

滑坡的易滑度分区及其概率预报模式

陈 剑, 杨志法, 刘衡秋

(中国科学院 地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室, 北京 100029)

摘要: 滑坡的发生主要由地形、地质和降雨三方面因素决定。基于区域地质-气象耦合分析的思路, 有可能提高区域性滑坡的预报精度。首先通过将降雨条件和地质环境条件相结合的方法, 提出一种新的滑坡概率预报模式, 利用数理统计分析, 提出利用最大 24 h 雨强和前 15 d 实效降雨量作为滑坡灾害发生的短期预报判据; 然后以重庆市区作为研究对象, 选择岩性组合、地形坡度、边坡形态、岩体结构和水文地质五大因素及其 21 种状态为预测变量, 利用信息量法进行了易滑度的分区; 最后, 对概率预报滑坡的可行性进行了实例分析和探讨。

关键词: 工程地质; 滑坡; 降雨; 易滑度分区; 信息量法; 概率预报

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)13-2392-05

LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY ZONING AND ITS PROBABILISTIC FORECAST

CHEN Jian, YANG Zhi-fa, LIU Heng-qiu

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: How to predict and forecast the landslide hazard effectively is always a key point for prevention from casualty and economic loss caused by landslides. Based on the coupling analysis of the geology and meteorology, it is possible to improve the precision of the landslide forecast. The occurrence of landslides is mainly controlled by the following three factors: topography, geology and rainfall. A new method of landslide probabilistic forecast is proposed considering the combination of geologic environment with weather conditions. The urban area of Chongqing, which is one of the cities with most serious landslides in China, is taken as the study example. Taking into account the geologic environmental factors such as slope gradient, slope shape, lithology combination, structures of rock mass and hydrologic geology, the landslide susceptibility zonation is conducted with the information model. The prediction criterion of landslides in each susceptibility subarea is established by two variable combinations: the maximum 24 hours rainfall and the antecedent effective precipitation of 15 days. Finally, the feasibility of the probabilistic forecast on landslides using weather prediction is discussed with an actual example.

Key words: engineering geology; landslide; rainfall; landslide susceptibility zoning; information model; probabilistic forecast

1 引 言

滑坡是世界上十大自然灾害之一, 是仅次于地

震和洪水的一种严重的地质灾害。我国因 70% 的地域为山区, 故滑坡发生密度大、频率高, 成为世界上受滑坡影响最严重的国家之一。如何对滑坡进行预测预报是滑坡防灾减灾的关键环节, 因为只有以

收稿日期: 2004-03-17; **修回日期:** 2004-05-24

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412701)

作者简介: 陈 剑(1976-), 男, 1998年毕业于昆明理工大学地质专业, 现为中国科学院地质与地球物理研究所博士研究生, 主要从事环境地质与地质工程方面的研究工作。E-mail: cjian@mail.igcas.ac.cn.

足够的精度成功地预测预报出滑坡的发生时间、地点、规模和发展趋势等,才能真正达到防灾减灾的目的。滑坡产生的地点主要是受地形地质条件控制。降雨,尤其是暴雨往往是导致滑坡发生的一个重要诱发因素。滑坡的气象预报预警研究正在越来越受到人们的关注,许多国家和地区已经开展滑坡气象预报的实际应用工作。在以往的降雨预报滑坡方面的研究中,主要是从降雨的角度入手,通过对降雨因子(雨强、雨量和雨时)与滑坡发生的关系进行分析,从而得出经验的滑坡预报模式^[1-3]。但由于一般很少考虑地形地质的因素,因此滑坡预报的可靠性和准确性无疑会大大降低。基于区域地质-气象耦合分析的滑坡预报,是对突发性滑坡进行预报预警的一种行之有效的方法^[4,5]。本文以重庆市作为研究实例,利用信息量法进行了易滑度的分区;通过结合降雨条件和地质环境条件进行分析的方法,讨论了利用概率预报滑坡的可行性。

2 易滑度的概念

滑坡发生的因子可以分为两种类型:一类为环境因子,如地质、坡度、坡向、高程和土壤性质等;另一类为诱发因子,如暴雨、地震和人工开挖等。但区域性滑坡作为一种自然现象,决定其发生的主导作用因素是地形、地质和降雨^[5]。由于滑坡灾害具有明显的地域性特点,受不同的地形和地质因素影响,在不同的地区滑坡发生需要的临界降雨量和降雨强度不同,有时甚至会差异很大;在相同降雨条件下,边坡的稳定性也是各不相同的。稳定性差的边坡容易产生滑坡,而稳定性好的边坡不易滑坡。因此,要通过降雨对滑坡进行预报,必须要考虑滑坡的区域地质环境特征。

易滑度概念主要是针对由降雨诱发滑坡的地区而提出来的一个灾害评价指标,其定义为:在一定降雨条件下,具有某种地质环境因素(地形坡度、岩性组合、岩体结构和水文地质等)的边坡可能发生滑坡的难易程度。根据边坡的地形地质特征,可将单个边坡的易滑度定为 4 级:大(S_1)、较大(S_2)、中等(S_3)、小(S_4),详见表 1。边坡的易滑度指标反映了边坡自身的稳定性以及降雨诱发滑坡的可能性。通过对滑坡预报区进行易滑度的分区,无论从空间上还是从时间上都有可能提高降雨预报滑坡的精度。

表 1 易滑度的分级标准

Table 1 Grading standard of landslide susceptibility

判别因子级别	地质条件				地形条件	
	岩性组合	岩体结构	潜在的滑动面	水文地质泉水流量 $F/(L \cdot s^{-1})$	边坡角 $\alpha(^{\circ})$	坡高 h/m
小(S_4)	厚层砂砾岩	块状结构	无	<0.1	<10	<20
中(S_3)	中薄层泥页岩	层状结构	不显	0.1~0.5	10~20	20~40
较大(S_2)	中薄层砂岩 夹泥页岩	碎裂结构	较显	0.5~1.0	20~30	40~60
大(S_1)	松散堆积层	松散结构	明显	1.0	30	60

3 信息量法评价

在综合考虑边坡的地形坡度、地层岩性、岩体结构、水文地质和植被情况等因素的基础上,根据历史的滑坡资料统计分析,可以利用信息量法对滑坡预报区域进行易滑度的分区。

3.1 信息量法的基本原理和方法

Shannon 把信息定义为“随机事件不确定性的减少”,并提出了信息量的概念及信息熵的数学公式。信息量的概念已被广泛应用于滑坡灾害的空间预测和危险性评价等研究^[6-8]。滑坡灾害与地形地质等环境因素密切相关,信息量法的原理是利用滑坡的易滑度影响因素进行类比,即具有类似边坡的地形、地质因素的斜坡具有类似的易滑度。对于滑坡而言,在不同的地质环境中存在一种最佳因素组合。因此,对于区域滑坡预报要综合研究最佳因素组合,而不是停留在单个因素上。每一种因素对边坡失稳所起作用的大小,可用信息量来表示,即

$$I_{A_j \rightarrow B} = \ln \frac{P(B/A_j)}{P(B)} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $I_{A_j \rightarrow B}$ 为因素 A 在 j 状态显示事件 B 发生的信息量, $P(B/A_j)$ 为因素 A 在 j 状态下实现事件 B 的概率, $P(B)$ 为事件 B 发生的概率。

在具体计算中,通常将总体概率改用样本频率进行估算,于是式(1)可转化为

$$I_{A_j \rightarrow B} = \ln \frac{N_j/N}{S_j/S} = \ln \left(\frac{S/N_j}{N/S_j} \right) \quad (j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中: N_j 为具有因素 A_j 出现滑坡的单元数, N 为研究区内已知滑坡所分布的总数, S_j 为因素 A_j 的

单元数， S 为研究区单元总数。

3.2 模型的建立

以重庆市区作为实例研究对象。重庆市区地质环境复杂，褶皱、节理比较发育。该区出露的地层主要为中侏罗统砂岩、泥岩，呈紫红色，常常组成向斜构造，地层产状平缓。由于这些特定的地形地质因素，加上降雨充沛的湿润性气候，决定了该地区是我国滑坡灾害的重灾区之一。

根据重庆市区 1 : 10 000 的地形图和工程地质图，以地形边界和岩性组合特征作为单元的划分依据，将该区划分为 315 个单元。根据对该区的降雨型滑坡调查资料和滑坡地形地质因素的分析，选择了岩性组合、地形坡度、边坡形态、岩体结构和水文地质五大因素及其 21 种状态为预测变量(见表 2)。

表 2 易滑度分区预测变量

Table 2 Predicting variables for the susceptibility zoning

因素	状态	变量
岩性组合	松散堆积层	x_1
	砂泥岩互层	x_2
	中厚层泥岩	x_3
	中厚层砂岩	x_4
地形坡度/(°)	0 ~ 10	x_5
	11 ~ 20	x_6
	21 ~ 30	x_7
	31 ~ 40	x_8
	> 40	x_9
边坡形态	直线型	x_{10}
	凸型	x_{11}
	凹型	x_{12}
	复合型	x_{13}
岩体结构(节理密度/(条·m ⁻¹))	0 ~ 0.60	x_{14}
	0.61 ~ 1.20	x_{15}
	1.21 ~ 1.80	x_{16}
	> 1.80	x_{17}
水文地质(泉水流量/(L·s ⁻¹))	0 ~ 0.1	x_{18}
	0.1 ~ 0.5	x_{19}
	0.5 ~ 1.0	x_{20}
	> 1.0	x_{21}

3.3 易滑度分区

通过信息模型预测，根据划分单元信息量的大

小进行预报区易滑度的分级，共分为 4 级(见表 3)。信息量值越大表示在降雨条件下发生滑坡可能性越大；信息量值越小，表示在降雨条件下属于稳定的单元。

表 3 信息量法的易滑度等级划分

Table 3 Grade classification of the susceptibility with the information model

易滑度等级	大(S_1)	较大(S_2)	中等(S_3)	小(S_4)
信息量 I	$I > 0.50$	$0 < I \leq 0.50$	$-1.00 < I \leq 0$	$I \leq -1.00$

根据单元划分易滑度的等级，进行分区成图，重庆市中区的易滑度分区如图 1 所示。

4 概率预报模式

由于滑坡发生的复杂性，滑坡现象一般被看作是一种随机事件，描述这种随机事件的一般数学模型是概率模型。考虑区域性滑坡主要是在强降水条件下发生，因此，可以通过建立某种条件概率函数关系对滑坡作出短期预报^[9]。

4.1 临界雨量指标的确定

对于边坡来说，其岩土体的含水量必须达到某一界限值才可能在一次降雨过程中发生滑坡。因此，在一定的地质条件下，降雨型滑坡的发生时间实际上是由降雨强度和前期降雨量共同决定的^[10, 11]。考虑到降雨型滑坡的发生时间经常具有一定的滞后性，因此，降雨强度可以通过滑坡发生前 48 h 内的最大 24 h 雨强来确定。由于前期岩土体含水量测定实际比较困难，往往利用前期降雨量来进行折算。根据当地地区的纬度和雨季的日照、蒸发、植被状况和相对湿度等，采用以下公式计算前期(15 d)的有效雨量 K_a ，即

$$K_a = \sum_{t=2}^{16} R_t K^{(t-1)} \quad (3)$$

式中： R_t 为滑坡前 t 日的降雨量； K 为含水量衰减系数，取 0.65 ~ 0.85； $t = 2, 3, \dots, 16$ d。

4.2 滑坡预报模型

为了提高区域滑坡预报的精度，在考虑降雨条件这一诱发因素的同时，需要考虑边坡的地形、地质等影响因素。根据这一预报思路，在对预报区进

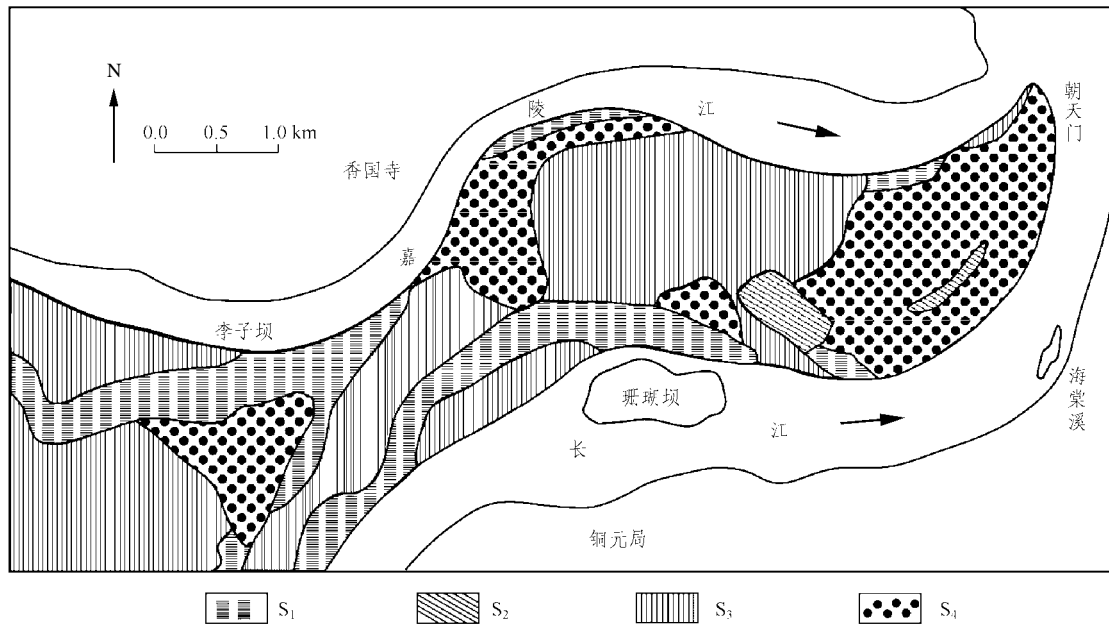


图 1 重庆市中区的易滑度分区图

Fig.1 Landslide susceptibility zonation map in the urban area of Chongqing City

行易滑度分区后，将易滑度等级为大和较大的地区分别作为 1 和 2 级预报区。在降雨条件下各级预报区发生滑坡的概率可表示为

$$P(L) = \sum_{i=1}^n P(L/R_i)P(R_i) \quad (4)$$

式中： $P(L)$ 为预报区发生滑坡的概率， $P(L/R_i)$ 为预报区在某种降雨条件下发生滑坡的概率($i = 1, 2, 3, 4$)， $P(R_i)$ 为某种降雨条件的出现概率。

当 $i=1$ 时，预报日雨量为大雨($25 \text{ mm} < R_1 < 50 \text{ mm}$)；当 $i=2$ 时，预报日雨量为暴雨($50 \text{ mm} < R_2 < 100 \text{ mm}$)；当 $i=3$ 时，预报日雨量为大暴雨($100 \text{ mm} < R_3 < 200 \text{ mm}$)；当 $i=4$ 时，预报日雨量为特大暴雨($R_4 > 200 \text{ mm}$)。这里， $P(L/R_i)$ 可以通过区域历史滑坡资料和数理统计等方法确定； $P(R_i)$ 可以利用当地气象部门的降雨预报确定。

5 实例分析

通过对重庆市易滑度大的地区降雨诱发滑坡事件的前 48 h 内的最大 24 h 雨强和前 15 d 有效降雨量作曲线拟合，利用复相关系数进行筛选，得出 1 级预报区发生大型滑坡(体积大于等于 $1 \times 10^5 \text{ m}^3$)时的回归预报判据，其回归方程为

$$y = -1.57x + 158.70 \quad (5)$$

式中： y 为最大 24 h 雨强， x 为前 15 d 有效降雨量。

根据以上统计分析结果，在无前期雨量的情况下，重庆市易滑度大的地区降雨诱发大型滑坡的临界雨强可以定为 160 mm/d 。

1982 年 7 月 17 日在重庆市云阳县境内发生了区域性大型滑坡，以此作为实例分析通过概率预报模型对滑坡进行预报的可行性。1982 年 7 月 17 日的实际降水量为 125.8 mm ，根据降雨记录计算 7 月 17 日前 15 d 有效降雨量为 9.2 mm ，由式(5)得出该区发生大型滑坡的临界降雨量为 144.3 mm 。将未来 24 h 的预报降雨量在给定的雨量区间内(即不同的降雨条件 i)视为一连续型随机变量，假定其服从雨量区间上的均匀分布，通过概率计算可以确定预报区未来 24 h 在大暴雨条件下发生大型滑坡的概率 $P(L/R_3)$ 为 55.7% ，在无雨条件下可认为不发生滑坡。假如通过气象部门预报该区 7 月 17 日的大暴雨降水概率 $P(R_3)$ 为 95% ，零降水概率为 5% ；依据概率预报式(4)可以得出该区 7 月 17 日发生大型滑坡的概率为 52.9% 。

6 结 论

为了提高降雨预报滑坡的精度，在考虑降雨条件这一诱发因素的同时，必须考虑边坡的地形、地质等影响因素。根据这一预报思路，利用信息量法

对重庆市滑坡预报区进行了易滑度的分区。将降雨条件和地质环境条件相结合,通过历史滑坡资料分析、长期监测和数理统计等方法获得各级预报区在某种降雨条件下诱发滑坡发生的概率,并由当地气象部门确定未来 24 h 某种降雨条件出现的概率。因此,利用概率预报模型可以预报未来 24 h 发生滑坡的可能性,并可根椐滑坡发生的概率进行预警分级,将预警信息及时发布,从而达到有效防灾避灾的目的。基于易滑度分区的滑坡概率预报模式,可望提高滑坡预报的实时性和准确性。

致谢 本文研究得到中国科学院地质与地球物理研究所孙广忠先生的指导和帮助,在此表示感谢。

参考文献(References) :

- [1] David K K, Raymond C W, Robert K M, et al. Real-time landslide warning during heavy rainfall[J]. *Science*, 1987, 238 : 921 – 925.
- [2] 陈百炼. 降水诱发地质灾害的气象预警方法研究[J]. *贵州气象*, 2002, 26(4) : 4 – 7.(Chen Bailian. Research on weather warn forecast method of the rainfall induced geological hazard[J]. *Journal of Guizhou Meteorology*, 2002, 26(4) : 4 – 7.(in Chinese))
- [3] Dai F C, Lee C F. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides[J]. *Engineering Geology*, 2001, 59 : 253 – 266.
- [4] 刘传正. 突发性地质灾害的监测预警问题[J]. *水文地质工程地质*, 2001, 2(4) : 1 – 4.(Liu Chuazheng. Monitoring and warring problem of abrupt geohazards[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2001, 2(4) : 1 – 4.(in Chinese))
- [5] 杨志法, 陈 剑. 关于滑坡预测预报方法的思考[J]. *工程地质学报*, 2004, 12(2) : 118 – 123.(Yang Zhifa, Chen Jian. Thoughts on the prediction or forecast of landslides[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, 12(2) : 118 – 123.(in Chinese))
- [6] 吴益平, 唐辉明. 滑坡灾害空间预测研究[J]. *地质科技情报*, 2001, 20(2) : 87 – 90.(Wu Yiping, Tang Huiming. Spatial prognosis studying of landslide hazard[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20(2) : 87 – 90.(in Chinese))
- [7] 阮沈勇, 黄润秋. 基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. *成都理工学院学报*, 2001, 28(1) : 89 – 92.(Ruan Shenyong, Huang Runqiu. Application of GIS-based information model on assessment of geological hazards risk[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28(1) : 89 – 92.(in Chinese))
- [8] 张桂荣, 殷坤龙, 刘传正, 等. 基于 GIS 的陕西省旬阳地区滑坡灾害危险性区划[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2003, 14(4) : 39 – 43.(Zhang Guirong, Yinkunlong, Liu Chuazheng, et al. The hazard zoning of landslide supported by GIS in Xunyang region of Shaanxi Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2003, 14(4) : 39 – 43.(in Chinese))
- [9] 谭万沛, 王成华. 暴雨泥石流滑坡的区域预测与预报[M]. 成都 : 四川科学技术出版社, 1994.(Tan Wanpei, Wang Chenghua. *Regional Prediction and Forecast of Rainfall-induced Slide-debris Flows*[M]. Chengdu : Sichuan Science and Technology Press, 1994.(in Chinese))
- [10] 钟荫乾. 滑坡与降雨关系及其预报[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1998, 9(4) : 81 – 86.(Zhong Yinqian. Landslide related to rainfall and its forecasting[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998, 9(4) : 81 – 86.(in Chinese))
- [11] 胡明鉴, 汪 稔, 张平仓. 蒋家沟流域松散砾石土斜坡滑坡频发原因与试验模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(12) : 1 831 – 1 834.(Hu Mingjian, Wang Ren, Zhang Pingcang. Cause of frequent occurrence of gravel slope landslide and experiment simulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(12) : 1 831 – 1 834.(in Chinese))