

单体滑坡风险评估的二级模糊综合评判

张东辉^{1, 2}, 赵英俊¹, 薛东剑²

(1. 核工业北京地质研究院 遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室, 北京 100029;
2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:选取地形地貌、地质、气候、水文、植被和人为活动 6 个致灾指标, 人口密度、工程设施和土地利用 3 个承灾因素, 将二级模糊综合评判模型用于单体滑坡风险的评估. 先在同类因素间进行初级评判, 再利用初判的结果进行类间的二级评判. 以青川窝前滑坡为例进行了二级模糊综合评判的实现, 得出危险度为 0.49, 易损性度为 0.067, 危害度为 0.033.

关键词:窝前单体滑坡; 模糊评判; 风险评估; 遥感

中图分类号: TP183; P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9102(2011)02-0057-06

我国每年因滑坡灾害造成的损失数以亿计, 给国家和人民生命财产带来巨大损失, 采用科学的风险评估方法, 对处于人口活动范围的大型单体滑坡进行定量调查, 将为国民经济建设和国民人身安全保障提供科学的依据. 目前对单体滑坡的研究集中在稳定性评价和灾害预警两方面. 滑坡稳定性评价方法主要有可能性预测模型、支持函数模型、地貌方法、基于地理信息系统(GIS)和遥感技术的方法、以 GIS 为基础的滑坡危险区划分方法、统计方法和人工智能方法等^[1]. 应用方面主要有针对地质灾害数据存储方法^[2]、实时灾害预报系统的开发^[3]、滑坡空间预测方法^[4]、滑坡位移预测研究^[5]以及滑坡发生概率的推算^[6]等. 灾害预警方面的研究, 主要计算灾害发生可能性、灾害损失的大小以及防治工程的选择^[7-9]. 单体滑坡风险评估的危险性、易损性和危害性三级模式的提出使研究内容更加广泛, 理论方法更加丰富和先进^[10, 11]. 模糊数学为研究和处理具有双重不确定性的事物提供了新的方法, 其核心是用参数间的模糊关系替代数学假设基础上求出的解析关系. 对滑坡这一集随机性与模糊性为一体的事物, 用模糊数学的方法进行综合评判, 可望得到更切合实际的结果.

1 原理与方法

1.1 模糊评判模型的理论和方法

模糊评判的一般方法是设 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 为研究对象的 n 种因素, 即因素集. $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 为诸因素的 m 种评判所构成的评判集, 元素个数可根据实际需要主观确定. 实际中很多问题的因素评判集都是模糊的, 因此, 综合评判应该是 V 上的一个模糊子集 $B = (b_1, b_2, \dots, b_m) \in F(V)$, 其中 b_k 为评判 v_k 对模糊子集 B 的隶属度: $\mu_B(v_k) = b_k (k = 1, 2, \dots, m)$, 反映了第 k 种评判 v_k 在综合评价中所起的作用. 综合评判 B 依赖于各因素的权重, 即它是 U 上的模糊子集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \in F(U)$, a_i 表示第 i 种因素的权重. 当权重 A 给定以后, 相应地就可给定一个综合评判 B . 对于实际中的许多问题往往都是涉及因素多, 各因素的权重分配较为均衡的情况, 此时, 可采用将诸因素分为若干个层次进行研究. 即首先分别对单层次的各因素进行评判, 然后再对所有的各层次因素作综合评判.

二级模糊综合评判的具体方法为, 首先, 将因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 分成若干个组 $u_1, u_2, \dots, u_k (1$

收稿日期: 2010-10-29

基金项目: 国家 863 重点项目 (2007AA120306)

通信作者: 赵英俊 (1968-) 男, 河北宣化人, 研究员级高工, 博士生导师, 主要从事遥感图像处理与分析研究. E-mail: briugrs@sohu.com

$\leq k \leq n$), 且 $U_i \cap U_j = \Phi (i \neq j)$ 称 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ 为一级因素集. 不妨设 $U_i = \{u_1^{(i)}, u_2^{(i)}, \dots, u_{n_i}^{(i)}\} (i = 1, 2, \dots, k; \sum_{i=1}^k n_i = n)$, 称之为二级因素集. 其次, 设评判集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 对二级因素集 $U_i = \{u_1^{(i)}, u_2^{(i)}, \dots, u_{n_i}^{(i)}\}$ 的 n_i 个因素进行单因素评判, 即建立模糊映射 $f_i: U_i \rightarrow F(V) [u_j^{(i)} \mapsto f_i(u_j^{(i)}) = (r_{j1}^{(i)}, r_{j2}^{(i)}, \dots, r_{jm}^{(i)}) (j = 1, 2, \dots, n_i)]$, 于是得到评判矩阵为

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{11}^{(i)} & r_{12}^{(i)} & \dots & r_{1m}^{(i)} \\ r_{21}^{(i)} & r_{22}^{(i)} & \dots & r_{2m}^{(i)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n_i1}^{(i)} & r_{n_i2}^{(i)} & \dots & r_{n_im}^{(i)} \end{bmatrix}$$

设 $U_i = \{u_1^{(i)}, u_2^{(i)}, \dots, u_{n_i}^{(i)}\}$ 的权重为 $A_i = (a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, \dots, a_{n_i}^{(i)})$, 则可以求得综合评判为 $B_i = A_i \circ R_i = (b_1^{(i)}, b_2^{(i)}, \dots, b_m^{(i)}) (i = 1, 2, \dots, k)$, 其中 $b_j^{(i)}$ 由模型 $M(\wedge, \vee)$ 或 $M(\cdot, \vee)$, $M(\wedge, +)$, $M(\cdot, +)$ 确定. 最后, 对于一级因素集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_k\}$ 作综合评判, 设其权重 $A = (a_1, a_2, \dots, a_k)$, 总评判矩阵为 $R = [B_1, B_2, \dots, B_k]^T$. 按模型 $M(\wedge, \vee)$ 或 $M(\cdot, \vee)$, $M(\wedge, +)$, $M(\cdot, +)$ 运算得到综合评判 $B = A \circ R = (b_1, b_2, \dots, b_m) \in F(V)$.

1.2 单体滑坡灾害风险评估原理

单体滑坡灾害风险评估可定义为各种影响因子对单体滑坡灾害发生的概率及其对人类社会产生危害的程度进行描述的定量过程. 联合国自然灾害风险的定义将地质灾害风险表述为在一定的区域时间限度内, 特定的地质灾害对人类生命财产、经济、资源环境等可能造成的损失, 定量表达为风险度 = 危险度 \times 易损度.

按照工程地质方法将滑坡风险评估分为: 评估要素和范围的确定、指标体系的建立、风险评估模型的选取和风险评估及区划制图等 4 大步骤. 在对单体滑坡地质环境背景进行深入、全面、系统的定性分析基础上, 建立单体滑坡灾害风险评估模型. 目前常见的灾害风险评估模型有: 多元回归分析法、聚类分析法、模糊综合评判法、神经网络法、信息量法、信息权法、层次分析法、专家打分法、统计分析法、概率分析法、灰色关联分析法、野外现场分析判断、指数加权模型、可拓物元综合评判模型和 GIS 计算机技术分析.

2 滑坡概况

2.1 基本情况

窝前滑坡位于青川县马公乡窝前村, 属特大型滑坡, 滑坡体中心坐标 $N32^\circ 18' 26.45''$, $E104^\circ 57' 45.10''$. 灾害体堆积土石方约 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 是广元市目

前发现的最大地质滑坡体. 危险区面积 $4.2 \times 10^6 \text{ m}^2$, 主要灾害诱发因素是降雨, 目前该滑坡体处于欠稳定状态, 未来趋势也不稳定, 具有较大的风险性.



图 1 窝前滑坡的高精度航拍影像

Fig. 1 High precision aerial images of Woqian landslide

2.2 致灾信息

1) 地形地貌. 窝前滑坡地貌上为深切切割的中山区, 处于朝阳河上游, 无阶地发育, 滑坡所在山体的最高点, 海拔为 1 870 m, 河谷处高程 1 280 m, 相对高差为 600 m, 地形阶地不发育. 该滑坡呈“鱼”形, 后缘呈弧形椅状; 中前部主堆积区为岩土体的流通区; 滑坡后缘陡壁为岩土堆积区, 高差 438 m.

2) 地质条件. 窝前滑坡的地层由新到老依次为寒武纪邱家河组灰黑色薄板硅质板岩 ($\in q$), 油房组灰到深灰色中层装变质砂岩, 以及变质粉砂岩装炭质板岩 ($\in y$); 震旦纪水晶组灰白色块装细晶含藻白云岩 (Z_1), 元吉组第二段钙质绢云母千枚岩薄层结晶灰岩 (Z_2) 和第一段白云岩、硅质条带白云岩 (Z_3). 位于龙门山构造带, 该断裂带是一个巨大的推覆构造带, 由多条挤压逆冲断裂和推覆体组成. 汶川地震时, 窝前地区烈度为 V.

3) 气候条件. 青川县境内气候差异较大, 多年平均气温 13.7°C , 属亚热带湿润季风气候, 春迟、夏短、秋凉、冬长. 温度、湿度和光照条件在各种地形上变化大, 多年平均降水量 1 021.7 mm, 一般情况下年最低降雨量高于 900 mm. 空气湿度 69% - 85%, 多年平均水面蒸发量 727.9 mm, 陆面蒸发量 546.1 mm.

4) 水文条件. 在高精度光学卫星 SPOT5 全色 2.5 m 分辨率的图像上, 勾画出流经研究区的河网水系. 一般来说, 距离河流越近的斜坡, 受到水流侵蚀作用就越明显. 此外, 水流长度直接影响地面径流的速度, 进而影响斜坡下缘岩体的被侵蚀程度. 而沟谷密度是描述地面被水流切割破碎程度的指标, 是地形地貌、岩性、地形和指标的综合影响反映. 通过计算, 窝前滑坡水流长度最大值为 2 688 m, 河网密度值为 5.73 km/km^2 .

5) 植被条件. 归一化植被指数是求解区域植被覆盖率常用的参数, 通过近红外与可见光波段数值之差和这 2 个波段数值之和的比值, 将简单的比值植被指数 RVI 非线性归一化处理成归一化差值植被指数, 比值始终介于 -1 到 1 之间. 运用 ERDAS 空间建模的语句是: EITHER 0 IF (\$ n7_r_dhk = 0.0) OR \$ n3_nir_dhk / \$ n7_r_dhk OTHERWISE.

6) 人为活动. 经遥感解译和现场调查可知, 根据开挖的影响范围, 在数据库中沿公路两侧建立影响宽度并赋予评价指标, 可以量化公路因子在滑坡致灾过程中的作用程度.

2.3 承灾信息

1) 人为活动. 窝前滑坡是汶川地震诱发下形成的, 高速滚落而下的无数巨大石块, 将 27 户 34 人掩埋. 通过计算, 窝前滑坡威胁或者已经造成危害的人口密度值为 0.94 人/km².

2) 工程设施. 道路交通承灾体因子的划分依据是, 越接近单体滑坡的道路, 在滑坡灾害发生过程中对路面的破坏效应越大, 重建或者修复的成本越高, 因此, 越接近公路的像元, 赋予的承灾性指标值越大.

3) 土地利用. 结合高分辨率航片和野外调查, 建立研究区内地物分类的样区, 再利用 SPOT5 数据, 结合目视解译和计算机解译手段, 勾画出 3 个单

体滑坡区域内的土地利用类型. 按照计算机分类处理的一般步骤, 研究区内土地利用类型分为: 水体、林地、灌草地、耕地、裸地和居民点. 精度检验 kappa 系数达到 0.90, 说明分类精度可以接受.

3 参评因子的选取与分级

3.1 参评因子的选取

分析系统中各因素之间的关系, 建立系统的层次结构. 单体滑坡致灾性和承灾性影响因素的主要因子, 为两级层次结构. 危险性评价因子 $U = \{ \text{地形地貌 } u_1, \text{地质条件 } u_2, \text{气候条件 } u_3, \text{水文条件 } u_4, \text{植被条件 } u_5, \text{人为活动 } u_6 \}$, $u_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 为一级评价因子. 地形地貌 $u_1 = \{ \text{坡度 } u_{11}, \text{坡向 } u_{12}, \text{总曲率 } u_{13} \}$; 地质条件 $u_2 = \{ \text{地层岩性 } u_{21}, \text{断裂分布 } u_{22}, \text{地震烈度 } u_{23} \}$; 气候条件 $u_3 = \{ \text{年降雨量 } u_{31} \}$; 水文条件 $u_4 = \{ \text{河流分布 } u_{41}, \text{水流长度 } u_{42}, \text{河网密度 } u_{43} \}$; 植被条件 $u_5 = \{ \text{植被指数 } u_{51} \}$; 人为活动 $u_6 = \{ \text{道路分布 } u_{61} \}$, 为二级评价因子. 易损性评价因子 $U = \{ \text{人口密度 } u_1, \text{工程设施 } u_2, \text{土地利用 } u_3 \}$, 为一级评价因子. 人口密度 $u_1 = \{ \text{人口密度 } u_{11} \}$; 工程设施 $u_2 = \{ \text{承灾道路 } u_{21} \}$; 土地利用 $u_3 = \{ \text{土地利用 } u_{31} \}$.

3.2 参评因子的分级

将 15 个因素作 5 级定量划分 (表 1), 并规定对滑坡影响程度最大的为 5 级, 最小的为 1 级, 评判等级相应按极低、低、一般、高、极高危险区依次划分.

表 1 参评因素及其等级
Tab. 1 Evaluation factors and their levels

参评因素	评判等级					
	1	2	3	4	5	
坡度 (°)	0 ~ 10; 60 ~ 90	11 ~ 20	46 ~ 60	21 ~ 30	31 ~ 45	
地形地貌	坡向	<0 (Flat)	112.6 ~ 157.5S (E); 292.6 ~ 337.5 (NW)	157.6 ~ 202.5 (S); 247.6 ~ 292.5 (W); 337.6 ~ 360 (N)	67.6 ~ 112.5 (E)	22.6 ~ 67.5 (NE)
	总曲率	-5 ~ 5	-10 ~ -5, 5 ~ 10	-20 ~ -10, 10 ~ 20	< -20	> 20
	地层岩性	ε q; ε y	Z _s ; Z _y 1	S _m b; S _n 2; Z _y 2	S _n 3; Z _s	Q _r ; Q _p ; Q _m
地形条件	断裂分布/m	> 1 000	500 ~ 1 000	180 ~ 500	90 ~ 180	0 ~ 90
	地震烈度	III	II	IV	V	VI
气候	年降雨量/mm	< 700	700 ~ 800	800 ~ 900	900 ~ 1 000	> 1 000
水文条件	河流分布/m	> 500	200 ~ 500	100 ~ 200	50 ~ 100	0 ~ 50
	水流长度/m	0 ~ 1 000	1 000 ~ 2 000	2 000 ~ 3 000	3 000 ~ 4 000	> 4 000
	河网密度/(km/km ²)	< 1	1 ~ 2	2 ~ 5	5 ~ 9	> 9
植被	植被指数	160 ~ 255	20 ~ 30; 80 ~ 160	50 ~ 80; 0 ~ 10	10 ~ 20; 30 ~ 50	20 ~ 30
人为	道路分布/m	> 500	200 ~ 500	100 ~ 200	50 ~ 100	0 ~ 50
人口	人口密度/(人/km ²)	0 ~ 1	1 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 50	> 50
工程	承灾道路/m	> 500	200 ~ 500	100 ~ 200	50 ~ 100	0 ~ 50
土地	土地利用	裸地	水体; 灌草地	林地	耕地	居民点

以岩土体的抗剪强度指标为例,量化依据为:滑坡构成岩体的软硬结构,硬度由低到高依次为松散体(残积物、坡积物、崩积物、冲积物);软弱岩层(泥岩、页岩、片岩、煤层、灰岩、白云岩、泥灰岩);中等坚硬岩体(粉砂岩、石灰岩、白云岩、泥质灰岩、玄武岩、石英片岩、千枚岩、凝灰岩夹页岩);坚硬岩(花岗岩、凝灰角砾岩、大理岩)。

4 单体滑坡风险评估模型的建立

4.1 层次分析法确定因子权重

层次分析将半定性、半定量问题转化为定量问

$$\text{综合指标} \begin{cases} W_{1\text{危险性指标权重}} = (W_{11}\text{地形地貌}, W_{12}\text{地质}, W_{13}\text{气候}, W_{14}\text{水文}, W_{15}\text{植被}, W_{16}\text{人为}) = \\ \quad (0.32 \ 0.30 \ 0.017 \ 0.24 \ 0.031 \ 0.092) \\ W_{2\text{易损性指标权重}} = (W_{21}\text{人口密度}, W_{22}\text{工程设施}, W_{23}\text{土地利用}) = (0.56 \ 0.12 \ 0.32) \end{cases}$$

4.2 二级模糊综合评判模型

1) 因子模糊关系矩阵的建立. 分别统计窝前滑坡的危险性评价指标和易损性评价指标中,各个级别评价价值占总图像像素的统计值,建立模糊关系评价矩阵。

2) 一级综合评判. 模糊综合评判模型分为两级,第一级评判将第一级因子的评价矩阵(R_i)与相应的权重分配矩阵(W_i)运算,得出单体滑坡风险的一级综合评判值(B_i)。

3) 二级综合评判. 二级综合评判在一级评判的基础上运算,可以得出窝前滑坡的综合评价价值($B_{\text{危险性}}、B_{\text{易损性}}$)。

$$B_{\text{危险性}} = W_{1\text{危险性指标权重}} \times B_i = \{0.32 \ 0.30 \ 0.017 \ 0.24 \ 0.031 \ 0.092\} \times \begin{Bmatrix} 0.12 & 0.20 & 0.23 & 0.17 & 0.28 \\ 0.0073 & 0.050 & 0.78 & 0.16 & 0.0067 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.13 & 0.24 & 0.40 & 0.14 & 0.089 \\ 0.00091 & 0.023 & 0.020 & 0.29 & \\ 0.81 & 0.11 & 0.054 & 0.016 & 0.015 \end{Bmatrix} =$$

$$\{0.1463 \ 0.1474 \ 0.4092 \ 0.1465 \ 0.1518\}$$

$$B_{\text{易损性}} = W_{2\text{易损性指标权重}} \times B_i = \{0.56 \ 0.12 \ 0.32\} \times \begin{Bmatrix} 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.91 & 0.054 & 0.016 & 0.0078 & 0.0077 \\ 0.24 & 0.12 & 0.61 & 0.035 & 0.0051 \end{Bmatrix} = \{0.1860 \ 0.0449 \ 0.7571 \ 0.0121 \ 0.0026\}$$

题使思维过程层次化. 采用层析分析法能够得出单体滑坡多指标的权重,实施步骤为: 1) 分析系统中各因素之间的关系,建立系统的层次结构. 2) 构造两两比较矩阵,对于同一层次各因素关于上一层中某一准则的重要性进行两两比较,构造出两两判断矩阵. 3) 由比较矩阵计算被比较因素对每一准则的相对权重,并进行判断矩阵的一致性检验. 4) 计算方案层对目标层的组合权重和组合一致性检验. 按照上述过程,计算出窝前滑坡灾害点致灾指标和承灾指标的权重分配方案:

4.3 模型的检验

对提取的单体滑坡风险评价因子采用主成分分析,确定决定单体滑坡风险值的关键因子,从而检验模型的有效性. 在 Matlab 软件中,输入判别函数 princomp 判断数据的主成分. princomp 格式是: PC = princomp(X) - [PC, SCORE, latent, tsquare] = princomp(X), 其中, [PC, SCORE, latent, tsquare] = princomp(X) 对数据矩阵 X 进行主成分分析,给出各主成分(PC)、Z-得分(SCORE)、X 的方差矩阵的特征值(latent)和每个数据点的 HotellingT2 统计量(tsquare). 方差矩阵的特征值为: 0.7283, 0.3892, 0.2375, 0.1304, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0; 计算方差矩阵的特征值的贡献率: 0.4903, 0.2620, 0.1599, 0.08779, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0. 确定主成分数目的方法是将方差百分比进行相加处理,当达到 0.85 的时候,认为所选的主成分对于实验结果的模拟具有最好的代表性. 因此: 0.4903 + 0.2620 = 0.7523 < 0.85; 0.4903 + 0.2620 + 0.1599 = 0.9122 > 0.85. 选择 3 个综合变量 y_1, y_2, y_3 , 得出综合变量的表达式为 $y_1 = 0.1388x_1 - 0.0008x_2 - 0.1662x_3 - 0.1252x_4 - 0.1074x_5 + 0.0087x_6 - 0.1085x_7 + 0.1926x_8 - 0.1104x_9 - 0.1386x_{10} - 0.1512x_{11} - 0.1706x_{12} + 0.5143x_{13} + 0.5143x_{14} + 0.5143x_{15}$ $y_2 = -0.0571x_1 - 0.2787x_2 + 0.5709x_3 - 0.4136x_4 - 0.3181x_5 - 0.2094x_6 - 0.2188x_7 - 0.0440x_8 + 0.1920x_9 + 0.3895x_{10} - 0.1373x_{11} - 0.1352x_{12} + 0.0224x_{13} + 0.0224x_{14} + 0.0224x_{15}$

$$y_3 = 0.032 9x_1 - 0.071 7x_2 - 0.158 7x_3 - 0.476 3x_4 - 0.067 6x_5 - 0.095 1x_6 + 0.113 2x_7 - 0.068 7x_8 - 0.019 6x_9 - 0.059 6x_{10} + 0.052 7x_{11} + 0.835 4x_{12} + 0.044 4x_{13} + 0.044 4x_{14} + 0.044 4x_{15}$$

分析 3 个主成分系数的绝对值大小,得出影响单体滑坡致灾性的指标分别是:坡向、总曲率、地层岩性、断裂分布、河网密度、道路分布,说明地形地貌、地质条件、水文条件以及人为活动是窝前滑坡的主要致灾因素。回顾单体滑坡模糊综合评判模型的参数,这 4 个因素的权重值分别为地形地貌(0.32)、地质条件(0.30)、水文条件(0.24)和人为活动(0.092),排在前 4 位,明显高于气候条件的 0.017 和植被条件的 0.031,说明所建立的单体滑坡模糊综合评判模型是合理的。

5 评估结果分析

根据单体滑坡数据的获取情况和实际需要,将

危险性标准定为 5 个等级: $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\} = \{\text{极低危险区; 低危险区; 一般危险区; 高危险区; 极高危险区}\}$ 。通过运算,得出窝前滑坡的危险性划分图,根据各评估级别像元的统计量,得出滑坡危险性的轻重程度(图 2a),并绘制危险性评估等级直方图(图 2b)。按照统计百分比表示危险性程度,窝前的评语集合为: $\{0.05; 0.29; 0.46; 0.13; 0.07\}$ (图 2c)。选择危险性评估集合 $V = \{V_4, V_5\} = \{\text{高危险区; 极高危险区}\}$ 的危险性分值,通过对比图层权重-级别打分模型和模糊综合评判模型的评价结论得出窝前滑坡危险性程度值为 0.49(图 2d)。同理,得出易损性程度值为 0.067。综上所述,根据风险度 = 危险度 \times 易损度,可以得出单体滑坡危害度为 0.033。对相应的栅格图层也可以采用相乘的办法,获得窝前滑坡危害度图(图 2-d)。

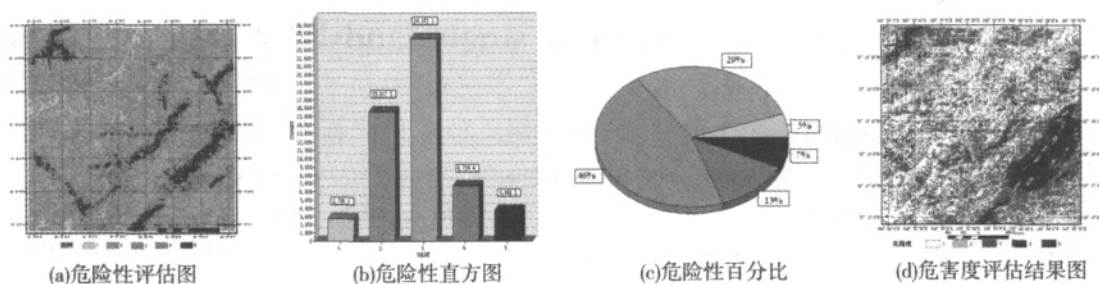


图 2 窝前滑坡风险评估结果

Fig. 2 Risk assessment of Woqian landslide

6 结论

本文以青川窝前滑坡为例,讨论了单体滑坡风险评估的二级模糊综合评判模型。分别提取致灾指标和承灾指标 9 大类 15 子类的信息。经过数据预处理,建立了单体滑坡灾害风险评估模型。并进行了主成分分析,验证了模型是可靠的。在此基础上,得出窝前滑坡的危险度为 0.49,易损性度为 0.067,危害度为 0.033。

参考文献:

[1] 张俤元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1994.
Zhang Z Y, Wang S T, Wang L S. Principles of engineering geological analysis[M]. Beijing: Geology Press, 1994.

[2] 汤明高,许强,黄润秋.三峡库区典型塌岸模式研究[J].工程地质学报,2006,14(2):172-177.
Tang M G, Xu Q, Huang R Q. Types of typical bank slope collapses on the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(2): 172-177.

[3] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
Qian M G, Shi P W. Mine pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.

[4] 王华俊,涂国祥,李俊明.西南某高速公路库区段冰水堆积物塌岸预测及模式研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2011,26(1):63-65.
Wang H J, Tu G X, Li J M. The research of bank collapse type and bank collapse prediction of the glacial deposits of reservoir areas of one highway southwest[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2011, 26(1): 63-65.

[5] 黄乐亭,王金庄.地表动态沉降变形规律与计算方法研究[J].

- 中国矿业大学学报 2008,37(2):211-215.
- Huang L T,Wang J Z. Research on laws and computational methods of dynamic surface subsidence deformation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008,37(2): 211-215.
- [6] 刘琼梅,曾敏. 基于关联规则的遥感图像挖掘的应用研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版) 2011,26(1):63-65.
Liu Q M,Zeng M. Applied research of the remote sensing image mining based on association rules[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition),2010,25(2): 94-97.
- [7] 刘永彬. 关联规则分析及其在空间数据中的应用研究[D]. 南宁: 广西大学 2007.
Liu Y B. Association rules analysis and spatial data of applied research [D]. Nanning: Guangxi University 2007.
- [8] 刘天翔,许强,黄润秋,等. 三峡库区塌岸预测方法初步研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版) 2005,32(6):12-19.
Liu T X,Xu Q,Huang R Q,et al. A preliminary study on the methods of predicting reservoir bank collapse in the Three Gorges areas. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition) 2005,32(6):12-19.
- [9] 刘盛和,何书金. 土地利用动态变化的空间分析测算模型[J]. 自然资源学报 2002,17(5):533-540.
Liu S H,He S J. A spatial analysis model for measuring the rate of land use change[J]. Journal of Natural Resource 2002,17(5):533-540.
- [10] 徐友宁,袁汉春,何芳,等. 矿山环境地质问题综合评价: 指标体系[J]. 地质通报 2003,22(10):829-832.
Xu Y N,Yuan H C,He F,et al. Comprehensive evaluation index system of the environmental geological problems of mesMine geological environment protection[J]. Regional Geology of China, 2003,22(10):829-832.
- [11] 魏义强,张永波,王鹏. 山西省郭峪煤矿矿山地质环境影响评价[J]. 科技情报开发与经济,2010,20(1):154-155.
Wei Y Q,Zhang Y B,Wang P. The mine geological environment impact assessment of guoyu coalmine in shanxi province[J]. Sci-Tech Information Development & Economy,2010,20(1):154-155.

Two – level fuzzy comprehensive evaluation on risk assessment of single landslide

ZHANG Dong – hui^{1,2}, ZHAO Ying – jun¹, XUE Dong – jian²

(1. National Key Laboratory of Remote Sensing Information and Imagery Analyzing Technology ,
Beijing Research Institute of Uranium Geology , Beijing 100029 , China;

2. National Laboratory of Geo – hazard Prevention and Geo – environment Protection , Chengdu University of Technology , Chengdu 610059 , China)

Abstract: The two – level model of the fuzzy comprehensive evaluation is used to assess single landslide risk , selecting six hazard indexes: topography , geology , climate , hydrology , vegetation , human activities. and three vulnerability factors: population density , engineering facilities , land use information. Preliminary evaluations are proceeded in the same type. Then the senior evaluation is proceeded with the results of preliminary evaluations between the all types . Taking QingChuan Woqian landslide as an example , discussed the steps of the evaluation. Results indicate that the hazard is 0.49 , vulnerability is 0.067 , and risk is 0.033.

Key words: woqian single landslide; fuzzy comprehensive evaluation; risk assessment; remote sensing