

李恒吉,蒙鹏,巩子祯,等.黄河流域城市韧性综合评价及驱动因素研究[J].中国沙漠,2026,46(4):34-47.

黄河流域城市韧性综合评价及 驱动因素研究

李恒吉¹, 蒙 鹏¹, 巩子祯², 赵雪雁³

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 云南丽江玉龙雪山冰冻圈与可持续发展国家野外科学观测研究站, 甘肃兰州 730000; 2.兰州交通大学 建筑与城市规划学院, 甘肃兰州 730070; 3.西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 黄河流域作为中国重要的生态屏障和经济带,其城市发展面临着生产、生活、生态(三生)空间失衡与韧性不足的双重挑战。本文基于“三生”视角构建了黄河流域城市韧性综合评价框架,利用CRITIC综合指数、全局自相关指数和冷热点分析方法及地理探测器对黄河流域73个城市的韧性水平、空间集聚状况和驱动因素进行测算分析,深入探究黄河流域城市韧性发展状态及水平,并识别其主要驱动因素。结果表明:(1)2000—2023年,黄河流域城市韧性呈现波动上升态势,但整体水平较低,存在较大提升空间。下游区域城市韧性整体优于中游和上游,呈现出东高西低、逐级降低的空间分布格局。(2)黄河流域城市韧性在空间位置上具有明显的集聚分布特征,热点区域集中分布在黄河流域下游区域,冷点区域集中分布在黄河流域中上游区域。(3)各项探测因子对黄河流域城市韧性影响程度差异较大,地区生产总值(GDP)和当年实际使用外资金额的影响作用最强,科学技术支出占公共预算支出比重和城镇化率次之,年降水量影响程度最弱。各驱动因素在其演化过程中存在交互作用,表现为不同程度的双因子增强或非线性增强。地区经济基础和科技教育与其他因素的交互影响能力最强,城市规模和空间承载能力次之。

关键词: “三生”理念; 城市韧性; CRITIC综合指数; 地理探测器; 黄河流域

文章编号: 1000-694X(2026)04-034-14

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00182

中图分类号: F290

文献标志码: A

0 引言

黄河流域是保障国家生态安全、粮食安全与能源安全的战略要地,也是承载多元文化传承与城乡融合发展的核心区域^[1]。然而,随着快速城镇化和工业化的进程,黄河流域城市发展面临着生产、生活、生态(三生)空间失衡与韧性不足的双重挑战。生产空间受传统重工业路径依赖制约,产业结构性矛盾突出,全流域产业韧性呈现中游塌陷、边缘弱化的分异特征^[2];生态空间因土地过度开发导致流域整体景观连通性下降,上游水源涵养区土壤保持服务低值区集中且呈现跨流域溢出效应,中下游城市扩张与生态保护冲突加剧,环境规制效率中心-边缘梯度差异较大,水土流失、荒漠化、湿地萎缩、生物多样性锐减等问题依然严峻^[3];生活空间则由于城镇化发展,加剧了城市供水安全、环境污染、公

共服务、住房保障及交通拥堵等压力,人居环境建设与资源承载力深度失衡,流域上中下游、城市群发展不协调问题突出^[4]。“三生”空间的碎片化、相互挤压以及发展模式的不协调,致使城市基础设施韧性薄弱,经济系统韧性有待增强,社会系统韧性存在短板,生态系统韧性脆弱,直接削弱了城市抵御外部风险的能力,构成了其韧性不足的根源。《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》(2021年)明确提出将韧性城市建设纳入流域治理框架。在此背景下,开展“三生”视角下黄河流域城市韧性评价研究,能够为制定差异化的城市韧性提升策略提供决策支撑,助力实现黄河流域生态保护和高质量发展战略目标。

“三生”理念是在“三生”空间研究基础上提升的一种生产、生活、生态协调可持续发展的理念。目前,黄河流域“三生”理念的相关研究集中在空间

分类与识别^[5]、空间功能评价与格局演变^[6]、空间演化与耦合协调^[7]等方面。也有研究基于“三生”视角开展黄河流域城市高质量发展^[8]、综合承载力^[9]和人居环境转变^[3]方面的研究。普遍采用熵值法^[10]、熵权 TOPSIS 法^[11]、耦合协调度模型^[12]、FLUS 模型^[13]及地理信息技术方法^[14]进行分析。而城市韧性内涵的核心在于城市应对不确定扰动的响应与应对能力^[15]。黄河流域城市韧性的研究主要围绕城市经济、社会、生态和基础设施4个维度,聚焦城市韧性的抵抗-适应-转型能力,构建涵盖生态韧性、经济韧性、社会韧性和基础设施(工程)韧性的指标体系,针对单一维度^[16]、双重维度^[17]和多维度综合评价^[18]开展研究,但评价指标体系偏向普适性,与区域特色结合不够紧密,且对韧性内部各维度间的相互作用机制及跨尺度传导机制解释能力较弱。采用综合指数法^[19]、熵权 TOPSIS 法^[20]、PSR 模型^[21]、DPSIR 模型^[22]进行城市韧性计算分析。在影响因素方面,普遍采用地理探测器^[23]、地理加权回归(GWR)^[24]、结构方程模型(SEM)^[25]、灰色关联度分析(GRA)^[26]、空间杜宾模型^[27]、障碍度模型^[28]等方法对经济发展水平、城镇化率、环境规制、产业结构和科技创新等因素对城市韧性的影响状况进行分析。

“三生”理念与城市韧性理论相结合,能够为理解和评价城市韧性提供更全面、更具地域特色的分析框架。在“三生”空间视角下,城市韧性表现为城市系统在生产、生活、生态3个相互关联、相互作用的维度上,所展现出的抵御、适应和转型能力。生产空间是城市经济活动的载体,关系到城市的经济基础和就业吸纳能力。生产韧性则关注城市经济生产系统在面对外部冲击(如经济危机、市场剧烈波动、供应链中断等)时,能够维持其运行、恢复生产、并实现结构优化与升级的能力。生活空间是城市居民居住、交往、消费和享受公共服务的场所。生活韧性则关注城市居民生活系统在面对各类风险(如公共卫生事件、基础设施故障、社会服务中断等)时,能够保障居民基本生活需求、公共安全、社会服务供给和社会福祉的能力,涵盖社会组织的稳定性、基础设施的可靠性、公共服务的可及性、居民的健康与安全及社会公平与包容。生态空间是城市赖以生存的自然基础,生态韧性则关注城市及其周边生态系统在面对环境压力(如环境污染、气候

变化、生物多样性丧失等)时,能够维持其结构、功能、过程和自组织能力,并具备自我修复与恢复的能力。生态空间包括绿地、水体、土壤、大气等自然要素及其相互作用。高生态韧性意味着城市能够有效净化环境、调节气候、涵养水源、维持生物多样性,为生产和生活提供安全的环境保障。

综上所述,本文的主要工作和边际贡献在于:①充分考虑城市韧性与“三生”空间两者之间既相互依存又对立统一的特殊关系,从城市韧性的多维角度出发,构建涵盖生产-生活-生态3个方面的黄河流域城市韧性综合评价指标体系,紧密结合黄河流域城市发展特色和生态保护与高质量发展要求;②利用CRITIC综合指数对黄河流域73个城市的韧性水平进行定量测算,并对生产-生活-生态三大系统韧性状况进行深入分析,探究韧性内部各维度相互作用机制及跨尺度传导机制;③利用全局自相关指数和冷热点分析方法展示各城市韧性空间集聚状况和演变特征,利用地理探测器揭示其影响机制。目的在于拓展城市韧性研究理论体系,为推动黄河流域乃至中国城市高质量发展提供理论支撑。

1 数据与方法

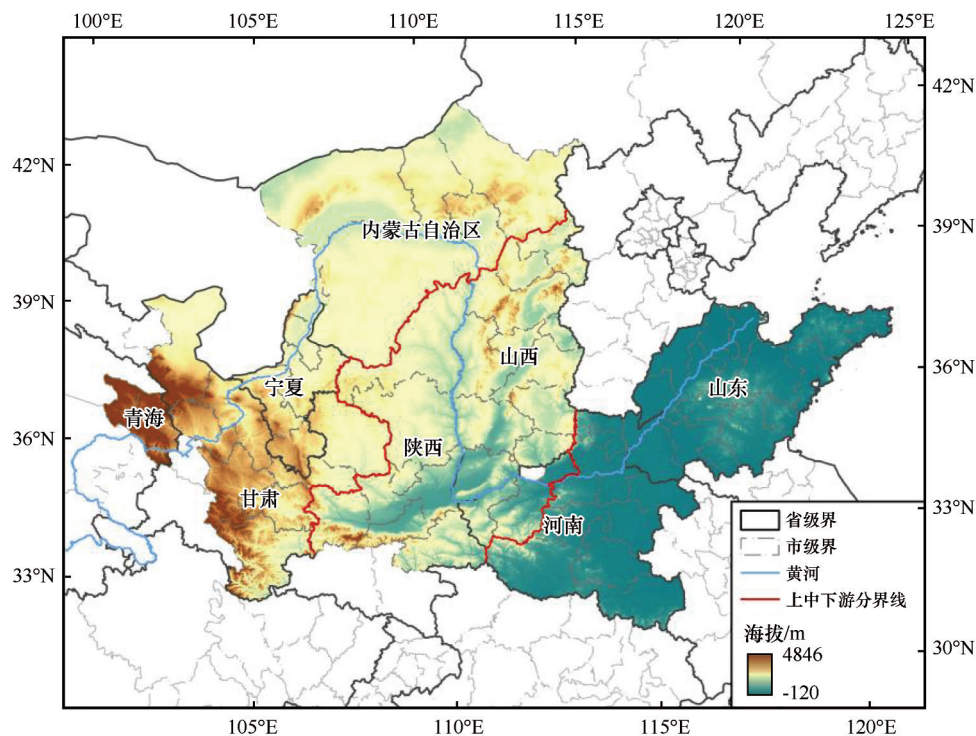
1.1 研究区概况

研究区范围参考《黄河流域综合规划(2012—2030年)》《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》及相关文献^[29]。选取黄河流域范围包括青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东8个省(自治区)的73个城市(图1)。

1.2 指标体系构建及数据来源

1.2.1 城市韧性综合评价指标体系

本文基于“三生”理念结合“韧性”概念,考察城市系统在生产活动、居民生活和社会交往、生态环境维持与修复基本功能层面上,抵御、适应和转型能力的综合体现。借鉴其他学者研究成果^[15,30],结合黄河流域城市的特性及数据获取情况,构建黄河流域城市韧性综合评价指标体系(表1)。生产韧性:衡量城市系统在维持和发展经济生产活动过程中,应对外部冲击(如市场波动、资源约束等)并保持经济活力与结构弹性的能力。不仅包括经济增长,更侧重于经济结构的优化、生产效率的提升以



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改

图1 研究区概况

Fig.1 Overview map of the study area

及应对经济风险的内在机制^[24,31]。生态韧性:关注城市生态系统在外部干扰(如环境污染、气候变化等)下维持其结构、功能和恢复力的能力。强调城市环境的自我调节能力、污染物的处理能力、生态系统的健康程度及对环境压力的适应和恢复水平^[18,32]。生活韧性:关注城市系统在应对各种风险(如公共卫生事件、基础设施故障等)时,保障居民基本生活需求、社会服务供给、公共安全及居民福祉的能力。强调社会的稳定、公共服务的可及性、基础设施的可靠性及居民的适应与恢复能力^[31,33]。

1.2.2 城市韧性驱动因素

基于已有研究成果^[33],从自然表征、科技教育、经济基础、城市建设、空间承载、城市发展和经济开放程度7个方面考虑驱动因素指标(表2)。选取平均坡度^[34]、年降水量^[34]表征区域城市自然特征。选取科学技术支出占公共预算支出比重^[27]表征城市科技教育状况,选取地区生产总值(GDP)^[33]表征城市经济基础,选取建成区面积^[35]表征城市建设状况,选取生态足迹^[36]表征城市空间承载能力,选取城镇化率^[15]表征城市发展状况,选取当年实际使用外资金额^[17]表征城市经济开放水平。

1.2.3 数据来源

生产用地比例、人均公园绿地面积、建成区绿化覆盖率、平均坡度来源于30 m土地利用数据集,人均GDP、人均固定资产投资额、社会消费品零售总额、城乡居民储蓄年末余额、第一产业产值占GDP比例、第二产业产值占GDP比例、第三产业产值占GDP比例、人均可支配收入、公共财政收入占GDP比重、年降水量、科学技术支出占公共预算支出比重、地区生产总值(GDP)、建成区面积、生态足迹、城镇化率、当年实际使用外资金额来源于地级市统计年鉴,大气污染物排放量、生活垃圾无害化处理率、污水处理厂污水集中处理率、一般工业固体废物综合利用率、公共图书馆数量、燃气普及率、排水管网密度、人均用电量、人均用水量、年末移动电话用户数、人口密度、每万人公共汽车数、每万人拥有医疗卫生机构床位数、就业率、基本社会保障覆盖率、在校学生数、人均道路面积来源于中国城市统计年鉴,二氧化碳排放量来源于CEADs中国碳核算数据库,归一化植被指数(NDVI)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心NDVI数据集,空气质量大于二级以上天数占比来源于中国空气质量在线监测分析平台。

表 1 黄河流域城市韧性综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system for urban resilience in the Yellow River Basin

目标层	指标层	单位	含义	属性
生产	生产用地比例	%	衡量城市生产活动空间承载能力与布局效率	+
	人均 GDP	元	衡量地区经济发展水平	+
	人均固定资产投资额	元	反映城市对未来生产能力的投入	+
	社会消费品零售总额	万元	衡量市场需求活跃度和居民消费能力	+
	城乡居民储蓄年末余额	元	反映居民财富积累、潜在消费能力及稳定性	+
	第一产业产值占 GDP 比例	%		-
	第二产业产值占 GDP 比例	%	反映城市产业结构的优化和多元化	+/-
	第三产业产值占 GDP 比例	%		+
	人均可支配收入	元	衡量居民购买力及经济发展成果的分享程度	+
	公共财政收入占 GDP 比重	%	反映政府调控经济、提供公共服务的财政能力	+
生态	大气污染物排放量	—	反映城市发展对空气质量造成的压力	-
	二氧化碳排放量	t	衡量城市活动对全球气候变化的影响	-
	生活垃圾无害化处理率	%	反映城市废物管理能力和对环境的保护水平	+
	污水处理厂污水集中处理率	%	衡量城市对生活污水集中处理的能力	+
	一般工业固体废物综合利用率	%	反映城市对工业固体废物的循环利用能力	+
	归一化植被指数(NDVI)	—	反映城市生态系统健康状况	+
	人均公园绿地面积	m ²	反映城市绿色空间可达性和质量	+
	建成区绿化覆盖率	%	衡量城市建成区植被覆盖程度	+
	空气质量大于二级以上天数占比	%	城市空气质量的直接量化	+
生活	公共图书馆数量	座	反映城市公共文化服务水平	+
	燃气普及率	%	反映城市能源供应基础设施完善程度	+
	排水管网密度	km·km ⁻²	反映城市防洪排涝基础设施完善程度	+
	人均用电量	kWh	衡量城市能源需求和利用水平	+
	人均用水量	m ³	衡量城市水资源消耗水平	+
	年末移动电话用户数	人	反映城市信息通信基础设施覆盖程度	+
	人口密度	人·km ⁻²	反映城市对人口的吸引力和集聚能力	-
	每万人公共汽车数	辆	衡量城市公共交通系统服务水平和便捷性	+
	每万人拥有医疗卫生机构床位数	张	反映城市医疗卫生服务供给能力	+
	就业率	%	衡量劳动力市场的活跃度	+
	基本社会保障覆盖率	%	衡量社会安全网完善程度	+
	在校学生数	人	反映城市教育资源提供水平及培养能力	+
	人均道路面积	m ²	衡量城市交通基础设施的完善程度	+

1.3 研究方法

1.3.1 CRITIC 赋权法

CRITIC 赋权法基于评价指标的对比强度和指标间冲突性综合衡量指标权重,相较于层次分析等

主观赋权法,CRITIC 赋权更为客观科学,相比熵权法完全根据指标数据离散程度确定权重,CRITIC 赋权结果更为稳健。因此本文在 CRITIC 赋权基础上采用 CRITIC 综合指数对黄河流域城市韧性水平进

表2 黄河流域城市韧性驱动因素指标体系

Table 2 Indicator system of driving factors for urban resilience in the Yellow River Basin

目标层	序号	指标	单位	含义	属性
自然表征	X_1	平均坡度	度	城市抵御自然扰动的“基础条件”	-
	X_2	年降水量	mm		+
科技教育	X_3	科学技术支出占公共预算支出比重	%	提升城市整体韧性水平的“赋能器”	+
经济基础	X_4	地区生产总值(GDP)	万元	城市韧性物质保障、支撑基础	+
城市建设	X_5	建成区面积	km ²	城市空间规模和发展程度	+
空间承载	X_6	生态足迹	—	城市对生存环境的压力	+
城市发展	X_7	城镇化率	%	城市化进程	+
经济开放	X_8	当年实际使用外资金额	万元	经济活跃程度	+

行综合测度:

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} = \frac{S_j \times R_j}{\sum_{j=1}^n (S_j \times R_j)} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{m-1}} \times \sum_{j=1}^n (1-r_{jk})}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{m-1}} \times \sum_{j=1}^n (1-r_{jk})} \quad (1)$$

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

式中: m 表示待评价样本数量; n 表示评价指标项; r_{jk} 为指标 j 与指标 k 的相关系数,用Pearson系数表示; S_j 、 R_j 、 C_j 分别为第 j 个指标变异性、冲突性、信息量; W_j 为第 j 个指标的权重; x_{ij} 表示无量纲化处理后的第 i 个样本第 j 项评价指标的数值; U_i 表示 i 样本城市韧性综合指数。

1.3.2 空间特征测度

全局空间自相关分析(全局Moran's I)。采用全局Moran's I 分析区域总体的空间关联和空间差异程度:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

式中: I 为全局Moran's I 值; n 为样本总数; $\bar{Y}$ 为所有样本平均值; Y_i 表示第 i 个区域的样本值; Y_j 表示第 j 个区域的样本值; W_{ij} 为空间权重矩阵。

为了进一步确定是否存在空间自相关关系,需要对 I 进行显著性检验:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (4)$$

式中: Z 为全局Moran's I 检验值; $E(I)$ 为 I 的期望; $\text{Var}(I)$ 为 I 的方差。

冷热点分析(局部Getis-Ord G_i^* 指数)。采用冷热点分析(局部Getis-Ord G_i^* 指数)方法来反映黄河流域城市韧性状况在各区域的高低值分布状况及空间差异的变化趋势,揭示局部空间分布特征:

$$G_i^* = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ij} x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (5)$$

式中: x_i 为 i 区域的观测值; n 为区域总数; W_{ij} 为空间权重矩阵;空间相邻取值为1,不相邻取值为0。 G_i^* 值显著为正,表明 i 地区周围的值相对较高,属于热点地区;反之则为冷点地区。

1.3.3 地理探测器

探究地理现象影响机制的方法如空间计量模型、地理加权回归模型等,都不能较好反映要素在同一区域内的相似性与不同区域之间的差异性。地理探测器作为挖掘地理数据空间异质性的统计工具,可以探测影响城市韧性的相关因素驱动作用,包括因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测4种探测方法。其中因子探测通过 q 统计量度量某因子 X 多大程度上解释了因变量 Y 的空间分异,值域 $[0, 1]$, q 值越大解释力越强;交互作用探测用于判别两个不同因子共同作用时,对属性 Y 解释程度的影响是增强还是减弱,或是二者对其影响是否具有独立性^[23],判断依据见表3。因此本文选择因子探测、交互作用探测探究城市韧性驱动因素。公式表示如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{n=1}^L N_h \sigma_h^2 \tag{6}$$

式中： q 是检测因子的解释系数，其范围为 0 到 1。 q 值越大，因子的解释力越强； N 和 σ^2 是城市的数量和城市韧性的方差； N_h 和 σ_h^2 分别是每个子类别中的城市数及其对应的城市韧性方差。

表 3 交互作用判断依据

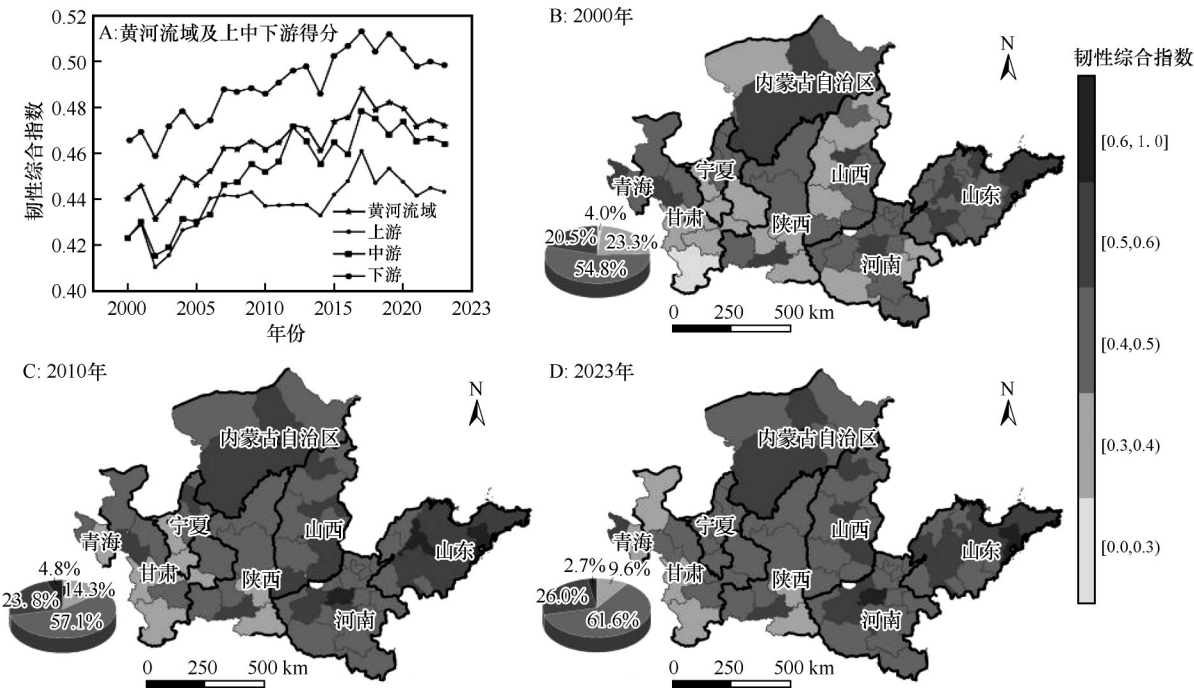
判断依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	相互独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

2 结果与分析

2.1 城市韧性综合评价

选择 2000、2010、2023 年为时间断面，绘制黄河流域城市韧性时空变化图。2000—2023 年，黄河流域城市韧性呈现波动上升态势，但整体水平较低，存在较大提升空间(图 2)。黄河流域整体城市韧性

综合指数由 2000 年的 0.44 上升至 2023 年的 0.472，最低点出现在 2002 年为 0.431，最高点出现在 2017 年，为 0.488；黄河流域上游城市韧性综合指数自 2000 年的 0.423 提升至 2023 年的 0.443，最低点发生在 2002 年，为 0.410，最高点出现在 2017 年，为 0.461；中游城市韧性综合指数自 2000 年的 0.423 提升至 2023 年的 0.464，最低点发生在 2002 年，为 0.415，最高点出现在 2017 年，为 0.479；下游城市韧性综合指数自 2000 年的 0.465 提升至 2023 年的 0.498，最低点出现在 2002 年，为 0.458，最高点出现在 2017 年，为 0.513。2000 年，黄河流域城市韧性状况排名为下游>黄河流域整体>中游>上游，下游区域城市韧性整体优于中游和上游，呈现东高西低、逐级降低的空间分布格局；2002 年，黄河流域城市韧性状况都出现降低，但降幅各不相同，上游降幅最大，中游次之，下游最小，受经济结构调整与环境政策收紧影响较大；2002—2017 年，黄河流域城市韧性表现为波动上升，且达到研究时段内最高点，下游区域城市韧性状况依然优于中游和上游；2017—2023 年，因全球新冠疫情的肆虐，黄河流域城市韧性状况一致降低，但东高西低、逐级降低的空间分布格局没有发生改变。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2024)0650 号标准地图制作，底图边界无修改

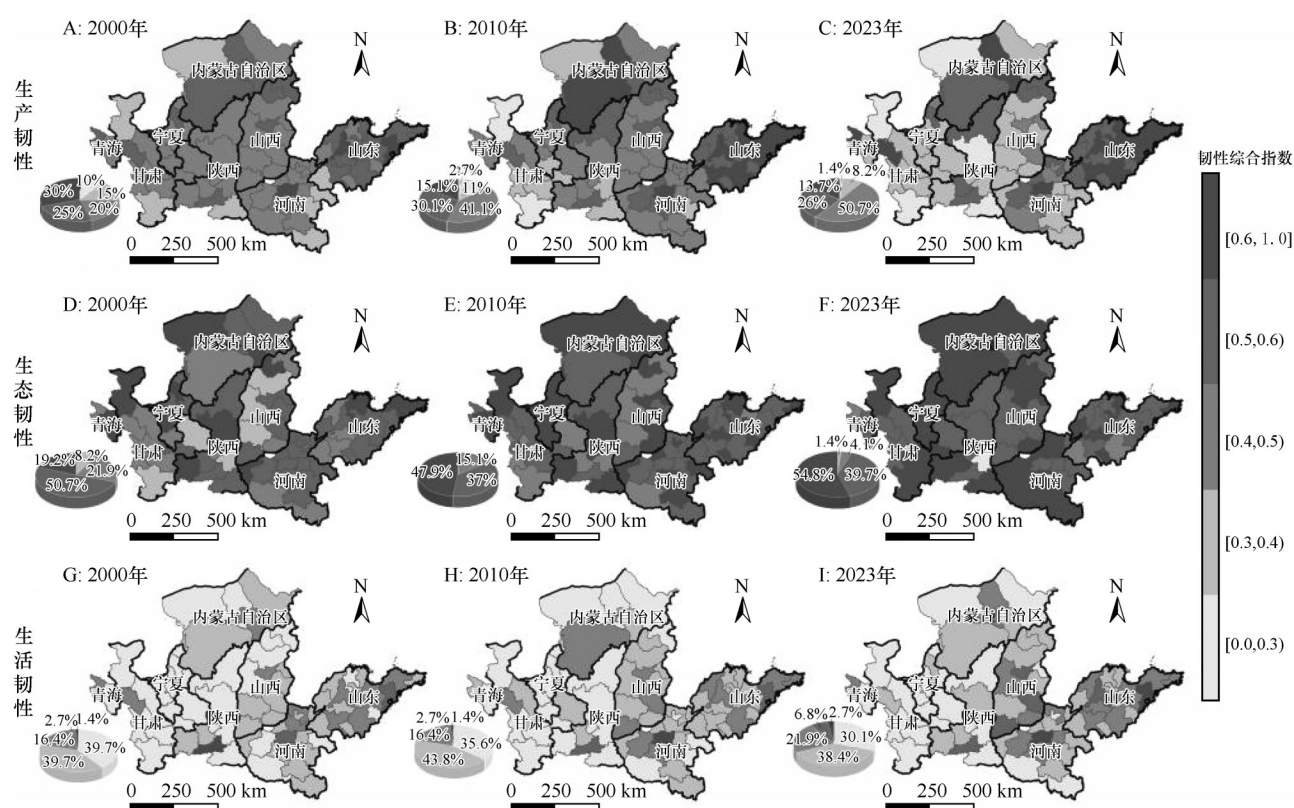
图 2 黄河流域城市韧性时空变化

Fig.2 Spatio-temporal variation of urban resilience in the Yellow River Basin

2000—2023年,黄河流域城市韧性呈现波动上升态势,增长状况明显,综合指数整体包括[0.30~0.40)、[0.40~0.50)、[0.50~0.60)和[0.60~1.00]4个层次,以[0.40~0.50)层次为主。2000年,黄河流域城市韧性综合指数[0.30~0.40)层次城市数量为16个(21.9%),最低为上游区域的陇南市(0.308),[0.40~0.50)层次城市数量为48个(65.8%),分布最广,主要分布在中、下游区域;[0.50~0.60)层次城市数量为9个(12.3%),最高为下游区域的青岛市(0.581),黄河流域城市韧性东高西低、差异显著的空间分布状况开始显现;2000—2010年,黄河流域城市韧性整体上升,[0.30~0.40)层次城市数量降至10个(13.7%),主要分布在上游区域,最低的城市为陇南市(0.311),[0.40~0.50)层次城市数量下降至43个(58.9%),[0.50~0.60)层次城市数量上升至18个(24.7%),[0.60~1.00]层次取得突破,为青岛市(0.612)和郑州市(0.609),黄河流域城市韧性东高

西低、差异显著的空间分布状况成型;2010—2023年,黄河流域城市韧性仍然保持上升态势,[0.30~0.40)层次城市数量持续下降至7个(9.6%),主要分布在上游区域,最低的城市为渭南市(0.328),[0.40~0.50)层次城市数量上升至45个(61.6%),[0.50~0.60)层次城市数量上升至19个(26%),[0.60~1.00]层次城市依旧为青岛市(0.657)和郑州市(0.614),黄河流域城市韧性东高西低、差异显著的空间分布状况更加显著。

从生产韧性、生态韧性、生活韧性3个层面进一步分析黄河流域城市韧性状况(图3)。从时间上看,三大层面韧性状况都表现出明显上升状况,生产韧性综合指数由2000年的0.474上升为2023年的0.499,生态韧性综合指数由2000年的0.528上升为2023年的0.603,生活韧性综合指数由2000年的0.336上升至2023年的0.367,但3个层面之间差距明显,始终表现为生态韧性>生产韧性>生活韧性。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改

图3 黄河流域73个城市生产-生态-生活层面韧性状况

Fig.3 Urban resilience at the production-ecology-life level of 73 cities in the Yellow River Basin

生产韧性层面,2000—2023年各个韧性区间段的的城市数量变化明显,[0.40~0.50)层次城市数量占比不断提高,为主要城市状态水平,2000年处于

[0.30~0.40)、[0.40~0.50)、[0.50~0.60)和[0.60~1.00]层次的城市数量分别为8、43、19个及3个;2010年差距加大,武威市和陇南市降低至[0~0.30)

层次, [0.30~0.40) 层次城市数量保持不变, [0.40~0.50) 层次城市数量降低至 30 个, [0.50~0.60) 层次城市数量上升至 22 个, [0.60~1.00] 层次城市数量上升至 11 个, 以青岛市、烟台市和济南市表现突出; 2023 年 [0~0.30) 层次城市为 0, [0.30~0.40) 层次城市数量降低至 6 个, [0.40~0.50) 层次城市数量上升至 34 个, [0.50~0.60) 层次城市数量上升至 23 个, [0.60~1.00] 层次城市数量降低至 10 个, 青岛市、烟台市和济南市依旧处于高水平状态, 表现出整体提升但两极分化的成长状况。

生态韧性层面, 2000—2023 年各个韧性区间的城市数量变化明显, 整体取得极大增长, [0.60~1.00] 层次城市数量占比不断提高, 逐渐成为主要城市状态水平, 2000 年处于 [0.30~0.40)、[0.40~0.50)、[0.50~0.60) 和 [0.60~1.00] 层次的城市数量分别为 6、16、37 个及 14 个, 以 [0.50~0.60) 层次为主; 2010 年上升较大, [0.30~0.40) 层次城市为 0, [0.40~0.50) 层次城市数量降低至 11 个, [0.50~0.60) 层次城市数量降低至 27 个, [0.60~1.00] 层次城市数量上升至 35 个; 2023 年渭南市降低至 [0.30~0.40) 层次, [0.40~0.50) 层次城市数量降低至 3 个, [0.50~0.60) 层次城市数量上升至 29 个, [0.60~1.00] 层次城市数量上升至 40 个, 说明生态保护理念和黄河流域生态保护和高质量发展战略取得明显成效。

生活韧性层面, 2000—2023 年始终处于低水平状态, 整体取得增长, 但增长态势不明显, 以 [0~0.30) 和 [0.30~0.40) 水平为主, 2000 年处于 [0~0.30)、[0.30~0.40)、[0.40~0.50) 和 [0.50~0.60) 层次的城市数量分别为 29、29、12 个及 3 个; 2010 年 [0~0.30) 层次城市数量降低至 26 个, [0.30~0.40) 层次城市数量上升至 32 个, [0.40~0.50) 层次城市数量保持不变, [0.50~0.60) 层次城市数量降低至 2 个, 郑州市率先进入 [0.60~1.00] 层次水平; 2023 年 [0~0.30) 层次城市数量降低至 22 个, [0.30~0.40) 层次城市数量降低至 28 个, [0.40~0.50) 层次城市数量上升至 16 个, [0.50~0.60) 层次城市数量上升至 5 个, 青岛市和郑州市进入 [0.60~1.00] 层次水平。

这种变化趋势与当前区域重大战略的实施具有深度关联性: 黄河流域生态保护和高质量发展战略实施中, 生态保护作为战略的首要目标, 政策倾斜与资金投入集中, 加之生态工程(如水土保持、污染治理)见效快、易量化, 短期内改善显著; 生产层面的转型升级、产业结构的调整和绿色经济的培育

需要时间和技术积累, 部分传统产业的退出和新兴产业的成长仍面临市场接受度、技术瓶颈及配套设施建设等挑战, 变化相对滞后; 而生活层面的改善是生态和生产两大层面变化的综合性结果, 其感知度和广泛性受到多种因素制约, 需要更长的周期, 且易受个体差异、区域发展不平衡等因素的影响, 因此, 生活品质的提升是最后一环, 也最需要持续巩固和深化发展。

2.2 空间集聚变化特征

2.2.1 全局空间集聚演化特征

2000—2023 年黄河流域城市韧性状况全局 Moran's I 指数计算结果显示, 研究时段内 Moran's I 指数均为正值且对应的 P 值均通过 5% 显著性检验(表 4), 表明黄河流域城市韧性状况在空间位置上存在相互依赖关系, 具有较为明显的空间集聚分布特征。但 Moran's I 指数整体偏小, 集聚程度较低, 但整体上升趋势明显, 说明黄河流域城市韧性集聚状况趋于明显, 相互关联程度呈现提高态势。

2.2.2 局部空间集聚特征

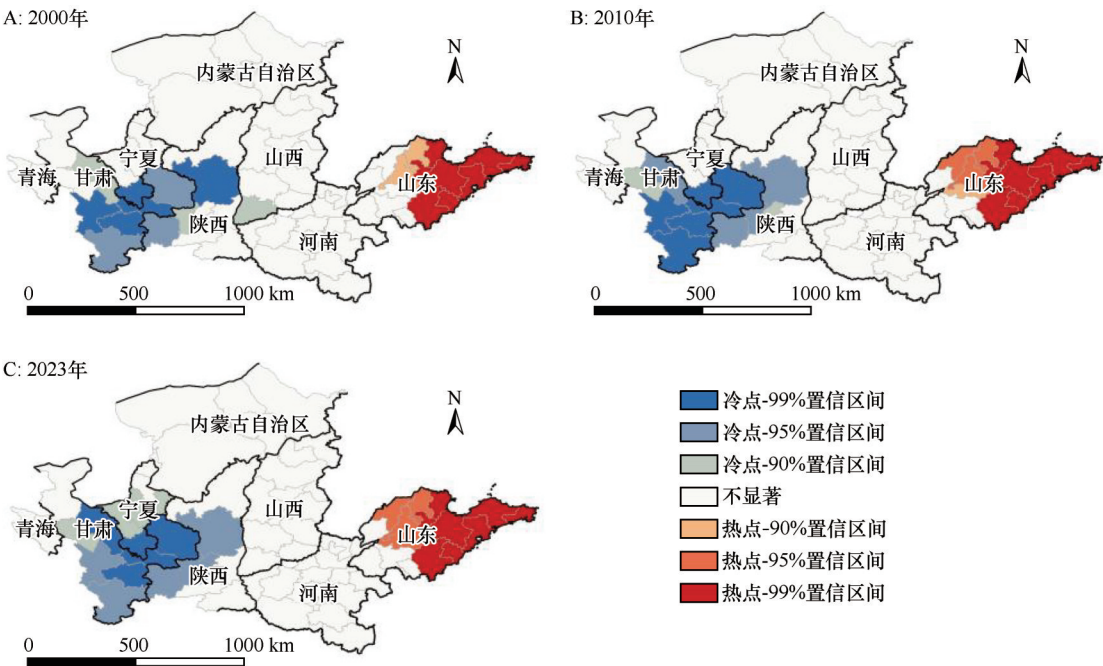
通过测算 2000、2010 年和 2023 年的黄河流域城市韧性状况 Getis-Ord G_i^* 指数, 生成黄河流域城市韧性冷热点演变图(图 4)。

2000—2023 年, 黄河流域城市韧性冷热点分布具有明显的空间集聚特征, 热点区域集中分布在黄河流域下游区域, 冷点区域集中分布在黄河流域中上游区域, 其中 99% 置信区间热点区域保持不变, 始终分布在山东省威海市、青岛市、烟台市、潍坊市等 8 个城市。2000 年, 热点区域包括威海市、青岛市、烟台市、潍坊市等 8 个 99% 置信区间热点区域和滨州市、济南市 2 个 90% 置信区间热点区域, 冷点区域则包括延安市、固原市、平凉市等 5 个 99% 置信区间冷点区域, 庆阳市、宝鸡市、陇南市 3 个 95% 置信区间冷点区域和运城市、咸阳市、白银市 3 个 90% 置信区间冷点区域。2010 年 99% 置信区间热点区域保持不变, 滨州市、济南市和德州市成为 95% 置信区间热点, 仅有泰安市处于 90% 置信区间热点区域, 庆阳市、固原市、平凉市等 6 个城市处于 99% 置信区间冷点区域, 延安市、咸阳市、宝鸡市、中卫市为 95% 置信区间冷点区域, 铜川市和白银市为 90% 置信区间冷点区域。2023 年 99% 置信区间热点区域保持不变, 滨州市、济南市、德州市和泰安市为 95% 置信区间热点区域, 冷点区域出现扩张, 庆阳

表 4 黄河流域城市韧性全局 Moran's *I* 指数

Table 4 Global Moran's *I* index of urban resilience in the Yellow River Basin

年份	Moran's <i>I</i> 指数	<i>z</i> 得分	<i>P</i> 值	年份	Moran's <i>I</i> 指数	<i>z</i> 得分	<i>P</i> 值
2000	0.087	1.066	0.004	2012	0.169	1.599	0.007
2001	0.116	1.998	0.004	2013	0.183	1.181	0.010
2002	0.119	1.805	0.002	2014	0.234	1.790	0.007
2003	0.123	1.439	0.001	2015	0.239	1.867	0.006
2004	0.121	1.528	0.001	2016	0.259	2.142	0.032
2005	0.128	1.365	0.020	2017	0.280	1.958	0.005
2006	0.115	2.216	0.044	2018	0.295	1.022	0.004
2007	0.128	1.077	0.004	2019	0.317	1.303	0.006
2008	0.133	1.128	0.004	2020	0.445	2.414	0.046
2009	0.157	1.343	0.003	2021	0.457	2.200	0.040
2010	0.175	1.043	0.004	2022	0.464	3.117	0.000
2011	0.171	0.747	0.004	2023	0.474	2.367	0.001



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改

图 4 黄河流域城市韧性空间格局冷热点演变

Fig.4 Cold-hotspot evolution of urban resilience in the Yellow River Basin

市、固原市、平凉市等 5 个城市处于 99% 置信区间冷点区域,延安市、宝鸡市、陇南市等 5 个城市处于 95% 置信区间冷点区域,吴忠市、中卫市和兰州市为 90% 置信区间冷点区域。

2.3 驱动因素

运用地理探测器模型,将黄河流域城市韧性作为因变量 *Y*,本研究选定的 8 个驱动因子($X_1\sim X_8$)作为

自变量,对 2000—2023 年相应的数据进行离散化处理后计算出因子探测 *q* 值,分析各因子对黄河流域城市韧性影响程度,以及各因子交互作用的影响水平。

2.3.1 主导因素识别

利用因子探测发现:8 个探测因子均在 5% 水平上显著,对黄河流域城市韧性状况的影响作用有显著的差异性(表 5)。 $X_1\sim X_8$ *q* 值均值差异较大,表明各项因素对黄河流域城市韧性状况都具有明显的

表 5 黄河流域城市韧性驱动因子探测结果

Table 5 Detection results of urban resilience drivers in the Yellow River Basin

年份	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
2000	0.181	0.130	0.044	0.174	0.029	0.062	0.013	0.170
2001	0.130	0.045	0.059	0.383	0.153	0.102	0.319	0.367
2002	0.130	0.036	0.013	0.434	0.151	0.127	0.328	0.358
2003	0.204	0.060	0.034	0.483	0.188	0.079	0.292	0.333
2004	0.167	0.083	0.035	0.432	0.176	0.057	0.365	0.366
2005	0.019	0.099	0.045	0.441	0.190	0.061	0.395	0.474
2006	0.163	0.089	0.023	0.460	0.166	0.047	0.350	0.497
2007	0.177	0.110	0.529	0.476	0.248	0.047	0.305	0.412
2008	0.187	0.173	0.471	0.488	0.234	0.078	0.410	0.408
2009	0.175	0.174	0.512	0.449	0.263	0.063	0.339	0.366
2010	0.186	0.197	0.508	0.474	0.239	0.046	0.409	0.439
2011	0.172	0.049	0.540	0.571	0.245	0.073	0.325	0.462
2012	0.147	0.048	0.457	0.545	0.246	0.092	0.378	0.542
2013	0.184	0.083	0.555	0.542	0.286	0.102	0.531	0.520
2014	0.174	0.086	0.469	0.544	0.274	0.103	0.485	0.485
2015	0.211	0.089	0.544	0.521	0.268	0.109	0.543	0.522
2016	0.269	0.133	0.422	0.569	0.335	0.146	0.407	0.561
2017	0.198	0.048	0.441	0.538	0.305	0.148	0.407	0.482
2018	0.204	0.102	0.389	0.502	0.336	0.145	0.405	0.309
2019	0.218	0.030	0.481	0.481	0.335	0.161	0.416	0.413
2020	0.154	0.083	0.350	0.482	0.250	0.164	0.474	0.447
2021	0.155	0.106	0.360	0.473	0.297	0.171	0.418	0.361
2022	0.161	0.101	0.505	0.531	0.256	0.175	0.411	0.390
2023	0.164	0.043	0.421	0.529	0.257	0.173	0.423	0.427
均值	0.172	0.092	0.342	0.480	0.239	0.106	0.381	0.421

影响作用,但影响程度差异明显, X_4 地区生产总值(GDP)和 X_8 当年实际使用外资金额的影响作用最强,其次为 X_3 科学技术支出占公共预算支出比重和 X_7 城镇化率, X_2 年降水量影响程度最弱,说明各城市应注重经济基础、科技教育、城市规模和经济开放方面的提升。

2000—2023年各年份主导驱动因素各不相同。2000年, X_1 平均坡度、 X_4 地区生产总值(GDP)和 X_8 当年实际使用外资金额 q 值均大于0.150,为主导驱动因素,表明城市自然表征、经济基础和经济开放程度对黄河流域城市韧性的影响作用最为显著;2005年, X_8 当年实际使用外资金额、 X_4 地区生产总

值(GDP)和 X_7 城镇化率 q 值均大于0.390,为主导驱动因素,表明城市经济开放程度、经济基础和城市规模对黄河流域城市韧性的影响作用最为显著;2010年, X_3 科学技术支出占公共预算支出比重、 X_4 地区生产总值(GDP)和 X_8 当年实际使用外资金额 q 值均大于0.430,为主导驱动因素,表明城市科技教育、经济基础和经济开放程度对黄河流域城市韧性的影响作用最为显著;2015年, X_3 科学技术支出占公共预算支出比重、 X_7 城镇化率和 X_8 当年实际使用外资金额 q 值均大于0.520,为主导驱动因素,表明科技教育、城市规模和经济开放程度对黄河流域城市韧性的影响作用最为显著;2023年, X_4 地区生

产总值(GDP)、 X_8 当年实际使用外资金额和 X_7 城镇化率 q 值均大于0.420,为主导驱动因素,表明经济基础、经济开放程度和城市规模对黄河流域城市韧性状况的影响作用最为显著。整体来看,科技教育、经济基础、经济开放程度和城市规模对黄河流域城市韧性的影响作用最为显著,说明黄河流域城市应加强在科技教育方面的投入,注意把握城市规

模和经济开放程度,加强经济基础,统筹促进城市韧性提升。

2.3.2 各因子交互作用探测

在因子探测的基础上,将所有显著性因子输入交互探测模型,得到黄河流域城市韧性各因子交互作用探测结果(图5),其中白色数字代表双因子增强,黑色数字代表非线性增强。

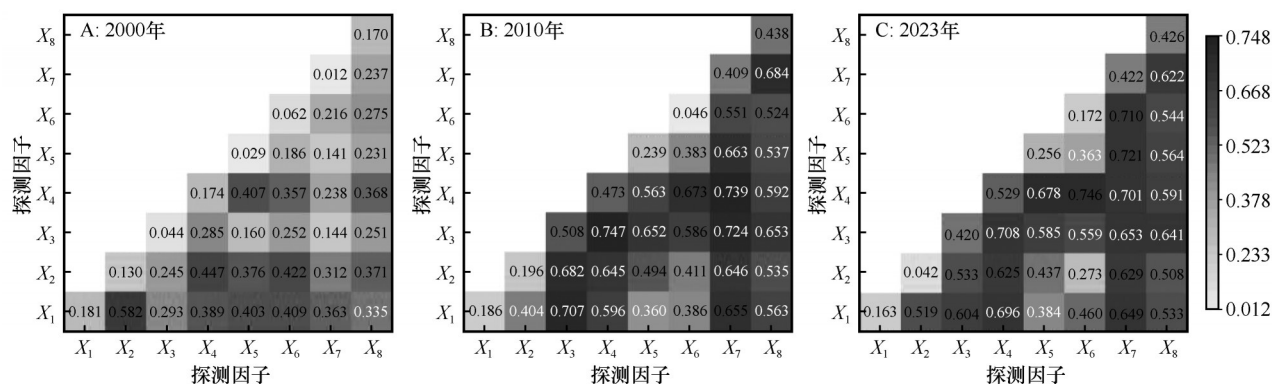


图5 黄河流域城市韧性各因子交互作用探测结果

Fig.5 Detection results of interactions among factors of urban resilience in the Yellow River Basin

2000年共产生1项双因子增强,27项为非线性增强,指标间的非线性增强在黄河流域城市韧性状况中占据主导地位。交互探测值排名靠前的是: X_1 平均坡度 $\cap X_2$ 年降水量(0.582)、 X_2 年降水量 $\cap X_4$ 地区生产总值(GDP,0.447)、 X_2 年降水量 $\cap X_6$ 生态足迹(0.422)、 X_1 平均坡度 $\cap X_6$ 生态足迹(0.409)、 X_4 地区生产总值(GDP) $\cap X_5$ 建成区面积(0.407)、 X_1 平均坡度 $\cap X_5$ 建成区面积(0.403),说明 X_1 平均坡度、 X_2 年降水量、 X_4 地区生产总值(GDP)、 X_6 生态足迹与其他因子交互作用正向提升作用强,黄河流域城市韧性状况受区域自然表征的影响最大,经济基础和空间承载状况次之。

2010年共产生19项双因子增强,8项为非线性增强,指标间的双因子增强在黄河流域城市韧性状况影响中占据主导地位。交互探测值排名靠前的是: X_3 科学技术支出占公共预算支出比重 $\cap X_4$ 地区生产总值(GDP,0.747)、 X_4 地区生产总值(GDP) $\cap X_7$ 城镇化率(0.739)、 X_3 科学技术支出占公共预算支出比重 $\cap X_7$ 城镇化率(0.724)、 X_1 平均坡度 $\cap X_3$ 科学技术支出占公共预算支出比重(0.707),说明 X_3 科学技术支出占公共预算支出比重、 X_4 地区生产总值(GDP)、 X_7 城镇化率与其他因子交互作用正向提升作用强,黄河流域城市韧性状况受地区科技教育和经济基础的影响最大,城市规模次之。

2023年产生双因子增强与非线性增强状况数量一致,都为14项。交互探测值排名靠前的是: X_4 地区生产总值(GDP) $\cap X_6$ 生态足迹(0.746)、 X_5 建成区面积 $\cap X_7$ 城镇化率(0.721)、 X_6 生态足迹 $\cap X_7$ 城镇化率(0.710)、 X_3 科学技术支出占公共预算支出比重 $\cap X_4$ 地区生产总值(GDP,0.708),说明 X_4 地区生产总值(GDP)、 X_6 生态足迹、 X_7 城镇化率与其他因子交互作用正向提升作用强,黄河流域城市韧性状况受地区经济基础、空间承载的影响最大,城市规模次之。

总体来看,各驱动因素在黄河流域城市韧性状况演化过程中存在交互作用。不同驱动因子相互作用后,对于黄河流域城市韧性状况的解释力增强,且表现为不同程度的双因子增强或非线性增强,没有出现减弱状况。黄河流域城市韧性是多因素综合作用的结果,受地区经济基础(X_4 地区生产总值(GDP))的影响最大,科技教育(X_3 科学技术支出占公共预算支出比重)、空间承载(X_6 生态足迹)和城市规模(X_7 城镇化率)次之。

3 讨论

2000—2023年,黄河流域城市韧性呈现波动上升态势,但整体水平较低,存在较大提升空间,这与王璇等^[31]、Chen等^[37]研究结果一致。黄河流域城市韧性具有较为明显的空间集聚分布特征,且下游区

域城市韧性状况整体优于中游和上游,呈现出东高西低、逐级降低的空间分布格局,Li等^[38]、Ji等^[39]的研究得出相同结论,黄河流域上中下游区域城市在经济发展、自然资源、人口规模和政策扶持等方面存在明显差距。地区生产总值(GDP)、当年实际使用外资金额、科学技术支出占公共预算支出比重、城镇化率对黄河流域城市韧性状况具有明显的影响作用,且影响程度差异较大,与石龙宇等^[30]、李田田^[33]的研究结果一致,表明黄河流域城市应注重加大在经济基础、经济开放程度、科技教育和城市规模等方面的关注力度,强化主要驱动因素的推动作用,促进区域城市韧性稳步提升。

基于对2000—2023年黄河流域城市韧性演变实证结论,提出以下对策建议:①黄河流域整体层面,贯彻黄河流域生态保护和高质量发展战略要求,提升经济基础与开放程度、加强科技教育投入、优化城镇化结构与基础设施韧性、健全区域协同治理与灾害应急体系,推动产业升级与现代服务业发展,构建上下游协同治理平台,缩小区域差异,提升全域韧性水平。②上游应聚焦水资源管理、灾害预警与生态修复,提升用水效率与气候韧性;中游应推进产业升级、环境保护与城市治理能力提升,优化科技投入结构并增强城镇化带动效应;下游应以已有经济基础与对外开放优势为依托,推动高端制造与现代服务业集聚、绿色金融与跨境协同,加强生态与水环境保护,形成稳定的韧性增量;③明确典型城市定位和行动路径:示范引领型城市(如西安、郑州、青岛等)应以提升经济水平、对外开放程度与科技投入的协同来增强城市韧性;产业升级驱动型城市(如济南、太原、洛阳等)应通过优化产业结构、提升科技支出占比与城镇化水平来放大韧性增量;生态修复与提升型城市(如兰州、银川、呼和浩特等)应聚焦水资源管理、生态修复与灾害防控能力建设;脆弱性缓释型城市(如张掖、平凉、鄂尔多斯等)应强化降水波动应对、社区韧性建设与公共服务保障,形成以数据驱动、制度创新与区域协同为支撑的分层分域韧性提升路径。

总体而言,本文丰富和发展了黄河流域城市韧性综合评价及驱动因素方面的研究,但仍存在部分不足亟须完善:①本文基于“三生”(生产、生活、生态)理念构建了黄河流域城市韧性综合评价体系,在指标全面性和充足性方面可能存在不足。②本文虽然对黄河流域城市韧性空间集聚变化特征进

行了验证,但未对其可能存在的空间溢出状况和距离衰减规律进行深入探究。期望在后续研究中进一步加强和完善。

4 结论

2000—2023年,黄河流域城市韧性呈现波动上升态势,但整体水平较低,存在较大提升空间。黄河流域下游区域城市韧性整体优于中游和上游,呈现出东高西低、逐级降低的空间分布格局。生产、生态、生活3个层次韧性状况同样表现出上升状况,但3个层次之间差距明显,表现为生态韧性>生产韧性>生活韧性。

2000—2023年,黄河流域城市韧性在空间位置上存在相互依赖关系,具有集聚分布特征,但集聚程度较低。冷热点分布具有明显的空间集聚状况,热点区域集中分布在黄河流域下游区域,冷点区域集中分布在黄河流域中上游区域。

8个探测因子对黄河流域城市韧性的影响程度差异较大,地区生产总值(GDP)和当年实际使用外资金额的影响作用最强,科学技术支出占公共预算支出比重和城镇化率次之,年降水量影响程度最弱。经济基础和经济开放程度对黄河流域城市韧性状况的影响作用最为显著,科技教育和城市规模次之。

各驱动因素在黄河流域城市韧性演化过程中存在交互作用。不同驱动因子相互作用后,对黄河流域城市韧性的解释力明显增强,且表现结果为不同程度的双因子增强或非线性增强。地区经济基础和科技教育与其他因素的交互影响能力较强,城市规模和空间承载能力次之。

参考文献:

- [1] 孙威,刘鸿宇,杨子涵.长江、黄河两大流域可持续发展研究比较[J].资源科学,2024,46(11):2289-2303.
- [2] 李连刚,张平宇,程钰,等.黄河流域经济韧性时空演变与影响因素研究[J].地理科学,2022,42(4):557-567.
- [3] 赵宏波,谷天顺,孙东琪,等.“三生”功能视角下黄河流域城市人居环境动态演变与机制[J].地理学报,2023,78(12):2973-2999.
- [4] 姜海宁,郑舒婷,杨琪,等.黄河流域资源型城市人居环境韧性水平演化及其障碍度[J].资源科学,2024,46(10):2047-2063.
- [5] 赵宏波,魏甲晨,孙东琪,等.基于随机森林模型的“生产-生活-生态”空间识别及时空演变分析:以郑州市为例[J].地理研究,2021,40(4):945-957.
- [6] 逯承鹏,纪薇,刘志良,等.黄河流域甘肃段县域“三生”功能

- 空间时空格局及影响因素识别[J].地理科学,2022,42(4):579-588.
- [7] Song Y Y, Xue D Q, Dai L H, et al. Land cover change and eco-environmental quality response of different geomorphic units on the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Arid Land, 2020, 12(1):29-43.
- [8] 王慧丽,徐玉杰,张靖妮,等.基于“三生”视角的黄河流域城市高质量发展测度研究[J].人民黄河,2024,46(1):25-31.
- [9] 刘卫婷.“三生空间”视角下沿黄八省区城市综合承载力研究[D].太原:山西财经大学,2023.
- [10] 李慧燕.“三生”空间理念下京津冀城市群新型城镇化协调发展研究[J].生态经济,2021,37(5):92-98.
- [11] 陈晓红,许晓庆,刘艳军,等.基于三生空间质量的哈长城市群城市脆弱性时空演变格局及驱动力研究[J].生态学报,2022,42(15):6395-6405.
- [12] Li Y P, Zhao J S, Zhang S Q, et al. Qualitative-quantitative identification and functional zoning analysis of production-living-ecological space: a case study of urban agglomeration in Central Yunnan, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(10):1163.
- [13] 王超越,郭先华,陆晨东,等.基于FLUS的成渝城市群三生空间演变及模拟预测[J].生态科学,2024,43(5):157-168.
- [14] 李娟,李振林.基于GIS空间分析的县域国土空间开发适宜性评价[J].地理空间信息,2021,19(9):57-60.
- [15] 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.
- [16] 赵政楠,茹少峰,薛飞.黄河流域生态韧性的时空格局与分布动态演进:基于能值生态足迹模型的分析[J].中国人口·资源与环境,2024,34(8):136-147.
- [17] 刘同超,吴丹.黄河流域城市经济韧性与生态韧性的耦合协调关系研究[J].人民黄河,2024,46(3):6-11.
- [18] 吴孔森,孔冬艳,安传艳.黄河流域人地系统韧性时空演化及协调发展[J].中国沙漠,2023,43(6):246-257.
- [19] 赵培红,常佳欣,马原野,等.河北省城市韧性水平测度、时空特征与提升路径研究[J].决策咨询,2025(2):56-63.
- [20] 陈有川,张延奇,段文婷,等.基于多源数据的省域县城韧性发展水平评价研究:以山东省为例[J].城市发展研究,2024,31(11):18-23.
- [21] 李博雅,史维良.基于PSR模型的黄河流域城市韧性评价[J].科技和产业,2023,23(17):98-103.
- [22] 苏佳,武茜,黄光球.基于DPSIR模型的城市韧性评价:以关中城市群为例[J].经营与管理,2024(5):200-208.
- [23] 吴康,张静,李栋.中国城市群地区健康城市发展的综合评估及其影响因素[J].地理学报,2024,79(6):1371-1390.
- [24] 刘海龙,安芷萱,王焕珂,等.京津冀城市群县域城市韧性与创新效率耦合协调时空演变及影响因素的空间异质性[J].地理研究,2025,44(2):577-602.
- [25] 李晓娟,李璐璐,朱月月.韧性城市恢复能力评价研究[J].工程管理学报,2021,35(4):48-52.
- [26] 姚翠友,田一凡,王听听,等.京津冀城市群城市韧性时空演变及协调度分析[J].生态经济,2025,41(3):95-102.
- [27] 彭坤杰,许春晓,贺小荣.长三角地区城市人居环境韧性水平演化特征[J].经济地理,2023,43(6):74-84.
- [28] 马飞,张东伟,陈龙,等.城市群城市韧性水平测度及障碍因子识别[J].长安大学学报(社会科学版),2024,26(2):112-124.
- [29] 孙颖琦,张子龙,陈兴鹏,等.多源数据视角下黄河流域城市体系的规模等级与网络结构分析[J].地理科学,2024,44(2):268-277.
- [30] 石龙宇,郑巧雅,杨萌,等.城市韧性概念、影响因素及其评估研究进展[J].生态学报,2022,42(14):6016-6029.
- [31] 王璇,王成新,史佳璐.中原城市群城市韧性时空演进及跃迁机制[J].地理科学,2024,44(7):1206-1216.
- [32] Zhao J, Zhao Y. Synergy/trade-offs and differential optimization of production, living, and ecological functions in the Yangtze River Economic Belt, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 147:109925.
- [33] 李田田.黄河流域城市韧性时空演变及影响因素研究[D].兰州:兰州大学,2023.
- [34] Cheng Q, Lu Y, Wang T, et al. Study on the evolution of the urban land use and the driving mechanism from the perspective of the “productive-living-ecological” spaces[J]. Sustainability, 2025, 17:237.
- [35] 姚鸣奇,张卓群,郑艳,等.海绵城市试点建设提高了生态韧性吗?:一项准自然实验[J].城市发展研究,2023,30(4):25-33.
- [36] Zou L L, Liu Y S, Wang J Y, et al. An analysis of land use conflict potentials based on ecological-production-living function in the southeast coastal area of China[J]. Ecological Indicators, 2021, 122:107297.
- [37] Chen Y, Su X, Zhou Q. Study on the spatiotemporal evolution and influencing factors of urban resilience in the Yellow River Basin[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(19):10231.
- [38] Li H, Wang Y, Zhang H, et al. The spatial-temporal evolution and driving mechanism of urban resilience in the Yellow River Basin cities[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 447:141614.
- [39] Ji X, Nie Z, Wang K, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of urban resilience in the Yellow River Basin, China[J]. Regional Sustainability, 2024, 5(3):54-68.

Comprehensive evaluation and driving factors of urban resilience in the Yellow River Basin

Li Hengji¹, Meng Peng¹, Gong Zizhen², Zhao Xueyan³

(1. *Yulong Snow Mountain Cryosphere and Sustainable Development National Field Science Observation and Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *School of Architecture and Urban Planning, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;* 3. *College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China*)

Abstract: As a crucial ecological barrier and economic corridor in China, the Yellow River Basin faces dual challenges of imbalanced “production-living-ecological” spatial configurations and insufficient resilience in its urban development. This study constructs a comprehensive urban resilience evaluation framework for the Yellow River Basin from the production-living-ecological perspective. Utilizing the CRITIC composite index, global spatial autocorrelation, cold/hot spot analysis, and geographical detector, we assess resilience levels, spatial clustering patterns, and driving factors across 73 cities in the basin. The research aims to investigate urban resilience development status, identify key influencing factors, and provide scientific guidance for regional coordinated development, ecological conservation, and disaster prevention to support high-quality development in the Yellow River Basin. Key findings include: (1) From 2000 to 2023, urban resilience exhibited fluctuating growth with significant regional disparities, showing an east-high-west-low spatial pattern that diminishes progressively from downstream to upstream regions. Overall resilience remains suboptimal, requiring substantial improvement. (2) Distinct spatial clustering characteristics emerge, with hot spots concentrated in downstream areas and cold spots clustered in upstream regions. (3) Driving factors demonstrate varied impacts, with GDP and foreign direct investment exerting the strongest influence, followed by Science and technology expenditure ratio and Urbanization rate, while Annual precipitation shows minimal impact. Factor interactions reveal either two-factor enhancement or nonlinear enhancement effects, where economic foundation and technological capacity exhibit the strongest interactive effects with other factors, followed by urban scale and spatial carrying capacity.

Key words: production-living-ecological concept; urban resilience; CRITIC composite index; geographical detector; the Yellow River Basin