引文格式：郑安丽,宋军林,李景宜,等. 关中平原城市群内涝灾害韧性评估与影响因素分析[J]. 地理空间信息, 2026, 24(3): 71-77. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.03.015

# 关中平原城市群内涝灾害韧性评估与影响因素分析

郑安丽[1]，宋军林[1,2]，李景宜[1,2]，折花花[1]，周陆超[1]，吴成森[1]，
郭俊理[1,2]，孔金龙[1]，文彦君[1,2*]
（1. 宝鸡文理学院 地理与环境学院，陕西 宝鸡 721013；2. 宝鸡文理学院 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室，陕西 宝鸡 721013）

**摘　要：**以关中平原城市群11个地级市为研究对象，从经济、社会和基础设施3个维度构建评价体系；运用博弈论组合赋权法、灰色关联度分析法、灰色预测模型对关中平原城市群内涝灾害韧性进行评估预测，并提出提升策略。结果表明：①研究区内涝灾害韧性水平总体呈波动上升趋势，子系统韧性水平差异显著；②内涝灾害水平呈现以西安市为核心逐渐递减的空间特征，子系统韧性中经济、社会韧性发展潜力大，基础设施韧性有待进一步提升；③维度层内涝灾害韧性的主要影响因素为经济因素，指标层人均可支配收入的关联度最高；④2024—2028年研究区内涝灾害韧性继续呈现增长态势，宝鸡市、咸阳市和运城市的核心地位逐渐凸显。

**关键词：**关中平原城市群；内涝灾害；韧性评估；灰色预测模型；博弈论组合赋权法
**中图分类号：**TU982　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）03-0071-07

# Urban Flood Resilience Evaluation in the Guanzhong Plain Urban Agglomeration and Its Influence Factors Analysis

ZHENG Anli[1], SONG Junlin[1,2], LI Jingyi[1,2], SHE Huahua[1], ZHOU Luchao[1], WU Chengsen[1],
GUO Junli[1,2], KONG Jinlong[1], WEN Yanjun[1,2]
(1. College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China;
2. Key Lab of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating of Shaanxi Province, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China)

**Abstract:** Taking 11 prefecture-level cities in the Guanzhong plain urban agglomeration as the research object, we established an urban flood resilience evaluation system from economic, social and infrastructure three dimensions, used game theory combination weighting method, grey relational analysis method, and grey prediction model to evaluate and predict the resilience level of urban flood in the Guanzhong plain urban agglomeration, and proposed improvement strategies. The results indicate that ①the overall level of urban flood resilience in the Guanzhong plain urban agglomeration shows a fluctuating upward trend, significant differences are present in the resilience levels of three dimensions. ②The urban flood level displays a spatial pattern with Xi'an as the core, gradually decreasing outward. Among the subsystem resilience, economic and social resilience have great development potential, while infrastructure resilience requires further enhancement. ③The main factor influencing urban flood resilience is economic factor at the dimension level, with per capita disposable income showing the highest degree of correlation. ④Urban flood resilience in the study area is expected to continue its growth from 2024 to 2028. The core status of cities like Baoji, Xianyang and Yuncheng gradually becomes more prominent.

**Key words:** Guanzhong plain urban agglomeration, urban flood, resilience evaluation, grey prediction model, game theory combination weighting method

20世纪80年代以来大规模的城市建设使得我国城镇区域下垫面属性发生明显变化，地表径流系数和汇流速度增加[1]；同时全球气候变化使得我国极端降水事件发生的频率和强度增加[2]，从而促使城市内涝灾害成为我国最常见的重大自然灾害之一[3]。2006年以来我国每年有100座以上城市发生内涝[4]。我国采取编制防灾减灾规划、成立减灾中心以及建设海绵城市等措施有效降低了城市内涝灾害的影响，但在极端情况下仍将造成巨大损失。韧性理念从动态发展的角度为城市内涝灾害防治提供了新思路，加强韧性城市建设已成为推动灾害治理现代化的重要选择[5-6]。2005年国际减灾会议确认了韧性在防灾减灾工作中的重要

项目来源：国家自然科学基金资助项目（41771215）；陕西省重大项目前期工作专项资助项目（202310）；陕西省重点实验室资助项目（13JS009）；宝鸡文理学院研究生科研创新资助项目（YJSCX24YB54）；国家级大学生创新创业训练计划资助项目（202210721018）。
第一作者简介：郑安丽（1998—），硕士，研究方向为城市灾害韧性，E-mail：1069838664@qq.com。
通信作者：文彦君（1978—），博士，教授，研究方向为自然灾害风险与历史气候变化影响，E-mail：wenyanjun2003@163.com。

性[7-8]。灾害韧性是指系统发生灾害扰动时具有的预防、吸收、抵御、恢复、适应和学习能力，灾前能有效降低成灾概率，灾中能有效减轻灾害损失，灾后有助于系统快速恢复至原始状态或达到更高的平衡状态。在外部干扰和冲击下城市如何提高灾害韧性、实现可持续发展，成为当前研究热点。国内外学者对灾害韧性的研究从定性研究逐步转向定量研究，通过构建多维度灾害韧性指标体系和评估模型，对不同区域各类灾害韧性时空特征及影响因素进行分析。在理论研究方面，通过解析灾害韧性定义、特征、评价体系和评估方法等[7,9]，已形成成熟的理论框架；在评价体系方面，从经济、社会、制度、基础设施和环境等城市属性维度构建指标体系[10-12]和从压力、状态、响应等灾害过程维度构建评价指标体系[13-14]；在评估方法方面，熵权法、AHP[15-16]的应用较广泛，近年来多采用AHP-TOPSIS混合方法、AHP-CRITIC组合赋权[11,17-18]等主客组合赋权方法；在时空特征分析方法方面，多采用GIS空间分析法、探索性数据分析法、核密度估计法等[12,19-22]；在影响因素分析方面，探讨各指标、维度对灾害韧性的影响程度，多采用有障碍度模型、地理探测器[15,22]等方法。目前内涝灾害的研究多侧重于特征、成因、演变机理和风险应对，对内涝灾害韧性量化的研究较少，因此本文采用博弈论组合赋权法测度了关中平原城市群内涝灾害韧性，分析了其时空演化特征和主要影响因素，预测未来发展趋势，并提出内涝灾害韧性提升的策略，以期为关中平原城市群内涝灾害治理和城市群高质量发展提供有益参考。

## 1 数据来源与研究方法

关中平原城市群位于西北内陆，具有承东启西、连接南北的重要区位优势，是西部地区的第二大城市群，在黄河流域高质量发展中占据重要地位；包括西安市、咸阳市、宝鸡市、铜川市、渭南市、商洛市、运城市、临汾市、天水市、庆阳市和平凉市11个地级市[23]。受地形地貌、季风气候、河川地理条件影响，该地区发生连续阴雨和强降水的可能性较大，洪涝灾害多发。据史料记载，1793—1998年关中平原地区平均2.35年发生一次洪涝灾害[24-25]。21世纪以来，气候变化和城市建设叠加影响使得该地区暴雨和特大暴雨出现频率增加，在一定程度上导致洪涝灾害频发，进而导致城市内涝灾害严重[26]。

### 1.1 数据来源

本文采用的统计数据来源于2009—2023年《中国城市统计年鉴》、2009—2023年《中国城市建设统计年鉴》、2009—2023年研究区各省市统计年鉴、各地级市《国民经济和社会发展统计公报》和中经网统计数据库等，个别缺失数据采用线性插值法进行补全；人口密度来源于WorldPop人口密度数据集（https://hub.worldpop.org），空间分辨率为1 km；植被覆盖数据来源于MOD13A3产品数据（https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/），空间分辨率为1 km，按照研究区地级市边界求取平均值，得到逐年归一化植被指数表征植被覆盖率；土地利用数据来源于中国30 m分辨率土地覆盖数据集[27]，分为9种地类，并利用ArcGIS提取计算得到研究区地级市2008—2022年不透水地面积占比；矢量数据来源于国家测绘地理信息局标准地图服务网站。

### 1.2 评价指标体系构建

基于国内外韧性评价研究[12,28-29]，结合内涝灾害特征，本文将关中平原城市群内涝灾害韧性解构为经济、社会和基础设施3个维度。考虑指标合理性和数据可获得性，选取影响内涝灾害韧性的18个指标，构建评价指标体系（表1）。

### 1.3 研究方法

1）博弈论组合赋权法。首先通过AHP确定主观权重（$w_1$），邀请6位专家，运用1～9标度法对各指标的重要性进行两两比较，得到初始矩阵，并计算几何平均数得到判断矩阵，由此计算被比较指标的主观权重，利用一致性比率（$CR$）进行一致性检验，若$CR<0.1$，则矩阵通过一致性检验；然后通过熵权法确定客观权重（$w_2$），为减少主观因素影响，采用熵权法计算各指标客观权重，为实现不同年份间的比较加入了时间变量[12]，基于统一数据量纲和便于综合计算的需求，采用极值标准化法对原始数据进行标准化处理；最后通过博弈论赋权法确定综合权重，博弈论组合赋权法充分考虑了不同权重对指标综合权重的作用，可提高指标权重分配的科学性，已被广泛应用于自然灾害风险评估中[14,18,30]。基于博弈论思想，先对$W$与$w_1$、$w_2$作离差最小化处理，再对其微分得到最优组合系数$a_1$、$a_2$，并进行归一化处理，最后代入式（1）即可得到各指标最优综合权重。

$$W=\sum_{k=1}^{2}a_k w_k^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

式中，$W$为权重的线性组合；$a_k$为不同赋权方法的权重系数。

基于综合权重，研究区内涝灾害韧性指数的计算公式为：

表1　关中平原城市群内涝灾害韧性评价指标体系

| 维度层 | 准则层 | 指标层 | 指标解释与属性 |
|---|---|---|---|
| 经济韧性 | 抵抗力 | 人均可支配收入/万元 | 抵抗灾害的居民收入水平（+） |
| | | 市政公用设施建设固定资产投资/万元 | 抵抗灾害的市政设施水平（+） |
| | 恢复力 | 人均GDP/万元 | 应对灾害的经济发展水平（+） |
| | | 第三产业增加值/亿元 | 应对灾害的经济活力（+） |
| | 适应力 | 教育支出占财政支出比重/% | 对灾害的认识程度（+） |
| 社会韧性 | 抵抗力 | 城镇化率/% | 抵抗灾害的城市发展水平（+） |
| | | 人口密度/(人/km$^2$) | 人口灾害暴露程度（−） |
| | 恢复力 | 就业人员人数/万人 | 应对灾害的社会劳动力水平（+） |
| | | 失业保险参保人数/万人 | 应对灾害的社会保障能力（+） |
| | | 货物周转量/亿t·km | 应对灾害的货物周转便利程度（+） |
| | 适应力 | 污水处理率/% | 资源再利用能力（+） |
| | | 万人在校大学生数/人 | 教育发展水平（+） |
| 基础设施韧性 | 抵抗力 | 排水管网密度/(km/km$^2$) | 抵抗灾害的水利发展状况（+） |
| | | 人均拥有道路面积/m$^2$ | 抵抗灾害的人员疏散能力（+） |
| | 恢复力 | 万人病床数/张 | 灾后恢复的医疗服务水平（+） |
| | | 不透水地面积占比/% | 应对灾害的地面积水风险（−） |
| | 适应力 | 植被覆盖率/% | 下垫面的透水和蓄水能力（+） |
| | | 移动电话年末用户数/万户 | 灾情传递、灾害预警能力（+） |

注：+为正向指标；−为负向指标。

$$C_{xi}=\sum_{i=1}^{n}Y_{xij}W_j \tag{2}$$

式中，$Y_{xij}$为第$x$年城市$i$第$j$项指标的标准化数值；$W_j$为第$j$项指标的综合权重。

2）灰色关联度分析法能衡量因素序列与特定序列之间的紧密程度，进而对系统发展变化趋势进行定量描述和比较。本文采用该方法识别关中平原城市群内涝灾害韧性的关键影响因素。若关联度均大于0.5，说明指标对城市内涝韧性有影响，关联度数值越高，影响越大。

3）灰色预测模型适用于小样本数据预测，预测精度高、适用范围广[31]。本文利用该模型预测研究区2024—2028年内涝灾害韧性，包括构建非负数据序列以满足模型数据要求、建立级比计算以检验数据适宜性、构造数据矩阵和常数向量、求解发展系数与灰色作用量模型参数、将参数代入预测模型得出预测结果等步骤。

4）核密度估计法能反映地理事物在空间上的分布特征[21]。本文采用该方法揭示关中平原城市群内涝灾害韧性预测水平的空间集聚特征，并生成三维热力图，更直观地反映研究区内涝灾害韧性水平的形态分布。

## 2　关中平原城市群内涝灾害韧性时空演化分析

### 2.1　时间演化分析

1）综合韧性时序分析。由图1可知，研究期内关中平原城市群内涝灾害韧性指数总体呈上升趋势，由2.168 2增至3.932 3，表明各城市经济、社会和基础设施水平不断发展，内涝灾害韧性整体水平不断提高；标准差有一定增加，表明内涝灾害韧性指数的离散程度增大，各城市间内涝灾害韧性差异增大；变异系数呈上升—波动—平稳的趋势，前期各城市应对内涝灾害的韧性水平差距开始拉大，2010—2020年进入非均衡化发展阶段，后期差距逐渐缩小，空间异质性减弱。由各城市内涝灾害韧性指数均值（图2）可知，

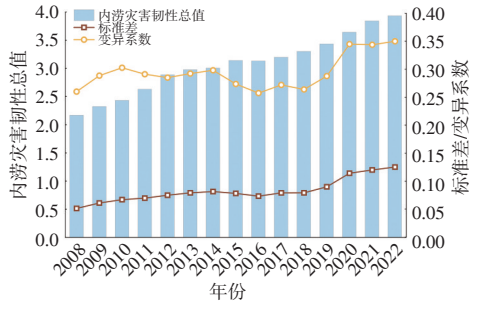



图1　关中平原城市群内涝灾害韧性时间序列变化图

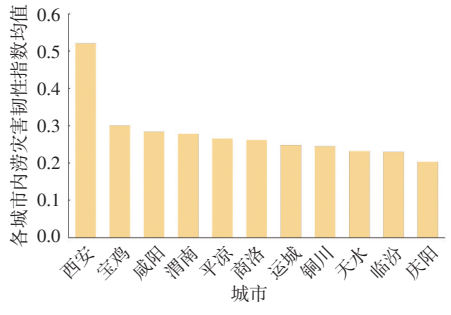



图2　2008—2022年关中平原城市群各城市内涝灾害韧性指数均值图

关中平原城市群内涝灾害韧性地区差异明显，西安市的极化地位显著，经济、社会发展水平高，民众灾害意识较强，基础设施水平较高，面对内涝灾害具有较强的抵抗力和恢复力；庆阳市由于部分指标的下降延缓了内涝灾害韧性的提升速度，其内涝灾害韧性水平最低。总体来看，除西安市外其余城市的韧性水平差距较小，有很大上升空间，说明西安市需要发挥区域中心城市的辐射带动作用，也从侧面反映出关中平原城市群的配套资源分布不均。

2）子系统韧性时序分析。由图3可知，各子系统在研究期内内涝灾害韧性水平均呈上升趋势，动态变化明显，且差异显著，其中经济韧性增幅最大，2021年之前一直处于最低水平，随后超过社会韧性并呈上升趋势，对内涝灾害韧性的贡献率增长近一倍，表明随着时间推移，关中平原城市群经济发展迅速，在城市群内涝灾害韧性中的地位变化明显；社会韧性上升幅度较小，中后期趋于平稳，对城市内涝灾害韧性的贡献率基本保持不变，表明关中平原城市群社会发展水平逐年提高，但在城市群内涝灾害韧性中的地位无明显变化；基础设施韧性一直处于最高水平且平稳发展，对城市内涝韧性的贡献率最高但呈下降趋势，究其原因，关中平原城市群经济韧性增速比基础设施快，且基础设施在城市发展和内涝灾害过程中承受较大压力，因此在城市内涝韧性中的占比下降。

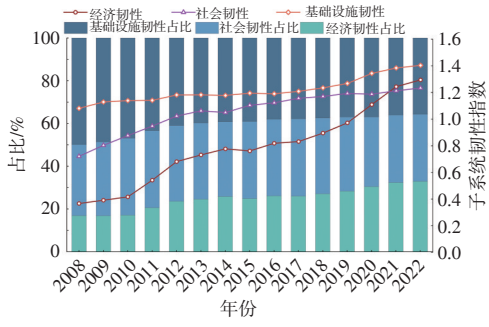



图3 关中平原城市群内涝灾害子系统韧性时间序列变化图

## 2.2 空间演变特征分析

### 2.2.1 综合韧性空间演变特征

采用自然断点法将2008年、2012年、2016年、2020年和2022年各城市内涝灾害韧性指数分为低韧性（<0.193）、较低韧性（0.193~0.251）、中等韧性（0.251~0.284）、较高韧性（0.284~0.308）、高韧性（>0.308）5级。

1）内涝灾害韧性等级的城市数量结构改变。2008年内涝灾害韧性水平整体偏低，除西安市为较高韧性外，其余城市均为较低、低韧性；2012年、2016年韧性水平提升较慢，各韧性等级城市数量趋于均衡，以中等韧性为主，西安市和咸阳市分别在2012年和2016年达到高韧性，此时韧性等级结构的橄榄型特征显现；2020年韧性水平稳步增长，除天水市为中等韧性外其余城市均达到较高韧性及以上；2022年各城市内涝灾害韧性水平均达到较高及以上，高韧性城市数量增加至6个，无较低和低韧性等级韧性，形成典型的倒金字塔结构。

2）内涝灾害韧性水平发展不均。西安市位于城市群中部，具有较高韧性，低和较低韧性城市分布于城市群外围，呈现中间高、四周低的空间分布格局。究其原因，首先在城市群发展上，2018年《关中平原城市群发展规划》中明确了西安市龙头引领作用，通过构建陇—连霍主轴线和包茂、京昆、福银发展带，优先带动咸阳市、渭南市、宝鸡市等节点城市发展，随后辐射带动甘肃省、山西省城市；其次作为国家首批、西北唯一的海绵城市建设试点，西咸新区的排水系统建设提升了区域应灾能力，这种核心城市因战略定位而获得的社会资源，促使西安市具有较强的应灾能力，进而向影响外围城市发展。本质上来说，研究区内涝灾害韧性形成以西安市为核心逐渐递减的空间特征是规划政策驱动下的资源聚集、功能分化的结果。总体来看，随着时间的变化，研究区内涝灾害韧性等级数量结构从橄榄型结构向典型金字塔结构转变，整体内涝灾害韧性水平提升。

### 2.2.2 子系统韧性空间演变特征

1）经济韧性。在内涝灾害情况下，经济韧性反映了城市资金保障和居民抵抗风险的能力。结果表明，研究区的经济韧性处于较高水平，2008年经济韧性水平较低，低和较低韧性城市在研究区北部外围呈片状分布，仅西安市为较高韧性；2012年大部分城市达到中等韧性水平，西安市因第三产业增加值、人均可支配收入和人均GDP增长较快首先进入高韧性等级；2016年所有城市均达到中等及以上韧性水平，天水市第三产业增加值增幅在70%以上，由低韧性进入中等韧性；2020年有8个城市达到较高韧性，商洛市由于收入水平和经济活力较低，仍为中等韧性水平；2022年经济韧性水平较高，西安市、咸阳市和宝鸡市达到高韧性；总体来看，经济韧性呈现中部地区高的特征，城市群经济发展潜力巨大。

2）社会韧性。在内涝灾害情况下，社会韧性反映了城市在灾害发生时的城市综合水平和社会保障能

力。结果表明，研究区的社会韧性处于较高水平，2008年社会韧性水平中等，庆阳市为低韧性，中等及以上韧性城市在研究区中部偏右团状分布；2012年所有城市均达到中等及以上韧性水平，渭南市由于城市化水平、城市运输效率提升和大学生数量增加，达到高韧性；2016年以较高韧性城市为主，天水市由于就业人数下降和城市运输效率波动变化导致其仍为中等韧性，咸阳市和运城市因城市发展迅速和大学生人数增加达到高韧性，特别是运城市万人在校大学生人数增长1.6倍，平凉市2016—2020年城镇化率提升近10%，社会迅速发展，达到高韧性；2022年社会韧性水平较高，天水市也步入较高韧性等级；总体来看，社会韧性呈现东部先提升的特征，社会发展潜力巨大。

3）基础设施韧性。在内涝灾害情况下，基础设施韧性反映了城市在灾害发生时基础设施建设水平、灾情传递情况。结果表明，基础设施韧性处于中等偏上水平，2008年有8个城市为低韧性，仅西安市达到较高韧性，宝鸡市、渭南市少部分地区因不透水地面积较小呈中等韧性，渭南市中等韧性地区分布较密集；2012年运城市达到中等韧性，应对内涝灾害的抵抗力和适应力有所提升；2016年以较低韧性城市为主，西安市北部分布高韧性地区，宝鸡市排水管网密度下降但医疗卫生水平和灾害预警能力有所提升，达到较高韧性；2020年除天水市外其余城市均达到中等及以上韧性水平，宝鸡市积极推进城市排水防涝综合规划，成效显著，达到高韧性，渭南市、咸阳市、临汾市和铜川市高韧性地区分布较少；2022年天水市城市排水能力下降，医疗卫生水平和植被覆盖率波动变化，仍为较低韧性，仅较少地区达到中等韧性，面临较大内涝灾害风险；总体来看，基础设施韧性增长缓慢，呈现北低南高的空间特征，城市群整体基础设施水平有待进一步提升。

## 3　内涝灾害韧性影响因素与动态预测

### 3.1　影响因素分析

由表2可知，关中平原城市群内涝灾害韧性维度层、指标层关联度均在0.5以上，说明指标选取合理且对内涝灾害韧性均有较大影响。结合维度层、指标层重要程度雷达图（图4）可知，维度层关联度大小为经济>基础设施>社会，说明研究区内涝灾害韧性的主要影响因素为经济。指标层$X_1$的关联度高达0.946 7，说明居民收入水平在灾害发生时尤为重要；$X_3$、$X_4$、$X_8$、$X_{12}$、$X_{15}$和$X_{17}$的关联度均超过0.8，说明经济水平与活力、社会劳动力水平、医疗教育水平、下垫面透水和蓄水能力对研究区内涝灾害韧性影响较大；$X_2$、$X_7$、$X_{10}$、$X_{11}$、$X_{13}$、$X_{14}$和$X_{16}$的关联度均超过0.7，其余指标的关联度在0.5~0.6之间，对研究区内涝灾害韧性有一定影响。

表2　关中平原城市群内涝灾害韧性维度层、指标层关联度

| 维度层 | 关联度 | 指标层 | 关联度 | 排序 |
|---|---|---|---|---|
| 经济韧性 | 0.777 3 | 人均可支配收入（$X_1$） | 0.946 7 | 1 |
| | | 市政公用设施建设固定资产投资（$X_2$） | 0.778 4 | 10 |
| | | 人均GDP（$X_3$） | 0.872 7 | 4 |
| | | 第三产业增加值（$X_4$） | 0.888 9 | 2 |
| 社会韧性 | 0.592 1 | 教育支出占财政支出比重（$X_5$） | 0.565 7 | 17 |
| | | 城镇化率（$X_6$） | 0.559 6 | 18 |
| | | 人口密度（$X_7$） | 0.789 4 | 8 |
| | | 就业人员人数（$X_8$） | 0.848 2 | 5 |
| | | 失业保险参保人数（$X_9$） | 0.568 9 | 16 |
| | | 货物周转量（$X_{10}$） | 0.722 4 | 13 |
| | | 污水处理率（$X_{11}$） | 0.748 0 | 12 |
| | | 万人在校大学生人数（$X_{12}$） | 0.813 6 | 7 |
| 基础设施韧性 | 0.688 7 | 排水管网密度（$X_{13}$） | 0.716 5 | 14 |
| | | 人均拥有道路面积（$X_{14}$） | 0.781 0 | 9 |
| | | 万人病床数（$X_{15}$） | 0.874 5 | 3 |
| | | 不透水地面积占比（$X_{16}$） | 0.757 7 | 11 |
| | | 植被覆盖率（$X_{17}$） | 0.825 3 | 6 |
| | | 移动电话年末用户数（$X_{18}$） | 0.666 0 | 15 |

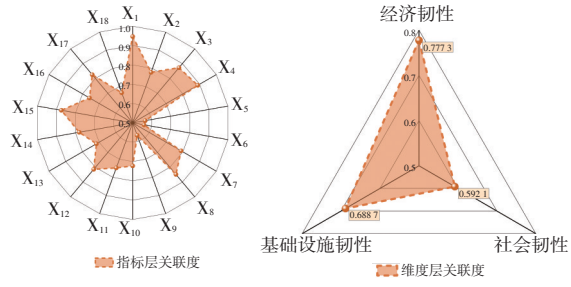



图4　关中平原城市群内涝灾害韧性维度层、指标层重要程度雷达图

### 3.2　预测结果分析

采用灰色预测模型预测研究区内涝灾害韧性指数，并通过极比值检验模型适宜度。结果表明，平均相对残差均小于0.1，说明模型拟合效果良好；后验差比$C$值均小于0.5，说明预测结果精度等级较好；小误差概率$p$值均为1，说明预测结果较科学、合理。2024—2028年内涝灾害韧性指数预测结果见表3，结合2024年、2028年关中平原城市群内涝灾害韧性三维热力图可知，关中平原城市群内涝灾害韧性水平

继续呈稳步增长态势，2028年各城市内涝灾害韧性等级均达到高韧性，表明预测趋势与现有趋势具有一致性。从韧性空间分布来看，研究区内涝灾害韧性地区间差异仍存在，以西安市为核心逐渐递减的空间格局进一步稳固，宝鸡市、咸阳市和运城市的核心地位逐渐凸显。城市群整体灾害韧性水平提升有利于增强城市应灾能力，因此发挥核心地区带动作用是研究区内涝灾害韧性水平提升的重点。

表3 关中平原城市群内涝灾害韧性预测结果

| 城市 | 平均相对残差 | 后验差比 $C$ 值 | 韧性指数预测值 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 2024年 | 2025年 | 2026年 | 2027年 | 2028年 |
| 西安 | 0.056 3 | 0.145 0 | 0.750 5 | 0.787 3 | 0.825 9 | 0.866 5 | 0.908 9 |
| 铜川 | 0.020 2 | 0.066 6 | 0.351 0 | 0.365 9 | 0.381 5 | 0.397 7 | 0.414 6 |
| 宝鸡 | 0.030 4 | 0.151 0 | 0.387 0 | 0.398 1 | 0.409 6 | 0.421 3 | 0.433 5 |
| 咸阳 | 0.097 8 | 0.217 1 | 0.349 6 | 0.351 7 | 0.354 3 | 0.359 0 | 0.361 4 |
| 渭南 | 0.032 9 | 0.205 4 | 0.325 0 | 0.330 7 | 0.336 4 | 0.342 2 | 0.348 2 |
| 商洛 | 0.058 2 | 0.364 2 | 0.300 2 | 0.304 7 | 0.309 2 | 0.313 8 | 0.318 5 |
| 天水 | 0.034 4 | 0.108 2 | 0.292 3 | 0.304 9 | 0.318 0 | 0.331 7 | 0.345 9 |
| 平凉 | 0.019 1 | 0.075 9 | 0.390 4 | 0.403 4 | 0.416 5 | 0.432 3 | 0.449 7 |
| 庆阳 | 0.019 9 | 0.066 3 | 0.336 0 | 0.348 5 | 0.361 9 | 0.377 2 | 0.394 1 |
| 运城 | 0.035 4 | 0.103 4 | 0.371 5 | 0.386 2 | 0.401 6 | 0.417 6 | 0.437 0 |
| 临汾 | 0.035 2 | 0.172 9 | 0.324 3 | 0.337 4 | 0.351 1 | 0.365 4 | 0.380 1 |

## 4 结 语

本文分析了关中平原城市群11个城市2008—2022年内涝灾害韧性的时空演化特征和主要影响因素。结果表明：①时间变化上，研究区内涝灾害韧性水平总体呈波动上升趋势，发展态势向好，各城市间差距逐渐减小，3个维度子韧性水平均呈上升趋势，差异显著，经济韧性增幅最明显，社会韧性增幅较平稳，基础设施韧性增幅最小但处于第一位；②空间格局上，研究区内涝灾害韧性等级数量结构从橄榄型结构向典型金字塔结构转变，韧性水平发展空间分布不均，呈现以西安市为核心逐渐递减的空间特征；③影响因素上，维度层关中平原城市群内涝灾害韧性的主要影响因素为经济方面，指标层关联度最高的是人均可支配收入，经济水平与活力、社会劳动力水平、医疗教育水平、下垫面透水和蓄水能力对研究区内涝灾害韧性影响较大；④2024—2028年研究区内涝灾害韧性继续呈稳步增长态势，2028年达到较高韧性水平，但地区间差异不断增大，以西安市为核心逐渐递减的空间格局进一步稳固，宝鸡、咸阳和运城的核心地位逐渐凸显。

内涝灾害韧性的提升是一个长期、复杂的过程，本文提出了关中平原城市群内涝灾害韧性提升策略：①推进城市间资源互补，提升经济韧性。西安市应充分发挥城市群核心的辐射带动作用，在保障城市群中部西安市、咸阳市和宝鸡市经济增长的同时，加大对城市群外围（甘肃省和山西省）的资源配置；增加教育支出、市政公用设施投入和居民收入，促进第三产业发展，以增强城市群在面对内涝灾害时的资金保障能力。②关注落后城市综合发展水平，提升社会韧性。针对社会发展较慢的庆阳市、天水市和商洛市，对外应制定相应政策吸引人才流入，增加高校在校生数量；对内应增加就业机会，降低社会失业率，提高城市污水处理效率；同时促进各城市住房保障、社会保障等民生事业的发展，形成各城市独特的应灾能力。③完善内涝灾害风险应对机制，提升基础设施韧性。结合海绵城市发展理念，增加城市绿地、地下水库和城市透水地面积，加大排水管网建设的力度。在暴雨发生时，气象、医疗、应急、交通等多部门应协同联动应灾。随着大数据和人工智能的发展，基础设施应逐步智能化，打造高效智能的现代市政基础设施体系，提高灾害预警能力。

城市群是城市发展到成熟阶段的空间组织，有地域相近、气候相似的特征，具有灾害风险共性。面对内涝灾害时，可发挥城市群效应，提升其整体内涝韧性[32]。然而，随着城市群建设的推进，其内部高度集聚的人口与有限的城市资源之间的矛盾日益突出，各城市的应灾能力存在差异，不利于城市群可持续发展。本文利用灰色预测模型对研究区未来内涝灾害韧性水平进行动态预测，打破了大多研究更多关注灾害韧性本身的局限；内涝灾害韧性水平评估、时空演化特征、影响因素和动态预测等研究结果可为研究区应

对城市内涝灾害的现代化治理提供科学依据。后续对于关中平原城市群内涝灾害韧性的研究将从以下方面深入探讨：①选择发展水平相近的多个城市群，横向对比其灾害韧性，探讨时空演化特征；②结合实际，考虑影响因素之间相互作用机制，使结果更具说服力。

## 参考文献


[1] 王浩,王佳,刘家宏,等. 城市水循环演变及对策分析[J]. 水利学报,2021,52(1):3-11

[2] 张昕晗,赵文婷,焦菊英,等. 1960—2023年黄土高原极端降水事件时空演变特征[J]. 干旱区地理,2025,48(7):1153-1166

[3] 刘家福,张柏. 暴雨洪灾风险评估研究进展[J]. 地理科学,2015,35(3):346-351

[4] 李超超,程晓陶,申若竹,等. 城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J]. 灾害学,2019,34(2):57-62

[5] 蔡建明,郭华,汪德根. 国外弹性城市研究述评[J]. 地理科学进展,2012,31(10):1245-1255

[6] 文海家,钱龙,李卓航,等. 山地城镇洪涝滑坡灾害韧性评估研究[J]. 防灾减灾工程学报,2024,44(4):751-761

[7] 邵亦文,徐江. 城市韧性:基于国际文献综述的概念解析[J]. 国际城市规划,2015,30(2):48-54

[8] 李亚,翟国方,顾福妹. 城市基础设施韧性的定量评估方法研究综述[J]. 城市发展研究,2016,23(6):113-122

[9] 王化齐,张戈,李林,等. 城市内涝风险识别、预警与韧性评估研究进展[J]. 灾害学,2023,38(1):136-140

[10] 李亚,翟国方. 我国城市灾害韧性评估及其提升策略研究[J]. 规划师,2017,33(8):5-11

[11] 孟晓静,陈鑫,陈佳静,等. 组合赋权-TOPSIS在洪涝灾害下城市区域韧性评估中的应用[J]. 安全与环境学报,2023,23(5):1465-1473

[12] 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

[13] 王文静,穆晓红,王媛媛,等. 青海省城镇洪涝韧性评估及障碍因子诊断[J/OL]. (2024-04-28)[2024-12-18]. 甘肃农业大学学报,http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1055.S.20240428.1500.060.html

[14] Fu L, Ding M, Zhang Q. Flood Risk Assessment of Urban Cultural Heritage Based on PSR Conceptual Model with Game Theory and Cloud Model: A Case Study of Nanjing[J]. Journal of Cultural Heritage,2022,58:1-11

[15] 徐彬,文彦君,郭梦凡,等. 县域尺度下陕西省干旱灾害韧性时空演变特征及障碍因子分析[J]. 灾害学,2024,39(3):102-109

[16] 许兆丰,田杰芳,张靖. 防灾视角下城市韧性评价体系及优化策略[J]. 中国安全科学学报,2019,29(3):1-7

[17] Moghadas M, Asadzadeh A, Vafeidis A, et al. A Multi-criteria Approach for Assessing Urban Flood Resilience in Tehran, Iran[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2019,35:101069

[18] 高玉琴,汪键,高见,等. 基于组合赋权–云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J]. 水利水电科技进展,2024,44(2):22-29

[19] 周健,张宏建,王冰,等. 城市暴雨洪涝灾害脆弱性时空特征分析[J]. 地理空间信息,2021,19(10):40-43

[20] 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

[21] 陈军飞,张玉琦,嵇娟,等. 长三角城市群洪涝韧性时空演化及影响因素[J]. 水资源保护,2024,40(6):58-68

[22] 李梦杰,刘德林. 中原城市群城市灾害韧性时空演变及障碍因子研究[J]. 中国安全科学学报,2022,32(9):144-151

[23] 史玉芳,牛玉. 关中平原城市群韧性空间关联网络及其影响因素研究[J]. 干旱区地理,2024,47(2):270-280

[24] 《陕西历史自然灾害简要纪实》编委会. 陕西历史自然灾害简要纪实[M]. 北京:气象出版社,2002

[25] 袁林. 西北灾荒史[M]. 兰州:甘肃人民出版社,1994

[26] 雷向杰,李茜,王娟,等. 陕西关中地区旱涝演变规律和21世纪旱涝特点分析[J]. 灾害学,2016,31(3):101-109

[27] Yang J, Huang X. The 30 m Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data,2021,13(8):3907-3925

[28] Zhu S Y, Li D Z, Huang G Y, et al. Enhancing Urban Flood Resilience: A Holistic Framework Incorporating Historic Worst Flood to Yangtze River Delta[J]. China International Journal of Disaster Risk Reduction,2021,61:102355

[29] Ruan J E, Chen Y B, Yang Z W. Assessment of Temporal and Spatial Progress of Urban Resilience in Guangzhou Under Rainstorm Scenarios[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2021,66:102578

[30] 苏广全,吕海深,朱永华,等. 基于博弈论组合赋权的洪水风险评价:以武威地区为例[J]. 干旱区研究,2022,39(3):801-809

[31] 尹建军,胡静,黄宇瑄. 长江中游城市群城市韧性时空演化特征及动态预测研究[J]. 长江流域资源与环境,2023,32(11):2312-2325

[32] 嵇娟,陈军飞,丁童慧,等. 长三角城市群城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调关系[J]. 生态学报,2024,44(7):2772-2785