

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.2007

中国降碳减污扩绿增长耦合协调的 时空演化及组态提升路径

刘亦文¹, 李桢泉²

(1. 湖南工商大学 国际商学院, 湖南 长沙 410205; 2. 湖南工商大学 资源环境学院, 湖南 长沙 410205)

摘要: 从“降碳减污”和“扩绿增长”维度构建我国降碳减污扩绿增长耦合协调度测算指标体系, 运用耦合协调度模型对2014—2023年中国273个地级市的降碳减污扩绿增长耦合协调度进行测算, 在此基础上考察其时空演化规律, 并使用fsQCA方法探析其提升路径。研究结果表明: 从样本期间的全国整体水平来看, 我国降碳减污扩绿增长整体碳耦合协调度呈现稳定上升趋势; 八大综合经济区各地区降碳减污扩绿增长耦合协调度呈现同向收敛, 全国降碳减污耦合协调度水平的区域差异来源以各地区区域间差异为主, 差异水平具有较强的空间性特征。在各空间水平下, 不同水平层级的地区基本保持原层级水平并向高层级转移的特征; 由人口密度、能源效率和环境规制水平等主导因素组成的3条不同路径是协同推进降碳减污扩绿增长的有效提升路径。

关键词: 降碳减污扩绿增长协同增效; 耦合协调模型; fsQCA

中图分类号: X-01

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)02-0053-11

引文格式: 刘亦文, 李桢泉. 中国降碳减污扩绿增长耦合协调的时空演化及组态提升路径[J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(2): 53-63.

Spatiotemporal Evolution and Configuration Improvement Strategy of the Coupling Coordination Between Carbon Reduction, Pollution Control, Greenery Expansion and Economic Growth in China

LIU Yiwen¹, LI Zhenxiao²

(1. International Business School, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China;

2. School of Resource and Environment, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China)

Abstract: Based on the construction of a measurement index system for the coupling coordination of the perspective of “carbon reduction and pollution control” and “greenery expansion”, by using the coupling coordination model to calculate the coupling coordination of carbon reduction, pollution control, and greenery expansion in 273 prefecture level cities in China from 2014 to 2023, followed by an inquiry into the spatiotemporal evolution pattern, as well as an exploration of its improvement strategy with fsQCA method adopted. The research results indicate that, from the perspective of the overall national level during the sample period China’s overall carbon reduction, pollution control, greening and economic growth coupling coordination shows a stable upward trend; the eight major comprehensive economic zones. the coupling coordination degree of carbon reduction, pollution control, and greenery

收稿日期: 2025-03-20

基金项目: 湖南省自然科学基金资助面上项目(2025JJ50469); 长沙市自然科学基金资助项目(kq2402104)

作者简介: 刘亦文, 男, 湖南工商大学教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为能源与气候政策综合集成分析方法及应用,

E-mail: ewen_lau@163.com

expansion in each region converges in the same direction. The regional differences in the coupling coordination degree of carbon reduction and pollution control in China are mainly due to regional discrepancies, with the differences characterized with strong spatial features. As for each spatial level, regions at different levels generally maintain their original hierarchical level and transition to higher levels. Effective ways to collaborate the promotion of carbon reduction, pollution control, carbonreduction, pollutioncontrol, greeningand economic growthinclude the three different strategies composed of such dominant factors as population density, energy efficiency, and environmental regulation level.

Keywords: carbonreduction, pollution control, greening and economic growth synergy and efficiency improvement; coupling coordination model; fsQCA

1 研究背景

党的二十大着眼全面建设社会主义现代化国家全局,部署了推进生态文明建设的战略任务和重大举措,明确提出“协同推进降碳、减污、扩绿、增长,推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展”的要求。当前,降碳减污扩绿增长的系统性推进已成为学术界的研究热点,相关研究主要聚焦两大维度:其一,环境治理措施的协同减排效能评估。现有研究表明,我国环境政策体系已显现显著的减排综合效应^[1],不同类型的环境规制工具呈现交互作用特征^[2]。但学界对现行治理手段在污染与碳排放协同控制领域的实施效能尚存分歧。以行政指令为特征的总控型碳管理机制,在实际执行中可能对重点行业的低碳技术突破形成制约效应^[3]。总体上看,尽管在全国范围内推行碳排放总量管控机制能有效抑制全国层面的碳排放增长趋势,但各省份的减排成效呈现出明显的不均衡特征。有文献研究了碳排放权交易政策的降碳减污效应,发现碳排放权交易市场可显著降低碳排放量^[4-5],但该效应存在地区差异性^[6-7]。二是“双碳”背景下降碳减污的协同减排影响因素研究。相关学者认为技术创新驱动^[8]、能源系统转型^[9]与产业优化升级^[10]构成了实现降碳减污扩绿增长协同推进的核心路径。值得注意的是,也有研究认为有效的环境规制能够形成正向激励效应^[11-12],在改善大气环境质量与抑制温室气体排放过程中展现出独特的双重促进机制。在微观研究层面,部分学者聚焦于量化分析单一“减污”或“降碳”边际减排成本的测算^[13-14],为降碳减污扩绿增长协同推进机制的设计提供了重要参数支撑。但针对“降碳减污”和“扩绿增长”二者协同作用效果评价方面研究较少。相关研究主要集中在通过整合“降碳减污”和“扩绿增长”来实现城市可持续发展^[15],致力于建立综合性政策框架,促进这三者间的有效

协同作用^[16]。目前政策导向相关研究主要通过已有城市或国家的政策实践进行案例分析,或是建立政策整合和衔接的数学模型或计量模型,从理论层面探讨政策之间的关联和影响^[17-18]。

综合来看,学界对中国降碳减污扩绿增长耦合协调度统计测度及影响因素等还没有形成完备的理论框架和研究方法体系,且多数研究侧重于单一污染物排放或仅对二氧化碳排放进行时空演化规律的探究^[18],或仅为应用研究和影响评估^[19],少有研究涉及多种污染物排放及二氧化碳排放协同治理的时空特征分析,关于国内降碳减污扩绿增长影响因素的空间演化规律和作用机制仍尚不明确,且已有研究对污染物的研究大多停留在对大气污染物的研究,但就当前实际情况来看,一般工业固体废物和废水排放等也对生态系统产生较大的环境压力^[20]。本文构建了包含降碳、减污、扩绿、增长四维度的耦合协调度评估框架。采用熵权-TOPSIS组合评价模型,对中国273个地级市的耦合协调度水平进行了系统性量化评估,重点揭示各城市耦合协调度的时空演变规律与动态特征。研究进一步运用模糊集定性比较分析法(fsQCA),深度探究驱动城市耦合协调度提升的核心要素配置路径,旨在为可持续城市发展规划提供理论支撑与实践依据。

2 降碳减污扩绿增长耦合协调度评价指标体系构建

本研究基于污染物与碳排放的同源性特征,将多种污染物和碳排放同时纳入测算“降碳减污”指数体系,同时考虑经济增长和城市绿色产业发展的共同作用,从“降碳减污”和“扩绿增长”两个角度测度中国降碳减污扩绿增长耦合协调度,具体评价指标体系如表1所示。

表1 降碳减污扩绿增长耦合协调度评价指标体系
Table 1 Calculation index system of coupling coordination degree of carbon reduction, pollution control, greenery expansion and economic growth

一级指标	二级指标	三级指标	指标说明	单位
降碳减污扩绿增长耦合协调度	“降碳减污”指数	SO ₂ 强度	SO ₂ /地区生产总值	t/万元
		废水强度	废水排放量/地区生产总值	t/万元
		PM _{2.5} 强度	PM _{2.5} /地区生产总值	μg·m ⁻³ ·万元 ⁻¹
		NO _x 强度	NO _x /地区生产总值	t/万元
		粉尘强度	粉尘排放量/地区生产总值	t/万元
		生活污水治理水平	生活污水处理率	%
		生活垃圾治理水平	生活垃圾无害化处理率	%
		环境执法效能	案件数目	件
		政府环保关注度	环保词汇/工作报告总词数	%
		生态建设投入	园林绿化投资	万元
	“扩绿增长”指数	污水治理水平	污水处理厂集中处理率	%
		CO ₂ 强度	CO ₂ /地区生产总值	t/万元
		市场繁荣度	社会消费品零售总额	万元
		工业发展规模	工业总产值	万元
		地区发展指数	人均地区生产总值	元
		城市绿色空间规模	人均公园绿地面积	m ²
		城市森林覆盖率	城市森林覆盖率	%
		产业升级程度	产业结构高级化	
		地区居民经济收益	居民人均可支配收入	元
		地区经济发展速度	地区生产总值增长率	%

本研究采用熵权-TOPSIS 组合评价模型,通过双重优势机制规避主观赋权偏差与单一指标局限性。首先,为消除指标量纲异质性,本研究采用对数转换实施无量纲化处理。其次,本研究构建基于能源消费视角的碳排放强度评估框架,主要依托了多维度能源活动数据核算二氧化碳排放量。其中核算体系覆盖煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气等9类常规能源载体。能源燃烧相关排放量采用《2006年IPCC国家温室气体清单指南》提供的标准化核算框架进行折算,工业生产过程排放量则采用产量关联排放因子法进行估算,计算公式为

$$FCE_{t,c} = \sum_i (FC_{t,c,i} \times EF_i) \quad (1)$$

式中: i 为能源种类; $FC_{t,c,i}$ 为 t 时期 c 地区对 i 种类能源的消费量; EF_i 为第 i 种类能源的二氧化碳排放系数。

本研究旨在研究“降碳减污”与“扩绿增长”二者之间的协同治理关系。因此,在运用TOPSIS熵权法对“降碳减污”指数和“扩绿增长”指数进行测度的基础上构建耦合协调度模型计算中国“降碳减污”指数和“扩绿增长”指数的耦合协调度,耦合协调度计算过程参考赵文举等^[21]的研究进行计算。本文适用的耦合协调度模型如下:

$$C = \frac{\prod_{i=1}^n U_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i}, \quad (2)$$

$$D = \sqrt{C \times T}, \quad (3)$$

$$T = \alpha C_1 + \beta C_2. \quad (4)$$

式(2)~(4)中: C 为“降碳减污”“扩绿增长”两个系统之间的耦合值,且 $0 \leq C \leq 1$; D 为“降碳减污”“扩绿增长”的耦合协调度值,且 $0 \leq D \leq 1$; T 为综合评价指标; α 、 β 为待确定的权重系数,且 $\alpha + \beta = 1$ 。

“十四五”期间党和国家要求深入打好污染防治攻坚战,突出源头治理、系统治理、综合治理,生态环境保护的焦点也从“双碳”目标走向多种污染防治和碳减排的协同治理,将多种污染物的防治纳入现有环境管理体系,加快我国环境治理体系和治理能力现代化进程。因此,在结合目前我国生态环境治理要求以及建设美丽中国美好愿景的基础上,确定中国降碳减污耦合协调度的“降碳减污”和“扩绿增长”的权重均为0.5,即 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ 。

3 结果分析

3.1 降碳减污扩绿增长耦合协调度测度结果及分布走势

本研究基于降碳减污扩绿增长耦合协调度评价体系,运用熵权法-TOPSIS与耦合协调度模型,对中国273个主要地级市降碳减污扩绿增长耦合协调水平展开定量评估。参照国务院发展研究中心发布的区域划分标准,归类为东北区域、北部沿海、东部沿海、南部沿海、黄河中游、长江中游、大西南及大西北八大经济区,系统开展空间分异特征研究。评估结果及动态演化趋势详见表2。

表2 中国降碳减污扩绿增长耦合协调度测度结果
Table 2 Measurement results of coupling coordination degree of carbon reduction, pollution control, greenery expansion and economic growth in China

地区	年份			
	2014	2017	2020	2023
全国	0.527 9	0.549 2	0.556 6	0.582 5
东北区域	0.498 9	0.511 5	0.512 0	0.533 9
北部沿海	0.578 8	0.596 4	0.592 2	0.617 4
东部沿海	0.585 9	0.604 9	0.610 3	0.638 9
南部沿海	0.549 4	0.565 0	0.563 8	0.584 2
黄河中游	0.531 4	0.548 9	0.562 1	0.587 8
长江中游	0.519 7	0.545 8	0.554 2	0.583 6
大西南	0.492 9	0.524 5	0.535 9	0.562 0
大西北	0.475 2	0.503 0	0.533 8	0.565 3

表 2 所示分析结果表明,全国及各区域层面的减污降碳扩绿增长耦合协调度发展呈现显著的规律性特征:1)整体发展态势方面,2014—2023 年间全国减污降碳扩绿增长耦合协调度指数由 0.527 9 稳步攀升至 0.582 5,年均增长率达 1.10%。这一增长轨迹不仅印证了我国“双碳”战略目标实施成效,也体现了生态文明建设理念的深化拓展。作为全球最大的发展中国家,中国在协调经济社会发展与生态保护方面取得的积极进展,充分展现了负责任大国的全球气候治理担当。2)空间分异格局层面,区域发展呈现显著的空间非均衡性。东部沿海地区凭借 0.610 9 的平均值成为耦合协调度最优区域,北部沿海地区以 0.596 0 紧随其后,形成“东高西低”的阶梯状分布格局。值得关注的是,东北区域(0.516 1)和大西北(0.520 0)长期处于低位区间,其数值分别较全国均值低 7.599 3% 和 6.778 9%,反映出传统工业转型区与生态脆弱区的协同发展挑战。3)动态演化特征维度,八大经济区耦合协调度年均增幅达 0.610 0%,其中大西北地区以 1.000 0% 的增速居首位。时序分析显示,北部沿海地区呈现持续稳定增长态势,其余区域则在不同阶段表现出波动上升特征。这种区域增长异质性的存在,要求政策制定需兼顾效率与公平,特别是在高污染排放密集区,亟待通过技术创新与制度创新释放协同治理潜力。

研究结论表明,尽管我国降碳减污扩绿增长协同治理体系已初步形成良性演进态势,但区域发展不平衡不充分问题依然突出。未来需强化区域协同机制,重点突破中西部地区的生态转型瓶颈,持续完善“政府—市场—社会”多元共治的现代环境治理体系。

3.2 降碳减污扩绿增长耦合协调度的空间分布

图 1~2 展示了基于 ArcGIS 生成的我国 2014 年和 2023 年降碳减污扩绿增长耦合协调度空间分布图(所有图基于自然资源部标准地图(审图号为 GS(2024)0650 号)绘制,底图无修改)。

通过对图 1~2 的分析可发现,该协调度在空间维度呈现显著的“东部优势集聚,西部相对滞后”的非均衡分布特征,且研究期内整体发展水平呈现稳步提升态势。这一空间分异格局的形成机制可从以下维度进行解析:1)区域经济支撑维度。东部沿海地区凭借雄厚的产业基础和经济实力,能够在污染治理、生态补偿等领域投入更多财政资源,形成“经济基础—环境投入—治理效能”的良性循环。而西部欠发达区域受财政约束,环境治理的资源配置能力相对薄弱;2)技术创新驱动维度。东部地区依托密集的高校科研院所和创新型企业集群,构建了较为完善的技术研发与成果转化体系,使得清洁能源技术、碳捕捉

技术等得以快速应用。反观西部地区,科技创新生态系统尚待完善,技术承接与转化效率存在提升空间;3)制度协同效应维度。东部地区在生态文明体制改革中积累了先行经验,通过政策工具创新有效激励了多元主体参与,西部地区在制度设计精细化程度和跨部门协同效率上尚需优化。

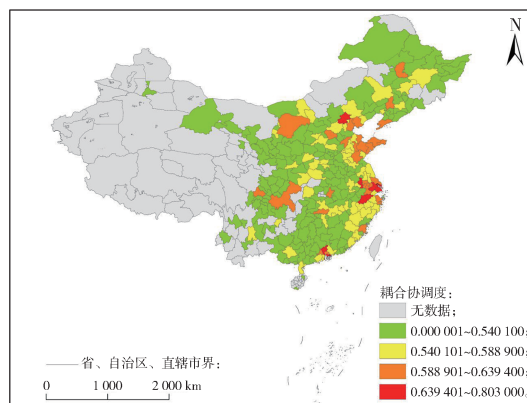


图 1 2014 年中国降碳减污扩绿增长耦合协调度的空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of coupling coordination degree of carbon reduction, pollution control, greenery expansion and economic growth in 2014

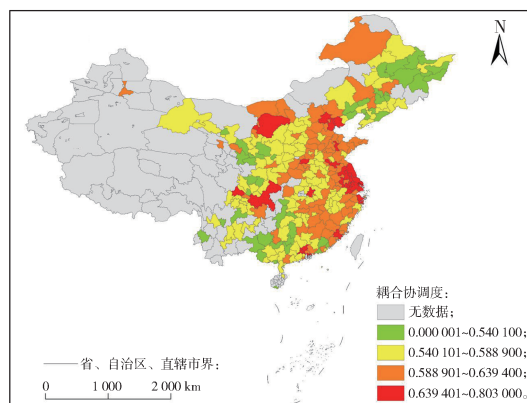


图 2 2023 年中国降碳减污扩绿增长耦合协调度的空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of coupling coordination degree of carbon reduction, pollution control, greenery expansion and economic growth in 2023

4 空间演化特征分析

4.1 降碳减污扩绿增长耦合协调度的核密度估计

图 3 展现了研究期内全国及八大经济区降碳减污扩绿增长耦合协调度的核密度曲线分布特征及其动态演变规律。自“十一五”规划将节能减排目标纳入国民经济约束性指标体系以来,全国及各经济区协调度核密度曲线呈现整体右移趋势,显示出我国协同治理水平稳步提升的发展态势。这一演变过程反映出,

在生态文明建设战略推动下,不同区域均取得了具有显著差异的治理成效,为构建现代环境治理体系奠定了重要基础。从主峰形态演变看,全国整体核密度曲线呈现主峰收窄且峰值抬升的分布特征,表明研究期内区域间协调水平离散程度显著降低,整体协同治理能力持续增强。比较分析八大经济区可以发现,各经济区协调度均呈现上升趋势,但黄河中游与大西北地区的分布形态呈现多极化特征。在分布延展性方面,

全国及东北、大西南地区的核密度曲线存在明显左拖尾现象,揭示出区域内存在耦合协调度显著高于平均水平的局部地区。从波峰数量分析,北部沿海和大西南地区在观测初期呈现多峰分布特征,但后期逐渐演变为单峰分布,显示出区域内部发展差异缩小趋势。相较而言,全国整体及其他经济区在观测期内始终保持单峰分布形态,表明这些区域内部发展均衡性较好,未出现显著的两极分化现象。

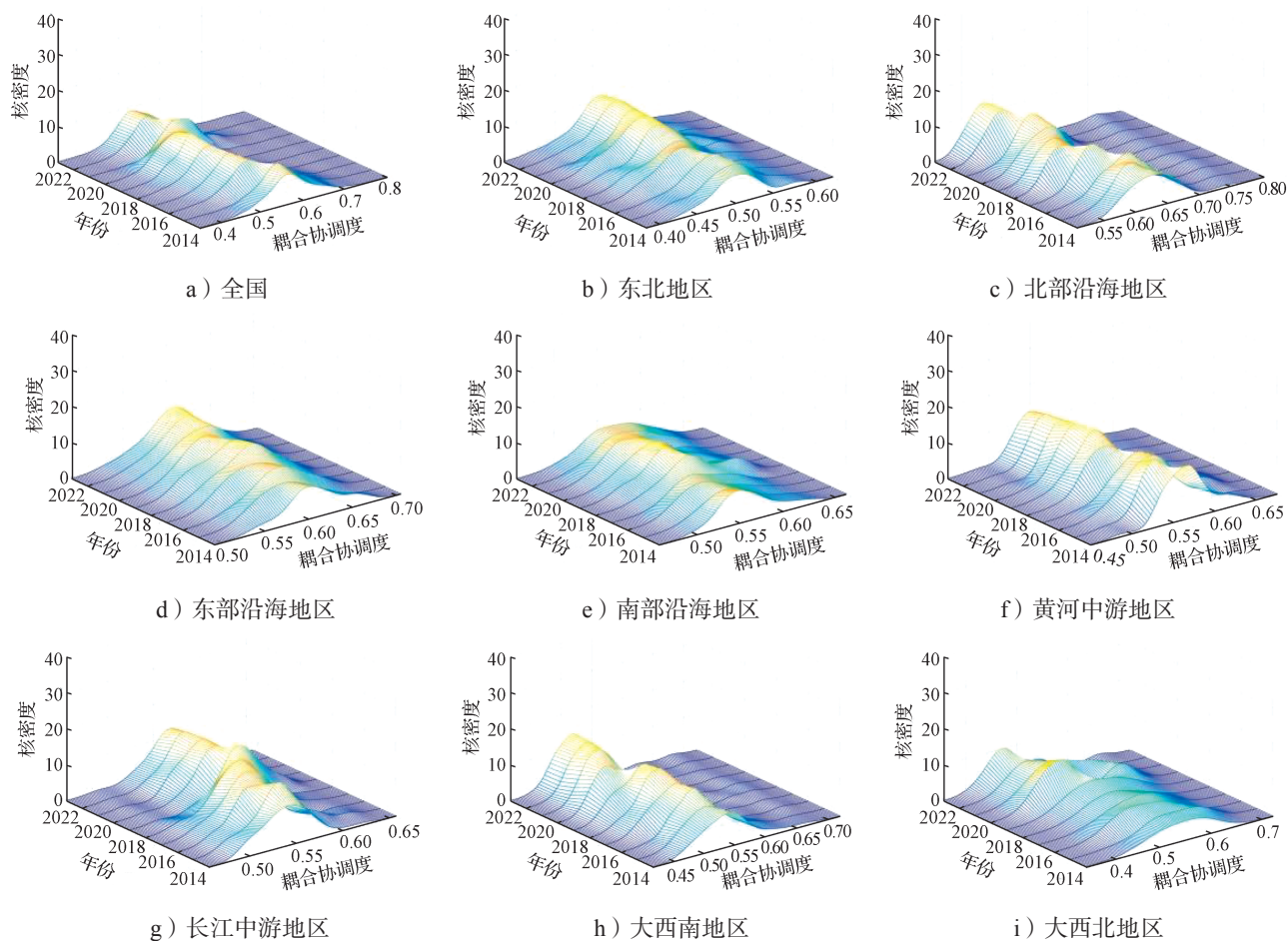


图3 中国降碳减污扩绿增长耦合协调度核密度估计

Fig. 3 Kernel density estimation of coupling coordination degree of carbon reduction, pollution control, greenery expansion and economic growth in China

4.2 降碳减污扩绿增长耦合协调度的马尔可夫链分析

考虑到各地级市降碳减污扩绿增长耦合协调度相互影响且具有一定的空间相关性,使用空间马尔可夫链分析地区间的空间关联性。耦合协调度的空间马尔可夫链转移矩阵如表3所示。由表3可知,就全国水平而言,当领域空间滞后类型分别为无滞后、低、中低、中高和高水平时,我国耦合协调度水平处于强优势的地级市可以保持优势的的概率不低于92.44%;低优势地区提升至中低水平的概率为27.01%,19.28%,29.20%,48.19%,30.00%;中低优势

地区提升至中高优势地区的概率为30.16%,27.45%,22.46%,38.58%,47.83%;中高优势地区提升至高优势地区的概率为20.61%,18.51%,11.85%,19.92%,31.39%;各水平均保持着一定的概率向上跨级。表3中马尔可夫矩阵中对角线上的元素数值代表了各种情形下发展新优势水平状态保持不变的概率,在各领域空间滞后类型下,对角线元素的数值最大,即各水平等级下地区保持自身原等级的概率最高。在高水平滞后类型下,中低水平区域出现了显著分化:中低水平向高水平转移概率达31.39%,而低水平转移至中低水平概率仅4.35%。这表明环境规制压力对中等发

展水平城市产生了“倒逼转型”效应。

表 3 2014—2023 年中国降碳减污扩绿增长耦合协调度空间马尔可夫链转移矩阵

Table 3 Spatial Markov chain transfer matrix of China's coupling coordination degree of carbon reduction, pollution control, greenery expansion and economic growth from 2014 to 2023

滞后类型	<i>t</i>	<i>t</i> +1				观测值
		低水平	中低水平	中高水平	高水平	
无滞后	低水平	0.708 6	0.270 1	0.019 7	0.001 5	659
	中低水平	0.120 6	0.569 8	0.301 6	0.007 9	630
	中高水平	0.008 4	0.126 7	0.658 8	0.206 1	592
	高水平	0.001 8	0.007 1	0.081 1	0.910 1	567
低水平	低水平	0.794 1	0.192 8	0.009 8	0.003 3	306
	中低水平	0.205 9	0.519 6	0.274 5	0.000 0	102
	中高水平	0.018 5	0.240 7	0.555 6	0.185 2	54
	高水平	0.000 0	0.080 0	0.120 0	0.800 0	25
中低水平	低水平	0.676 0	0.292 0	0.032 0	0.000 0	250
	中低水平	0.136 8	0.638 6	0.224 6	0.000 0	285
	中高水平	0.022 2	0.207 4	0.651 9	0.118 5	135
	高水平	0.000 0	0.000 0	0.093 8	0.906 3	64
中高水平	低水平	0.506 0	0.481 9	0.012 0	0.000 0	83
	中低水平	0.071 1	0.522 8	0.385 8	0.020 3	197
	中高水平	0.003 8	0.101 5	0.695 5	0.199 2	266
	高水平	0.000 0	0.005 3	0.090 9	0.903 7	187
高水平	低水平	0.650 0	0.300 0	0.050 0	0.000 0	20
	中低水平	0.043 5	0.456 5	0.478 3	0.021 7	46
	中高水平	0.000 0	0.051 1	0.635 0	0.313 9	137
	高水平	0.003 4	0.003 4	0.068 7	0.924 4	291

4.3 降碳减污扩绿增长耦合协调度的基尼系数分解

4.3.1 基尼系数的总体差异

本研究运用 Dagum 基尼系数分解法，系统测算了 2014—2023 年中国八大经济区降碳减污扩绿增长耦合协调度的时空演变特征，所得结果见表 4。

表 4 的研究结果表明，区域发展差异呈现多维分化特征：在总体收敛态势方面，各区域基尼系数均值介于 0.028 7（东部沿海）至 0.048 1（大西北）之间，整体呈波动下降趋势，其中东北地区基尼系数从 2014 年的 0.058 6 降至 2023 年的 0.039 2，年均降幅达 4.3%；大西北地区则呈现“快速下降（2014—2020 年降幅 42.7%）—反弹回升（2020—2023 年增幅 28.3%）”的 U 型波动轨迹，折射出生态脆弱区治理成效的阶段性反复特征。从区域分化格局看，以八大区域 2023 年均值 0.037 4 为参照，东北地区持续高于基准值 4.8%，大西北地区虽较 2014 年下降 26.6% 但仍居差异首位；

北部沿海（0.032 3）和东部沿海（0.028 7）持续保持低位，较均值分别低 13.6% 和 23.3%；南部沿海呈现“上升—收敛”交替波动特征，黄河中游则以 0.027 7 至 0.033 6 的窄幅波动成为均衡发展典范。驱动机制方面，东北地区高差异性与重工业转型滞后密切相关，其基尼系数波动与装备制造业去产能周期高度同步；2022 年大西北地区基尼系数骤升 37.9%，凸显风光电基地建设引发的生态保护矛盾；东部沿海通过产业高端化实现持续收敛，2018 至 2023 年波动幅度仅 0.27%。据此，建议针对东北老工业基地构建产能置换与生态修复的联动补偿机制，针对大西北地区推行新能源项目集群与生态修复的捆绑开发模式，针对黄河中游则可推广焦化、电解铝等行业的绿色工艺协同创新经验，以差异化路径推动区域协调发展。

表 4 八大经济区基尼系数差异结果
Table 4 Gini coefficient discrepancies among the eight major economic zones

区域	2014	2015	2016	2017	2018
东北	0.058 6	0.054 8	0.049 0	0.043 4	0.049 0
北部沿海	0.036 5	0.035 1	0.036 8	0.032 9	0.033 6
东部沿海	0.042 3	0.035 7	0.031 7	0.030 7	0.027 1
南部沿海	0.046 0	0.052 0	0.045 7	0.044 7	0.040 3
黄河中游	0.029 1	0.030 1	0.028 7	0.033 6	0.029 8
长江中游	0.036 9	0.032 9	0.030 8	0.028 9	0.027 6
大西南	0.050 6	0.046 2	0.039 7	0.038 0	0.035 3
大西北	0.065 5	0.064 0	0.050 6	0.053 5	0.054 0

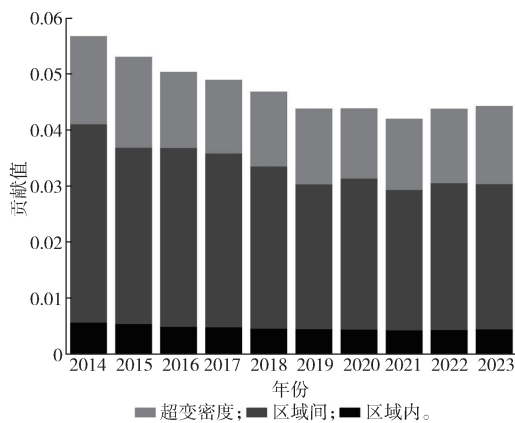
区域	2019	2020	2021	2022	2023
东北	0.041 3	0.037 2	0.043 5	0.039 1	0.039 2
北部沿海	0.036 4	0.033 4	0.031 4	0.031 8	0.032 3
东部沿海	0.028 8	0.030 8	0.028 7	0.028 0	0.028 7
南部沿海	0.041 4	0.038 3	0.039 4	0.040 4	0.040 8
黄河中游	0.028 2	0.027 9	0.026 1	0.027 7	0.028 7
长江中游	0.027 8	0.029 5	0.029 4	0.028 8	0.030 0
大西南	0.036 7	0.036 5	0.030 9	0.032 1	0.032 7
大西北	0.042 7	0.037 5	0.034 0	0.046 9	0.048 1

4.3.2 基尼系数的差异来源

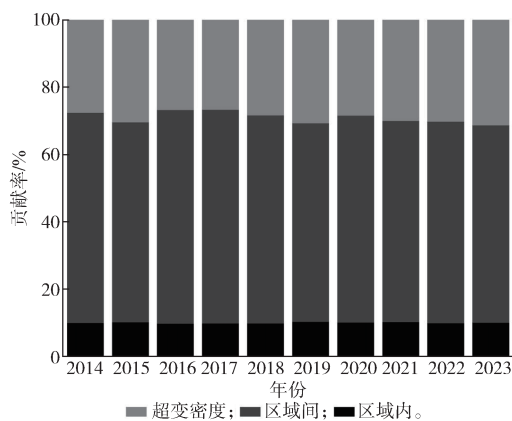
本研究系统解构了全国地级市降碳减污扩绿增长耦合协调度的空间差异及其来源，所得结果如图 4 所示。

图 4 所示结果显示，2014—2023 年间子群间差异贡献均值为 0.029（波动区间 0.026~0.035），子群内差异贡献均值为 0.005（0.004~0.006），超变密度贡献均值为 0.013（0.012~0.016）。从贡献率维度看，子群间差异以 59.83% 的主导地位构成空间分异的核心来源，超变密度贡献率 29.89% 次之，子群内差异

贡献率仅占 10.28%。时序演变呈现结构性特征:子群间差异贡献率从 62.41% 下降至 58.63%, 年均降幅 0.4%; 超变密度贡献率由 27.55% 攀升至 31.25%, 年均升幅约为 0.4%; 子群内差异贡献率始终稳定在 10% 左右。值得注意的是, 子群间差异贡献值 10 a 间下降约 26.8% (从 0.035 4 降至 0.025 9), 而超变密度贡献值降幅收窄至 11.5% (从 0.015 6 降至 0.013 8), 表明跨区域交互效应的影响韧性更强。研究揭示, 尽管区域间发展梯度是空间分异的主导因素, 但超变密度的动态调节作用在持续增强, 2019 年后其贡献率已突破 30% 阈值。三类差异源的变化幅度均未超过基准期的上下 15%, 显示空间分异机制仍保持基础框架稳定。这一特征印证了区域协同治理政策的路径依赖特性, 同时也提示需关注超变密度所代表的非线性交互效应, 其为打破传统梯度发展模式提供了潜在突破点。



a) 贡献值



b) 贡献率

图4 耦合协调度的空间差异及其来源

Fig. 4 Spatial differences and sources of coupling coordination degree

4.4 组态提升路径分析

4.4.1 组态变量选择与校准

本研究基于熵权-TOPSIS 分析框架, 系统测度

了 2014—2023 年间中国 273 个地级市降碳减污扩绿增长耦合协调度的均值水平, 并将其作为核心因变量。研究选取环境规制、科研强度、人口密度、工业化水平及能源结构等 5 个维度作为关键解释变量, 各变量的定义如下。科技水平 (science): 选取国内发明专利申请授权量的对数来衡量。环境规制 (regulation): 选取生态建设与保护本年完成投资额来衡量。工业化水平 (industry): 选取产业集聚程度来衡量。人口密度 (population): 选取地区人口密度来衡量人口因素。能源结构 (energy): 选取能源效率程度来衡量。

本文采用结果变量和前因变量的关键分位点 (上四分位、中位数和下四分位) 作为模糊集合的界定阈值, 依次对应完全不隶属点、交叉点和完全隶属点 (如表 5 所示)。

表5 变量校准锚点

Table 5 Calibrated anchor point for variables

变 量	模糊校准点		
	完全隶属	交叉点	完全不隶属
耦合协调度	0.637 1	0.552 9	0.470 8
人口密度	8 853.617 2	3 005.341 5	1 036.948 3
环境规制水平	77 844.470 0	3 314.500 0	0.000 0
能源效率水平	0.364 7	0.129 9	0.037 7
科技水平	45 421.050 0	2 105.000 0	0.000 0
工业化水平	0.393 3	0.190 3	0.137 1

4.4.2 必要性检验

表 6 为必要性检验结果。

表6 单因子必要性分析结果

Table 6 Single factor necessity analysis results

条件变量	一致性	覆盖度	条件变量	一致性	覆盖度
人口密度	0.607 6	0.651 7	< 人口密度 >	0.691 9	0.663 6
环境规制水平	0.628 1	0.786 3	< 环境规制水平 >	0.676 6	0.575 3
能源效率	0.647 2	0.708 8	< 能源效率 >	0.688 5	0.648 5
科技水平	0.718 5	0.908 7	< 科技水平 >	0.634 8	0.536 1
工业化水平	0.531 5	0.602 1	< 工业化水平 >	0.795 6	0.728 5

注: < 指标 > 表示该指标的相反值

fsQCA 必要性检验通过了前因条件与结果变量的逻辑关系验证, 确保了研究结论的有效性。检验主要包含两个核心指标: 逻辑稳定性指标 (衡量特定条件对结果的稳定影响, 阈值大于 0.9 时判定为必需条件) 和解释覆盖度指标 (反映条件组合的解释力, 通过有效案例覆盖率计算)。检验结果显示, 无论在耦合协调度提升或非提升路径中, 均未发现单一必要条件, 表明需通过条件组态分析解析复杂因果关系。

4.4.3 组态提升路径分析

不同组态表明实现中国降碳减污扩增长耦合协调的多元路径模式,组态分析结果如表7所示。根据组态理论化过程,以下对3个组态进行分析说明。

表7 城市耦合协调度组态结果

Table 7 Configuration results of urban coupling coordination degree

解释因子	组态		
	1	2	3
人口密度	⊗		
环境规制水平		•	
能源效率			•
科技水平	•	•	•
工业化水平	⊗	⊗	⊗
一致率	0.950 0	0.950 8	0.954 3
原始覆盖率	0.455 5	0.456 3	0.452 8
唯一覆盖率	0.026 8	0.039 4	0.023 6
总体一致率		0.936 2	
总体覆盖率		0.622 2	

注:•和⊗分别表示核心条件存在与不存在;•和⊗分别表示边缘条件存在与不存在,下表同。

1)降低人口密度主导耦合协调度提升路径。该路径包含人口密度、科技水平和工业化水平三大核心条件,其中人口密度和工业化水平对耦合协调度提升起负向作用,但缺乏城市环境规制水平和能源效率水平部分^[22]。这表明在该路径中,大力发展城市科技水平,合理布局城市空间,并辅以去除不合理的工业化生产,该城市降碳减污扩绿增长耦合协调度能得到进一步发展。因此在提升耦合协调度时,需着力推动产业结构绿色转型,通过淘汰高耗能、高排放的传统工业产能,系统性降低单位产值的资源环境压力。具体而言,可优先布局新能源、节能环保等战略性新兴产业,引导企业采用清洁生产技术和智能监测系统,实现工业流程碳排放的精准管控。同时,通过构建产城融合的空间规划体系,疏解中心城区过度集聚的人口与产业功能,在都市圈尺度内形成“多中心、组团式”发展格局,有效缓解人口密度对生态环境的边际挤压效应。从政策协同角度来看,需完善工业用地差别化定价机制,对低效工业用地实施“腾笼换鸟”策略,并将腾退空间优先用于生态修复与绿色基础设施建设,从而在降低工业化水平绝对规模的同时,实现空间资源的环境效益增值。

2)提升环境规制水平主导耦合协调度提升路径。该路径包含环境规制水平、科技水平和工业化水平三大核心条件,其中工业化水平对耦合协调度提升起负向作用。环境规制效能的提升应立足三个维度展开:

环保税制度可通过梯度税率设计将企业环境成本显性化,促使污染排放从社会成本转化为企业决策变量,倒逼生产工艺向清洁化方向迭代;排污权交易机制需完善初始分配的市场化准则,建立跨区域交易平台以释放环境容量资源配置潜力,形成“谁减排谁受益”的市场激励机制;生态补偿机制则需突破行政区划限制,通过横向财政转移支付和生态产品价值核算,构建区域间利益协调框架,为生态保护地区提供可持续的经济支撑。这些政策工具的协同实施将重塑企业生产函数,推动传统产业向资源节约型、环境友好型方向转型。与此同时,科技创新作为破解环境与经济矛盾的关键变量,需构建全链条创新生态体系,应设立国家绿色技术重点实验室集群,聚焦碳捕集利用封存、多污染物协同控制等前沿领域,突破共性技术瓶颈;在成果转化环节,需建立绿色技术评估与交易平台,完善环境效益货币化核算方法,降低技术商业化风险。此外针对工业化进程的生态负效应,传统产业改造应实施全生命周期环境绩效管理,通过能效标杆制度推动钢铁、建材等高耗能行业技术改造,配套实施差别电价、碳排放配额等梯度政策工具^[23],加速落后产能市场出清;新兴产业培育需聚焦绿色低碳赛道,在新能源装备制造领域构建完整产业链,在节能环保产业培育系统解决方案供应商,通过政府采购、应用示范等政策组合拓展市场需求;区域布局优化则需建立产业准入负面清单与生态保护红线的联动机制,引导产业向资源环境承载力强的区域集聚,构建绿色产业园区循环经济体系。这种双向发力策略既能化解传统产业转型阵痛,又能培育经济发展新动能,最终实现经济增长与生态承载力的动态平衡。

3)提升能源效率主导耦合协调度提升路径。该路径包含能源效率、科技水平和工业化水平三大核心条件,其中工业化水平对耦合协调度提升起负向作用。提升能源效率可通过优化能源消费结构与技术迭代降低单位产出的资源消耗强度,为系统协同增效提供基础支撑;科技水平的提升则通过清洁技术研发与数字化治理手段增强生态经济系统的动态适配能力,驱动降碳减污与绿色增长的正向循环。而工业化水平的负向效应源于传统工业扩张模式下高能耗、高排放的路径依赖,其过度依赖资源要素投入的特征易加剧生态环境承载压力,形成经济增长与生态保护的目标冲突。破解此矛盾需推动工业化模式向绿色集约化转型,通过产业技术升级重构生产函数中的环境要素权重,同时强化环境规制对工业污染排放的约束效力,从而扭转工业化进程对系统协调度的抑制作用。三者交互作用表明,唯有通过能源利用效率的持续改进与科技创

新的深度融合,方能抵消工业化发展带来的生态损耗,实现经济发展质量与生态环境效益的协同跃升。

4.4.4 稳健性检验

参考 W. Q. Judge 等^[24]的研究,将原始一致性调整至 0.7,其它操作不作变动,结果显示耦合协调度提升的前因条件组合并没有发生显著变化,所得到的两条路径为前面组态分析的路径子集,这充分说明在本次针对耦合协调度组态提升分析中的路径均具有一定的稳健性(表 8)。已有提升城市耦合协调度的对策建议更多基于实证结果进行宏观定性分析^[25],而本文充分强调各驱动因子间的复杂联系,从驱动因子联动匹配所产生的多重组合效应出发,采用 fsQCA 方法厘清了提高耦合协调度的组态路径,在一定程度上增强了相关对策建议的针对性和系统性。

表 8 fsQCA 稳健性检验组态结果
Table 8 Robustness test configuration results of fsQCA

解释因子	组态	
	1	2
人口密度		
环境规制水平		•
能源效率		
科技水平	•	•
工业化水平	⊗	
一致率	0.936 0	0.938 9
原始覆盖率	0.608 3	0.516 2
唯一覆盖率	0.152 0	0.059 9
总体一致率	0.668 2	
总体覆盖率	0.928 3	

5 研究结论与建议

通过研究 2014—2023 年中国 273 个地级市降碳减污扩绿增长耦合协调的时空演化特征及组态提升路径发现:2014—2023 年,中国降碳减污扩绿增长耦合协调度稳步上升且趋势明显,我国降碳减污扩绿增长耦合协调度自 2014 年的 0.527 9 上升至 2023 年的 0.582 5,显示出我国降碳减污扩绿增长协同治理成效向好的信号。从全国分布来看,耦合协调度呈现出“由东向西”逐渐减弱的分布格局。从八大经济区来看,各地区耦合协调度整体呈现同向收敛状态,全国以及各个经济区都有稳定增长的趋势,在观察期后期部分出现了波动;具体地,降碳减污协同治理以南部沿海及东部沿海地区为高水平区域,大西北地区及黄河中游地区降碳减污协同治理水平处全国排名末端。从组态提升路径分析来看,城市科技发展水平、能源效率和环境规制水平等主导因

素组成的三条不同路径是降碳减污扩绿增长协同增效的有效提升路径。

结合上述研究结论,本文提出如下启示与建议。一是提升城市科技发展水平,科技创新是推动环保减排的重要引擎,提高科技水平可以带来更多环保技术和解决方案,降低环境污染。政府应鼓励科技企业在环保技术领域投入研发,推动科技在清洁能源、智能交通等场景中的应用,建立科技成果转化机制,将科技研究成果快速应用到环境保护领域,加速技术推广和应用。二是提高能源效率,提高能源效率可以降低碳排放,减少对传统能源的依赖,同时减少能源浪费,降低生产成本。制定强制性的能源管理标准和目标,鼓励企业采用高效节能设备和技术,减少能源消耗,加强对企业能源使用情况的监管和核查,推动企业实施能源审计,发挥潜在的节能潜力。三是加强环境规制水平,强化环境规制有利于规范企业行为,减少环境污染,保障居民健康,严格的排放标准和奖惩机制能够有效约束企业的环保行为,推动其向绿色环保方向发展。一方面制定更严格的污染物排放标准,强化对企业污染排放的监督检查,确保企业合规排放;另一方面建立健全的环境奖惩机制,对达标企业给予激励,对违规行为进行处罚,促使企业自觉遵守环保法规。

参考文献:

[1] 赵曼仪,王 科. 减污降碳协同效应综合评估的研究综述与展望 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(2): 58-69.
ZHAO Manyi, WANG Ke. Comprehensive Evaluations of the Synergistic Effects of Carbon Emission Reduction and Air Pollution Control: A Literature Review[J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(2): 58-69.

[2] 柴麒麟,傅 莎,郑晓奇,等. 中国重点部门和行业碳排放总量控制目标及政策研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(12): 1-7.
CHAI Qimin, FU Sha, ZHENG Xiaoqi, et al. Carbon Emission Cap Control Target and Policy Study of Selected Sectors and Industries in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(12): 1-7.

[3] 韩冬日,丁丽鑫,董会忠,等. 组态视角下全过程治理驱动减污降碳协同的路径选择 [J]. 环境科学研究, 2024, 37(9): 1867-1876.
HAN Dongri, DING Lixin, DONG Huizhong, et al. Path Selection of Whole Process Governance Driving Collaboration of Pollution Control and Carbon

- Reduction from Configuration Perspective[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(9): 1867-1876.
- [4] 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.
- [5] 任亚运, 傅京燕. 碳交易的减排及绿色发展效应研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(5): 11-20.
REN Yayun, FU Jingyan. Research on the Effect of Carbon Emissions Trading on Emission Reduction and Green Development[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(5): 11-20.
- [6] 高庆先, 高文欧, 马占云, 等. 大气污染物与温室气体减排协同效应评估方法及应用[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(3): 268-278.
GAO Qingxian, GAO Wenou, MA Zhanyun, et al. The Synergy Effect Assessment Method and Its Application for Air Pollutants and Greenhouse Gases Reduction[J]. Climate Change Research, 2021, 17(3): 268-278.
- [7] 贾璐宇, 王艳华, 王 克, 等. 大气污染防治措施二氧化碳协同减排效果评估[J]. 环境保护科学, 2020, 46(6): 19-26, 43.
JIA Luyu, WANG Yanhua, WANG Ke, et al. Evaluation of Carbon Dioxide Coordination Emission Reduction Based on National Air Pollution Control Plan[J]. Environmental Protection Science, 2020, 46(6): 19-26, 43.
- [8] 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 Lianbiao, LI Xiao, DUAN Hongbo. Synergistic Effects of Reducing Pollution and Carbon Emissions in the Yangtze River Delta[J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(6): 21-32.
- [9] 赵立祥, 赵 蓉, 张雪薇. 碳交易政策对我国大气污染的协同减排有效性研究[J]. 产经评论, 2020, 11(3): 148-160.
ZHAO Lixiang, ZHAO Rong, ZHANG Xuewei. Study on the Effectiveness of Carbon Trading Policy on the Coordinated Emission Reduction of Air Pollution in China[J]. Industrial Economic Review, 2020, 11(3): 148-160.
- [10] 孙佑海. 依法构建降碳减污扩绿保供增长五位一体的协同机制[J]. 郑州大学学报(哲学社会科学版), 2022, 55(6): 26-29, 124.
SUN Youhai. Construct a Five-in-One Coordination Mechanism to Reduce Carbon, Reduce Pollution, Expand Green and Ensure Supply Growth According to Law[J]. Journal of Zhengzhou University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2022, 55(6): 26-29, 124.
- [11] 崔新蕾, 王冉冉. 中国降碳-减污-扩绿-增长协同发展空间关联网络特征及影响因素研究[J]. 环境科学研究, 2024, 37(7): 1446-1457.
CUI Xinlei, WANG Ranran. Research on the Spatial Correlation Network Characteristics and Influencing Factors of Coordinated Development of Carbon Emission Reduction-Pollution Reduction-Green Expansion-Economic Growth in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(7): 1446-1457.
- [12] 刘世锦, 赵 勇, 刘耕源. 降碳减污扩绿增长: “四位一体”评估框架及测度[J]. 生态文明研究, 2024, 11(3): 21-41.
LIU Shijin, ZHAO Yong, LIU Gengyuan. The Synergistic Effect of Carbon Reduction, Pollution Abatement, Green Expansion and Economic Growth: A New “Four in One” Evaluation Framework and Measurement Method[J]. Journal of Eco-Civilization Studies, 2024, 11(3): 21-41.
- [13] 夏学超, 孙 慧, 祝树森, 等. 多元主体环境规制组合如何实现降碳减污扩绿增长协同推进?[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(8): 22-35.
XIA Xuechao, SUN Hui, ZHU Shusen, et al. How Can a Combination of Environmental Regulations by Multiple Stakeholders Achieve the Synergistic Advancement of Carbon Reduction, Pollution Control, Green Expansion, and Economic Growth?[J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(8): 22-35.
- [14] 曾雪婷, 张馨予, 张寿全, 等. 生态带共建视域下京津冀地区减污降碳协同效应研究[J]. 环境科学研究, 2024, 37(7): 1458-1469.
ZENG Xueting, ZHANG Xinyu, ZHANG Shouquan, et al. Synergistic Effects of Carbon-Pollutant Reduction in Beijing-Tianjin-Hebei Region Under Ecological Belt Co-Construction[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(7): 1458-1469.
- [15] 赵 果, 李小敏, 赵玉婷, 等. 生态环境分区管控减污降碳协同增效技术路径及实证研究: 以湘潭市为例[J]. 环境影响评价, 2024, 46(1): 1-8.
ZHAO Guo, LI Xiaomin, ZHAO Yuting, et al. Technical Paths and Empirical Studies of Synergistic Effect of Pollution and Carbon Reduction Under the Eco-Environmental Zoning Control: A Case Study of Xiangtan City[J]. Environmental Impact Assessment, 2024, 46(1): 1-8.
- [16] 于 潇, 林建鑫. 公众环境关注是否促进减污降碳协同增效? : 来自居民与企业的机制考察[J]. 西安财经大学学报, 2024, 37(3): 55-67.
YU Xiao, LIN Jianxin. Does Public Environmental

- Concern Promote Synergies in Pollution and Carbon Reduction? Mechanism Investigation From Residents and Enterprises[J]. Journal of Xi'an University of Finance and Economics, 2024, 37(3): 55-67.
- [17] 朱思瑜, 于冰. “排污权”和“碳排放权”交易的减污降碳协同效应研究: 基于污染治理和政策管理的双重视角[J]. 中国环境管理, 2023, 15(1): 102-109.
ZHU Siyu, YU Bing. Research on the Co-Benefits of Pollution Reduction and Carbon Reduction of “Emissions Trading” and “Carbon Emissions Trading”: Based on the Dual Perspectives of Pollution Control and Policy Management[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2023, 15(1): 102-109.
- [18] 刘亦文, 阳超, 蔡宏宇. 中国碳排放总量与强度的省际差异与因素分解[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(1): 1-9.
LIU Yiwen, YANG Chao, CAI Hongyu. Inter-Provincial Diversity and Factor Decomposition of the Totality and Intensity of Carbon Emissions in China[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2022, 36(1): 1-9.
- [19] 桑宇, 乔鹏, 薛军. 中国不同区域一般工业固体废物现状及展望[J]. 现代化工, 2022, 42(10): 11-17.
SANG Yu, QIAO Peng, XUE Jun. Status and Prospect of General Industrial Solid Wastes in China's Different Regions[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(10): 11-17.
- [20] 彭湘君, 章仟. 区域绿色金融发展与经济增长的耦合协调度和异质性研究[J]. 当代金融研究, 2022, 5(10): 53-67.
PENG Xiangjun, ZHANG Qian. Coupling Regional Heterogeneity Analysis of Green Finance and Economic Growth[J]. Journal of Contemporary Financial Research, 2022, 5(10): 53-67.
- [21] 赵文举, 张曾莲. 中国经济双循环耦合协调度分布动态、空间差异及收敛性研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(2): 23-42.
- ZHAO Wenju, ZHANG Zenglian. Research on the Dynamic Distribution, Spatial Difference and Convergence of China's Economic Dual Circulation Coupling Coordination Degree[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2022, 39(2): 23-42.
- [22] 毕佳港, 林树高, 诸培新. 城市韧性与城市土地利用效率耦合协调发展及其影响因素: 以长江经济带为例[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(11): 2315-2328.
BI Jiagang, LIN Shugao, ZHU Peixin. Coupling and Coordinated Development of Urban Resilience and Urban Land Use Efficiency and the Influencing Factors: A Case Study of Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(11): 2315-2328.
- [23] 宋亚植, 李银, 李仲飞. 基于产出效率的中国钢铁行业碳配额分配方案[J]. 资源科学, 2023, 45(2): 333-343.
SONG Yazhi, LI Yin, LI Zhongfei. Carbon Quota Scheme for China's Iron and Steel Industry Based on Output Efficiency[J]. Resources Science, 2023, 45(2): 333-343.
- [24] JUDGE W Q, FAINSHMIDT S, BROWN J L. Institutional Systems for Equitable Wealth Creation: Replication and an Update of Judge et al. (2014)[J]. Management and Organization Review, 2020, 16(1): 5-31.
- [25] 朱晓晶, 王伯礼, 张鑫. 长江经济带碳排放-交通运输-区域经济耦合协调研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(11): 103-114.
ZHU Xiaojing, WANG Boli, ZHANG Xin. Research on Coupling Coordination Among Carbon Emissions, Transportation, and Regional Economy in Yangtze River Economic Belt Railway[J]. Transport and Economy, 2025, 47(11): 103-114.

(责任编辑: 申剑)