

基于可拓云模型的重庆市中心城区公路洪灾风险评价

黄淇¹, 牟凤云¹, 张用川¹, 陈林², 李云燕³

(1.重庆交通大学智慧城市学院, 重庆 400074; 2.重庆市地理信息和遥感应用中心, 重庆 401147; 3.山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆大学, 重庆 400045)

摘要: [目的] 分析公路洪灾风险指标存在的模糊性和随机性, 以及公路洪灾风险评价指标由定性描述转化为定量表达的问题, 为提高公路洪灾风险防控能力提供科学决策依据, 降低社会经济损失。[方法] 首先从致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体暴露性 3 个准则层出发选取 12 项指标, 构建公路洪灾风险评价指标体系, 其次利用 AHP-熵权法确定各指标权重, 最后基于可拓云模型构建了公路洪灾风险评价模型, 将重庆市中心城区公路洪灾风险等级划分为 I—V 级(非常低、比较低、一般、比较高和非常高)。[结果] ①重庆市中心城区 69.52% 的公路洪灾风险为 I—III 级, 仅 30.38% 的公路为 IV—V 级; 渝中区(64%)、巴南区(47%)和江北区(41%)高风险公路比例最高, 应针对全区公路进行总体防控; ②渝中区(71.06%)、巴南区(57.43%)和江北区(38.76%)的高风险公路长度最长, 应针对区内 IV—V 级公路进行防控。[结论] “两江四岸”及周边地区高风险公路最为密集, 各大流域、湖泊及水库附近为次密集。应保障及完善两江水上交通系统及周边地区路网体系, 同时推进各大流域水文站及防汛监测预警系统建设, 编制防御及应急预案等。

关键词: 可拓云模型; 公路洪灾; 洪灾风险; AHP-熵权法; 重庆市中心城区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)03-0157-09

中图分类号: TP277, U418

文献参数: 黄淇, 牟凤云, 张用川, 等. 基于可拓云模型的重庆市中心城区公路洪灾风险评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 157-165. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.021; Huang Qi, Mou Fengyun, Zhang Yongchuan, et al. Risk assessment of highway flood disaster in Central Chongqing City based on extension cloud model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 157-165.

Risk Assessment of Highway Flood Disaster in Central Chongqing City Based on Extension Cloud Model

Huang Qi¹, Mou Fengyun¹, Zhang Yongchuan¹, Chen Lin², Li Yunyan³

(1. Smart City Academy, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074,

China; 2. Chongqing Geographic Information and Remote Sensing Application

Center, Chongqing 401147, China; 3. Key Laboratory of New Technology for Construction of

Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: [Objective] The fuzziness and randomness of highway flood risk indicators, and transform highway flood risk evaluation indicators from qualitative descriptions to quantitative values were analyzed in order to improve highway flood risk prevention and control ability, to provide a scientific basis for decision-making, and to reduce social and economic losses. [Methods] Twelve indicators from three criteria layers (namely, the risk of factors causing disasters, the sensitivity of disaster-pregnant environments, and the exposure of disaster-bearing bodies) were selected to construct a highway flood risk evaluation index system. Then the weight of each index was determined by the AHP-entropy weight method. Finally, a highway flood risk evaluation model was constructed based on an extension cloud model. The flood risk of highways in the

收稿日期: 2021-12-08

修回日期: 2022-01-11

资助项目: 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室开放基金“重庆市中心城区城市公路网络抗灾韧性评估研究”(LNTCCMA-20220112); 国家重点研发计划项目(2019YFB2102500); 重庆交通大学研究生科研创新项目(CYS21362)

第一作者: 黄淇(1998—), 女(汉族), 重庆奉节人, 硕士研究生, 主要从事交通经济、国土资源遥感、3S 技术集成与应用。Email: 422879032@qq.com。

通信作者: 牟凤云(1979—), 女(汉族), 山东省高密市人, 博士, 教授, 主要从事交通经济、国土资源遥感、3S 技术集成与应用。Email: mfyfsd@cqjtu.edu.cn。

central urban area of Chongqing City was divided into risk class I to V (very low, relatively low, average, relatively high, and very high). [Results] ① 69.62% of highways in the downtown area of Chongqing City had a flood risk of class I to III, and only 30.38% of highways had a flood risk of class IV to V. Yuzhong District (64%), Banan District (47%), and Jiangbei District (41%) accounted for the highest proportion of high-risk highways, and these region's highways should be targeted for flood prevention and control. ② Yuzhong District (71.06%), Banan District (57.43%), and Jiangbei District (38.76%) had the longest length of high-risk highways, and flood prevention and control measures should be carried out for class IV and V highways in the region. [Conclusion] The "two rivers and four banks" location and the surrounding areas were the most densely populated with high-risk highways, followed by major watersheds, lakes, and reservoirs. The water transportation system of the two rivers and the highway network system in the surrounding areas should be ensured and improved, the construction of hydrological stations and flood-control monitoring and early warning systems in major watersheds should be promoted, and the defense and emergency plans should be prepared.

Keywords: extension cloud model; highway flooding; flood risk; AHP-entropy method; Central Chongqing City

中国疆域辽阔,自然灾害频发,为了全面掌握中国自然灾害风险隐患情况,提升全社会抵御自然灾害的综合防范能力,国务院决定于 2020—2022 年开展第一次全国自然灾害综合风险普查工作,客观认识中国自然灾害综合风险水平,从而为政府有效开展自然灾害防治工作、切实保障社会经济可持续发展提供权威的灾害风险信息和科学决策依据。

2021 年重庆市第一次全国自然灾害综合风险普查结果显示^[1],2020 年汛期,重庆市普通公路共发生各类水毁 2 万余处,普通国省干线公路发生造成交通阻断的水毁 600 余处,直接经济损失超过 1.40×10^9 元;高速公路水毁 98 处,直接经济损失 5.50×10^7 。其中,2020 年 8 月,双洪峰过境重庆市中心城区,“两江四岸”大量滨江公路被洪水淹没,社会经济损失惨重;2021 年 4 月,重庆市政府发布通知,中心城区 3.94×10^7 m“两江四岸”及周边地区将于 2025 年底完成统筹沿江防洪排涝和城市建设、开展基础设施灾后重建工作试点工作,从而有效应对百年一遇洪水水位下的洪涝灾害。综上所述,重庆市公路受洪灾威胁甚为严重,加之山区公路建设和养护难度大、成本高,公路洪灾风险评价对于其灾前风险防控意义重大。

现有洪灾风险评价方法主要包括历史灾情法、多准则评估法和模型模拟法^[2]。其中,由于历史灾情法和模型模拟法所需的原始数据往往难以获取,因此多准则评估法最为常用^[3-4],但传统的多准则评估法,往往在处理指标取值的随机性与模糊性问题上存在不足。

随着可拓学和云模型的融合,可拓云模型逐渐被提出,其优势突出,不仅有助于指标由定性描述转化为定量表达,而且可以解决指标取值存在的模糊性和

随机性问题,基于以上优势,可拓云模型被广泛应用于各个领域的安全评价研究,如生态安全评价^[5-7]、水安全评价^[8-9]、施工安全评价^[10-11]、隧洞安全评价^[12-14]、交通安全评价^[15-16]等,但鲜有研究将可拓云模型引入自然灾害视角下的城市基础设施安全问题之中。

公路是城市内重要基础设施之一,公路洪灾风险评价即是从洪灾视角出发对公路安全进行评价。笔者将可拓云模型引入公路洪灾风险评价领域,一方面,可利用可拓学的定性定量分析解决公路洪灾风险评价指标由定性描述转化为定量表达的问题。另一方面,利用云模型的不确定性推理解决公路洪灾风险指标存在的模糊性和随机性问题。

本研究以重庆市中心城区的公路为研究对象,首先构建公路洪灾风险评价指标体系,利用 AHP-熵权法确定指标权重;基于可拓云构建公路洪灾风险评价模型;最后分析评价结果,从而客观认识重庆市中心城区公路洪灾风险水平,为提高公路洪灾风险防控能力提供科学决策依据。

1 研究区概况

重庆市中心城区由渝中区、江北区、南岸区、九龙坡区、沙坪坝区、大渡口区、北碚区、渝北区、巴南区 9 个区组成,面积约 5.47×10^3 km²。区内降雨充沛,年降雨量 1.00×10^3 mm 至 1.20×10^3 mm,但降雨年内分配极不均匀,汛期(5—9 月)降雨量占全年的 60% 至 85%,加之区内水系稠密,在长江、嘉陵江交汇形成的“两江四岸”空间格局下,重庆市中心城区洪灾频发,其关键性地理位置决定了其既要承担长江中上游、嘉陵江洪水过境的压力,又要为长江中下游防汛

保安,因此汛期内防汛压力巨大。截至 2019 年,中心城区内公路里程达 5.33×10^3 km。

2 研究思路及方法

2.1 研究思路

本研究基本思路见图 1。以重庆市中心城区的公路为研究对象,首先从致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体暴露性出发选取 12 项指标,构建公路洪灾风险评价指标体系,利用 AHP-熵权法确定各指标综合权重;再者基于可拓云构建重庆市中心城区公路洪灾风险评价模型;最后分析公路的危险性等级、敏感性等级、暴露性等级以及综合风险等级评价结果。

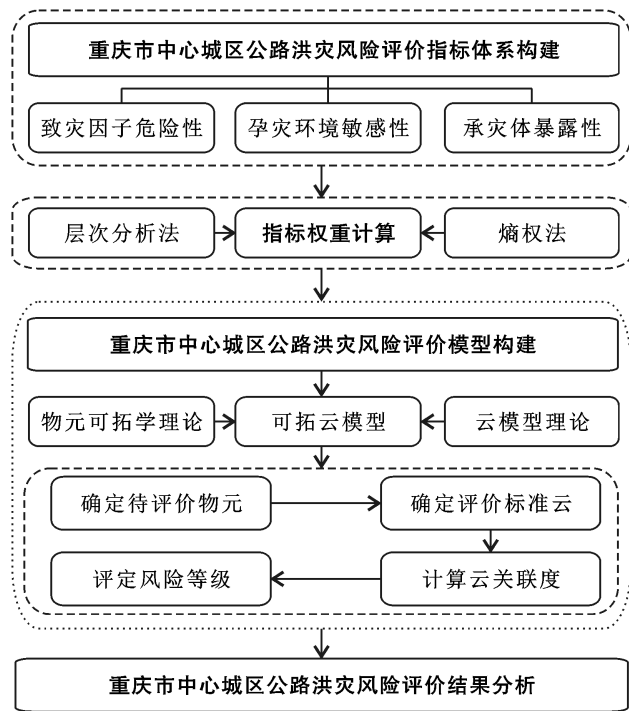


图 1 公路洪灾风险评价研究思路

2.2 研究方法

2.2.1 AHP-熵权法原理 在确定指标权重时,既需主观评定指标的重要性,亦需客观体现指标的数据特征。因此,本研究结合 AHP 法和熵权法,首先运用 AHP 法计算各指标主观权重 w_a ,再运用熵权法计算各指标客观权重 w_e ,最后在主、客观权重基础上,运用加和法集成原理,得到综合权重向量 W 。

$$W = aw_a + bw_e \quad (1)$$

假设有 n 个指标,则有

$$a = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n ip_i - \left(1 + \frac{1}{n} \right) \right] \quad (2)$$

$$b = 1 - a \quad (3)$$

式中: p_i 为 w_{ai} 与 w_{ei} 的平均值。

2.2.2 可拓云模型原理^[5,10] 可拓云模型由物元模型和正态云模型嵌套而成。物元模型将待评价事物定义为由三元组表示的物元,记作 $R = (NCV) = (\text{事物名称}, \text{事物特征}, \text{事物关于该特征的量值})$;正态云模型将一个整体性概念由 3 个数字特征表示,符号表达为 (E_x, E_n, H_e) ,其中 E_x 为期望值, E_n 为熵值, H_e 为超熵,分别反映了云的中心值、跨度大小和厚度。

物元理论将事物变化中的质和量进行了有机结合,有助于将公路洪灾风险评价指标由定性描述转化为定量表达,但是传统基于物元理论的评价研究中, V (事物关于某特征的量值) 值往往取为确定的数值或区间,没有充分考虑到指标取值的随机性和模糊性问题。(随机性指事件本身的含义是明确的,只是在一定条件下可能发生,可能不发生。模糊性指事件本身是模糊不清的。)

可拓云模型充分利用了正态云模型处理随机性和模糊性的优点,用正态云模型 (E_x, E_n, H_e) 取代传统物元模型 $R = (NCV)$ 中的确定值 V ,则 $R = NC(E_x, E_n, H_e) = (\text{事物名称}, \text{事物特征}, \text{云量值})$,得到可拓云模型,从而解决了公路洪灾风险评价过程中指标取值的随机性和模糊性问题。

(1) 确定待评价物元。将待评价物元表示为:

$$R = \begin{pmatrix} N & C_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}) \\ N & C_2 & (E_{x1}, E_{n2}, H_{e2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N & C_n & (E_{xn}, E_{nm}, H_{en}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: N 为待评价物元; C_n 为第 n 项指标; (E_{xn}, E_{nm}, H_{en}) 为待评价物元 N 关于指标 C_n 的云量值。

(2) 确定评价标准云。将各指标的等级阈值界限作为双约束空间 $[C_{\max}, C_{\min}]$,代入公式(2)中计算各个指标在各个等级的 (E_x, E_n, H_e) ,最终得到公路洪灾风险等级评价标准云。

$$E_x = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} \quad (5)$$

$$E_n = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \quad (6)$$

$$H_e = T \quad (7)$$

式中: T 为常量,取值应客观反映公路洪灾风险评价的随机性、模糊性和离散性。

(3) 计算云关联度。将各项指标在各个等级的 (E_x, E_n, H_e) 输入正向云发生器,产生一个以 E_x 为期望值、 E_n 为标准差的正态随机数 x_{ij} , 和一个以 E_n 为期望值, H_e 为标准差的正态随机数 E_n' ,再代入式(5)计算云关联度 $\mu(x_{ij})$,生成云滴 $\text{drop}[x_{ij}, \mu$

(x_{ij})], 重复生成步骤, 积累一定数量的云滴, 从而汇聚成云。

$$\mu(x_{ij}) = k_{ij} = \exp\left[-\frac{(x_i - E_x)^2}{2(E_n')^2}\right] \quad (8)$$

所有的云关联度组成综合评判矩阵 D :

$$D = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1j} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nj} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: k_{ij} 为第 i 项指标在第 j 等级下的云关联度; n 为评价指标数。

(4) 风险等级评定。

首先计算综合评判向量 H :

$$H = W \cdot D \quad (10)$$

式中: W 为综合权重向量; D 为综合评判矩阵。

计算综合评判分值 r_i :

$$r_i = \frac{\sum_{i=1}^5 d_i f_i}{\sum_{i=1}^5 d_i} \quad (11)$$

式中: d_i 为向量 D 的分量; f_i 为等级 i 的分值。

由于云关联度 $\mu(x_i B)$ 建立在超熵 H_e 之上, 计算结果存在随机性, 需运用 MATLAB 编程实现多次求解, 以降低随机性影响, 最终得到综合评判期望矩阵 D_x , 综合评判期望值 E_{rx} 和综合评判熵值 E_{rm} :

$$D_x = \frac{\sum_{i=1}^h D(i)}{h} \quad (12)$$

$$E_{rx} = \frac{\sum_{i=1}^h r_i(x)}{h} \quad (13)$$

$$E_{rm} = \sqrt{\frac{1}{h} \sum_{i=1}^h [r_i(x) - E_{rx}]^2} \quad (14)$$

式中: h 为运算次数, 取 3 000; $D(i)$ 为第 i 次计算得到的综合评判矩阵; $r_i(x)$ 为第 i 次的综合评判分值。 E_{rx} 为综合评判分值的期望值。

3 结果与分析

3.1 公路洪灾成因分析及类型划分

公路洪灾的形成受气象、地形、植被、水文等多种因素共同影响, 但暴雨是重庆市公路洪灾的主要触发原因, 因此本文针对暴雨引发的公路洪灾进行探讨, 结合相关文献^[2]及实际情况, 将重庆市公路洪灾归纳为 8 种类型(图 2)。①暴雨作用下, 公路路基边坡发生的岩石塌落、缺口、冲沟、沉陷、塌方等灾害为边坡坍塌类; ②填方路段边坡出现冲沟、缺口、沉陷等灾害为水毁冲沟类; ③公路坡面冲刷产生泥石流、崩塌落石等导致公路路面产生积水、积石及淤泥等堵塞交通的灾害为路面淤埋类; ④公路路基流失导致公路

坍塌缺口为路基缺口类; ⑤公路路基大范围流失、损毁的灾害为路基冲失类; ⑥路基在垂直方向上产生较大的沉落, 不均匀下陷, 造成的局部路段损坏的灾害为路基沉陷类; ⑦公路桥梁及涵洞等结构发生损坏的灾害为桥涵损毁类; ⑧边沟、排水沟、截水沟及暗沟等路基排水设施发生淤积或堵塞的现象为排水系统淤塞类。

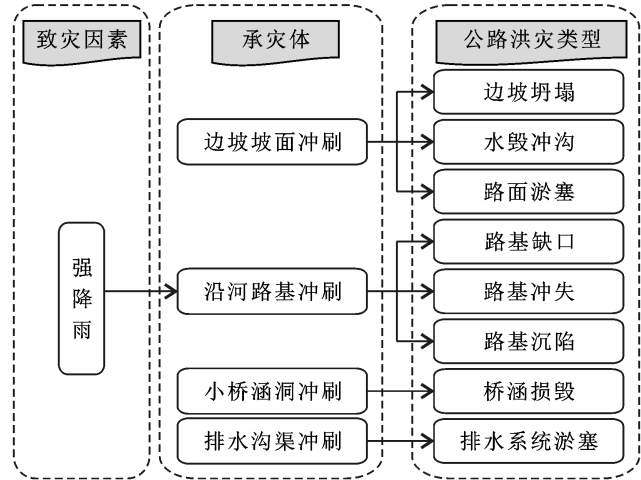


图 2 重庆市公路洪灾分类

3.2 公路洪灾安全评价指标体系构建

3.2.1 影响因素分析及评价指标选取 根据史培军^[17]提出的区域灾害系统论, 灾害是致灾因子、孕灾环境与承灾体综合作用的结果, 结合国际主流灾害风险评估“H-E-V”框架^[18], 包括危险性(hazard)、暴露性(exposure)和脆弱性(vulnerability)研究, 危险性研究致灾因子引发的风险, 暴露度研究暴露在风险中的承灾体。如人口、基础设施、财产等。脆弱性研究致灾因子所造成的承灾体的损失程度。本研究以致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体暴露性为准则层, 参考大量文献的指标选取情况, 致灾因子上, 强降雨迅速汇流累积成较大地表径流是公路洪灾的主要触发条件。孕灾环境上, 高程、坡度、坡向、平面曲率和剖面曲率等地形条件影响着地面径流的流量、流速、流向、敛散性和加速度, 为公路洪灾的发生提供动力条件; 植被对降水的遮拦、径流的截留以及吸收等作用可以减少地表汇流, 具有一定蓄水防洪功能, 沿线植被覆盖度较低的公路更易发生洪灾。河流、湖泊和水库等水文因素对强降雨具有再分布作用, 距离水系较近的公路更易发生洪灾。承灾体上, 公路等级越高, 防护设施就越完善, 抗洪能力也越强; 人口密度和国内生产总值越高, 发生公路洪灾后的社会经济损失就越大。综上所述, 分别选取 12 个指标, 构建重庆市中心城区公路洪灾风险评价指标体系(图 3)。

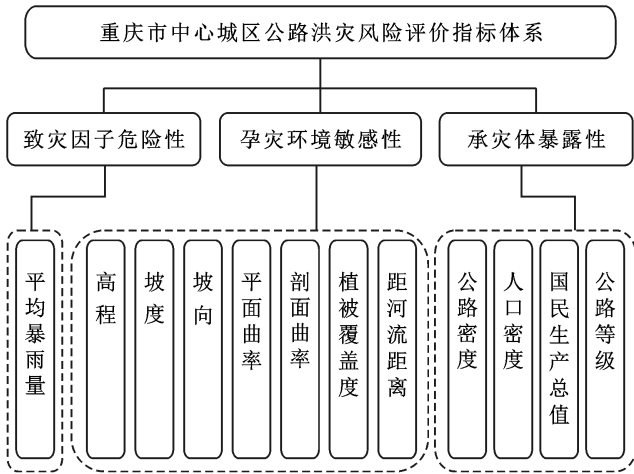


图 3 重庆市中心城区公路洪灾风险评价指标体系

3.2.2 评价指标数据获取及处理 根据所构建的公路洪灾风险评价指标体系(图 3),涉及的数据详情见表 1。数据处理过程包括:①根据重庆市 36 个国家级地面气象站点降水量,利用 GIS 地统计学分析中的协同克里金法(协同 DEM),插值获得重庆市中心城区 2016—2020 年平均暴雨量分布图;②根据重庆

市中心城区 DEM,利用 GIS 空间分析工具,提取坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率分布图;③结合重庆市 2019 年 NPP/VIIRS 夜间灯光对 2019 年区县生产总值进行栅格化处理,获得重庆市中心城区 2019 年 GDP 栅格数据;④从重庆市中心城区 2020 年道路中提取高速、国道、省道、县道和城市一级、二级道路网。

3.3 公路洪灾风险评价模型构建

3.3.1 指标权重及等级阈值划分 根据公式(1)—(3)分别计算 12 个指标的 AHP 权、熵权及其组合权重(表 2),并利用自然断点法划分出重庆市中心城区公路沿线 12 个指标在 5 个洪灾风险等级下的阈值界限(表 3)。

3.3.2 确定评价标准云 根据公式(5)—(7),将表 3 中各指标的等级阈值界限作为双约束空间 $[C_{max}, C_{min}]$,计算正态云模型 (E_x, E_n, H_e) ,得到公路洪灾风险等级标准云模型(表 4)。

将重庆市中心城区公路洪灾风险水平划分为 5 个等级:Ⅰ级(非常低)、Ⅱ级(比较低)、Ⅲ级(一般)、Ⅳ级(比较高)、Ⅴ级(非常高)。

表 1 重庆市中心城区公路洪灾风险评价相关数据

数据名称	类型	时间	分辨率	来源
重庆市国家级气象站点降水量	列表	2016—2020 年(日度)	—	中国国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)
重庆市中心城区 DEM	栅格	2020 年	30 m	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
重庆市中心城区植被覆盖度	栅格	2020 年	250 m	FRMM-EarthPrinter
重庆市中心城区人口密度	栅格	2020 年	1 km	WorldPop(https://www.worldpop.org/)
重庆市统计年鉴	列表	2019 年	—	重庆市统计局(http://tjj.cq.gov.cn/)
NPP/VIIRS 夜间灯光	栅格	2019 年	500 m	NCEI(https://www.ncei.noaa.gov/)
重庆市中心城区道路	矢量	2020 年	—	高德地图(https://www.amap.com/)
重庆市中心城区河流	矢量	2020 年	—	全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn/main.do?method=index)

表 2 重庆市中心城区公路洪灾风险评价指标权重

目标层	准则层	指标层	AHP 权	熵权	综合权重
公路洪灾风险综合指数	致灾因子危险性	平均暴雨量 C_1/mm	0.009	0.101	0.054
		高程 C_2/m	0.117	0.059	0.089
		坡度 $C_3/(\text{°})$	0.008	0.030	0.019
		坡向 $C_4/(\text{°})$	0.099	0.182	0.139
	孕灾环境敏感性	平面曲率 C_5/m	0.004	0.031	0.017
		剖面曲率 C_6/m	0.004	0.018	0.011
		植被覆盖度 $C_7/\%$	0.500	0.177	0.343
		距河流距离 C_8/m	0.003	0.177	0.088
	承灾体暴露性	公路密度 $C_9/10^4 \text{ m}$	0.018	0.014	0.016
		人口密度 $C_{10}/(\text{人} \cdot \text{m}^{-2})$	0.160	0.027	0.095
		GDP $C_{11}/\text{万元}$	0.002	0.061	0.031
		公路等级 C_{12}	0.075	0.123	0.098

3.4 公路洪灾风险评估结果与分析

首先运用可拓云模型分别计算公路的危险性、敏感性和暴露性等级,再者运用 GIS 技术进行空间可视化(附图 4,见封 2),最后分区统计公路的危险性、敏

感和暴露性等级百分比分布(图 4)。

(1) 致灾因子危险性等级为Ⅳ—Ⅴ级(即危险性“比较高、非常高”)的公路较少,由于巴南区多强降雨,平均暴雨量值高,因此Ⅳ—Ⅴ级的公路多分布于

巴南区 (14.05%); 反之, 危险性等级为 I—II 级 (即危险性“非常低”、“比较低”) 的公路最多, 南岸区 (98.19%) 和江北区 (90.56%) 均超过 90%、渝中区 88.20%, 渝北区 77.92%, 大渡口区 and 北碚区皆有

超过 60% 公路危险性等级为 I—II 级。因而从致灾因子层面来看, 重庆市中心城区内的公路仅仅受暴雨影响发生洪灾的风险比较小。(具体见图 4a 及封 3 附图 4a)。

表 3 重庆市中心城区公路洪灾风险评价指标等级阈值

指标	各等级洪灾风险评价指标阈值				
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
C ₁	[69.35, 69.89]	[69.9, 70.25]	[70.26, 70.57]	[70.58, 70.93]	[70.94, 71.49]
C ₂	[656, 1214]	[468, 655]	[354, 467]	[275, 353]	[178, 274]
C ₃	[6, 12]	[4—5]	[3, 3]	[2, 2]	[0, 1]
C ₄	[0, 78]	[79, 149]	[150, 228]	[229, 297]	[298, 360]
C ₅	[-3.50E+08, -5.03E+07]	[-5.02E+07, -7.49E+06]	[-7.48E+06, 2.71E+07]	[2.72E+07, 9.26E+07]	[9.27E+07, 4.39E+08]
C ₆	[-4.97E+08, -1.12E+08]	[-1.11E+08, -1.97E+07]	[-1.96E+07, 2.80E+07]	[2.81E+07, 9.42E+07]	[9.43E+07, 3.39E+08]
C ₇	[86, 100]	[72, 85]	[59, 71]	[27, 58]	[0, 26]
C ₈	[4 051, 6 905]	[2 886, 4 050]	[1 812, 2 885]	[895, 1 811]	[0, 894]
C ₉	[0.00E+00, 8.03E-08]	[8.04E-08, 1.71E-07]	[1.72E-07, 2.92E-07]	[2.93E-07, 4.78E-07]	[4.79E-07, 9.92E-07]
C ₁₀	[29.3 437]	[3 438, 10 062]	[10 063, 19 384]	[19 385, 31 781]	[31 782, 61 337]
C ₁₁	[4, 316]	[317, 793]	[794, 1 494]	[1 495, 4 056]	[4 057, 11 717]
C ₁₂	[0, 1]	[2—3]	[4—5]	[6, 8]	[9—10]

表 4 重庆市中心城区公路洪灾风险等级标准云模型

指标	各等级洪灾风险标准				
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
C ₁	(0.041, 0.014, 0.000 2)	(0.126, 0.015, 0.000 2)	(0.234, 0.02, 0.000 2)	(0.388, 0.031, 0.000 2)	(0.741, 0.086, 0.000 2)
C ₂	(0.769, 0.077, 0.000 2)	(0.462, 0.026, 0.000 2)	(0.337, 0.016, 0.000 2)	(0.259, 0.011, 0.000 2)	(0.187, 0.013, 0.000 2)
C ₃	(0.729, 0.091, 0.000 2)	(0.374, 0.028, 0.000 2)	(0.231, 0.019, 0.000 2)	(0.131, 0.014, 0.000 2)	(0.045, 0.015, 0.000 2)
C ₄	(0.109, 0.036, 0.000 2)	(0.315, 0.032, 0.000 2)	(0.522, 0.036, 0.000 2)	(0.729, 0.032, 0.000 2)	(0.913, 0.029, 0.000 2)
C ₅	(-0.456, 0.114, 0.000 2)	(-0.066, 0.016, 0.000 2)	(0.022, 0.013, 0.000 2)	(0.137, 0.025, 0.000 2)	(0.606, 0.132, 0.000 2)
C ₆	(-0.898, 0.189, 0.000 2)	(-0.193, 0.045, 0.000 2)	(0.013, 0.024, 0.000 2)	(0.18, 0.032, 0.000 2)	(0.638, 0.12, 0.000 2)
C ₇	(0.028, 0.009, 0.000 2)	(0.109, 0.018, 0.000 2)	(0.24, 0.025, 0.000 2)	(0.417, 0.034, 0.000 2)	(0.759, 0.08, 0.000 2)
C ₈	(0.014, 0.004, 0.000 2)	(0.047, 0.007, 0.000 2)	(0.098, 0.01, 0.000 2)	(0.237, 0.036, 0.000 2)	(0.673, 0.109, 0.000 2)
C ₉	(0.925, 0.025, 0.000 2)	(0.78, 0.023, 0.000 2)	(0.645, 0.022, 0.000 2)	(0.422, 0.053, 0.000 2)	(0.132, 0.044, 0.000 2)
C ₁₀	(0.793, 0.069, 0.000 2)	(0.502, 0.028, 0.000 2)	(0.341, 0.026, 0.000 2)	(0.196, 0.022, 0.000 2)	(0.064, 0.022, 0.000 2)
C ₁₁	(0.974, 0.001, 0.000 2)	(0.981, 0.001, 0.000 2)	(0.985, 0.001, 0.000 2)	(0.989, 0.001, 0.000 2)	(0.996, 0.001, 0.000 2)
C ₁₂	(0.951, 0.017, 0.000 2)	(0.7, 0.033, 0.000 2)	(0.45, 0.017, 0.000 2)	(0.25, 0.017, 0.000 2)	(0.05, 0.017, 0.000 2)

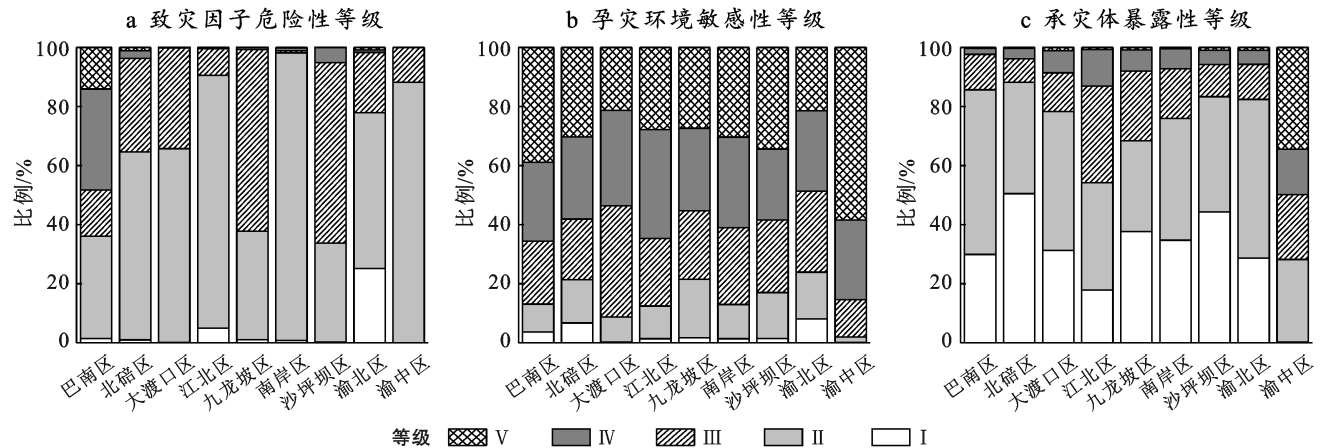


图 4 重庆市中心城区各区公路危险性、敏感性和暴露性等级分布

(2) 孕灾环境敏感性等级为 IV—V 级 (即敏感性“比较高”、“非常高”) 的公路最多。其中, 渝中区 (85.41%) 在长江和嘉陵江的环抱下, 极易受暴雨冲

击、洪峰叠加、多流汇集的影响, 超过 80% 公路敏感性等级为 IV—V 级, 其孕灾环境之敏感决定了其在公路洪灾防治中的优先地位, 与此同时, 位于两江之北

的江北区(64.65%)和位于两江之南的巴南区(65.63%)、巴南区(61.07%)内河流较多,滨江公路亦多,超过 60%公路敏感性等级为 IV—V 级;此外,敏感性等级为 I—II 级(即敏感性“非常低、比较低”)的公路十分少。(见图 4b 及封 3 附图 4b)

(3) 承灾体暴露性等级为 IV—V 级(即暴露性“比较高、非常高”)的公路总体较少,多分布于渝中区(49.85%)和江北区(13.11%),此二区作为重庆市中心城区的政治、经济、文化以及商贸流通中心,其内公路、人口和 GDP 高度密集,一旦发生公路洪灾将损失极其惨重,所以应将此二区作为公路洪灾防治的重中之重,与此同时,大渡口区(8.57%)、九龙坡区(8.04%)、南岸区(7.23%)、内亦有少部分公路暴露性为 IV—V 级,也应作为公路洪灾防治的重点关注对象;暴露性等级为 I 至 II 级(即暴露性“非常低”、“比较低”)的公路最多,北碚区(88.21%)、巴南区(85.66%)、沙坪坝区(83.35%)和渝北区(82.40%)超过 80%公路暴露性等级为 I—II 级、大渡口区(78.29%)和南岸区(75.98%)超过 70%公路暴露性等级为 I—II 级,这些区域的公路、人口、GDP 分布相对稀疏,公路洪灾发生后损失也相对较轻(见图 4c 及封 3 附图 4c)。

3.5 综合风险等级评价

综合考虑致灾因子危险性、孕灾环境敏感性和承灾体暴露性,统计风险等级总体分布(图 5)、各区风险等级百分比分布(图 6)以及各区在各风险等级的公路长度分布(图 7),计算公路洪灾风险等级并进行空间可视化。

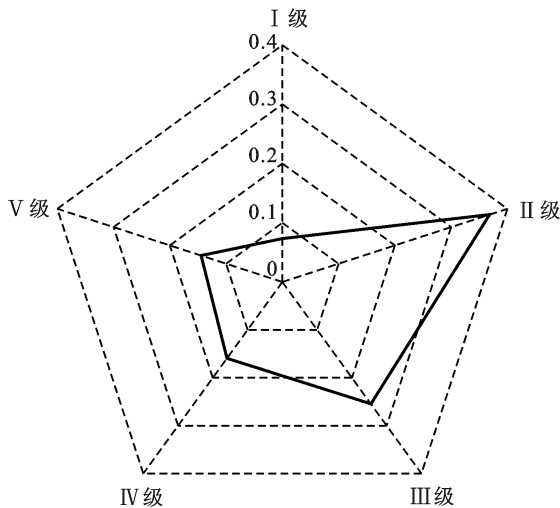


图 5 重庆市中心城区公路洪灾风险等级总体分布

根据公路洪灾风险等级总体分布图(图 5),重庆市中心城区内公路洪灾风险等级分布排名为: II 级(36.85%)> III 级(25.46%)> IV 级(15.94%)> V 级

(14.44%)> I 级(7.32%)。由此可知,重庆市中心城区大部分公路(69.62%)的洪灾风险处于一般、比较低或非常低的水平,仅少部分公路(30.38%)的洪灾风险处于比较高或非常高的水平,应作为公路洪灾重点防治对象。

根据各区公路洪灾风险等级比例(图 6)可知,各区内风险等级为 IV—V 级(风险“比较高”或“非常高”)的公路比例排名为:渝中区(71.06%)>巴南区(57.43%)>江北区(38.76%)>沙坪坝区(36.73%)>渝北区(24.04%)>北碚区(21.66%)>南岸区(18.40%)>大渡口区(16.35%)>九龙坡区(10.04%)。

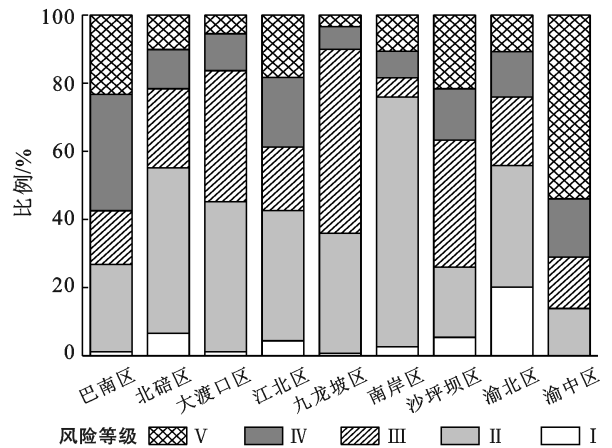


图 6 重庆市中心城区各区公路风险等级分布

重点关注位居前三的渝中区、巴南区和江北区,对照前文分析,渝中区和江北区紧邻两江且经济发达,孕灾环境敏感性和承灾体暴露性均相对于其他区更高,而巴南区虽然经济相对欠发达,承灾体暴露性相对较低,但区内水系密集且降水丰富,致灾因子危险性和孕灾环境敏感性均相对于其他区更高。因此,从高风险公路百分占比上看,渝中区、巴南区和江北区的高风险公路百分占比更大,应作为重庆市中心城区公路洪灾防控的重点区域,对全区公路进行总体防控。

对各区在各风险等级的公路长度进行统计(图 7),各区风险等级为 IV—V 级的公路长度排名依次为:巴南区(1 261.04 m)>渝北区(794.25 km)>沙坪坝区(600.94 km)>江北区(381.91 km)>北碚区(320.83 km)>南岸区(214.3 km)>渝中区(200.80 km)>九龙坡区(176.87 km)>大渡口区(69.20 km)。

某区在某风险等级下的公路长度排名,不仅受该区内该风险等级公路的比例影响,而且受该区内公路总长影响。因此,比例排名位列第二的巴南区,由于其区域面积较大,区内公路总长较长,风险为 IV—V 级的公路亦相对较长,加之比例排名本已靠前,因而

在长度排名中拔得头筹;而比例排名位列第一的渝中区,却由于其区域面积较小,区内公路总长较短,风险为Ⅳ—Ⅴ级的公路亦相对较短,因而在长度排名中下降

至倒数第三;此外,长度排名位列前茅的巴南区、渝北区、沙坪坝区亦是同理,由于其区内公路总长较长而排名靠前,因此区内风险为Ⅳ—Ⅴ级的公路相对较长。

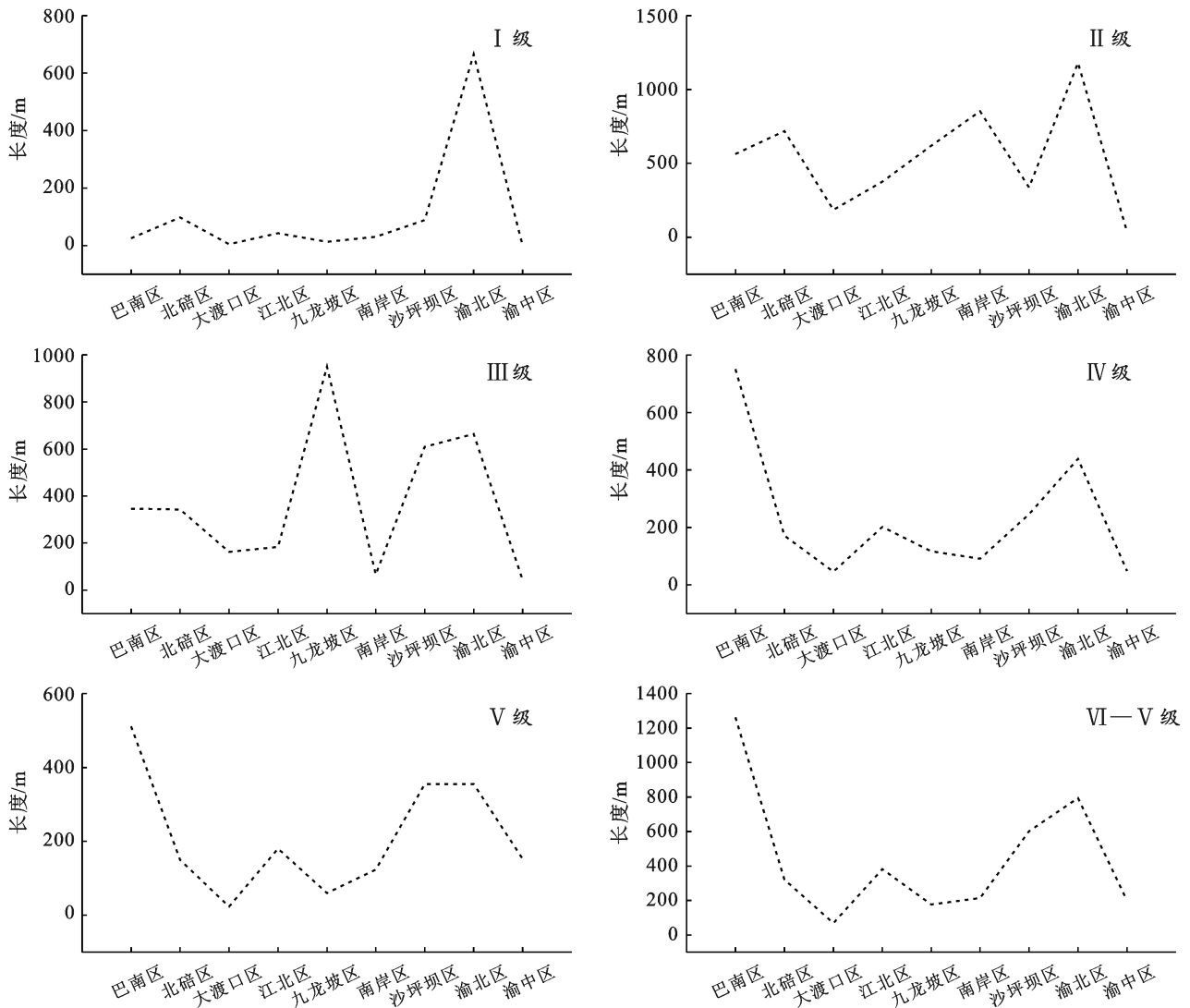


图 7 重庆市中心城区各区在各风险等级的公路长度分布

从各区高风险公路长度上看,巴南区、渝北区和沙坪坝区的高风险公路长度更长,应该重点关注其区域内风险为Ⅳ至Ⅴ级的公路,因地制宜地进行洪灾防控。

根据重庆市中心城区公路洪灾风险等级空间分布可视化结果可知,“两江四岸”及周边地区风险等级为Ⅳ—Ⅴ级的公路最为密集,各大流域、湖泊及水库附近风险等级为Ⅳ—Ⅴ级的公路次为密集,应作为公路洪灾防控的重点区域。

(1) “两江四岸”及周边地区风险等级为Ⅳ—Ⅴ级的公路最为密集。如渝中区内沙滨路、嘉陵江滨江路、长江滨江路和九滨路,江北区内洪滨路和北滨一路、南岸区内南滨路等均沿江而建,风险极高。由于多个流域汇集于两江,一旦各流域持续暴雨,导致两江洪水叠加,便会出现百年一遇大洪灾。如重庆市主

城区 2020 年 8 月遭遇的大洪水,引发“两江四岸”朝天门、磁器口、海棠烟雨公园等地大量临江道路被淹,首次启动防汛Ⅰ级应急响应,就是因为岷江、沱江、培江和渠江流域持续大暴雨,多个流域同时汇入长江、嘉陵江,导致嘉陵江 2 号洪水与长江 5 号洪水前后叠加,引发史无前例的大洪水。

(2) 各大流域、湖泊及水库附近风险等级为Ⅳ—Ⅴ级的公路次为密集。流域附近,如巴南区内花溪河流域和箭滩河流域、沙坪坝区内梁滩河流域、北碚区内梁滩河流域、竹溪河流域、江北区内栋梁河流域,渝北区的后河流域等。据报道,巴南区箭滩河两侧每年涨水均会被淹,沿河的窖坝街和下河路一度紧急封锁。湖泊及水库附近,如巴南区内内的松树桥水库、滩子口水库、林基水库、石桥水库,渝北区内东方红水

库、苟溪桥水库、下坝水库、北碚区的龙滩子水库,亦应作为公路洪灾防控的重点区域。

4 讨论与结论

4.1 结论

本研究将可拓云模型引入公路洪灾风险评价领域,对重庆市中心城区公路洪灾风险等级进行评价,解决了公路洪灾风险指标存在的模糊性和随机性问题以及公路洪灾风险评价指标由定性描述转化为定量表达的问题。

(1) 重庆市中心城区 69.62% 的公路洪灾风险处于 I—III 级(一般、比较低或非常低)水平,30.38% 的公路处于 IV—V (比较高或非常高)水平。从高风险公路比例看,渝中区(71.06%)、巴南区(57.43%)和江北区(38.76%)的高风险公路比例更高,应作为公路洪灾防控的重点区域,对全区公路进行总体防控。从各区高风险公路长度上看,巴南区(1 261.04 km)、渝北区(794.25 km)和沙坪坝区(600.94 km)的高风险公路长度更长,应该重点关注其区域内风险等级为 IV—V 级的公路,因地制宜进行洪灾防控。

(2) “两江四岸”及周边地区高风险公路最为密集,各大流域、湖泊及水库附近高风险公路次为密集。针对“两江四岸”及周边地区,一方面,应保障两江水上交通运行,启动跨江大桥运营健康监测系统,同时完善两江水上交通系统,建设轮渡、索道、缆车、户外电梯等特色交通;另一方面,应进一步完善路网体系,加快滨江、跨江轨道线路成环成网,增强“两江四岸”及周边地区轨道环线疏散能力,同时重点打通连接滨江与腹地的山城步道,增强滨江可达性与疏散性。针对各大流域、湖泊及水库附近,应重点推进防汛监测预报预警和水文服务站建设,编制超标洪水防御预案、防洪排涝应急预案等。

4.2 讨论

对于洪灾风险等级为 I—III 级的公路,宜采取非工程性措施,加强宣传对公路洪灾应急避险知识的宣传,保证日常维修、养护工作。对于洪灾风险等级为 IV—V 级的公路,在保证日常维修、养护工作的前提下,还宜适当采取工程性措施。如酌情加固公路、完善公路防护,达到灾前预防的目的。同时,规划避灾备用路线,制定切合实际的公路洪灾应急预案,达到科学避灾的目的。

本文所采用的公路洪灾风险评价指标的阈值界限仅使用了自然断点法进行划分,若结合多种阈值划分方法进行对比分析,评价结果或将更为客观准确。此外,本研究在对重庆市中心城区公路进行洪灾风险

分析时,未对各种公路类型进行全面考量,在今后的研究中应进一步探讨。

[参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅.2021 年重庆市第一次全国自然灾害综合风险普查新闻发布会[EB/OL](2021-06-17)[2021-11-09]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/gssxwfbh/xwfbh/chongqing/Document/1707705/1707705.htm>.
- [2] 李梦梅,巴南区公路洪灾风险多尺度综合评估研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.
- [3] 李梦梅,牟风云,林孝松,等.基于 GIS 的公路洪灾危险性空间模糊综合评价[J].中国安全科学学报,2018,28(11):149-155.
- [4] 唐红梅,廖学海,陈洪凯.基于因子分析法的公路洪灾模糊概率综合评价模型[J].中国安全科学学报,2015,25(2):141-146.
- [5] 陈林,牟风云,李梦梅.基于可拓云模型的区域生态安全预警模型及应用:以垫江县为例[J].科学技术与工程,2019,19(35):402-408.
- [6] 王治和,黄坤,张强.基于可拓云模型的区域生态安全预警模型及应用:以祁连山冰川与水源涵养生态功能区张掖段为例[J].安全与环境学报,2017,17(2):768-774.
- [7] 周子英,刘伏英.基于 PSR-可拓云模型的湖南省怀化市农业生态安全评价[J].水土保持通报,2021,41(2):267-274.
- [8] 薛昱,杜红艳.基于可拓云模型的区域水安全评价[J].科学决策,2020(12):73-98.
- [9] 张志君,陈伏龙,龙爱华,等.基于可拓云模型的干旱区水资源安全评价:以石河子垦区为例[J].干旱区研究,2020,37(4):847-856.
- [10] 陈娟娟.基于可拓云理论的施工安全综合评价及应用研究[D].湖北 武汉:武汉科技大学,2017.
- [11] 刘小溪.城市轨道交通项目施工安全评价研究[D].黑龙江 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [12] 贺思乐,靳春玲,祁英弟,等.基于 RS-可拓云模型的水工隧洞围岩安全评价[J].水电能源科学,2020,38(7):138-141.
- [13] 何乐平,罗舒月,胡启军,等.基于理想点—可拓云模型的隧道围岩稳定性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(2):126-134.
- [14] 李燕,靳春玲,贡力,等.基于熵理论—可拓云模型的引水隧洞塌方风险评价[J].长江科学院院报,2022,39(2):70-76.
- [15] 韩刚.基于可拓云模型的城市道路交通安全评价方法研究[D].湖北 武汉:华中科技大学,2018.
- [16] 谭泽斌.基于可拓云模型的隧道交通安全评价研究[D].湖北 武汉:华中科技大学,2019.
- [17] 史培军.三论灾害研究的理论与实践[J].自然灾害学报,2002,11(3):1-9.
- [18] 张会,李铖,程炯,等.基于“H-E-V”框架的城市洪涝风险评估研究进展[J].地理科学进展,2019,38(2):175-190.