

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240131001

# 基于随机森林优化算法的城市群洪涝灾害韧性 时空演变研究\*

孟晓静<sup>1,2</sup>, 刘超<sup>1</sup>, 曹莹雪<sup>1,2</sup>, 田占<sup>1</sup>, 陈磊<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学资源工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为了提升城市应对灾害的能力, 对城市洪涝灾害韧性进行研究。基于“驱动力-状态-响应(DSR)”模型建立城市洪涝灾害韧性评估指标体系, 采用随机森林优化算法(RF)构建城市洪涝灾害韧性评估模型, 通过均方根误差(RMSE)和决定系数( $R^2$ )评价模型性能。以关中平原城市群为例, 分析西安、宝鸡、咸阳、商洛、铜川、渭南、临汾、运城、平凉、天水、庆阳等11座城市2011~2020年的城市洪涝灾害韧性时空演变规律。结果表明: 驱动力和状态对城市洪涝灾害韧性水平影响较大, 响应对城市洪涝灾害韧性水平影响较小; 在时间序列上, 关中平原城市群各城市洪涝灾害韧性水平发展存在较大差异, 但整体处于平稳上升的状态, 其中铜川的城市洪涝灾害韧性水平提升最为明显; 在空间格局上, 城市群洪涝灾害韧性水平呈现出由核心城市向外围递减的空间结构特征, 各城市的洪涝灾害韧性等级的空间分布存在不均衡的现象。研究结果可为关中平原城市群韧性城市建设提供指导。

**关键词:** 城市洪涝灾害韧性; 时空演变; DSR模型; 随机森林算法

**中图分类号:** X915.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0784-08

## Study on Spatiotemporal Evolution of Flood Disaster Resilience in Urban Agglomeration Based on Random Forest Optimization Algorithm

MENG Xiaojing<sup>1,2</sup>, LIU Chao<sup>1</sup>, CAO Yingxue<sup>1,2</sup>, TIAN Zhan<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>

(1. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** To improve the capacity of cities to cope with disasters, the study focuses on urban flood disaster resilience. An evaluation index system for urban flood disaster resilience was established based on the "driving force-state-response (DSR)" model. An assessment model was constructed using a random forest optimization algorithm (RF). Model performance was evaluated using the root mean square error (RMSE) and the coefficient of determination ( $R^2$ ). Taking the Guanzhong Plain urban agglomeration as an example, the spatiotemporal evolution of urban flood disaster resilience in Xi'an, Baoji, Xianyang, Shangluo, Tongchuan, Weinan, Linfen, Yuncheng, Pingliang, Tianshui, and Qingyang from 2011 to 2020 was analyzed. The results showed that driving force and state significantly impacted the resilience level of urban flood disaster, while response had a milder impact. Over the time se-

\* 收稿日期: 2024-01-31; 修回日期: 2024-05-15

基金项目: 陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划项目(2022JQ-406)资助

作者简介: 孟晓静(1982—), 女, 教授, 博士。主要从事城市公共安全及防灾减灾研究。E-mail: meng\_020929@163.com

ries, significant differences in the development of flood disaster resilience levels were observed among the cities in the Guanzhong Plain urban agglomeration, though the overall trend was rising steadily. Tongchuan exhibited the most significant improvement in flood disaster resilience. Spatially, resilience levels showed a declining gradient from core cities to the periphery, with an imbalance in spatial distribution of flood disaster resilience levels among the cities. The research results provide guidance for the construction of resilient cities in the Guanzhong Plain urban agglomeration.

**Keywords:** urban flood disaster resilience; spatiotemporal evolution; DSR model; random forest algorithm

## 0 引言

近年来,随着极端天气的频繁发生,城市面临越来越多的自然灾害问题。其中,洪涝灾害居于首位。据应急管理部统计,2021年洪涝灾害造成0.59亿人次受灾、直接经济损失2 458.9亿元,占全国自然灾害造成的受灾人口总数和直接经济损失的55.15%、73.62%<sup>[1]</sup>。城市在预防和应对洪涝灾害带来的冲击或危害时,传统的防灾减灾措施已经难以满足当前的需求,而城市韧性在传统安全理念的基础上,更加注重城市适应变化、维持系统稳定和自我恢复的能力<sup>[2]</sup>。因此,研究城市洪涝灾害韧性对提升城市应对洪涝灾害的能力具有重要意义。

20世纪70年代,C. S. Holling<sup>[3]</sup>首次将韧性概念应用于生态学领域,用来关注生态系统的进化和发展。韧性的概念在经历了工程韧性、生态韧性和演进韧性<sup>[4]</sup>的完善后,学者们将其运用在人类社会系统,成为韧性城市理论的思想基础,并进一步将城市韧性定义为城市系统应对冲击时自身快速恢复的能力<sup>[5]</sup>。近年来,诸多学者从不同角度对城市韧性展开深入研究并取得了一定成果。2003年,M. Bruneau等<sup>[6]</sup>提出了韧性评估概念框架,包括技术、组织、社会和经济4个基本维度。周方等<sup>[7]</sup>从基础设施的视角构建了城市3层网络耦合的城市韧性评估模型,以此来研究基础设施耦合关系对城市韧性的影响。此外,《安全韧性城市评价指南》<sup>[8]</sup>详细列出了评价指标和评价方法,进一步完善了安全韧性城市评价框架。随着对韧性概念的深入理解以及城市韧性评估技术的不断发展,为洪涝灾害视角下的城市韧性评估奠定了坚实的基础。

针对城市洪涝灾害韧性,不同学者从多个方向

展开研究。J. C. J. H. Aerts等<sup>[9]</sup>基于对个人、企业和政府等实体的社会行为的考虑,将社会行为和行为适应整合到洪涝风险评估中,以提高评估风险的能力。孟晓静等<sup>[10]</sup>通过逼近理想解排序法(TOPSIS)构建城市韧性评估模型,表明抵抗力属性和生态环境维度是影响洪涝灾害下城市韧性水平的主要因素。以上学者在研究城市韧性时采用了AHP、熵权法和TOPSIS等方法,这些方法在评估过程中存在主观性较强、工作量较大等不足。

城市群作为城市复合系统,逐渐成为城市韧性研究领域的热点。贺山峰等<sup>[11]</sup>基于熵权法对长三角地区洪涝灾害韧性进行研究,发现长三角地区洪涝灾害韧性水平处于非均衡化发展阶段,且空间聚集效应不明显。李梦杰等<sup>[12]</sup>采用障碍度模型研究中原城市群城市灾害韧性,表明障碍因子主要集中在经济和社会方面。在研究城市群洪涝灾害韧性时需要处理大量指标数据,机器学习算法具有明显优势<sup>[13]</sup>。随机森林算法(RF)作为一种数据挖掘能力极强的工具,被广泛应用到各个领域。吴立志等<sup>[14]</sup>引入RF优化初选的14个火灾风险指标,并以特征重要度归一化结果作为指标的权重,以济南市区为例评估城市火灾风险。然而RF的性能会受到自身参数选用的影响,通过人为设置参数进行对比筛选工作量大,且不能保证结果高效稳定。因此,本文通过引入具有稳定性好、全局搜索能力强的麻雀搜索算法(SSA)进行最佳参数选优,在提升工作效率的同时保证韧性评估工作的稳定进行。

本文结合驱动力-状态-响应(DSR)模型,建立城市洪涝灾害韧性评估指标体系,构建基于随机森林优化算法的城市韧性评估模型。以关中平原城市群为例,分析城市群城市洪涝灾害韧性时空格局演变特征,以期对关中平原城市群韧性城市建设提供指导。

# 1 基于 DSR 模型的城市洪涝灾害韧性评估指标体

驱动力-状态-响应(DSR)模型可以直观的反映出所选取的指标间内在的逻辑关系,本文在 DSR 模型的基础上建立城市洪涝灾害韧性评估指标体系。DSR 模型通过检测驱动力、状态和响应之间的连续反馈机制,能够较好的反映人类活动与环境之间的因果关系,在环境可持续发展评价领域应用广泛。现有 DSR 模型中的驱动力是指人类行为、过程和生活方式对可持续发展的影响;状态是指可持续发展的“状态”,由自然资源、社会和经济等组成;响应由政治、经济、法律等措施组成<sup>[15]</sup>。

城市洪涝灾害韧性受到自然环境与城市系统的共同影响,评估城市洪涝灾害韧性的 DSR 模型涵盖环境、经济、社会、基础设施等方面,与现有 DSR 模型的内涵存在差异,因此,对 DSR 模型的内涵进

行了调整。“驱动力”表示城市系统与公众对提升城市韧性的需求;“状态”表示城市各个系统之间相互作用、发挥承受风险冲击的能力;“响应”表示城市主动调动自身资源应对灾害风险的能力。“驱动力”是“状态”发生变化的根本原因,“状态”是“响应”制定的依据和“驱动力”实现的约束条件,“响应”是促使“状态”发生变化的重要途径<sup>[16]</sup>。经过调整的 DSR 模型可以更加明确的反映出城市系统在应对洪涝灾害时所面临问题的内在逻辑关系,是建立城市洪涝灾害韧性评估指标体系的基础。

依据调整后的 DSR 模型,结合已有城市韧性评估研究<sup>[10]</sup>及《安全韧性城市评价指南》<sup>[8]</sup>推荐的评估指标,根据系统综述法和荟萃分析的优先报告条目声明筛选出关于城市洪涝灾害韧性的中英文文献 37 篇,在系统性、可操作性原则的指导下总结和提炼具有显著影响的指标,并按照驱动力、状态和响应 3 个维度归纳总结,进行指标初选。在此基础上考虑独立性、可空间量化性原则最终得到城市洪涝灾害韧性评估指标体系,见表 1。

表 1 城市洪涝灾害韧性评估指标体系

Table 1 Evaluation index system for urban flood disaster resilience

目标层	准则层	指标层	含义及性质
城市洪涝灾害韧性评估指标体系	驱动力	年降雨量 C <sub>11</sub>	气候变化风险(-)
		高程标准差 C <sub>12</sub>	地形地貌
		水网密度 C <sub>13</sub>	水文条件(-)
		城市化水平 C <sub>14</sub>	地区发展程度
		城镇居民人均可支配收入 C <sub>15</sub>	经济系统内在活力
	状态	人均道路面积 C <sub>21</sub>	道路交通应急响应疏散能力
		建成区排水管道密度 C <sub>22</sub>	城市排污防涝能力
		常住人口密度 C <sub>23</sub>	人口规模与集聚程度(-)
		城镇登记失业率 C <sub>24</sub>	人口特征的脆弱性(-)
		规模以上工业企业资产总计 C <sub>25</sub>	城市工业经济实力
		第三产业比重 C <sub>26</sub>	经济结构合理程度
		人均 GDP C <sub>27</sub>	人均经济实力
	响应	移动电话普及率 C <sub>31</sub>	预警信息传达能力
		建成区绿化覆盖率 C <sub>32</sub>	城市灾害分解能力
		万人医疗卫生机构床位数 C <sub>33</sub>	城市医疗救助能力
		万人高等学校在校学生 C <sub>34</sub>	城市学习适应能力
		社会保障与就业支出占比 C <sub>35</sub>	政府保障能力
		保险密度 C <sub>36</sub>	个人应对风险能力

注:(-)表示该指标为负向指标

为了直观反映和比较不同城市的指标数据,利用自然间断点法<sup>[17]</sup>将 2011~2020 年的城市洪涝灾害韧性指标数据分为低韧性(I 级)、较低韧性(II 级)、较高韧性(III 级)和高韧性(IV 级)4 个等级,确保每个分组之间差异最大、分组之内差异最小,并根据实际情况进行调整。结果见表 2。

# 2 基于随机森林优化算法的城市洪涝灾害韧性评估模型

RF 是由 L.Breiman 在 2001 年提出的一种基于决策树的集成学习算法<sup>[18]</sup>,其基本思想是将多个弱

表2 城市洪涝灾害韧性评估指标等级划分标准

Table 2 Classification standard for urban flood disaster resilience evaluation indices

等级	C <sub>11</sub> /mm	C <sub>12</sub> /m	C <sub>13</sub> /(km/km <sup>2</sup> )	C <sub>14</sub> /‰	C <sub>15</sub> /元	C <sub>21</sub> /(m <sup>2</sup> /人)	C <sub>22</sub> /(km/km <sup>2</sup> )	C <sub>23</sub> /(人/km <sup>2</sup> )	C <sub>24</sub> /‰
I级	>700	<250	>0.55	<40	<21 000	<11	<4	>500	>3.5
II级	(600,700]	[250,350)	(0.5,0.55]	[40,50)	[21 000,26 000)	[11,14)	[4,6)	(300,500]	(3,3.5]
III级	(500,600]	[350,450)	(0.45,0.5]	[50,60)	[26 000,32 000)	[14,17)	[6,9)	(150,300]	(2.5,3]
IV级	≤500	≥450	≤0.45	≥60	≥32 000	≥17	≥9	≤150	≤2.5
等级	C <sub>25</sub> /亿元	C <sub>26</sub> /‰	C <sub>27</sub> /(元/人)	C <sub>31</sub> /(部/百人)	C <sub>32</sub> /‰	C <sub>33</sub> /(张/万人)	C <sub>34</sub> /(人/万人)	C <sub>35</sub> /‰	C <sub>36</sub> /(元/人)
I级	<1 200	<34	<22 000	<70	<28	<47	<70	<12	<900
II级	[1 200,2 200)	[34,44)	[22 000,33 000)	[70,90)	[28,36)	[47,60)	[70,170)	[12,15)	[900,1 700)
III级	[2 200,4 000)	[44,54)	[33 000,50 000)	[90,120)	[36,40)	[60,74)	[170,380)	[15,18)	[1 700,2 700)
IV级	≥4 000	≥54	≥50 000	≥120	≥40	≥74	≥380	≥18	≥2 700

决策树组合成一个强决策树,通过这些弱决策树之间的互补作用来提高整体决策的准确性<sup>[19]</sup>。SSA是J. K. Xue等<sup>[20]</sup>于2020年受麻雀的觅食行为和反捕食行为的启发而提出的一种群体智能优化算法。

在RF中,决策树数量和最小叶子节点数对算法的性能有较大影响,故在此基础上引入稳定性好、全局寻优能力强并能在最优值附近快速收敛的SSA对其进行最佳参数选优,从而建立基于随机森林优化算法的城市洪涝灾害韧性评估模型。具体步骤如下:

(1)数据标准化。为了使数据具有可比性,采用极值法对各个指标进行无量纲标准化处理,使各个指标数据取值均在[0,1]范围内。

正向指标:

$$M_{xij} = \frac{Y_{xij} - \min(Y_j)}{\max(Y_j) - \min(Y_j)} \quad (1)$$

负向指标:

$$M_{xij} = \frac{\max(Y_j) - Y_{xij}}{\max(Y_j) - \min(Y_j)} \quad (2)$$

式中,  $M_{xij}$ 表示第  $x$  个年份第  $i$  个城市第  $j$  项指标标准化的结果;  $Y_{xij}$ 表示第  $x$  个年份第  $i$  个城市第  $j$  项指标的原始数据;  $\max(Y_j)$ 、 $\min(Y_j)$ 表示第  $j$  项指标数据的最大值与最小值。

(2)数据集划分。根据表2得到洪涝灾害下城市韧性评估指标等级划分标准,使用Rand函数在每个等级区间随机生成500个样本,共生成2 000个样本,以1、2、3、4作为4个等级区间的期望输出。在各等级样本中将训练样本和测试样本按照80%和20%进行划分。

(3)初始化麻雀种群及相关参数。在SSA具体实现中,最大迭代次数与种群数量对算法性能影响较大,见文献[20],设置最大迭代次数  $t_{\max}$  为100,种群数量为10。

(4)计算适应度值并记录最优位置。

(5)更新发现者、加入者和意识到危险的麻雀的位置。

(6)判断是否满足算法停止条件。若满足,则输出麻雀搜索算法最优的参数;否则,重复步骤4~5。

(7)使用最优参数训练随机森林得到特征重要度,并将特征重要度归一化得到指标权重  $\omega_j$ 。

$$F_j = \frac{d}{\sigma} \quad (3)$$

$$\omega_j = \frac{F_j}{\sum_{j=1}^n F_j} \quad (4)$$

式中,  $F_j$ 表示指标的特征重要度;  $d$ 表示袋外数据自变量值发生扰动后所有决策树差值的平均值;  $\sigma$ 表示标准差。

(8)计算城市洪涝灾害韧性指数  $C_{xi}$ 。城市洪涝灾害韧性指数取值范围为0~1,结果越接近1时,表明城市韧性水平越高;反之,表明城市韧性水平越低。

$$C_{xi} = \sum_{j=1}^n M_{xij} \omega_j \quad (5)$$

为准确区分城市洪涝灾害韧性水平的高低与差异,采用自然间断点法对2011~2020年关中平原城市群11座城市的洪涝灾害韧性指数进行等级划分,得到低韧性(0~0.358 9]、较低韧性(0.358 9~0.450 2]、较高韧性(0.450 2~0.556 8]和高韧性(0.556 8~1]四个等级区间。

为了确定模型的准确性,本文选取均方根误差(RMSE)和决定系数( $R^2$ )两个指标对模型的性能进行对比,RMSE值越小表示模型的误差越小; $R^2$ 越接近1,表示模型的拟合程度越好。模型中的训练集和测试集的RMSE值分别为0.001 21和0.002 04, $R^2$ 值分别为0.999 99和0.999 97。此外,训练集和测试集之间的RMSE和 $R^2$ 差值较小,这表明模型的评估精度和泛化能力较高,可以用于城市洪涝灾害韧性的综合评估。

### 3 工程应用

#### 3.1 研究区域概况及数据来源

选取关中平原城市群为研究对象,《关中平原城市群发展规划》指出关中平原城市群包括陕西省西安、宝鸡、咸阳、商洛、铜川、渭南,山西省临汾、运城,甘肃省平凉、天水、庆阳共 11 个城市,如图 1 所示。关中平原作为古丝绸之路的起点,发挥着承东启西、联接南北的区位优势。开展关中平原城市群城市洪涝灾害韧性研究对提升城市群综合实力和整体竞争力具有重要意义。

依据数据的可获得性和研究基本单元的一致性原则,文中使用的数据来自 2011~2020 年地理空间数据云、《中国城市统计年鉴》、研究区域各省和各城市的统计年鉴以及《国民经济和社会发展统计公报》。

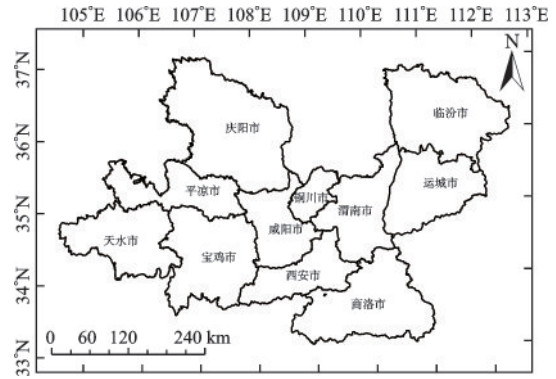


图 1 关中平原城市群城市概况

Fig.1 City overview map of Guanzhong Plain urban agglomeration

#### 3.2 指标权重的确定

依据 2011~2020 年关中平原城市群各指标标准化后的数据,以及城市洪涝灾害韧性评估模型式(4)计算各评估指标的权重,结果见表 3。

表 3 指标体系权重的计算结果

Table 3 Calculation results of index system weights

		驱动力 0.315 6				状态 0.406 4				
指标	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	$C_{21}$	$C_{22}$	$C_{23}$	$C_{24}$	
权重	0.084 6	0.047 8	0.084 1	0.048 0	0.051 1	0.048 4	0.052 2	0.081 4	0.081 7	
		响应 0.278 0								
指标	$C_{25}$	$C_{26}$	$C_{27}$	$C_{31}$	$C_{32}$	$C_{33}$	$C_{34}$	$C_{35}$	$C_{36}$	
权重	0.047 9	0.047 9	0.046 9	0.047 0	0.046 0	0.046 9	0.041 6	0.047 6	0.048 9	

根据指标权重计算结果,对城市洪涝灾害韧性指标体系准则层进行分析。其中,驱动力、状态权重较高,响应权重较低,表明驱动力和状态对城市洪涝灾害韧性水平影响较大。驱动力反映的是外部环境压力和城市发展需求,会直接或间接的影响城市的状态,气象条件、地形地貌和城市发展等因素会导致城市的道路、排水系统、人口等状态发生变化。状态表示城市承受风险冲击的能力,同时,城市的状态也会反馈到驱动力,基础设施、人口、经济等因素的改变可以降低洪涝灾害造成的后果,从而影响驱动力的水平。

从表 3 可知,降雨量  $C_{11}$ 、水网密度  $C_{13}$ 、常住人口密度  $C_{23}$  和城镇登记失业率  $C_{24}$  权重较高,表明这 4 项指标是影响关中平原城市群城市洪涝灾害韧性水平的主要因素。从实际情况看,暴雨是导致洪涝灾害的直接原因,因此降雨量权重最高符合实际。水网密度表示河流分布的疏密程度,河流分布越密集,区域内河流流量越大,遭受洪涝灾害的风险越

大,因此其权重仅次于降雨量。此外,常住人口密度作为衡量人口的密集程度的指标也占据较高的权重,因为较高的人口密度会使城市在遭受洪涝灾害时面临更大的风险。城镇登记失业率反映的是城市社会生活的稳定性,高失业率会增加社会的不安定因素、影响城市的应急响应能力。

#### 3.3 关中平原城市群城市洪涝灾害韧性水平时序演变特征

为进一步反映不同城市历年洪涝灾害韧性水平的时序演变特征,根据城市洪涝灾害韧性评估模型式(5)计算 2011~2020 年关中平原城市群 11 市的城市洪涝灾害韧性指数,见表 4。并绘制关中平原城市群城市洪涝灾害韧性指数时序变化趋势,如图 2 所示。

从整体来看,关中平原城市群洪涝灾害韧性指数均值在 2011~2020 年总体呈上升趋势。其中,在 2013 年、2015 年和 2019 年城市群洪涝灾害韧性指

表4 关中平原城市群城市洪涝灾害韧性指数

Table 4 Urban flood disaster resilience indices in Guanzhong Plain urban agglomeration

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
西安	0.665 4	0.709 4	0.691 5	0.669 0	0.649 7	0.672 4	0.617 8	0.639 9	0.593 1	0.634 5
咸阳	0.432 9	0.474 4	0.468 5	0.457 6	0.450 2	0.476 4	0.478 4	0.548 0	0.477 4	0.489 0
宝鸡	0.440 9	0.455 0	0.491 9	0.536 5	0.517 8	0.548 9	0.518 9	0.543 2	0.478 3	0.496 9
铜川	0.373 1	0.393 1	0.377 3	0.387 6	0.398 5	0.428 2	0.394 7	0.447 2	0.463 6	0.487 7
渭南	0.445 1	0.495 0	0.421 2	0.416 2	0.398 4	0.395 0	0.418 4	0.455 3	0.454 6	0.419 6
商洛	0.343 3	0.345 8	0.297 9	0.279 8	0.276 9	0.261 3	0.298 8	0.358 9	0.339 7	0.414 6
天水	0.408 6	0.388 1	0.329 7	0.421 8	0.424 2	0.433 2	0.423 4	0.373 6	0.383 4	0.327 1
平凉	0.340 1	0.332 0	0.297 7	0.374 5	0.368 6	0.393 5	0.411 7	0.335 5	0.347 7	0.386 6
庆阳	0.383 6	0.367 8	0.375 4	0.473 6	0.493 3	0.507 1	0.474 7	0.413 0	0.379 7	0.414 2
运城	0.488 0	0.520 1	0.513 0	0.486 3	0.482 8	0.456 6	0.554 2	0.523 6	0.517 1	0.542 7
临汾	0.495 6	0.442 2	0.393 1	0.459 6	0.483 6	0.497 1	0.502 2	0.512 7	0.528 4	0.556 8
均值	0.437 9	0.447 5	0.423 4	0.451 1	0.449 5	0.460 9	0.463 0	0.468 3	0.451 2	0.470 0

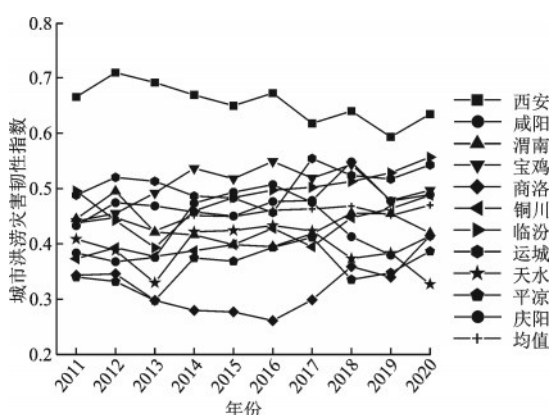


图2 关中平原城市群城市洪涝灾害韧性时序变化趋势

Fig.2 Temporal variation trends of urban flood disaster resilience in Guanzhong Plain urban agglomeration

数均值出现下降,相比前一年下降了0.024 1、0.001 6和0.017 1,下降幅度为5.39%、0.35%和3.65%。其余年份韧性指数均值均表现为上升,最终在2020年韧性指数均值达到0.470 0,与2019年相比增长幅度为4.17%,与2011年相比增长幅度为7.33%,城市群洪涝灾害韧性等级由较低等级上升到较高等级。表明关中平原城市群洪涝灾害韧性水平发展较为平稳,处于不断上升的状态。

从城市层面来看,咸阳、宝鸡、铜川、商洛、平凉、庆阳、运城和临汾等城市洪涝灾害韧性水平总体呈现上升趋势,其中铜川提升最为明显,韧性指数由0.373 1上升至0.487 7,增长幅度为30.72%,韧性等级由较低等级上升到较高等级。究其原因,铜川市在研究时段初期,降雨对城市造成的压力较大、基础设施建设较为滞后,导致城市洪涝灾害韧性水平受到影响。在2013年后铜川市建成区排水管道密度、人均道路面积、第三产业比重和人均GDP等指标增长迅速,在基础设施与经济发展方面

取得新成效,城市功能系统完备性和适应能力不断增强,城市洪涝灾害韧性水平提升明显。咸阳、宝鸡、运城和铜川呈现波动上升趋势,其中咸阳、宝鸡和运城韧性指数增长幅度为12.96%、12.7%和11.21%;商洛和临汾整体呈现先下降后上升的趋势,韧性指数增长幅度为20.77%和12.35%;平凉和庆阳的变化波动较大,但总体呈现上升趋势,韧性指数增长幅度为13.67%和7.98%。在研究时段内,西安和渭南韧性指数下降了4.64%和5.73%。西安作为核心城市,常住人口持续增加,但排水管道的建设未能跟上城市建设的步伐,导致了西安的韧性指数出现下降;渭南人均道路面积和排水管道密度等指标呈现先降低后提升的趋势,但最终并未恢复到原先的水平,这与渭南的韧性指数发展趋势一致。天水韧性指数下降了19.95%,其原因在于城市排污防涝能力和保障能力的显著降低。从城市洪涝灾害韧性指数时序变化趋势可以看出,关中平原城市群各城市在城市洪涝灾害韧性水平发展上存在较大差异,且变化趋势各不相同。

### 3.4 关中平原城市群城市洪涝灾害韧性水平空间格局演变特征

以2011、2014、2017、2020年为例来研究关中平原城市群城市洪涝灾害韧性等级空间格局分布,如图3所示。

从图3可以看出,关中平原城市群城市洪涝灾害韧性等级空间分布不均衡,城市之间存在明显的差异。2011~2020年核心城市西安的韧性等级一直处于前列,韧性等级相对较低的非核心城市分布在核心城市外围,整体呈现出由核心城市向非核心城市递减的空间结构特征。从整体来看,研究区域

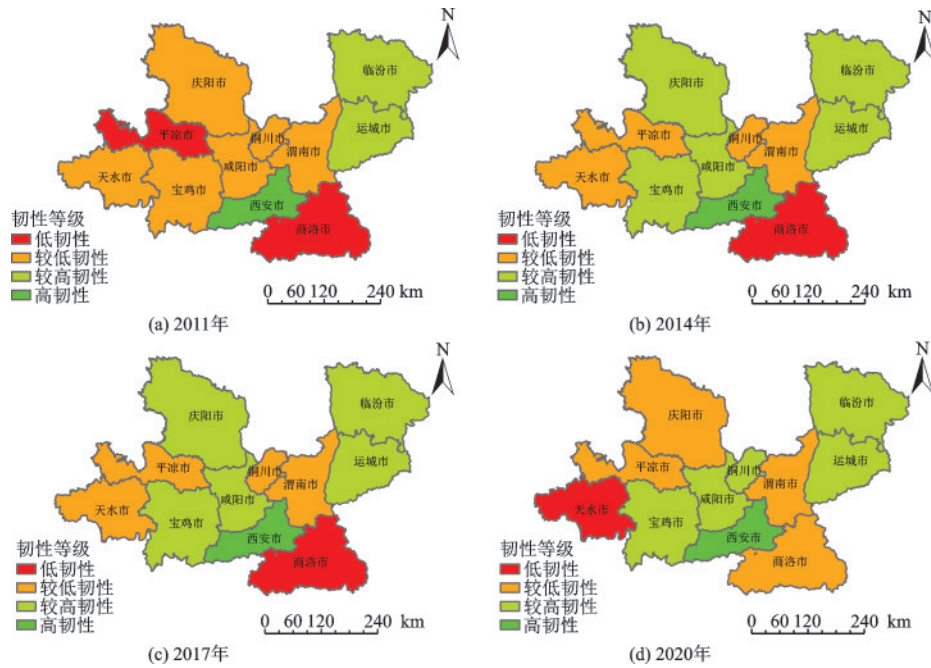


图3 关中平原城市群城市洪涝灾害韧性等级空间格局分布

Fig.3 Spatial distribution maps of urban flood disaster resilience levels in Guanzhong Plain urban agglomeration

历年城市韧性等级空间格局分布均呈现出陕西省高、山西省次之、甘肃省较低的态势。

2011~2020年,高韧性城市和较高韧性城市由3个增长至6个,较低韧性和低韧性城市由8个减少至5个,表明关中平原城市群洪涝灾害韧性等级显著提升。在研究时间段内,核心城市西安的发展对外围城市的韧性等级产生了正面影响,彰显出各城市之间的相互促进作用,进一步表明核心城市对其他城市的辐射带动作用。

## 4 结论

本文利用DSR模型建立了城市洪涝灾害韧性指标体系,并采用随机森林优化算法构建了城市洪涝灾害韧性评估模型。通过对2011~2020年关中平原城市群的城市洪涝灾害韧性时空演变特征进行分析,得出以下结论:

(1)从指标权重计算结果看,驱动力和状态对城市洪涝灾害韧性水平影响较大,降雨量、水网密度、常住人口密度和城镇登记失业率是影响关中平原城市群城市洪涝灾害韧性水平的主要因素。

(2)从时间序列看,关中平原城市群洪涝灾害韧性水平发展整体处于平稳上升的状态,区域内各城市洪涝灾害韧性水平发展存在较大差异,波动幅度各不相同。其中,铜川韧性指数提升幅度最大,

发展最好;天水的洪涝灾害韧性指数存在较大提升空间。

(3)从空间格局看,城市群洪涝灾害韧性等级呈现出由核心城市向外围递减的空间结构特征,在空间分布上表现为陕西省较高、山西省次之、甘肃省较低。同时,各城市之间存在相互促进作用,且核心城市对其他城市具有辐射带动作用。

## 参考文献:

- [1] 应急管理部. 2021年全国自然灾害基本情况[EB/OL]. (2022-01-23)[2023-07-10]. [https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202201/t20220123\\_407204.shtml](https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202201/t20220123_407204.shtml).
- [2] 陈长坤,陈以琴,施波,等.雨洪灾害情境下城市韧性评估模型[J].中国安全科学学报,2018,28(4): 1-6.  
Chen C K, Chen Y Q, Shi B, et al. An model for evaluating urban resilience to rainstorm flood disasters [J]. China Safety Science Journal, 2018,28(4): 1-6.(in Chinese)
- [3] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973:1-23.
- [4] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems[J]. Ecology and Society, 2004, 9(2): 5.
- [5] 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.

- Shao Y W, Xu J. Understanding urban resilience: a conceptual analysis based on integrated international literature review[J]. *Urban Planning International*, 2015, 30(2): 48-54.(in Chinese)
- [6] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4):733-752.
- [7] 周方,赵伟,胡翔奎,等.基于关键基础设施耦合关系的城市韧性评价[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(4): 1014-1021.  
Zhou F, Zhao W, Hu X K, et al. Research on the urban resilience assessment for critical infrastructure interdependency [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(4): 1014-2021.(in Chinese)
- [8] 安全韧性城市评价指南: GB/T 40947—2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.
- [9] Aerts J C J H, Botzen W J, Clarke K C, et al. Integrating human behaviour dynamics into flood disaster risk assessment[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(3): 193-199.
- [10] 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.  
Meng X J, Chen X, Chen J J, et al. Application of combination weighting and TOPSIS in the assessment of urban regional resilience under flood disaster [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(5): 1465-1473.(in Chinese)
- [11] 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 F, 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.(in Chinese)
- [12] 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.  
Li M J, Liu D L. Spatial-temporal evolution and obstacle factors of urban disaster resilience in Zhongyuan urban agglomeration [J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(9): 144-151.(in Chinese)
- [13] 杨硕,李德营,严亮轩,等.基于随机森林模型的乌江高陡岸坡滑坡地质灾害易发性评价[J]. *安全与环境工程*, 2021, 28(4):131-138.  
Yang S, Li D Y, Yan L X, et al. Landslide susceptibility assessment in high and steep bank slopes along Wujiang River based on random forest model[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2021, 28(4): 131-138. (in Chinese)
- [14] 吴立志,陈振南,张鹏.基于随机森林算法的城市火灾风险评估研究[J]. *灾害学*, 2021, 36(4):54-60.  
Wu L Z, Chen Z N, Zhang P. Research on urban fire risk evaluation based on the random forest algorithm [J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(4): 54-60. (in Chinese)
- [15] 张苗,陈银蓉,周浩.基于DSR模型的城市土地低碳集约利用评价:以武汉市为例[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(5): 169-175.  
Zhang M, Chen Y R, Zhou H. Evaluation for the low-carbon and intensive urban land use based on the DSR model: a case study of Wuhan City [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(5): 169-175. (in Chinese)
- [16] 樊燕燕,刘轩谷.基于DSR-灰云模型的西北城市抗震韧性评估[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(6): 1191-1202.  
Fan Y Y, Liu X G. Seismic resilience evaluation of northwest cities based on DSR-gray cloud model [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(6): 1191-1202.(in Chinese)
- [17] 李乃强,徐贵阳.基于自然间断点分级法的土地利用数据网格化分析[J]. *测绘通报*, 2020(4):106-110, 156.  
Li N Q, Xu G Y. Grid analysis of land use based on natural breaks (jenks) classification [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(4): 106-110, 156. (in Chinese)
- [18] Breiman L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1):5-32.
- [19] 张建荣,张伟,薛楠楠,等.基于随机森林算法的塔式起重机会安全事故预测及致因分析[J]. *安全与环境工程*, 2021, 28(5):36-42.  
Zhang J R, Zhang W, Xue N N, et al. Prediction and cause analysis of tower-crane safety accidents by using random forest algorithm [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2021, 28(5):36-42. (in Chinese)
- [20] Xue J K, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.

(本文编辑:张艺)