

极端降雨诱发滑坡灾害危险性模糊综合评判

刘东燕¹, 薛凯喜^{1,2}, 李东升¹, 赵宝云¹, 胡艳香²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 东华理工大学 建筑工程学院, 南昌 330030)

摘要:将改进的层次分析法和模糊综合评判方法相结合, 深入分析影响公路滑坡灾害危险性的影响因素, 建立了综合评判指标体系并划分危险性等级。评价过程中首先确定了不同降雨情况下指标体系的动态权重系统, 然后应用“梯形”隶属函数公式和专家经验赋值法分别测算连续型和离散型指标的隶属度, 最终通过所构建的 3 级模糊综合评判模型进行了实例研究。研究表明, 该方法用于极端降雨诱发公路滑坡灾害危险性评价具有适用性和合理性, 结果可靠。

关键字:极端降雨; 滑坡; 危险性评价; 层次分析法; 模糊综合评判

中图分类号: TU457 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2011)04-0093-07

Fuzzy Comprehensive Evaluation on Landslides Risk Assessment Induced by Extreme Rainfall

LIU Dong-yan¹, XUE Kai-xi^{1,2}, LI Dong-sheng¹, ZHAO Bao-yun¹, HU Yan-xiang²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. School of Architectural Engineering, East China Institute of Technology, Nanchang 330030, P. R. China)

Abstract: The hazard assessment of the highway landslide induced by the extreme rainfall is a complicated systemetic issue. By combining the modified analytic hierarchy process and the fuzzy comprehensive evaluation, all the factors that influence the highway landslide are analyzed. And the comprehensive evaluation index system as well as the danger rating is established. In the process of evaluation, different rainfall's dynamic weighting system is fixed, and then the membership of continuous and discrete index are calculated respectively by using the trapezoid membership function formula and expertise assignment, and finally case study is carried out. It is shown that this method is suitable and rational to evaluate the highway landslide induced by extreme rainfall.

Key words: extreme rainfall; landslides; risk assessment; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation

由降雨诱发的公路滑坡灾害具有群发性、同时性、爆发性和成灾大等特点, 中国每年汛期都会发生大量的公路滑坡, 给公路交通和社会经济发展带来了严重影响。大量的研究表明^[1-4], 降雨是滑坡灾害的主要致灾因子, 而在长时间暴雨或大暴雨等极端情况下滑坡灾害的发生机率更会陡然增大。长期以来, 学者对各类滑坡的预报预警较为关注, 而对其危险性的评价进展缓慢。因此, 在中国进一步完善地

质灾害群防群测体系的过程中, 对极端降雨诱发公路滑坡灾害的危险性进行研究, 探索形成一套科学、完整、实用的危险性评价方法, 具有十分重要的学术和工程应用价值。

极端降雨诱发公路滑坡灾害的危险性评价是一项复杂的系统工程。近年来, 众多专家学者涉足该领域的研究, 如文献[5]中运用稳定性计算原理对重庆市醴糟坪滑坡群进行了危险性评价; 文献[6-7]等

收稿日期: 2010-12-26

基金项目: 西部交通建设科技项目(2009318000001)

作者简介: 刘东燕(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程、防灾减灾工程学研究, (E-mail) xkx1257@qq.com。

利用 GIS 平台,将多元空间信息统计分析方法与非线性统计预测方法相结合,并建立单因子分析、多因子分析、整组性分析和多元空间信息的非线性预测模型,并把其应用于滑坡危险性区划中;另外还有一些学者将概率与统计模型^[8-9]、经验模型^[10]等运用于该领域解决问题。上述学者的研究成果在很大程度上为滑坡灾害危险性评价建立了研究基础。对于单体公路滑坡而言,影响其危险性的因素繁多,诸因素对其危险性的影响具有模糊性、层次性和影响程度的差异性^[11-12],且作为诱发因子的降雨因素具有动态性,理想的危险性评价方法须反映这些特点。由于模糊数学是研究和处理模糊性现象的一种数学理论和方法^[13],因此,基于模糊综合评判的非确定性分析方法用于滑坡灾害的危险性评价在理论上是可行的。

该文将层次分析法和模糊综合评判方法相结合,提出极端降雨诱发滑坡灾害危险性的模糊综合评判方法,在深入分析各种影响因素的基础上,建立

了模糊综合评判指标体系、划分了危险性等级并给出 3 级模糊综合评判模型。最后,利用改进的层次分析法确定了 6 种极端降雨条件下的权重系统,并通过对 5 h 暴雨工况下童家湾滑坡灾害危险性的综合评判验证了该方法的可靠性。

1 综合评判指标体系与危险性等级划分

应用模糊综合评判的方法对地质灾害危险性进行评价,建立具有层次性的评价指标体系是最为关键的工作之一^[14-16]。然而,影响滑坡灾害危险性的因素繁多,指标体系的构建是一个复杂的系统工程。该文在大量的野外地质调查和试验研究的基础上,深入分析现有的灾害危险性评判方法,采用理论分析法和主成分分析法并联系工程实际来提炼指标,最后通过专家咨询法确定了 22 个最终指标,并建立了极端降雨诱发公路滑坡灾害危险性评价指标体系(图 1)。

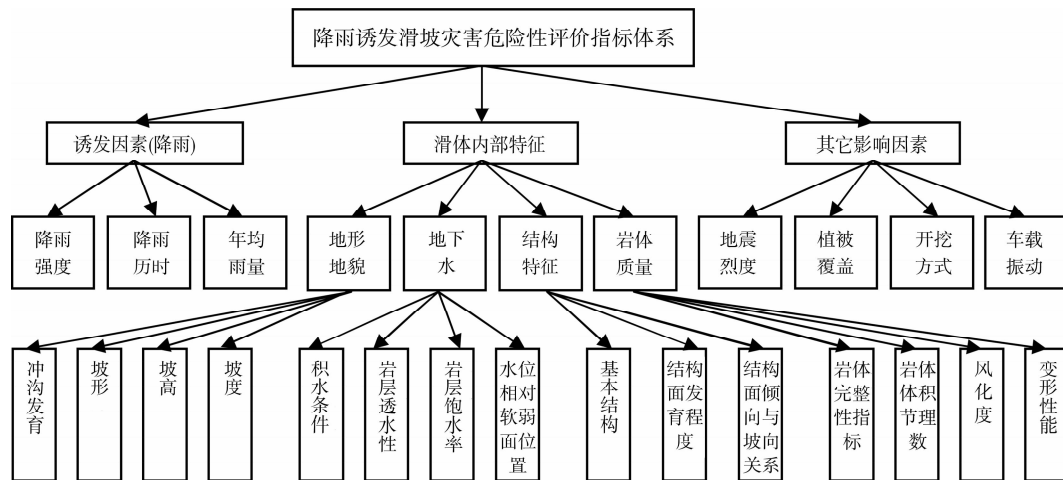


图 1 评价指标体系

对各评价指标进行量化分级是评判过程中隶属度测算的基础性工作,该文所依托的西部交通建设科技项目研究了重庆市国省干线公路沿线 287 个滑坡的基本特征,并收集了详尽的数据资料,通过对记

录参数的统计分析,同时参考文献^[5、10、14、16],确定了评价指标体系中各指标危险性指标的界限值(表 1)。

表 1 降雨诱发公路岩质滑坡危险性模糊综合评价指标体系及分级

指标体系			危险性等级				
I	II	III	极高度	高度	中度	轻度	极轻度
		$A_{11}/(\text{mm} \cdot (24\text{h})^{-1})$	大暴雨(100~250)	暴雨(50.0~99.9)	大雨(25.0~49.9)	中雨(10~24.9)	小雨(0~9.9)
A	A_1	A_{12}/h	≥ 8	5~8	2~5	1~2	< 1
		A_{13}/mm	800	≥ 800	≥ 800	400~800	< 400

续表 1

指标体系			危险性等级				
I	II	III	极高度	高度	中度	轻度	极轻度
B	B ₁	B ₁₁ /%	≥80	50~80	30~50	10~30	<10
		B ₁₂	凸形	凹形	平直	s型	阶梯型
		B ₁₃ /m	≥70	50~70	30~50	10~30	<10
		B ₁₄ (°)	≥60	50~60	30~50	10~30	<10
	B ₂	B ₂₁	好	较好	一般	差	很差
		B ₂₂ (m·d ⁻¹)	≥50	30~50	20~30	10~20	<10
		B ₂₃ /%	≥80	60~80	40~60	20~40	<20
		B ₂₄	水位高于软弱面或软弱层,坡体存在上层滞水	水位与软弱面或软弱层一致,坡体存在上层滞水	水位略低于软弱面或软弱层一致,坡体局部存在上层滞水	水位低于软弱面或软弱层,坡体不存在上层滞水	水位明显低于软弱面或软弱层,坡体不存在上层滞水
	B ₃	B ₃₁	松散体结构	破碎结构	层状结构	块状结构	匀质结构
		B ₃₂	强发育(≥80)	发育(50~80)	较发育(30~50)	较不发育(10~20)	不发育(<10)
		B ₃₃	顺向破	斜交坡	平叠坡	逆向坡	
	B ₄	B ₄₁	≤0.25	0.25~0.45	0.45~0.65	0.65~0.85	≤0.85
		B ₄₂ /条	≥35	25~35	15~25	5~10	<5
		B ₄₃	全风化	强风化	弱风化	微风化	未风化
B ₄₄		极软岩	软岩	较软岩	阮坚硬岩	坚硬岩	
C	C ₁	≥IX	VIII~IX	VII~VIII	VI~VII	<VI	
	C ₂	好	良	一般	差	裸露	
	C ₃	强度爆破	中强爆破	弱强度爆破	机械开挖	人工开挖	
	C ₄	沿高速公路、日均车流量≥10 000 台	沿国道、日均车流量≥6 000 台	沿省道、日均车流量≥3 000 台	沿县道、日均车流量≥1 000 台	沿乡道、日均车流量<1 000 台	

注:字母 A、B、C 分别代表第 I 层指标 3 类要素, A_i 代表第 II 层指标中属于 A 要素的第 i 个指标, 第 III 层指标类推。

2 模糊综合评判数学模型的构建

如前所述,极端降雨诱发公路滑坡灾害危险性评价系统因素繁多、指标体系共分 3 个层次,即上层

指标的取值由下层更多的指标决定。因此,采用模糊数学的理论解决该问题时须进行 3 级模糊综合评判,给出综合评判模型如式(1)所示。

$$\underset{\sim}{B} = \underset{\sim}{A} \circ \underset{\sim}{R} = \underset{\sim}{A} \circ \left[\begin{array}{c} \underset{\sim}{A}_1 \circ \left[\begin{array}{c} \underset{\sim}{A}_{11} \circ \underset{\sim}{R}_{11} \\ \underset{\sim}{A}_{12} \circ \underset{\sim}{R}_{12} \\ \dots\dots \\ \underset{\sim}{A}_{1m} \circ \underset{\sim}{R}_{1m} \end{array} \right] \\ \underset{\sim}{A}_2 \circ \left[\begin{array}{c} \underset{\sim}{A}_{21} \circ \underset{\sim}{R}_{21} \\ \underset{\sim}{A}_{22} \circ \underset{\sim}{R}_{22} \\ \dots\dots \\ \underset{\sim}{A}_{2m} \circ \underset{\sim}{R}_{2m} \end{array} \right] \\ \dots\dots \\ \underset{\sim}{A}_n \circ \left[\begin{array}{c} \underset{\sim}{A}_{n1} \circ \underset{\sim}{R}_{n1} \\ \underset{\sim}{A}_{n2} \circ \underset{\sim}{R}_{n2} \\ \dots\dots \\ \underset{\sim}{A}_{nm} \circ \underset{\sim}{R}_{nm} \end{array} \right] \end{array} \right] = [r_1, r_2, \dots, r_m] \quad (1)$$

式中: \tilde{A} 为权重系统; \tilde{R} 为指标集隶属度构成的评价矩阵; B 为综合评判结果行向量; “ \circ ”为模糊关系合成运算符号。

对于模糊关系的合成运算,一般可选用 5 种模型,分别为: $M(\wedge, \vee)$ 、 $M(\cdot, \vee)$ 、 $M(\wedge, \oplus)$ 、 $M(\cdot, \oplus)$ 、 $M(\cdot, +)$ 。5 种模型运算的定义不同,所以对同一评价对象求出的评价结果也会不一样。前 4 种模型都是在具有某种限制和取极限值的情况下寻求各自的评价结果,故而会不同程度丢失某些有用信息,只适用于仅关心评价对象极限值和突出其主要因素的场合;后 1 种是加权平均模型,它考虑了所有因素的影响,而且保留了单因素评价的全部信息,除必须对权值进行归一化处理外,运算中对权值和隶属度无上限限制,故该文选用该模型。

对极端降雨诱发公路滑坡灾害危险性的评价共分 5 个等级,若评价结果

$$r_k = \max B = \max [r_1, r_2, \dots, r_5] \quad (2)$$

则按照最大隶属度原则,则评价等级为 k 。

表 2 2 种标度计算结果对比

计算结果	$e^{0/5} \sim e^{8/5}$ 指数标度法	1~9 标度法
判断矩阵	$M_{B_2}^{e^{0/5} \sim e^{8/5}} = \begin{bmatrix} 1 & 1/e^{1/5} & 1/e^{4/5} & 1/e^{6/5} \\ e^{1/5} & 1 & 1/e^{2/5} & 1/e^{3/5} \\ e^{4/5} & e^{2/5} & 1 & e^{1/5} \\ e^{6/5} & e^{3/5} & 1/e^{1/5} & 1 \end{bmatrix}$	$M_{B_2}^{1 \sim 9} = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/5 & 1/7 \\ 2 & 1 & 1/3 & 1/4 \\ 5 & 3 & 1 & 2 \\ 7 & 4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$
一致性检验 CR	0.016 9	0.049 2
权重 ω_{B_2}	{0.065 7, 0.121 5, 0.445 0, 0.367 8}	{0.134 0, 0.190 1, 0.329 4, 0.346 4}

由表 2 可知:同种模糊语言的情况下, $e^{0/5} \sim e^{8/5}$ 指数标度法和 1~9 标度法相比,前者所构造的判断矩阵在一致性程度上远高于后者,由此计算的权重也存在很大区别。由此,根据数理统计学的知识可以确定, $e^{0/5} \sim e^{8/5}$ 指数标度法用于判断矩阵的构造更加合理。

3.2 确定动态权重系统

该文主要研究极端降雨诱发公路滑坡灾害的危险性问题,而在时间轴度上降雨作为滑坡灾害的诱发因素具有一定的特殊性。对单体岩质滑坡而言,降雨等诱发因素应视为动态指标,其它如滑坡内部特征、地震烈度、历史开挖方式、车载振动等指标的取值在有限的时间段内基本不变,是相对静态的指标。显然,不同情况的降雨对滑坡危险性的影响程度存在差异,并非一成不变,理应分配不同的权重以区别对待。

3 基于改进的层次分析法确定动态权重系统

3.1 改进的层次分析法

构造具有满意一致性的判断矩阵是进行多因素层次分析的前提,传统的层次分析法以 1~9 标度法确定判断矩阵,而该标度法精度不高,且为了满足一致性条件需进行多次调整^[11-12]。因此,笔者对其进行了改进,选用 $e^{0/5} \sim e^{8/5}$ 指数标度法代替 1~9 标度法,有效地提高了精度并避免了多次调整判断矩阵。

下面以第 II 层“滑坡内部特征”内诸指标权重的确定为例进行改进前后的对比。

经课题组专家讨论后认为:针对各指标对危险性的贡献不同, B2 比 B1 稍小重要; B3 比 B2 稍微重要、比 B1 比较重要; B4 比 B1 十分重要、比 B3 稍小重要。按照上述模糊语言分别用 2 种标度法建立判断矩阵进行比较,结果列于表 2。

选取大暴雨、暴雨、大雨和 5 h、8 h 2 类反映降雨情况的动态指标进行组合,共 6 种极端情况,分别由课题组专家对第 1 层评价指标进行重要性排序,采用 $e^{0/5} \sim e^{8/5}$ 指数标度法构造判断矩阵,最终确定 6 种情况下的权重列于表 3,并绘制了权重系统的动态变化情况如图 2 所示。

表 3 不同降雨情况下第一层指标动态权重

降雨情况	权重			一致性系数 CR
	A	B	C	
DY ₅	0.153 3	0.712 5	0.134 2	0.013 8
DY ₈	0.163 9	0.710 5	0.125 5	0.017 1
BY ₅	0.193 2	0.685 7	0.121 2	0.017 1
BY ₈	0.226 3	0.657 5	0.116 2	0.017 1
DB ₅	0.263 2	0.626 2	0.110 6	0.017 1
DB ₈	0.303 8	0.591 7	0.104 5	0.017 1

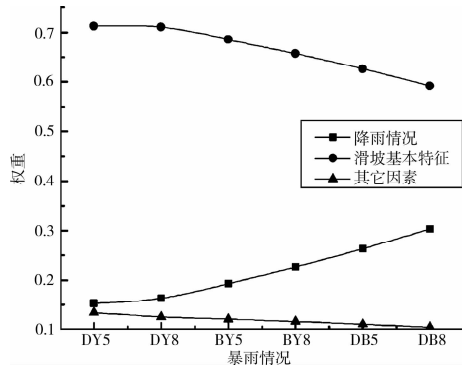


图 2 权重动态变化图

表 3 和图 2 清晰地显示出随降雨情况的变化, 相对应的权重系统在随之变化, 且随降雨强度或历时的增大, 降雨的权重增大, 而另外 2 个因素的权重随之减小。因此, 在对滑坡的稳定性进行评价时, 选择相对应的权重系统是符合实际情况的。

为节约篇幅, 其它静态指标权重的确定过程本文不再详述, 仅将结果列于表 4。

表 4 静态指标权重

上级指标	权重				一致性系数 CR	上级指标	权重				一致性系数 CR
A	A1	A2	A3		0.000 0	B2	B21	B22	B23	B24	0.005 6
	0.471 8	0.316 2	0.212 0				0.137 1	0.503 4	0.096 7	0.262 8	
B	B1	B2	B3	B4	0.017 1	B3	B31	B32	B33	0.000 0	
	0.134 0	0.190 1	0.329 4	0.346 4			0.422 4	0.345 8	0.231 8		
C	C1	C2	C3	C4	0.005 6	B4	B41	B42	B43	B44	0.005 6
	0.180 2	0.243 2	0.345 2	0.231 4			0.350 9	0.350 9	0.105 7	0.192 6	
B _i	B11	B12	B13	B14	0.005 6						
	0.229 3	0.139 1	0.146 2	0.485 4							

4 指标集隶属度的测算

指标隶属度的测算是模糊综合评判中单因素评判的关键环节。在该文构建的评价指标体系中, 各指标按数学分类划分, 可分为离散型(定性)指标和连续型(定量)指标。离散型指标如植被覆盖、坡形、基本结构、风化程度等, 其余为连续型指标。对于离散型指标一般采用经验赋值的方法确定隶属度; 对于连续型指标则可根据指标特性通过构造隶属函数的方法测算隶属度。该文参考相关研究成果^[17-21], 结合降雨诱发公路滑坡灾害的特点, 给出“梯形”隶属函数, 第 i 个指标对危险性等级 I - V 的隶属度计算公式如下:

$$\mu_{iI}(x) = \begin{cases} \frac{x - a_{i,A}}{a_{i,3} - a_{i,4}} & x \geq a_{i,A} \\ 1 & x < a_{i,A} \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{iII-IV}(x) = \begin{cases} \frac{x - a_{i,j-2}}{a_{i,j-1} - a_{i,j-2}} & x \geq a_{i,j-1} \\ 1 & a_{ij} \leq x \leq a_{i,j-1} \\ \frac{a_{i,j+1} - x}{a_{i,j+1} - a_{ij}} & a_{i,j+1} \leq x < a_{ij} \\ 0 & x < a_{i,j+1} \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{iV}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq a_{i2} \\ \frac{x - a_{i2}}{a_{i1} - a_{i2}} & a_{i1} \leq x \leq a_{i2} \\ 0 & x \leq a_{i2} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $a_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 0, 2, \dots, 4)$ 表示等级标准中, 某一等级标准值域的界限值。隶属函数曲线图如图 3 所示。

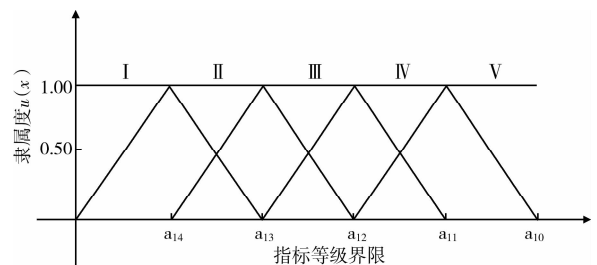


图 3 隶属函数曲线图

5 实例研究

5.1 工程概况

童家湾滑坡位于重庆市涪陵区西侧城乡结合部, 地理位置介于东经 $106^{\circ}56'$ ~ $107^{\circ}43'$, 北纬 $29^{\circ}21'$ ~ $30^{\circ}01'$ 之间。滑坡后缘高程 270 ~ 280 m, 前缘高程 201 ~ 207 m。滑坡南北纵长约 340 m, 东西横宽为 140 ~ 170 m, 滑坡面积约 $5.44 \times 10^4 \text{ m}^2$, 滑体平均厚度约 15.80m, 体积约 $85.92 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑体土表层主要为人工填土, 局部为粉质粘土, 由褐黄色粉质粘土夹泥岩、砂岩碎块、碎石组成; 自流井组东岳庙段薄一中厚层状黄褐色、褐灰色介壳灰岩, 中厚层状褐黄色泥质粉砂岩、黄灰色砂岩。属典型古岩

质滑坡。

对该滑坡在 5 h 暴雨工况下的危险性进行模糊

综合评判,影响边坡稳定性的特性指标检测值如表 5 所示。

表 5 单因素评判各指标实测值及隶属度

指标	A_{11}	A_{12}	A_{13}	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}	B_{21}	B_{22}	B_{23}	B_{24}	
实测值	暴雨	4	300	20	平直	80	36	较好	57	39	水位明显低于软弱面或软弱层,坡体不存在上层滞水	
隶属度	5	0.60	0.00	0.00	0.00	0.18	1.00	0.00	0.65	1.00	0.05	0.00
	4	1.00	0.67	0.00	0.00	0.62	0.67	0.30	0.88	0.86	1.00	0.15
	3	0.40	1.00	0.00	0.50	0.95	0.00	1.00	0.64	0.00	0.95	0.29
	2	0.00	0.33	0.00	1.00	0.84	0.00	0.70	0.35	0.00	0.00	0.85
	1	0.00	0.00	1.00	0.50	0.57	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.97
指标	B_{31}	B_{32}	B_{33}	B_{41}	B_{42}	B_{43}	B_{44}	C_1	C_2	C_3	C_4	
实测值	破碎结构	65	顺向破	0.21	43	弱风化	较坚硬岩	VI	裸露	机械开挖	沿省道	
隶属度	5	0.80	0.87	0.89	1.00	1.00	0.65	0.76	0.00	0.95	0.00	0.60
	4	0.93	1.00	0.65	0.84	0.85	0.80	0.89	0.00	0.77	0.00	0.95
	3	0.65	0.13	0.47	0.00	0.00	0.91	0.58	0.00	0.30	1.00	0.57
	2	0.35	0.00	0.20	0.00	0.00	0.65	0.47	1.00	0.00	0.00	0.00
	1	0.10	0.00	0.12	0.00	0.00	0.10	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00

5.2 模糊综合评判

将表 5 所列各指标隶属度做适当排列即可得到单因素评价矩阵,如对岩体质量的单因素评判:

$$\tilde{B}_{B_1} = \tilde{A}_{B_1} \circ \tilde{R}_{B_1} = [0.3509, 0.3509, 0.1057, 0.1926] \circ$$

$$\begin{bmatrix} 1.00 & 0.84 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.85 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.65 & 0.80 & 0.91 & 0.65 & 0.10 \\ 0.76 & 0.89 & 0.58 & 0.47 & 0.32 \end{bmatrix}$$

$$= [0.9169, 0.8490, 0.2079, 0.1592, 0.0722]$$

同理得 \tilde{B}_{B_2} 、 \tilde{B}_{B_3} 、 \tilde{B}_{A_1} 、 \tilde{B}_C 等单因素评判结果,进而求出“滑体内部特征”的评判结果 \tilde{B}_B 后即可进行第三级模糊综合评判:

$$\tilde{B} = \tilde{A} \circ \tilde{R} = [0.1932, 0.6857, 0.1212] \circ$$

$$\begin{bmatrix} 0.28 & 0.68 & 0.50 & 0.10 & 0.21 \\ 0.73 & 0.76 & 0.35 & 0.26 & 0.12 \\ 0.36 & 0.40 & 0.55 & 0.18 & 0.00 \end{bmatrix}$$

$$= [0.6018, 0.7042, 0.4110, 0.2221, 0.1298]$$

对评判结果进行归一化,则

$$\tilde{B} = [0.2909, 0.3404, 0.1987, 0.1073, 0.0627],$$

于是有

$$r_{II} = \max \tilde{B} = \max [0.2909, 0.3404, 0.1987, 0.1073, 0.0627] = 0.3404$$

即综合评判结果为该滑坡危险性等级为高度危

险。

5.3 结果检验

为检验模糊综合评判方法的可靠性,采用多层次灰色评价方法,请从事地质灾害危险性评价的工程技术人员和专家对童家湾滑坡在 5 h 暴雨工况下的危险性进行评价并排序,评价结论与模糊综合评判的结果一致,这说明将模糊综合评判方法用于极端降雨诱发公路滑坡灾害的危险性评价具有一定的可靠性,具有很高的工程应用价值。

6 结语

研究表明,将改进的层次分析法和模糊综合评判法相结合对降雨诱发公路滑坡灾害的危险性评价是可行的,通过实际的工程运用,验证了该方法得到的评判结果具有适用性和合理性,结果可靠。由于降雨是滑坡灾害发生的诱发因素,该因素具有动态性,评价过程中选取相对应的权重系统更加符合工程实际。各指标隶属度的确定是进行模糊综合评判的关键环节,鉴于即有离散型指标,又有连续型指标,因此针对不同的类型需采用不同的方法进行确定,前者采用经验赋值法,后者采用构造隶属函数的方法。在基础数据的获取上,鉴于因素繁多,相关技术人员水平有限,在一定程度上影响了综合评判的精度,今后还需进一步完善。

参考文献:

- [1] ALCANTARA AYALA I. Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico[J]. *Geomorphology*, 2004, 61:19-40.
- [2] 李铁锋,丛威青. 基于 Logistic 回归和前期有效雨量的降雨型滑坡预测方法[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(1):33-35.
- LI TIE-FENG, CONG WEI-QING. Method of rainfall-induced landslides prediction based on logistic regression and antecedent effective rainfall [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and control*, 2006, 17(1):33-35.
- [3] 乔建平,杨宗佑,田宏岭. 降雨滑坡预警的概率分析方法[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(3):343-349.
- QIAO JIAN-PING, YANG ZONG-GU, TIAN HONG-LING. Probability analysis based method for rainfall-induced landslide warning [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(3):343-349.
- [4] 高华喜,殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. *岩土力学*, 2007, 28(5):1055-1060
- GAO HUA-XI, YIN KUN-LONG. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction [J]. *Hock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5):1055-1060.
- [5] 金晓媚,刘金韬. 重庆市醴糟坪滑坡危险性评价[J]. *岩石力学与工程*, 2000, 19(1):47-49.
- JIN XIAO-MEI, LIU JIN-TAO. Danger evolution of landslide group of Laozaoping in Chongqing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(1):47-49.
- [6] 单新建,叶洪,李悼芬,等. 基于 GIS 的区域滑坡危险性预测方法与初步应用[J]. *岩石力学与工程*, 2002, 21(10):1507-1514.
- SHAN XIN-JIAN, YE HONG, LI DAO-FEN. Prediction method of dangerous areas of Regional landslide based on GIS and ITS application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(10):1507-1514.
- [7] 高克昌,崔鹏,赵纯勇,等. 基于地理信息系统和信息量模型的滑坡危险性评价——以重庆万州为例[J]. *岩石力学与工程*, 2006, 25(5):991-997.
- GAO KE-CHANG, CUI PENG, ZHAO CHUN-YONG, et al. Landslide hazard evolution of Wanzhou based on GIS information value method in the three gorges reservoir [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5):991-997.
- [8] CLERICI A, PEREGO S, TELLINI C, et al. A procedure for landslide susceptibility donation by the conditional analysis method [J]. *Geomorphology*, 2002, 48(4):349-364.
- [9] 王卫东,陈燕平,钟晟. 应用 CF 和 Logistic 回归模型编制滑坡危险性区划图[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2009, 40(4):1127-1133.
- WANG WEI-DONG, CHEN YAN-PING, ZHONG SHENG. Landslides susceptibility mapped with CF and Logistic regression model [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2009, 40(4):1127-1133.
- [10] WANG WEI-DONG, XIE CUI-MING, DU XIANG-GANG. Landslides susceptibility mapping based on geographical information system, Guizhou, south-west China [J]. *Environmental Geology*, 2009, 58(1):33-43.
- [11] 张喜平,柳立群,赵雪芹. 丘陵型水库地质灾害危险性模糊综合评判[J]. *地质灾害与环境保护*, 2010, 21(1):41-46.
- ZHANG XI-PING, LIU LI-QUN, ZHAO XUE-QIN. Analysis of slope stability of the hydropower station diversion tunnel outlet at the jinsha rive [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2010, 21(1):41-46.
- [12] 谢全敏,夏元友. 滑坡灾害评价及其治理优化决策新方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 2008:55-56.
- [13] 王旭华,陈守煜. 边坡稳定性评价的多层模糊模式识别方法[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2006, 25(6):855-856
- WANG XU-HUA, CHEN SHOU-YU. Multi-layer fuzzy pattern recognition model and its application in slope stability assessment [J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2006, 25(6):855-856.
- [14] 谢全敏,夏元友. 滑坡灾害评价及其治理优化决策新方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 2008:55-56.
- [15] CHEN H J, LIU S H. Slope failure characteristics and stabilization methods [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(4):377-391.
- [16] 张永兴,陈云,文海家,等. 边坡灾害风险评估系统研究及应用[J]. *重庆建筑大学学报*, 2008, 30(1):30-34.
- ZHANG YONG-XING, CHEN YUN, WEN HAI-JIA, et al. The research of landslide hazards assessment system [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2008, 30(1):30-34.
- [17] 聂洪峰,祁生文,孙进忠,等. 重庆市区域稳定性层次分析模糊综合评价[J]. *工程地质学报*, 2002, 10(4):409-415.
- NIE HONG-FENG, QI SHENG-WEN, SUN JIN-ZHONG, et al. Analytical hierarchy process and fuzzy mathematical evaluation of regional stability of Chongqing municipality [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(4):409-415.
- [18] 荆洪英,张利,闻邦椿. 基于层次分析法的产品设计质量权重分配[J]. *东北大学学报:自然科学版*, 2009, 30(5):713-717.

- plate[J]. Journal of Chongqing University, 2007, 30(3): 145-149.
- [14] ZHOU XIAO-PING, LING TONG-HUA. Elastic-plastic analytical solution for centric crack loaded by two pairs of point shear forces in finite plate [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16: 1009-1014.
- [15] ZHOU XIAO-PING, ZHANG YONG-XING. Elastoplastic analysis of an infinite plate with a crack loaded by two pairs of concentrated shear forces [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(12): 14-18.
- [16] ZHOU X P, YANG H Q. Elastoplastic solution for an eccentric crack loaded by two pairs of point tensile forces [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2009, 51(1): 62-72.
- [17] GUO C, ZHOU X P, ZHANG Y X, et al. Elastic-plastic near field solution of an eccentric crack under shear in a finite width plate [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2009, 51(3): 174-180.

(编辑 王秀玲)

(上接第 99 页)

- JING HONG-YING, ZHANG LI, WEN BANG-CHUN. AHP-based assignment of weight in product design quality [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2009, 30(5): 713-717.
- [19] CHEN H J, LIU S H. Slope failure characteristics and stabilization methods [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(4): 377-391.
- [20] 李克钢, 侯克鹏, 李旺. 指标动态权重对边坡稳定性的影响研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 493-498
LI KE-GANG, HOU KE-PENG, LI WANG. Research on influences of factors dynamic weight on slope stability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 493-498.
- [21] CLERICI A, PEREGO S, TELLINI C, et al. A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the conditional analysis method [J]. Environmental Geology, 2006, 50: 941-961.

(编辑 胡英奎)