

采用本底因子贡献率法的三峡库区滑坡危险度区划

乔建平¹, 朱阿兴², 吴彩燕¹, 田宏岭¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 美国威斯康星大学地理系, 美国威斯康星州麦迪逊 53706-1491)

摘 要: 在不考虑触发因素的情况下对滑坡本底因子量化处理, 分析与滑坡发育的关系, 进行滑坡本底因子危险度区划。采集参加区划的本底因子包括地层岩性(U_1)、坡度(U_2)、坡形(U_3)、高差(U_4)、坡向(U_5)共五种。通过危险度区划, 研究区约 4 650 km² 中, 极高危险度区 57.44 km², 高危险度区 2 305.15 km², 中危险度区 1 241.6 km², 低危险度区 1 045.31 km²。采用的方法: ①数据库反演统计; ②贡献率与权重分析; ③危险度模糊判别。

关键词: 本底因子; 三峡库区; 滑坡; 区划

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

云阳-巫山段集中了三峡库区 40% 的滑坡, 是库区重点滑坡分布段, 所以选择该段为研究区域^[1-5]。三峡库区的滑坡数量多、分布广、产生的原因复杂, 将这些现象与机理结合进行系统研究有诸多的困难。但从滑坡发育的环境本底因子分析, 划分可能产生滑坡的不同危险程度, 推断形成滑坡的危险环境, 区划出不同等级的危险范围, 其结果经过统计和野外实地检验是可靠的, 并在有关部门得到使用。本底因子危险度区划的基本构架如图 1。

1 滑坡发育的主要本底因素

1.1 滑坡数据库

根据我所调查统计的云阳-巫山段库区 205 个滑坡资料(表 1), 建立了多功能滑坡数据库(CDMI)系统。数据库中的每一个滑坡都有基本信息量, 如地层、坡度、坡形、高差、坡向等。与滑坡环境相关的主要因素称为滑坡发育的本底主要因子。

1.2 本底因子数据

CDMI 滑坡数据库中存储了三峡库区云阳-巫山段长约 100 km, 宽约 40 km 范围内的 205 个滑坡数

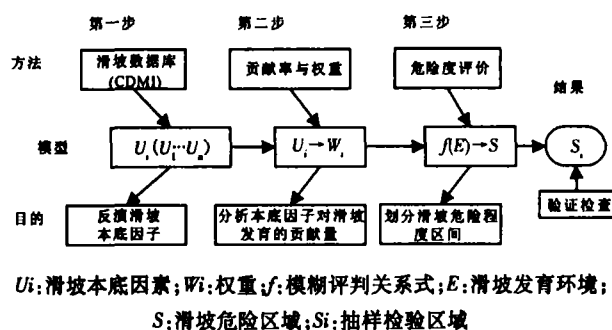


图 1 滑坡本底因子危险度区划原理框图

Fig. 1 Procedures of the application of bottom factors to the differentiation of landslide risk levels

据, 每个滑坡文档中都可以查寻到滑坡分布的各环境本底数据资料。采用 GIS 技术将区内 1:20 万地质图(投影处理)、1:5 万地形图数字化处理, 绘制各种相关矢量信息图层, 补充滑坡数据库中缺乏的信息, 建立环境信息图层。对研究区 1:5 万数字化地形图进行 25 m × 25 m 栅格处理(国家测绘局技术标准), 建立 706 万余个采样网格, 面积约 4 650 km², 使信息图层资料的精度得到保证。通过本底因素的信息处理, 得到主要本底因子图层(图 2):

收稿日期(Received date): 2006-07-16。

基金项目(Foundation item): 2004DFB01100 科技部国际科技合作重点项目, 中科院研究所前沿创新项目资助 [Supported by the important item of the International Science and Technology Cooperation of Science and Technology of China (2004DFB01100), the institute innovative item of Chinese Academy of Science.]

作者简介(Biography): 乔建平(1953-), 研究员, 主要研究方向: 滑坡危险性评价、滑坡机理与分布规律 [Qiao Jianping (1953-), male, professor, research direction: landslide hazard assessment, landslide mechanism and distribution rule. E-mail: jpqiao@imde.ac.cn]

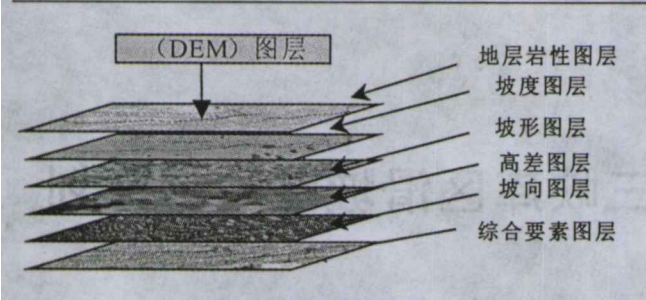


图2 本底因子图层
Fig.2 Strata diagrams of bottom

$$U_i = (U_1, U_2, U_3, U_4, U_5) [1]$$

式中 U_i 为本底因子集($i=1,2,\cdots5$)、 U_1 为地层、 U_2 为坡度、 U_3 为坡形、 U_4 为高差、 U_5 为坡向。采集的 U_i

数据量达到3 700 余万个,使分析资料精确化。

2 本底因子的贡献率及权重

2.1 贡献率

贡献率是分析滑坡发育本底因子作用的一项指标,采用

$$U_{oi} = U_i / \sum U_i \times 100\% \tag{1}$$

式中 U_{oi} 为本底因子贡献率($i=1,2,\cdots5$)。参考文献^[6-8]对公式(1)贡献率统计,获得研究区本底因素对滑坡发育的三级贡献(表2)。

表1 云阳-巫山段滑坡数量及规模分级统计
Table 1 Landslide scale statistics along the banks from Yunyang to Wushan

区域	统计指标	规模区间					累计
		<1	1~10	10~100	100~1 000	>1 000	
云阳	个	24	2	21	7	10	64
	体积(×10 ⁴ m ³)	0.115 3	15	945	1 662	28 028.8	30 650.915 3
奉节	个	19	16	26	12	11	84
	体积(×10 ⁴ m ³)	0.07	106.5	1 300.5	3 783	27 481	32 671.07
巫山	个	25	1	17	11	3	57
	体积(×10 ⁴ m ³)	0.145	5.6	618.1	4 645.59	6 700	11 969.435
合计	个	68	19	64	30	24	205
	体积(×10 ⁴ m ³)	0.330 3	127.1	2 863.6	10 090.9	62 209.8	75 291.420 3

表2 本底因子对滑坡发育的贡献
Table 2 Contribution of bottom factors to landslide development

贡献分类	地层	坡度(°)	坡形	高差(m)	坡向(°)
高(UU_{oi})	T_{2b}				
	J_{3s}	20~50	Ⅳ	600~800	157.5~202.5
	T_{2XJ} J_{12}				112.5~157.5
中(MU_{oi})	J_{3p}	10~20			202.5~247.5
	J_{2s}	50~80	Ⅴ		292.5337.5
	T_{1j}			1 100~1 400	
低(LU_{oi})			Ⅲ	400	0~22.5
	J_{2xs}				247.5~292.5
	T_{1d}	>80	Ⅱ	100~300	67.5~112.5
	J_{2x}	<10	Ⅰ	1 600~1 700	22.5~67.5
					337.5~360

2.2 权重

权重是本底因子对滑坡发育作用程度的一种指标,与贡献率具有同等的价值^[9-12]。采用贡献率法求出权重,称为贡献权重。每一种因子在采样样本

中的自身贡献程度可用自权重表示,不同因子在采样样本中相互贡献程度可用互权重表示。权重的计算方法如图3。对表2的本底因子贡献率进行均值化、归一化处理,得到了表3贡献自权重和表4贡献互权重结果。

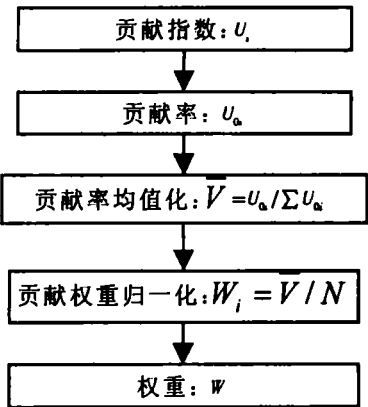


图3 贡献权重计算框图
Fig.3 The calculation of CRW

在滑坡危险度区划中,对同一图层的本底因子样本区间危险度评价取贡献自权重值,如表2中地层因子图层中采样区间 S_{ij} 为 $UU_{0i}=T_{2b}$ 岩性时,取自权重值为表3中 $W_1=0.50$ 。当5项本底因子 U_i 组合时样本区的危险度评价取贡献互权重值,即表4中高贡献类的权重值, $W_1'=0.20$ 、 $W_2'=0.21$ 、 $W_3'=0.17$ 、 $W_4'=0.26$ 、 $W_5'=0.16$ 。中、低贡献类的权重值对滑坡发育的贡献作用不大,在危险度评价中可以只采用高贡献类权重值^[13]。

表3 本底因子贡献自权重分配表
Table 3 The distribution of contributive self-weighing of the bottom factors

贡献分类	地层 (W_1)	坡度 (W_2)	坡形 (W_3)	高差 (W_4)	坡向 (W_5)	平均 ($\overline{W_1}$)
高	0.50	0.51	0.54	0.54	0.47	0.52
中	0.36	0.35	0.33	0.32	0.32	0.33
低	0.14	0.14	0.13	0.14	0.21	0.15
权重和 ΣW_i	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表4 本底因子贡献互权重分配表
Table 5 The distribution of the contributive mutual weighing of the bottom factors

贡献分类	地层 (W_1')	坡度 (W_2')	坡形 (W_3')	高差 (W_4')	坡向 (W_5')	权重和 ($\Sigma W_i'$)
高	0.20	0.21	0.17	0.26	0.16	1.0
中	0.23	0.24	0.25	0.15	0.13	1.0
低	0.13	0.09	0.19	0.16	0.43	1.0

3 模糊推理评价

3.1 方法

评价体系的实施方法分三个步骤(图4):第一,利用人工智能方法获取专家知识并建立专家知识库;第二,利用地理信息系统技术及地学运算方法对滑坡产生的本底因子(条件)进行定量计算并建立有关地理信息系统数据库;第三,通过模糊推理方法将知识库中的专家知识与地理信息系统中的环境条件相结合对各个象元滑坡危险度进行评价,计算出模糊滑坡危险度,同时将这些模糊危险度进行分级评价,得出空间上详细的滑坡危险度分级图^[14-17]

3.2 评价模型

采用模糊判别方法将滑坡本底因子进行组合,计算每种组合关系的模糊危险度,对每一种评价模型采用不同的公式:

1. 坡度与岩层倾角之差和坡向与岩层倾向之差对滑坡的影响。公式为

$$S_1 = e - [\frac{(\alpha - \alpha_0) \times 0.5477}{D}]^2 \times \cos(\beta - \beta_0) \tag{2}$$

式中 S_1 为危险度, α 为斜坡坡度, α_0 为岩层倾角, D 为坡角与倾角的角度差, β 为坡向, β_0 为岩层倾向。

2. 坡度与岩性对滑坡的影响。公式为

$$S_2 = W_1' \times e - [\frac{(\alpha - \alpha') \times 0.5477}{\theta}]^2 \tag{3}$$

式中 S_2 为危险度, α 为斜坡坡度, α' 为滑坡坡度, θ 为坡度对滑坡影响的有效范围, W_1' 为地层岩性权重。

3. 高差与岩性对滑坡的影响。公式为

$$S_3 = W_1' \times e - [\frac{(h - h_0) \times 0.5477}{H}]^2 \tag{4}$$

式中 S_3 为危险度, h 为斜坡高差, h_0 为滑坡高差, H 为高差对滑坡影响的有效范围, W_1' 为权重。

4. 坡形与岩性对滑坡的影响。公式如下:

当坡形为凸坡时

$$S_4 = W_3' \times W_1' \times e - [\frac{l \times 0.5477}{L}]^2 \tag{5}$$

当坡形为凹坡时

$$S_4' = W_3' \times W_1' \times [1 - e - [\frac{l \times 0.5477}{L}]^2] \tag{6}$$

式中 S_4 、 S_4' 为危险度, l 为坡形高差, L 为坡形影响范围, W_3' 为坡形权重。

3.3 结果

将表2、表4数值代入公式(3)~(6),对各种组合计算的危险度值进行叠加,得出最终危险度分区结果(图5、表5)。

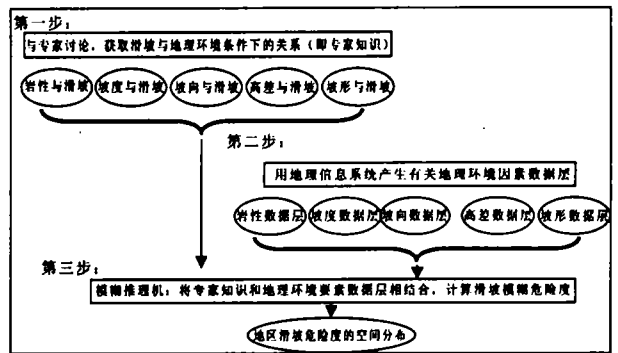


图4 体系实施的技术路线
Fig. 4 The technological realization processes

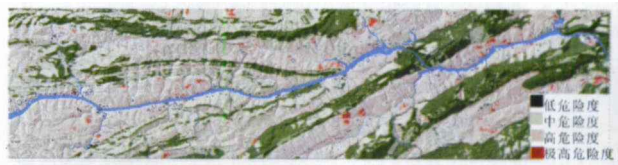


图5 滑坡危险度分级图
Fig. 5 Classification of landslide risk levels

表 5 危险度级别空间分布范围比例和
滑坡点在各级别中的分布比例

Table 5 The percentage of spatial distribution of risk levels
and the percentage of landslide spots in risk classifications

模糊评价 值域范围	危险度 级别	总面积 (km ²)	占百分数 (%)	滑坡点 (个数)	占百分数 (%)	密度 (个/km ²)
0-1	低	1 045.31	22.48	20	9.75	0.019
1-2	中	1 241.6	26.7	33	16.1	0.027
2-3	高	2 305.15	49.57	147	71.71	0.064
3-4	极高	57.94	1.25	5	2.44	0.086
-	总计	4 650	100	205	100	-

3.4 检验

表 5 的百分数说明,低危险度地区和中危险度地区出现滑坡的可能性要比其所占的面积比例要低。相反,高危险度和极高危险度地区出现滑坡的可能性要远远大于所点面积的比例。

从分布密度上来看,滑坡分布密度与危险度级别有很强关系。高危险度和极高危险度级别地区的滑坡分布密度大大高于其他两个级别,分布密度随危险度级别的提升而增加,而且两个高危险度级别的分布密度的增加幅度也远远大于两个低危险度级别的增加幅度(图 6),证明评价结果符合实际^[18,19]。

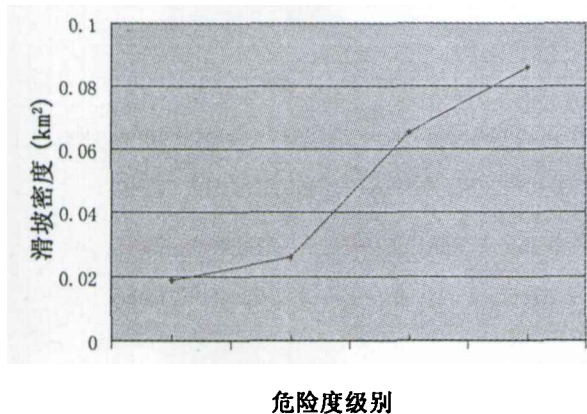


图 6 危险度级别与滑坡分布密度

Fig. 6 Risk classification and landslide distribution density

4 结论

1. 采用本底因子法的滑坡危险度区划,是建立在对滑坡的内部条件评价基础之上,分析区域范围内滑坡发育环境具备的条件程度,能够有效掌握滑坡孕育场的潜在危险性;

2. 贡献率法定量统计了本底因素与滑坡发育的关系,以及因子在其中的贡献程度。采用贡献率法求因子的权重是一种探索,实际应用中证明该方法的结果是可靠的。

3. 模糊评价的危险度区划结果符合三峡库区的滑坡发育特点,经统计检验,区划结果基本正确,具有应用推广价值;

4. 本底因子与触发因子相结合滑坡危险度区划有待于进一步研究,并提高可靠性分析。

参考文献(References)

[1] Tang Hongmei, Lin Xiaosong, Chen Hongkai, et al. Risk zoning assessment of geological disaster in Wanzhou Area, Chongqing City [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(3): 1~4[唐红梅,林孝松,陈洪凯,等.重庆万州区地质灾害危险性分区及评价[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(3): 1~4]

[2] Liu Yuan. Risk analysis and zoning of geological hazards (chiefly landslide, rock fall and debris flow) in China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2003, 14(1): 95~99[柳源.中国地质灾害(以崩、滑、流为主)危险性分析与区划[J].中国地质灾害与防治学报 2003, 14(1): 95~99]

[3] Zhang Chunshan, Zhang Yecheng, Zhang Lihai. Danger assessment of collapses, landslides and debris flows of geological hazards in China [J]. *Journal of Geomechanics*, 2004, 13(1): 27~32[张春山,张业成,张立海.中国崩塌、滑坡、泥石流灾害危险性评价[J].地质力学学报, 2004, 13(1): 27~32]

[4] Wu Shuren, Jin Yiming, Shi Jusong, et al. A primary study on landslide warning criterion: an example from the reservoir region of the Three Gorges [J]. *Journal of Jiling University (Earth Science Edition)*, 2004, 34(4): 596~600[吴树仁,金逸民,石菊松,等.滑坡预警判据初步研究——以三峡库区为例[J].吉林大学学报(地球科学版) 2004, 34(4): 596~600]

[5] Liu Renzhi, Ni Jiren. Landslide and rock fall hazard zonation in China[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2005, 13(1): 13~22[刘仁志,倪晋仁.中国滑坡崩塌危险性区划[J].应用基础与工程科学学报,2005, 13(1): 13~22]

[6] Qiao Jianping. A research on the contribution ratio of the strata factors to landslide development along the banks from Yunyang to Wushan in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Lithological Soft Science and Engineering*, 2004, 23 (17): 2920~2924[乔建平.三峡库区云阳-巫山段地层因素对滑坡发育的贡献率研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23 (17): 2920~2924]

[7] Wu Caiyan. A study of the contribution ratio of slope orientation to landslide development along the banks from Yunyang to Wushan in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering)*, 2005, 37 (4): 25~29[吴彩燕.三峡库区云阳-巫山段坡向因素对滑坡发育的贡献率研究[J].四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(4): 25~29]

[8] Wu Caiyan. A study of application of GIS to slope forms contributive

- to the landslides in Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(3):34~37[吴彩燕. 基于GIS的三峡库区滑坡坡形研究[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(3):34~37]
- [9] Zhang Lijun, Wang Sihong. Assessment and zoning of ecologic-geologic environment of Sanjiang Plain in Heilongjiang Province[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2004, (6): 33~36[张丽君, 汪思宏. 区域性滑坡敏感性评价的数据驱动权重模型及应用[J]. 水文地质工程地质, 2004, (6):33~36]
- [10] Wang Yuanhan, Liu Duanling. Comprehensive Fuzzy evaluation method for the stability of slope[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1998, 26(Suppl.):96~98[王元汉, 刘端伶. 边坡稳定性的Fuzzy综合评判法[J]. 华中理工大学学报, 1998, 26(增刊):96~98]
- [11] Aleotti P. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives[J]. *Bull Eng Env* 1999, 58:21~44
- [12] Dong W M, Wong F S. Fuzzy Weighted Averages and implementation of the extension principle[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1987, 21:183~199
- [13] Fan Yunxiao, Luo Yun, Chen Qingshou. Establishment of weight about vulnerability indexes of hazard bearing body[J]. *Journal of Catastrophology*, 2001, 16(1):85~87[樊运晓, 罗云, 陈庆寿. 区域承灾体脆弱性综合评价指标权重的确定[J]. 灾害学, 2001, 16(1):85~87]
- [14] Qiao Jianping. A 3D visible evaluation of landslide risk degree under integration of GIS and artificial intelligence[J]. *Science in China Ser. E Technological Sciences*, 2003, 46(Suppl.):142~147
- [15] A-xing Zhu. Mapping landslide susceptibility in the Three Gorges area, China using GIS, expert knowledge and fuzzy logic[A]. In: *GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment (Proceedings of ICGRHWE held at the Three Gorges Dam, China, September 2003)*[C]. IAHS Publ. 2004, 289:385~391
- [16] Xie Quanmin, Xia Yuanyou, Zhu Ruigeng. Fuzzy model of comprehensive evaluation on the treatment of dangerous rock masses[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 2001, 7:18~20[谢全敏, 夏元友, 朱瑞庚. 模糊综合评判模型在危岩滑坡体治理中的应用[J]. IM&P 化工矿物与加工, 2001, 7:18~20]
- [17] Zhu Liangfeng, Wu Xincui, Ying Kunlong, et al. Risk zonation of landslide in China based on information content model[J]. *Journal of Earth Science and Environmental*, 2004, 26(3):52~55[朱良峰, 吴信才, 殷坤龙, 等. 基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3):52~55]
- [18] Darevskii V. E., Romanov A. M. Calculation of landslide danger and maximum landslide pressure by the variation method[J]. *Soil Mechanics & Foundation Engineering*, 1994, 31(2):79~80
- [19] Fausto Guzzetti. Landslide fatalities and evaluation of landslide risk in Italy[J]. *Engineering Geology*, 2000, 58:89~107

Bottom Factors Applied to the Zoning Study of the Risk Levels of Landslides in Three Gorges Reservoir Area

QIAO Jianping¹, ZHU Axing², WU Caiyan¹, TIAN Hongling¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

2. University of Wisconsin, Madison 53706-1491, Wisconsin, USA)

Abstract: Without taking inducing factors into consideration, this paper adopts a quantitative analysis of the bottom factors in the Three Gorges Reservoir area, studies the relationship between the bottom factors and the development of landslides, and then zones the area according to risk levels. The bottom factors adopted in this paper include lithological characters(U_1), gradient(U_2), slope form(U_3), difference of height(U_4), and slope orientation(U_5). In 4 650 km² of the studied area, the areas of the very high, high, medium and low hazard degree area respectively were 57.94 km², 2 305.15 km², 1 241.6 km², 1 045.31 km². The methodological steps are ①inversion statistic analysis, ②the analysis of contribution ratio and weighing, ③getting results via fuzzy evaluation of risk levels.

Key words: bottom factors; Three Georges area; landslide