

产业结构升级对黄河流域减污降碳的作用机制及情景预测研究

王淑英,姚福伟,王珂珂

(郑州大学 管理学院,郑州 450001)

摘要:CO₂排放与大气污染物的协同减排既是经济社会发展的挑战也是助推高质量发展的重大机遇.分析黄河流域产业结构升级对减污降碳的作用机制并进行可视化分析,运用STIRPAT模型进行实证分析,在此基础上创新性地模拟预测黄河流域未来减污降碳趋势.研究发现,整体上黄河流域研究期内减污降碳呈现向好趋势,其中中卫、石嘴山以及内蒙古乌海情况较为严重,是减污降碳的重点区域;黄河流域产业结构高级化的减污降碳效应较合理化更优,经济增长和人口增加均利于抑污减排;在区域异质性上,中下游地区产业结构升级的减污降碳效应相比上游地区更好;加快产业转型升级、稳定人口增长速率和经济高质量发展是黄河流域减污降碳的最优路径.

关键词:黄河流域;减污降碳;产业结构合理化;产业结构高级化;影响机制;情景模拟

中图分类号:X321;X821

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2026)01-0035-12

CO₂排放和生态污染问题加剧,环境保护的结构性、根源性、趋势性压力尚未根本解决,实现减污降碳的任务十分艰巨^[1].中国政府不断规划设计减污低碳发展路径和战略,明确将“双碳”目标纳入生态文明建设整体布局中.黄河流域产业结构倚能倚重、能源化工产业比重大,高知识含量的战略性新兴产业规模较小,生态环境保护和经济高质量发展矛盾突出,是我国实施抑污减排的典型区域^[2].深入研究黄河流域产业结构升级、实现绿色低碳发展具有时效性与紧迫性.

影响区域碳排放的主要因素有产业结构、人口、经济增长、城镇化水平、能源强度等^[3].产业结构升级对碳排放影响的相关研究主要为以下两方面:第一,将产业结构升级作为碳排放的控制因素,通过线性回归、投入产出模型等方法研究其对碳排放的影响;大部分研究表明碳排放强度与第三产业的增加值呈负相关^[4-5],与第二产业的增加值呈正相关^[6].第二,基于LMDI等碳排放分解方法对碳排放因素进行分解,采用STIRPAT等模型解析变动响应关系^[7].在环境治理领域,早期研究往往聚焦于废气、废水及固态废弃物等单一污染源指标的分析;而随着研究的深入,大多数学者倾向于运用多元化的指标体系或构建综合性的环境污染评估模型,以此更为全面地探讨与评估生态环境的治理成效与现状^[8-10].

当前关于减污降碳主要聚集在两方面.一是探究不同行业的减污降碳协同发展路径^[11-13].如张鸿宇等^[11]采用下游部门需求法和项目法以及大气污染物减排模型,预测基准、政策和强化情景下煤化工行业煤炭消耗和二氧化碳排放变化进而探究协同减排路径.文献^[12-13]分别对陶瓷行业与能源电力行业的减污降碳路径进行了分析与探究.二是减污降碳协同效应评估及措施评价^[14-17].刘华军等^[14]设计了一套从边际减

收稿日期:2024-11-29;**修回日期:**2025-01-22.

基金项目:河南省高校哲学社会科学重大项目(2025-YYZD-01);河南省软科学研究计划项目(242400410155);国家自然科学基金(72502222).

作者简介:王淑英(1968—),女,河南许昌人,郑州大学教授,博士生导师,研究方向为区域经济,E-mail:wangshuying@zzu.edu.cn.

通信作者:王珂珂(1994—),女,河南驻马店人,郑州大学副教授,研究方向为区域经济,E-mail:wkk@zzu.edu.cn.

引用本文:王淑英,姚福伟,王珂珂.产业结构升级对黄河流域减污降碳的作用机制及情景预测研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(1):35-46.(Wang Shuying, Yao Fuwei, Wang Keke. Research on the role mechanism and scenario prediction of industrial structure upgrading on pollution reduction and carbon reduction in the Yellow River Basin[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(1): 35-46. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.11.29.0003.)

排成本角度出发的新型评估模型,用以量化和分析我国在减污降碳方面的协同成效.而针对具体的减排措施,研究聚焦于技术革新和产业结构升级两大领域^[15-17].

针对环境污染的预测较多集中于碳排放领域,当前研究较多采用 LEAP、灰色关联度和 STIRPAT 模型 3 种方法进行预测^[18-21].此外,情景分析法被加入碳排放预测中,通过设计不同情景,模拟影响因素变化趋势来测算碳达峰或确定最佳碳减排时间.如 YANG 等^[19]基于 LEAP 模型分析了中国未来 10 年的空气污染物和 CO₂ 排放量并提出相关政策建议.由于行业特定参数的官方数据匮乏,单独依赖 LEAP 模型与灰色关联度分析方法可能会造成显著偏差,而 STIRPAT 模型则具有良好的拓展以及改进空间,近年来在碳排放预测领域得到广泛运用.MA 等^[20]通过 STIRPAT 模型对未来中国碳足迹发展进行情景预测,发现保持能源消费总量的低增长和第三产业在这三个行业中所占比例的高增长对于限制中国碳足迹的未来增长至关重要.

综上所述,本文从以下三方面进行边际拓展:首先,当前学术界关于产业结构升级与减污降碳的相关研究相对匮乏,本文结合理论剖析与实证检验,揭示产业结构升级在推动减污降碳方面的积极作用,拓宽减污降碳驱动因素的研究范畴,深化产业经济领域的理论研究;其次,本文从理论和实证上全面解析产业结构升级对减污降碳的作用机制,从异质性的视角,深入剖析并解构两者间复杂的内在逻辑关联;最后,依据不同区域的发展现状与潜力差异,设定多样化的情景并进行预测性分析,旨在为未来产业结构转型升级与低碳经济发展提供实证依据,同时也为相关政策的制定提供决策参考与数据支撑.

1 机制分析

产业结构指各产业及要素之间的联系及联系方式,周振华^[22]将产业结构分为合理化和高级化两个维度,后续已有众多学者通过这两个维度进行了实证研究^[23-24].产业结构合理化侧重研究产业间联系和耦合程度,而高级化是产业结构升级的一种衡量标准,指的是产业结构逐渐服务化的过程.本文以此理论框架为参照,对黄河流域产业结构升级如何影响减污降碳进行分析(附录图 S1).

产业结构合理化一般通过优化资源配置、提升能源利用率两个方面影响减污降碳:1)主导产业部门的变化影响区域经济发展.随着第二产业的崛起,工业生产规模的扩大、产业共生模式的完善和先进生产技术的应用提高了经济效益,能源化工产业的发展带动了经济的快速增长.但在此期间,污染物排放量急剧增加.最终,当服务业占据主导地位时,技术、人才和知识密集型产业的发展提高了资源配置的合理性和经济发展的效率.此外,合理化推动能源密集型行业减少高碳能源的使用,推动能源结构向清洁低碳方向转型,钢铁、建材等行业通过淘汰落后设备,改用清洁能源(如天然气、氢能),进而推动黄河流域减污降碳协同增效.2)产业结构合理化通过引导资源向高效产业流动,减少低效、高能耗产业的资源占用,从而提高能源和资源的整体利用效率.通过减少能源密集型行业的比重,增加现代服务业和高技术产业的占比,能够降低单位产出的能源消耗和污染排放.此外,优化产业分布能避免高耗能行业向欠发达地区转移,减少某些区域因能源使用低效而导致的污染物和碳排放集中,提升了减污降碳的效率.因此,提出假设 1:产业结构合理化对黄河流域减污降碳有促进作用.

产业结构高级化主要通过淘汰落后产能和催生新兴产业两个方面影响减污降碳:1)产业结构高级化进程的加快促进社会生产效率提升和分工细化,使经济结构服务化的同时伴随产业结构由低附加值向高附加值转变,生产要素由劳动向技术、知识演进,最终产品的比重逐渐上升,同时产业结构高级化与技术进步相结合,不断淘汰落后产能,高新科技的运用形成了高效劳动生产率,提升了企业技术密集程度和产品的剩余价值,形成产业高集约化,既拉动经济增长又降低污染排放,促进了减污降碳的进程.2)产业结构高级化有效加速了制造业向服务化转型的步伐,并促进了高新技术产业与现代服务业等新型经济体的蓬勃兴起.这一过程通过细化劳动分工、延长产业价值链条、激励生产技术革新等手段,实现了污染排放的显著降低,而可再生能源、环保材料的出现,不仅降低了对化石能源的依赖程度,还因产业高级化所蕴含的“环保特性”而显著降低了污染物的排放.同时,这一高级化进程促进了产业内部结构的更新换代,进一步激发了新兴行业的崛起,从而激发了社会的潜在消费需求,为经济增长注入了新的活力,进而推动黄河流域减污降碳水平的提升.因此,提出假设 2:产业结构高级化对黄河流域减污降碳有促进作用.

2 研究设计

2.1 研究区域

黄河自西向东依次穿越青海、甘肃、宁夏、内蒙古等九大省级行政区域,最终汇入渤海.考虑研究区域完整性,本文以黄河自然流域范围为基础,兼顾地域划分单元的整体性,并紧密关联地区经济与黄河流域的直接影响,选取了黄河流域干流及主要支流核心区所在的 57 个地级市作为研究对象,具体如附录图 S2 所示.

2.2 减污降碳指标

为表征城市减污降碳整体效能,统筹水、气、土、固废等环境要素治理和温室气体减排要求,优化治理目标、治理工艺和技术路线,强化多污染物与温室气体协同控制,参考文献[25]构建减污降碳指标 $RPCE$ (reduction of pollution and carbon emissions), 计算式为: $RPCE = \sum_{i=1}^4 E_i \times \pi_i$, 式中, $RPCE$ 表征城市减污降碳的强度,其取值范围为 0~1,越趋于 0 则表示减污降碳的效果越显著; E_i 为该城市减污降碳细分项指标,细分项指标采用归一化方法以消除极值影响, π_i 为细分指标对应的权重,其总和为 1,指标具体权重由熵权法计算所得.综合考虑数据的可获取性以及减污降碳各细分领域代表性指标,选取细分项指标如表 1 所示.

表 1 减污降碳指标
Tab. 1 Indicators of $RPCE$

一级指标	二级指标	计算方法	单位
减污指标	工业废水排放强度	工业废水排放量/GDP	t · 万元 ⁻¹
	工业 SO ₂ 排放强度	工业 SO ₂ 排放量/GDP	t · 万元 ⁻¹
	工业烟(粉)排放强度	工业烟(粉)排放量/GDP	t · 万元 ⁻¹
降碳指标	CO ₂ 排放强度	CO ₂ 排放量/GDP	t · 万元 ⁻¹

2.3 可视化模型

对黄河流域地级市减污降碳指数进行 Kriging 插值分析,可以更好评估黄河流域上中下游的减污降碳水平,为制定相关政策提供参考,计算式如下: $\hat{M}_0 = \sum_{i=1}^n \partial_i M_i$, 式中, \hat{M}_0 是点 (x_0, y_0) 处的估计值, ∂_i 是空间权重系数, M_i 是空间要素值,在此为 i 点的减污降碳指数.

2.4 产业结构合理化指标构建

目前产业结构合理化水平多使用结构偏离度指标衡量,但该评价指标存在缺陷,泰尔指数是对该指标的修正,但 Logarithmic 函数会扩大要素消耗度,减少要素稀缺度,且未添加绝对值,导致产业结构“失真”和“虚假合理化”,因此本文以加权结构偏离度表示产业结构合理化程度,以就业结构代表要素投入结构,同时鉴于经济非均衡的常态性,以产值占比衡量三大产业在经济领域的关键程度.计算方法如下:

$$RIS = \sum_{w=1}^n \left(\frac{Y_{w,t}}{Y_i} \right) \left| \frac{Y_{w,t}/L_{w,t}}{Y_i/L_i} - 1 \right|, \tag{1}$$

式中, RIS (rationalization of industrial structure) 代表产业结构合理化程度, Y_t 表示 t 时间的总产出(元), L_t 表示 t 时间的从业人员数量(人), $Y_{w,t}$ 表示 w 产业在 t 时间的总产出(元), $L_{w,t}$ 表示 w 产业在 t 时间的从业人员数量(人). RIS 值与产业结构合理化呈负相关.

2.5 产业结构高级化指标构建

学术界一般采用产值之比来衡量产业结构高级化,但这一指标并未反映出产业结构递进的趋向.事实上,产业结构高级化主要体现为两个内涵:①产业结构演进的趋势,从第一产业为主向第二再向第三产业为主过渡;②产业由低附加值向高附加值产品部门转移,从价值链低端走向高端的过程.结合数据的可获得性,本文选取产业结构层次指数来测算产业结构高级化水平.其计算式如下: $HIS = \sum_{m=1}^3 Y_m \times m$, 式中, HIS (high-ranking of industrial structure) 代表产业结构高级化程度. Y_m 表示第 m 产业产值占 GDP 的比重,这

一指数体现了第一产业占主体地位向第二、第三产业占主体地位的递进过程,代表了产业结构升级的目标和方向. HIS 值越大,表明产业结构越高级.

2.6 计量模型的构建

IPAT 恒等式存在着同比例变动的问题,而 STIRPAT 模型对这一问题进行了改进,人口、技术和经济因素在各自变动时对环境产生的影响被充分考虑.该模型的拓展性较强,是当前进行计量分析的主流方法.因此,本文采用 STIRPAT 模型进行实证研究,选取减污降碳指数($RPCE$)作为因变量,最终构建的模型如下:

$$\ln RPCE_{it} = \alpha_0 + \beta_1 \ln RIS_{it} + \beta_2 \ln HIS_{it} + \beta_3 \ln POP_{it} + \beta_4 \ln GDP_{it} + \beta_5 \ln Trade_{it} + \beta_6 \ln Urb_{it} + c_{it} + d_{it} + e_{it},$$

(2)

式中, i 代表城市; t 代表年份; GDP 表示区域人均 GDP; POP 表示区域人口总量; $Trade$ 表示外商投资程度,用外商投资依存度表示; Urb 表示城镇化率; α_0 表示常数项; c_{it} 表示城市个体效应; d_{it} 表示年份时间效应; e_{it} 为随机扰动项.

2.7 数据来源和描述性统计

各指标数据主要来源于各市(州)城市统计年鉴、各市(州)国民经济和社会发展统计公报及各市(州)统计局、环保局相关单位公报、《中国能源统计年鉴》《中国城市统计年鉴》.部分缺失数据采用相邻年份均值或插值法填充,本文涉及的相关变量描述性统计见附录表 S1 所示.

3 实证分析及模型检验

3.1 均值及可视化分析

为更好反映黄河流域减污降碳与产业结构升级的变化趋势,将产业结构合理化与高级化指标进行标准化处理,减污降碳与产业结构升级的均值变化见图 1.2013—2018 年黄河流域减污降碳均值整体呈现下降趋势,从 0.107 降为 0.045,但从 2019 后又逐渐上升,到 2022 年其数值为 0.071.产业结构合理化和高级化均值整体呈上升态势,其中合理化均值是在波动中上升,又因衡量合理化的加权结构偏离度是负向指标,说明黄河流域产业结构合理化发展存在一定问题,黄河流域横跨我国的东中西部三大区域,流域内经济、产业、生态水平差距较大,较多地区资源配置失衡,倚能倚重,为追求经济效益形成恶性循环,进而影响合理化发展.而高级化均值上升则较为稳定,从 2013 年的 0.059 增长为 2022 年的 0.122,增幅为 106.7%,表明黄河流域整体产业结构演进趋势良好.

为打破行政区域界限的影响,更直观反映黄河流域减污降碳水平,借助 ArcGIS 10.7 软件,利用自然断裂点分类分别对 2013 年和 2022 年的减污降碳水平进行空间可视化(附录图 S3,图 S4).从整体水平看,2013—2022 年黄河流域减污降碳数值下降,低碳清洁发展成效显著,存在较为显著的空间异质性特征.从时间尺度来看,黄河流域减污降碳平均值从 2013 年的 0.107 降为 2022 年的 0.071,下降趋势显著.从空间尺度来看,黄河流域减污降碳指数呈现“西高东低”的分布格局.具体来看,2013 年黄河流域减污降碳指数整体偏高,上游甘肃和宁夏整体低碳清洁发展水平较低,其中中卫、石嘴山以及内蒙古乌海情况较为严重,其数值均高于 0.343,是减污降碳的重点关注区域,主要原因在于产业结构偏重,高污染、高能耗行业占比大,使得减排

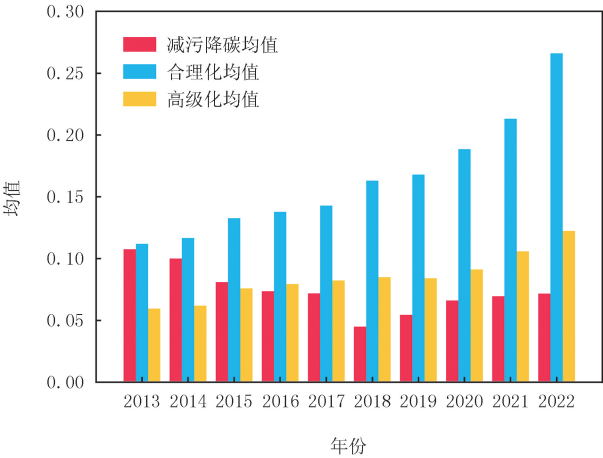


图1 黄河流域2013—2022年减污降碳与产业结构升级均值
Fig.1 The average of $RPCE$ and industrial structure upgrading in the Yellow River Basin(2013–2022)

压力较大.此外,传统能源的依赖性较强,清洁能源技术和产业转型步伐相对较慢,影响了整体减碳进度.政策执行和环保技术支持力度不足,以及资金和人才资源有限,也制约了两地在绿色发展上的突破和成效.而中下游尤其是陕西北部 and 山西南部减污降碳水平较高,其数值均低于 0.064.随着时间推移,流域整体减污降碳指数下降,到 2022 年,全流域减污降碳指数均低于 0.176,清洁低碳发展成效显著.其中,中下游城市表现优异,除以临汾为核心的圈层区域数值偏高外其余城市数值均低于 0.094,减污降碳整体处于较高水平且聚集效应明显,但东部区域向西的辐射能力较弱,对流域整体的带动作用亟需加强.上游城市整体低碳清洁发展虽有进步,但仍存有较大发展空间,亟需促进产业升级转型,提升技术、知识、人才密集型产业比重,推动绿色低碳发展.

3.2 基准回归

为验证产业结构升级与减污降碳之间的关系,采用 Stata 16.0 软件进行分析.首先进行 Hausman 检验并提出建立个体固定效应模型的原假设.经检验,所有模型的 p 值均大于 0.1,没有证据拒绝原假设,则采取个体固定效应模型.

鉴于量纲的统一性与对称性,对所有变量进行对数化处理.使用 Stata 16.0 软件对面板数据进行回归,结果见表 2.据(1)、(2)列回归结果可知,不论是否加入其他变量,产业结构升级指标都对减污降碳水平存在显著提升作用.由第(2)列可得,衡量合理化的指标($\ln RIS$)通与减污降碳的指标($\ln RPCE$)呈正相关且显著性,加权结构偏离度和减污降碳指数均是负向指标,说明产业结构合理化能有效提升减污降碳水平,假设 1 得以验证.当加权结构偏离度每降低 1%,即产业结构合理程度上升 1%,减污降碳指数减少 0.037%.由第(2)列可得,代表产业结构高级化的产业结构层次指数($\ln HIS$)通过了 5%的显著性检验并与减污降碳指数($\ln RPCE$)负相关,说明产业结构高级化对绿色低碳发展有显著促进作用,验证了假设 2 的成立.当产业结构层次指数每增加 1%,减污降碳指数减少 0.066%.产业结构层次指数的提升,一方面,淘汰落后产能,推动企业转型升级;另一方面,服务业污染物排放量占比远低于工业,当第二产业为主向第三产业为主体递进,会有效抑污减排.

表 2 基准回归分析结果
Tab. 2 Benchmark regression analysis results

变量	(1) $\ln RPCE$	(2) $\ln RPCE$	变量	(1) $\ln RPCE$	(2) $\ln RPCE$
$\ln RIS$	0.045 *** (0.029)	0.037 ** (0.026)	$_cons$	-3.233 *** (0.126)	-4.132 *** (0.166)
$\ln HIS$	-0.072 ** (0.026)	-0.066 ** (0.026)	个体固定	Yes	Yes
$\ln POP$		-0.238 *** (0.035)	时间固定	Yes	Yes
$\ln GDP$		-0.139 *** (0.043)	R^2	0.645	0.637
$\ln Trade$		0.021(0.027)	样本量	570	570
$\ln Urb$		-0.066 ** (0.028)			

注:全文表中***、**、* 分别表示在 1%、5%、10%的显著性水平;()内数值为稳健标准误.

从其他控制变量的结果来看,经济增长能显著推动减污降碳水平的提升,表明区域经济发展会推动公众环保意识的增加,进而加强了对企业污染行为的制约力,促使公众加强对政府污染治理工作的监督,此现象对减少污染、降低碳排放具有积极促进作用.人口规模与减污降碳指数呈显著负相关,这验证了 GUDIPUDI 等^[26]的研究结论,人口的增长产生了集聚正外部性,构建了庞大的劳动力资源池,还促进了技术、人才、知识的交流,进而推动了基础设施服务的高效共享,有效助力环境污染问题的改善.外商投资程度与减污降碳指数正相关,究其原因,黄河流域自然资源相较于沿海城市更为丰富,但其开放程度较低,外商在该区域更偏向投资资源密集型行业,同时被沿海城市淘汰的高耗能、高污染外资企业向黄河流域迁移,存在一定的“污染避难所”效应.城镇化虽然与减污降碳负相关但并未通过显著性检验,一个可能的原因是城镇化水平的提高会促使居民增加能源消费需求,因此对减污降碳的积极作用并不明显.

3.3 区域异质性分析

受经济、历史及地形等因素的影响,黄河流域存在客观上的区域差异,不同区域产业结构升级水平及其

对减污降碳的影响均有所不同,且结合可视化分析,发现黄河流域上中下游存在较大差异,所以需进一步对比研究产业结构升级与减污降碳两者存在的区域异质性特征.在分类回归检验之前,首先对不同流域之间的减污降碳指数和产业结构升级指数进行描述性统计.由附录表 S2 可以得出黄河流域上游与中下游差距明显,其减污降碳和产业结构合理化指数均值分别为 0.115 和 10.147,均明显高于中下游,与可视化分析结论吻合,这一结果为产业结构升级影响减污降碳的区域异质性检验奠定了基础.

表 3 进行了区域异质性回归.回归结果显示,产业结构升级对黄河流域中下游减污降碳存在显著的促进作用,中游的产业结构升级回归系数绝对值均小于下游,这表明下游产业结构升级的抑污减排效应更强,在上游地区该作用并不显著.可能原因在于,黄河流域中下游相较上游地区,产业结构转型较早,清洁能源使用占比较大且居民环保意识更强,使得产业结构升级所释放的红利更为充分.

表 3 区域异质性检验结果
Tab. 3 Results of the regional heterogeneity test

变量	ln RPCE		
	上游	中游	下游
ln RIS	0.031(0.034)	0.043 * (0.055)	0.056 * (0.033)
ln HIS	0.044(0.105)	−0.063 * (0.021)	−0.251 * * (0.124)
ln POP	−0.085 * (0.034)	−0.685 * * * (0.076)	0.012(0.476)
ln GDP	−0.067(0.037)	−0.973 * * * (0.108)	−1.257 * * * (0.179)
ln Trade	−0.045(0.036)	0.016(0.045)	−0.027 * (0.065)
ln Urb	−0.023(0.087)	0.053(0.052)	−0.019(0.055)
_cons	−2.856 * * * (0.236)	−6.976 * * * (0.346)	−5.751 * * * (0.633)
个体固定	Yes	Yes	Yes
时间固定	Yes	Yes	Yes
R ²	0.775	0.843	0.879
样本量	170	240	160

3.4 内生性问题

尽管本文尽可能控制了影响减污降碳的变量,但减污降碳可能受到公众环保意识、城市资源禀赋等其他因素的影响,存在遗漏变量问题,且减污降碳与产业结构升级可能存在反向因果关系.本文试图采用工具变量法缓解内生性,具体参考黄群慧等^[27]的研究,选择 1984 年各省每百人固定电话普及量作为工具变量.之所以选用这一变量,是因为通信技术在产业结构升级中扮演了重要角色.1984 年各省固定电话普及率的差异反映了各地区通信基础设施的早期发展水平,而通信设施的布局对区域产业的长期发展具有深远影响.这一变量与产业结构存在紧密联系,也能够规避对当前经济变量的直接干扰.同时,相较于当代数字经济的迅速发展,固定电话的历史普及水平对当前城市减污降碳的影响微乎其微,从而较好地满足了排他性条件.此外,该变量具有较好的数据可操作性和区域差异性,能够为研究提供坚实的理论和实证基础,因此满足了工具变量的相关性要求.需指出的是,1984 年的每百人固定电话普及量是省级横截面数据,未随时间发生变化.为与地级市层面的面板数据分析相匹配,本文借鉴文献^[28]的思路,将 1984 年省级固定电话普及量与各地级市的国际互联网用户数量相乘构建了工具变量(ln IV),并采用两阶段最小二乘法(2SLS)进行估计,结果见附录表 S3 所示,第一阶段回归结果中,工具变量的系数显著为正,此外,对于原假设“工具变量识别不足”的检验 Kleibergen-Paap rk 的 LM 统计量 p 值均为 0.000,显著拒绝原假设,在工具变量弱识别的检验中,Cragg-Donald 的 Wald F 统计量大于 Stock-Yogo 弱识别检验 10%水平上的临界值,说明选取此工具变量是合理的.在考虑了内生性后,第二阶段回归结果中,产业结构合理化与高级化系数分别为 0.027 和 −0.723且通过显著性检验,说明产业结构升级能有效促进减污降碳.

3.5 稳健性检验

为进一步验证产业结构升级对减污降碳影响研究结论的稳健性,本文从以下 3 个方面验证.
1) winsorize 缩尾.本文使用 winsorize 缩尾法去除异常值,并基于新样本对式(1)进行回归,结果如表 4

的第(1)列所示,产业结构合理化与高级化的系数均显著,系数估计值较表 2 第(2)列中变化很小,且显著性未发生改变。

2)分阶段回归.本文研究期为 10 年,期间黄河流域发展迅速,从时间纬度来看,流域 10 年前后发展差距较大,得出的结论可能存在一定偏差,为进一步确保研究结果的稳健性,将本文的样本按时间划分为 2013—2015 年和 2016—2022 年,得出分样本回归结果,具体见表 4 的(2)和(3)列.结果显示,产业结构合理化与高级化的系数均显著,系数估计值和表 2 第(2)列中相比变化很小,且显著性未发生改变。

3)更换核心变量.为检验模型的稳健性,本文首先借鉴文献[29]的研究选取泰尔指数($\ln Theil$)作为产业结构合理化的代理变量,如式(3)所示.其次,以第三产业与第二产业产值之比($\ln HIS_2$)代替产业结构高级化作为核心变量,将两者纳入式(2)将进行回归验证.回归结果如表 4 的第(4)列所示.结果显示,合理化、高级化系数均显著,分别为 0.043 和 -0.348 ,基准回归结果稳健。

$$Theil = \sum_{w=1}^n (\frac{Y_{w,t}}{Y_t}) (\frac{Y_{w,t}/L_{w,t}}{Y_t/L_t}),$$

(3)

式中,变量的具体含义与加权结构偏离度类似, $Y_{w,t}$ 表示 w 产业在 t 时间的总产出(元), $L_{w,t}$ 表示 w 产业在 t 时间的从业人数。

综上,本文的研究结论的稳健性得以验证。

表 4 稳健性检验的估计结果

Tab. 4 Estimation results of robustness tests

变量	(1) ln RPCE	(2) ln RPCE	(3) ln RPCE	变量	(4) ln RPCE
ln RIS	0.036 * * (0.023)	0.068 * * (0.036)	0.089 * * * (0.206)	lnTheil	0.046 * * (0.032)
ln HIS	$-0.265 * * *$ (0.055)	$-0.059 *$ (0.127)	$-0.807 * * *$ (0.111)	lnHIS ₂	$-0.347 * * *$ (0.722)
ln POP	$-0.664 * * *$ (0.043)	-0.057 (0.311)	$-0.793 * * *$ (0.050)	lnPOP	$-0.195 * * *$ (0.036)
ln GDP	$-0.947 * * *$ (0.067)	-0.052 (0.031)	$-0.566 *$ (0.094)	lnGDP	$-0.111 * * *$ (0.034)
ln Trade	-0.039 (0.025)	0.035(0.028)	0.001(0.031)	lnTrade	$-0.055 * *$ (0.026)
ln Urb	-0.428 (0.070)	0.832 * * (0.297)	0.011(0.169)	lnUrb	0.010(0.036)
_cons	$-6.975 * * *$ (0.249)	$-2.437 * * *$ (0.442)	$-4.485 * * *$ (0.289)	_cons	2.328 * * (0.366)
个体固定	Yes	Yes	Yes	个体固定	Yes
时间固定	Yes	Yes	Yes	时间固定	Yes
R ²	0.929	0.843	0.916	R ²	0.665
样本量	570	570	570	样本量	570

4 基于 STIRPAT 模型的情景模拟

4.1 预测模型

为消除多重共线性对预测模型的影响,本文对数据进行方差膨胀因子(VIF)检验,检验结果如表 5 所示.各自变量的 VIF 值均小于 10,因此不考虑多重共线性问题。

表 5 VIF 检验结果

Tab. 5 Results of VIF test

变量	ln RIS	ln HIS	ln POP	ln GDP	ln Trade	ln Urb
VIF	1.38	1.38	1.30	1.29	1.17	1.04
1/VIF	0.722	0.725	0.769	0.777	0.852	0.962

因此,本文构建的预测模型如式(4)所示:

$$\ln RPCE = -4.132 + 0.037 \ln RIS - 0.066 \ln HIS - 0.238 \ln POP - 0.139 \ln GDP +$$

$$0.021 \ln Trade - 0.066 \ln Urb.$$

(4)

为进一步确保预测模型的准确性,本文将模拟值与实际值进行对比,如图 2 所示,2013 至2022 年的偏差值较小,最大偏差没有超过 5%.整体上预测值趋势与实际值趋势基本吻合,表明模型的预测水平较高,本文构建的减污降碳预测模型具有一定的合理性.

4.2 情景设置

本文基于 2013—2022 年黄河流域减污降碳的历史数据,依据实际发展状况,通过参考相关文献,合理设置参数和情景组合.假设 STIRPAT 模型中各自变量分别有高、低 2 种模式,其中产业结构升级包括产业结构合理化和高级化,人口规模包括人口和城镇化率,而经济水平包括人均 GDP 和外商投资程度,如表 6 所示.

在深度剖析中国经济增长的原动力及产业结构变迁趋向的过程中,张军等^[30]认为 2030 年中国服务业在国内生产总值中所占比例或将攀升至 53.8%.而胡鞍钢^[31]提出随着科技跃迁、消费模式升级以及政策激励效应的持续显现,预计到 2030 年,服务业的比重将实现显著飞跃,超越前述预测,有望达到62.5%的里程碑.鉴于黄河流域生态安全和资源禀赋特征等实际情况,产业结构升级可能低于全国平均水平,结合产业结构合理化和高级化平均变化速率,本文将预测区间 2022—2025 年期间产业结构合理化和高级化低速率分别设置为-0.3%和 0.4%,高速率设置为-0.5%和 0.6%.2026—2030 年期间低速率分别设置为-0.20%和 0.25%,高速率设置为-0.35%和 0.45%,2031—2035 年期间低速率分别设置为-0.10%和 0.15%,高速率设置为-0.12%和 0.20%.

表 6 情景设置
Tab. 6 Scenario setting

情景方案	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5	情景 6	情景 7	情景 8
产业结构升级	低	高	高	高	低	低	低	高
人口规模	低	低	高	高	低	高	高	低
经济水平	低	低	低	高	高	高	低	高

2021 年我国全面放开“三胎”政策,结合“全面二孩”政策,流域短期会迎来人口激增,人口达峰前后其增长速率可能减缓,参考岳书敬^[32]的观点进行参数设定,2022—2025 年、2026—2030 年以及 2031—2035 年期间低速率分别设置为 0.4%、0.2%和-0.1%,而高速率则分别为 0.50%、0.25%和 0%.

文献[33]认为 2030 年中国的城镇化率将高达 69%,而文献[34]则认为 2035 年的城镇化率将达到 77.29%.本文将 2022—2025 年期间低速率设置为 1.5%,高速率为 2.0%.2026—2030 年期间低速率设置为 1.2%,高速率为 1.5%,2031—2035 年期间低速率和高速率分别设置为 0.8%和 1.2%.

人均 GDP 衡量区域经济发展水平,与经济增速具有一致性,经济增长的边际速率将呈现长期下降趋势,到 2030 年经济增速将收敛于 3.9%~4.5%^[35].参考世界银行和国际货币基金组织等预测情景,将预测区间 2022—2025 年期间低速率设置为 4.5%,高速率为 5.0%,2026—2030 年期间低速率和高速率分别设置为 3.9%和 4.5%,2031—2035 年期间低速率和高速率分别设置为 3.0%和 3.5%.

根据外商投资依存度变化速率,综合考虑疫情对黄河流域外贸带来的影响,将预测区间 2022—2025 年期间低速率设置为 0.50%和高速率为 0.75%,2026—2030 年期间低速率和高速率分别设置为 1.5%和 2.0%,2031—2035 年期间低速率和高速率分别设置为 2.5%和 3.5%.具体参数设定见附录表 S4 所示.

4.3 模拟预测结果分析

如图 3,8 种情景下黄河流域减污降碳指数出现明显的分流,其趋势及变化率存在显著差异.情景 1、2、5、8 的减污降碳指数于 2022 年后稳步下降,其余情景则保持上升,人口规模的增长率是导致这一现象的主要

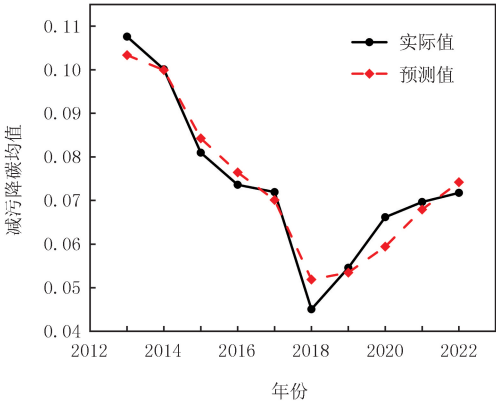


图2 黄河流域减污降碳实际值与预测值对比
Fig.2 Comparison of actual and predicted values
of RPCE in the Yellow River Basin

原因.情景 7 相较于其他情景,减污降碳指数的增速位居第一,该情景下 2035 年减污降碳指数为 0.111,较基准年增幅 53.9%,人口规模的增加和城镇化进程加快,客观增加了能源的需求量,产业结构升级水平低导致能源结构优化较缓,整体能源效率提升受限,基于此背景下的经济发展更依赖双高产业,进而不利于抑污减排.情景 8 中减污降碳的降速明显高其他情景,该情景下 2035 年减污降碳指数为 0.042,较基准年降幅 42.34%,该情景在经济高质量发展和稳定人口增长速率的基础上,通过优化资源配置、创新节能技术等方式实现产业结构转型升级,最符合未来黄河流域发展路径.但由于黄河流域在兼顾经济发展与减污降碳的同时,还需贯彻国家最新出台的人口政策,因此应将产业结构升级作为减污降碳的重点.

5 结论与建议

本文分析黄河流域产业结构升级对减污降碳的作用机制,测算黄河流域 57 个地级市 2013—2022 年的减污降碳指数并进行可视化分析,建立扩展 STIRPAT 模型分析产业结构升级对减污降碳的影响,在此基础上设置 8 种不同的发展情景,模拟预测得到黄河流域未来减污降碳趋势.得到以下主要结论:1)2013—2022 年黄河流域减污降碳均值从 0.107 降为 0.071,呈“西高东低”的分布格局,发展趋势较好.上游甘肃和宁夏整体低碳清洁发展水平较低,其中中卫、石嘴山以及内蒙古乌海情况最为严重,主要原因在于产业结构偏重、高污染行业占比大,加之政策、技术支持不足和资源限制;2)产业结构合理化和高级化的回归系数分别为 0.037 和-0.066 且均显著,表明对流域减污降碳具有促进作用,通过内生性和稳健性检验,高级化的抑污减排效果较合理化更优,原因是其通过技术进步和创新驱动,推动高附加值、低能耗产业发展,提高资源利用效率和污染治理技术,而合理化受技术限制使其减污降碳效果不如高级化显著.经济增长和人口增加均利于抑污减排,外商在黄河流域更偏向投资高耗能产业,存在“污染避难所”效应;3)在区域异质性上,上游地区的合理化和高级化回归系数分别为 0.031 与 0.044 且均不显著,中下游地区产业结构升级的减污降碳效应更好,主要原因在于中下游产业结构转型较早,清洁能源使用占比较大且居民环保意识更强,使得产业结构升级所释放的红利更为充分;4)不同情景下的黄河流域减污降碳水平变化差异较大.情景 8 中 2035 年减污降碳指数为 0.042,较基准年降幅 42.34%,通过优化资源配置、创新节能技术等方式实现产业结构转型升级并稳定人口增长速率和推动经济高质量发展符合未来发展趋势.

论文的创造性价值在于揭示了黄河流域减污降碳发展以及产业结构的减污降碳效应均存在地区发展差异,外商投资偏向高耗能产业也导致“污染避难所”效应等具体问题,此外结合实证分析指出了产业结构高级化更有效推动减污降碳,其通过技术创新提高资源利用和污染治理效率,同时探讨了中下游地区产业升级的成功经验,并预测不同发展情景下的未来趋势,为制定区域发展策略提供了科学依据.因此,本文提出相对应的建议:

- 1)减污降碳重点区域需立足经济发展,加快产业结构升级.上游甘肃、宁夏及其他重点区域未来应转变传统的发展模式,打造低碳化产业群,推广绿色清洁能源的使用,逐渐减少经济发展对能源化工产业的依赖;
- 2)强化产业结构转型升级,充分发挥产业结构高级化和合理化对抑污减排的积极效用,促进新兴产业形成及

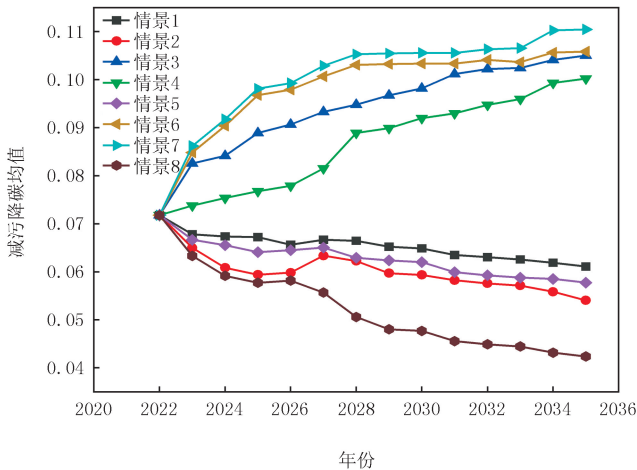


图3 不同情景下黄河流域减污降碳指数变化趋势
Fig.3 Trends of RPCE indices in the Yellow River Basin under different scenarios

重塑需求端推进生态与经济的协调发展,逐步实现“经济生态化”以及“生态经济化”的高质量发展之路;3)制定差异化地区产业结构发展策略,中上游地区应加强产业结构与减污降碳的适配,推动区域内产业结构的持续优化以保持其在改善环境方面的优势,而上游地区应该需借助自身的资源优势,通过引进人才和技术,打造特色产业结构,以释放产业结构升级在改善环境方面的红利;4)注重城市人口规模和功能布局,不同发展阶段的城镇人口容量要科学适宜,发挥人口集聚减排效应,积极把握产业转移契机的同时加强政府引导和规范外商投资行为,控制“双高”产业,推动本区域多余产能向服务业转型,实现黄河流域产业结构转型升级和经济发展提质增效。

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.11.29.0003).

参 考 文 献

[1] 王豪杰,黄良杰.科技金融政策对城市碳排放的影响机制研究[J].生态经济,2024,40(9):32-40.
WANG H J,HUANG L J.Research on the impact mechanism of scientific and technological financial policies on urban carbon emissions [J].Ecological Economy,2024,40(9):32-40.

[2] 刘建华,施天乐,黄亮朝.黄河流域碳排放、科技创新与产业结构优化:基于 Moran's I 与 PVAR 的实证分析[J].生态经济,2024,40(3):30-38.
LIU J H,SHI T L,HUANG L C.Carbon emission,technological innovation and industrial structure optimization in the Yellow River Basin:an empirical analysis based on moran's I and PVAR[J].Ecological Economy,2024,40(3):30-38.

[3] ZHAO B,WANG K L,XU R Y.Fiscal decentralization,industrial structure upgrading,and carbon emissions:evidence from China[J].Environmental Science and Pollution Research International,2023,30(13):39210-39222.

[4] 陈向阳,戴尔.“增量规制”还是“存量优化”:碳交易制度对中国城市第二产业产能过剩的影响[J].中国地质大学学报(社会科学版),2023,23(5):16-30.
CHEN X Y,DAI E."Incremental regulation" or "stock optimization": the impact of carbon trading system on China's urban secondary industry overcapacity[J].Journal of China University of Geosciences(Social Sciences Edition),2023,23(5):16-30.

[5] 刘云龙,常先林,黄承峰.经济增长、产业结构和人口结构对中国碳排放的影响分析[J].管理现代化,2022,42(4):15-20.
LIU Y L,CHANG X L,HUANG C F.The impact of economic growth,industrial structure and population structure on China's carbon emissions[J].Modernization of Management,2022,42(4):15-20.

[6] 郑蕊,刁书琪.基于 LMDI-PDA-MMI 分解法的我国产业体系碳排放驱动因素研究[J].生态经济,2022,38(5):33-39.
ZHENG R,DIAO S Q.Investigating the driving factors of carbon emissions in China's industrial system using the LMDI-PDA-MMI method[J].Ecological Economy,2022,38(5):33-39.

[7] 张江艳.基于扩展 STIRPAT 模型 LMDI 分解的碳排放脱钩因素[J].环境科学,2024,45(4):1888-1897.
ZHANG J Y.Research on carbon emission decoupling factors based on STIRPAT model and LMDI decomposition[J].Environmental Science,2024,45(4):1888-1897.

[8] 谢荣辉.绿色技术进步、正外部性与中国环境污染治理[J].管理评论,2021,33(6):111-121.
XIE R H.Green technology progress,positive externality and environmental pollution control of China[J].Management Review,2021,33(6):111-121.

[9] AKIMOTO H,NARITA H.Distribution of SO₂,NO_x and CO₂ emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1° × 1° resolution[J].Atmospheric Environment,1994,28(2):213-225.

[10] 徐乐,王海霞,邵帥.长三角环境协同治理的非对称效应:基于多主体与多区域的双重视角[J].西安交通大学学报(社会科学版),2023,43(2):128-142.
XU L,WANG H X,SHAO S.The asymmetric effect of collaborative environmental governance of the Yangtze River Delta Region:based on the dual perspectives of multi-agent and multi-region[J].Journal of Xi'an Jiaotong University(Social Sciences),2023,43(2):128-142.

[11] 张鸿宇,王媛,郝成亮,等.双碳约束下煤化工行业节煤降碳减污协同[J].环境科学,2023,44(2):1120-1127.
ZHANG H Y,WANG Y,HAO C L,et al.Coal-carbon-pollutant coordinated control of coal chemical industry under carbon peak and carbon neutrality constraints[J].Environmental Science,2023,44(2):1120-1127.

[12] 吴宇鹏,范安成,吴仁海,等.陶瓷行业减污降碳协同增效案例评估:基于干法制粉的实证分析[J].气候变化研究进展,2022,18(3):373-380.
WU Y P,FAN A C,WU R H,et al.Evaluation of synergy in reducing pollution and carbon in the ceramic industry:based on the empirical analysis of dry milling[J].Climate Change Research,2022,18(3):373-380.

[13] 杜忠明,周天睿.我国能源电力行业减污降碳协同增效的思路探析[J].环境保护,2022,50(10):21-23.

- DU Z M,ZHOU T R.Analysis of the idea of pollution reduction and carbon reduction synergy in China's energy and power industry[J].*Environmental Protection*,2022,50(10):21-23.
- [14] 刘华军,郭立祥,乔列成.减污降碳协同效应的量化评估研究:基于边际减排成本视角[J].*统计研究*,2023,40(4):19-33.
LIU H J,GUO L X,QIAO L C.Quantitative evaluation of co-benefits of air pollution reduction and carbon emission reduction;based on marginal abatement cost[J].*Statistical Research*,2023,40(4):19-33.
- [15] XU B,LIN B Q.Regional differences in the CO₂ emissions of China's iron and steel industry;Regional heterogeneity[J].*Energy Policy*,2016,88:422-434.
- [16] ZHENG C Y,ZHANG H R,CAI X R,et al.Characteristics of CO₂ and atmospheric pollutant emissions from China's cement industry;a life-cycle perspective[J].*Journal of Cleaner Production*,2021,282:124533.
- [17] 杨瑄,王力,张泽阳,等.产业结构扭曲对减污降碳的影响:基于环保重点城市的实证分析[J].*环境科学研究*,2023,36(11):2074-2089.
YANG X,WANG L,ZHANG Z Y,et al.Effects of industrial structure distortion on co-control of air pollutants and CO₂:empirical study based on key environmental protection cities[J].*Research of Environmental Sciences*,2023,36(11):2074-2089.
- [18] ABBAS Z,WAQAS M.Strategy on coal consumption and GHGs emission analysis based on the LEAP model;a case study[J].*Energy Sources,Part A:Recovery,Utilization,and Environmental Effects*,2024,46(1):10349-10368.
- [19] YANG R P,WANG M,ZHAO M X,et al.Synergic benefits of air pollutant reduction,CO₂ emission abatement,and water saving under the goal of achieving carbon emission peak;the case of Tangshan City,China[J].*International Journal of Environmental Research and Public Health*,2022,19(12):7145.
- [20] MA H Q,LIU Y X,LI Z,et al.Influencing factors and multi-scenario prediction of China's ecological footprint based on the STIRPAT model[J].*Ecological Informatics*,2022,69:101664.
- [21] 曾炜,方泽慧,张燕华.湖北省碳达峰情景预测:基于 STIRPAT 扩展模型[J].*环境科学与技术*,2023,46(S2):226-232.
ZENG W,FANG Z H,ZHANG Y H.Scenario Prediction in peak carbon dioxide emissions,Hubei Province;Based on STIRPAT Extended Model[J].*Environmental Science & Technology*,2023,46(S2):226-232.
- [22] 周振华.产业结构演进的一般动因分析[J].*财经科学*,1990(3):1-6.
ZHOU Z H.Analysis on the general motivation of industrial structure evolution[J].*Finance and Economics*,1990(3):1-6.
- [23] 巫强,陈宇超.长江经济带发展战略与产业结构升级:基于可持续发展的视角[J].*长江流域资源与环境*,2024,33(2):229-241.
WU Q,CHEN Y C.Yangtze River economic belt development strategy and industrial structure upgrade;based on perspective of sustainable development[J].*Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2024,33(2):229-241.
- [24] 赵建春.产业结构优化升级与旅游效率:基于 2003—2022 年省际面板数据[J].*地域研究与开发*,2024,43(1):67-73.
ZHAO J C.Industrial structure upgrading and tourism efficiency;based on inter-provincial panel data from 2003 to 2022[J].*Areal Research and Development*,2024,43(1):67-73.
- [25] 马伟波,赵立君,王楠,等.长三角城市群减污降碳驱动因素研究[J].*生态与农村环境学报*,2022,38(10):1273-1281.
MA W B,ZHAO L J,WANG N,et al.Study on driving factors of pollution and carbon reduction in the Yangtze River Delta urban agglomerations[J].*Journal of Ecology and Rural Environment*,2022,38(10):1273-1281.
- [26] GUDIPUDI R,FLUSCHNIK T,ROS A G C,et al.City density and CO₂ efficiency[J].*Energy Policy*,2016,91:352-361.
- [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] 高梦桃.数字经济发展对家庭相对贫困的缓解效应[J].*中国流通经济*,2023,37(1):24-37.
GAO M T.The alleviation effect of digital economy development on the relative poverty of households[J].*China Business and Market*,2023,37(1):24-37.
- [29] GU R D,LI C F,LI D D,et al.The impact of rationalization and upgrading of industrial structure on carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J].*International Journal of Environmental Research and Public Health*,2022,19(13):7997.
- [30] 张军,徐力恒,刘芳.鉴往知来:推测中国经济增长潜力与结构演变[J].*世界经济*,2016,39(1):52-74.
ZHANG J,XU L H,LIU F.Learning from the past;speculating on China's economic growth potential and structural evolution[J].*The Journal of World Economy*,2016,39(1):52-74.
- [31] 胡鞍钢.中国经济发展大趋势[J].*人民论坛*,2017(14):16-19.
HU A G.General trend of China's economic development[J].*People's Tribune*,2017(14):16-19.
- [32] 岳书敬.长三角城市群碳达峰的因素分解与情景预测[J].*贵州社会科学*,2021(9):115-124.
YUE S J.Factor decomposition and scenario prediction of the carbon peak of the city clusters in the Yangtze River Delta[J].*Guizhou Social Sciences*,2021(9):115-124.
- [33] 中国社会科学院宏观经济研究中心课题组.未来 15 年中国经济增长潜力与“十四五”时期经济社会发展主要目标及指标研究[J].*中国工业经济*,2020(4):5-22.

Research Group of the Macroeconomic Research Center of the CASS.Research on the potential growth of the chineses economy in the next 15 years and the main goals and indicators of economic and social development during the 14th Five-Year Plan period[J].China Industrial Economics,2020(4):5-22.

[34] 杜修立,张昱昭.中国城镇化率提升的动力分解与新发展阶段趋势预测:基于国际比较的一种新方法[J].统计研究,2022,39(2):33-47.
DU X L,ZHANG Y Z.Driving-force decomposition increase of China's urbanization rate increase and trend forecast in the new development stage:a new method based on international comparison[J].Statistical Research,2022,39(2):33-47.

[35] LIU J H,SHI T L,HUANG L C.A study on the impact of industrial restructuring on carbon dioxide emissions and scenario simulation in the Yellow River Basin[J].Water,2022,14(23):3833.

Research on the role mechanism and scenario prediction of industrial structure upgrading on pollution reduction and carbon reduction in the Yellow River Basin

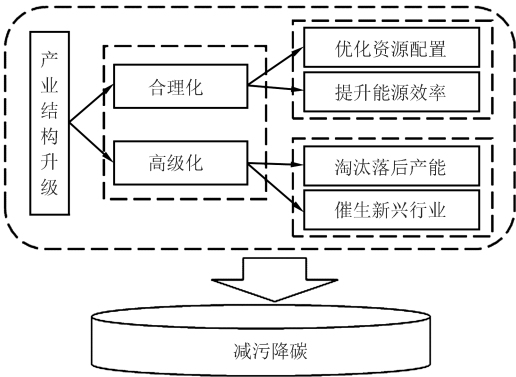
Wang Shuying, Yao Fuwei, Wang Keke

(School of Management, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

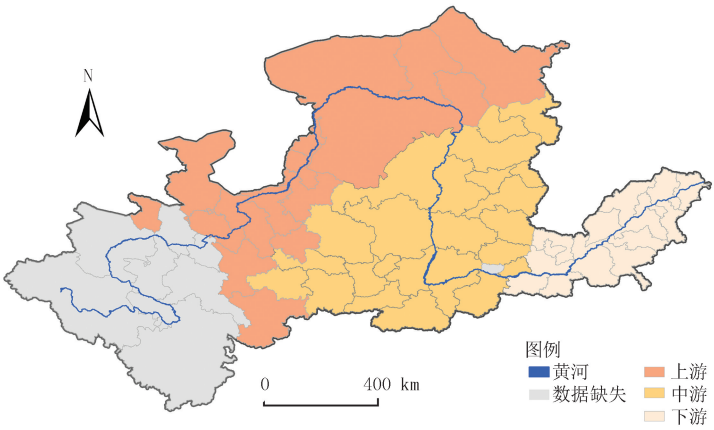
Abstract: The coordinated reduction of CO₂ emissions and atmospheric pollutants is both a challenge for economic and social development and a significant opportunity to promote high-quality growth. This study analyzes the mechanism by which industrial structure upgrading in the Yellow River Basin contributes to pollution and carbon reduction, accompanied by a visualization analysis. An empirical analysis is conducted using the STIRPAT model, and based on this, an innovative simulation predicts future trends in pollution and carbon reduction in the Yellow River Basin. The study finds that: overall, the Yellow River Basin shows an improving trend in pollution and carbon reduction during the study period, with Zhongwei, Shizuishan, and Wuhai in Inner Mongolia facing more severe situations and thus being key areas for pollution and carbon reduction efforts; the pollution and carbon reduction effect of the advanced industrial structure in the Yellow River Basin is superior to that of the industrial rationalization, and both economic growth and population increase are conducive to pollution control and emission reduction; regarding regional heterogeneity, the pollution and carbon reduction effect of industrial structure upgrading is better in the middle and lower reaches than in the upper reaches; accelerating industrial transformation and upgrading, stabilizing population growth, and promoting high-quality economic development constitute the optimal path for pollution and carbon reduction in the Yellow River Basin.

Keywords: the Yellow River Basin; pollution and carbon reduction; rationalization of industrial structure; advanced industrial structure; impact mechanism; scenario simulation

[责任编辑 赵晓华 刘洋]



图S1 产业结构升级对减污降碳的影响机制分析框架
Fig.S1 Framework for analysing the impact mechanism of industrial structure upgrading on RPCE

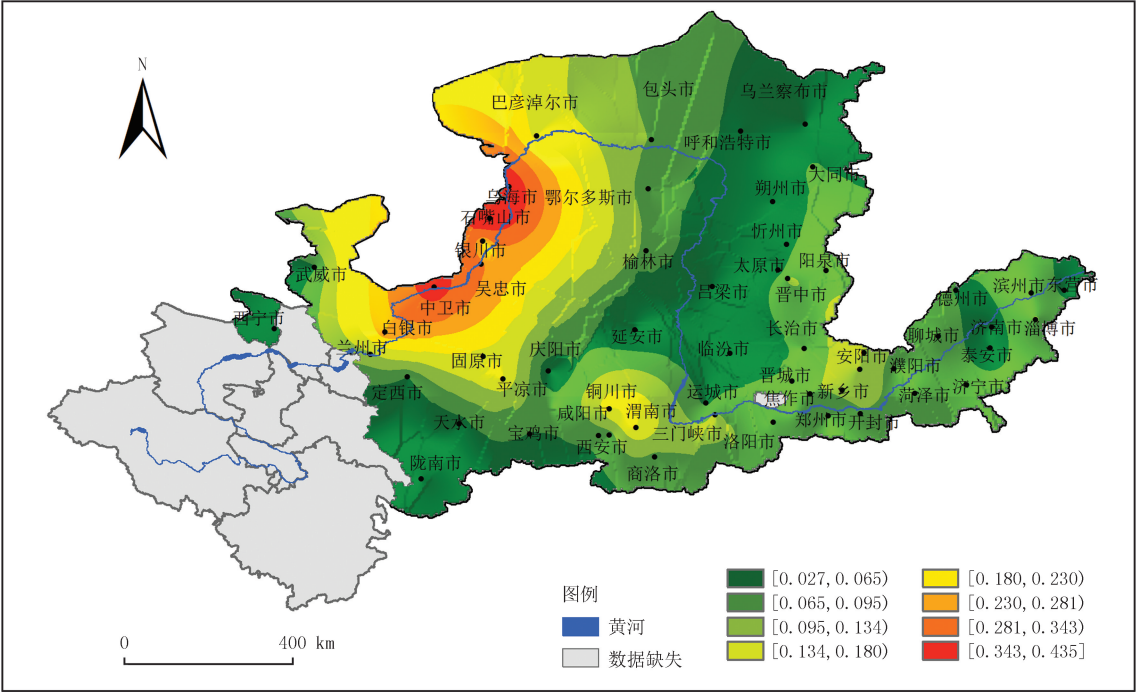


注：该图基于标准地图服务系统下载的审图号为GS(2022) 4309号的标准地图制作，底图边界无修改，下同。

图S2 研究区域图
Fig.S2 Study area map

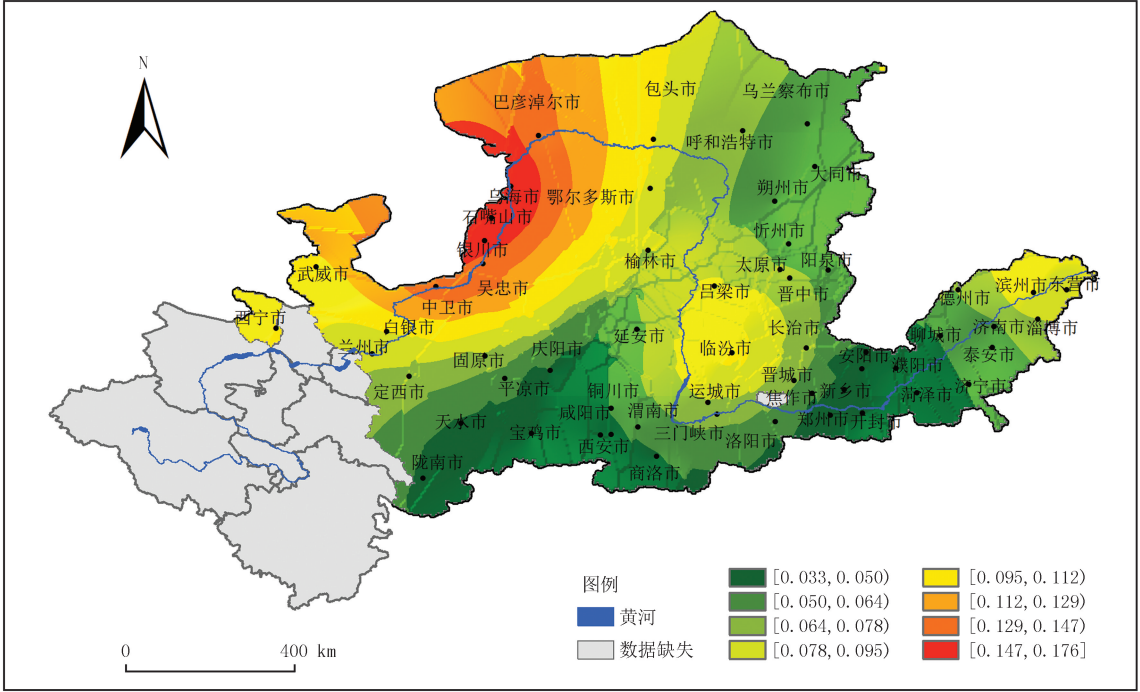
表 S1 变量描述统计
Tab. S1 Variable descriptive statistics

变量	单位	观测值	平均值	标准差	最小值	最大值
<i>RPCE</i>	/	570	0.074	0.070	0.005	0.483
<i>RIS</i>	/	570	4.401	9.136	0.068	105.971
<i>HIS</i>	/	570	2.318	0.131	2.038	2.650
<i>POP</i>	万人	570	436.945	314.081	51.520	1 599.006
<i>GDP</i>	元	570	54 492.060	37 585.340	6 910.724	283 865.000
<i>Trade</i>	%	570	7.099	9.358	0.001	55.865
<i>Urb</i>	%	570	54.581	15.041	21.260	95.370



图S3 黄河流域2013年减污降碳指数Kriging空间插值图

Fig.S3 Kriging spatial interpolation of the *RPCE* index in the Yellow River Basin in 2013



图S4 黄河流域2022年减污降碳指数Kriging空间插值图

Fig.S4 Kriging spatial interpolation of the *RPCE* index in the Yellow River Basin in 2022

表 S2 分流域描述性统计

Tab. S2 Sub-basin descriptive statistics

变量	区域	样本量	平均值	标准差	最小值	最大值
减污降碳指数(<i>RPCE</i>)	上游	170	0.115	0.096	0.005	0.483
	中游	240	0.056	0.053	0.009	0.450
	下游	160	0.057	0.034	0.015	0.215
产业结构合理化(<i>RIS</i>)	上游	170	10.147	15.177	0.221	105.971
	中游	240	2.369	2.596	0.130	26.029
	下游	160	1.860	3.342	0.068	23.427
产业结构高级化(<i>HIS</i>)	上游	170	2.309	0.113	2.063	2.601
	中游	240	2.309	0.126	2.082	2.621
	下游	160	2.337	0.150	2.038	2.650

表 S3 产业结构升级影响减污降碳的 2SLS 估计

Tab. S3 2SLS estimates of the impact of industrial structure upgrading on *RPCE*

第一阶段回归			第二阶段回归		
变量	$\ln RIS$	$\ln HIS$	变量	$\ln RPCE$	$\ln RPCE$
$\ln IV$	0.339*** (0.058)	0.321*** (0.056)	$\ln RIS$	0.027* (0.031)	
Kleibergen-Paap rk	303.219[0.000]	167.354[0.000]	$\ln HIS$		−0.723** (0.877)
LM statistic			$\ln POP$	−0.353*** (0.017)	−0.346*** (0.024)
Cragg-Donald	632.121{16.38}	233.478{16.38}	$\ln GDP$	−0.153*** (0.025)	−0.158*** (0.032)
Wald F statistic			$\ln Trade$	0.075*** (0.019)	0.068*** (0.019)
			$\ln Urb$	0.066* (0.037)	0.077* (0.034)
			_cons	−3.557*** (0.079)	−4.266*** (0.846)
R^2	0.667	0.425	R^2	0.326	0.614
样本量	570	570	样本量	570	570

注：***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 的显著性水平；()内数值为稳健标准误；[]数值为 *p* 值；{}数值为 Stock-Yogo 弱识别检验 10%水平上的临界值。

表 S4 不同情景模式参数设置

Tab. S4 Parameter settings for different scenarios

变量	情景设置	2022—2025 年	2026—2030 年	2031—2035 年	变量	情景设置	2022—2025 年	2026—2030 年	2031—2035 年
<i>RIS</i>	低	−0.3	−0.2	−0.1	<i>Urb</i>	低	1.2	1.2	0.8
	高	−0.5	−0.35	−0.12		高	2.0	1.5	1.2
<i>HIS</i>	低	0.4	0.3	0.15	<i>GDP</i>	低	4.5	3.9	3.0
	高	0.6	0.45	0.2		高	5.0	4.5	3.5
<i>POP</i>	低	0.4	0.2	0.1	<i>Trade</i>	低	0.5	1.5	2.5
	高	0.5	0.25	0.1		高	0.75	2	3.5