



· 黄河流域生态保护和高质量发展 ·

黄河流域城市绿色创新效率与生态韧性的 时空耦合及影响因素

孙 鹏, 戴鹏辉, 惠 岩, 张杰繁, 职紫燕

(西安外国语大学 旅游学院·人文地理研究所, 陕西 西安 710128)

摘要 探析城市绿色创新效率与生态韧性的耦合协调关系对推动黄河流域生态保护和高质量发展具有重要的现实意义。利用 Super-SBM 模型和熵权法分别测算黄河流域 78 个城市 2010—2020 年的绿色创新效率与生态韧性水平, 并利用修正耦合协调度模型、Tobit 回归模型进一步分析两者耦合协调发展的时空演变特征及影响因素。结果表明: ① 2010—2020 年黄河流域城市绿色创新效率与生态韧性均呈现出随时间演化而波动上升态势, 但发展水平较低, 两者在区域间均呈现出明显的空间差异性; ② 研究期间黄河流域绿色创新效率与生态韧性耦合度与协调度均呈增长趋势, 其中耦合度整体处于磨合阶段, 协调度整体处于一般协调状态, 从空间格局来看, 呈现出“上游-中游-下游”阶梯式递增的特征; ③ 经济发展水平、交通基础设施、对外开放程度、人力资本对耦合协调度有着显著的正向促进作用, 产业结构、城镇化水平对耦合协调度抑制作用显著。

关键词 绿色创新效率; 生态韧性; 修正耦合协调度模型; Tobit 回归模型; 黄河流域

中图分类号: F127; X22 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbr.2025-04-007

Spatio-temporal coupling and influencing factors of urban green innovation efficiency and ecological resilience in the Yellow River Basin

SUN Peng, DAI Penghui, HUI Yan, ZHANG Jiefan, ZHI Ziyan

(School of Tourism & Research Institute of Human Geography, Xi'an International Studies University, Xi'an 710128, China)

Abstract Exploring the coupled and coordinated relationship between urban green innovation efficiency and ecological resilience is of great practical significance for promoting ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. The Super-SBM model and entropy weight method are used to measure the green innovation efficiency and ecological resilience level of 78 cities in the Yellow River Basin from 2010 to 2020, respectively, and to further analyze the spatial and temporal evolution characteristics of the coupled and coordinated development and the factors influencing them by using the modified coupled coordination degree model and the Tobit regression model. The results show that: ① Both green innovation efficiency and ecological resilience of cities in the Yellow River Basin in 2010—2020 show a fluctuating upward trend over time evolution, but the development level is low; both show obvious spatial variability among regions. ② The coupling degree and coordination degree of green innovation efficiency and ecological resilience in the Yellow River Basin show an overall increasing trend, but the coupling degree is in the磨合阶段, and the coordination degree is in the一般协调状态. ③ Economic development level, transportation infrastructure, degree of opening up, and human capital have significant positive promoting effects on the coupled coordination degree, while industrial structure and urbanization level have significant inhibitory effects on the coupled coordination degree.

收稿日期: 2024-05-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42130510); 西安市社科基金重点项目(23JX147)。

第一作者: 孙鹏, 男, 博士, 教授, 从事产业集群创新与区域治理研究, sunpeng@xisu.edu.cn。

通信作者: 戴鹏辉, 男, 从事城市创新与可持续发展研究, sxjzgdph21@163.com。

sin during the study period showed a growing trend, in which the coupling degree as a whole was in the stage of friction, and the coordination degree as a whole was in the state of general coordination; from the perspective of spatial pattern, it presents the characteristics of "upstream-midstream-downstream" step increase. ③ The level of economic development, transportation infrastructure, degree of openness to the outside world, and human capital have a significant positive contribution to the degree of coupling coordination, while the industrial structure and urbanization level have a significant inhibiting effect on the degree of coupling coordination.

Keywords green innovation efficiency; ecological resilience; modified coupled coordination degree model; Tobit regression model; the Yellow River Basin

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带,然而,当前黄河流域城市倚能倚重、低质低效,面临着生态脆弱、水土流失、环境污染等不可避免的内部扰动和外部冲击^[1],城市韧性亟待提升。党的二十大报告明确提出要打造宜居、韧性、智慧城市。随着黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家战略,城市生态韧性作为韧性城市建设的重要系统,成为当前黄河流域城市生态风险防控的重要内容。《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》强调坚持生态优先、绿色发展,提升科技创新的支撑能力。绿色创新作为“绿色”与“创新”理念的结合点,具有绿色发展与技术创新的双重特征^[2],成为提升生态韧性的重要途径^[3]。而生态韧性则是绿色创新实施的基础和保障^[4],直接影响城市绿色创新政策的出台^[5]。因此,绿色创新与生态韧性之间存在互相影响、交互耦合的关系。探讨黄河流域城市绿色创新与生态韧性的耦合协调关系,对于黄河流域生态保护和高质量发展至关重要。

绿色创新最早于1996年由Fussler等人提出,被定义为在不破坏环境的前提下,创造新产品和服务,从而增加经济体系的价值^[6]。随着新发展理念的提出,绿色创新研究引起了国内学术界的广泛关注,而绿色创新效率作为绿色创新发展水平最重要的衡量指标,成为绿色创新研究的热点。相关研究如下:一是基于投入-产出视角对绿色创新效率进行测度和评价,并进一步分析其时空演变特征^[7],测度方法主要包括SFA模型^[8]和DEA模型^[9],由于DEA模型因松弛变量问题往往导致效率值偏高,其衍生模型成为主流方法,如考虑非期望产出的Super-SBM模型^[10-11]、EBM模型^[12]等;二是对影响因素进行探析,研究发现环境规制、经济发展、基础设施水平、对外开放、人力资本等因素^[13-14]对促进绿色创新效率的提升有着显著作用,而以第二产业为主的产业结构^[15]有

着明显的抑制作用;三是在创新效率非均衡分布和区域关联程度不断增加的背景下,网络关系是影响创新效率表现的重要因素,一些学者开始基于关系型视角,通过引力模型构建关联矩阵,利用社会网络分析方法对绿色创新效率空间关联关系及网络结构特征进行了初步探索^[16-17]。

“韧性”一词起源于工程学领域的概念,后由生态学家Holling引入生态学,定义为生态系统吸收变化和干扰并保持系统稳定的能力^[18],随后向城市领域延伸。目前普遍认为城市韧性是由城市经济、社会、制度、生态等系统组成的复杂系统^[19]。而城市生态韧性作为城市韧性的重要系统得到广泛关注,国外对城市生态韧性的研究主要围绕评估框架的构建^[20]及测度^[21]进行,并提出绿色基础设施^[22]、城市绿地^[23]等优化措施。国内学者通过构建包含“抵抗力-适应力-恢复力”^[24]“风险-连通性-潜力”^[25]“规模-密度-形态”^[26]等在内的多维评估模型,采用熵权法^[27]、CRITIC权重法^[28]等对城市生态韧性进行测度,并利用地理探测器^[29]、障碍度模型^[30]、时空地理加权回归模型(GTWR)^[31]等对影响因素进行分析,包括地形、植被、水源等自然因素^[32]以及环境规制、经济发展水平、产业结构等社会经济因素^[33]。近年来学者们对城镇化^[34]、旅游经济^[35]等系统与城市生态韧性之间的关系研究也开始涌现。

随着绿色创新理念与韧性思想的深入,学者们就绿色创新对生态韧性的影响机制进行了探索,认为体现了低能耗、少污染的绿色生产理念的绿色创新,在提升生态韧性的过程中发挥着重要的渠道作用^[36],发展低碳经济与创新驱动经济是实现城市生态韧性的路径选择^[37]。综上可知,学术界对绿色创新、生态韧性的研究取得了丰富的成果,并从绿色创新视角对生态韧性的影响机制进行了探索,但忽视了生态韧性对绿色创新的反

馈效应,对两者间的耦合协调关系研究较为匮乏,尤其缺少对黄河流域的实证研究。鉴于此,本文以 2010—2020 年黄河流域 78 个地级市为研究对象,在尝试探析绿色创新效率与生态韧性的耦合协调机理的基础上,借助 Super-SBM 模型和熵权法分别测算绿色创新效率与生态韧性水平,并利用修正耦合协调度模型、Tobit 回归模型进一步分析两者耦合协调发展的时空演变特征及影响因素,以为黄河流域生态保护和高质量发展提供

理论参考。

1 城市绿色创新效率与生态韧性耦合机理

城市绿色创新和生态韧性是当今社会关注的重要议题,两者相互影响、相互促进,构成交互耦合的关系(见图 1)。

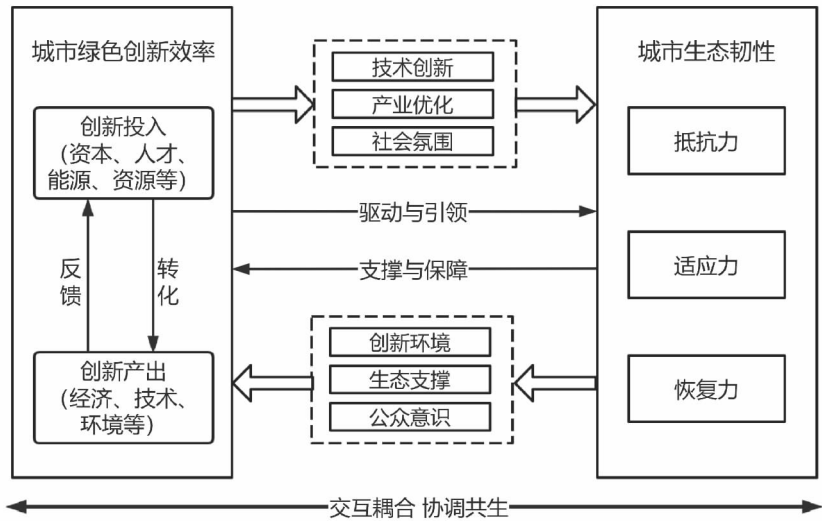


图 1 绿色创新效率与生态韧性耦合协调机理

Fig. 1 Coupling and coordination mechanism of green innovation efficiency and ecological resilience

1)绿色创新效率的提升对生态韧性具有显著的驱动作用。绿色创新的核心在于技术创新,旨在提高资源利用效率,并推动经济向更加环保、可持续的方向发展。一系列创新技术,诸如清洁能源技术、循环经济技术以及生态修复技术等,对改善环境质量、稳固和恢复生态系统以及进一步增强生态韧性发挥着至关重要的作用。清洁能源技术的广泛应用,通过减少化石燃料的消耗和降低二氧化碳等温室气体的排放,能有效降低极端气候事件的发生频率,从而为生态系统提供了更加稳定的生存环境;循环经济技术则强调通过优化生产流程来减少废弃物的产生,这有助于维持生态系统的物质平衡,进一步促进生态韧性的提升;生态修复技术则通过实施植被恢复、水质改善、生物修复等措施对已受损的生态系统进行修复,以提高其恢复力和抵抗力。此外,绿色创新效率的提升还能促进绿色产业的发展,并推动绿色产业与其他产业的协同发展。例如,清洁能源产业与制造业的结合,不仅能推动制造业的绿色转型,还能促进生态系统的多样化和韧性的增强,降

低对生态系统的压力。同时,绿色创新效率的提升也有助于推动社会形成绿色消费和绿色生产的理念,提高公众对绿色创新发展的认识。公众通过监督企业的环保行为、积极参与环保公益活动等方式,进一步推动绿色创新活动的深入开展,从而促进生态韧性的全面提高。

2)生态韧性被视为绿色创新效率提升的重要支撑。一个具备良好韧性的生态系统,能够有效抵御外部干扰和冲击,维持其结构与功能的稳定性。这种稳定性为绿色创新营造了有利的生态环境和条件。具体而言,在生态韧性较强的地区,自然资源能得到更为妥善的保护与利用,这为绿色创新提供丰富的物质基础。同时,生态韧性的增强还有助于提升生态系统的服务功能,例如水源涵养、气候调节等,从而为绿色创新提供重要的生态支持。除此之外,生态韧性的增强还能够提升公众对绿色创新的接受度和支持度。当生态系统展现出较强的稳定性和恢复力时,人们会更加坚信绿色创新的可行性和有效性,进而更加积极地参与和支持绿色创新活动。这一正向反馈机制

进一步强化了生态韧性与绿色创新效率之间的相互促进关系。

2 研究区域、研究方法与数据来源

2.1 研究区范围

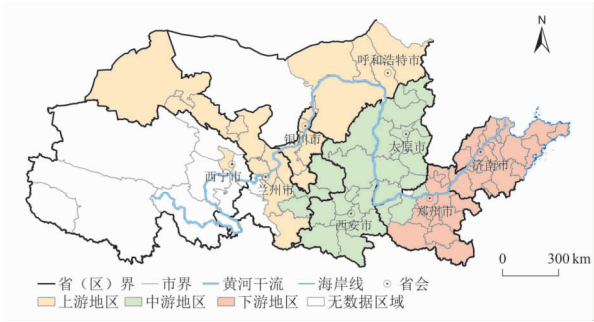
本文以黄河干流流经区域为主体,考虑到各地区之间创新、生态要素的关联性,剔除被纳入长江经济带的四川省和传统上属于东北地区的内蒙古东部地区以及部分统计数据严重缺失的城市,最终选取青海、甘肃、陕西、宁夏、内蒙古、山西、河南和山东 8 个省(自治区)的 78 个地级市(州、盟)为研究区域。并参考许玉洁等人^[7]的做法,将黄河流域划分为上、中、下游地区(见图 2)。

2.2 指标体系的构建

2.2.1 城市绿色创新效率指标体系

绿色创新旨在实现以较低的资源消耗和环境成本,获取更优的经济效益与创新成果。因此,

对绿色创新效率的测度要考虑技术创新与绿色发展的双重特性。参考已有研究^[7,14],基于绿色创新的内涵,兼顾指标的科学性和数据的可得性,在传统创新效率指标的基础上,构建了包含投入、期望产出和非期望产出在内的绿色创新效率评价指标体系(见表 1),系统测度黄河流域城市绿色创新效率。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2022)1873 号的标准地图制作,底图无修改,下同。

图 2 黄河流域研究区范围

Fig. 2 Study area of the Yellow River Basin

表 1 城市绿色创新效率评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of urban green innovation efficiency

指标类别	一级指标	二级指标	单位
投入指标	资本投入	R&D 经费内部支出	万元
	劳动投入	R&D 人员	人
	能源投入	全社会用电量	10 ⁸ kW · h
	资源投入	供水总量	10 ⁴ t
产出指标	期望产出	GDP	亿元
		专利申请授权数	件
	非期望产出	工业废水排放量	10 ⁴ t
		工业烟(粉)尘排放量	t
		工业二氧化硫排放量	t

在投入指标方面,依据罗默的内生经济增长理论,资本和劳动是创新投入最基本的要素,参考滕堂伟等人^[17]的思路,选取 R&D 经费内部支出与 R&D 人员表征资本投入与劳动投入;能源投入受限于各城市煤炭、石油、天然气消耗数据的缺失,选取全社会用电量进行替代;另外考虑到黄河流域城市发展对水资源的依赖,选取供水总量表征资源投入^[7]。

产出指标分为期望产出与非期望产出。期望产出方面,现有研究多选取新产品销售收入表征经济效益^[14],由于统计数据在地级市尺度上的严重缺失,本文借鉴陈蓓等人^[15]的研究,选取 GDP

表征绿色创新的经济产出,GDP 是反映一个地区一个时期内生产最终成果的重要指标,可以被视为绿色创新活动对经济增长的直接贡献;专利申请授权数是一个城市创新水平的客观反映,因此被用来表征技术产出^[10]。非期望产出方面,区别于传统创新,绿色创新考虑到创新过程中环境污染产物问题,选取工业废水、烟(粉)尘及二氧化硫排放量表征非期望产出^[11]。

2.2.2 城市生态韧性指标体系

现阶段对城市生态韧性的概念界定与评估模型尚未统一,但普遍强调城市生态系统在面对不确定风险时所表现出的抵抗、适应和恢复能

力^[24]。因此,本文在考虑黄河流域城市发展模式以及生态环境特征的基础上,借鉴相关研究^[27,32],基于指标的科学性及数据的可获取性,

从抵抗力、适应力、恢复力 3 个维度构建城市生态韧性指标体系(见表 2)。

表 2 城市生态韧性评价指标体系

Tab. 2 Evaluation index system of urban ecological resilience

目标层	准则层	指标层	单位	属性	权重
城市生态韧性	抵抗力	单位 GDP 工业二氧化硫排放量	t/km ²	-	0.006
		单位 GDP 工业烟尘排放量	t/万元	-	0.006
		单位 GDP 工业废水排放量	10 ⁴ t/万元	-	0.005
		PM _{2.5} 浓度	μg/m ³	-	0.055
		生活垃圾清运量	10 ⁴ t	-	0.008
	适应力	生活垃圾无害化处理率	%	+	0.016
		污水处理厂集中处理率	%	+	0.008
		一般工业固体废物综合利用率	%	+	0.052
		空气质量优良率	%	+	0.038
		归一化植被指数(NDVI)		+	0.053
	恢复力	人均公园绿地面积	m ² /人	+	0.073
		建成区绿化覆盖率	%	+	0.012
		园林绿地面积	hm ²	+	0.307
		单位面积水资源总量	m ³ /km ²	+	0.261
		节能环保支出占地方财政支出比重	%	+	0.101

1) 抵抗力是指城市生态环境面对生产生活中污染物及废弃物排放的承受程度。选取单位 GDP 工业二氧化硫排放量、单位 GDP 工业烟尘排放量、单位 GDP 工业废水排放量^[28]表示工业污染情况;选取 PM_{2.5} 浓度、生活垃圾清运量来表示城市生产生活在生态环境的影响^[27]。

2) 适应力强调城市生态系统在面对水-土-气等维度的干扰与冲击时进行调整吸收的能力。选取生活垃圾无害化处理率、污水处理厂集中处理率、一般工业固体废物综合利用率、空气质量优良率表示城市生态系统受到生产生活所带来的冲击后所做出的回应,净化效率越高表明适应力越强^[27,33]。

3) 恢复力体现为城市生态系统在经历冲击与调整之后的恢复潜力。选取归一化植被指数(NDVI)、人均公园绿地面积、建成区绿化覆盖率、园林绿地面积表示生态修复能力^[28,30];选取单位面积水资源总量表示水资源的丰富度^[38];节能环保支出占地方财政支出比重则体现城市生态环境治理效率^[30,32]。

2.3 研究方法

2.3.1 Super-SBM 模型

数据包络分析方法(DEA)是一种多指标投入和产出评价决策单元相对效率的方法。由于传

统的 DEA 模型存在径向和角度问题,导致结果存在较大误差。为此,Tone 提出了基于松弛变量测度且包含非期望产出的 SBM 模型,但该模型无法对效率值为 1 的有效决策单元进行进一步对比^[11]。2002 年 Tone 又提出了 Super-SBM 模型,该模型实现了对有效决策单元的进一步分解并排序,使测算结果准确度得到提高^[39]。因此,本文采用 Super-SBM 模型测算黄河流域城市绿色创新效率,计算公式如下:

$$\min \theta^* = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}^t}}{1 - \frac{1}{q+h} \left(\sum_{r=1}^q \frac{s_r^+}{y_{r0}^t} + \sum_{k=1}^h \frac{s_k^-}{b_{k0}^t} \right)}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} x_{i0}^t \geq \sum_{i=1}^T \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j^t x_{ij}^t - s_i^-, \quad i = 1, 2, \cdots, m \\ y_{r0}^t \geq \sum_{i=1}^T \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j^t y_{rj}^t + s_r^+, \quad r = 1, 2, \cdots, q \\ b_{k0}^t \geq \sum_{i=1}^T \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j^t b_{kj}^t - s_k^-, \quad k = 1, 2, \cdots, h \\ \lambda_j^t \geq 0 (\forall j), s_i^- \geq 0 (\forall i), s_r^+ \geq 0 (\forall r), \\ s_k^- \geq 0 (\forall k) \end{cases}$$

(1)

式中: θ^* 为绿色创新效率值; λ 表示决策单元的权重; s_i^- 、 s_r^+ 、 s_k^- 分别表示投入、期望产出和非期望

产出的松弛变量; x'_i 、 y'_r 、 b'_k 分别表示决策单元在第 t 时期的绿色创新投入、期望产出和非期望产出的值; n 表示总体决策单元数量; m 、 q 、 h 表示投入、期望产出和非期望产出要素个数; T 表示总体研究期数(年)。

2.3.2 熵权法

熵权法是一种根据各指标变异程度确定指标权重的客观赋权法。本文参考文献[8],采用熵权法测算黄河流域城市生态韧性水平。首先对原始数据进行标准化处理,其次确定各指标的权重,最后利用线性加权法计算城市生态韧性综合得分,具体步骤如下。

1) 根据指标属性对原始数据进行标准化处理,以消除原始数据量纲不一致对结果的影响。

正向指标:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{ij}^{\min}}{X_{ij}^{\max} - X_{ij}^{\min}} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

负向指标:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij}^{\max} - X_{ij}^{\min}}{X_{ij}^{\max} - X_{ij}^{\min}} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: i 为城市; j 为指标; Z_{ij} 和 X_{ij} 分别为标准化值与原始值; $X_{ij}^{\max}$ 和 $X_{ij}^{\min}$ 分别为 j 指标的最大值与最小值; m 为样本城市数量; n 为生态韧性指标个数。

2) 计算 j 指标的信息熵 e_j ,确定 j 指标权重。

$$p_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^m Z_{ij}} \quad (4)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (5)$$

$$W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (6)$$

式中: p_{ij} 为 j 指标下 i 城市占该指标的比重; e_j 为信息熵; W_j 为 j 指标权重。

3) 根据各指标的标准化值与权重,利用线性加权法求得城市生态韧性综合评价值。

$$S_i = \sum_{j=1}^n Z_{ij} W_j \quad (7)$$

式中: S_i 为城市生态韧性综合评价值。

2.3.3 修正耦合协调度模型

耦合协调度模型能够解释绿色创新效率与生态韧性的耦合关系程度以及协调发展状况,然而传统的耦合协调度模型中的耦合度 C 未能均匀分布在 $[0, 1]$ 之间,导致耦合度解释效度降低,因此,本文采用王淑佳等人^[40] 提出的修正耦合协调度模型测度耦合协调度,公式如下:

$$C = \sqrt{\left[1 - \frac{\sum_{i>j} \sqrt{(U_i - U_j)^2}}{\sum_{m=1}^{n-1} m} \right]} \times \left(\prod_{i=1}^n \frac{U_i}{\max U_i} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (8)$$

$$T = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times U_i, \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (9)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (10)$$

式(8) ~ (10) 中: C 表示耦合度; U_i 和 U_j 分别表示绿色创新效率与生态韧性标准化后的值,且 $U_i \in [0, 1]$, $C \in [0, 1]$, C 值越低,各子系统越离散; T 表示综合协调指数; α_i 表示权重; D 表示耦合协调度,且 $D \in [0, 1]$ 。

当 $n = 2$ 时,假定 $\max U_i$ 为 U_2 ,

$$C = \sqrt{[1 - (U_2 - U_1)] \times \frac{U_1}{U_2}} \quad (11)$$

$$T = \alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2, \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (12)$$

本文认为2个子系统同等重要,因此 α_1 、 α_2 赋值相同,即 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 。借鉴相关研究成果^[41],将耦合度分为4个阶段:低度耦合阶段 $[0, 0.3)$ 、拮抗阶段 $[0.3, 0.5)$ 、磨合阶段 $[0.5, 0.8)$ 、高度耦合 $[0.8, 1.0]$ 。将耦合协调度分为5种类型:严重失调 $[0, 0.2)$ 、轻度失调 $[0.2, 0.4)$ 、一般协调 $[0.4, 0.6)$ 、良好协调 $[0.6, 0.8)$ 、优质协调 $[0.8, 1.0]$ 。

2.3.4 面板 Tobit 回归模型

由于耦合协调度取值为 $[0, 1]$,具有被截堵的特点,适用于受限因变量 Tobit 回归模型,因此选取面板 Tobit 模型来剖析黄河流域绿色创新效率与生态韧性间耦合协调的影响因素。借鉴前人研究^[15, 34],本文重点考察经济发展水平、产业结构、环境规制、城镇化水平、交通基础设施、对外开放程度、人力资本等因素对耦合协调度的影响,具体变量及说明见表3。

表 3 黄河流域城市绿色创新效率与生态韧性耦合协调度影响因素

Tab.3 The influencing factors of the coupled coordination degree of green innovation efficiency and ecological resilience in Yellow River Basin cities

变量类型	变量名称	变量符号	变量说明	单位
被解释变量	耦合协调度	D	修正耦合协调度模型计算结果	无量纲
	经济发展水平	EC	人均 GDP	元
	产业结构	IS	第二产业增加值占 GDP 的比重	%
解释变量	环境规制	ER	环境污染治理投资占 GDP 比重	%
	城镇化水平	URB	年末城镇人口/年末总人口	%
	交通基础设施	INF	人均道路面积	m ²
	对外开放程度	FDI	实际使用外资金额与 GDP 之比	%
	人力资本	TALE	普通高校在校学生数	人

作为城市发展的基础,经济发展水平直接影响绿色创新资源的投入与生态韧性建设的支撑能力,是影响绿色创新与生态韧性耦合协调的重要前提,选取人均 GDP 来表示^[7,32];产业结构反映工业化程度,高污染、高能耗的传统产业往往会对生态韧性造成较大压力,不利于绿色创新的发展,采用第二产业增加值占 GDP 的比重来表示^[10,33];环境规制体现了政府对环境保护的重视程度,通过政策手段引导绿色创新,促进生态环境改善,选择环境污染治理投资占 GDP 比重来说明^[15,38];城镇化进程中的资源集聚与配置效率提升,为绿色创新提供了更好的基础设施和市场环境,同时也对生态韧性提出更高要求,采用年末城镇人口占年末总人口的比重来表征^[14,33];交通基础设施的完善促进了区域间的绿色创新资源流动与信息共享,为绿色创新技术的推广和生态韧性的提升提供了物质基础,通过人均道路面积来体现^[7,38];对外开放通过引进外资和技术,促进绿色技术的国际交流与合作,但也需注意避免“污染天堂”现象,确保绿色创新效率与生态韧性的协同提升,通过实际使用外资金额与 GDP 之比来表征^[11,27];人力资本是绿色创新活动的核心驱动力,其数量和质量直接影响到绿色技术的研发与应用,也是提升生态韧性治理能力的重要基础,选取普通高校在校学生数来表示^[10]。

面板 Tobit 回归模型具体设定如下:

$$D_{it} = \alpha + \beta_1 \ln(EC_{it}) + \beta_2 IS_{it} + \beta_3 ER_{it} + \beta_4 URB_{it} + \beta_5 INF_{it} + \beta_6 FDI_{it} + \beta_7 \ln(TALE_{it}) + \varepsilon_{it}$$

(13)

式中: D_{it} 为耦合协调度; i 表示城市; t 表示时间; α 为常数项; $\beta_1 \sim \beta_7$ 表示各解释变量的偏回归系数; EC_{it} 表示经济发展水平; IS_{it} 表示产业结构;

ER_{it} 表示环境规制; URB_{it} 表示城镇化水平; INF_{it} 表示交通基础设施; FDI_{it} 表示对外开放程度; $TALE_{it}$ 表示人力资本; ε_{it} 是随机扰动项。为保证数据平稳,削弱变量间共线性问题对回归结果的影响,本研究对模型中经济发展水平和人力资本 2 个指标进行对数化处理。

2.4 数据来源

本文数据主要来源于《中国城市统计年鉴(2011—2021 年)》《中国城市建设统计年鉴(2010—2020 年)》以及各地级市相应年份的统计年鉴和统计公报。归一化植被指数(NDVI)为 1 km 分辨率 NDVI 数据,来源于美国航空航天局(NASA)的 MOD13A3 数据集(<https://search.earthdata.nasa.gov>)。PM_{2.5} 数据来源于哥伦比亚大学社会经济数据与应用中心。对于受价格因素影响的数据,统一以 2010 年为基期进行消胀处理。部分缺失数据利用年均增速进行插值法补充。此外,由于 2019 年莱芜市被划入济南市,为保持统计口径的一致性,将 2010—2018 年原莱芜市数据合并至济南市。

3 结果及分析

3.1 绿色创新效率与生态韧性时空演变分析

基于黄河流域城市绿色创新效率与生态韧性评价指标体系,采用考虑非期望产出的 Super-SBM 模型和熵权法分别测算了 2010—2020 年绿色创新效率和生态韧性的综合指数。同时,本文利用 ArcGIS 10.8 软件分别对 2010、2015、2020 年黄河流域 78 个地级市的绿色创新效率、生态韧性进行空间可视化。以 2010 年为基期,将城市绿色创新效率依次划分为低效率、中低效率、中高效

率、高效率;将城市生态韧性依次划分低韧性、中低韧性、中高韧性、高韧性。

整体来看,黄河流域 2010、2015、2020 年绿色创新效率均值分别为 0.579、0.655、0.642,整体

效率水平较低,但呈现良好发展态势。由图 3 可知,自 2010 年以来,黄河流域城市绿色创新效率呈不同幅度的上升趋势,整体呈现出“上游 < 中游 < 下游”的分布格局。

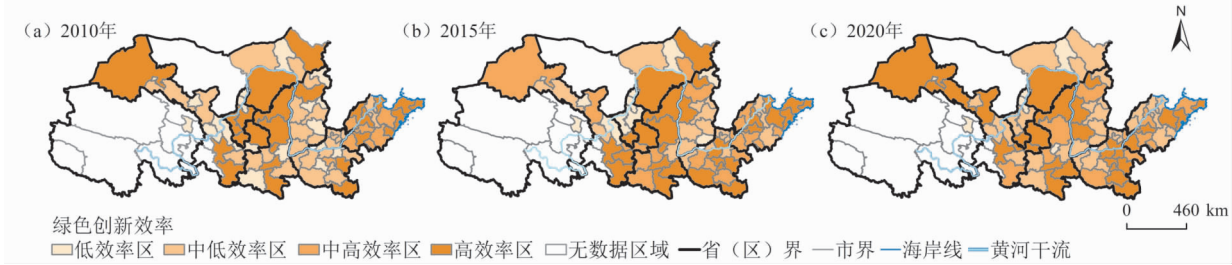


图 3 黄河流域城市绿色创新效率时空演化

Fig. 3 The spatio-temporal evolution of urban green innovation efficiency in the Yellow River Basin

具体来看,2010 年,黄河流域城市绿色创新效率以中低及以下为主导,达到中低及以下效率的城市有 46 个,占比达 59%。其中,高效率城市集聚效应明显,形成以西安、榆林、鄂尔多斯为代表的中上游集聚区和以济南、青岛为核心的山东半岛城市群 2 个集聚高地,充足的经济和科技等储备支撑了其绿色创新的发展。而低效率城市在全流域零散分布,其中,西宁、兰州、包头、银川、太原等城市发展方式低质低效,付出了较大的环境代价。2015 年,黄河流域绿色创新效率增长明显,达到中高效率及以上的城市增长至 48 个,成为主要类型,占比达 62%。其中,山西、河南效率提升最为明显,低效率的城市减少至 12 个,仍呈零散布局状态。2020 年,黄河流域绿色创新效率

相较 2015 年有轻微下降,中高效率以上的城市减至 39 个,低效率城市集中分布于上游的西宁、银川、包头等城市,这些城市面临着创新发展与生态保护的双重压力。相较中下游地区,上游地区经济基础薄弱、产业结构单一、人才和技术资源有限、环保意识薄弱,导致环境污染问题较为突出,绿色创新动力不足。

黄河流域 2010、2015、2020 年城市生态韧性均值分别为 0.295、0.281、0.330,整体呈先下降后上升的波动增长趋势。由图 4 可知黄河流域大多数城市生态韧性得到不同程度的增长,由低韧性上升为中等韧性(中低、中高韧性),并向高韧性水平攀升,整体呈现出“东高西低、南高北低”的连片集聚特征。

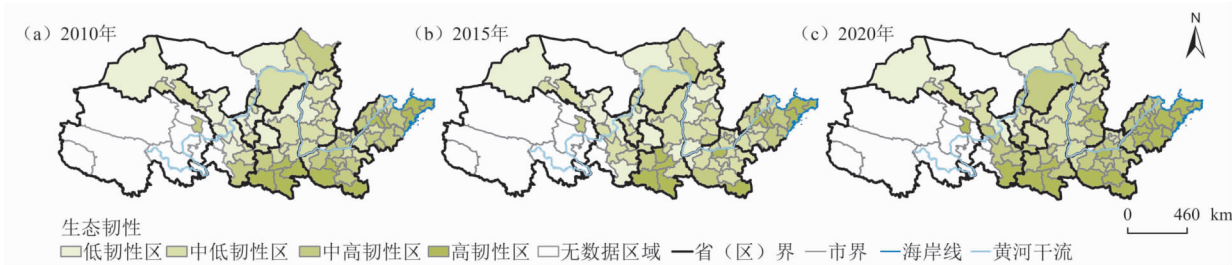


图 4 黄河流域城市生态韧性时空演化

Fig. 4 The spatio-temporal evolution of urban ecological resilience in the Yellow River Basin

具体来看,2010 年,黄河流域以中低韧性类型为主,占城市总数的 38.5%,中高及以上韧性区主要集聚于中游的陕南地区 and 下游的山东、河南等地区,形成韧性集聚带。相反,上游地区的兰州、嘉峪关、中卫等城市在经济发展中资源过度消耗与环境污染加剧,对生态系统带来较大压力,形成低韧性区。而西安、济南、青岛等城市凭借优化的产业结构、较低的环境污染及良好的生态基底,

展现出较高的生态韧性水平。2015 年,黄河流域城市生态韧性水平总体呈现下降趋势,中低及以下韧性区扩散显著,占比由 59.0% 攀升至 71.8%,而较高及以上韧性区显著缩减,城市数量缩减为 22 个。其中,河南省尤为突出,韧性下降最为显著,可能归因于资源约束趋紧、环境污染严峻、突发环境事件高发频发等,削弱了其生态系统抵抗力与适应力。2020 年,黄河流域城市生态韧

性整体水平大幅回弹,中高及以上韧性城市数量增至 50 个,占比达 64.1%,集聚于中下游地区且呈连绵扩散趋势。近年来,中下游地区通过有效的污染治理和生态修复措施,生态韧性恢复力大幅提升。相比之下,中低韧性城市数量减至 35.9%,其中,低韧性城市仅剩 7 个,且均位于上游区域。上游地区受干旱气候、脆弱生态系统及长期过度开发影响,生态恢复面临重大挑战。

3.2 绿色创新效率与生态韧性耦合协调分析

3.2.1 耦合协调度的时序变化特征分析

采用修正耦合协调度模型,首先计算得出 2 个系统的耦合度 C 值,为进一步反映 2 个系统的协调程度,计算协调度 D 值,并取全流域年均值反映黄河流域整体情况(见图 5)。由结果可知,2010—2020 年黄河流域城市绿色创新效率与生态韧性的耦合度与协调度均呈上升趋势,其中,耦合度均值 $C \in [0.659, 0.703]$,整体处于磨合阶段,并向高度耦合阶段迈进,这表明绿色创新效率与生态韧性之间联系紧密,绿色创新效率的提高会促进生态韧性的提升,而生态韧性的提高也为绿色创新活动提供良好的创新环境。协调度均值 $D \in [0.443, 0.503]$,整体处于一般协调状态,向

良好协调水平迈进,这表明随着黄河流域对新发展理念贯彻、生态文明建设的推进以及对生态保护与高质量发展的高度重视,两者协调发展势头良好,但仍有较大提升空间。

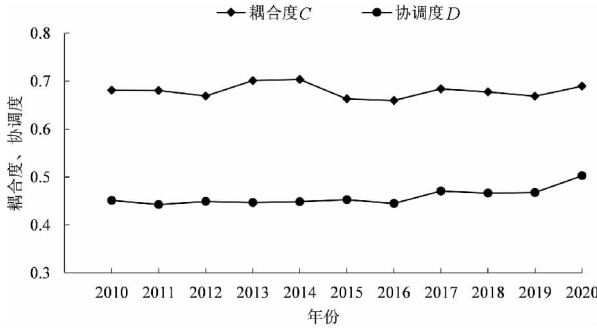


图 5 2010—2020 年绿色创新效率与生态韧性耦合度及协调度均值

Fig. 5 Mean values of coupling and harmonization of green innovation efficiency and ecological resilience in 2010—2020

3.2.2 耦合协调度的空间演变特征分析

为进一步探究耦合协调度的空间演变特征,选取 2010、2015、2020 年为时间节点,根据耦合协调度分类标准,借助 ArcGIS 10.8 软件对其进行空间可视化,得出耦合协调度空间分布图(见图 6)。

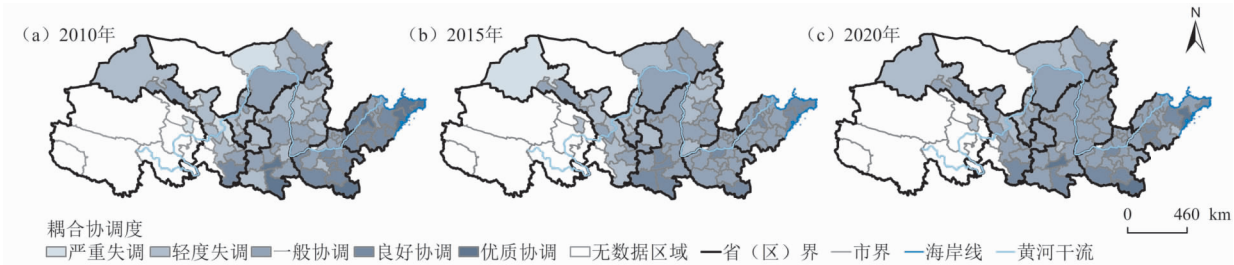


图 6 黄河流域城市绿色创新效率与生态韧性的耦合协调度时空演化

Fig. 6 The spatio-temporal evolution of coupling coordination degree between urban green innovation efficiency and ecological resilience in the Yellow River Basin

总体来看,2010—2020 年黄河流域绿色创新效率与生态韧性耦合协调度水平较低,以一般协调型为主,并显示出明显的空间差异性,呈现出“上游-中游-下游”的阶梯式递增的特征。具体来看,2010 年:黄河流域以一般协调类型为主,共 42 个城市,占比达 53.8%;而轻度失调的城市有 24 个,占比 30.8%,主要位于中上游地区,严重失调的地区包含上游的嘉峪关、金昌、白银 3 个城市;达到良好协调城市有 9 个,以西安、信阳、济南、青岛等城市为代表,零散分布于中下游地区。2015 年,流域内各城市绿色创新效率与生态韧性耦合协调度得到一定程度的提高:一般协调城市增至

47 个,占比 60.3%;轻度失调城市减至 20 个,占比 25.6%,仍集中分布在中上游地区;而严重失调城市仅剩上游的酒泉市,下游的郑州提升明显,迈入良好协调发展型。2020 年,黄河流域绿色创新效率与生态韧性耦合协调度提升明显,无严重失调城市,一般协调城市增至 52 个,占比 66.7%,失调城市得到大幅缩减,轻度失调城市减至 13 个,良好协调及以上城市仍集中分布于中下游地区,其中,西安、青岛、信阳率先跨入优质协调类型。

研究期内,黄河流域达到一般协调及以上水平的城市数量递增,失调城市数量递减,反映绿色

创新效率与生态韧性协调发展趋势向好,但区域间耦合协调发展仍有较大潜力。中下游地区因经济发达、创新资源丰富、技术实力强,绿色创新水平较高,且环境治理投入大,生态韧性增强,两者良性互动促进了高协调发展水平。相较之下,上游地区受绿色创新投入规模的限制,绿色创新水平低,同时,脆弱的生态环境制约着生态韧性的提升,耦合协调发展面临挑战。

4 城市绿色创新效率与生态韧性耦合协调的影响因素分析

为剖析黄河流域城市绿色创新效率与生态韧性耦合协调的影响因素,构建 78 个城市 2010—2020 年的面板数据,运用 Stata 17.0 软件进行回归分析,表 4 的回归结果显示不同变量对耦合协调度的影响效应差异明显。

1) 经济发展水平 [ln(EC)] 在 1% 的显著性

表 4 耦合协调度影响因素回归模型估计结果

Tab. 4 Estimated results of the regression model of factors influencing the coupling coordination degree

变量	相关系数	标准误	Z 统计值	p 值
经济发展水平 [ln(EC)]	0. 045 6***	0. 014 7	3. 10	0. 002
产业结构 (IS)	-0. 001 8***	0. 000 4	-4. 09	0. 000
环境规制 (ER)	-0. 000 2	0. 006 7	-0. 03	0. 973
城镇化水平 (URB)	-0. 001 3***	0. 000 4	-3. 62	0. 000
交通基础设施 (INF)	0. 001 4***	0. 000 5	2. 66	0. 008
对外开放程度 (FDI)	0. 003 5*	0. 002 1	1. 67	0. 095
人力资本 [ln(TALE)]	0. 030 9***	0. 004 5	6. 85	0. 000

注:***、**、* 分别代表在 1%、5%、10% 水平上通过显著性检验。

4) 城镇化水平 (URB) 在 1% 的显著性水平下对耦合协调度产生负向影响,随着城镇化的快速发展,黄河流域城市的人口与经济活动集聚程度增加,可以加快技术进步与创新,进而提升绿色创新效率,但同时也会导致资源的过度消耗,还会引发空气、土壤、水的污染,降低城市的生态韧性,阻碍了绿色创新与生态韧性的协调发展。

5) 交通基础设施 (INF) 在 1% 的显著性水平下对耦合协调度具有正向影响。一方面,交通条件的改善加快了区域间物流、信息流的速度,促进创新要素的流动,从而提高绿色创新效率;另一方面,良好的交通基础设施提高了城市应对环境变化和自然灾害的能力,进而提升城市生态韧性。

6) 对外开放程度 (FDI) 在 10% 的显著性水平

水平下对绿色创新效率与生态韧性的耦合协调发展具有正向影响,表明经济发展水平较高的地区有更多的资源和科技水平进行绿色创新与生态保护,从而促进绿色创新与生态韧性的协调发展。

2) 产业结构 (IS) 中第二产业的占比在 1% 的显著性水平下对耦合协调度呈现负向作用,黄河流域大多数城市处于工业化中期阶段,在工业化过程中伴随着较高的资源消耗和环境污染,对生态系统造成较大压力,阻碍了绿色创新与生态韧性的协调发展。因此推动黄河流域绿色、低碳、循环发展,优化产业结构、推动绿色技术创新,成为推动黄河流域绿色创新效率与生态韧性的耦合协调发展主要方向。

3) 环境规制 (ER) 对耦合协调度具有负向影响,但未通过显著性检验,这可能由于环境规制是一个长期且复杂的过程,其效应往往具有一定的滞后性,因此在短期内效果并不明显,未来需提高环境规制效率。

下对绿色创新效率与生态韧性的耦合协调度具有正向作用,表明外商投资对黄河流域各城市有着显著的“污染光环效应”,外商投资能够通过技术溢出和知识扩散,为黄河流域带来先进的生产技术、清洁技术和管理经验,提高绿色创新效率,减少环境污染,提升生态韧性。

7) 人力资本 [ln(TALE)] 在 1% 的显著性水平下对耦合协调度呈现正向作用,高等教育的发展能提升人力资本水平,成为绿色创新效率与生态韧性协调发展的内生推动力。人力资本的积累激发技术创新,助力绿色创新技术的突破,引领经济绿色低碳转型。同时具备环保意识 and 技能的高素质创新型人才更有可能采取积极措施来保护和修复生态系统,从而提高生态韧性,最终推动绿色

创新与生态韧性的协调发展。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文采用 Super-SBM 模型和熵权法测度了黄河流域城市绿色创新效率与生态韧性的水平,并利用修正耦合协调度模型、Tobit 回归模型进一步对耦合协调时空演变及影响因素进行分析,结论如下。

1)2010—2020 年黄河流域城市绿色创新效率呈现出随时间演化而波动上升态势,空间上呈现出“上游 < 中游 < 下游”的格局。城市生态韧性整体呈现先下降后上升的增长态势,空间上呈现出“东高西低、南高北低”的连片集聚特征。

2)2010—2020 年黄河流域绿色创新效率与生态韧性的耦合度整体上处于磨合阶段,协调度水平较低,整体处于一般协调状态。从时间变化来看,黄河流域绿色创新效率与生态韧性之间的耦合度与协调度均呈上升趋势,耦合协调发展水平不断提高。从空间格局来看,耦合协调度空间差异性显著,呈现出“上游-中游-下游”的阶梯式递增特征,仅西安、青岛、信阳达到优质协调水平。

3)黄河流域绿色创新效率与生态韧性的耦合协调度受到多种因素的影响,不同影响因素对耦合协调度的影响效应差异明显。其中:经济发展水平、交通基础设施、对外开放程度、人力资本对绿色创新效率与生态韧性的耦合协调度具有显著的正向作用;产业结构、城镇化水平对耦合协调度具有显著的负向影响;环境规制对耦合协调度具有负向影响,但影响不显著。

5.2 讨论

1)城市绿色创新效率与生态韧性事关黄河流域生态保护和高质量发展,两者的耦合协调发展至关重要。其中,绿色创新效率所得结论与许玉洁等人^[7]研究结果存在一定差异,主要由于指标体系的构建及测度方法的差异所致。生态韧性所得结论与张明斗等人^[38]研究一致,流域内生态韧性空间差异显著。本文对城市绿色创新效率与生态韧性的耦合协调机理、时空演变及影响因素进行了探索,能在一定程度上丰富绿色创新与生态韧性领域的相关研究,有助于加深对两者之间关系的认识。

2)本研究也存在提升以下空间:①对两者间

耦合协调度影响因素的选取侧重于社会经济方面的影响,未来应当考虑自然环境相关因素对两者协调发展的作用;②由于数据获取限制、统计口径差异等原因,可能导致研究结果不够全面,未来研究可将相关数据更新至最新年份,同时利用预测模型对耦合协调发展趋势做进一步分析。

参考文献

- [1] 马淑芹,许超,夏瑞,等. 协同推进黄河流域生态保护治理的问题、挑战与建议[J]. 环境保护, 2023, 51(22): 10-13.
- [2] 彭文斌,苏欣怡,杨胜苏,等. 环境规制视角下城市绿色创新时空演变及溢出效应[J]. 地理科学, 2023, 43(1): 41-49.
- [3] LI D, YANG W P, HUANG R Y. The multidimensional differences and driving forces of ecological environment resilience in China[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 98: 106954.
- [4] 杨云超,刘笑男,刘伟. 中国城市科技创新竞争力国际比较研究[J]. 科技管理研究, 2022, 42(23): 104-111.
- [5] 邹蔚,王兴宇,万凤娇,等. 城市韧性与科技创新水平耦合协调发展研究:以长三角城市群为例[J]. 生态经济, 2024, 40(1): 78-87.
- [6] FUSSLER C, JAMES P. Driving eco-innovation: A breakthrough discipline for innovation and sustainability[M]. London: Pitman, 1996.
- [7] 许玉洁,刘曙光. 黄河流域绿色创新效率空间格局

- 演化及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2022, 37(3): 627-644.
- XU Y J, LIU S G. Spatial pattern evolution and influencing factors of green innovation efficiency in the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 627-644.
- [8] 肖黎明, 张仙鹏. 强可持续理念下绿色创新效率与生态福利绩效耦合协调的时空特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(2): 312-324.
- XIAO L M, ZHANG X P. Spatio-temporal characteristics of coupling coordination between green innovation efficiency and ecological welfare performance under the concept of strong sustainability[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(2): 312-324.
- [9] 葛世帅, 曾刚, 杨阳, 等. 基于 DEA-Malmquist 和 Tobit 模型的长三角城市群绿色创新绩效研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(4): 738-749.
- GE S S, ZENG G, YANG Y, et al. Research on green innovation performance of Yangtze River Delta urban agglomerations based on DEA-Malmquist and Tobit model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(4): 738-749.
- [10] 董会忠, 李旋, 张仁杰. 粤港澳大湾区绿色创新效率时空特征及驱动因素分析[J]. 经济地理, 2021, 41(5): 134-144.
- DONG H Z, LI X, ZHANG R J. Spatial-temporal characteristics and driving factors of green innovation efficiency in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Economic Geography, 2021, 41(5): 134-144.
- [11] 鲍涵, 滕堂伟, 胡森林, 等. 长三角地区城市绿色创新效率空间分异及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(2): 273-284.
- BAO H, TENG T W, HU S L, et al. Spatial differentiation and influencing factors of urban green innovation efficiency in Yangtze River Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(2): 273-284.
- [12] 王星, 苏志, 赵文娜. 城市绿色创新效率的区域差异、动态演进及收敛性研究: 以黄河流域沿线城市为例[J]. 城市问题, 2022(12): 30-41.
- WANG X, SU Z, ZHAO W N. Regional differences, dynamic evolution and convergence analysis of green innovation efficiency in the Yellow River Basin[J]. Urban Issues, 2022(12): 30-41.
- [13] 孙勇, 樊杰, 孙中瑞, 等. 黄河流域绿色技术创新时空格局及其影响因素分解[J]. 生态经济, 2022, 38(5): 60-67.
- SUN Y, FAN J, SUN Z R, et al. Temporal and spatial pattern of green technology innovation and its influencing factors in the Yellow River Basin[J]. Ecological Economy, 2022, 38(5): 60-67.
- [14] 孙燕铭, 谌思邈. 长三角区域绿色技术创新效率的时空演化格局及驱动因素[J]. 地理研究, 2021, 40(10): 2743-2759.
- SUN Y M, SHEN S M. The spatio-temporal evolutionary pattern and driving forces mechanism of green technology innovation efficiency in the Yangtze River Delta region[J]. Geographical Research, 2021, 40(10): 2743-2759.
- [15] 陈蓓, 彭文斌, 刘奕飞. 长江中游城市群绿色创新效率的时空演变与驱动因素[J]. 经济地理, 2022, 42(9): 43-49.
- CHEN B, PENG W B, LIU Y F. Spatio-temporal evolution and driving factors of green innovation efficiency of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Economic Geography, 2022, 42(9): 43-49.
- [16] 赵林, 高晓彤, 吴殿廷. 黄河流域绿色技术创新空间关联网络结构与影响因素[J]. 人文地理, 2023, 38(4): 102-111.
- ZHAO L, GAO X T, WU D T. Spatial correlation network and influencing factors of green technology innovation in Yellow River Basin[J]. Human Geography, 2023, 38(4): 102-111.
- [17] 滕堂伟, 潘雅君, 王胜鹏, 等. 长三角地区城市绿色创新效率网络空间结构演化及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(7): 1335-1348.
- TENG T W, PAN Y J, WANG S P, et al. Evolution and driving factors of spatial network structure of green innovation efficiency in Yangtze River Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(7): 1335-1348.
- [18] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973(4): 1-23.
- [19] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1717-1731.
- ZHAO R D, FANG C L, LIU H M. Progress and prospect of urban resilience research[J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1717-1731.
- [20] MOORES J P, YALDEN S, GADD J B, et al. Evaluation of a new method for assessing resilience in urban aquatic social-ecological systems[J]. Ecology and Society, 2017, 22(4): 1-15.
- [21] SUÁREZ M, GÓMEZ-BAGGETHUN E, BENAYAS J,

- et al. Towards an urban resilience index: A case study in 50 Spanish cities[J]. *Sustainability*, 2016, 8(8): 774.
- [22] SUÁREZ M, RIEIRO-DIAZ A M, ALBA D, et al. Urban resilience through green infrastructure: A framework for policy analysis applied to Madrid, Spain [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2024, 241: 104923.
- [23] AFRYANIE D, JULIAN M M, RIQQI A, et al. Re-framing urban green spaces planning for flood protection through socio-ecological resilience in Bandung City, Indonesia[J]. *Cities*, 2020, 101: 102710.
- [24] 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 C Y, DONG Z Y Z, CHEN B. Spatio-temporal analysis and simulation of urban ecological resilience: A case study of Hangzhou[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1): 116-126.
- [25] 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 S, DO L H, ZOU Z L. Assessment of ecological resilience in Nanchang based on "risk-connectivity-potential" [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(3): 733-741.
- [26] 曾凡盛,冯兴华,唐燕,等. 鄱阳湖流域县域生态韧性空间格局演变研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2022, 38(6): 29-35.
- ZENG F S, FENG X H, TANG Y, et al. Evolution of ecological resilience space pattern at county level in Poyang Lake Basin[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2022, 38(6): 29-35.
- [27] 吕添贵,胡晗,付舒斐,等. 长三角地区城市生态韧性时空分异特征及影响因素[J]. *地域研究与开发*, 2023, 42(1): 54-60.
- LYU T G, HU H, FU S F, et al. Spatio-temporal differentiation and influencing factors of urban ecological resilience in the Yangtze River Delta[J]. *Areal Research and Development*, 2023, 42(1): 54-60.
- [28] 杨丽莎,陈妍,谢会强. 黄河流域城市群生态韧性的时空格局与驱动因素分析[J]. *生态经济*, 2024, 40(2): 99-108.
- YANG L S, CHEN Y, XIE H Q. Spatio-temporal patterns and driving factors of ecological resilience in urban agglomerations in the Yellow River Basin[J]. *Ecological Economy*, 2024, 40(2): 99-108.
- [29] 王文慧,钟业喜,马宏智,等. 鄱阳湖水陆交错带生态韧性时空变化及影响因素[J]. *生态学报*, 2023, 43(22): 9514-9526.
- WANG W H, ZHONG Y X, MA H Z, et al. Spatio-temporal variations and influencing factors of ecological resilience in the aquatic-terrestrial ecotone of Poyang Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(22): 9514-9526.
- [30] 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 S M, NIU J L. Dynamic evolution and obstacle factors of urban ecological resilience in Shandong Peninsula urban agglomeration[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(8): 51-61.
- [31] 李加林,张旖芯,张海涛,等. 基于“潜力-弹性-稳定性”模型的温州市生态韧性时空变化及影响因素研究[J]. *生态学报*, 2024, 44(8): 3253-3267.
- LI J L, ZHANG Y X, ZHANG H T, et al. The research of spatio-temporal characteristics and influence factors of Wenzhou ecological resilience based on the potential-elastic-stability model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(8): 3253-3267.
- [32] 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 J Y, DONG P, LU Y Q. 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.
- [33] 王松茂,牛金兰. 黄河流域城市生态韧性时空演变及其影响因素[J]. *生态学报*, 2023, 43(20): 8309-8320.
- WANG S M, NIU J L. Spatio-temporal evolution and influencing factors of urban ecological resilience in the Yellow River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(20): 8309-8320.
- [34] 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 S J, CUI Z T, LIN J J, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4): 973-991.
- [35] 王松茂,牛金兰. 山东省旅游经济与城市生态韧性协同演化研究[J]. *地理学报*, 2023, 78(10): 2591-2608.
- WANG S M, NIU J L. Co-evolution of tourism economy and urban ecological resilience in Shandong Prov-

ince[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(10): 2591-2608.

[36] 张卓群,姚鸣奇,张晓慧. 水生态文明城市建设试点对水生态韧性的影响研究[J]. *城市问题*, 2023(10):45-53.

ZHANG Z Q, YAO M Q, ZHANG X H. Analysis of the impacts and mechanisms of the pilot project of water ecological civilization city construction on water ecological resilience[J]. *Urban Problems*, 2023(10): 45-53.

[37] 陈明星,先乐,王朋岭,等. 气候变化与多维度可持续城市化[J]. *地理学报*, 2021, 76(8):1895-1909.

CHEN M X, XIAN L, WANG P L, et al. Climate change and multi-dimensional sustainable urbanization[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(8): 1895-1909.

[38] 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 M D, REN Y T, ZHOU L. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of urban ecological resilience in the Yellow River Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(3): 445-454.

[39] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1):32-41.

[40] 王淑佳,孔伟,任亮,等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(3): 793-810.

WANG S J, KONG W, REN L, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(3): 793-810.

[41] 葛世帅,曾刚,杨阳,等. 黄河经济带生态文明建设与城市化耦合关系及空间特征研究[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1):87-102.

GE S S, ZENG G, YANG Y, et al. The coupling relationship and spatial characteristics analysis between ecological civilization construction and urbanization in the Yellow River Economic Belt[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 87-102.

(编辑 李 静)