

长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长耦合 协调的时空演变及影响机制

田培¹, 赵泽群¹, 邓若瑄¹, 马清伊¹, 陈万旭², 许继军³

[1. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室,
湖北武汉430079; 2. 中国地质大学(武汉)区域生态过程与环境演变湖北省
重点实验室, 湖北武汉430074; 3. 长江科学院水资源综合利用研究所, 湖北武汉430010]

摘要: [目的] 分析生态治理工程在长江中游城市群“降碳-减污-扩绿-增长”系统中的积极作用, 系统揭示其时空演变规律、影响机制及发展趋势, 为区域协同推进降碳、减污、扩绿、增长提供科学依据。[方法] 基于2003—2023年相关数据, 构建了包含30个指标的评价体系, 综合运用熵值法、耦合协调度模型、时空地理加权回归及ARIMA预测模型, 系统分析该区域耦合协调的时空演变规律、驱动机制及变化趋势。[结果] ①该区域耦合协调度均值(0.44~0.75)在研究时段内呈上升趋势, 但省际与省内差异显著, 湖北省(0.82)耦合协调度最高, 湖南省(0.74)相对滞后; ②驱动因素存在时空异质性, 数字经济与产业结构高级化水平为正向驱动因素, 科技投入的贡献不够显著, 政府干预因行政治理与市场化矛盾产生了一定程度抑制作用; ③至2030年, 武汉、长沙、南昌等核心城市耦合协调度接近或突破0.85, 但中小城市增速缓慢, 省际差距缩小。[结论] 2003—2023年, 长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长耦合协调发展水平持续上升, 且未来将继续保持上升趋势, 区域内发展水平存在明显省际、省内差异。建议强化核心城市辐射作用, 推动产业转型与科技成果转化, 完善生态补偿机制, 并根据驱动因素的时空差异精准施策, 促进区域协调发展。

关键词: 降碳-减污-扩绿-增长; 耦合协调; 时空演变; 驱动机制; 长江中游城市群

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0284-11

中图分类号: X22, F127

文献参数: 田培, 赵泽群, 邓若瑄, 等. 长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长耦合协调的时空演变及影响机制[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 284-294. Tian Pei, Zhao Zequn, Deng Ruoxuan, et al. Spatiotemporal evolution and influencing mechanisms of coupling coordination of carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth in urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 284-294.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.032

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.032

Spatiotemporal evolution and influencing mechanisms of coupling coordination of carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth in urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River

Tian Pei¹, Zhao Zequn¹, Deng Ruoxuan¹, Ma Qingyi¹, Chen Wanxu², Xu Jijun³

(1. Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation of Hubei Province, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079, China; 2. Hubei Key Laboratory of Regional Ecology and Environmental Change, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 3. Water Resources Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: [Objective] The positive role of ecological management projects in the ‘carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth’ system of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River was analyzed, and its spatiotemporal evolution patterns, influencing mechanisms, and future

收稿日期: 2025-09-29

修回日期: 2025-12-04

采用日期: 2025-12-04

资助项目: 长江科学院开放研究基金“绿色转型视角下长江中游城市群水-能源-粮食系统适配性研究”(CKWV20221038/KY); 国家重点研发计划项目(2023YFC3205600); 区域生态过程与环境演变湖北省重点实验室开放基金(REEC-OF-202404); 华中师范大学中央高校基本科研业务费项目(CCNU25JC016, CCNU25QN007)

第一作者: 田培(1988—), 男(汉族), 湖北省大悟县人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持、水文水资源研究。Email: tianpei@ccnu.edu.cn.

通信作者: 许继军(1971—), 男(汉族), 湖北省武汉市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水文水资源、水资源管理研究。Email: xujj07@163.com.

development trends were systematically revealed, in order to provide a scientific basis for the regional coordinated advancement of carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth. [Methods] Based on data from 2003 to 2023, an evaluation system comprising 30 indicators was constructed. The entropy method, coupling coordination degree model, spatiotemporal geographically weighted regression model, and ARIMA prediction model were comprehensively employed to systematically analyze the spatiotemporal evolution patterns, driving mechanisms, and future trends of coupling coordination in this region. [Results] The results showed that: ① the mean coupling coordination degree (0.44—0.75) showed an upward trend during the study period. However, significant inter-provincial and intra-provincial differences were observed. Hubei Province had the highest coupling coordination degree (0.82), while Hunan Province lagged relatively behind (0.74). ② The driving factors exhibited spatiotemporal heterogeneity. The level of digital economy and industrial structure upgrading served as a positive driving factor, while the contribution of technological investment was not significant. Government intervention exerted a certain inhibitory effect due to the conflict between administrative governance and marketization. ③ The high consistency between the actual and predicted values in 2023 confirmed the reliability of the future trend prediction. It was projected that by 2030, the coupling coordination degree of core cities such as Wuhan, Changsha, and Nanchang would approach or exceed 0.85. However, the growth rate of small and medium-sized cities would be slow, and inter-provincial disparities would narrow. [Conclusion] From 2003 to 2023, the coupling and coordinated development level of carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth in the region has been continuously increasing and is expected to maintain an upward trend. Significant inter-provincial and intra-provincial differences are observed in development levels within the region. It is recommended to strengthen the radiating role of core cities, promote industrial transformation and the application of scientific and technological achievements, improve the ecological compensation mechanisms, and implement targeted policies based on the spatiotemporal differences of driving factors to facilitate regional coordinated development.

Keywords: carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth; coupling coordination; spatiotemporal evolution; driving mechanisms; urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River

生态环境是人类生存、发展的根基。随着中国经济增长,生态环境面临诸多问题^[1]。长江中游城市群作为长江经济带“共抓大保护,不搞大开发”的核心区域,长江流域的水土流失也主要集中在上中游地区^[2],生态系统和经济系统协调发展面临矛盾,探究其降碳-减污-扩绿-增长的耦合协调发展程度,对该区域高质量发展具有重要意义。

目前,对协同推进降碳-减污-扩绿-增长的研究中,冯帅^[3]从法学机制视角进行剖析,引入“碳减排-污染防治-生态产品服务-绿色低碳发展”,构建了“降碳-减污-扩绿-增长”四位一体的协同模式。在行业领域方面,从农业^[4]、建筑业^[5]、旅游业等^[6]不同视角对降碳-减污-扩绿-增长的协同效应进行了评估。区域上,从不同空间尺度构建综合评价体系,贵州、黄河流域与长江经济带的协同发展水平呈上升趋势,但其内在机制、空间格局与驱动因素存在显著差异^[7-9]。在研究方法上,主要运用耦合协调度模型,结合熵权法/CRITIC等进行赋权,同时采用社会网络分析和Dagum基尼系数深化空间维度的研究^[10-12]。驱动机制方面,除传统回归模型外,加入了收敛模

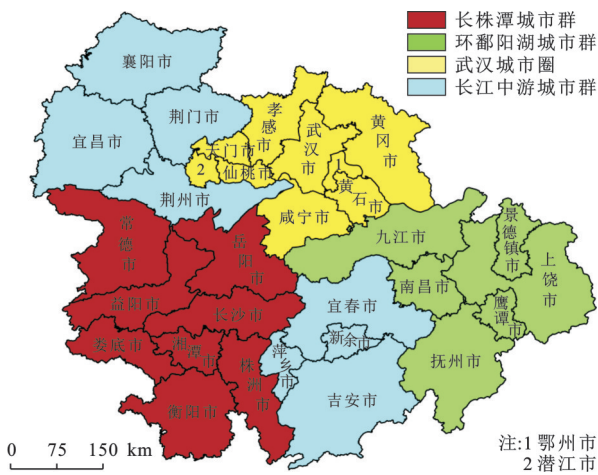
型、空间计量经济学模型^[13-15]。尽管研究成果较为丰富,但仍存在不足,如多集中于国家、省域或整个经济带尺度,缺乏对具有重要生态地位与发展潜力的城市群的研究;指标体系上,对水资源效率、农业污染及城乡均衡维度考量不足;驱动因素的分析方法多数研究未能融合时空维度,难以制定精准的差异化策略;缺乏对系统协同发展轨迹的动态预测,难以支撑“碳达峰”等长期目标的实现。

针对上述不足,以长江中游城市群为例,构建纳入水资源、畜禽粪污综合利用率、城乡均衡指标的综合评价体系,分析2003—2023年区域耦合协调度的时空演变特征;深入剖析数字经济、产业结构等核心驱动因素的时空异质性影响;结合“碳达峰”目标与“十五五”规划导向,运用ARIMA模型预测至2030年的发展路径;同时探讨生态治理工程在“降碳-减污-扩绿-增长”系统中的积极作用,为区域协同推进降碳、减污、扩绿、增长提供科学依据。

因此,系统探究该区域“降碳-减污-扩绿-增长”的协同发展路径,对于破解发展困境,推动区域绿色低碳转型具有重要的理论与现实意义。

1 研究区概况

长江中游城市群是以武汉城市群、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群为主体的特大型城市群(图1),包含28个地级市和3个县级市。2023年GDP约占全国12%,是中国经济增长的重要引擎,更是实施促进中部崛起战略、实施生态优先发展的重点区域。但该区域在快速城镇化和工业化过程中,长期依赖高投入、高耗能发展模式,资源环境约束趋紧,经济社会与生态环境保护间矛盾突出。同时,该区域开展了一系列水土流失治理、植被恢复等生态修复工程,支撑了区域的协同发展。



注:地图数据来源国家地理信息公共服务平台审图号为GS(2024)0650号,底图边界无修改。以下各图同。

图1 长江中游城市群分布

Fig.1 Distribution of city clusters in middle reaches of Yangtze River

2 研究方法数据来源

2.1 长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长协同效应的测度模型

2.1.1 评价指标体系构建

充分考虑长江中游城市群的区域特征,遵循系统性、科学性与可操作性原则,参考已有成果,构建了长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长综合评价指标体系(表1)^[26]。在评价体系中,针对该区域农业比重高、水资源丰富的特点,将“畜禽粪污综合利用率”纳入减污系统,反映农业面源污染治理潜力;将“单位GDP用水量”引进降碳系统,体现水资源约束对碳排放的影响;将“城乡收入比”纳入增长系统,评估城乡协调发展对系统的作用。

2.1.2 熵值法

为使结果更加客观、可靠,本研究采用熵值法为

各指标赋权,并加权求和得到各子系统的得分,计算方法参见Cheng Xinyi等^[17]。

2.1.3 耦合协调度模型

耦合协调分析被广泛用于研究城市化与生态环境之间的关系。耦合协调度越高,子系统相互作用越强,耦合协调发展效果越好^[18]。

本研究运用耦合协调度模型测度降碳、减污、扩绿和增长4个子系统间的耦合协调度,计算方法参考郝岩等^[19]。研究认为所有子系统重要性相同,故均取1/4^[11],耦合协调度划分见表2。

2.2 相关性分析

采用皮尔逊相关系数,判断各要素对区域“降碳-减污-扩绿-增长”耦合协调度影响程度及方向^[20]。

2.3 时空地理加权回归分析GTWR模型

时空地理加权回归模型(GTWR)是在地理加权回归模型(GWR)基础上引入时间维度,可直观反映各影响因素的时空异质性^[21],揭示影响因子的动态作用机制,计算公式如下:

$$D_j = S_0(m_j, n_j, t_j) + \sum_{p=1}^h S_p(m_j, n_j, t_j) f_{jp} + \epsilon_p \quad (1)$$

式中: D_j 表示第 j 个城市降碳-减污-扩绿-增长的耦合协调度; (m_j, n_j, t_j) 表示第 j 个单元的时空坐标; $S_0(m_j, n_j, t_j)$ 表示样本常数项; $S_p(m_j, n_j, t_j)$ 表示地理位置回归函数在第 j 个决策单元的第 p 个影响因素的回归系数取值; f_{jp} 表示第 j 个决策单元的第 p 个影响因素; ϵ_p 表示随机扰动项。

2.4 ARIMA模型预测

ARIMA模型可处理各种类型的时间序列数据,仅考虑内生变量,就能拟合较为平稳的序列,操作简单,预测精度高^[22]。本研究采用ARIMA模型预测耦合协调发展趋势。计算公式如下:

$$Y_t = c + \varphi_1 Y_{t-1} + \varphi_2 Y_{t-2} + \dots + \varphi_p Y_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t \quad (2)$$

式中: Y_t 是时间序列数据; φ_1 到 φ_p 反映当前值与过去 p 个时间点值之间的关系; θ_1 到 θ_q 描述当前值与过去 q 个时间点的误差之间的关系; ϵ_t 为 t 时间点的误差项; c 为常数。

2.5 数据来源

研究数据来源于2004—2024年《中国能源统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国金融统计年鉴》《中国农业统计年鉴》《中国第三产业统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国县域统计年鉴》、国家知识产权局及武汉大学黄昕团队制作的CLCD数据集。部分缺失值采用线性插值法补充。

表 1 长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长综合评价指标体系
Table 1 Comprehensive evaluation indicator system for carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth in urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River

目标层	指标层	公式	单位	指标属性
降碳	CO ₂ 排放强度	CO ₂ 排放量/GDP	t/(10 ⁴ 元)	-
	土地利用的碳平衡率	土地利用碳吸收/碳排放	%	+
	碳生态承载系数	邓元杰等 ^[16]	%	+
	碳排放增长率		%	-
	单位 GDP 用电量	用电量/GDP	t/(10 ⁴ 元)	-
	单位 GDP 用水量	用水量/GDP	t/(10 ⁴ 元)	-
	万人二氧化碳排放量	CO ₂ 排放量/人数	t/(10 ⁴ 人)	-
	单位 GDP 能耗	能源消耗量/GDP	t/(10 ⁴ 元)	-
减污	工业废水排放强度	工业废水排放量/工业总产值	t/元	-
	SO ₂ 排放强度	SO ₂ 排放量/工业总产值	t/(10 ⁶ 元)	-
	工业烟尘排放强度	工业烟尘排放量/工业总产值	t/(10 ⁶ 元)	-
	PM _{2.5} 浓度年平均		μg/m ³	-
	单位面积化肥使用量	化肥使用量/耕地面积	t/hm ²	-
	畜禽粪污综合利用率		%	+
	环境污染治理占比	环境污染治理支出/一般公共预算	%	+
扩绿	人均公园绿地面积	绿地面积/总人口	m ² /人	+
	建成区绿化覆盖率	建成区植被绿化面积/建成区面积	%	+
	森林覆盖率		%	+
	归一化植被指数		无量纲	+
	绿色金融指数	Yang Xuan 等 ^[8]	无量纲	+
	绿色实用专利授权数量		项	+
	绿色发明专利授权数量		项	+
增长	人均 GDP	GDP/总人口	元/人	+
	GDP 增长率		%	+
	全要素生产率	崔新蕾等 ^[7]	%	+
	城镇化率	城市人口/总人口	%	+
	城乡收入比	城镇居民人均可支配收入/农村居民人均可支配收入	%	-
	居民消费水平	社会零售总额/总人口	元/人	+
	每万人医院床位数	医疗机构床位数/总人口	张/(10 ⁴ 人)	+
	教育支出占比	教育支出/财政支出	%	+

注：“+”代表正向指标，“-”代表负向指标。

表 2 耦合协调度等级评价标准

Table 2 Evaluation criteria for coupling coordination level

耦合协调度 (D)等级	区间	耦合协调度 (D)等级	区间
极度失调	0.00≤D<0.10	勉强协调	0.50≤D<0.60
严重失调	0.10≤D<0.20	初级协调	0.60≤D<0.70
中度失调	0.20≤D<0.30	中级协调	0.70≤D<0.80
轻度失调	0.30≤D<0.40	良性协调	0.80≤D<0.90
濒临失调	0.40≤D<0.50	优质协调	0.90≤D<1.00

3 结果与分析

3.1 长江中游城市群降碳、减污、扩绿、增长指数变化特征

3.1.1 降碳指数

2003—2022 年,研究区降碳指数呈较大幅度波动下降趋势(图 2a)。湖北省表现为先升后降,2016 年达到峰值(0.62),并长期领先,可能因为三峡工程的实施等,极大程度地替代了化石能源,结构性优势突出;湖南省降碳指数最低,表明其碳排放量较大。

3.1.2 减污指数

2003—2022年减污指数总体呈上升趋势(图2b),表现为“前期缓慢,后期加速”的特征,3个省份发展水平相近。主要原因是随着《长江中游城市群发展规划》及环保政策密集出台,各地加强环境治理,加大对工业排放及化肥农药等污染源监管,推进畜禽粪污资源利用技术的研发与推广应用,该区域PM_{2.5}和SO₂排放量显著降低。

3.1.3 扩绿指数

2003—2022年扩绿指数表现为稳步上升的变化趋势(图2c),呈现“全域推进,区域分化”格局,尤其是

省会城市,人均绿地面积和绿化覆盖率快速增长,扩绿指数较2003年翻倍;但赣南部分城市因地形限制,扩绿增速缓慢,需针对性加强生态补偿,同时因地制宜,加大城市绿地、城市公园的建设,提升绿化率。

3.1.4 增长指数

2003—2022年,区域增长指数呈波动上升趋势,江西省增速最为显著(图2d)。期间受2008年经济危机和2020年疫情影响,经济出现阶段性回落。同时,2008年经济危机倒逼产业转型,推动增长指数后续迅速恢复并高速增长。尽管增长指数总体呈上升态势,但仍需提升其抗风险能力。

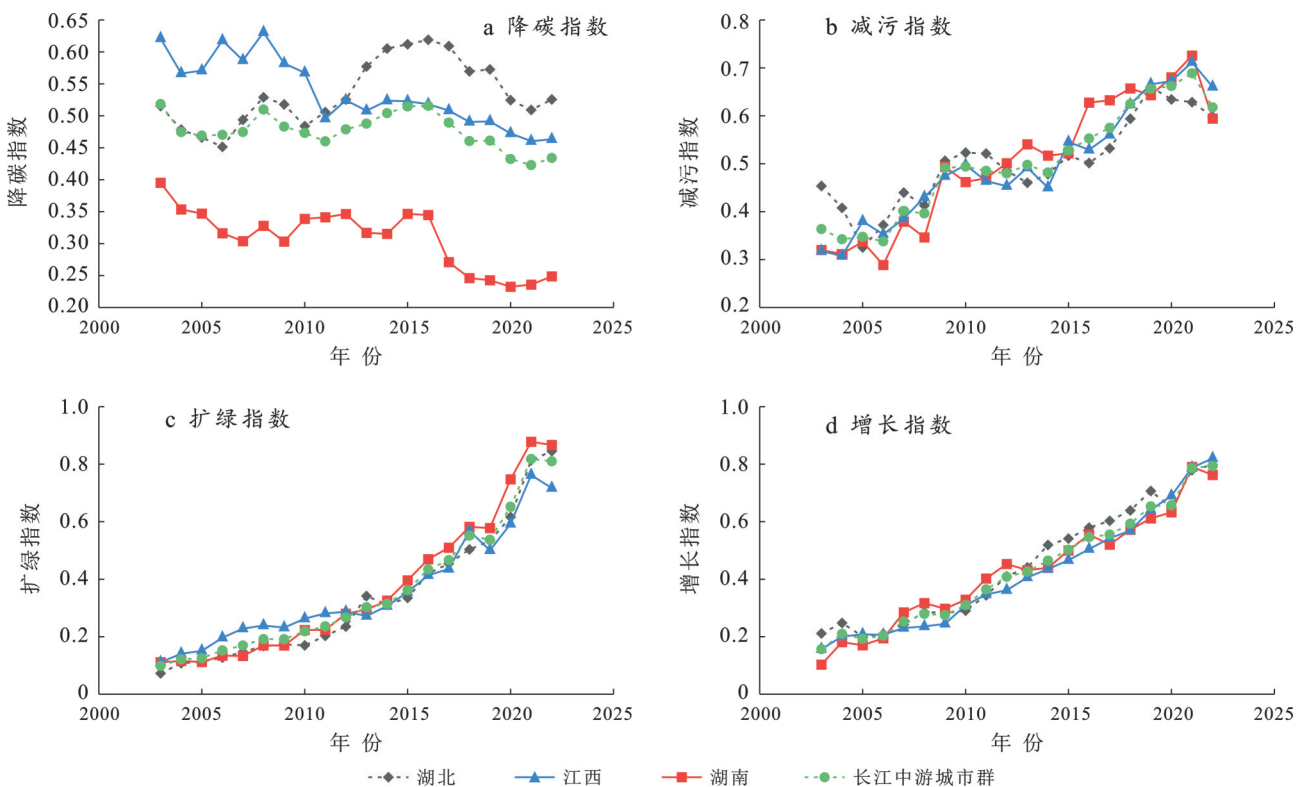


图2 长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长系统指数变化趋势

Fig.2 Trend of carbon reduction-pollution reduction-greening expansion-growth system index at urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River

3.2 长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长耦合协调度时空演变特征

2003—2022年,长江中游城市群耦合协调发展可分为3个阶段(图3)。缓慢增长阶段(2003—2010年),多数城市耦合协调度为0.5左右,部分城市短暂下滑,反映出经济增长与环境保护的阶段性矛盾;稳步优化阶段(2011—2020年),耦合协调度普遍上升,2014年后均突破0.5;高位趋稳阶段(2020年后),15个城市突破0.8,协调发展模式逐渐成熟。

在空间上,长江中游城市群耦合协调发展省际、

省内差异明显,湖北省长期领先,湖南省则明显滞后;湖北省以武汉、宜昌、襄阳为核心,凭借高新技术产业与生态廊道建设,实现高协调发展,呈现“多极支撑”格局;江西省借助鄱阳湖生态经济区政策,南昌、九江、鹰潭发展较好,呈现“北高南低”格局;湖南省表现为“北低南高”。

3.3 长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长耦合协调度驱动机制

基于现有研究,并结合区域特征,选取产业结构高级化指数、政府干预程度、科技投入程度、数字经

济化指数、科技发展水平作为驱动因子进行分析^[7,10-11]。研究表明,数字经济化指数、产业结

构高级化指数、政府干预程度、科技发展水平对区域耦合协调发展影响显著(表 3)。

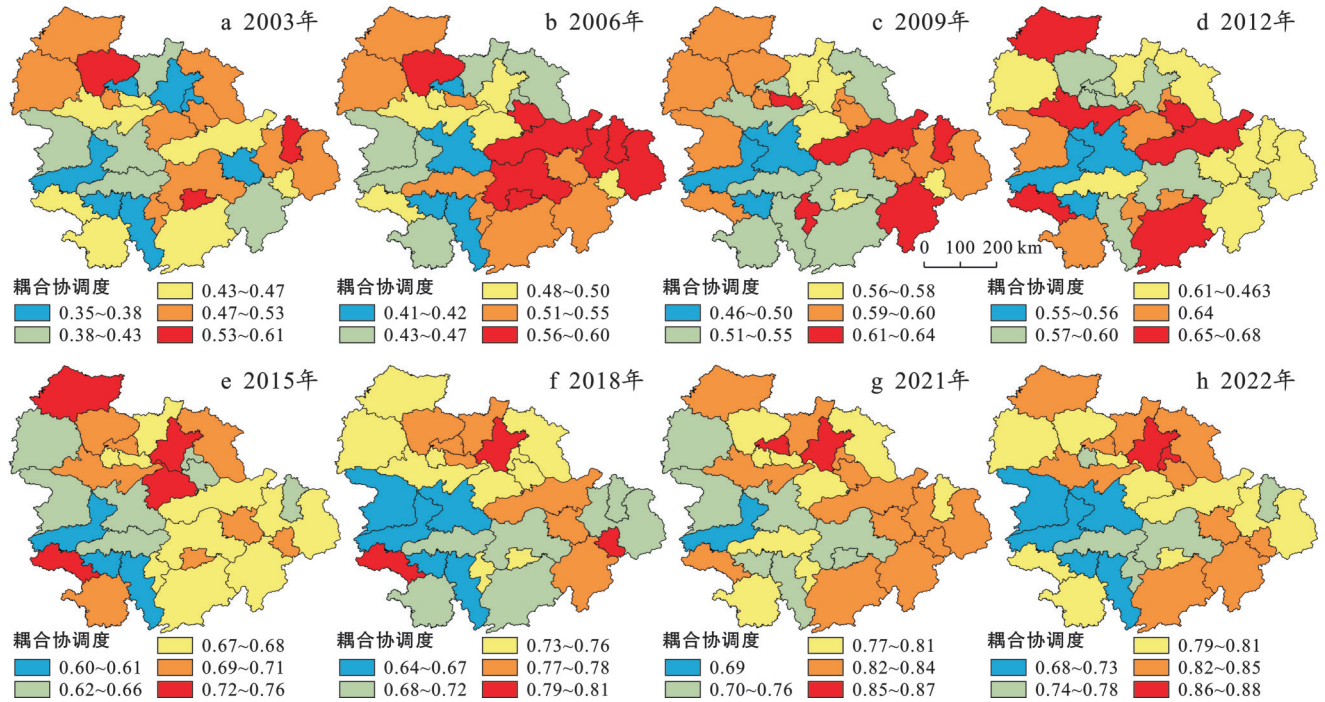


图 3 2003—2022 年长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长耦合协调度

Fig.3 Assessment results of coordinated development of carbon reduction-pollution reduction-greening expansion-economic growth coupling at urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River during 2003—2022

表 3 路径相关系数强度

Table 3 Strength of path correlation coefficient

项目	数字经济化指数	产业结构高级化指数	科技投入程度	政府干预程度	科技发展水平	耦合协调度
数字经济化指数	1	0.39**	0.04	0.04	0.26**	0.44**
产业结构高级化指数	0.39**	1	0.03	0.12**	0.41**	0.20**
科技投入程度	0.04	0.03	1	-0.10*	0.13**	0
政府干预程度	0.04	0.12**	-0.10*	1	-0.06	0.51**
科技发展水平	0.26**	0.41**	0.13**	-0.06	1	0.22**
耦合协调度	0.44**	0.20**	0	0.51**	0.22**	1

注:产业结构高级化指数为第三产业增加值与第二产业增加值的比值,政府干预程度为一般财政支出与 GDP 比值,科技投入程度为政府科技投入额与一般财政支出的比值,科技发展水平采用发明专利授权数表示。**表示在 0.01 水平相关性显著,*表示在 0.05 水平相关性显著。

由图 4 可知,数字经济化指数影响先升后降,空间差异显著,其中衡阳受益最大,始终为正反馈,湖北省及赣西多为正反馈,湖南省多为负反馈;产业结构高级化指数影响持续增强,但推动作用空间不均,对江西省的推动作用较为明显,尤其九江、宜春等地由负转正,对湖南省的作用较弱,尤其西南部分城市产业结构亟需调整;政府干预程度影响逐渐转负,湖北、江西受政府干预程度限制明显;科技发展水平影响先升后降,波动较小,表明专利数量虽然增大,但未能有效转化为协同效能。

3.4 长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长耦合协调度发展趋势预测

结合 2030 年实现“碳达峰”的目标,预测了 2023—2030 年的区域协调发展状况。由表 4 可知,至 2030 年,3 个省会城市耦合协调度都将突破 0.85,表明其系统协同性较强。省际差距将逐渐缩小,但中小城市分化明显。如鄂州、常德、萍乡等增速缓慢,存在省内区域失衡风险。

2023 年耦合协调度的实际值与预测值对比分析结果表明,二者的发展趋势高度一致,平均误差仅为

0.023(详见表 5)。由表 5 可以看出,省级层面,误差均不超过 0.01;市级层面分化明显,武汉、南昌等多数

城市预测误差小于 0.02,长沙、衡阳等地的预测值偏高。

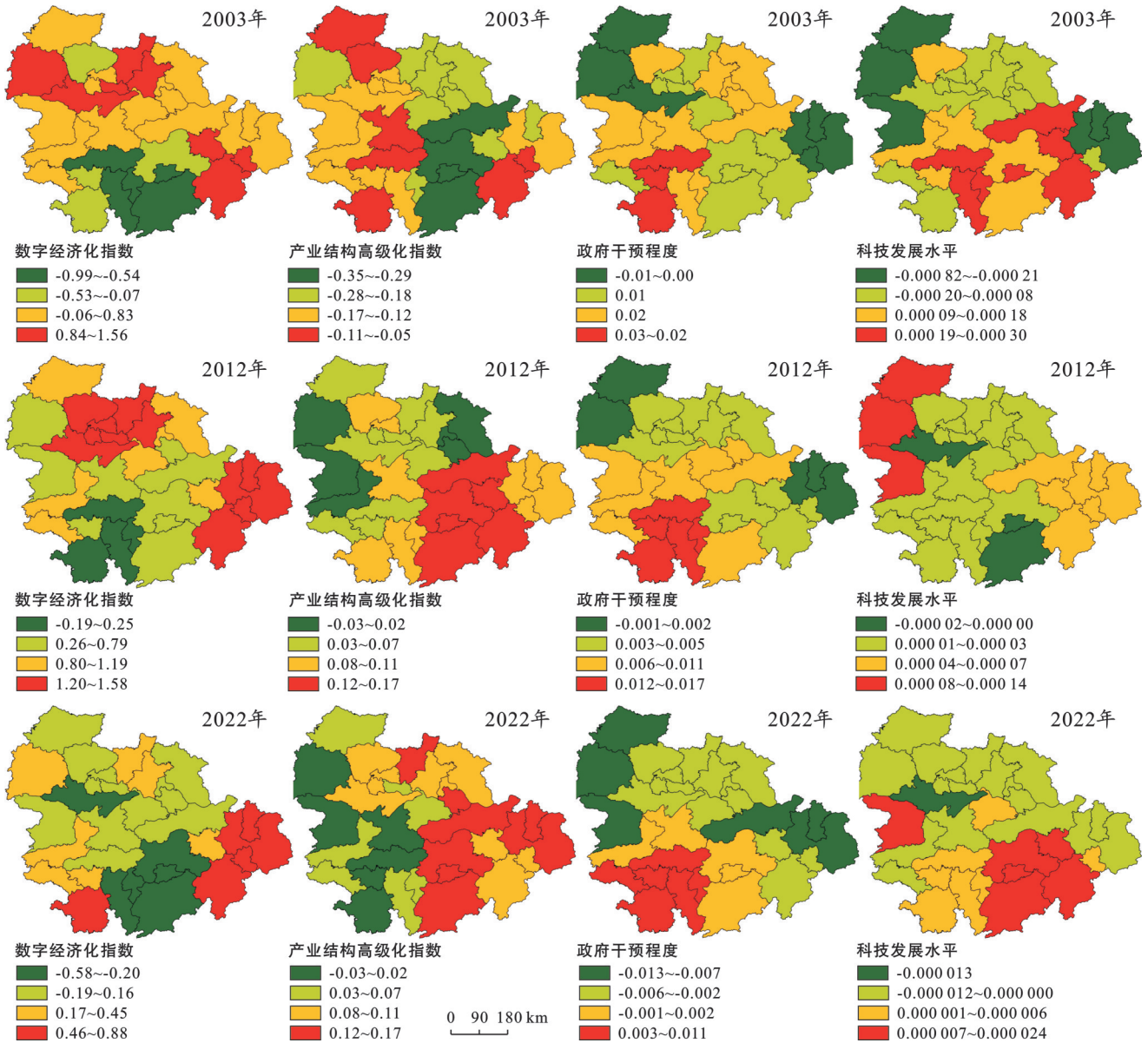


图 4 长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长耦合协调度驱动机制

Fig.4 Driving mechanism of coupling coordination degree of carbon reduction-pollutant reduction-green expansion-economic growth at urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River

4 讨论

长江中游城市群区域耦合协调度整体呈上升趋势,这与胡剑波等^[12]对长江中游经济区的的结果一致,可能是受长江上游水土保持重点防治工程、《长江中游城市群发展规划》等影响,区域绿色转型总体向好。本研究进一步揭示了区域显著的省际、省内的空间差异,与李健等^[9]、陈秀端等^[23]在其他区域的研究相呼应,反映了此类空间失衡有一定普遍性。可能是核心城市凭借经济优势推动绿色转型,

而中小城市则经济受限转型困难,这种经济基础对系统协调的影响也在 Han Shan^[18]对城市韧性体系的研究中被验证。因此,协调度提升并非子系统同步均衡发展的结果,而是呈现出协同和权衡。宏观上,“减污”与“扩绿”在 2010 年后同步上升,表明环境治理与生态建设形成良性循环;“降碳”对系统协调发展具有制约作用,其波动下降与其他系统上升趋势形成对比,揭示了传统增长路径与碳排放的内在矛盾。尽管“降碳”逐渐呈协同趋势,但仍是系统协调的关键短板,“扩绿”则通过提高植被覆盖率协助“降

碳”,绿色金融等也间接支撑高质量“增长”,从而促进整个系统同步发展,这与 Gong Jicheng^[24]提出的协同治理理念高度契合。

表 4 2023—2030 年长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长耦合协调度预测

Table 4 Projected coordination of carbon reduction-pollution reduction-greening expansion-economic growth coupling at urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River (2023—2030)

年份	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
武汉	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	0.94	0.95	0.96
黄石	0.84	0.85	0.85	0.86	0.87	0.87	0.88	0.88
鄂州	0.87	0.88	0.89	0.89	0.90	0.91	0.91	0.92
黄冈	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.88	0.89
孝感	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.89	0.90	0.90
咸宁	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.86
仙桃	0.81	0.82	0.83	0.84	0.84	0.85	0.86	0.86
潜江	0.80	0.81	0.88	0.82	0.83	0.84	0.84	0.85
天门	0.86	0.87	0.82	0.88	0.89	0.90	0.90	0.91
襄阳	0.86	0.86	0.88	0.88	0.89	0.89	0.90	0.90
宜昌	0.85	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88
荆州	0.84	0.86	0.87	0.88	0.89	0.89	0.90	0.90
荆门	0.84	0.83	0.84	0.85	0.86	0.86	0.87	0.89
湖北省	0.84	0.85	0.86	0.87	0.87	0.88	0.89	0.89
长沙	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85
株洲	0.74	0.74	0.75	0.76	0.76	0.77	0.78	0.78
湘潭	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79	0.79	0.80	0.81
岳阳	0.74	0.75	0.77	0.78	0.79	0.79	0.80	0.81
益阳	0.73	0.74	0.74	0.75	0.76	0.77	0.77	0.78
常德	0.70	0.71	0.73	0.74	0.75	0.76	0.77	0.78
衡阳	0.81	0.82	0.83	0.83	0.84	0.85	0.85	0.86
娄底	0.80	0.82	0.83	0.84	0.85	0.85	0.86	0.87
湖南省	0.76	0.77	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.82
南昌	0.85	0.85	0.86	0.87	0.88	0.88	0.89	0.89
九江	0.82	0.83	0.83	0.84	0.84	0.85	0.86	0.86
景德镇	0.79	0.80	0.81	0.81	0.82	0.83	0.83	0.84
鹰潭	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.88	0.89	0.89
新余	0.80	0.81	0.82	0.83	0.83	0.84	0.84	0.85
宜春	0.79	0.79	0.80	0.81	0.82	0.82	0.83	0.84
萍乡	0.77	0.78	0.79	0.79	0.80	0.81	0.81	0.82
上饶	0.82	0.83	0.84	0.85	0.85	0.86	0.87	0.87
抚州	0.85	0.86	0.87	0.87	0.88	0.89	0.89	0.90
吉安	0.84	0.85	0.86	0.87	0.87	0.88	0.88	0.89
江西省	0.82	0.83	0.83	0.84	0.85	0.85	0.86	0.86

已有研究表明,水土保持在区域协调中至关重要^[25]。水土保持措施在产生保水保土效益时,也通过提升植被覆盖度增强碳吸收能力,减少因土壤侵

蚀损失的碳;化肥的使用也影响农田固碳速率,可见水保措施在强化“扩绿”和“减污”时,也会推动“降碳”的实现^[26]。生态清洁小流域建设则在控制水土流失与面源污染的同时,改善了区域生产生活条件,推动了乡村振兴和共同富裕,有利于“降碳-减污-扩绿-增长”协调发展。空间实践上,湖北省尤其是三峡库区在生态清洁小流域建设方面成效显著,也从微观机制角度解释了湖北长期领先,形成“多级支撑”的原因。

表 5 2023 年长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长耦合协调度实际值与预测值对比

Table 5 Comparison of actual value and predicted value of coupling coordination degree of carbon reduction-pollutant reduction-green expansion-economic growth at urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River in 2023

城市	实际值	预测值	城市	实际值	预测值	城市	实际值	预测值
武汉	0.90	0.89	长沙	0.66	0.78	南昌	0.85	0.85
黄石	0.82	0.84	株洲	0.75	0.74	九江	0.84	0.82
鄂州	0.83	0.87	湘潭	0.79	0.74	景德镇	0.76	0.79
黄冈	0.83	0.83	岳阳	0.81	0.74	鹰潭	0.88	0.84
孝感	0.85	0.85	益阳	0.75	0.73	新余	0.77	0.80
咸宁	0.78	0.80	常德	0.68	0.70	宜春	0.80	0.79
仙桃	0.79	0.81	衡阳	0.74	0.81	萍乡	0.77	0.77
潜江	0.82	0.8	娄底	0.78	0.80	上饶	0.84	0.82
天门	0.84	0.86	湖南	0.75	0.76	抚州	0.83	0.85
襄阳	0.86	0.86				吉安	0.83	0.84
宜昌	0.79	0.85				江西	0.82	0.82
荆州	0.85	0.84						
荆门	0.84	0.84						
湖北	0.83	0.84						

数字经济与产业结构高级化是推动系统协调的关键因素。数字经济的促进作用已得到广泛认同^[8,27],并在欧洲的可持续增长中发挥效益^[28],其在湖北和赣西作用显著,在湖南多数地区可能因数字技术与区域产业基础、制度环境适配性不足等,未能有效转化为协同效益。这说明数字技术的推动作用并非适合所有区域,可能存在区域适配性限制与边际递减效应,需通过持续的技术升级维持活力。产业结构高级化的正反馈与已有^[29]研究一致,其推动效应在江西不断增强,对湖南省影响较弱,尤其西南部可能受传统产业路径依赖的束缚,也说明产业转型仍处于红利释放期,需持续推进产业升级,聚焦绿色技术的产业化应用与高附加值低碳产业的培育,进一步延长红利周期。政府干预由正转负,与崔新

蕾等^[11]及 Gong Jicheng 等^[24]研究结果相似,表现出传统行政治理模式与市场化进程的矛盾,因此市场化程度较高的地区,应谨慎进行直接干预,适宜采用激励型、市场化措施,如碳排放权交易、生态补偿等;而湖南可能因处于快速发展阶段,政府的直接投资可弥补市场失灵等不足。同时,科技发展水平的影响先升后降,未能持续发挥推动作用,这与韦倩等^[30]的创新质量与转化效率非单纯的数量积累相似,可能是单纯追求专利数量而忽视成果转化与实际应用导致,说明应建立健全绿色技术评估、交易与产业化服务体系,推动创新成果真正落地。基于上述空间分异,各地应因地制宜施策,湖北省应继续加强数字经济与产业高级化的双轮驱动作用;江西省可借助科技后发优势与生态禀赋,推动绿色创新与生态产品价值实现;湖南省则继续发挥政府干预的优势,优化干预方式,借助长株潭一体化推动绿色转型。

本研究引入 ARIMA 模型预测未来变化趋势,结果表明 2023 年实际值与预测值高度吻合,证明其对区域发展路径判断的可靠性。基于“总体平稳,局部波动”的预测格局,在“十五五”时期应致力于高质量发展和区域协调。一是强化如武汉等核心城市“增长极”功能,增强其带动作用;二是着力补齐“降碳”短板,特别关注预测偏差较大城市的转型阻力,应采取有效措施,助推“碳达峰”的实现。具体而言,推动区域绿色转型,发展新质生产力,以新型能源体系建设为重点,推进产业结构低碳化,系统降低碳排放与环境污染。同时,基于该区域水资源丰富、农业比重高的特点,应加强水资源集约利用,严格执行水资源消耗总量和强度双控,保护水域、林地等核心生态用地,持续推进生态清洁小流域建设与城乡建设的绿色低碳转型。此外,应重视社会维度的协调,通过缩小城乡收入差距,提升医疗、教育等基本公共服务水平,增强社会发展的包容性。在此过程中,主动顺应数字化、低碳绿化等趋势,系统构建“降碳-减污-扩绿-增长”四位一体的高质量发展新路径。

5 结论与展望

5.1 结论

(1) 长江中游城市群降碳-减污-扩绿-增长耦合协调发展稳步上升(0.44~0.75),但各子系统间与区域间的发展呈现不均衡性。其中,降碳子系统波动最为显著,制约了整体协调性,当前区域发展仍以增长扩绿为主导,降碳系统仍需优化。空间上呈现明显的区域分异,湖北省持续领先,湖南省滞后。

(2) 驱动因素具有明显的时空异质性。数字经

济发展与产业结构高级化是推动系统协调的核心动力;政府干预随市场化深入逐渐呈抑制作用,行政治理模式亟需转型;科技发展水平未能有效转化为系统协同效益。

(3) 2030 年武汉、长沙、南昌等核心城市耦合协调度将突破 0.85,省际差距逐步缩小,但省内分化风险依然存在,尤其小城市面临增速放缓、路径依赖等发展瓶颈。

5.2 展望

各省应基于自身优势与约束条件制定差异化路径:湖北、江西应持续强化数字经济发展水平与产业升级;湖南需优化政府职能,强化服务职能与生态补偿;三省需共同推动专利质量提升与成果转化。

实现高质量协同发展,需在持续推动经济绿色转型的同时,注重区域间协同,发挥核心城市的带动作用,创新生态构建与治理模式优化,系统提升抗风险能力与可持续性。

后续研究需要深化以下几个方面:①自然环境因素的种类和分析深度有待拓展,这些因素与经济社会指标间的相互作用机制有待进一步明晰;②在探讨政策对降碳-减污-扩绿-增长的影响时,应充分考虑政策干预的短期与长期效应的差异性;③将研究尺度拓展至其他城市群或流域,进行跨区比较,总结可复制、可推广的降碳-减污-扩绿-增长模式和策略。

参考文献(References)

- [1] 穆雅晴,吴宜进,田培,等.长江中游经济区“水-能源-粮食”系统与城市绿色转型适配性研究[J].自然资源学报,2024,39(9):2140-2154.
Mu Yaqing, Wu Yijin, Tian Pei, et al. The adaptability of “water-energy-food” system and urban green transformation in the middle reaches of the Yangtze River Economic Zone [J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(9):2140-2154.
- [2] 姚仕明,姚立强.长江流域水安全保障分析及对策建议[J].人民长江,2025,56(4):1-7.
Yao Shiming, Yao Liqiang. Analysis and countermeasures of water security in Changjiang River basin [J]. Yangtze River, 2025, 56(4):1-7.
- [3] 冯帅.协同推进降碳、减污、扩绿、增长的法律机制研究[J].中国地质大学学报(社会科学版),2024,24(4):61-75.
Feng Shuai. Legal mechanism on the coordinated promotion of carbon reduction, pollution reduction, green expansion and economic growth [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2024, 24(4):61-75.

- [4] 卢泓钢,王益如,吴伟光. 中国农业减污降碳协同增效的水平测度及其时空收敛性研究:基于“减污-降碳-扩绿-增长”的四维分析[J]. 生态经济, 2024, 40(12):186-195. Lu Honggang, Wang Yiru, Wu Weiguang. Environment pollution and carbon emission of agriculture in China: Based on the four-dimensional analysis of “pollution reduction, carbon reduction, green expansion and growth” [J]. Ecological Economy, 2024, 40 (12) : 186-195.
- [5] 汪振双,王宇飞,汪涛,等. 建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络特征及驱动机制[J]. 中国环境科学, 2025, 45(7):4064-4079. Wang Zhenshuang, Wang Yufei, Wang Tao, et al. Spatial correlation network characteristics and drivers of carbon reduction-construction waste control-green expansion-economic growth synergy effect in construction industry [J]. China Environmental Science, 2025, 45 (7) : 4064-4079.
- [6] Li Ying, Hao Shizhuan, Liu Yaping, et al. Research on the spatial correlation network and its driving factors for synergistic development of pollution reduction, carbon reduction, greening, and growth in China's tourism industry [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 377:124579.
- [7] 崔新蕾,王艳融,马艳茹. 黄河流域降碳-减污-扩绿-增长耦合协调的动态演进及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4):275-287. Cui Xinlei, Wang Yanrong, Ma Yanru. Dynamic evolution of carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth coupling coordination and its influencing factors in the Yellow River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4):275-287.
- [8] Yang Xuan, Ran Guanggui. Factors influencing the coupled and coordinated development of cities in the Yangtze River economic belt: A focus on carbon reduction, pollution control, greening, and growth [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370:122499.
- [9] 李健,邱广伟. 贵州降碳减污扩绿增长协同空间演进及路径探析[J]. 环境科学, 2025, 46(10):6465-6474. Li Jian, Qiu Guangwei. Spatial evolution of carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth synergy in Guizhou with path analysis [J]. Environmental Science, 2025, 46(10):6465-6474.
- [10] 尹碧波,郑佳琦,孙泽莹,等. “双碳”目标下中国降碳减污扩绿增长协同:效应测度、空间联系与区域差异[J]. 环境科学研究, 2025, 38(4):713-723. Yin Bibo, Zheng Jiaqi, Sun Zexuan, et al. Synergistic growth of pollution reduction, carbon reduction, green expansion, and economic growth in China under the ‘dual carbon’ goal: Effect measurement, spatial connection, and regional differences [J]. Research of Environmental Sciences, 2025, 38(4):713-723.
- [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] 胡剑波,周宗康,李潇潇. 中国降碳减污扩绿增长的时空分异及收敛性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(1):166-180. Hu Jianbo, Zhou Zongkang, Li Xiaoxiao. Spatial-temporal differentiation and convergence of cutting carbon dioxide emissions, reducing pollution, expanding green development and pursuing economic growth in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025, 34(1):166-180.
- [13] 李健,郭一达,王晓祺. 绿色金融改革、金融资源配置与企业降碳减污扩绿增长[J]. 农村金融研究, 2024(10):3-18. Li Jian, Guo Yida, Wang Xiaoqi. Green finance reform, financial resource allocation, and enterprise carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth [J]. Rural Finance Research, 2024(10):3-18.
- [14] 杨喜,汪思辰. 长江经济带城市土地“降碳减污扩绿增长”效率时空特征及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(4):721-733. Yang Xi, Wang Sichen. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of efficiency of “cutting carbon, reducing pollution, expanding green” for urban land in the Yangtze River economic belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025, 34 (4) : 721-733.
- [15] 安博文,许培源,黄寰,等. 中国协同推进降碳减污扩绿增长的绩效评估及空间差距演变:基于人与自然和谐共生的系统观[J]. 经济问题探索, 2024(10):115-135. An Bowen, Xu Peiyuan, Huang Huan, et al. Performance evaluation and spatial gap evolution of China's carbon reduction, pollution reduction and green growth: Based on the systemic conception of the harmony between humanity and nature [J]. Inquiry into Economic Issues, 2024(10):115-135.
- [16] 邓元杰,陈航,海宜峰,等. 成渝双城经济圈土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5):337-346. Deng Yuanjie, Chen Hang, Hai Yifeng, et al. Spatial

- patterns of carbon emission from land use and carbon balance partitioning in Chengdu-Chongqing economic zone [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024,44(5):337-346.
- [17] Cheng Xinyi, Fang Lan, Li Jun, et al. An empirical analysis of the impact of the coupling coordination degree of the water-energy-food nexus on food security in China [J]. *Current Research in Environmental Sustainability*, 2024,8:100261.
- [18] Han Shan, Wang Bo, Ao Yibin, et al. The coupling and coordination degree of urban resilience system: A case study of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023,101:107145.
- [19] 郝岩,张裕凤.近15年内蒙古耕地集约化与规模化耦合协调分析[J/OL].[2025-12-04].水土保持通报,1-12. <https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20231212.001>.
Hao Yan, Zhang Yufeng. Analysis of coupling coordination between intensification and scale of cultivated land in Inner Mongolia during recent 15 years [J/OL].[2025-12-04]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1-12. <https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20231212.001>.
- [20] 王爱,张迅,刘少婷,等.合肥市主城区热环境驱动因素的空间非平稳性分析[J].测绘科学,2024,49(10):202-216.
Wang Ai, Zhang Xun, Liu Shaoting, et al. Spatial non-stationarity analysis of thermal environment driving factors in main urban area of Hefei City [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2024,49(10):202-216.
- [21] 郭付友,李睿,尹鹏,等.基于GTWR模型的黄河流域城乡融合发展时空分异与驱动机制[J].地理科学,2024,44(12):2166-2175.
Guo Fuyou, Li Rui, Yin Peng, et al. Spatio-temporal differentiation and driving mechanism of urban-rural integrated development in the Yellow River basin based on GTWR model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024,44(12):2166-2175.
- [22] He Debiao, Kumar N, Zeadally S, et al. Efficient and privacy-preserving data aggregation scheme for smart grid against internal adversaries [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017,8(5):2411-2419.
- [23] 陈秀端,卢新卫.陕西省降碳、减污、扩绿和增长协同的时空演化特征[J/OL].[2025-09-22].环境科学,1-21. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202506104>.
Chen Xiuduan, Lu Xinwei. Spatiotemporal evolution characteristics of collaborative development of carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth in Shaanxi Province [J/OL]. [2025-09-22]. *Environmental Science*, 1-21. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202506104>.
- [24] Gong Jicheng, Yin Zhicong, Lei Yu, et al. The 2023 report of the synergetic roadmap on carbon neutrality and clean air for China: Carbon reduction, pollution mitigation, greening, and growth [J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2024,23:100517.
- [25] 李怡凤,王继军,马理辉,等.“进则全胜”的生态经济学基础及其与水土保持的关系[J].水土保持研究,2023,30(3):470-476.
Li Yifeng, Wang Jijun, Ma Lihui, et al. Eco-economic basis of progress leading to victory and its relationship with soil and water conservation [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(3):470-476.
- [26] 李智广,王海燕,王隽雄.碳达峰与碳中和目标下水土保持碳汇的机理、途径及特征[J].水土保持通报,2022,42(3):312-317.
Li Zhiguang, Wang Haiyan, Wang Junxiong. Mechanisms, pathways and characteristics of carbon sinks related to soil and water conservation from perspective of carbon peak and carbon neutralization [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(3):312-317.
- [27] 颜建军,张熙文,刘亦文,等.中国城市低碳治理的减污降碳协同效应:基于三批次低碳城市试点政策实施的准自然实验[J].环境科学学报,2025,45(6):480-494.
Yan Jianjun, Zhang Xiwen, Liu Yiwen, et al. Synergistic effect of pollution reduction and carbon mitigation in Chinese low-carbon cities: A quasi-natural experiment from the implementation of three batches of the low-carbon city pilot policies [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2025,45(6):480-494.
- [28] Arshad Z, Madaleno M, Lillebø A I, et al. Digital transformation in environmental management: Strengthening resource efficiency and climate resilience in Europe [J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2025,28:100945.
- [29] 张庆红,姜祎.降碳-减污-扩绿-增长耦合协调发展的时空演变及影响因素[J].统计与决策,2025,41(11):90-94.
Zhang Qinghong, Jiang Yi. Temporal and spatial evolution and influencing factors of coordinated development of carbon reduction-pollution reduction-greening-growth coupling [J]. *Statistics & Decision*, 2025,41(11):90-94.
- [30] 韦倩,韦祎.技术创新质量、经济增长与环境效率[J].江海学刊,2023(2):84-92.
Wei Qian, Wei Yi. Technological innovation quality, economic growth and environmental efficiency [J]. *Jianghai Academic Journal*, 2023(2):84-92.