

# 区域滑坡风险综合评估的三要素\*

乔建平 杨宗佶

(中国科学院地表过程与山地灾害重点实验室 中国科学院成都山地灾害与环境研究所 成都 610041)

**摘要** 区域滑坡风险综合评估应该包括三方面要素,即:滑坡区域风险分布 滑坡风险概率、滑坡风险损失。作者在滑坡风险区划的基础上,查明风险分布的状况,评估风险影响的地区范围。根据滑坡的诱发因素,分析发育的滑坡特点,评估滑坡发生的概率。采用受灾面积占评估区域的损失率统计,评估可能受灾损失的规模。将三要素评估迭加,建立了滑坡风险综合评估模型。并将此模型在四川省攀枝花市米易县进行了示范研究,最后得到米易县全县滑坡风险中等偏低的结论,这与研究区的实际情况基本一致,取得了较好的应用效果。

**关键词** 滑坡 风险 评估 三要素

**中图分类号**:P642.22 **文献标识码**:A

## THREE PRINCIPAL FACTORS FOR INTEGRATIVE ASSESSMENT OF REGIONAL LANDSLIDE RISKS

QIAO Jianping YANG Zongji

(Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041)

**Abstract** The distribution, probability and damage of landslide are three principal factors of the integrative assessment for regional landslide risk. The distribution and influence range of landslides are assessed on the basis of landslide risk zonation, and the probability of landslide is calculated according to the analysis of inducing factors and characteristics of landslides development. ; the extent of damage is estimated by the percentage of damage region comparing with study area. The landslide risk integrative assessment model is established by overlaying the three principal factors. This model was applied in the Miyi County, Panzhihua City, Sichuan Province, the risk degree of the study area is lower-middle level which is consistent with the actual situation after the risk assessment.

**Key words** Landslide, Risk, Assessment, Principal factors

### 1 引言

随着滑坡风险研究的不断深入,滑坡风险评估

已得到各国政府的高度重视,区域滑坡风险综合评估已成为国际地质灾害研究领域的热点问题。我国学者通过近 20a 对滑坡风险系统性研究,对滑坡灾害属性特征、风险构成、指标体系、易损性、评价模型

\* 收稿日期: 2011-05-20; 收到修改稿日期: 2011-09-30.

**基金项目**: 科技部国际合作项目(2009DFB20190)和国家“十一五”重点科技支撑计划项目(2008BAK50B04),“十二五”重点科技支撑计划项目(2011BAK12B01)资助。

**第一作者简介**: 乔建平,从事滑坡规律、滑坡机理和滑坡危险度区划研究. Email: jpqiao@imde.ac.cn

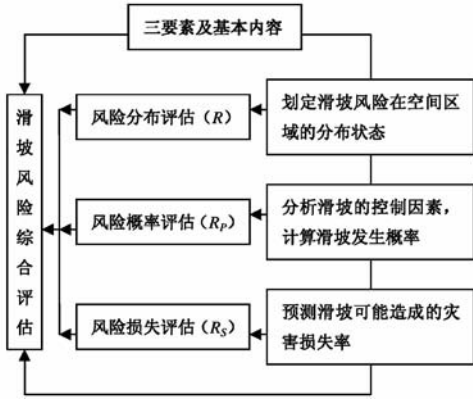


图1 滑坡风险综合评估体系结构

Fig. 1 Structure system of landslide risk integrative assessment

等进行了全面研究,使自然灾害风险评价理论与方法得到不断发展丰富<sup>[1]</sup>。然而,目前对滑坡风险评估还没有统一的标准,对风险评价、风险区划、风险分析、风险概率、风险评估的功能及阶段性、目标性的理解不同,所以采用的方式方法也各异。作者认为,对滑坡风险进行分类研究后,应该区别它们之间的差别,并给出基本定义;在分类定义的指导下,界定研究其基本要素内容<sup>[2]</sup>。并通过不断的总结提高,逐渐形成完整的滑坡风险研究理论体系<sup>[3]</sup>。滑坡风险评估是建立在前期若干项工作基础之上的。

一般需要经过滑坡风险评价(区划)、滑坡风险分析、滑坡风险概率准备之后,才可能开展滑坡风险评估。有了这些基础,进入滑坡风险评估阶段应该掌握3个基本要素,即、滑坡风险分布评估、滑坡风险概率评估、滑坡风险损失评估,最终才能构成滑坡风险综合评估。建立在上述三要素基础之上的滑坡风险评估才称得上是较完整的滑坡风险评估系统(图1)。

## 2 风险分布评估

### 2.1 风险区划

区域滑坡风险分布依靠滑坡风险区划确定,支撑区划的技术系统由图2表示。

区划结果应该给出区域内滑坡风险分布的具体范围、面积和所占的比例。区划模型采用乔建平<sup>[4]</sup>提出的的贡献权重迭加法:

$$R_s = H \times V = \left( \sum w_1 w_1' U_1 \right) \times \left( \sum w_2 w_2' U_2 \right) \quad (1)$$

式中,  $R_s$  为风险分布;  $H$  为危险度;  $V$  为易损度;  $w_1$  为滑坡因子自权重;  $w_1'$  为滑坡因子互权重;  $U_1$  为滑坡因子贡献指数;  $w_2$  为承灾体因子自权重;  $w_2'$  为承灾体因子互权重;  $U_2$  为承灾体因子贡献指数。

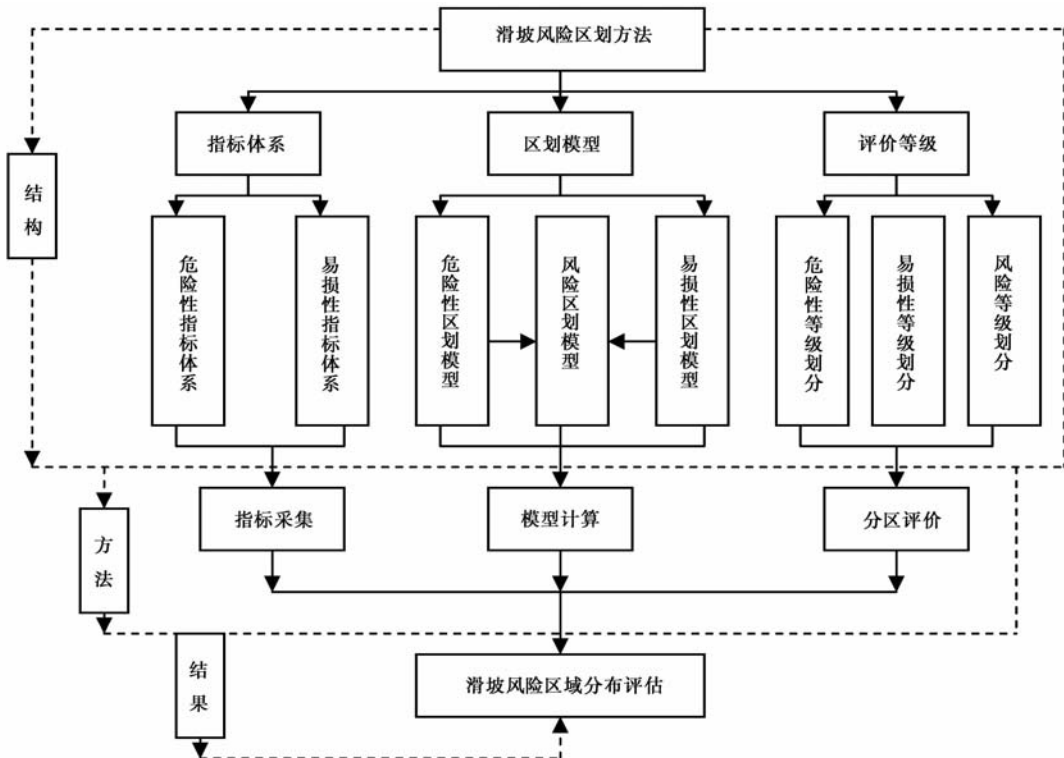


图2 滑坡风险区划结构框图

Fig. 2 Framework of landslides risk zonation

此外,根据区划的精度要求,还可参考文献[5]介绍的其它区划模型。

## 2.2 分布评估

对采用上述方法完成的滑坡风险区划结果,按不同的风险等级划分区间,如高、中、低滑坡风险区。并采用图、表的形式详细说明分布的位置(市(县)、镇(乡))、面积(各种统计比例(%)),对全区滑坡灾害损失的贡献等进行系统评估。说明滑坡风险分布的现状和潜在的危害性。

## 3 风险概率评估

### 3.1 概率分析

概率评估首先需要分析影响滑坡风险的控制因素是什么,然后再对区内滑坡受控的主要因素,以及随主控因素变化而造成风险损失的时间和可能性进行概率分析。无论任何地区的滑坡总要受到1种或几种因素控制。除了滑坡的本底因素作用外,触发因素将成为主控因素。除极端情况外(如地震、人为破坏等),一般情况下滑坡发生主要受到降雨因素的控制。有降雨条件,才可能出现滑坡风险。所以,降雨滑坡的概率也就是滑坡风险的概率。降雨滑坡概率的计算模型很多,但是当雨量与滑坡相关资料不能完全满足概率统计的前提下,可以采用降雨滑坡频率统计的方法近似计算降雨滑坡的概率,并以此代表降雨滑坡对风险的贡献。采用乔建平等的分析方法<sup>[6]</sup>,得到降雨滑坡风险概率计算模型:

滑坡发生空间概率:

$$P_{si} = x_i [1 - (1 - f_i)(1 - f_i')] = x_i(1 - p_{si}') \quad (2)$$

式中,  $P_{si}$  为滑坡分布空间概率;  $f$  为各滑坡危险区已发生滑坡频率;  $f'$  为各滑坡危险区降雨滑坡频率;  $x$  为滑坡分布密度系数;  $i$  为各滑坡危险区。

滑坡发生时间概率:

$$P_{ti} = [1 - (1 - f_i)(1 - f_i')] = (1 - p_{ti}') \quad (3)$$

式中,  $P_{ti}$  为滑坡发生空间概率;  $f$  为各滑坡危险区已发生滑坡频率;  $f'$  为各滑坡危险区降雨滑坡频率、由式(2)可得到滑坡风险概率为:

$$R = H \times V \in P$$

或

$$R_p = (\sum w_1 w_1' U_{ij}) \times (\sum w_2 w_2' U_{ij}) \in (P_s, P_t) \quad (4)$$

式中,  $R_p$  为滑坡风险概率;  $H$  为滑坡危险度;  $V$  为滑坡易损度;  $w_i$  为危险度或易损度因子间互权重;

$w_j'$  为危险度或易损度因子间自权重;  $U_{ij}$  为各评价因子自变量;  $P_s$  为滑坡分布空间概率;  $P_t$  为滑坡发生空间概率。

### 3.2 概率评估

滑坡风险概率评估是对降雨滑坡发生的可能性进行预测分析,其中包括空间和时间2方面的内容。空间概率评估主要分析滑坡风险随空间范围变化发生的可能性。因为不同滑坡风险区的空间分布面积是不同,所以风险概率分布也将随空间取样的大小而变化。当空间分布为给定的面积范围  $x_i$  时,可以通过式(3)得到风险空间分布概率,并评估在每一个具体  $x_i$  空间的风险概率情况。时间概率评估主要分析在给定临界降雨时间条件下,发生滑坡风险的时间可能性。

## 4 风险损失评估

### 4.1 损失率预测

滑坡发生前,可以通过对滑坡受损面积与滑坡风险面积之比,计算可能损失面积比率,预测滑坡灾害损失率。损失率与易损性不同,需要在危险度和易损度区划迭加的基础上,求解各风险区内具体滑坡直接灾的概率。易损性仅仅是对区域宏观承灾体的价值进行等级划分,而与滑坡点的关联性较小。损失率预测对灾区人员伤亡情况是难以准确评估的<sup>[7-9]</sup>,因为这与人们防灾意识和政府防灾管理程度密切相关。运用乔建平的滑坡受灾面积统计模型<sup>[10]</sup>,对滑坡风险分布区内每一处滑坡受灾面积与滑坡风险区面积进行损失率统计,即:

$$\begin{aligned} R_h(\%) &= \frac{\sum_{i=1}^n S_{Li}}{\sum_{i=1}^n S_{Ri}} (100\%) \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n (0.02 + 1.23S_0)_i}{\sum_{i=1}^n S_{Ri}} (100\%) \quad (5) \end{aligned}$$

式中,  $R_h$  为灾害损失率(%);  $S_L$  为滑坡受灾面积( $\text{km}^2$ );  $S_0$  为滑坡面积( $\text{km}^2$ );  $S_R$  为评估区面积( $\text{km}^2$ ),将统计结果划分为不同的等级,当损失率  $R_h$  越高时,说明滑坡受灾面积分布越大,区内遭受滑坡灾害损失的可能性也越大。

## 4.2 损失率预评估

在实际滑坡损失评估中,由于受到获取当地经济产量和固定资产资料信息的限制,如,经济总量、建筑物、基础建设、农业、林业、工业、水利等等,得出的经济损失评估结果往往可信度较低。当滑坡发生后评估经济损失是可靠的,而之前采用任何方法作出的经济损失评估与实际情况一般差距较大<sup>[11, 12]</sup>。所以对区域滑坡灾害发生前的损失预测评估,可以采用滑坡直接受损面积与风险区面积的比率 $R_h$ 评估可能造成的损失范围。确定空间范围后,再进行经济损失预测评估方能提高其可靠性。

## 5 风险综合评估

根据图 1 的原理,滑坡风险综合评估是一个较完整的系统,需要分不同阶段完成。经过分布、概率、损失 3 个阶段分项评估后,综合三要素评估结果,提高综合评估的质量。风险综合评估的 3 要素可以采用元素集合表示,即:

$$\bar{R} = R(R_s, R_p, R_h) \quad (6)$$

式中, $\bar{R}$ 为风险综合评估。在具体滑坡风险综合评估时,可将式(6)的内容采用表格的形式分别介绍,便于决策者得到完整的评估信息。

## 6 实例应用

选择四川省攀枝花市米易县(面积 2100km<sup>2</sup>)作为示范区。区内 2007 年调查有滑坡崩塌点 170 处,滑坡分布面密度为 6.7 处·100km<sup>-2</sup>,是攀枝花市滑坡崩塌数量最多、分布密度最大的重灾区。

### 6.1 风险分布 ( $R_s$ )

#### 6.1.1 风险区划

采用 GIS 技术将研究区滑坡本底因子和承灾体因子进行贡献作用统计,再作权重转换<sup>[9]</sup>,根据式(1)进行数据处理,分别得到米易县滑坡危险度、易损度、风险区划图及检验结果(图 3~图 6)。

#### 6.1.2 分布评估

米易县滑坡灾害风险区划结果,区内高风险区面积占全区面积的 3.6%,而且主要分布在米易县社会经济较为发达的城镇区域;中风险区占全区面积的 14.9%、主要分布经济条件较好的工矿产业区;低风险区占全区面积的 81.6%,主要分布在广

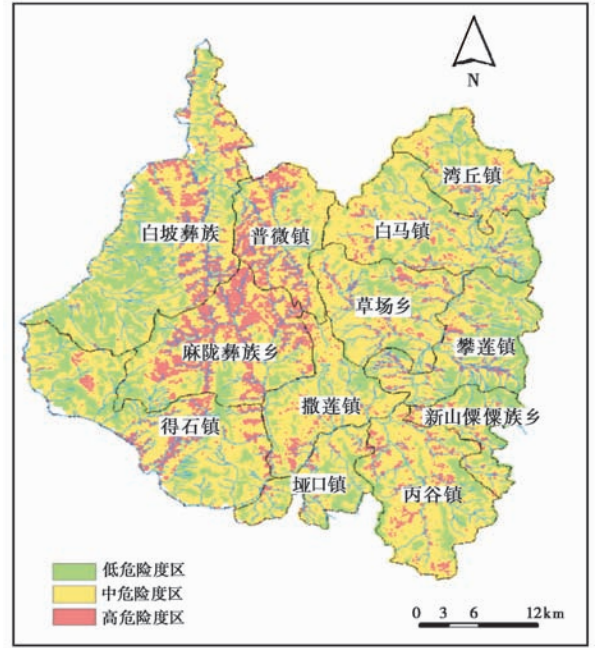


图 3 米易县滑坡危险度区划图

Fig. 3 landslide hazard zonation in Miye county

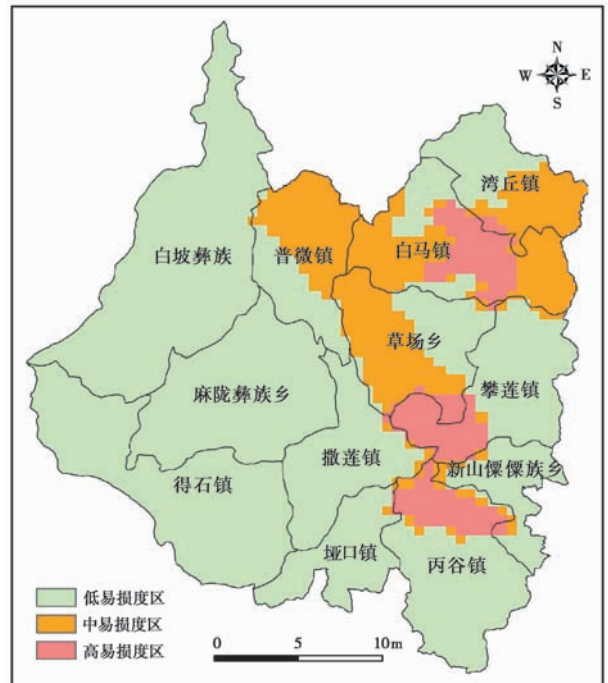


图 4 米易县承灾体易损度区划图

Fig. 4 Vulnerability zonation in Miye county

大的农业区域。因此米易县滑坡灾害风险总体不高,但是高风险区处于米易县的人口稠密区,经济发达区,一旦发生灾害也有造成严重损失的可能。

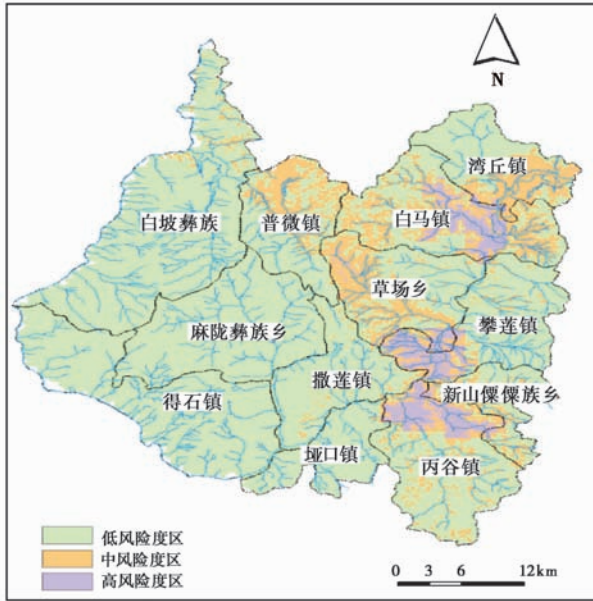


图5 米易县滑坡风险区划图

Fig. 5 Landslide risk zonation in Miyi county

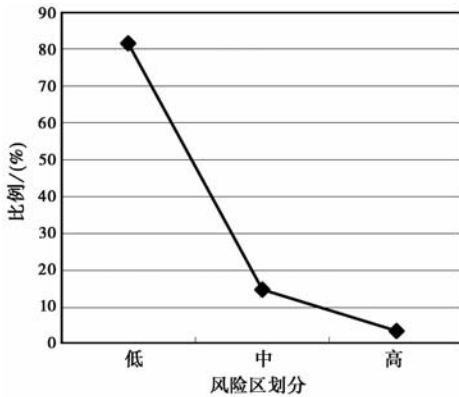


图6 米易县滑坡风险区划检验图

Fig. 6 The result of risk zonation validation

## 6.2 风险概率 ( $R_p$ )

### 6.2.1 概率分析

2007年调查统计滑坡总数170个,其中高风险区91个、中危险区72个、低危险区7个。根据式(2)、(3)分别获得滑坡时间和空间分布概率(表1、图7)。

### 6.2.2 概率评估

统计结果,米易县滑坡发生概率受降雨因素控制,当24h降雨量达到30mm时,具备发生单体滑坡的可能。当48h降雨量达到70mm或76h降雨量达到100mm时,具备发生群体滑坡的可能。不同风险区的滑坡发生概率如表1所示。图7表明,当高风险区的单体面积超过20km<sup>2</sup>时,滑坡空间分布概率为接近1,即具备了临界降雨条件下,该区域内发生

表1 米易县降雨型滑坡发生频率表

Table 1 Statistics of frequency of rainfall induced landslide

风险区	滑坡总数 $a$	降雨滑坡数 $b$	已发生滑坡频率 $f_i$	降雨滑坡频率 $f'_i$	滑坡时间分布概率 $P_{ti}$
高风险区	91	75	0.535	0.82	0.91
中风险区	72	34	0.423	0.48	0.70
低风险区	7	2	0.041	0.29	0.32
总计	170	111			

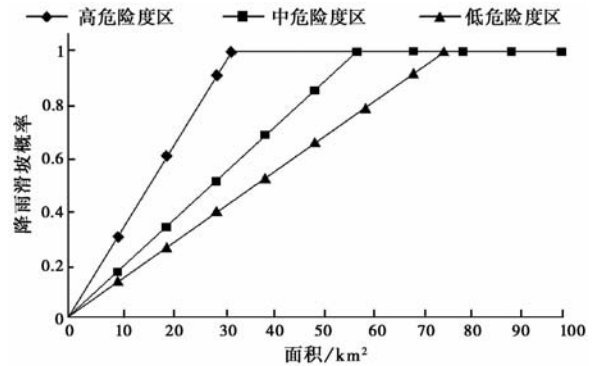


图7 米易县滑坡空间分布频率曲线图

Fig. 7 Spatial probability curve of landslide in Miyi county

滑坡的可能性极大。当中风险区的单体面积超过50km<sup>2</sup>时,滑坡空间分布概率为接近1,即具备了临界降雨条件下,该区域内发生滑坡的可能性较大。低风险区域内发生滑坡的可能性极小。

## 6.3 风险损失 ( $R_l$ )

### 6.3.1 损失预测

采用式(5)分别对表1中各风险区的滑坡的受灾损失面积统计后,并将全县高风险区75.3km<sup>2</sup>、中风险区314.3km<sup>2</sup>、低中风险区1722.5km<sup>2</sup>面积数代入该式计算,获得各风险区受灾损失率(图8)。统计结果,高、中、低风险区损失率比例为:

$$R_{h1} \geq 5R_{h2} \geq 400R_{h3}$$

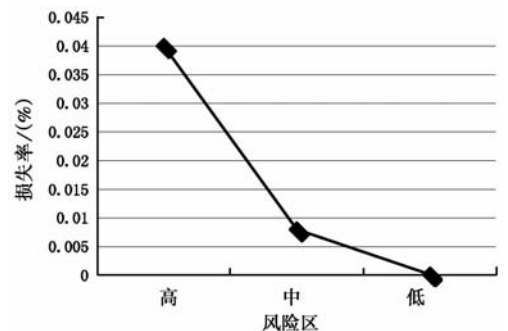


图8 米易县风险损失率统计图

Fig. 8 Statistics of landslide damage rate in Miyi county

式中,  $R_{h1}$  为高风险损失率;  $R_{h2}$  为中风险损失率;  $R_{h3}$  为低风险损失率。

### 6.3.2 损失评估

上述统计说明,高、中风险区与低风险区损失率差距很大。采用损失率  $R_h$  与各风险区面积相乘可获得风险损失预测范围:高风险区  $3\text{km}^2$ 、中风险区  $2.5\text{km}^2$ 、低风险区  $0.17\text{km}^2$ 。这些范围中的财产可能直接遭受滑坡损失。

## 6.4 风险综合评估 ( $\bar{R}$ )

研究区滑坡风险采用列表归类法进行综合评估(表2):

表2 米易县滑坡风险综合评估表

Table 2 Landslide risk integrative assessment in Miyi county

评估项目	风险分布 ( $R_S$ )	风险概率 ( $R_P$ )	风险损失 ( $R_h$ )
评估内容	高、中、低风险区面积分别占全区面积的3.6%、14.9%、81.6%	高、中、低风险区发生滑坡概率分别为: 0.91、0.70、0.32	直接受灾损失面积: 高风险区 $3\text{km}^2$ 、中风险区 $2.5\text{km}^2$ 、低风险区 $0.17\text{km}^2$
综合评估 ( $\bar{R}$ )	全区高风险区分布范围较少,低风险区占主要区域;在临界降雨条件下,高风险区发生滑坡的概率大,灾害损失的可能性大;全区 $5.67\text{km}^2$ 范围可能成为直接受损区域,占全区面积的0.027%。综合评估结论:米易县全县滑坡风险中等偏低,不成为滑坡重灾区		

## 7 结 语

(1)根据滑坡风险分类法,滑坡综合风险评估应该建立在3个评估阶段基础之上,即、滑坡风险分布评估、滑坡风险概率评估、滑坡风险损失评估。这3个评估阶段也可称为滑坡综合评估三要素。滑坡综合风险评估三要素基本形成较完整的综合体系;

(2)三要素中,分布评估是基础,需要给出风险的分布区域、面积、滑坡位置和数量。概率评估是条件,需要分析影响灾害的类型和可能性。损失评估是标准,需要提供评估区的灾害损失率,分析可能受灾的范围和影响程度;

(3)根据滑坡综合评估模型,可采用列表法按三要素内容分别给出评估结果,并得出综合评估结论。

## 参 考 文 献

[1] 高华喜. 滑坡灾害风险区划与预测研究综述[J]. 灾害学, 2010, **25**(2): 124~128.  
Gao Huaxi. Overview on landslide risk zoning and prediction re-

search. Journal of Catastrophology, 2010, **25**(2): 124~128.

[2] 乔建平, 王萌. 滑坡风险类型及层次链[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(1): 84~90.  
Qiao Jianping, Wang Meng. Types and hierarchical knowledge of landslide risks. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(1): 84~90.

[3] 乔建平. 滑坡风险区划理论与实践[M]. 成都: 四川大学出版社, 2010, 88~103.  
Qiao Jianping. Theories and Applications of Landslide Risk Zonation. Chengdu: Sichuan University Press, 2010, 88~83.

[4] 乔建平, 石莉莉, 王萌. 基于贡献权重法的滑坡风险区划[J]. 地质通报, 2008, **27**(11): 1787~1794.  
Qiao Jianping, Shi Lili, Wang Meng. Landslide risk zoning based on the contributing weight stack method. Geological Bulletin of China, 2008, **27**(11): 1787~1794.

[5] Qiao Jianping, Zhu Axing, Wu Caiyan, et al. Bottom factors applied to the zoning study of the risk level of landslides in the Three Gorges Reservoir area. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2006, **11**(4): 761~766.

[6] 乔建平, 杨宗佺, 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): 343~348.  
Qiao Jianping, Yang Zongji, Tian Hongling. Probability analysis based method for rainfall-induced landslide warning. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(3): 343~348.

[7] 许飞琼. 灾害损失评估及系统结构[J]. 灾害学, 1998, **13**(3): 80~83.  
Xu Feiqiong. Disaster loss evaluation and structure of the system. Journal of Catastrophology, 1998, **13**(3): 80~83.

[8] 常胜, 曾克峰. 恩施州地质灾害损失评估方法研究[J]. 湖北民族学院学报, 2005, **23**(4): 402~404.  
Chang Sheng, Zeng Kefeng. Method on evaluating loss of geological hazards in Enshi prefecture. Journal of Hubei Institute for Nationalities, 2005, **23**(4): 402~404.

[9] 谢全敏, 李道明, 翟鹏程. 滑坡次生灾害损失评估方法研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(5): 961~970.  
Xie Quanmin, Li Daoming, Zhai Pengcheng. Study on loss evaluation method of landslide secondary hazards. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(5): 961~970.

[10] 乔建平. 滑坡减灾理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1997, 95~96.  
Qiao Jianping. Theories and Applications of Landslide Mitigation. Beijing: Science Press, 1997, 95~96

[11] 吴红华. 灾害损失评估的灰色模糊综合方法[J]. 自然灾害学报, 2005, **14**(2): 115~118.  
Wu Honghua. Synthetic grey-fuzzy method for disaster losses assessment. Journal of Natural Disasters, 2005, **14**(2): 115~118.

[12] 潘晓红, 贾铁飞, 温家洪. 多灾害损失评估模型与应用评述[J]. 防灾科技学院学报, 2009, **14**(2): 77~82.  
Pan Xiaohong, Jia Tiefei, Wen Jiahong. The application and commentary of mult-hazard loss estimation model. Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology, 2009, **14**(2): 77~82.