

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240616002

山地城镇洪涝滑坡灾害韧性评估研究*

文海家^{1,2}, 钱龙^{1,2}, 李卓航^{1,2}, 黄俊豪^{1,2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045)

摘要: 为实现对山地城镇灾害韧性的有效评估, 以受洪灾-滑坡灾害链影响的中国典型山地城镇重庆市主城区都市区为研究区, 基于城市灾害韧性的内涵特征和作用机理, 结合“压力-状态-响应”模型的因果逻辑, 在多源数据收集分析的基础上, 构建承载洪涝、滑坡灾害韧性评估指标体系。采用机器学习方法评估滑坡压力韧性, 采用主客观组合权重分析及VIKOR法评估洪涝压力韧性和状态-响应韧性, 采用秩和比综合评价法构建综合韧性评估模型, 度量城市灾害韧性水平, 划分韧性等级, 分析评估结果。结果表明: ①研究区西部与西北部滑坡压力韧性强, 中部滑坡压力韧性处于中等水平, 南部与东北部滑坡压力韧性低; ②研究区中部洪涝压力韧性水平较低, 而研究区东部和西部洪涝压力韧性普遍较高, 整体呈现外圈高内圈低的态势, 其中位于研究区东南部的南川区是洪涝压力韧性最高的区; ③重庆市核心城区的渝中区是状态-响应韧性最高的区, 整体的状态-响应韧性空间分布呈现出一种明显的中心至外围递减趋势; ④综合韧性的空间分布没有明显的特征, 但研究区普遍存在一个行政区会出现多种不同韧性等级的情况, 体现了各阶段韧性发展的不平衡。

关键词: 城市韧性; 洪涝灾害; 滑坡灾害; “压力-状态-响应”模型

中图分类号: TU984 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0751-11

Study on Resilience Assessment of Flood and Landslide Disasters in Mountainous Urban Areas

WEN Haijia^{1,2}, QIAN Long^{1,2}, LI Zhuohang^{1,2}, HUANG Junhao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: To effectively evaluate disaster resilience in mountainous urban areas, the study focused on the central urban area of Chongqing, a typical mountainous city in China influenced by the flood-landslide disaster chain. Based on the concept and mechanisms of urban disaster resilience and combined with the causal logic of the Pressure-State-Response (PSR) model, a resilience evaluation index system for floods and landslides was constructed through the collection and analysis of multi-source data. Landslide pressure resilience was evaluated using machine learning techniques, and the flood pressure and state-response resilience were assessed through a combination of subjective and objective weighting analyses with the VIKOR method. The rank-sum ratio comprehensive evaluation method was employed to construct an overall resilience assessment model, measure urban disaster resilience levels, classify resilience grades, and analyze the assessment results. The findings indicated that: (1) High

* 收稿日期: 2024-06-16; 修回日期: 2024-07-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3007204)资助

作者简介: 文海家(1971—), 男, 教授, 博士。主要从事岩土工程防灾减灾方面的研究。E-mail: jhw@cqu.edu.cn

landslide pressure resilience was observed in the western and northwestern regions of the study area, moderate resilience in the central area, and low resilience in the southern and northeastern regions. (2) Flood pressure resilience was lower in the central region of the study area, while the eastern and western regions generally displayed higher resilience, with the outer regions being more resilient than the inner regions. Nanchuan District in the southeastern region of the study area had the highest flood pressure resilience. (3) Yuzhong District, the core urban area of Chongqing, showed the highest state-response resilience, with the spatial distribution of state-response resilience exhibiting an evident decreasing trend from center to periphery. (4) The spatial distribution of comprehensive resilience did not show distinct patterns, but it was common for an administrative region within the study area to exhibit varying resilience levels, reflecting the uneven development of resilience across different stages.

Keywords: urban resilience; flood disaster; landslide disaster; "Pressure-State-Response" model

0 引言

近年来,中国城市快速发展,人口和资源不断集聚。然而,频繁的自然灾害使得城市系统屡遭重创,许多城市在灾害面前显得更加脆弱^[1]。因此,城市规划在提升城市抗灾能力方面显得尤为关键。

城市往往面临多种灾害,气候变化和人类活动增加了引发洪涝、地质灾害等自然灾害的可能性^[2]。统计表明,自1951年以来,中国的平均降水量一直在增加,尤其是2012~2021年,是近70年来降水量最多的十年^[3]。极端降水通常持续时间长,雨量积累大,导致城市洪涝灾害与地质灾害更加频繁^[4]。

面对日益增多的自然灾害冲击,“韧性城市”概念的提出为管理和减轻城市灾害风险提供了新的视角和创造性的解决方案^[5-6]。根据联合国的定义,城市韧性是指一个系统、社区或社会迅速有效地抵抗、吸收、适应和从灾害中恢复的能力,包括通过保护和恢复其基本结构和功能^[7]。韧性城市不仅关注减灾和风险管理,也涉及到城市规划、社区参与和治理结构的整体性改进。为更好应对以洪涝、地质灾害为代表的自然灾害,我国对韧性城市的建设也日益重视。2020年,《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中首次将“韧性城市”上升为国家规划,要求增强城市抵御灾害、快速从灾害恢复的能力,建设“海绵城市”“韧性城市”;2022年重庆市发布《重庆市海绵城市建设“十四五”规划》,力争2025年城市的建成区域中超过45%的面积满足海绵城市的建设标准,为城市风险治理指明了新方向。

基于此,本研究以重庆市主城都市区为例,充分考虑洪涝灾害和滑坡灾害发育特征,构建面向洪

涝和滑坡灾害的城市韧性评价框架体系及评估模型,为城市灾害韧性评估提供新思路。

1 研究框架及方法

1.1 城市灾害韧性框架设计

1.1.1 压力-状态-响应(PSR)模型

压力(Pressure)-状态(State)-响应(Response)模型即PSR模型主要应用于区域环境问题、气候变化、土地资源等综合评价或指标体系研究,为当前可持续经济发展、环境现状评估的常用模型^[8]。PSR模型包含了压力指标、状态指标和响应指标三个类别,其中压力代表自然或人类的经济社会活动对系统的扰动、破坏,状态代表系统所处的状态如生态状态、人类生活状态等,响应代表系统在受到压力之后为了减轻系统受到的负面影响而采取的行动措施。PSR模型可以系统地分析阐述自然与社会相互影响的因果框架^[9]。图1展示了PSR的基本模型。

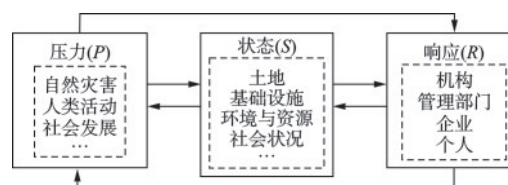


图1 PSR基本模型

Fig.1 Basic PSR model

1.1.2 洪涝滑坡灾害韧性评估框架

本研究将城市韧性定义为城市遭受灾害如洪涝灾害和滑坡灾害时,能够有效地抵御、承受、在灾害过程中响应并从中恢复的能力。将城市抗灾韧

性从时间维度上划为灾前、灾中、灾后三个阶段分别对应PSR模型中的压力、状态、响应三个阶段。

灾前的压力韧性为城市自身对洪涝灾害和滑坡灾害的抵抗能力,体现了城市面临灾害的风险与遭受损失的可能性,压力韧性越高,城市受到灾害发生的风险越低,抵抗灾害的能力也越强。由于洪涝灾害与滑坡灾害的形成机理,对城市的影响程度各不相同,本研究将灾前阶段的韧性分为洪涝压力韧性和滑坡压力韧性两个层级。

灾中状态韧性表示城市在受灾灾害时通过自身能力抵御、吸收洪涝与滑坡灾害带来冲击、扰动的能力,在面对灾害引起的负面作用时能保障城市基础和核心功能不受太大影响,使灾害损失最小化。

灾后响应韧性是城市受到灾害扰动后,内部各个系统适应灾害,采取措施应对、让系统从冲击中恢复到受到灾前冲击前的能力,并且在恢复之后弥补城市系统之前的不足,吸取教训使得城市更加稳定,以便于更好地应对未来的不确定性。图2展示了压力-状态-响应(PSR)模型对灾害韧性过程解释。

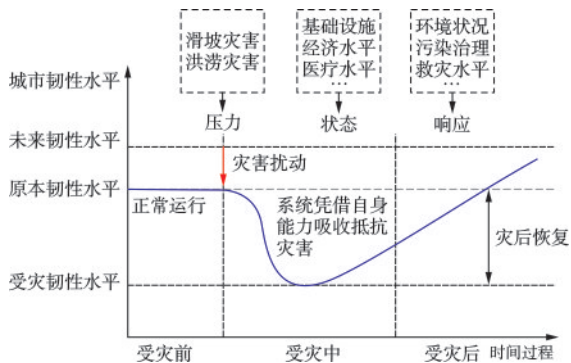


图2 压力-状态-响应(PSR)模型对灾害韧性过程解释图
Fig.2 Explanation diagram of disaster resilience process using Pressure-State-Response (PSR) model

在面对灾害时,城市的状态韧性和响应韧性至关重要,这需要城市中各种不同利益主体的共同参与和多方配合。每个维度和利益主体在灾害期间和灾后都有着重要作用,从而共同提升城市的韧性水平。本研究在城市韧性评估框架中将灾中状态韧性和灾后响应韧性合并为一体,构成了状态-响应韧性的核心概念。这一概念能够更全面地考量城市在灾害发生和灾后应对过程中的综合表现。

根据以上思路,构建灾害综合韧性评估框架,具体如图3所示。

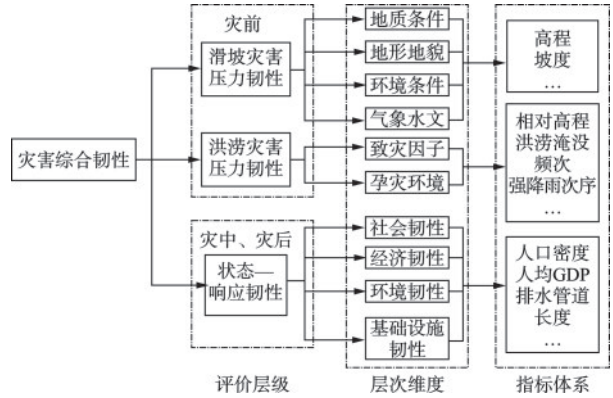


图3 城市灾害综合韧性评估框架

Fig.3 Framework for comprehensive urban disaster resilience assessment

1.2 滑坡压力韧性机器学习方法

滑坡易发性是指某一地区在当地地形条件和环境条件下发生滑坡的可能性,准确的滑坡易发性空间分布信息可以为政府部门等决策者提供科学信息和建议^[10-11]。机器学习模型可以产生相对更准确的结果,为后续的滑坡危害评估与防灾减灾奠定了更好的基础^[12]。随着城市韧性受到关注,机器学习逐渐被应用于城市灾害韧性的评价中^[13]。目前应用最广泛的机器学习包括逻辑回归^[14]、支持向量机^[15]、自适应神经模糊推理系统^[16]、人工神经网络^[17]和随机森林^[18]等。LightGBM^[19]是微软于2017年开发的梯度增强决策树(GBDT)的一种新变体,用于解决数据规模大且特征维数高时学习决策树的挑战,具有精度高、内存使用低、不易过拟合等优点。本研究采用LightGBM算法进行滑坡灾害压力韧性的评估。

LightGBM算法是一种梯度提升树(GBT)算法,作为一种轻量级GBT,通过在损失函数中增加二阶导数项,加快了模型的收敛速度,使用直方图算法降低存储需求并加速运算,它采用带深度限制的Leaf-wise生长策略,避免层数过多^[20]。

CART树通常作为该算法的基分类器,其函数形式如下所示:

$$y_i = \sum_{k=1}^L f_k(x_i) = f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_{i-1}(x_i) + f_i(x_i) \quad (1)$$

其中, i 代表第 i 个样本,多个基分类器共同决定第 i 个样本的决策值。在得到决策函数前需要求得各函数的模型参数,采用向前分步算法进行求解,求

解第 t 个模型的损失函数如下所示。

$$L^{(t)} = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)} + f_i(x_i)) + \Omega(f_i) \quad (2)$$

$$\Omega(f_i) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \| \omega \|^2 \quad (3)$$

加入正则项,调整叶子的权重和数量以限制决策树生长,避免过拟合。传统GBDT算法仅展开至一次项,所以算法精度低,模型效果差。所以得到决策树的目标函数之后,运用泰勒展开目标数到二次项,方便求解决策树,将其展开到二次项如下:

$$L^{(t)} \simeq \sum_{i=1}^n \left[l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)}) + g_i f(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_i^2(x_i) \right] + \Omega(f_i) \quad (4)$$

其中, g 表示一阶导数, h 表示二阶导数,同时将正则项合并,最后得到简化结果:

$$L^{(t)} = \sum_{j=1}^T \left[\left(\sum_{i \in I_j} g_i \right) w_j + \frac{1}{2} \left(\sum_{i \in I_j} h_i + \lambda \right) w_j^2 \right] + \gamma T \quad (5)$$

运用最小化损失函数求解每个叶子节点的权重,求导得到函数的解析解,运用解析解求得函数最优解,函数解析解为:

$$w_j^* = - \frac{G_j}{H_j + \lambda} \quad (6)$$

将解析解带入损失函数可得到最小化损失代价结果:

$$Obj = - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^T \frac{G_j^2}{H_j + \lambda} + \gamma T \quad (7)$$

之后可根据最小代价结果根据基尼系数或者其他指标对数进行分裂,比较分裂前于分裂后的最小损失值,若分裂后损失值更少就进行分裂,若损失代价变大则不再分裂,Gain是叶子节点是否进行分裂的指标,计算结果大于0就继续分裂,小于0就不再分裂,具体判断过程如下:

$$Gain = \frac{1}{2} \left[\frac{G_L^2}{H_L + \lambda} + \frac{G_R^2}{H_R + \lambda} - \frac{(G_L + G_R)^2}{H_L + H_R + \lambda} \right] - \gamma \quad (8)$$

如上步骤为求解LightGBM损失函数和基分类器的方法、原理。

1.3 洪涝压力韧性与状态-响应韧性赋权方法

1.3.1 基于AHP的城市韧性主观赋权方法

层次分析法(AHP)是T.L.Satty^[21]提出的一种适用性强、简单、实用的定量分析定性问题的方法,它在各要素之间建立了层次关系,评价过程简单,易于操作^[22]。层次分析法作为一种加权方法被广

泛应用于基于GIS的城市韧性评价中^[23],因此本研究选用该方法对洪涝灾害压力韧性和状态-响应韧性进行主观赋权,主要有以下4个步骤:

①建立层次分析结构:将洪涝灾害压力韧性和状态-响应韧性的评估指标分组,构建互相独立的层次结构,总体分为目标层、准则层、指标层;

②构造判断矩阵:同层次之间的元素两两比较,比较标度取1至9之间;

③权重计算:由判断矩阵计算被比较要素对于该准则的相对权重;

④一致性检验:计算一致性指标(CI)和随机一致性指标(RI)的比较检验系数(CR),如果 $CR < 0.1$,则认为该判断矩阵通过一致性检验。

1.3.2 城市韧性客观赋权方法

(1)熵权法

熵权法是一种基于信息熵原理的客观赋权方法,广泛应用于多指标综合评价问题中。熵权法优点在于它能够客观反映各指标在综合评价中的重要性,减少了主观判断的干扰^[24]。计算过程如下:

①归一化处理:将各个指标的数据转化为相同的量级,以便比较;

②计算信息熵:通过计算每个指标的信息熵来衡量其随机性和不确定性;

③计算权重:根据信息熵的大小确定各个指标的权重,信息熵越大,权重越小;信息熵越小,权重越大;

④归一化权重:将计算得到的权重进行归一化,以确保它们的总和为1,表示各指标在决策中的相对重要程度。

(2)CRITIC法

CRITIC法由D.Diakoulaki^[25]等在1995年提出,是一种客观赋权方法,用于多指标决策分析中确定各指标的权重,主要基于指标间的差异性和冲突性^[26]。以下是该方法的基本步骤:

①构建指标矩阵:将待评估的各个指标列成矩阵形式,行表示不同的评估对象或方案,列表示不同的评估指标;

②计算相关系数:对指标矩阵中的每一对指标计算皮尔逊相关系数(或其他相关系数)。相关系数用来衡量两个指标之间的线性相关性;

③构建相关系数矩阵:将计算得到的相关系数按照矩阵形式整理,得到一个相关系数矩阵;

④计算权重:通过对相关系数矩阵进行加权平

均,计算每个指标的权重。一般来说,相关系数越高的指标在决策中的重要性越大;

⑤归一化权重:将计算得到的权重进行归一化处理,确保它们的总和为1,表示各指标在决策中的相对重要程度。

1.3.3 主客观组合赋权步骤

通过层次分析法获得韧性指标的主观权重,记为 w^a ;通过熵权法或者CRITIC法计算获得客观权重记为 w^b 。所以洪涝灾害压力韧性与状态-响应韧性的组合赋权由式9进行计算。

$$w_i = \frac{w_i^a w_i^b}{\sum_{i=1}^n w_i^a w_i^b} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (9)$$

1.4 多指标评价方案排序

1.4.1 VIKOR 评价法

本研究对城市灾害韧性评价为多属性决策问题,VIKOR^[27]法是一种经典的多属性多标准决策方法,特别是在存在冲突和不完全确定的情况下。该方法意为多准则优化和折衷解决方法,其基本原理是根据决策属性的数据定义正理想方案和负理想方案,计算各多指标评价方案的群体效用值和个体遗憾值,通过最大化群体效用值和最小化个体遗憾值对方案排序以完成综合评价。

本研究运用VIKOR方法对城市韧性进行排序评价,具体步骤如下:

①标准化决策矩阵:将所有的指标进行标准化处理,确保它们在同一量级上比较;

②计算决策距离:计算每个候选方案到最佳和最差方案的距离。通常使用欧氏距离等指标来衡量;

③计算最大和最小值:对每个决策指标,计算所有方案的最大值和最小值;

④确定综合评价指数:对每个方案,计算综合评价指数。综合评价指数综合考虑了距离和最大和最小值的归一化差异;

⑤排序与选择:根据综合评价指数对所有方案进行排序,选择最佳的方案或给出最优的折衷解决方案。

1.4.2 秩和比综合评价法

秩和比综合评价法(RSR)通过将数据转换为秩次,来进行多指标或多对象的综合评价和比较。该方法综合能力强,操作简单、直观,不受指标量纲影响,适用于指标类型多样和数据信息不完全的评

价问题^[28]。秩和比法的基本步骤如下:

①数据标准化:对每个指标的数据进行标准化处理,将其转化为无量纲的相对值,以确保不同指标具有可比性;

②计算秩次:对每个方案在每个指标下的表现进行排名,得到每个指标下各方案的秩次。一般来说,排名越高表示表现越好;

③计算秩和:对每个方案的各指标秩次进行求和,得到各方案的秩和值;

④计算秩和比:计算每个方案的秩和比,即将每个方案的秩和值与其他方案的秩和值进行比较,以确定最优或最优折衷的方案。

2 研究区概况

研究区重庆市主城都市区位于重庆市的西部,共有21个行政区,包括渝中区、大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、南岸区、北碚区、渝北区、巴南区、江津区、合川区、永川区、璧山区、荣昌区、大足区、铜梁区、潼南区、涪陵区、长寿区、南川区、綦江区。经度为105°20'E—107°40'E,纬度为28°30'N—30°30'N。

研究区西部、北部与四川省毗邻,东部与重庆市渝东南武陵山、渝东北三峡库区城镇群相接,南部与贵州省交界,总面积约为28 657 km²,是重庆市政治、经济、文化、交通、金融中心,也是西南地区的综合交通枢纽。

重庆市主城都市区区域内的城市建设多依山就势,是独特的山地城市地形,地形特征表现为东南部起伏较大,西部、中部和北部相对平缓。研究区夏季降雨充沛,导致洪涝和滑坡等自然灾害频发,给人民生命财产安全造成巨大的损失。

3 韧性评估指标体系

在构建韧性评估指标过程中,需遵循以下韧性评估指标选取原则:(1)科学性原则:指标的选取需要有科学理论支撑与来源,同类别指标之间有关联性逻辑性,不同类别之间的指标不能出现重复;(2)可行性原则:每个指标充分考虑相应数据的可获取性,数据应易于获取且普遍可用,所有指标数据有据可循,对于难以获取的数据酌情考虑代替指标;(3)系统全面性原则:对韧性主体而言,城市是一个

由经济、环境、社会、基础设施等多要素构成的系统,因此韧性指标选取应从整个系统的视角进行考虑;(4)代表性原则:选取指标应能代表城市特性,同时具有普适性,指标体系可用于其他研究区域进行研究;(5)独立性:各个指标应保持较低的相关性,尽量相互独立,避免多个指标之间存在高度相关性,以减少冗余和提高分析效率。本研究通过文献阅读、专家咨询初步确定指标,然后通过重要性分析和相关性分析对指标进行筛选以确定最终的韧性评估指标。

3.1 滑坡压力韧性

滑坡灾害致灾因子繁多且形成机理复杂,大量已有研究表明滑坡灾害的发生与地形地貌、地质构造、环境条件和气象水文相关性较高,根据已有研究与指标选取原则从地形地貌、地质条件、环境条件、气象水文4个层次维度下的16个评价指标构成滑坡灾害压力韧性指标体系,这些指标能很好的反映研究区自然条件下抗击滑坡灾害压力的能力,具体见表1。

表1 滑坡压力韧性指标及数据来源

Table 1 Indicators and data sources for landslide pressure resilience

层次维度	评价指标	数据来源
地形地貌	高程	哥白尼数字高程模型 (Copernicus DEM) 提取生成
	坡度	
	坡位	
	地形起伏度	
	曲率	
	剖曲率	
地质构造	地形湿度指数	中国地质资料馆1:200 000 地质图
	地表粗糙度	
环境条件	水流动力指数	中国科学院地理科学与 资源研究所
	土地利用类型 与道路的距离	
气象水文	NDVI	中国科学院资源环境科学数据中 心
	多年平均降雨 与河流的距离	

3.2 洪涝压力韧性

洪涝灾害的形成涉及两个关键方面:致灾因子

和孕灾环境,两个方面的因素相互作用,共同导致了洪涝灾害的发生。致灾因子是直接导致灾害发生的原因,主要包括强降雨、上游来水增加等;孕灾环境是指那些增加灾害发生可能性或影响灾害严重性的背景条件,主要包括地形地貌、气候变化等。本研究通过分析研究区气象特征、灾害形成机理和发育规律,从致灾因子和孕灾环境2个层次维度下的6个评价指标构成洪涝灾害压力韧性指标体系,具体见表2。

表2 洪涝压力韧性指标及数据来源

Table 2 Indicators and data sources for flood pressure resilience

层次维度	评价指标	数据来源
致灾因子	连续三天累计降雨量	国家气象科学数据 共享服务平台
	强降雨天数	
	汛期总降雨量	
孕灾环境	绝对高程	DEM提取
	相对高程	
	洪涝水体淹没危险性	Google Earth Engine

3.3 状态-响应韧性

城市是一个复杂的系统,它涉及多个相互关联且相互影响的领域。本研究从经济、社会、环境和基础设施4个层次维度选取14个评价指标构成状态-响应韧性评价指标体系,具体见表3。

表3 状态-响应韧性指标及数据来源

Table 3 Indicators and data sources for state-response resilience

层次维度	评价指标	数据来源
经济韧性	人均GDP	《2022年重庆市 统计年鉴》
	城镇恩格尔系数	
	社保支出占比	
社会韧性	人口密度	《2022年重庆市 统计年鉴》
	低保人数	
	每万人拥有的床位数	
环境韧性	老少人口占比	《2022年重庆市 统计年鉴》
	绿化覆盖率	
	人均绿地面积	
基础设施韧性	城镇化率	《2022年重庆市 统计年鉴》
	学校数量	
	排水管道长度	
	货运周转量	
	人均道路长度	

4 韧性评估结果

4.1 滑坡压力韧性评估结果

本研究中滑坡压力韧性运用机器学习模型构建,滑坡压力韧性用0至1的连续值进行度量,1代表韧性很高,可抵御滑坡灾害的发生,0代表韧性很低且容易发生滑坡灾害。将收集的3090处历史滑坡灾害隐患点设为韧性为0(负样本),同时随机产生3090处韧性为1的样本(正样本),使正负样本数量相同以达到较好的评价效果。

在评价单元方面,滑坡压力韧性、洪涝压力韧性、状态-响应韧性、综合韧性采用区县级行政单元和乡镇级行政单元进行模型构建和评价。

6080个样本数据按照7:3的比例进行数据拆分,分为训练集和测试集,其中训练集样本4256个,测试集样本1824个。

本研究选用的目标函数是测试集的ROC-AUC值,取值范围是0至1,越接近于1说明模型预测能力越强。

通过贝叶斯优化算法对超参数进行寻优,选择AUC值最高的一组作为最优超参数。在LightGBM模型中,最优超参数为tree_depth=15, trees=238, learn_rate=0.0375, mtry=16, min_n=40, loss_reduction=6.596477e-10。ROC曲线如图4所示。

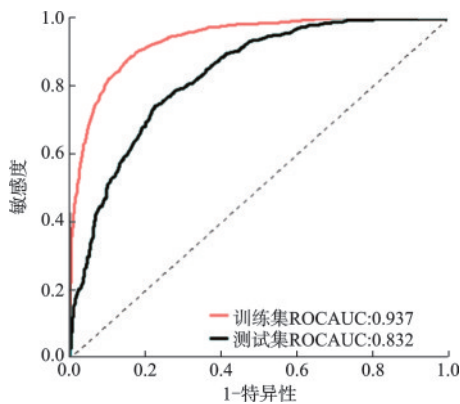


图4 ROC曲线图
Fig.4 ROC curves

将训练好的LightGBM模型应用于研究区,得到评估研究区所有栅格单元的韧性值,然后取各个行政区单位与乡镇街道单位范围内栅格的中位数,得到各个行政区与乡镇街道两个尺度的滑坡压力

韧性的评估结果。通过自然断点法将韧性等级分为高韧性、较高韧性、中等韧性、较低韧性、低韧性。对滑坡压力韧性评价结果进行可视化,如图5所示。

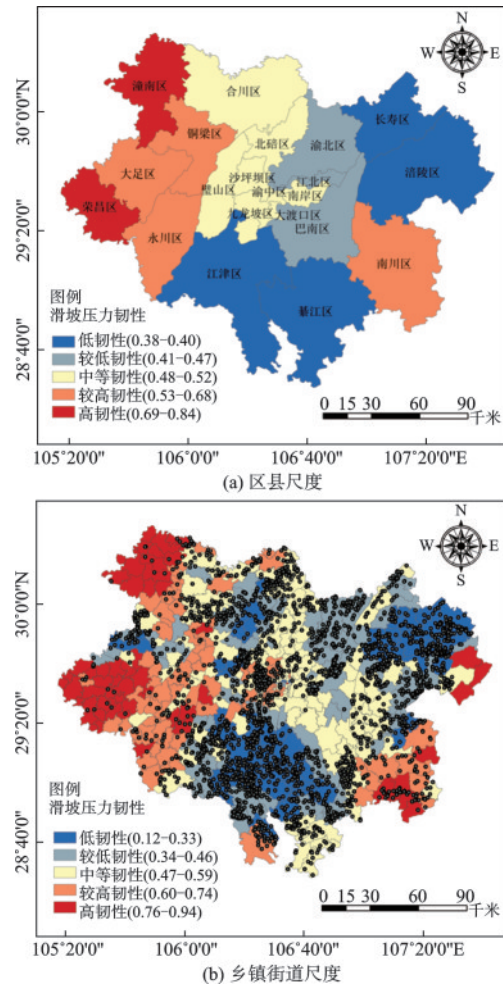


图5 滑坡压力韧性分布

Fig.5 Distribution of landslide pressure resilience

从区县尺度看,位于研究区的南部和东北部的长寿区、江津区、涪陵区和綦江区为低韧性区域。从乡镇尺度看,研究区中低韧性与较低韧性的乡镇街道主要分布于江津区、綦江区、涪陵区、长寿区和渝北区。低韧性与较低韧性的滑坡隐患点分布多,高韧性与较高韧性的区域滑坡隐患点分布少,符合历史滑坡灾害的空间分布。

4.2 洪涝压力韧性评估结果

洪涝灾害压力韧性指标为绝对高程(A1)、相对高程(A2)、水体淹没危险性(A3)、连续三天最大降雨(A4)、强降雨次数(A5)、汛期总降雨量(A6),用AHP方法对这些指标进行主观赋权,用熵权法对这

些指标进行客观赋权。结合主观方法和客观方法,以期得到更为全面和合理的权重赋值,运用式9计算组合权重,权重结果见表4。

根据VIKOR计算流程,取个体效益与群体效用的调节系数 $v=0.5$,结合计算的组合权重,计算研究区区县尺度和乡镇街道尺度的洪涝压力韧性。对洪涝压力韧性评价结果进行可视化,如图6所示。

表4 洪涝压力韧性指标权重

指标	AHP权重%	熵权法权重%	组合权重%
A1	3.912	33.36	0.101
A2	6.942	19.662	0.105
A3	34.983	12.093	0.325
A4	11.304	12.573	0.110
A5	14.925	12.222	0.141
A6	27.934	10.091	0.218

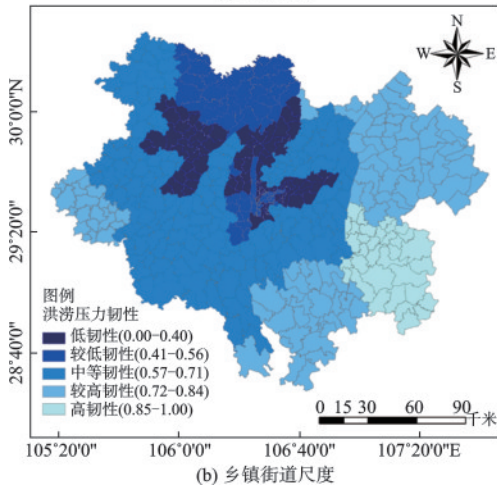
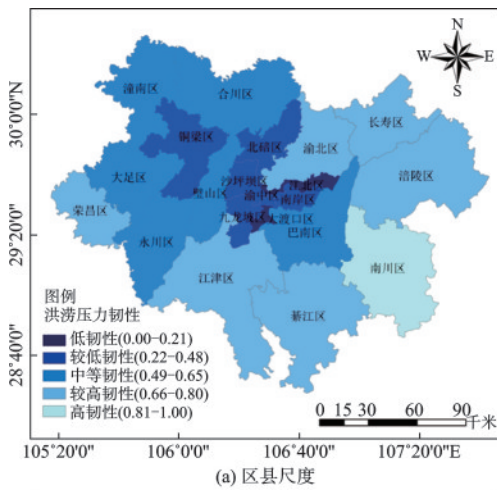


图6 洪涝压力韧性分布

Fig.6 Distribution of flood pressure resilience

位于研究区东南部的南川区是洪涝压力韧性最高的区。而位于研究区中部的核心城区,包括大渡口区、江北区、北碚区、南岸区、沙坪坝区、九龙坡区的整体韧性水平低。乡镇街道尺度的韧性分布与区县尺度分布基本一致。整体上呈现东部和西部韧性高,中部韧性低,外圈高内圈低的态势。

4.3 状态-响应韧性评估结果

构建AHP层次模型,目标层为状态-响应韧性,准则层分别是经济韧性 C_1 ,社会韧性 C_2 ,环境韧性 C_3 ,基础设施韧性 C_4 ,每个准则层下包含指标层。指标层一共有14个指标,层次结构如图7所示。

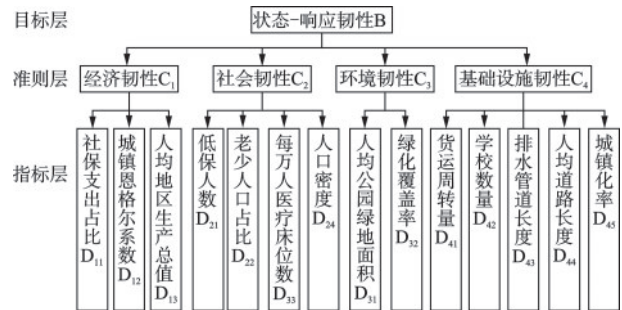


图7 状态-响应韧性AHP层次结构

Fig.7 AHP hierarchical structure of state-response resilience

首先构建准则层对目标层的判断矩阵 M ,然后构造各指标层 D 对准则层 C 的判断矩阵 M_1, M_2, M_3, M_4 ,均通过一致性检验。

结合客观赋权的CRITIC方法得到的权重,计算各个指标的组合权重见表5。

根据VIKOR计算流程,取个体效益与群体效用的调节系数 $v=0.5$,结合计算的组合权重,计算研究区区县尺度和乡镇街道两个尺度的状态-响应韧性,评价结果如图8所示。

根据研究区的状态-响应韧性结果可知:位于重庆市核心城区的渝中区是韧性最高的区,韧性空间分布呈现出一种明显的中心至外围递减趋势,同时每个行政区内部也存在这一现象。各行政区中的乡镇街道韧性水平有所差异,城镇中心区域韧性较高,远离城市中心的乡镇街道韧性较低。城镇中心区域由于资源集聚、经济活动集中、基础设施完善以及社区网络紧密等多重优势,展现出较强的抵御和适应各种挑战的能力。

表5 状态-响应韧性指标权重

Table 5 Weights of state-response resilience indicators

准则层	指标层	AHP 权重%	CRITIC 权重%	组合 权重%
经济韧性	人均GDP	17.996	6.077	15.668
	城镇恩格尔系数	11.985	6.346	10.896
	社保支出占比	5.998	7.351	6.318
社会韧性	人口密度	9.718	6.915	9.628
	低保人数	2.218	8.524	2.709
	每万人卫生床位数	9.718	6.198	8.630
环境韧性	老少人口占比	5.421	7.165	5.565
	绿化覆盖率	9.157	7.097	9.311
基础设施韧性	人均公园绿地面积	6.105	5.755	5.033
	排水管道长度	4.545	7.012	4.567
基础韧性	城镇化率	7.731	10.358	11.472
	货运周转量	1.733	5.817	1.445
	学校数量	3.102	6.105	2.714
	人均道路长度	4.546	9.279	6.043

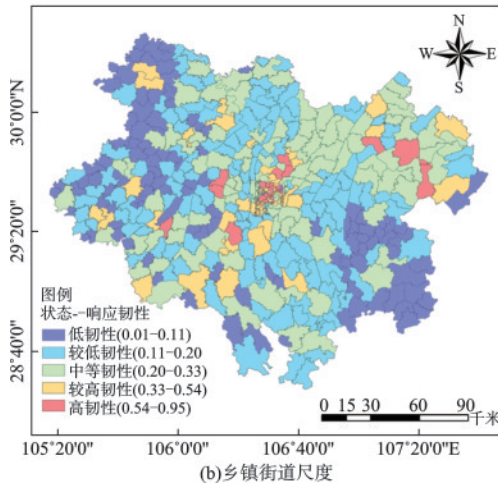
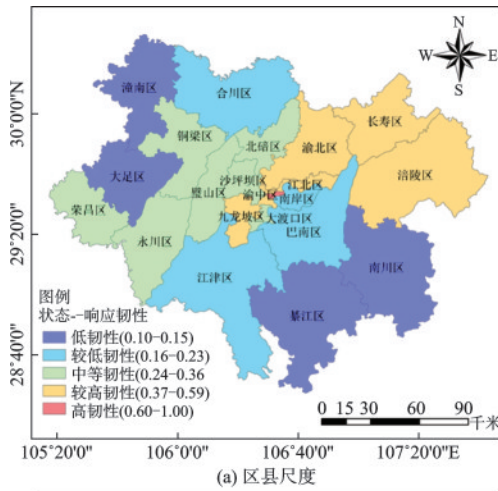


图8 状态响应韧性分布

Fig.8 Distribution of state-response resilience

4.4 城市灾害综合韧性评估结果

构建好滑坡压力韧性模型、洪涝压力韧性模型与状态-响应韧性模型后,运用秩和比综合评价法(RSR)构建城市综合韧性模型,RSR值越大城市灾害综合韧性越高。根据灾害综合韧性计算过程,将两种尺度下的灾害综合韧性评价结果导入 ArcGIS 进行可视化,如图9所示。

在区县尺度评价结果中,综合韧性的空间分布没有明显的特征。但每个行政区内部的乡镇街道韧性水平多样,通常具有2~4种不同的韧性水平,具有一定的差异性,反映了城市韧性发展的不均衡。

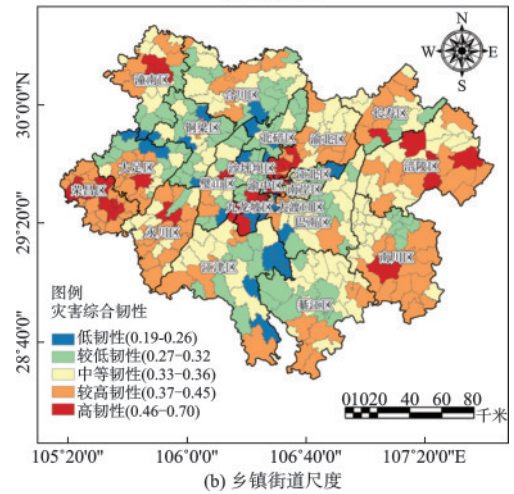
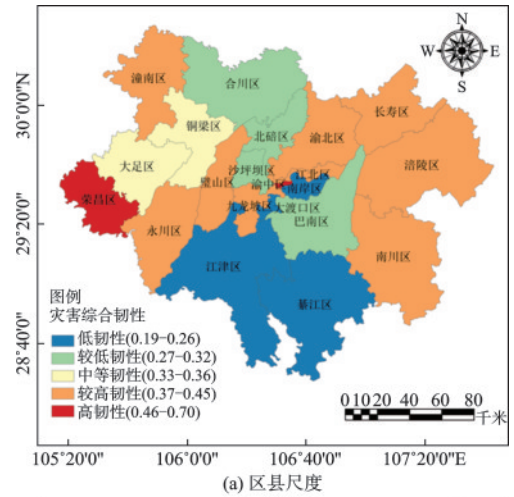


图9 灾害综合韧性分布

Fig.9 Distribution of comprehensive disaster resilience

5 结论

以重庆市主城都市区为例,研究滑坡与洪涝灾

害下的城市韧性评估,主要结论如下:

(1)研究区西部与西北部滑坡压力韧性高,而南部与东北部滑坡压力韧性低。其中位于研究区西部的荣昌区和潼南区的滑坡压力韧性最高,区内的乡镇街道均有较高的韧性。

(2)研究区中部洪涝压力韧性水平较低,而研究区东部和西部洪涝压力韧性普遍较高,其中位于研究区东南部的南川区是洪涝压力韧性最高的区。整体呈现外圈高内圈低的态势。

(3)重庆市核心城区的渝中区是状态-响应韧性最高的区,整体的状态-响应韧性空间分布呈现出一种明显的中心至外围递减的趋势。

(4)综合韧性的空间分布没有明显的特征,但研究区普遍存在一个行政区会出现多种不同韧性等级的情况,体现了各阶段韧性发展的不平衡,应注重强化薄弱环节。

本文对滑坡和洪涝灾害分开进行了评价,但滑坡和洪灾不仅可以独立发生,还可能互为因果,形成一种复杂的灾害链:持续的强降雨引发山洪,山洪的冲刷作用导致山体稳定性降低,进而触发滑坡,这两种灾害的相互作用将增加灾害管理的复杂性和挑战性。因此,可考虑二者的相互作用,进行更加全面的韧性评估。

参考文献:

- [1] 张靖岩,范乐,张泽伟,等.多灾种下特大城市安全韧性影响评估研究与实践[J].灾害学,2023,38(1):7-12.
Zhang J Y, Fan L, Zhang Z W, et al. Assessment and practice of mega-city safety resilience under multiple disasters [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 7-12. (in Chinese)
- [2] Mehryar S, Surminski S. Investigating flood resilience perceptions and supporting collective decision-making through fuzzy cognitive mapping[J]. Science of The Total Environment, 2022, 837: 155854.
- [3] Administration C M. Blue book on climate change of China 2022 rolled out [EB/OL].(2022-08-09)[2024-07-25].https://www.cma.gov.cn/en2014/news/News/202208/t20220809_5024647.html.
- [4] Zhang X, Mao F, Gong Z, et al. A disaster-damage-based framework for assessing urban resilience to intense rainfall-induced flooding [J]. Urban Climate, 2023, 48: 101402.
- [5] Duy P N, Chapman L, Tight M. Resilient transport systems to reduce urban vulnerability to floods in emerging-coastal cities: a case study of Ho Chi Minh City, Vietnam[J]. Travel Behaviour and Society, 2019, 15: 28-43.
- [6] Wijayawardana N, Abenayake C, Jayasinghe A, et al. An urban density-based runoff simulation framework to envisage flood resilience of cities [J]. Urban Science, 2023, 7(1): 17.
- [7] UNISDR. 2009 UNISDR terminology on disaster risk reduction [EB/OL]. (2009-01-23) [2024-07-25]. <https://www.undrr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction>.
- [8] Jiao L, Wang L, Lu H, et al. An assessment model for urban resilience based on the pressure-state-response framework and BP-GA neural network [J]. Urban Climate, 2023, 49: 101543.
- [9] Nathwani J, Lu X, Wu C, et al. Quantifying security and resilience of chinese coastal urban ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2019, 672: 51-60.
- [10] Xiong H, Ma C, Li M, et al. Landslide susceptibility prediction considering land use change and human activity: a case study under rapid urban expansion and afforestation in China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 866: 161430.
- [11] Zeng T, Wu L, Peduto D, et al. Ensemble learning framework for landslide susceptibility mapping: different basic classifier and ensemble strategy [J]. Geoscience Frontiers, 2023: 101645.
- [12] Yang C, Liu L L, Huang F, et al. Machine learning-based landslide susceptibility assessment with optimized ratio of landslide to non-landslide samples [J]. Gondwana Research, 2023, 123: 198-216.
- [13] Zhang X, Song J, Peng J, et al. Landslides-oriented urban disaster resilience assessment: a case study in Shenzhen, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 661: 95-106.
- [14] Goyes-Peñafiel P, Hernandez-Rojas A. Landslide susceptibility index based on the integration of logistic regression and weights of evidence: a case study in Popayan, Colombia [J]. Engineering Geology, 2021, 280: 105958.
- [15] Dou J, Yunus A P, Bui D T, et al. Improved landslide assessment using support vector machine with bagging, boosting, and stacking ensemble machine learning framework in a mountainous watershed, Japan [J]. Landslides, 2020, 17: 641-658.
- [16] Teimouri M, Kornejady A. The dilemma of determin-

- ing the superiority of data mining models: optimal sampling balance and end users' perspectives matter[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79: 1707-1720.
- [17] Zhang W, Li H, Li Y, et al. Application of deep learning algorithms in geotechnical engineering: a short critical review [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2021: 1-41.
- [18] Fang Z, Wang Y, Duan G, et al. Landslide susceptibility mapping using rotation forest ensemble technique with different decision trees in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(2):238.
- [19] Ke G, Meng Q, Finley T, et al. LightGBM: a highly efficient gradient boosting decision tree [C]//*Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*, Red Hook, NY, USA: Curran Associates Inc., 2017.
- [20] 杨勇杰. 一种结合 LightGBM 算法和神经网络的可解释的中小板企业成长力模型[D]. 杭州:浙江大学, 2022.
- Yang Y J. An Interpretable SMB growth model combining with LightGBM algorithm and neural networks [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)
- [21] Saaty T L. Decision Making with the analytic hierarchy process[J]. *International Journal of Services Sciences*, 2008, 1(1):83-98.
- [22] Li L, Chen X, Zhang J, et al. Landslide susceptibility-oriented suitability evaluation of construction land in mountainous areas[J]. *Forests*, 2022, 13(10): 1621.
- [23] Tayyab M, Zhang J, Hussain M, et al. Gis-based Urban flood resilience assessment using urban flood resilience model: a case study of Peshawar City, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(10): 1864.
- [24] 章穗, 张梅, 迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. *管理学报*, 2010, 7(1):34-42.
- Zhang S, Zhang M, Chi G T. Scientific and technological evaluation model based on entropy weight method and its empirical research [J]. *Chinese Journal of Management*, 2010, 7(1): 34-42. (in Chinese)
- [25] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method [J]. *Computers & Operations Research*, 1995, 22(7): 763-770.
- [26] 杨洋, 黄德镛, 耿元玲, 等. 基于 FAHP-CRITIC 组合赋权的采矿方法优选[J]. *化工矿物与加工*, 2022, 51(1): 6-11,22.
- Yang Y, Huang D Y, Geng Y L, et al. Mining method optimization based on FAHP-CRITIC combined weighting [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2022, 51(1): 6-11,22. (in Chinese)
- [27] Opricovic S, Tzeng G-H. Compromise solution by MCDM methods: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS [J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 156(2): 445-455.
- [28] 张意, 乌瀚宝栌尔, 刘拓, 等. 基于 TOPSIS 法与秩和比法模糊联合的化学药品毒性鉴定机构质量考核结果分析[J]. *工业卫生与职业病*, 2023, 49(6): 531-535.
- Zhang Y, Wu H, Liu T, et al. Analysis of quality assessment results of chemical toxicity identification agencies based on fuzzy combination of TOPSIS method and rank-sum ratio method [J]. *Industrial Health and Occupational Diseases*, 2023, 49(6): 531-535. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)