DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.010 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.010
李晨曦, 冯悦, 刘霈珈, 等. 关中平原城市群城市韧性的时空演化及障碍因子诊断[J]. 水土保持研究,2026,33(6):463-474,485.
Li Chenxi, Feng Yue, Liu Peijia, et al. Spatiotemporal evolution of urban resilience and diagnosis of obstacle factors in Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):463-474,485.

# 关中平原城市群城市韧性的时空演化及障碍因子诊断

李晨曦[1], 冯 悦[1], 刘霈珈[2,3], 李 治[1]
(1.西安建筑科技大学 公共管理学院, 西安 710055;
2.郑州大学 政治与公共管理学院, 郑州 450001; 3.郑州大学 国家安全研究院, 郑州 450001)

**摘 要:**[目的]探究关中平原城市群城市韧性的时空演变规律与障碍因子作用机制,为城市群韧性提升与高质量协同发展提供科学依据。[方法]基于经济、社会、生态与基础设施4个维度构建评价体系,综合运用熵值法、核密度估计及障碍度模型,对2017—2023年关中平原城市群11个城市的韧性水平进行了测度与障碍诊断。[结果](1)区域韧性整体呈稳步上升趋势,年均增长率为4.65%,但内部差异显著,空间上呈现以西安为核心的"核心-边缘"结构,并逐步向"轴线拓展、多中心协同"的网络化格局演进;(2)经济与社会韧性是核心制约维度,其中进出口总额、普通本专科在校学生数、社会消费品零售总额为关键障碍因子;(3)2023年人口自然增长率的障碍作用显著增强,表明制约因素已从经济主导向经济社会结构性问题并重转变。[结论]关中平原城市群城市韧性整体呈稳步上升趋势,空间格局逐步向多中心协同的网络化结构演进;经济与社会韧性是主要制约维度,障碍结构由经济主导演变为经济社会复合型;社会维度制约作用由隐到显,人口因素成为新增显著障碍因子。

**关键词:**城市韧性; 关中平原城市群; 核密度估计; 时空演化; 障碍因子
**中图分类号:**F299.27; TU984.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0463-12

# Spatiotemporal evolution of urban resilience and diagnosis of obstacle factors in Guanzhong Plain urban agglomeration

Li Chenxi[1], Feng Yue[1], Liu Peijia[2,3], Li Zhi[1]
(1.*School of Public Administration, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an* 710055, *China*; 2.*School of Politics and Public Administration, Zhengzhou University, Zhengzhou* 450001, *China*; 3.*Institute of National Security Studies, Zhengzhou University, Zhengzhou* 450001, *China*)

**Abstract:** [**Objective**] This study aims to explore the spatiotemporal evolution patterns of urban resilience in the Guanzhong Plain urban agglomeration and the influencing mechanisms of its obstacle factors, thereby providing a scientific basis for the resilience enhancement and high-quality coordinated development of the urban agglomeration. [**Methods**] An evaluation system was constructed based on four dimensions: economy, society, ecology, and infrastructure. The entropy method, kernel density estimation, and obstacle degree model were comprehensively applied to measure the resilience level and conduct obstacle diagnosis for 11 cities in the Guanzhong Plain urban agglomeration from 2017 to 2023. [**Results**] (1) The overall regional resilience maintained a steady upward trend with an average annual growth rate of 4.65%, yet significant internal disparities existed. Spatially, the agglomeration presented a "core-periphery" structure centered on Xi′an, and gradually evolved into a network pattern characterized by "axial expansion and polycentric coordination". (2) Economic and

**收稿日期:**2026-01-09 **修回日期:**2026-02-08 **接受日期:**2026-03-09
**资助项目:**教育部人文社会科学研究一般项目(23YJC630076);国家自然科学基金(42001230,72074175);陕西省社会科学基金年度项目(2024D058);中国科协高端科技智库青年人才计划项目(20220615ZZ07110019);河南科协青年人才托举工程(2026HYTP022)
**第一作者:**李晨曦(1988—),男,陕西咸阳人,博士,副教授,主要从事土地资源评价与利用规划研究。E-mail:lichenxi@xauat.edu.cn
**通信作者:**刘霈珈(1989—),女,甘肃庆阳人,博士,副教授,主要从事土地资源评价与利用规划,城乡融合发展研究。E-mail:zzuliupj@zzu.edu.cn

social resilience constituted the core restrictive dimensions, among which the total import and export volume, the number of students enrolled in general undergraduate and junior colleges, and the total retail sales of consumer goods were identified as the key obstacle factors. (3) In 2023, the obstructive effect of the natural population growth rate rose remarkably, which indicated that the restrictive factors had shifted from an economy-dominated pattern to a balanced focus on both economic and social structural problems. [**Conclusion**] The urban resilience of the Guanzhong Plain urban agglomeration shows an overall steady upward trend, and its spatial pattern has gradually evolved into a polycentric collaborative network structure. Economic and social resilience serve as the major restrictive dimensions. The obstacle structure has shifted from an economy-dominated pattern to a combined economic-social pattern. The restrictive effect of the social dimension has changed from latent to prominent, and population factors have emerged as new notable obstacle factors.

**Keywords**: urban resilience; Guanzhong Plain urban agglomeration; kernel density estimation; spatiotemporal evolution; obstacle factors

在当前全球气候变化与不确定性风险叠加的复杂背景下,城市作为承载社会经济发展的主要空间,其面临的自然灾害、公共卫生事件及社会经济冲击日益频发,提升城市应对扰动的能力已成为全球性共识与紧迫课题[1-2]。“韧性”理念为此提供了全新的分析范式,其强调系统在承受冲击的同时维持核心功能、并能够通过学习适应实现转型发展的综合能力,这与中国推进新型城镇化、建设“韧性城市”的战略导向高度契合[3]。关中平原城市群作为《国家新型城镇化规划》与“一带一路”倡议中明确的西部地区核心增长极,于国家区域发展的整体格局里,处于重要战略地位。然而,该区域内部发展不平衡,且共同面临着水资源短缺、生态环境脆弱及产业结构转型等多重压力,使其整体韧性面临严峻考验。因此,科学评估并提升其城市韧性,不仅是响应国家战略部署的必然要求,更是保障区域可持续发展的现实迫切需要。

本文所探讨的“城市韧性”,是一个超越传统单一防灾的综合性概念,特指城市系统在预见、抵抗、吸收、适应并从外部扰动中恢复的过程中,保持关键功能稳定乃至实现转型升级的动态能力[4-5]。研究对象“关中平原城市群”则严格依据国家发展规划界定的空间范围,主要包括陕西西安、宝鸡、咸阳、铜川、渭南、商洛部分区县,以及甘肃天水、平凉、庆阳部分区县和山西运城、临汾部分区县。纵观现有研究,学界已在城市韧性的概念框架[6-7]、评价指标体系构建[8-9]、测度方法[10-11]及其时空分异格局等[12]方面积累了丰富成果。在韧性评估与时空演化分析方面,熵值法、障碍度模型等客观赋权与诊断方法被广泛应用于不同尺度的韧性评价[13];核密度估计、空间自相关等方法则为揭示韧性分布的动态演进与空间关联特征提供了有效工具[14-15]。近年来,随着国土空间规划体系改革的深化,基于资源环境承载能力和国土空间开发适宜性的“双评价”框架,以及强调资源效率优化与空间布局韧性协同的理论视角,为城市群可持续发展研究提供了新范式[16-17]。已有研究指出,在生态本底脆弱、资源约束趋紧的内陆地区,城市韧性的提升必须与空间资源配置效率、基础设施网络优化及生态安全格局构建紧密结合[18-19]。

然而,聚焦于关中平原城市群这一特定对象,现有研究仍存在三方面亟待深化的缺口:一是多聚焦静态截面分析,对其韧性长时间序列的动态演化轨迹与阶段性跃迁特征揭示不足;二是多关注韧性水平的驱动因素,而对制约韧性提升的关键“短板”与障碍因子进行系统诊断与动态追踪的研究较为薄弱;三是针对该内陆型城市群所面临的水资源紧缺约束[20]、黄土高原生态脆弱性[21]以及产业转型与社会结构变化等[22]的独特地域风险,现有研究对其与城市韧性系统间的作用机制探讨尚不充分,尤其缺乏基于“资源效率-空间布局-韧性支撑”协同框架的系统性探讨[23],导致现有策略往往难以兼顾地域适应性与系统精准性。

鉴于此,本研究旨在通过构建契合区域特点的韧性评价指标体系,以关中平原城市群为研究区域,基于2017—2023年11个地级市的面板数据,综合运用熵值法、核密度估计法、空间分析与障碍度模型,对城市韧性水平进行定量评估与时空演化解析,并系统诊断影响其提升的关键障碍因子及其动态演变规律。本研究的意义在于,在理论层面,不仅深化了对内陆型城市群韧性动态演化规律的认识,而且通过融合障碍度诊断与时空分析,为从“状态评估”到“短板诊断”再到“机理揭示”的研究链条提供了方法论补充;特别是在资源约束背景下,为理解“国土空间效率-城市韧性”协同关系提供了实证案例。在实践层面,研究成果能为关中平原城市群识别韧性短板、优化空间资源

配置、制定差异化协同提升策略提供科学的决策依据,从而推动区域的高质量与安全发展。

# 1　研究区域及数据来源

## 1.1　研究区域

关中平原城市群地处中国西部,涵盖陕西、甘肃、山西3省的11个地级市,包括西安、宝鸡、咸阳、铜川、渭南、商洛、天水、平凉、庆阳、运城及临汾。区域总面积约10.71万$km^2$,该城市群以西安市为核心,具备深厚的文化底蕴和较为完善的产业基础,交通网络日益健全,生态治理成效初显,已成为推动西北地区发展的关键区域。然而,与东部发达城市群相比,关中平原城市群仍存在核心城市带动能力有限、区域内部协同不足、生态环境本底脆弱等问题,亟需探索符合自身特点的韧性发展路径。

## 1.2　数据来源

本研究数据主要源自2017—2023年的《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》,以及陕、甘、晋3省及其11个地级市对应的统计年鉴、国民经济与社会发展统计公报、生态环境状况公报等公开资料。数据处理遵循以下流程:首先,对原始数据进行系统收集与整理,构建涵盖所有城市与年份的面板数据库;其次,进行数据质量检验,发现少数指标存在零星缺失,总缺失率低于1.5%,主要表现为个别城市在特定年份的数据空缺,如2019年天水市污水处理率、2020年平凉市互联网宽带接入用户数等共21个数据点,这些缺失主要由部分统计公报发布滞后或统计口径微调所致,在时序上呈随机分布,未形成系统性缺失;针对缺失数据,采用线性插值法进行补全,该方法基于相邻年份数据的趋势进行估计,适用于时间序列且能保持数据结构的一致性;随后,为消除指标间量纲差异,运用极值法对所有指标进行标准化处理,正向指标与负向指标分别采用相应公式进行归一化;最后,将处理后的数据整合为可用于模型计算的完整数据集,并在MATLAB R2025 a与ArcGIS 10.8平台中完成分析与可视化工作。

# 2　研究方法

## 2.1　指标体系构建

建立科学合理的评价指标体系是准确测度城市韧性的前提与基础。秉持系统性、科学性与可操作性的原则,本文在借鉴既有研究成果的基础上,结合关中平原城市群的发展特征,构建包含目标层、准则层与指标层的城市韧性评价体系。目标层为城市韧性综合水平,旨在反映城市系统应对外部扰动与内部压力的整体能力。准则层由经济韧性、社会韧性、生态韧性和基础设施韧性4个维度构成,各维度不仅具有明确的韧性内涵,其下属指标也经过理论筛选,以系统反映对应维度的韧性机制。

经济韧性指城市经济系统在冲击下维持稳定、恢复并实现转型的能力[24]。为刻画该能力,选取人均地区生产总值、第三产业占比等指标,分别衡量经济基础、结构多样性与内生恢复潜力;进出口总额和全社会消费品零售总额则分别反映对外经济适应性与内需市场稳定性。社会韧性强调社会系统通过公共服务、社会保障等实现调节与适应的能力[25]。对应选取人口密度、自然增长率等指标,反映社会结构与人口活力;医疗机构床位数、在校学生数等指标则分别体现公共卫生服务能力与人力资本储备水平。生态韧性关注生态环境的自我调节与污染治理能力[26]。选用人均公园绿地面积、绿化覆盖率等指标表征生态本底与自然调节功能;污水处理率、空气质量优良天数等指标则反映环境治理成效与生态健康支撑能力。基础设施韧性指交通、市政、信息等设施网络在灾害中保障城市运行的能力[27]。选取人均道路面积、排水管道密度等指标衡量物理设施的承载与排险能力;互联网宽带用户数等指标则体现智慧化支撑与信息联通水平。基于上述理论关联,综合考虑数据可得性与代表性,最终筛选确定24项具体指标构成指标层。所有指标中,仅城镇登记失业率与工业二氧化硫排放量为负向指标,其余均为正向指标。指标体系具体构成见表1。

## 2.2　基于熵值法与变异系数法的权重确定与稳健性检验

为客观确定城市韧性评价指标的权重,避免主观偏差,本研究采用熵值法计算各指标权重,并引入变异系数法进行稳健性验证。熵值法基于信息熵理论,通过指标数据的离散程度评估其相对重要性;变异系数法则通过“标准差/均值”衡量指标的相对离散程度,两者同属基于数据离散特征的客观赋权法,可形成有效互补验证。具体步骤如下:

2.2.1　*数据标准化处理*　为消除量纲影响,本研究采用极值法对各项评价指标进行标准化处理:

对于正向指标:

$$X'_{ij}=\frac{X_{ij}-\min X_{ij}}{\max X_{ij}-\min X_{ij}}+0.0001 \tag{1}$$

对于负向指标:

$$X'_{ij}=\frac{\max X_{ij}-X_{ij}}{\max X_{ij}-\min X_{ij}}+0.0001 \tag{2}$$

式中:$X_{ij}$为$i$年($i=1,2,\cdots,m$)第$j$项($j=1,2,\cdots,n$)指标的原始值;$X'_{ij}$为标准化处理后的值;$\max X_{ij}$和$\min X_{ij}$分别为第$j$项指标中的最大值和最小值。

**表 1 城市韧性评价指标体系及权重**

**Table 1 Urban resilience evaluation indicator system and weights**

| 目标层 | 准则层 | 指标层 | 指标单位及性质 | 序号 | 权重 |
|---|---|---|---|---|---|
| 城市韧性 | 经济韧性（0.5780） | 人均地区生产总值 | 元（+） | $X_1$ | 0.0333 |
| | | 第三产业占GDP比重 | %（+） | $X_2$ | 0.0204 |
| | | 城镇化率 | %（+） | $X_3$ | 0.0284 |
| | | 城镇居民人均可支配收入 | 元（+） | $X_4$ | 0.0172 |
| | | 全社会消费品零售总额 | 亿元（+） | $X_5$ | 0.1221 |
| | | 进出口总额 | 亿元（+） | $X_6$ | 0.2728 |
| | 社会韧性（0.2801） | 人口密度 | 人/km$^2$（+） | $X_7$ | 0.0282 |
| | | 城镇登记失业率 | %（−） | $X_8$ | 0.0082 |
| | | 医疗机构床位数 | 张（+） | $X_9$ | 0.0477 |
| | | 普通本专科在校学生数 | 人（+） | $X_{10}$ | 0.1665 |
| | | 人口自然增长率 | %（+） | $X_{11}$ | 0.0291 |
| | | 公共图书馆藏书量 | 千册（+） | $X_{12}$ | 0.0264 |
| | 生态韧性（0.0723） | 人均公园绿地面积 | m$^2$（+） | $X_{13}$ | 0.0082 |
| | | 建成区绿化覆盖率 | %（+） | $X_{14}$ | 0.0103 |
| | | 污水处理率 | %（+） | $X_{15}$ | 0.0125 |
| | | 工业二氧化硫排放量 | t（−） | $X_{16}$ | 0.0049 |
| | | 生活垃圾无害化处理率 | %（+） | $X_{17}$ | 0.0043 |
| | | 空气质量优良天数比率 | %（+） | $X_{18}$ | 0.0163 |
| | 基础设施韧性（0.0696） | 人均城市道路面积 | m$^2$/人（+） | $X_{19}$ | 0.0199 |
| | | 建成区排水管道密度 | km/km$^2$（+） | $X_{20}$ | 0.0174 |
| | | 燃气普及率 | %（+） | $X_{21}$ | 0.0039 |
| | | 公路货运量 | 万t（+） | $X_{22}$ | 0.0391 |
| | | 用水普及率 | %（+） | $X_{23}$ | 0.0025 |
| | | 互联网宽带接入用户数 | 万户（+） | $X_{24}$ | 0.0604 |

注：“（+）”表示正向指标，数值越大越有利于提升城市韧性；“（−）”表示负向指标，数值越大越不利于提升城市韧性。

2.2.2 *熵值法权重计算* 指标比重$P_{ij}$为：

$$P_{ij}=X'_{ij}/\sum_{i=1}^{m}X'_{ij} \tag{3}$$

计算指标熵值$e_j$为：

$$e_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\ln p_{ij} \tag{4}$$

计算指标的权重$W_j$为：

$$W_j=(1-e_j)/\sum_{j=1}^{n}\left(1-e_j\right) \tag{5}$$

最后，计算韧性综合指数$S_i$为：

$$S_i=\sum_{j=1}^{n}W_j\times X'_{ij} \tag{6}$$

2.2.3 *变异系数法检验权重稳健性* 为验证熵值法权重的可靠性，采用变异系数法进行对比分析。首先计算各指标的变异系数$\mathrm{CV}_j$：

$$\mathrm{CV}_j=\sigma_j/\overline{X}_j \tag{7}$$

式中：$\sigma_j$为第$j$项指标的标准差；$\overline{X}_j$为其均值。

进而得到变异系数法权重$W'_j$：

$$W'_j=\mathrm{CV}_j/\sum_{j=1}^{n}\mathrm{CV}_j \tag{8}$$

通过对熵值法权重与变异系数法权重进行相关性检验（表2），结果显示，二者Pearson相关系数为0.983 2（$p<0.001$），Spearman等级相关系数为0.942 0（$p<0.001$），均达到统计显著水平，且相关性极强，表明两种方法在具体权重数值和指标重要性排序上高度一致。特别值得注意的是，两种方法识别的前5大障碍因子完全一致，依次为$X_6$（进出口总额）、$X_{10}$（普通本专科在校学生数）、$X_5$（全社会消费品零售总额）、$X_{24}$（互联网宽带接入用户数）和$X_9$（医疗机构床位数）。这进一步证实了这些关键指标在制约区域韧性提升中的重要作用，也充分说明熵值法的赋权结果具有极高的稳健性与可靠性，为后续障碍因子的深度诊断及针对性对策建议提供了坚实的方法学支撑。

表 2　权重方法相关性检验
Table 2　Correlation test of weighting methods

| 检验方法 | 相关系数 | $p$值 | 相关强度 | 统计显著性 |
|---|---|---|---|---|
| Pearson相关系数 | 0.9832 | <0.001 | 极强相关 | 显著 |
| Spearman等级相关系数 | 0.9420 | <0.001 | 极强相关 | 显著 |

### 2.3　核密度估计

核密度估计是一种重要的非参数估计方法。其核心原理在于通过平滑处理,从样本数据中生成一条连续的密度曲线,从而精确揭示随机变量的概率分布特征[28]。该方法能够有效揭示数据分布的位置、形态、延展性以及极化趋势等深层信息。本文运用此方法分析关中平原城市群城市韧性水平的动态分布演化特征,其计算公式如下:

$$f(x)=\frac{1}{Nh}\sum_{i=1}^{N}K\left(\frac{X_i-x}{h}\right) \tag{9}$$

式中:$N$为观测值数量;$X_i$为第$i$个城市的韧性综合评价值;$h$为带宽,带宽的选择对核密度曲线估计的合理性至关重要,本文选择了Silverman所提出的最优带宽值;$K\left(\frac{X_i-x}{h}\right)$为核函数。为提升估计的稳健性与可比性,本研究选用应用广泛的高斯核函数(Gaussian Kernel)进行估计,其表达式为:

$$K(u)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{u^2}{2}} \tag{10}$$

式中:$u$为核函数的自变量,它表示观测值$X_i$与目标点$x$之间的标准化距离;e为指数函数的底数,在核函数中通过$e^{-\frac{u^2}{2}}$实现高斯曲线的指数衰减。

### 2.4　障碍度模型

障碍度模型能够用于诊断与分析制约关中平原城市群城市韧性提升的主要障碍因子及其作用强度。该模型通过计算单项指标对系统发展的阻碍作用,能够准确识别制约城市韧性水平提升的关键因素,为制定差异化的韧性提升策略提供科学依据[29]。其计算公式如下:

$$I_{ij}=1-X'_{ij} \tag{11}$$

$$O_{ij}=\frac{W_j^{(E)}\times I_{ij}}{\sum_{j=1}^{m}W_j^{(E)}\times I_{ij}} \tag{12}$$

式中:$O_{ij}$对应第$j$项指标对城市韧性的障碍度;$W_j^{(E)}$对应第$j$项指标的权重;$X'_{ij}$为各项指标标准化数值;$I_{ij}$为指标偏离度,具体通过指标标准化值$X'_{ij}$与理想值1的差距来体现;$m$为指标个数。

## 3　结果与分析

### 3.1　关中平原城市群韧性水平评价及时空演化特征

3.1.1　城市韧性水平测度结果及总体特征　基于熵值法对2017—2023年关中平原城市群11个城市进行韧性水平测度,结果显示该区域城市韧性呈现出明显的“核心-边缘”结构特征与动态演化趋势(表3)。从整体水平看,各城市韧性水平差异显著,均值分布在0.140 5～0.812 9,极差达0.672 4。其中,西安市作为区域核心,其韧性水平遥遥领先,是排名第二的咸阳市的3.55倍,而铜川、商洛、平凉等城市则相对滞后,反映出区域内部发展不平衡的突出问题。从时序演化角度来看,关中平原城市群韧性水平总体呈稳步提升态势,区域均值从2017年的0.205 8增长至2023年的0.268 0,年均增长率为4.65%。值得注意的是,2020年区域韧性均值较2019年出现小幅回落,从0.239 0降至0.236 7,这主要与新冠疫情突发导致的短期系统性冲击有关。作为内陆型城市群,其经济运行与社会活动对线下协作与实体场景依赖较强,疫情期间人员流动受限、部分产业阶段性停滞以及公共服务资源紧张,对经济韧性维度的进出口、消费市场以及社会韧性维度的公共服务等方面造成一定压力,这与全国多数城市当时的韧性波动趋势一致。随后,随着复工复产与政策支持,2021年起韧性水平迅速回升并延续增长。具体到城市表现,临汾市增长最为显著,增幅达45.88%,2023年其韧性水平已接近咸阳、宝鸡等次中心城市;渭南市、商洛市等基础较弱城市也表现出较强的追赶势头。相比之下,西安市因发展基数较大,增幅相对有限,体现出高基数城市进入稳定发展阶段的特征。这种时序演化特征表明,研究期内关中平原城市群韧性建设取得显著成效,区域内部差距呈现缓慢收敛趋势,但核心城市的绝对优势地位与区域发展的不均衡格局仍未发生根本性改变,如何强化核心辐射、促进区域协同应成为未来韧性提升的关键方向。

3.1.2　城市韧性的时序演化特征　为直观揭示关中平原城市群城市韧性的时序演变趋势,本文运用MATLAB软件,采用三维核密度估计呈现综合及分维度韧性的分布特征(图1—2)。核密度曲线形态的演变,深刻反映了区域韧性发展的内在过程与结构性特征。

从综合韧性的分布演化来看(图1),核密度曲线的分布中心在研究期内持续右移,这标志着区域整体应对各类扰动的综合能力得到了系统性增强,其背后是西安、咸阳、宝鸡等城市产业结构优化升级、区域交通与数字基础设施网络完善以及渭河生态带治理等

多重发展进程共同作用的结果。曲线始终保持显著的多峰分布形态，直观且稳定地揭示了“单核主导、多层分化”的空间结构韧性，表明西安作为核心城市的资金、人才、技术等发展要素集聚效应持续强化，而咸阳、宝鸡、运城等次中心城市尚未形成足够强大的反磁力中心，商洛、庆阳、天水等边缘城市发展动能不足，区域韧性提升的多极驱动格局远未成熟。曲线分布宽度的变化进一步刻画了区域内部差距的动态过程。2019—2021年曲线宽度的收窄，反映出区域内部韧性差距出现阶段性缓和，这主要与“西咸一体化”“黄河流域生态保护和高质量发展”等区域协同发展战略深入实施产生的初步“涓滴效应”，以及新冠疫情初期普惠性纾困政策为商洛、平凉等边缘城市提供的缓冲作用有关。然而，2022年后分布范围再度扩大，且右侧拖尾现象愈加明显，这揭示了在后疫情复苏阶段区域发展内生动力出现严重分化，西安凭借其科教资源、产业基础等积累优势实现韧性跃升，而庆阳、平凉等产业结构单一、内生动力不足的边缘城市则复苏乏力，导致“核心—边缘”的韧性断层风险再次凸显，区域协同发展机制面临严峻考验。

**表3 关中平原城市群韧性综合水平**

**Table 3 Comprehensive level of resilience in Guanzhong Plain urban agglomeration**

| 城市 | 2017年 | 2018年 | 2019年 | 2020年 | 2021年 | 2022年 | 2023年 | 平均值 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 西安市 | 0.6734 | 0.7829 | 0.8067 | 0.8094 | 0.8790 | 0.8798 | 0.8593 | 0.8129 |
| 铜川市 | 0.1388 | 0.1518 | 0.1597 | 0.1727 | 0.1747 | 0.1769 | 0.1784 | 0.1647 |
| 宝鸡市 | 0.1936 | 0.2052 | 0.2125 | 0.2128 | 0.2365 | 0.2479 | 0.2534 | 0.2231 |
| 咸阳市 | 0.1865 | 0.1937 | 0.2273 | 0.2325 | 0.2468 | 0.2578 | 0.2580 | 0.2290 |
| 渭南市 | 0.1550 | 0.1860 | 0.1861 | 0.1853 | 0.1962 | 0.2017 | 0.2237 | 0.1906 |
| 商洛市 | 0.1106 | 0.1145 | 0.1403 | 0.1393 | 0.1576 | 0.1559 | 0.1653 | 0.1405 |
| 天水市 | 0.1577 | 0.1546 | 0.1651 | 0.1558 | 0.1754 | 0.1783 | 0.1840 | 0.1673 |
| 平凉市 | 0.1339 | 0.1335 | 0.1521 | 0.1420 | 0.1685 | 0.1525 | 0.1681 | 0.1501 |
| 庆阳市 | 0.1354 | 0.1439 | 0.1482 | 0.1423 | 0.1798 | 0.1627 | 0.1624 | 0.1535 |
| 运城市 | 0.1982 | 0.2019 | 0.2293 | 0.2116 | 0.2258 | 0.2396 | 0.2313 | 0.2197 |
| 临汾市 | 0.1809 | 0.2003 | 0.2017 | 0.2004 | 0.2105 | 0.2099 | 0.2639 | 0.2096 |
| 平均值 | 0.2058 | 0.2244 | 0.2390 | 0.2367 | 0.2591 | 0.2603 | 0.2680 | 0.2419 |

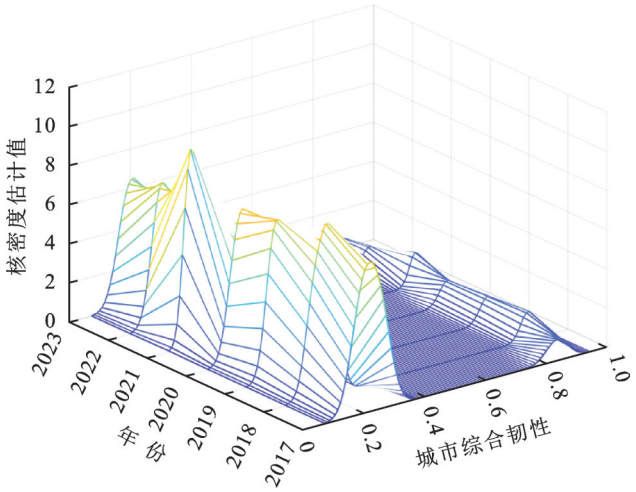



**图1 城市综合韧性核密度估计图**

**Fig. 1 Kernel density estimation of urban comprehensive resilience**

分维度韧性的演化特征则呈现出差异化的内在逻辑（图2）。经济韧性核密度曲线主峰的显著右移与副峰的相对左移并存，说明西安通过电子信息、高端制造等产业升级与对外开放提升了经济系统的稳定与恢复力，而庆阳、平凉等边缘城市则因产业结构单一、价值链低端锁定等问题，与核心城市的经济韧性“质量差距”持续存在。社会韧性曲线在2019年后双峰差距显著扩大，凸显了优质教育、医疗等公共服务与人力资本向西安高度集聚的“虹吸效应”持续强化，商洛、铜川等边缘城市面临人口净流出、公共服务资源利用效率不足等问题，社会韧性的空间公平性面临严峻挑战。生态韧性的密度曲线中心小幅右移，且主峰中心始终大于副峰中心，表明西安、宝鸡、咸阳等多数城市在污染治理与生态建设方面取得进展，但铜川、庆阳等部分资源型城市、传统工业城市生态修复的滞后性，也反映出绿色转型进程的不平衡性。基础设施韧性曲线呈现先左移后右移的偏态分布，整体水平向好，但左偏趋势暗示商洛、平凉等城市在互联网宽带接入等新型基础设施覆盖与应用上可能存在滞后，与西安的“数字鸿沟”风险值得关注。综上，关中平原城市群韧性水平在时序演进中整体呈提升态势，但其提升过程伴随显著的空间分异与结构固化。“核心-边缘”发展不均衡是贯穿各维度韧性演化的核心问题，且经济与社会维度的分化尤为突出，这构成了区域韧性系统提升的主要结构性约束。

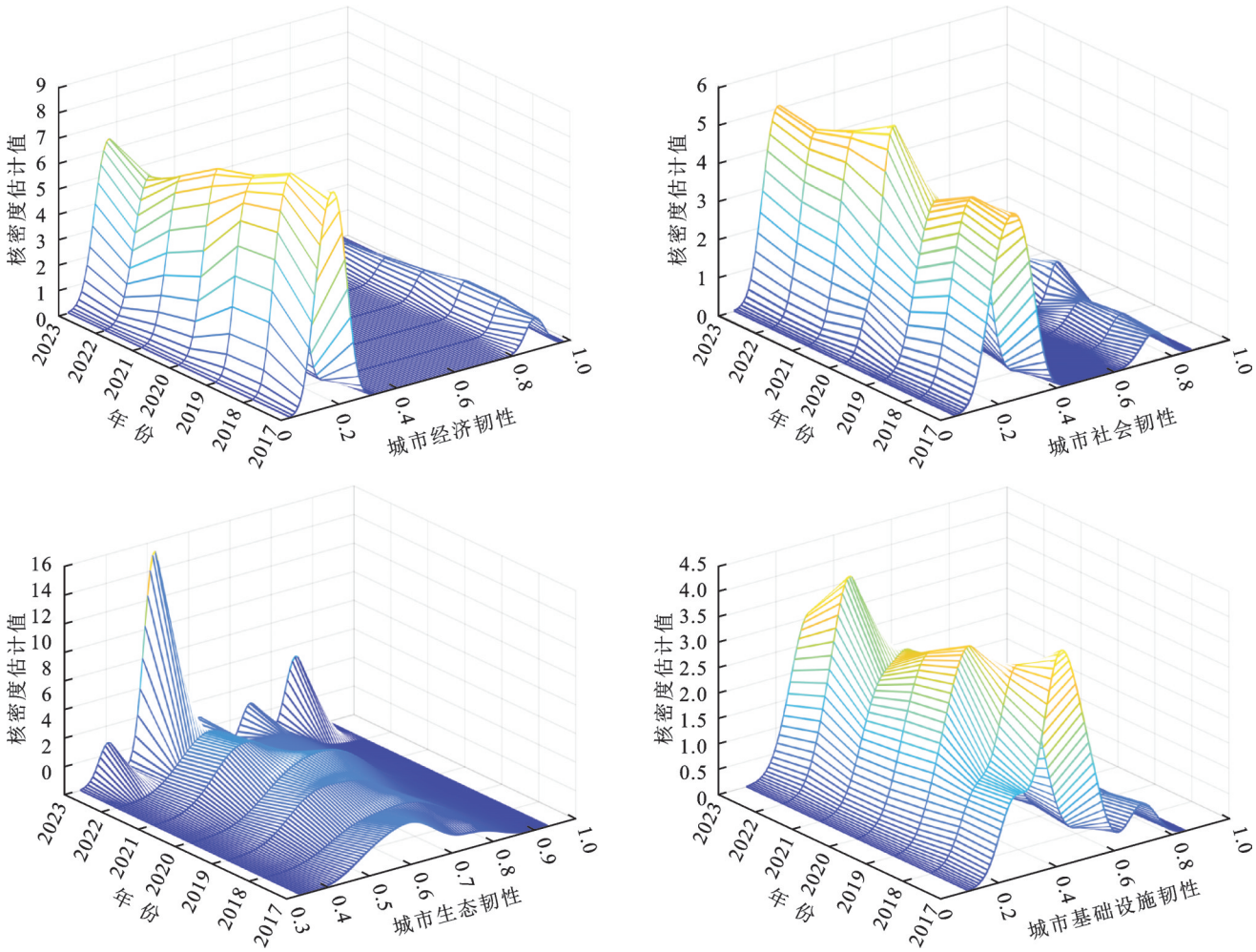



**图 2　各维度韧性核密度估计图**

**Fig. 2　Kernel density estimation of resilience of each dimension**

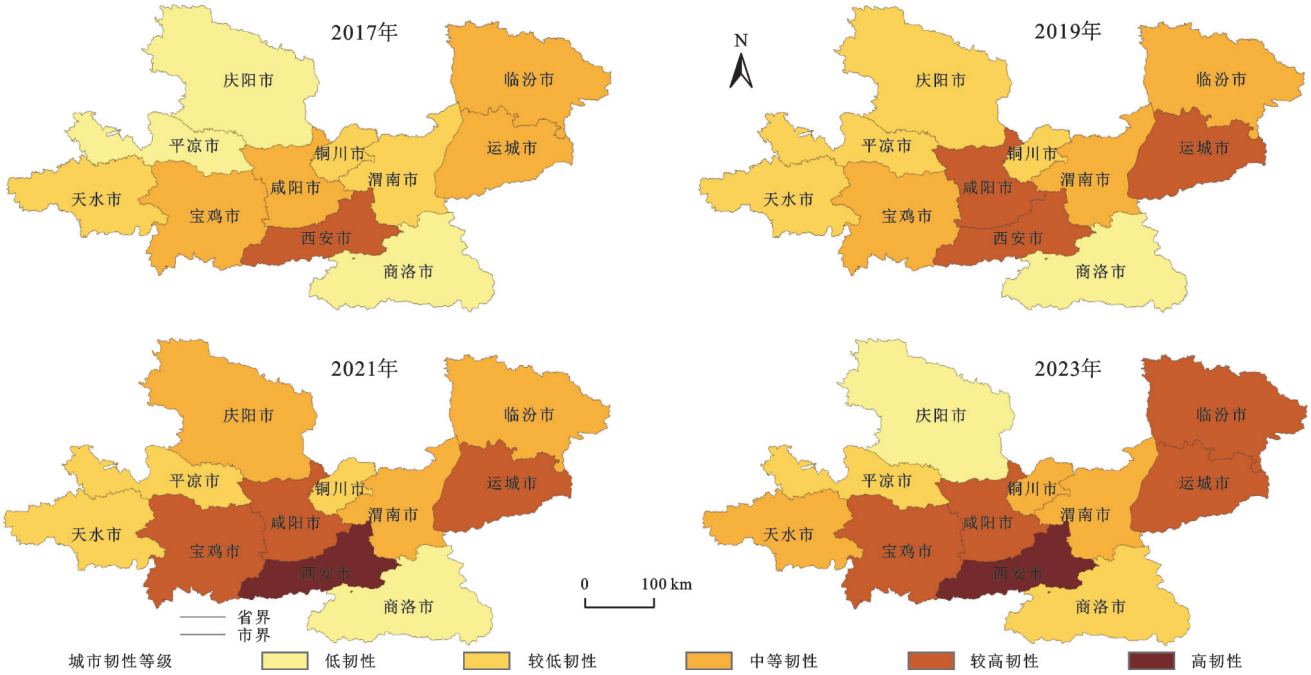
3.1.3　城市韧性的空间演化特征　为进一步探究关中平原城市群城市韧性的空间演变特征,本文运用 ArcGIS 10.8软件,采用自然断点法将关中平原城市群城市韧性水平划分为低韧性、较低韧性、中等韧性、较高韧性和高韧性 5 种类型,并选取 2017 年、2019 年、2021 年和 2023 年的城市韧性数据进行可视化分析(图 3)。研究发现,区域韧性空间格局以“核心-边缘”结构为起点,逐步呈现向“轴线拓展、多中心协同”网络格局演进的趋势。这一演变过程并非简单的等级序列更替,而是核心城市辐射效应、区域政策引导、要素流动通道建设以及城市内在结构响应 4 类关键动力因素综合作用的结果,表现出显著的阶段性演化特征。

2017 年,韧性空间格局呈现“单核突出、边缘滞后”的初始形态。西安市依托国家中心城市战略定位及“一带一路”倡议初期的政策集聚效应,在优质产业、科教资源、公共服务等方面形成显著优势,成为区域唯一的高韧性核心,区域极化效应突出。咸阳、宝鸡、运城、临汾等城市凭借较好的工业基础和交通区位,组成中等韧性过渡带,而天水、平凉、商洛、庆阳等边缘城市受限于产业结构单一、基础设施薄弱与要素集聚能力不足,多数处于较低或低韧性等级。该阶段的格局主要由西安单极集聚效应主导,区域协同机制尚未形成,政策红利辐射范围有限。

2019 年,韧性格局进入“核心强化与局部协同”阶段。西安市韧性等级进一步提升,咸阳市与运城市在西咸一体化推进、黄河流域生态保护与高质量发展战略启动等区域政策引导下,升级为较高韧性等级,形成“西咸—运城”增长组团。宝鸡市、临汾市维持中等韧性等级,庆阳市等部分边缘城市依托交通设施改善与政策扶持韧性有所提升,但商洛市仍处于低韧性层级。这一变化反映出区域协同政策与基础设施互联的初步效应,核心城市功能外溢与交通网络优化促进了韧性要素的有限扩散,但边缘城市的结构性短板仍制约其提升速度。

2021 年,区域韧性空间结构呈现“多中心初步显现”的特征。西安市凭借产业升级、人才集聚与公共服务优化跃升为高韧性等级,成为区域超强核心;咸

阳市、宝鸡市、运城市同步升级为较高韧性等级，分别沿西向“西安—宝鸡”与东向“西安—运城”形成韧性梯度延伸带；临汾市、庆阳市向中等韧性等级拓展，而铜川、商洛受制于产业转型困难与人口流失，仍处于较低韧性水平。这一阶段的演变主要受到国家新型城镇化战略深入实施与区域要素流动效率提升的双重推动，次中心城市间的产业协作、数字连通与公共服务共享能力得到增强，网络化格局初见雏形。




注：基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2024)0650号的标准地图制作，底图未做修改，下图同。

**图3 关中平原城市群韧性空间格局演变**

**Fig. 3 Spatial pattern evolution of resilience in Guanzhong Plain urban agglomeration**

2023年，韧性格局演化为“核心巩固与边缘波动并存”的状态。西安市通过创新驱动、数字基建升级与对外开放深化，进一步巩固其高韧性核心地位；咸阳、宝鸡、运城、临汾作为区域增长极，韧性水平稳定在较高等级；天水市凭借交通条件改善与生态治理成效，成功升级为中等韧性城市；然而庆阳市因产业结构单一、人口支撑不足及外部市场波动，韧性均值从2022年0.162 7降至2023年0.162 4，回落至低韧性等级。这一细微却逆向的波动，不仅凸显了城市内在结构特征在应对外部扰动与区域协同过程中的关键作用，更深刻揭示了边缘资源型城市在区域韧性整体演进中所面临的系统脆弱性与转型压力。

整体而言，关中平原城市群韧性空间格局的演变是西安核心的极化与扩散效应、多层次政策规划的引导与干预、沿交通与数字廊道的要素流动效率提升以及各城市基于自身结构的内生响应能力四重动力系统共同驱动的结果。尽管轴线延伸与多中心协同趋势日益清晰，但核心与边缘之间的韧性差距依然明显，未来韧性提升策略应更加注重区域协同机制的系统构建与边缘城市结构转型的精准支持，以推动形成更加均衡、可持续的韧性空间网络。

### 3.2 关中平原城市群城市韧性障碍因子识别

3.2.1 准则层障碍因子识别与成因解析 2017—2023年关中平原城市群城市韧性准则层障碍因子的动态演化特征（图4）显示，各维度对韧性提升的制约作用存在显著差异且呈现关联性演化规律。其中，准则层平均障碍度从大到小排序为经济韧性（52.82%）＞社会韧性（30.82%）＞基础设施韧性（13.21%）＞生态韧性（3.15%），经济韧性与社会韧性作为核心制约维度，呈现“相互制约、动态关联”的特征，共同构成区域韧性发展的主要瓶颈；基础设施韧性与生态韧性则分别作为支撑条件与基础保障，障碍作用相对有限但持续存在，其演化态势与核心维度形成呼应。

从时序演变与形成机制来看，经济韧性障碍度长期处于高位且整体呈波动下降趋势，由2017年的53.98%降至2023年的53.65%，表明区域经济结构转型与抗风险能力虽有所增强，然而其障碍度仍超过50%，反映出经济发展不均衡与产业韧性不足等问题依然突出。其高障碍度的核心成因在于区域“内陆型”发展属性与“核心—边缘”空间结构的双重约束：外贸通道高度依赖陆路运输，缺乏港口优势，易受国际物流成本与全球市场波动冲击；同时产业

布局呈现“核心集聚、边缘锁定”特征,西安集中了区域内 70% 以上的高新技术产业与外贸主体,而平凉、庆阳等边缘城市仍以资源型、低附加值产业为主,产业链条短、抗风险能力弱,导致经济韧性呈现“核心强、边缘弱”的显著空间分异。社会韧性障碍度则持续攀升,由 2017 年的 28.64% 上升至 2023 年的 32.40%,尤其在 2020 年后增速显著,这一变化与经济韧性的结构性失衡密切相关。经济集聚效应引发西安、咸阳等核心城市人口快速流入,医疗、教育等公共服务资源紧张,边缘城市则陷入“经济弱—服务差—人才流失—经济更弱”的负向循环,疫情后公共服务补短板需求与人口结构转型进一步加剧了社会系统的调节压力。生态韧性障碍度始终保持最低水平且稳步下降,由 2017 年的 3.82% 降至 2023 年的 2.56%,这得益于区域大气污染联防联控、渭河生态修复等协同治理措施,污染治理效率与生态系统自我调节能力显著增强,成为支撑韧性发展的“稳定器”。基础设施韧性障碍度整体稳定在 13% 左右,2023 年下降至 11.39%,表明交通、市政等“硬联通”建设取得阶段性进展,但“核心-边缘”设施供给差距依然显著,边缘城市在人均道路面积、互联网宽带接入率等基础设施指标上明显低于核心城市,整体水平不足核心城市的一半,制约了韧性要素在区域内的高效流动与均衡配置。

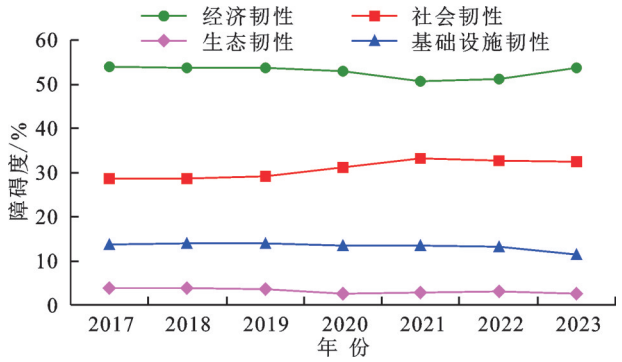



**图 4　关中平原城市群城市韧性准则层障碍因子**

**Fig. 4　Obstacle factors at criterion layer of urban resilience in Guanzhong Plain urban agglomeration**

综上,当前关中平原城市群韧性提升的关键在于有效破解经济与社会维度的系统障碍,同时持续巩固生态与基础设施的支撑作用,形成“核心维度突破-支撑维度强化”的协同提升格局。

3.2.2　指标层障碍因子识别、成因及关联性分析　为进一步厘清影响关中平原城市群韧性提升的主要障碍因子及时序演变特征,本文在准则层分析基础上,聚焦各城市 2017 年与 2023 年排名前五的障碍因子展开深度解析(表 4)。结果表明,指标层障碍因子呈现“核心因子持续主导、关联因子协同制约、新兴因子动态凸显”的演化特征,其制约范围从经济、社会维度逐步扩展至人口结构与基础设施等领域,反映出韧性系统的复杂性与动态性。

核心持续性障碍因子的形成机制与协同制约效应显著。进出口总额($X_6$)在所有 11 个城市中均位列首要障碍因子,出现频率达 11 次,其障碍度均值高达 32.84% 且在多数城市呈上升趋势,西安市在 2023 年达 35.36%,临汾市更升至 36.88%。其高障碍度源于“内陆区位+产业依赖”双重约束:区域外贸结构以加工制造与资源出口为主,附加值低且易受国际供应链波动冲击;同时西安自贸区等开放平台辐射作用有限,边缘城市外贸通道不畅,导致区域外贸韧性整体薄弱。该因子不仅与经济韧性高度绑定,还通过“外贸波动→产业收益下滑→公共服务投入受限”的传导链加剧社会韧性短板。普通本专科在校学生数($X_{10}$)与全社会消费品零售总额($X_5$)以 10 次的高频次构成“人力-内需”障碍群,其中前者障碍源于高等教育资源的极端空间失衡,西安集中了区域 80% 以上的本科院校,边缘城市高教资源严重匮乏,造成人力资源供给与产业升级需求错配,其障碍度在宝鸡、铜川等市长期维持在 19% 以上;后者则反映“收入-消费”循环不畅,边缘城市居民收入低、消费场景单一,内需释放不足,与经济韧性形成相互制约的闭环。

障碍因子作用强度的动态变化反映出结构转型与政策干预的双重影响。人口自然增长率($X_{11}$)由 2017 年未被列入前五,跃升至 2023 年在 6 个城市中成为关键障碍因子,尤其在西安市障碍度达 13.66%,成为第二大障碍。其增强主要受人口结构转型与流动失衡驱动:核心城市生育意愿下降,边缘城市青壮年外流加剧老龄化,共同导致劳动力供给收紧与社会保障压力增大,并通过“人口收缩→消费市场萎缩→产业规模受限”的链式传导扩散其障碍效应。人均城市道路面积($X_{19}$)在西安跃升为 2023 年第三大障碍因子,障碍度为 6.90%,反映出核心城市基础设施韧性已从“数量短缺”转向“结构优化”,交通拥堵与设施承载压力凸显;而边缘城市仍面临设施“数量不足”的共性短板,体现出韧性制约的空间异质性。与此同时,经济韧性障碍度的小幅下降,与西咸一体化、产业协作等区域协同政策及内需培育措施的初步成效相关,表明结构性政策有助于缓解系统脆弱性。

上述障碍因子并非孤立存在,而是通过“经济-社会-基础设施”多维传导链条,交织成一个紧密关联的系统网络。经济层面的外贸依赖与内需不足,直接制约社会层面的人力资本积累与人口可持续发展;社会层面的人力资源短缺与人口结构老化,反过来限制产

业升级与内需释放，进一步削弱经济韧性；基础设施的城乡与区域差距则固化了要素流动壁垒，加剧“核心锁定、边缘滞后”的空间格局。生态韧性虽未成为主要直接障碍，但其持续改善通过“环境优化→人才吸引→产业升级”的正向循环，为经济与社会系统提供了基础支撑。综上，关中平原城市群韧性提升需打破单一障碍因子引发的连锁制约，通过跨维度、整体性治理推动区域韧性向网络化、均衡化方向演进。

**表4 2017年和2023年关中平原城市群城市韧性主要障碍因子和障碍度**

**Table 4 Key obstacle factors and obstacle degrees of urban resilience in Guanzhong Plain urban agglomeration in 2017 and 2023**

| 城市 | 项目 | 2017年 | | | | | 2023年 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 西安 | 障碍因子 | $X_6$ | $X_{24}$ | $X_{10}$ | $X_{20}$ | $X_9$ | $X_6$ | $X_{11}$ | $X_{19}$ | $X_{10}$ | $X_7$ |
| | 障碍度/% | 35.16 | 10.39 | 9.85 | 5.31 | 4.99 | 35.36 | 13.66 | 6.90 | 6.59 | 6.35 |
| 铜川 | 障碍因子 | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{24}$ | $X_9$ | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{24}$ | $X_9$ |
| | 障碍度/% | 31.68 | 19.33 | 14.16 | 7.01 | 5.54 | 33.12 | 20.12 | 14.73 | 7.18 | 5.74 |
| 宝鸡 | 障碍因子 | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{24}$ | $X_9$ | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{11}$ | $X_9$ |
| | 障碍度/% | 33.42 | 19.93 | 13.17 | 6.88 | 4.51 | 35.71 | 21.03 | 13.63 | 3.14 | 4.52 |
| 咸阳 | 障碍因子 | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{24}$ | $X_7$ | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{11}$ | $X_9$ |
| | 障碍度/% | 33.27 | 17.63 | 13.58 | 6.63 | 3.18 | 35.57 | 19.44 | 12.55 | 3.77 | 4.33 |
| 渭南 | 障碍因子 | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{24}$ | $X_9$ | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{11}$ | $X_9$ |
| | 障碍度/% | 32.23 | 19.41 | 12.94 | 6.28 | 4.09 | 34.97 | 20.18 | 13.73 | 3.08 | 3.94 |
| 商洛 | 障碍因子 | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{24}$ | $X_{22}$ | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_9$ | $X_{22}$ |
| | 障碍度/% | 30.55 | 18.41 | 13.55 | 6.66 | 3.93 | 32.58 | 19.44 | 14.37 | 4.97 | 4.20 |
| 天水 | 障碍因子 | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{24}$ | $X_{22}$ | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{22}$ | $X_9$ |
| | 障碍度/% | 32.14 | 19.00 | 13.97 | 6.75 | 4.04 | 33.20 | 19.40 | 14.44 | 4.38 | 4.90 |
| 平凉 | 障碍因子 | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{24}$ | $X_{22}$ | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{22}$ | $X_9$ |
| | 障碍度/% | 31.51 | 19.12 | 13.87 | 6.73 | 3.85 | 32.80 | 19.40 | 14.43 | 4.66 | 4.99 |
| 庆阳 | 障碍因子 | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{24}$ | $X_9$ | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{22}$ | $X_9$ |
| | 障碍度/% | 31.57 | 18.94 | 13.81 | 6.73 | 5.27 | 32.59 | 19.33 | 14.35 | 4.23 | 5.05 |
| 运城 | 障碍因子 | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{24}$ | $X_9$ | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{11}$ | $X_9$ |
| | 障碍度/% | 33.35 | 19.55 | 13.33 | 6.56 | 4.16 | 34.69 | 20.02 | 13.66 | 3.77 | 4.20 |
| 临汾 | 障碍因子 | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{24}$ | $X_9$ | $X_6$ | $X_{10}$ | $X_5$ | $X_{11}$ | $X_9$ |
| | 障碍度/% | 33.21 | 19.40 | 13.35 | 6.61 | 4.83 | 36.88 | 21.91 | 14.30 | 3.89 | 5.03 |

## 4 结论及建议

本研究基于经济、社会、生态及基础设施4个韧性维度，构建了城市韧性评价指标体系。基于此体系，综合运用熵值法、核密度估计、空间分析与障碍度模型，对2017—2023年关中平原城市群11个城市的韧性水平进行了系统测度、时空演化分析及障碍因子诊断。主要结论如下：

（1）区域韧性水平呈稳步提升态势，但空间分异显著，格局演进呈现阶段性跃迁特征。研究期内，城市群韧性综合指数年均增长4.65%，整体抵御风险能力增强。空间上，韧性水平始终呈现以西安为核心的显著“核心-边缘”结构，并经历了从“单核极化”到“轴线拓展、多中心协同”的网络化格局演进。这一演化并非线性过程，而是“核心城市极化与扩散效应、区域战略与政策干预、沿交通干线要素流动效率提升、各城市内生发展能力响应”四重动力系统共同作用的结果，深刻揭示了内陆型城市群韧性空间重构的复杂动力机制，回应了既有研究对长时序动态演化轨迹揭示不足的缺口。

（2）韧性提升的障碍因子具有多维复合性，其制约结构呈现动态演变规律。经济韧性与社会韧性是制约区域韧性提升的核心维度。关键障碍因子包括进出口总额（$X_6$）、普通本专科生在校学生数（$X_{10}$）和全社会消费品零售总额（$X_5$）。尤为重要的是，研究发现障碍结构存在“从经济主导向经济社会复合型演变”的阶段性特征：人口自然增长率（$X_{11}$）的障碍作用在2023年于多数城市中显著凸显，标志着社会维度障碍完成了“由隐到显”的时序转化。这系统回应了关于障碍因子动态诊断研究薄弱的缺口，表明当前韧性建设的短板已从单一的经济冲击抵御，转向应对更深层次的经济社会结构性矛盾。

(3) 理论启示:资源约束下内陆型城市群的韧性脆弱性具有协同叠加特征。本研究表明,关中平原城市群同时面临“产业结构单一、人力资源空间错配”等持续性结构障碍,与“疫情等突发公共事件冲击”等突发性扰动障碍。二者并非孤立存在,而是通过经济与社会系统相互耦合、协同放大区域脆弱性,尤其在产业基础薄弱、公共服务资源匮乏的边缘城市表现更为突出。这一发现深化了对水资源紧缺约束、生态脆弱性等特定地域风险与城市韧性系统间复杂作用机制的认识,为在“资源效率-空间布局-韧性支撑”协同框架下探索差异化提升路径提供了实证依据。

基于上述结论,本文提出以下针对性建议:

第一,实施差异化韧性提升策略,优化区域空间网络格局。核心城市西安应聚焦“功能疏解与高端引领”,强化科技创新与开放枢纽等核心功能,并通过优化基础设施、积极应对人口结构变化以巩固社会韧性,实现从“集聚增长”向“高质量辐射”转变;咸阳、宝鸡、运城等次中心城市需着力“强链补链与枢纽升级”,积极承接核心城市功能外溢,共建产业协作圈,提升教育、医疗等区域性公共服务能力,使之发展成为韧性网络的关键支撑节点;商洛、庆阳、平凉等边缘城市则应推进“精准赋能与结构转型”,通过培育特色产业、针对性补齐基础设施与公共服务短板、引入远程智慧服务等方式突破发展瓶颈,逐步融入区域韧性协同体系。

第二,聚焦关键障碍系统治理,推动经济社会韧性协同突破。经济层面,应在稳定外贸基本盘、大力拓展多元化市场以降低外部依赖风险的同时,着力激发内生动力,通过优化收入分配和培育消费新场景等措施,不断壮大内需市场;社会层面,必须高度重视人口结构变化的长期影响,通过构建生育友好型社会、加大教育投入与职业技能培训、实施更积极的人才政策来优化人口素质与结构,同时持续加强公共卫生、社会保障等“软性”基础设施的均衡布局与服务质量。

第三,夯实韧性发展基底,强化生态与基础设施支撑效能。在夯实韧性基底方面,应坚持生态与基础设施“双轮驱动”。在生态层面,推动区域协同共治,持续加强大气、水、土壤污染联防联控,重点推进渭河等核心生态廊道的系统保护与修复,促进生态优势向可持续的韧性资本转化;在基础设施层面,在持续完善交通、市政等传统“硬联通”设施的同时,需以新型基础设施建设为契机,重点提升区域数字信息网络的覆盖广度与融合深度,为风险预警、应急指挥和资源高效调配提供智慧化支撑。

**参考文献(References):**


[1] 欧阳晓,陈键,魏晓,等.长江中游城市群生态韧性时空分异格局与演化机理[J].地理学报,2025,80(6):1572-1584.
Ouyang X, Chen J, Wei X, et al. Spatiotemporal differentiation and evolutionary mechanism of ecological resilience in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration [J]. Acta Geographica Sinica, 2025, 80(6):1572-1584.

[2] Peng Y, Wang Z, Zhang Y, et al. Facilitating or hindering: the impact of low-carbon pilot policies on socio-ecological resilience in resource-based cities [J]. Land, 2025,14(1):147.

[3] 陶希东.中国韧性城市建设:内涵特征、短板问题与规划策略[J].城市规划,2022,46(12):28-34,66.
Tao X D. Construction of resilient cities in China: connotation characteristics, weaknesses, and planning strategies[J]. City Planning Review, 2022,46(12):28-34,66.

[4] Spaans M, Waterhout B. Building up resilience in cities worldwide: Rotterdam as participant in the 100 Resilient Cities Programme[J]. Cities, 2017,61:109-116.

[5] 张永芳.中原城市群城市韧性动态演化及提升路径研究[J].地域研究与开发,2025,44(5):54-61,99.
Zhang Y F. Research on dynamic evolution and improvement path of urban resilience in the central plains urban agglomeration [J]. Areal Research and Development, 2025,44(5):54-61,99.

[6] Kolte R, Goswami S, Kumar A, et al. Challenges in practical implementation of the concept of urban resilience in cities[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023,99:104142.

[7] 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.
Liu H L, An Z X, Wang H K, et al. The coupling of urban resilience and innovation efficiency forcoordinated spatio-temporal evolution and spatial heterogeneity in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Geographical Research, 2025,44(2):577-602.

[8] 王小兰,张佳雯.成渝地区双城经济圈城市韧性时空演变及障碍因子分析[J].西南科技大学学报,2023,38(2):70-77.
Wang X L, Zhang J W. Spatial and temporal evolution and obstacle factors of urban resilience in the twin-city economic circle in Chengdu-Chongqing Region[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2023,38(2):70-77.

[9] 胡雨晨,张梦琳,毛义华,等.基于多灾害的城市韧性评估及应用研究[J].城市发展研究,2024,31(2):35-43.
Hu Y C, Zhang M L, Mao Y H, et al. Multi-hazard resilience assessment and application study [J]. Urban

Development Studies, 2024,31(2):35-43.

[10] 杨洋,王丽丽,李洪涛.不同风险情境下城市技术网络韧性的测度方法和提升路径:基于“技术-组织-环境”(TOE)框架的组态研究[J].科技管理研究,2025,45(11):41-52.
Yang Y, Wang L L, Li H T. The measurement methods and enhancement pathways of urban technological network resilience in different risk scenarios: a configurational study based on the “Technology-Organization-Environment” framework[J]. Science and Technology Management Research, 2025,45(11):41-52.

[11] 黄琼,崔子怡.中国城市韧性发展水平测度、差异分解与动态演变及障碍因子识别[J].统计与决策,2023,39(13):106-111.
Huang Q, Cui Z Y. Measurement, differences decomposition, dynamic evolution and obstacle factor identification of urban resilience development level in China[J]. Statistics & Decision, 2023,39(13):106-111.

[12] 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.
Wang X, Wang C X, Shi J L. Spatial and temporalevolution of urban resilience and its transition mechanism in Zhongyuan Urban Agglomeration[J]. Scientia Geographica Sinica, 2024,44(7):1206-1216.

[13] 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.

[14] 孙阳,张落成,姚士谋.基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价[J].中国人口·资源与环境,2017,27(8):151-158.
Sun Y, Zhang L C, Yao S M. Evaluating resilience of prefecture cities in the Yangtze River delta region from a socio-ecological perspective[J]. China Population, Resources and Environment, 2017,27(8):151-158.

[15] 贺山峰,梁爽,吴绍洪,等.长三角地区城市洪涝灾害韧性时空演变及其关联性分析[J].长江流域资源与环境,2022,31(9):1988-1999.
He S F, Liang S, Wu S H, et al. Analysis on spatio-temporal evolution and relevance of urban flood disaster resilience in Yangtze River Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(9):1988-1999.

[16] 杜海娥,李正,郑煜.资源环境承载能力评价和国土空间开发适宜性评价研究进展[J].中国矿业,2019,28(S2):159-165.
Du H E, Li Z, Zheng Y. Research progress on assessment of resources and environment bearing capacity and suitability of land space development[J]. China Mining Magazine, 2019,28(S2):159-165.

[17] 钟镇涛,张鸿辉,梁宇哲,等.资源环境承载能力与国土空间开发适宜性智能化评价研究[J].规划师,2020,36(2):71-77.
Zhong Z T, Zhang H H, Liang Y Z, et al. Smart evaluation on environmental capacity and suitability of national space development[J]. Planners, 2020,36(2):71-77.

[18] 孙才志,孟程程.中国区域水资源系统韧性与效率的发展协调关系评价[J].地理科学,2020,40(12):2094-2104.
Sun C Z, Meng C C. Evaluation of thedevelopment coordination relationship between resilience and efficiency of regional water resources system in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020,40(12):2094-2104.

[19] 汪勇政,李久林,顾康康,等.基于形态学空间格局分析法的城市绿色基础设施网络格局优化:以合肥市为例[J].生态学报,2022,42(5):2022-2032.
Wang Y Z, Li J L, Gu K K, et al. Optimization of urban green infrastructure network layout based on MSPA-CIRCUIT: case of Hefei[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(5):2022-2032.

[20] 侯彩霞,张宇宙,杨建平.关中平原城市群水资源-社会-生态系统耦合协调及障碍因子分析[J].干旱区地理,2025,48(4):717-727.
Hou C X, Zhang Y Z, Yang J P. Coupling coordination and obstacle factors of water-society-ecosystem in the Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. Arid Land Geography, 2025,48(4):717-727.

[21] 张良侠,樊江文,张海燕,等.黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析[J].环境科学,2022,43(9):4902-4910.
Zhang L X, Fan J W, Zhang H Y, et al. Spatial-temporal variations and their driving forces of the ecological vulnerability in the Loess Plateau[J]. Environmental Science, 2022,43(9):4902-4910.

[22] 唐晓灵,冯艳蓉,杜莉.产业结构调整与能源生态效率的演变特征及耦合关系:以关中平原城市群为例[J].技术经济,2021,40(4):58-64.
Tang X L, Feng Y R, Du L. The evolution characteristics and coupling relationship between industrial structure adjustment and energy eco-efficiency: taking Guanzhong Plain Urban Agglomeration as an example[J]. Journal of Technology Economics, 2021,40(4):58-64.

[23] 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 S Y, Wang Q X, Yuan J X, 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.

(下转第485页)