

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2018.10.020

# 四川省雅安市公路洪灾风险评估研究<sup>①</sup>

唐红梅<sup>1</sup>, 廖学海<sup>1,2</sup>, 杨刚<sup>3</sup>, 林尤跃<sup>2</sup>, 刘虎队<sup>2</sup>

1. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074;
2. 重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队, 重庆 401121;
3. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002

**摘要:** 为评价公路洪灾的风险性, 以雅安市为研究对象, 基于公路洪灾致灾机理、破坏形态, 综合考虑致灾因子、孕灾环境、承灾体和灾情因子四方面因素, 遴选出公路造价等 11 个指标构建公路洪灾风险评估指标体系, 利用层次分析法、模糊概率理论建立公路洪灾风险评估模型, 对雅安市公路洪灾风险进行区划, 区划结果表明: 雅安市公路洪灾风险性被分为高中风险亚区、中高风险亚区和中低风险亚区、低风险区四档三级, 经济发达的雨城区的公路洪灾风险性较高, 名山及西南部区县次之, 宝兴、芦山的公路洪灾风险性较小; 分区结果与近三年公路洪灾损失结果相符, 评价结果有一定的科学性和参考价值。

**关键词:** 道路工程; 公路洪灾; 风险评估; 层次分析法; 模糊概率

**中图分类号:** X43

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2018)10-0120-07

近年来四川经历了多次大范围、强降雨的极端降雨天气, 导致山洪及次生灾害的发生, 对地区社会经济尤其是对公路设施和交通运输安全造成了严重的影响, 公路洪灾已成为影响公路交通完好、畅通最主要的灾害, 给社会造成极大的经济损失<sup>[1]</sup>。目前, 对公路洪灾造成经济损失的风险评估工作不足<sup>[2-3]</sup>, 大量研究工作还主要停留在公路洪灾致灾机理<sup>[4-5]</sup>、孕灾环境<sup>[6]</sup>和危险性分析<sup>[7]</sup>等方面, 因此, 有必要开展公路洪灾的风险管理工作, 为公路的防灾减灾工作提供参考, 将公路洪灾风险最小化。

从系统的角度来看, 洪灾风险由洪灾危险性、洪灾易损性和洪水灾害灾情共同构成<sup>[8]</sup>。风险评估指标具有多样性, 不同的学者针对研究对象选择了相应的评价指标对公路洪灾风险性的安全等级进行了评价分区, 但风险评估主要从致灾因子、孕灾环境、承灾体和灾情因子 4 个方面加以考虑, 如曾蓉<sup>[1]</sup>、林孝松<sup>[9]</sup>等针对公路洪灾风险的复杂性、模糊性及不确定性特征, 遴选了地貌条件、暴雨强度等公路洪灾风险评估指标; 李帅杰等<sup>[10]</sup>则从洪水灾害风险的原理和区域防灾力等要素出发, 遴选经济、洪水等指标进行洪灾风险等级划分; 而刘家福等<sup>[11]</sup>基于洪灾风险基本原理, 考虑了土地利用、植被等主要指标, 利用定性及定量综合分析方法对亚洲洪灾风险进行综合评价。除评价指标不统一外, 评价方法也有多种模型, 如牛全福<sup>[12]</sup>基于 GIS 技术对地质灾害风险评估方法进行了研究; 段生荣<sup>[13]</sup>在大量山洪灾害调查的基础上, 采用实测雨量分析法、降雨灾害频率分析法和产汇流分析法对比进行山洪灾害临界雨量的确定, 根据典型流域洪水计算成果, 确定划分典型流域的风险区。

① 收稿日期: 2015-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071017); 四川省交通厅科技项目(glkj201227); 2013 年重庆高校创新团队建设计划资助项目(KJTD201305)。

作者简介: 唐红梅(1968-), 女, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事地质灾害减灾理论与减灾技术研究。

综上所述,风险评估工作具有较强的专业性、指标选取具有多样性、评价方法也具有可变性等特征,前人大量的研究为公路洪灾的研究奠定了基础.公路洪灾对四川省社会经济造成严重的影响,雅安是全川多雨中心,其遭受的公路洪灾损失情况尤为突出.据四川省交通运输厅公路局资料统计,仅 2012—2014 年雅安市共遭受 60 余次公路洪灾,不仅对当地交通运输造成了严重影响,同时也造成当地巨额的经济损失.因此,以四川省雅安市公路洪灾为研究对象,依据公路洪灾致灾机理、破坏形态等方面分析,遴选出路面拔河高度等 11 个评价指标,并获取各指标数据按既定标准分级赋值构成评价指标体系,然后运用模糊概率综合评价模型对雅安市公路洪灾风险进行区划.该研究工作对雅安等四川地区的公路洪灾风险评估及灾害管理工作具有借鉴意义.

## 1 研究区概况

雅安市位于四川盆地西缘,青衣江上游,是青藏高原向成都平原的过渡地带.雅安市幅员面积  $1.53 \times 10^5 \text{ km}^2$ .全市地形呈北、西、南地势高而东部和中部地势较低的地理格局.市域境内以山地为主,其中西南、西北部的极高山和高山占全市面积的 21% 左右,中、低山地约为总面积的 73%,丘陵、平坝占总面积的 6%,主要集中于河谷两侧.境内最高海拔达 5 793 m,与最低处相对高差达 5 166 m.雅安属内陆亚热带季风性湿润气候,区内雨量充沛,多年年均降雨量南北差异显著,北部多在 1 000~1 800 mm 之间,南部仅 800 mm 左右.降雨最多的是雨城区、天全一带,最多可达 2 000 mm 左右,为全川多雨中心,素有“雨城”“雅安天漏”之称.全市植被条件好,森林覆盖率达 50.79%.雅安市经济发达、交通便捷,2013 年实现地区生产总值(GDP)417.97 亿元,公路总里程达到 6 980 km,路网密度达到  $0.456 \text{ km/km}^2$ .境内构造地貌发育充分,地质构造运动强烈,断裂带纵横交错,曾于 2013 年发生 7.0 级地震,对境内公路设施等造成严重的破坏.诸多因素的影响,使得公路洪灾成为了一个不可忽视的灾害类型,对当地经济建设的发展带来了颇为严重的影响.

## 2 评价指标及数据来源

### 2.1 遴选风险性评价指标

公路洪灾风险评估是洪灾危险性与承灾体易损性对抗耦合对抗的综合表现.公路洪灾的发生是众多自然因素耦合作用的结果,在已有公路洪灾评价文献中对评价指标没有统一限定,不同研究者均因地制宜地选取典型指标对公路洪灾风险性进行评价.但在风险评估工作中,应包括孕灾环境、致灾因子、承灾体因子和灾情因子四方面内容.地形条件、地质地貌特征及气候状况是导致公路洪灾的 3 个主要因素<sup>[14]</sup>.根据公路洪灾致灾机理<sup>[4-5]</sup>和相关文献<sup>[1, 5-14]</sup>,在遵循系统性、灵活性、针对性、实用性和综合性指标选取原则的基础上,从孕灾环境、致灾因子、承灾体因子和灾情因子 4 个方面考虑,遴选出地貌条件( $u_1$ )、地质条件( $u_2$ )、植被覆盖度( $u_3$ )、年均降雨量( $u_4$ )、暴雨强度( $u_5$ )、潜在公路洪灾里程( $u_6$ )、路网密度( $u_7$ )、路面拔河高度( $u_8$ )、等级公路比率( $u_9$ )、GDP 总值( $u_{10}$ )和公路造价( $u_{11}$ )共 11 个指标构成公路洪灾评价指标体系(表 1).其中,指标体系参考评价模型分为极高、高、中和低 4 个风险等级,各等级阈值依据致灾机理、相关文献和专家意见及评价模型等综合确定.

### 2.2 数据来源

本文各指标数据来源:(1)依据《中国地貌图制图规范》将地貌分为平原/高原、丘陵、中山、高山/极高山 4 种类型;(2)地质条件是一个多元指标,主要包含地质构造、地层岩性、水文地质条件等因素,通过 GIS 技术采集地质条件因素信息后叠加,根据叠加情况赋予地质条件好、中、差、极差 4 个等级.如断裂构造、节理发育的岩层受挤压或因节理(裂隙)切割而形成破碎地带,岩土体松散,在致灾指标作用下极易引发灾害,潜在公路洪灾的可能性最大.相反,岩层水平、岩体完整性好的地区,在相同致灾指标作用下孕灾因素弱,界定为低易发区等级.(3)植被覆盖度信息通过林业局、区县《林业志》及土地利用情况获取;(4)年均降雨量和暴雨强度通过气象局资料获取;(5)根据研究区的交通地图和地貌、水系图等,结合公路洪

灾发生比例(国道、省道、县道发生的比例为 1:7:12)和研究区公路里程, 计算潜在的公路洪灾里程; (6) 路网密度、等级公路比率和公路造价通过《2013 年四川交通统计年鉴》等资料获取; (7) 借助 GIS 技术, 将河流水系进行 200m 缓冲, 将缓冲区与沿河公路叠加, 获取沿河公路路面拔河高度信息; (8) 通过《2013 年四川经济年鉴》查询 GDP 总值数据。

按照上述办法获取 11 个公路洪灾风险评估指标原始数据, 依据表 1 中的公路洪灾风险性评价指标分级赋值标准, 按公式(1)对指标进行量化赋值。

$$u_i = a_{\text{低}} + \frac{(x - b_{\text{低}})(a_{\text{高}} - a_{\text{低}})}{b_{\text{高}} - b_{\text{低}}} \quad (1)$$

式中,  $u_i$  为指标的量化赋值;  $a_{\text{低}}$  为各指标区间的下限赋值;  $a_{\text{高}}$  为各指标区间的上限赋值;  $x$  为指标的原始数据;  $b_{\text{低}}$  为各指标区间的下限值;  $b_{\text{高}}$  为各指标区间的上限值, 11 个指标分级赋值后的数值如表 1 中  $u_1 \sim u_{11}$  所示。

表 1 公路洪灾危险性综合评价指标体系分级标准

一级指标	二级指标	分级赋值	低危险区	中危险区	高危险区	极度危险区
			( $a_{i1}$ )	( $a_{i2}$ )	( $a_{i3}$ )	( $a_{i4}$ )
孕灾环境评价指标	地貌条件: $u_1$	分级	平原/高原	丘陵	中山	高山/极高山
		赋值	[0, 30)	[30, 60)	[60, 80)	[80, 100]
	地质条件: $u_2$	分级	好	中	差	极差
		赋值	[0, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]
	植被覆盖度: $u_3/\%$	分级	>30	[30, 20)	[20, 10)	$\leq 10$
		赋值	[0, 30)	[30, 60)	[60, 80)	[80, 100]
	年均降雨量: $u_4/\text{mm}$	分级	<800	[800, 1 000)	[1 000, 1 200)	$\geq 1200$
赋值		[0, 40)	[40, 50)	[50, 60)	[60, 100]	
暴雨强度: $u_5/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	分级	<0.5	[0.5, 1)	[1, 1.5)	$\geq 1.5$	
	赋值	[0, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]	
潜在洪灾公路里程: $u_6/\text{km}$	分级	<50	[50, 150)	[150, 300)	$\geq 300$	
	赋值	[0, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]	
致灾因子、承灾体指标	路网密度: $u_7(\sum \text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	分级	<0.2	[0.2, 0.8)	[0.8, 1.4)	$\geq 1.4$
		赋值	[0, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]
	路面拔河高度: $u_8/\text{m}$	分级	$\geq 50$	[30, 50]	[10, 30]	<10
		赋值	[0, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]
	等级公路比率: $u_9/\%$	分级	<15	[15, 30)	[30, 45)	$\geq 45$
		赋值	[0, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]
	灾情因子	GDP 总值: $u_{10}/\text{亿元}$	分级	<40	[40, 100)	[100, 200)
赋值			[0, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]
公路造价: $u_{11}/(\text{万元} \cdot \text{km}^{-1})$		分级	<80	[80, 160)	[160, 240)	$\geq 240$
赋值	[0, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]		

### 3 评价技术与方法

模糊概率综合评价模型是以层析分析法<sup>[15-18]</sup>和模糊概率<sup>[1,6,19-20]</sup>为基础, 分析具有模糊、复杂等特性的公路洪灾风险评估目标的众多影响因素, 通过两两比较判断等确定指标权重, 结合模糊概率评价模型对公路洪灾风险性进行评价。

#### 3.1 层次分析法确定指标权重

在多指标综合评价中, 指标权重分配不同会直接导致评价对象优劣顺序的改变, 但权重值的合理性、

准确性直接影响评价结果的可靠性. 层次分析法<sup>[7]</sup>能较好地处理无法定量而又不可回避的决策因素, 它综合考虑了评价指标体系中各层因素的重要程度而使各指标权重趋于合理. 因此, 采用层次分析法确定公路洪灾评价指标权重具有合理性和可行性. 公路洪灾影响因素众多, 将上述选取的 11 个评价指标, 根据各自对公路洪灾的影响程度, 采用九标度打分法进行两两比较以构建判断矩阵. 其中, 通过研究发现, 11 个指标对公路洪灾风险性的重要性程度排序依次为: GDP 总值、公路造价、路面拔河高度、等级公路比率、路网密度、暴雨强度、潜在洪灾公路里程、年均降雨量、地貌条件、地质条件、植被覆盖度. 经层次分析法及专家校核后的公路洪灾风险评估指标权重系数( $w_i$ )如表 2 所示.

表 2 公路洪灾风险评估指标权重系数

一级指标	孕灾环境评价指标(0.063 2)					致灾因子、承灾体指标(0.244 6)			灾情因子(0.692 2)		
二级指标	$u_1$	$u_2$	$u_3/$	$u_4/$	$u_5/$	$u_6/$	$u_7/$	$u_8/$	$u_9/$	$u_{10}/$	$u_{11}/$
权重/ $w_i$	0.009 2	0.006 1	0.004 6	0.011 1	0.001 84	0.013 8	0.042 2	0.126 5	0.075 9	0.461 4	0.230 8
			%	mm	(mm·min <sup>-1</sup> )	km	( $\sum$ km·km <sup>-2</sup> )	m	%	亿元	(万元·km <sup>-1</sup> )

### 3.2 模糊综合评价模型

公路洪灾风险评估的模糊矩阵集合  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{11}\}$  和指标权重系数  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_{11}\}$  (表 2) 已经确定, 根据公路洪灾情况, 运用模糊概率统计法选取公式(2)–(4)的梯形与半梯形隶属函数:

$$A_1(u_i) = \begin{cases} 1 & u_i \leq a_{i1} \\ \frac{1.6a_{i1} - u_i}{1.6a_{i1} - a_{i1}} & a_{i1} < u_i \leq 1.6a_{i1} \\ 0 & u_i > 1.6a_{i1} \end{cases} \quad (2)$$

$$A_k(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \leq 0.4a_{i,k-1} \\ \frac{u_i - 0.4a_{i,k-1}}{a_{i,k-1} - 0.4a_{i,k-1}} & 0.4a_{i,k-1} < u_i \leq a_{i,k-1} \\ 1 & a_{i,k-1} < u_i \leq a_{ik} \\ \frac{1.6a_{ik} - u_i}{1.6a_{ik} - a_{ik}} & a_{ik} < u_i \leq 1.6a_{ik} \\ 0 & u_i > 1.6a_{ik} \end{cases} \quad (3)$$

$$A_4(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \leq 0.4a_{i4} \\ \frac{u_i - 0.4a_{i4}}{a_{i4} - 0.4a_{i4}} & 0.4a_{i4} < u_i \leq a_{i4} \\ 1 & u_i > a_{i4} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $a_{ik}$  ( $i=1, 2, \dots, 11; k=2, 3$ ) 为指标的等级划分标准值, 具体取值可由表 1 获取.

依据模糊事件的概率公式(5)求出各危险等级的模糊概率  $P(A_j)$ :

$$P(A_j) = A_j(u_1)\pi_1 + A_j(u_2)\pi_2 + \dots + A_j(u_n)\pi_n \quad (5)$$

由信息集中原则, 求取危险性的评价结果:

$$\bar{\sigma}_j = \frac{P(A_j)}{\sum_{j=1}^4 P(A_j)} \quad (6)$$

以  $\bar{\sigma}_j$  最大值对应的  $J$  确定危险性等级, 为分级更加精细, 参照  $\bar{\sigma}_j$  与相邻  $\bar{\sigma}_{j\pm 1}$  的距离大小进一步确定亚类. 即: 以  $\bar{\sigma}_j$  最大值对应等级  $J$  为参考, 当  $\bar{\sigma}_j$  接近于  $\bar{\sigma}_{j-1}$  时, 确定为较安全亚类; 当  $\bar{\sigma}_j$  接近于  $\bar{\sigma}_{j+1}$  时, 确定为较危险亚类; 若有  $\bar{\sigma}_{j-1}$  与  $\bar{\sigma}_{j+1}$  相同时, 根据就高原则确定为较危险档亚类.



## 4 雅安市公路洪灾风险区划与分析

根据公路洪灾风险评估指标获取方法,结合雅安当地公路洪灾条件及历史灾情,获取各评价指标原始数据,并根据表 1 分级赋值标准量化以获取公路洪灾风险评估数据,在此基础上结合层次分析法确定的权重系数和模糊概率综合评价模型,经过计算、归一化处理后的雅安市各县的信息集中值 $\bar{\sigma}_j$  ( $j=1, 2, \dots, 4$ )和风险性等级结果如表 3 及图 1 所示. 其中亚类的确定,如雨城区最大 $\bar{\sigma}_j$  值为 $\bar{\sigma}_3=0.39$ , 即雨城区为高风险区;  $\bar{\sigma}_2=0.30$ , 说明中风险等级占有较高比重而不应忽视. 为更详细具体地对风险性分区, 将雨城区的风险等级确定为高风险等级偏向于中风险等级, 简称高中风险亚区.

表 3 雅安市公路洪灾风险评估指标分值及评价结果

区县名	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$u_8$	$u_9$	$u_{10}$	$u_{11}$	$\bar{\sigma}_1$	$\bar{\sigma}_2$	$\bar{\sigma}_3$	$\bar{\sigma}_4$	评价结果 $J$	亚区
雨城区	58.0	40.6	35.5	60.2	83.6	42.7	59.6	62.4	68.1	63.8	84.9	0.02	0.30	0.39	0.29	高风险区	高中风险亚区
名山县	50.0	43.0	48.6	75.0	86.5	43.5	39.8	67.7	70.9	43.6	83.3	0.18	0.31	0.29	0.22	中风险区	中高风险亚区
荥经县	74.0	37.5	28.4	50.0	81.7	52.8	76.7	52.6	24.4	43.4	91.8	0.24	0.30	0.26	0.20	中风险区	中高风险亚区
汉源县	62.0	51.4	58.6	37.1	80.4	68.0	73.9	54.0	31.2	45.9	83.8	0.20	0.32	0.29	0.20	中风险区	中高风险亚区
石棉县	74.0	60.5	20.7	38.9	51.6	50.4	75.0	44.9	53.4	46.2	86.1	0.20	0.32	0.28	0.20	中风险区	中高风险亚区
天全县	70.0	61.6	35.6	83.0	52.0	54.8	68.7	47.6	69.7	38.9	32.5	0.33	0.36	0.21	0.10	中风险区	中低风险亚区
芦山县	72.0	72.4	58.3	65.7	60.9	46.4	75.3	45.3	57.2	25.6	22.5	0.47	0.30	0.15	0.09	低风险区	低风险区
宝兴县	76.0	59.0	9.4	49.7	50.0	50.8	77.0	45.2	66.0	20.5	31.5	0.46	0.28	0.16	0.09	低风险区	低风险区

从表 3 可知,雅安市公路洪灾风险性包括高、中、低 3 个风险等级,以中风险等级为主,有 5 个行政单位,包括中高风险亚区的名山、荥经、汉源、石棉和中低风险亚区的天全县,占总面积的 65.04%. 高风险区的雨城区和低风险区的芦山、宝兴县分别占总面积的 6.99% 和 27.97%.

从研究区公路洪灾风险分区图(图 1)来看,高、中风险区分布于雅安大部地区,其中高风险区位于经济最发达的雨城区;低风险区则分布在雅安北部地区的宝兴县和芦山县. 值得说明的是,鉴于公路洪灾定义限定,本文未将“4·20”地震引发的公路灾害纳入研究,而是只限于降雨作用引起的公路灾害情况. 根据四川省交通运输厅公路局路况统计信息资料,获取的雅安历史上的公路灾害情况来看(表 4),除芦山县、雨城区和名山县发生公路

洪灾频次较小外,其余区县的公路洪灾频次较高. 但是由于公路洪灾风险评估考虑的是洪灾与灾情因子的耦合情况. 从表 4 中可知,低风险区的芦山县和宝兴县遭受公路洪灾后的一次经济损失小;相反,雨城区、汉源县等遭受公路洪灾后经济损失较为严重,这与当地经济发展和交通运输量相关. 风险分区结果与实际的公路洪灾发生情况吻合较好,进而说明本文的评价模型正确合理,对相近地区的公路洪灾风险评估具有一定的借鉴意义.

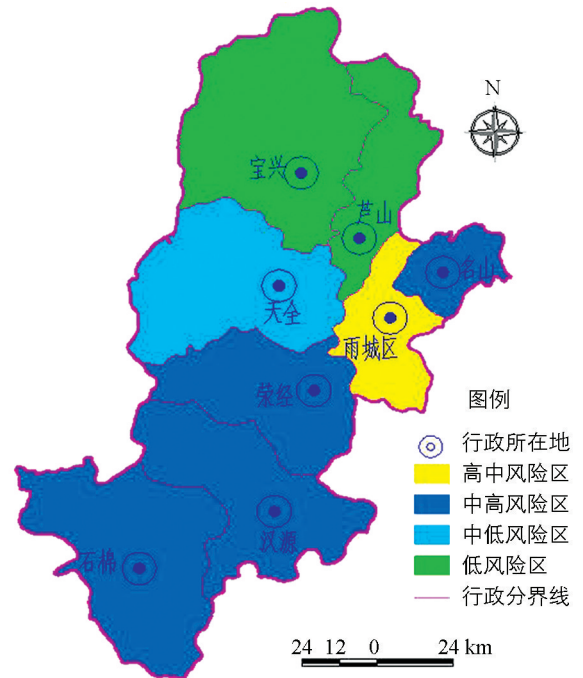


图 1 雅安市公路洪灾风险分区图

表 4 2012—2014 年雅安市公路洪灾统计

区县名	公路洪灾 频次/次	一次经济 损失/万元	一次交通中 断时间/h	区县名	公路洪灾 频次/次	一次经济 损失/万元	一次交通中 断时间/h
雨城区	6	8 900	52	石棉县	10	2 690	41
名山县	4	2 715	43	天全县	10	1 750	32
荥经县	11	4 500	40	芦山县	4	860	24
汉源县	9	5 200	37	宝兴县	8	930	35

## 5 结 论

本文以雅安市公路洪灾为研究对象,参照公路洪灾破坏形态、致灾机理和指标遴选标准,从孕灾环境、致灾因子、承灾体和灾情因子四方面遴选出地貌条件等 11 个指标,通过 ArcGIS 等方法获取指标数据,分级赋值后对雅安市的公路洪灾风险性以区县为单位进行划分,根据指标对公路洪灾的重要性程度排序,采用层次分析法确定评价指标的权重系数,运用模糊概率综合评价模型对雅安市的公路洪灾风险进行评估。结果表明:雅安市公路洪灾风险性被分为高中风险亚区、中高风险亚区和中低风险亚区、低风险区四档三级。经济发达的雨城区的公路洪灾风险性较高,名山及西南部区县次之,而宝兴等经济欠发达地区的公路洪灾频次虽然较高,但风险性较小;评价分区结果与近 3 年的公路洪灾统计分布结果相符,进而说明该综合评价模型实用合理,评价结果有一定的科学性和参考价值,可作为该区公路管理部门防治公路洪灾的理论参考依据。

## 参考文献:

- [1] 曾 蓉,陈洪凯,李俊业. 熵权模糊综合评价法在公路洪灾危险性评价中的应用 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(4): 587—591.
- [2] CAI H, RASDORF W, TILLEY C. Approach to Determine Extent and Depth of Highway Flooding [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2007, 13(2): 157—167.
- [3] XIA J Q, FALCONER R A, LIN B L, et al. Numerical Assessment of Flood Hazard Risk to People and Vehicales in Flash Floods [J]. Environmental Modelling, 2011, 26(8): 987—998.
- [4] 陈远川,陈洪凯. 山区沿河公路路基洪水毁损过程及机理研究 [J]. 公路, 2012, 11: 95—103.
- [5] MOHAMMADKHAN S, AHMADI H, JAFARI M. Relationship Between Soil Erosion, Slop, Parent Material, and Distance to Road (Case Study: Latian Watershed, Iran) [J]. Arab J Geosci, 2012, 4(1—2): 311—338.
- [6] 唐红梅,廖学海,陈洪凯. 基于模糊概率的阿坝州公路洪灾孕灾环境分区 [J]. 灾害学, 2014, 29(4): 52—56.
- [7] APEL H, THIEKEN A H, MERZ B, et al. Flood Risk Assessment and Associated Uncertainty [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004, 4(2): 295—308.
- [8] 黄大鹏,刘 闯,彭顺风. 洪灾风险评估与区划研究进展 [J]. 地理科学进展, 2007, 26(4): 11—21.
- [9] 林孝松,陈洪凯,王先进,等. 西南地区公路洪灾孕灾环境分区 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(2): 251—256.
- [10] 李帅杰,李昌志,程晓陶. 区域洪灾风险评估方法初探—以浙江省为例 [J]. 水利水电技术, 2012, 43(3): 82—87.
- [11] 刘家福,李 京,梁雨华,等. 亚洲典型区域暴雨洪灾风险评估研究 [J]. 地理科学, 2011, 31(10): 1266—1271.
- [12] 牛全福. 基于 GIS 的地质灾害风险评估方法研究—以“4. 14”玉树地震为例 [D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [13] 段生荣. 典型小流域山洪灾害临界雨量计算分析 [J]. 水利规划与设计, 2009(2): 20—22.
- [14] 覃庆梅,林孝松,唐红梅,等. 重庆市万州区公路洪灾孕灾环境分区 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(1): 89—94.
- [15] SINHA R, BAPALU G V, SINGH L K, et al. Flood Risk Analysis in the Kosi River Basin, North Bihar Using Multi-Parametric Approach of Analytical Hierarchy Process(AHP) [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2008,

36(4): 335-349.

- [16] 马国荣, 杨申琳. 基于物元分析的 AHP 确定指标权重系数方法 [J]. 长安大学学报, 2003, 23(5): 117-119.
- [17] 卿清涛, 徐金霞, 马振峰, 等. 四川盆地区雾霾灾害风险区划初探 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(9): 145-152.
- [18] 汪国懋. 基于层次分析法的水利 PPP 项目风险评价 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2016, 30(9): 156-160.
- [19] 李存斌, 张 益. 基于三角模糊数的电力企业科研风险模糊综合评判 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2017, 31(1): 143-151.
- [20] 刘章军, 叶燎原, 彭 刚. 砂土地震液化的模糊概率模型 [J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 876-880.

## Risk Assessment of Road Flood in Ya'an City, Sichuan Province

TANG Hong-mei<sup>1</sup>, LIAO Xue-hai<sup>1,2</sup>, YANG Gang<sup>3</sup>,  
LIN You-yue<sup>2</sup>, LIU Hu-dui<sup>2</sup>

1. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Nanjiang Hydro-Geological & Engineering Geology Brigade, Chongqing 401121, China;

3. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China

**Abstract:** Road floods have happened frequently in the past few years and caused great losses in the economy of Sichuan province. To assess the risk of road floods, a study was made with Ya'an as the study area. Based on failure mechanisms and forms of road floods, and taking into consideration flood-causing factors, flood-developing environment, hazard-affected bodies and flooding factors, an index system of risk assessment for road flooding was constructed, which consisted of 11 relevant and pertinent indicators. Using the AHP-entropy method and the theory of fuzzy probability, a risk assessment model was built and a map of risk of road floods in Ya'an city was drawn. The results of road flood hazard zoning divided Ya'an into a high-medium-risk area, a medium-high-risk area, a medium-low-risk area and a low-risk area. Of the four areas, Yucheng district, the central urban area of Ya'an with a well developed economy, was shown to have the highest road flood risk, followed in sequence by Mingshan, Baoxing and Lushan. These results were consistent with the actual losses of road floods in the past 3 years.

**Key words:** road engineering; road flood; risk assessment; AHP; fuzzy probability

责任编辑 汤振金