

黄河流域资源型城市韧性与碳排放的 耦合协调、时空演进与空间集聚

杨怡康, 蒋毓琪, 田文博, 王志华

(山西大同大学 商学院, 山西 大同 037009)

摘要: [目的] 分析黄河流域资源型城市韧性与碳排放的耦合协调水平与时空分异, 为推进全流域高质量发展提供科学依据。[方法] 基于构建城市韧性评价指标体系, 运用耦合协调模型和空间自相关模型测度城市韧性与碳排放的耦合协调水平、时空演进, 分析其空间集聚特征。[结果] ①黄河流域资源型城市韧性与碳排放分别呈递增与递减趋势, 城市韧性变化幅度快于碳排放, 且不同地区存在差异。②黄河流域资源型城市韧性与碳排放耦合协调水平呈“小幅提升—快速上涨”的特征, 中游耦合协调水平增幅高于上游与下游。③不同地区耦合协调等级明显提升, 但其差异较大。④部分资源型城市韧性与碳排放耦合协调逐渐向“高-低”区域集聚, 具有空间聚集效应, 呈现“块状”趋同特征。[结论] 黄河流域资源型城市需整合区域资源与要素优势, 制定个性化的提升路径, 实现“上游固碳增汇、中游降碳增效、下游低碳集约”的协同目标, 促进黄河流域资源型城市韧性提升与碳减排目标协同推进。

关键词: 城市韧性; 耦合协调; 时空演进; 空间集聚; 资源型城市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0259-10

中图分类号: X24, X32

文献参数: 杨怡康, 蒋毓琪, 田文博, 等. 黄河流域资源型城市韧性与碳排放的耦合协调、时空演进与空间集聚[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 259-268. Yang Yikang, Jiang Yuqi, Tian Wenbo, et al. Coupling coordination, spatio-temporal evolution and spatial agglomeration between urban resilience and carbon emission in resource-based cities of Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 259-268.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.032

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.032

Coupling coordination, spatio-temporal evolution and spatial agglomeration between urban resilience and carbon emission in resource-based cities of Yellow River basin

Yang Yikang, Jiang Yuqi, Tian Wenbo, Wang zhihua

(School of Business, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

Abstract: [Objective] The coupling coordination level and spatio-temporal differentiation between the resilience of resource-based cities and carbon emissions in the Yellow River basin were analyzed to provide a scientific basis for promoting high-quality development across the entire river basin. [Methods] Based on evaluation index system of urban resilience, the coupling coordination degree, spatio-temporal evolution, and spatial agglomeration between urban resilience and carbon emission were analyzed by the coupling coordination model and the spatial autocorrelation model. [Results] ①Urban resilience and carbon emissions of resource-based cities in the Yellow River basin showed increasing and decreasing trends, respectively. The change in urban resilience occurred faster than that in carbon emissions, and there were differences among different regions. ②The level of coupling coordination in resource-based cities was characterized by a ‘small increase followed by a rapid rise’, with the growth rate in the middle reaches being faster than that upstream and downstream. ③The level of coupling coordination improved significantly; however, there were substantial differences among the different regions. ④Some resource-based cities were

收稿日期: 2025-04-10

修回日期: 2025-08-18

采用日期: 2025-08-21

资助项目: 教育部人文社会科学研究规划青年资助项目“山西矿区生态占用赤字的负外部效应与补偿机制研究”(20YJC630052); 山西省哲学社会科学规划课题(2023YY251); 山西省高校哲学社会科学课题(2022W121); 山西省社科院规划课题(SXGZL202414); 大同市软科学课题(2023077); 山西大同大学云冈学专项课题(2023YGYB16)

第一作者: 杨怡康(1990—), 女(汉族), 山西省大同市人, 硕士, 讲师, 主要从事资源与环境经济研究。Email: yangyikang@sxtdtx.edu.cn.

通信作者: 蒋毓琪(1983—), 男(汉族), 山西省大同市人, 博士, 副教授, 主要从事资源与环境经济等方面的研究。Email: jiangyuqi@sxtdtx.edu.cn.

gradually distributed in ‘high-low’ areas and characterized by a ‘block-like’ distribution. [Conclusion] Resource cities in the Yellow River basin need to integrate regional resources, factor advantages, and formulate personalized improvement paths to achieve the collaborative goal of ‘carbon sequestration and sink enhancement upstream, carbon reduction and efficiency improvement in the middle reaches, and low-carbon intensification downstream’, which will contribute to promoting coordination between resilience improvement and carbon reduction in basin.

Keywords: urban resilience; coupling coordination; spatial-temporal evolution; spatial agglomeration; resource-based cities

黄河流域作为中国重要的经济带和“能源流域”,其资源型城市具有要素丰裕,工业分布较广,产业结构偏重的特点,高污染,高耗能与高排放的经济增长模式难以平衡碳排放需求与有限碳汇供给,制约其城市韧性^[1]。因此,科学探究黄河流域资源型城市韧性与碳排放的耦合关系及其动态变化,对建设“抵御复杂灾害,高质量多元发展,生态韧性强”的资源型城市,守住生态安全底线以及推进生态保护和经济可持续增长至关重要。

城市韧性作为城市安全的重要影响因素,已成为学者们聚焦的热点话题。1973年,韧性理念首次被引入生态系统^[2]。地方环境倡议国际理事会(ICLED)首次提出“城市韧性”^[3],城市韧性被界定为城市系统及其自然、社会和经济等各子系统在时间和空间维度上,面对外部因素干扰与冲击,维持、恢复而适应变化且调整的能力^[4]。城市韧性理念延伸至城市经济韧性、制度韧性与生态韧性等范畴^[5],其中,城市生态韧性作为学者们关注的焦点。评价城市生态韧性是衡量城市可持续发展的重要环节。城市韧性受自然、社会、经济等多重因素影响^[6],合理构建评价指标体系是科学、合理评估城市韧性水平的前提^[7]。由于研究区域存在差异,城市生态韧性需要设计分区管理模式并提出不同分区生态治理的任务^[8]。为了更好地提升城市生态韧性水平,确定空间集聚演变特征以及分异影响城市生态韧性的主要障碍因素尤为重要^[9],有助于不同地区制定符合自身特点的对策措施。城市生态韧性与社会、经济发展紧密相关,其研究内容由单一向耦合转变。有学者分析了城镇化、经济发展与生态韧性的耦合协调关系并归纳耦合协调等级的演变趋势^[10-11],强调其耦合协调水平形成以省会城市为中心向周边辐射的区域形态特点^[12],具有显著的同类集聚效应^[13]。

中国共产党第二十次全国代表大会报告明确强调优化城市协调发展格局,打造韧性城市。这需要自然、社会、经济等多重因素良性互动,增强城市应对外部冲击的承受、适应和恢复能力。部分学者指出,碳排放是影响城市生态安全的重要影响因素,相关研究侧重效率测度、影响因子分析与时空分异等。在测度方面,碳排放效率由单要素表征转变为用经

济、能源等多要素指标测度^[14]。碳排放测算方法包括随机前沿法(SFA)的参数估计法和数据包络分析(DEA)、SBM-ML模型、SBM-Undesirable、超效率SBM模型等非参数估计法^[15]。在影响因素分析方面,碳排放受社会经济、生态环境、政策制度以及技术创新等因素影响^[16],其中,技术创新促进降碳减排与绿色转型^[17]。在碳排放时空演变方面,其分析方法主要包括空间自相关、核密度估计法与马尔可夫链等。研究表明,中国碳排放效率稳步提升,存在区域异质性且空间集聚与空间外溢效应显著^[18]。

综上所述,关于城市韧性与碳排放的内在理论日臻完善,仅从生态视角衡量城市韧性尚有偏颇,且未进一步探究城市韧性与碳排放的动态关联、时空演变趋势与空间集聚特点。资源型城市的能源结构高碳化,能源转换效率低,使得其碳排放具有“总量大且集中度高”的特点,高碳排放直接冲击基础设施、生态系统和社会经济,降低其生态系统的恢复力,削弱了城市应对外部冲击的能力。因此,分析资源型城市韧性与碳排放的耦合协调度,有助于诊断资源型城市可持续发展状态,促进其绿色低碳韧性转型并协同减碳,提升其生态系统的恢复力,增强城市韧性与碳排放的相互促进、协同优化。黄河流域资源型城市的能源储量居全国之首,其超额碳排放阻滞城市韧性,制约了城市的高质量发展,故探究黄河流域资源型城市韧性与碳排放的耦合关系具有鲜明的地域特征和研究价值。基于此,本文一方面在评价指标上,基于经济、社会、生态与工程韧性4个维度构建黄河流域资源型城市韧性的评价指标体系;另一方面,在研究内容与方法上,选用耦合协调模型分析黄河流域资源型城市生态韧性与碳排放的耦合协调关系与时空演进趋势,借助空间自相关模型探究其空间集聚特征,旨在为促进其资源型城市韧性提升与碳减排目标协同推进提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依据《全国资源城市可持续发展规划(2013—2020年)》《黄河流域综合规划(2012—

2030年)》,结合可获得数据,共提取37个资源型城市(剔除阿坝藏族羌族自治州和海西蒙古族藏族自治州)作为研究对象(图1)。

1.2 数据来源

本研究所用数据来源于2013—2022年《中国统计

年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国环境统计年鉴》等以及黄河流域各资源型城市的统计年鉴。本文中碳汇量估算源于各资源型城市的森林资源清查、农业情况统计与园林绿化统计等数据。鉴于研究区在某些年份的数据缺失,故本研究采用线性插值法将其补齐。



图1 黄河流域资源型城市地理分区

Fig.1 Geographical distribution of resource-based cities in Yellow River basin

1.3 研究方法

1.3.1 碳排放测算模型

碳排放主要包括能源碳排放、过程碳排放、土地利用碳排放与其他碳排放。本研究以资源型城市为对象,碳排放量主要来自原煤、原油与天然气的能源碳排放,故仅考虑能源碳排放,其测算模型为^[19]

$$C_E = \sum_{r=1}^N B_r \times G_r \quad (1)$$

式中: C_E 表示资源型城市碳排放量; B_r 表示第 r 种能源的折标准煤量,即第 r 种能源的消费量与折标系数的乘积; G_r 表示第 r 种能源的碳排放系数; N 表示能源种类数量。其中,折标系数来自《中国能源统计年鉴》,碳排放系数参考李子杰等^[20]的研究成果。

1.3.2 城市韧性评价指标体系构建

本研究基于社会经济对外部条件干扰的响应,将资源型城市韧性过程融入分析框架(图2)。扰动前,城市系统存在稳态下的潜在矛盾。资源型城市以高碳产业为主导,资源开采推动经济增长的同时,伴随着较高的能源消耗与碳排放强度,制约着城市社会、经济、生态与工程系统协调与发展,形成高碳排放与低城市韧性负向循环。扰动期间,城市系统在外冲击下失衡。超额碳排放使得资源型城市韧性与碳排放矛盾凸显,加速城市系统退化。扰动后,城市系统恢复与适应性重构。资源型城市各系统受到外部冲击后,在制度、技术、资金投入的作用下,通过结构调整,提升其长期适应能力。一方

面,为了落实“双碳”目标,倒逼企业调结构、促减排,走绿色低碳转型之路。政府、企业增加R&D投入,绿色技术的正外部作用,使得碳排放强度下降。另一方面,提高工业“三废”利用率,改善资源型城市韧性。此外,植树造林能够提升碳汇量,加之部分生态修复工程有助于城市韧性逐步恢复。

根据已有研究成果^[21],分别从经济、社会、生态与工程4个维度选择科学性、可行性和代表性的指标,构建黄河流域资源型城市韧性的评价指标体系(表1)。随着城市韧性内涵不断丰富,资源型城市韧性的衡量标准由单一的评价单元变为多维度评价指标体系。在工业化与城镇化进程中,资源型城市系统承载着经济增长所需要素集聚投入与资源能源占用、社会主体生产生活行为对资源利用强度与生态环境的影响、生态超额需求与有限供给之间不均衡等多方面压力。黄河流域资源型城市社会经济发展主要依赖丰富的矿产资源,易对资源(能源)形成锁定效应。以工业为主的产业结构且产能过剩明显的发展模式推动地方经济增长,同时伴随着资源耗费、“三废”超额排放,导致生态环境承载压力较大,短期内难以摆脱 SO_2 、 CO_2 等有害气体与固体废弃物空间外溢对大气、水源、土壤等自然条件产生负外部效应。此外,相关行业的从业人员转移易产生“堵塞效应”,能源过多消费加剧碳排放增加,加之要素配置失衡,扩大了城乡居民收入差距,故碳排放强度增加显著^[22]。资源型城市为了应对能源需求依赖、生态

占用赤字、环境供给有限等带来的外部压力,通过转变经济组织形态与发展模式、调整产业结构、完善政策制度、技术创新投入与生态环境建设等,抵抗、转变、适应外部冲击,更新、升级城市系统。在“双碳”目标下,政府制定环境规章制度,倒逼资源企业转型升级,淘汰落后产能,节能减排,在某种程度上降低资源依赖程度,增强降碳治污能力^[23]。依据“波特假说”与内生增长理论,环境规制激励技术创新^[24],其产生“知识溢出效应”有助于驱动经济绿色增长,同

时增加碳技术研发投入,能够提高人力资本职业素养与技术创新水平,培育新兴产业,加速清洁能源替代,优化资源配置,提高资源利用率^[25],减少碳排放量,推动城市经济绿色增长。资源型城市韧性提升过程中,生态环境质量不容忽视。森林具有吸收并储存二氧化碳的能力,植树造林增加绿化面积,有助于增强生态产品与碳汇有效供给能力,促使吸碳固碳能力稳步提升,推进生态供求平衡,实现人与自然和谐共生。

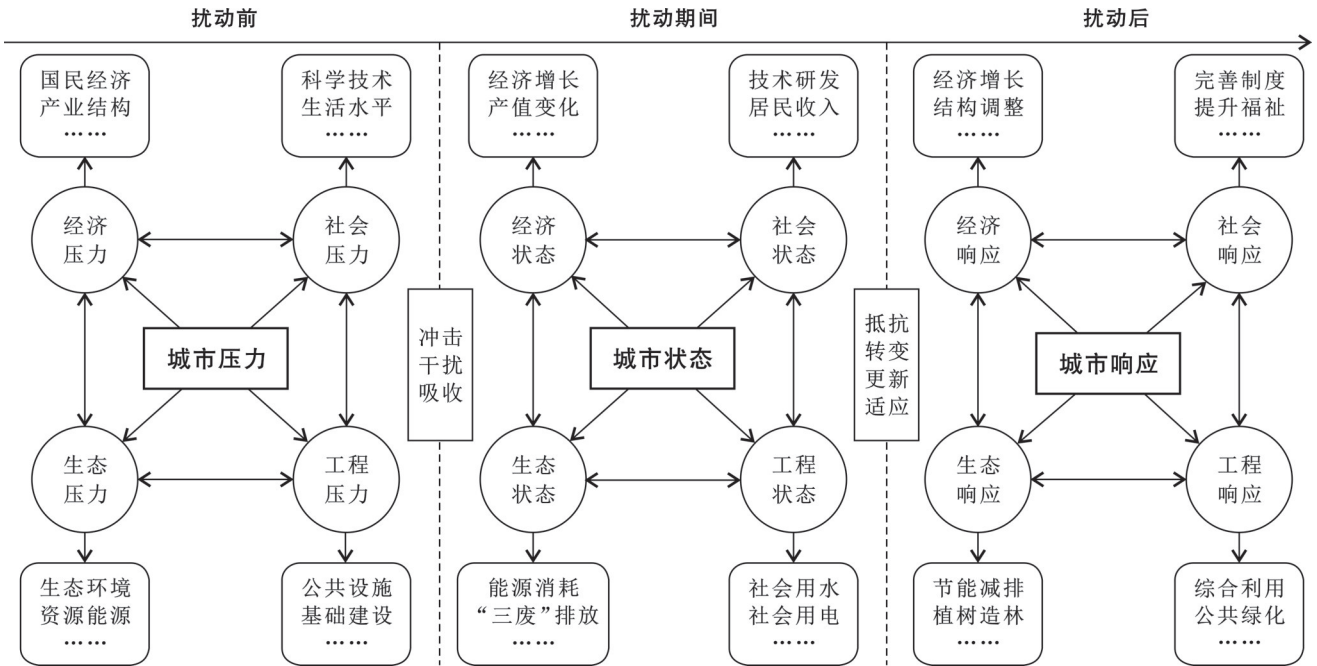


图 2 资源型城市韧性分析框架

Fig.2 Analysis framework of urban resilience in resource-based cities

1.3.3 系统综合水平评价模型

资源型城市生态韧性与碳排放评价指标的量纲不同,运用极差法对其标准化处理,指标权重运用熵权法确定^[26],资源型城市韧性/碳排放的综合水平指数表示为

$$U_i = \sum_{j=1}^n R_{ij} Y_{ij} \quad (2)$$

式中: U_i 表示第*i*城市韧性/碳排放的综合得分; R_{ij} 表示第*i*城市韧性/碳排放的第*j*指标的权重; Y_{ij} 表示第*i*城市韧性/碳排放的第*j*指标标准化值; n 表示城市数量。

1.3.4 耦合协调模型

耦合度通常主要用于衡量多个子系统之间的相互作用强度^[27],构建城市韧性与碳排放的耦合协调模型,能够合理判别两者的协调发展水平,表示式为

$$C = \left[\frac{U_1 \cdot U_2}{\left(\frac{U_1 + U_2}{2}\right)^2} \right]^k \quad (3)$$

$$T = \alpha \cdot U_1 + \beta \cdot U_2 \quad (4)$$

$$D = \sqrt{C \cdot T} \quad (5)$$

式中: C 表示耦合度; U_1 表示城市韧性的综合得分; U_2 表示碳排放的综合得分; K 表示调节系数,一般取值为[2,5],本文取2; α 表示城市韧性的权重; β 表示碳排放的权重,由于两者同等重要,故取 $\alpha=\beta=0.5$; T 表示综合协调指数; D 表示协调度。

城市韧性作为城市自然、社会、经济系统的重要组成部分,关于城市韧性与碳排放耦合协调等级并未划分标准。本研究以经济高质量发展与碳排放耦合协调的研究成果为依据^[28],对两者的耦合协调等级标准进行划分(表2)。

1.3.5 空间自相关模型

空间自相关是基于空间关联,测量地理要素观测值在空间上依赖性的方法。本研究选择空间自相关模型判别资源型城市韧性与碳排放耦合协调度的空间关联与聚集特征,分别采用全局Moran指数(I)

和局部 Moran 指数 (I_i), 计算公式为^[29]

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij})} \quad (6)$$

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_{j=1}^n (w_{ij} (x_j - \bar{x})) \quad (7)$$

式中: x_i, x_j 分别为第 i 与第 j 资源型城市的观测值; \bar{x} 为样本均值; S^2 为样本方差; w_{ij} 为空间权重, 若资源型城市 i 与 j 相邻, 则取值为 1, 反之为 0; I 为 Moran 指数, 表征不同资源型城市的空间相关性。

表 1 城市韧性评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of urban resilience

目标层	要素层	指标层	属性	权重
城市韧性 (A)	经济韧性 (A ₁)	全社会固定资产投资 (A ₁₁)	+	0.011
		财政收入 (A ₁₂)	+	0.044
		第二产业增加值占 GDP 比重 (A ₁₃)	-	0.093
		人均 GDP (A ₁₄)	+	0.041
		人均可支配收入 (A ₁₅)	+	0.038
		科技支出占财政支出比重 (A ₁₆)	+	0.056
	社会韧性 (A ₂)	年末从业人员数 (A ₂₁)	-	0.019
		采矿业从业人员占比 (A ₂₂)	-	0.032
		居民收入增长率 (A ₂₃)	+	0.039
		专利授权量 (A ₂₄)	+	0.055
		城镇化率 (A ₂₅)	+	0.026
		环境规制 (A ₂₆)	+	0.068
	生态韧性 (A ₃)	工业废水排放量 (A ₃₁)	-	0.036
		工业 SO ₂ 排放量 (A ₃₂)	-	0.062
		工业烟粉尘排放量 (A ₃₃)	-	0.042
		原煤消费量占比 (A ₃₄)	-	0.080
森林覆盖率 (A ₃₅)		+	0.038	
空气质量优良率 (A ₃₆)		+	0.009	
工程韧性 (A ₄)	全社会用电量 (A ₄₁)	-	0.035	
	全社会用水量 (A ₄₂)	-	0.028	
	生活污水处理率 (A ₄₃)	+	0.032	
	一般工业固废综合利用率 (A ₄₄)	+	0.049	
	生活垃圾无害化处理率 (A ₄₅)	+	0.030	
		建成区绿化覆盖率 (A ₄₆)	+	0.022
		人均公园绿地面积 (A ₄₇)	+	0.015

注: “+”表示正向关系; “-”表示负向关系。

表 2 城市韧性与碳排放的耦合协调等级划分标准
Table 2 Evaluation criterion of coupling coordination level between urban resilience and carbon emission

D 值区间	耦合协调程度	D 值区间	耦合协调程度
(0, 0.1)	极度失调	[0.5, 0.6)	勉强协调
[0.1, 0.2)	重度失调	[0.6, 0.7)	初级协调
[0.2, 0.3)	中度失调	[0.7, 0.8)	中级协调
[0.3, 0.4)	轻度失调	[0.8, 0.9)	良好协调
[0.4, 0.5)	濒临失调	[0.9, 1.0)	优质协调

2 结果与分析

2.1 城市韧性与碳排放耦合协调特征

2.1.1 城市韧性与碳排放演变趋势

2013—2022 年黄河流域资源型城市韧性指数与

碳排放指数的变化(图 3)表明, 城市韧性指数呈递增趋势, 由 2013 年的 0.288 上升至 2022 年的 0.512, 年均增幅达到 7.78%; 碳排放指数呈逐年递减特征, 由 2013 年的 0.822 下降至 2022 年的 0.601, 年均降幅为 2.69%。从不同地理区位看, 下游资源型城市韧性指数高于上、中游, 而下游碳排放指数低于上、中游, 充分说明下游城市各系统状况优于上、中游。总之, 黄河流域资源型城市韧性指数与碳排放指数呈负相关关系, 且城市韧性提升幅度高于碳排放下降幅度。

2.1.2 耦合协调的时序演变特征

2013—2022 年黄河流域资源型城市韧性与碳排放的耦合协调指数由 0.571 增加至 0.741(图 4), 其变化大致分为 2 个阶段。第一阶段(2013—2019 年)表

现为“小幅提升”,下游资源型城市的耦合协调水平高于上、中游。其原因是生态文明建设与绿色发展理念持续推进,加速经济发展模式转变、产业结构调整、淘汰落后产能,使资源型城市韧性与碳排放的耦合协调水平增加。下游发展水平相对较高,上游资源城市生态承载与供给较为稳定,而中游受限于资源依赖的“锁定效应”,其耦合协调水平呈上升趋势,却低于其他地区。第二阶段(2019—2022年)表现为“稳步大幅提升且中游赶超上游”。随着2019年黄河流域高质量发展战略与2020年“双碳”目标提出,资源型城市加大生态环境保护与治理力度,其系统结构不断完善,服务功能增强,因而资源型城市韧性与碳排放的耦合协调水平不断提升且增幅明显。尤其中游资源型城市制定节能降耗措施,在环境规制“后延效应”的作用下,碳排放较快下降,使得其耦合协调水平2019年超过了上游。总之,城市韧性与碳排放的耦合协调水平趋于向好,具有“小幅提升—快速上涨”的特点。

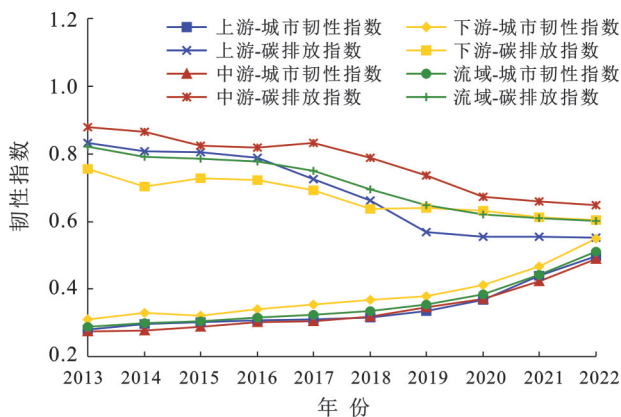


图3 2013—2022年黄河流域资源型城市韧性指数与碳排放指数

Fig.3 Index of urban resilience and index of carbon emission in resource-based cities of Yellow River basin

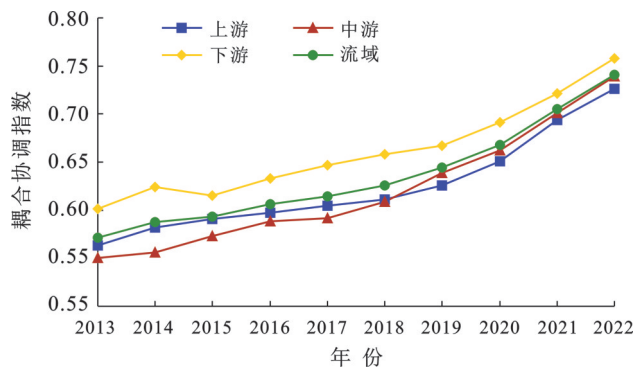


图4 2013—2022年黄河流域资源型城市韧性与碳排放的耦合协调指数

Fig.4 Index of coupling coordination between urban resilience and carbon emission in resource-based cities of Yellow River basin

2.1.3 耦合协调的空间演变特征

黄河流域城市韧性与碳排放耦合协调等级空间分布(图5)表明,城市韧性与碳排放耦合协调等级提升显著,具有“轻度失调和勉强协调过渡为初级、中级协调”的特点。2013年与2016年,上、中游耦合协调等级普遍低于下游。从空间分布看,上游耦合协调等级分布差异变化不大,以濒临失调为主;下游耦合协调等级均有提升,分别由濒临失调与勉强协调为主演变为勉强协调与初级协调为主;中游城市耦合协调等级变化分为4种情况:延安、铜川和咸阳等城市耦合协调等级未发生变化,均为勉强协调;大同、忻州和朔州等城市耦合协调等级由轻度失调过渡为濒临失调;阳泉、临汾和运城等城市耦合协调等级由濒临失调演变为勉强协调;洛阳、宝鸡和三门峡等城市耦合协调等级由勉强协调提升为轻度协调。2019年与2022年,黄河流域城市韧性与碳排放耦合协调等级均有显著提升,其中,下游高于上、中游,而中游多数城市高于上游,与“中游城市韧性与碳排放的耦合协调水平赶超上游”的结论趋于一致。总之,资源型城市韧性与碳排放耦合协调等级具有“西低东高”的空间分布规律。

2.2 城市韧性与碳排放空间集聚特征

2.2.1 耦合协调的全局空间集聚特征

研究结果表明,城市韧性与碳排放耦合协调的全局 Moran's I 估计值是正值,其变化呈“波动式上升”特征(图6),意味着其耦合协调度的空间集聚效应明显并稳中提升。其中,2013—2018年全局 Moran's I 指数“升中有降”,由0.293增加到0.344,年均增幅为2.90%,2019—2022年全局 Moran's I 指数上升至0.445,年均增幅为7.34%,充分说明黄河流域内资源型城市间关联性持续增强。

2.2.2 耦合协调的局部空间集聚特征

全局自相关基于整体视角分析了黄河流域资源型城市韧性与碳排放耦合协调的空间关联程度,其内部空间格局差异难以甄别,需引入空间自相关模型,探究其局部空间集聚特征。依据 Moran's I 散点图,黄河流域资源型城市韧性与碳排放耦合协调的空间集聚分为4个类型,即高-高、高-低、低-高和低-低4个区域(图7)。

2013—2022年城市韧性与碳排放耦合协调具有“局部集聚”特征,且以“高-高”和“低-低”集聚为主向“高-低”集聚为主转变,呈现出集聚效应且具有空间“带状”和“块状”分布特点。2013年与2016年耦合协调的局部空间分布特征差异不大,2019年与2022年耦合协调的局部空间分布变化表现为在空间上,上

游资源型城市主要集中于“高-高”区域,中游诸多城市为“高-低”与“低-低”类型,下游城市主要分布于“高-低”聚集区;在时间上,“高-高”和“低-低”集聚的资源型城市数量总体上呈减少趋势,表明黄河流域耦合协调水平整体提升,耦合协调度较高城市的相对优势减弱,较低城市逐渐增强,地区间城市韧性与碳排放耦合协调的差距趋于缩小。其原因在于上游资源型城市生态环境较为脆弱,水资源短缺、土地荒漠化等问题突出,经济发展较缓,工业转型水平较低,产业结构以资源型、高耗能产业为主,碳排放强度较高,削弱了城市韧性。中游资源型城市在环境规制作用下,部分企业调结构、促升级,形成了“以煤

为基、路径植入、多元发展”的绿色低碳转型思路,使得碳排放减少。然而位于黄河流域“几字湾”的晋北三市和包头市具有“高碳排放,低城市韧性”的显著特点,由于其韧性在空间上表现出“路径依赖”特征,短期内难以突破自身发展的锁定效应,呈现“低-高”集聚区域分布。下游的河南和山东部分资源型城市的工业门类多元、产业类型丰富,通过区域协作,驱动产业链延伸,提升附加值,形成“接续替代+多元拓展”的产业结构,实现了从单一资源依赖到复合产业生态的跨越,故分布于“高-低”聚集区。总之,黄河流域上、中、下游资源型城市韧性与碳排放耦合协调水平提高,趋于均衡发展态势。

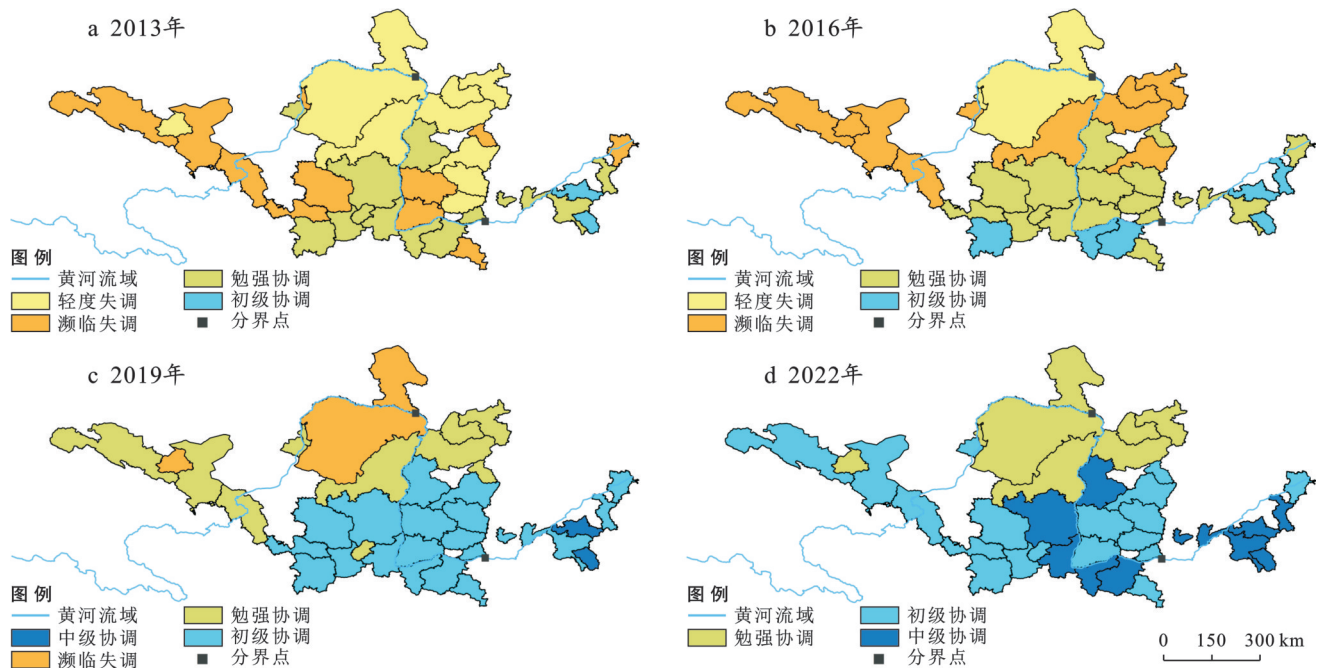


图5 2013—2022年黄河流域资源型城市韧性与碳排放耦合协调空间演变
Fig.5 Spatial evolution of coupling coordination between urban resilience and carbon emission in resource-based cities of Yellow River basin

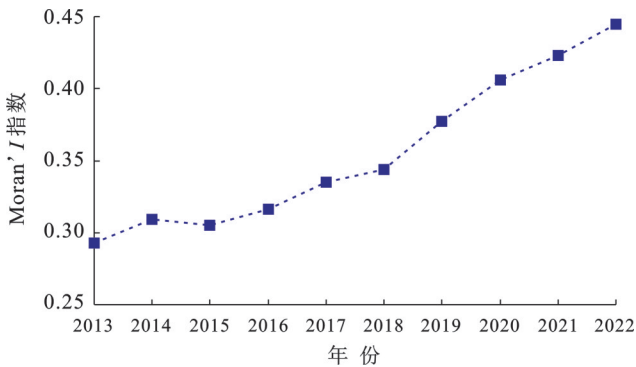


图6 2013—2022年黄河流域资源型城市韧性与碳排放耦合协调度的全局 Moran's I 指数
Fig.6 Global Moran's I index of coupling coordination degree between urban resilience and carbon emission in resource-based cities of Yellow River basin

3 结论与讨论

3.1 结论

- (1) 2013—2022年黄河流域资源型城市韧性与碳排放分别呈递增与递减趋势,两者呈负相关关系,城市韧性变化幅度快于碳排放且不同地区存在差异。
- (2) 2013—2022年黄河流域资源型城市韧性与碳排放的耦合协调水平呈“小幅提升—快速上涨”的特征,其变化分为下游的耦合协调水平高于上、中游和下游赶超上游两个阶段,中游耦合协调水平增幅最大。
- (3) 黄河流域资源型城市韧性与碳排放耦合协调等级明显提升,且下游耦合协调等级高于上、中

游,但不同地区耦合等级差异较大。2013—2022年上游耦合协调等级主要为勉强协调,中游耦合协调

等级为勉强协调、初级协调、中级协调3类,下游耦合协调等级以中级协调为主。

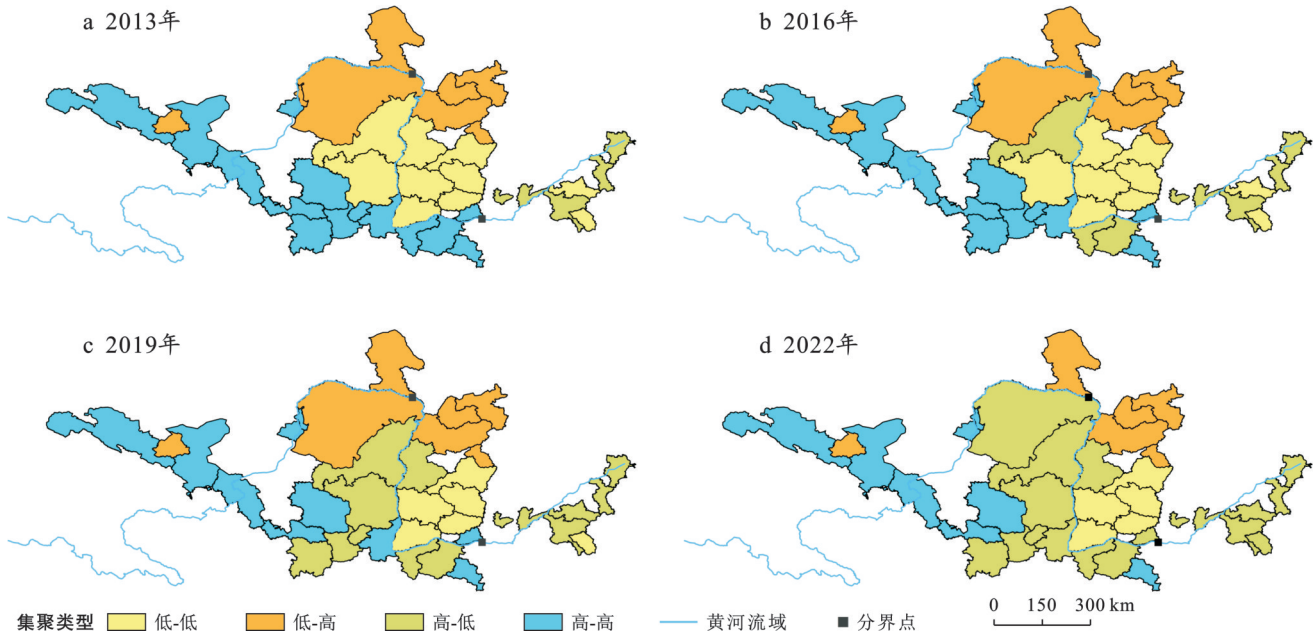


图7 城市韧性与碳排放的耦合协调集聚特征

Fig.7 Agglomeration characters of coupling coordination between urban resilience and carbon emission in resource-based cities of Yellow River basin

(4) 黄河流域资源型城市韧性与碳排放耦合协调以“高-高”和“低-低”集聚为主向“高-低”集聚为主转变,具有空间聚集效应,呈现“块状”分布特点,不同地区之间差异缩小,趋于均衡发展态势。

3.2 讨论

(1) 黄河流域不同地区资源型城市韧性与碳排放耦合协调水平普遍提升且中、下游耦合协调水平高于上游,与张赛茵等^[30]的结论基本一致,不同之处在于张赛茵等提出耦合协调空间差异不显著,原因在于其将部分城市耦合协调等级的初级、中级协调归结为协调阶段,而本研究依据黄河流域资源型城市韧性评价指标体系测度其耦合协调水平,结合耦合协调等级划分标准,进一步明确了城市韧性与碳排放耦合协调的等级空间分布以及演进特征,研究结果更科学、准确。

(2) 资源型城市降污减排,改善生态有效供给,是提高城市韧性的内在要求。研究结果表明,2013—2022年,黄河流域中、下游资源型城市韧性与碳排放耦合协调水平呈均衡化方向发展趋势,与史霄斌等^[28]的观点趋于一致,充分印证了所得结论的合理性。在此基础上,本研究进一步分析了城市韧性与碳排放耦合协调的局部空间分布特征,其部分城市逐渐向“高-低”集聚为主转变,呈现出聚集效应。基于此,未来可立足于资源型城市韧性与碳排放耦合

协调演进规律,黄河流域不同地区制定差异化路径。上游资源型城市基于黄河流域生态屏障优势与湿地修复工程,增强固碳增汇能力,同时限制高污染、高能耗资源开发,充分利用水电、风电等可再生能源,提升城市系统调节功能与韧性承载力。中游资源型城市弱化对高碳企业依赖,倒逼高耗能企业绿色转型,提升能源利用效率,实现降碳增效,增强城市韧性与碳排放协同潜力。下游资源型城市应基于产业多元化,充分发挥资金、人才、技术等优势,鼓励优质要素集聚且向周边地区扩散,充分发挥低碳技术辐射作用,实现低碳集约与城市韧性协同。总之,黄河流域资源型城市韧性与排放耦合协同应在差异化路径中实现“上游固碳增汇,中游降碳增效,下游低碳集约”的协同目标,形成“城市韧性能力提升—碳排放减少”的正向循环,促进黄河流域生态保护和高质量发展深度融合。

参考文献 (References)

- [1] 连煜. 坚持黄河高质量生态保护,推进流域高质量绿色发展[J]. 环境保护, 2020, 48(增刊1): 22-27.
Lian Yu. Adhere to the high quality ecological protection and promote the high quality and green development of the Yellow River basin [J]. Environmental Protection, 2020, 48(Suppl.1): 22-27.
- [2] Holling C S. Resilience and stability of ecological sys-

- tems [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4 (1973): 1-23.
- [3] 刘彦平. 城市韧性系统发展测度: 基于中国 288 个城市的实证研究[J]. *城市发展研究*, 2021, 28(6): 93-100.
Liu Yanping. Urban resilience system development measurement: Based on an empirical study of 288 Chinese cities [J]. *Urban Development Studies*, 2021, 28(6): 93-100.
- [4] Meerow S, Newell J P, Stults M. Defining urban resilience: A review [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 147: 38-49.
- [5] 张明斗, 任衍婷, 周亮. 黄河流域城市生态韧性时空演变特征及影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(3): 445-454.
Zhang Mingdou, Ren Yanting, Zhou Liang. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of urban ecological resilience in the Yellow River basin [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(3): 445-454.
- [6] 肖圣, 多玲花, 邹自力. 基于“风险—连通性—潜力”的南昌市生态韧性评估[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(3): 733-741.
Xiao Sheng, Duo Linghua, Zou Zili. Assessment of ecological resilience in Nanchang based on “risk-connectivity-potential” [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(3): 733-741.
- [7] 陶洁怡, 董平, 陆玉麒. 长三角地区生态韧性时空变化及影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(9): 1975-1987.
Tao Jieyi, Dong Ping, Lu Yuqi. Spatial-temporal analysis and influencing factors of ecological resilience in Yangtze River delta [J]. *Resources and Environment in the Yangtze basin*, 2022, 31(9): 1975-1987.
- [8] 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究: 以杭州市为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(1): 116-126.
Xia Chuyu, Dong Z, Chen Bin. Spatio-temporal analysis and simulation of urban ecological resilience: A case study of Hangzhou [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1): 116-126.
- [9] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析[J]. *经济地理*, 2022, 42(8): 51-61.
Wang Songmao, Niu Jinlan. Dynamic evolution and obstacle factors of urban ecological resilience in Shandong Peninsula urban agglomeration [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(8): 51-61.
- [10] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. *地理学报*, 2021, 76(4): 973-991.
Wang Shaojian, Cui Zitian, Lin Jingjie, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River delta [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4): 973-991.
- [11] 蒋文鑫, 吴军, 徐建刚. 城市生态韧性与经济发展水平耦合协调关系研究: 以江苏省为例[J]. *资源开发与市场*, 2023, 39(3): 299-308.
Jiang Wenxin, Wu Jun, Xu Jianguang. Study on the coupling coordination between urban ecological resilience and economic development level: Taking Jiangsu Province as an example [J]. *Resource Development & Market*, 2023, 39(3): 299-308.
- [12] 李苏, 刘浩南. 干旱区城市化与生态韧性耦合协调的时空格局演化分析: 以宁夏为例[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(4): 1281-1290.
Li Su, Liu Haonan. Spatio-temporal pattern evolution of coupling coordination between urbanization and ecological resilience in arid region: A case of Ningxia Hui Autonomous Region [J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(4): 1281-1290.
- [13] 李诗涵, 陈秋霞, 许章华, 等. 福州都市圈社会经济水平与生态环境韧性的时空演化及耦合协调性[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(6): 311-323.
Li Shihan, Chen Qiuxia, Xu Zhanghua, et al. Spatio-temporal evolution and coupling coordination of socioeconomic level and ecological resilience in Fuzhou metropolitan area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(6): 311-323.
- [14] 钟茂初, 赵天爽. “双碳”目标视角下的碳生产率与产业结构调整[J]. *南开学报(哲学社会科学版)*, 2021(5): 97-109.
Zhong Maochu, Zhao Tianshuang. Carbon productivity and industrial restructuring under the dual goals of carbon peak and carbon neutrality [J]. *Nankai Journal (Philosophy, Literature and Social Science Edition)*, 2021(5): 97-109.
- [15] Hui Zhang, Jie Duliu, Tian Wangbai, et al. Carbon emission efficiency measurement of construction industry and its treatment measures: A case study of Henan Province, China [J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2021, 20(2): 625-632.
- [16] 姜宛贝, 刘卫东. 中国经济空间格局演变及其 CO₂ 排放效应[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 722-732.
Jiang Wanbei, Liu Weidong. Effect of change of the spatial pattern of economic activities on CO₂ emissions in China [J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 722-732.
- [17] 程钰, 孙艺璇, 王鑫静, 等. 全球科技创新对碳生产率的影响与对策研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(9): 30-40.
Cheng Yu, Sun Yixuan, Wang Xinjing, et al. Research on the impact of global scientific and technological innovation on carbon productivity and countermeasures [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019,

- 29(9):30-40.
- [18] 孙亚男,刘华军,刘传明,等.中国省际碳排放的空间关联性及其效应研究:基于SNA的经验考察[J].上海经济研究,2016,28(2):82-92.
Sun Yanan, Liu Huajun, Liu Chuanming, et al. Research on spatial association of provinces carbon emissions and its effects in China [J]. Shanghai Journal of Economics, 2016,28(2):82-92.
- [19] 蒋毓琪,杨怡康,田文博,等.黄河流域碳生态安全水平空间格局与动态演进[J].水土保持通报,2023,43(5):419-425.
Jiang Yuqi, Yang Yikang, Tian Wenbo, et al. Spatial pattern and dynamic evolution of carbon ecological security level in Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5):419-425.
- [20] 李子杰,徐进亮,王健,等.长江经济带城市碳排放及其影响因素的时空异质性研究[J].长江流域资源与环境,2023,32(3):525-536.
Li Zijie, Xu Jinliang, Wang Jian, et al. Spatial and temporal heterogeneity of urban carbon emissions and their influencing factors in Yangtze River economic belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(3):525-536.
- [21] 初慧敏,贺山峰,何佳临,等.基于PSR模型的黄河流域城市生态韧性时空分异特征研究[J].水土保持研究,2025,32(4):396-404.
Chu Huimin, He Shanfeng, He Jialin, et al. Research on the spatiotemporal differentiation characteristics of urban ecological resilience in the Yellow River basin based on PSR model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(4):396-404.
- [22] Hao Yu, Liao Hua, Wei Yiming. Is China's carbon reduction target allocation reasonable? An analysis based on carbon intensity convergence [J]. Applied Energy, 2015,142:229-239.
- [23] 崔盼盼,赵媛,郝丽莎,等.中国能源行业碳排放强度下降过程中的省际减排成效评价[J].地理研究,2020,39(8):1864-1878.
Cui Panpan, Zhao Yuan, Hao Lisha, et al. Evaluation on the effectiveness of provincial emission reduction in the process of carbon emission intensity decline in China's energy industry [J]. Geographical Research, 2020,39(8):1864-1878.
- [24] 阎晓,任苏平,涂建军.资源型城市知识基础演化及创新合作驱动机理[J].资源科学,2024,46(10):1912-1929.
Yan Xiao, Ren Suping, Tu Jianjun. Change of knowledge base and the driving mechanism of innovation cooperation in resource-based cities [J]. Resources Science, 2024,46(10):1912-1929.
- [25] 崔艳芳,张国兴.黄河流域资源型城市碳排放影响因素与达峰预测研究[J].人民黄河,2023,45(2):9-14.
Cui Yanfang, Zhang Guoxing. Research on the influencing factors and peak prediction of carbon emission of resources-based cities in the Yellow River basin [J]. Yellow River, 2023,45(2):9-14.
- [26] 蒋毓琪,杨怡康,田文博,等.黄河流域资源型城市碳生态安全差异测度、来源分解与时空演进[J].环境工程技术学报,2024,14(4):1184-1194.
Jiang Yuqi, Yang Yikang, Tian Wenbo, et al. Difference measurement, source decomposition and spatial-temporal evolution of carbon ecological security in resource-based cities of the Yellow River basin [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024,14(4):1184-1194.
- [27] 杨怡康,蒋毓琪,田文博.黄河流域资源型城市碳生态安全与高质量发展耦合协调研究[J].人民黄河,2025,47(5):8-14.
Yang Yikang, Jiang Yuqi, Tian Wenbo. Coupling coordination between carbon ecological security and high-quality development in resources-based cities of the Yellow River basin [J]. Yellow River, 2025,47(5):8-14.
- [28] 史霄斌,康建军,栾志理.黄河中下游城市群碳排放水平与经济高质量发展耦合研究[J].人民黄河,2024,46(11):22-28.
Shi Xiaobin, Kang Jianjun, Luan Zhili. Study on the coupling of carbon emission levels and high quality economic development in urban agglomerations in the middle and lower reaches of the Yellow River [J]. Yellow River, 2024,46(11):22-28.
- [29] 李智慧,王凯,余芳芳,等.中国旅游业碳排放-旅游经济-生态环境耦合协调时空分异研究[J].地理与地理信息科学,2022,38(6):110-118.
Li Zhihui, Wang Kai, Yu Fangfang, et al. Temporal and spatial differentiation of coupling coordination of tourism carbon emissions, tourism economy and ecological environment in China [J]. Geography and Geo-Information Science, 2022,38(6):110-118.
- [30] 张赛茵,王启翔,袁佳欣,等.资源型城市韧性水平与绿色发展效率耦合的时空分异特征[J].浙江大学学报(理学版),2024,51(6):753-768.
Zhang Saiyin, Wang Qixiang, Yuan Jiaxin, et al. Spatial-temporal differentiation characteristics of the coupling of urban resilience and green development efficiency in resource-based cities [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2024,51(6):753-768.