantly enhance the level of pollution reduction and carbon mitigation synergy; (3) Digitalization levels and technological investment can strengthen the positive effect of green industrial development on pollution reduction and carbon mitigation synergy, while the impact of openness levels is not significant; (4) The promoting effect of green industrial development on pollution reduction and carbon mitigation synergy is more prominent in midstream cities, resource-based cities, policy-supported cities, and cities under greater environmental governance pressure. The research results provide new insights for improving pollution reduction and carbon mitigation synergy and promoting high-quality development in the Yellow River basin from an industrial development perspective.

Key words: industrial green development; synergy of pollution and carbon reduction; Yellow River basin; digitization level; science and technology investment

(责任编辑 周振新)