

# 降雨型滑坡时空预报新方法\*

丁继新\*\* 杨志法 尚彦军 周圣华 尹俊涛

(① 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012; ② 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; ③ 中南大学地学与环境工程学院, 长沙 410083)

**摘要** 地质条件和降雨是引起重庆地区山体滑坡的两个最主要条件. 文中在分析降雨型滑坡形成条件的基础上, 提出了将地质条件和降雨因素进行分级叠合的降雨型滑坡时空预报新方法. 首先, 利用多因素相互作用关系矩阵, 对某个地区或者某个边坡所在位置的地质条件进行半定量的评价和分级. 然后, 根据日最大降雨量和降雨过程的总降雨量, 对该地区降雨的严重程度进行分级. 最后将“地质条件影响因子”和“降雨影响因子”进行分级叠合, 得到了“滑坡易滑程度判别因子”, 并据此将滑坡按照其易滑度分为滑坡极易发生、滑坡易发生、滑坡不易发生和滑坡基本不发生 4 级. 通过对某个地区的一些危险边坡进行地质勘察, 结合比较准确的天气预报, 可以对该地区的降雨型滑坡进行较为准确的时空预测预报. 以鸡扒子滑坡为例, 验证了利用“双因素”分级叠合方法进行降雨型滑坡时空预报的可靠性和可行性.

**关键词** 降雨型滑坡 地质条件 降雨 双因素 分级叠合 相互作用关系矩阵 时空预报

滑坡灾害对人类社会的影响已经成为一个不可忽视的环境难题, 按危害程度排序, 滑坡灾害已成为仅次于地震的第二大自然灾害<sup>[1]</sup>. 滑坡是指山体边坡上的部分岩体、土体或二者的混合体在内外动力作用下沿着某一滑动面向下滑动, 是一种严重的岩土体失稳现象. 由于降雨原因引起的滑坡被称为降雨型滑坡. 影响边坡稳定性的因素总体上可以分为两类: 地质条件和外部触发因素. 地质条件主要包括边坡的岩土体结构、岩性、地形地貌、地质构造、水文地质条件和地应力等, 是滑坡发生的基本物质条件和

内因; 外部触发因素主要包括坡体自重、降雨、温度变化、地震、外部荷载、边坡开挖、人工爆破等, 为滑坡发生提供了外动力条件. 绝大多数滑坡都是在特定地质条件和外部触发因素共同作用下发生的.

滑坡是在许多内外动力因素相互作用、相互耦合下产生的, 形成机制极其复杂, 并且由于其突发性特征以及在运动规律上所表现出的不确定性, 有关预测预报方面的研究还远没有达到较高的精度<sup>[2]</sup>. 为了能进一步认识滑坡的形成机理, 提高滑坡的预测预报水平, 国内外的许多学者从不同的角度出发, 建立

收稿日期: 2005-07-14; 接受日期: 2005-09-27

\* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号: 2002CB412701)和中国科学院知识创新工程项目(批准号: KZCX3-SW-134)资助

\*\* E-mail: dingjixin@hotmail.com dingjixin-igcas@126.com

了一些非常有用的滑坡分析模型,来尝试着对滑坡进行预测预报。如日本学者斋藤迪孝于 1968 年借助于实验及实践经验分析,提出了斋藤迪孝滑坡预报模型<sup>[3]</sup>。秦四清等根据滑坡形成的内外动力因素相互作用的非线性特征以及混沌理论,建立了滑坡预报的非线性模型<sup>[4-6]</sup>。王在泉等学者根据位移的时间序列对滑坡信息进行提取,建立了 GM 和 Verhulst 滑坡统计预报模型<sup>[7,8]</sup>。除此之外,一些学者还从概率论、模糊数学和信息量模型等方面对滑坡预报模型进行了深入研究,并取得了一定的进展<sup>[9-12]</sup>。上述各种滑坡预报模型的建立极大地推进了滑坡预报研究的进展,为更加准确地预报滑坡奠定了坚实的基础,但离真正的滑坡时空预报还有很长的一段路要走。

通过统计分析方法或者专家打分方法来确定地质条件和降雨因素对某个滑坡的具体影响程度,但这两种方法都存在着一定的不足之处。统计分析方法可以根据滑坡的历史资料来分析某种因素在滑坡产生过程中所起的作用,但往往只是局限于单因素分析,却没有综合考虑两种甚至多种因素的共同作用。如任幼蓉在研究地质灾害的易发程度时,采用统计分析的原理,通过单因素分析方法,将地质环境复杂程度和降雨量的权重分别取 0.618 和 0.382<sup>[13]</sup>。如果将这种方法用于分析滑坡灾害,则无法反映出不同影响因素之间的相互作用和相互耦合对滑坡的影响,因此,也就无法反映出滑坡形成的真正原因;而专家的打分方法则包含了过多的个人主观因素,即使给同一个滑坡的影响因素进行打分,不同的专家会从不同的角度进行分析,从而会得出不同的分值。因此,上述两种方法都存在一定的局限性,不适于大范围推广应用。

本文在前人研究的基础上,以重庆地区的滑坡为研究对象,提出了一种基于“双因素”分级叠合的降雨型滑坡预报方法。由于该方法不仅考虑了滑坡发生的内因——地质条件,而且考虑了重庆地区滑坡的一个最主要的外在诱发因素——降雨,研究了该地区的山体边坡(尤其是危险边坡)在某种特定地质条件和降雨因素共同作用下的易滑程度。该研究不仅有利于深入理解滑坡的生成机制,而且可以大大提高滑坡的时空预报精度,对减灾防灾具有积极的意义。

## 1 滑坡诱发因素分析

滑坡的形成机制极其复杂,是在多种内外动力因素共同作用下发生的。作者通过对重庆市部分区县县的滑坡情况进行统计分析,发现地质条件和降雨是控制重庆地区山体滑坡发生的两个最主要因素。

### 1.1 地质条件

重庆市地处东经 105°17′~110°11′,北纬 28°10′~32°13′,覆盖了三峡库区 80%的区域,是我国滑坡的多发区和重灾区。通过对重庆地区所属的重庆市区、涪陵、万县、云阳和奉节 5 个地区 129 个滑坡灾害进行统计分析,发现该地区滑坡的分布具备以下特征:

(1) 87%的滑坡发育在坡脚为 15°~50°之间的山体斜坡上,其中 81%发育在坡脚为 20°~35°之间的斜坡上。79%滑坡发生在坡高为 130~200 m 之间的山坡上。65%的滑坡为顺层滑坡,35%的为反倾滑坡。

(2) 岩质滑坡数量占滑坡总数的 22%,但单个滑坡体积都比较大,一般都在 10 万立方米到数百万立方米;土质滑坡数量占滑坡总数的 78%,但单个滑坡体积相对较小,一般都在几千立方米到 10 万立方米之间。

(3) 大型滑坡多数发育在砂泥(页)岩互层或泥(页)岩、泥灰岩及薄层灰岩等相对软弱的层组之中。

(4) 90%的滑坡发生在构造活动比较强烈的部位,如断裂带、褶皱轴部、近向斜槽部及构造线交汇处等。断层和节理裂隙发育的地方滑坡较多,同时滑坡多分布于河流或溪谷的凹岸。

(5) 地下水发育并且排泄不畅的地方滑坡比较发育,并且滑坡明显受到地下水作用的影响,滑坡体前缘或剪出口一带常有泉水露头出现。

滑坡的上述分布特征表明,滑坡的形成明显与地形地貌条件、岩性、断层和节理、新构造运动、岩层产状、河流侵蚀、地下水的作用以及它们之间的相互作用和相互耦合有密切的关系。

### 1.2 降雨

研究表明,在具备了地势和地质条件后,降雨尤其是暴雨在很大程度上是山地滑坡发生的最主要激发因素。根据调查统计,甘肃省陇南武都地区 95%的滑坡、贵州六盘水地区 94%的滑坡都发生在雨季<sup>[14]</sup>。

因此可以说,在诱发滑坡的诸多外部营力中,降雨尤其是大量的降雨或暴雨是触发滑坡的最主要因素之一。降雨对滑坡的触发作用主要体现在:在降雨过程中,地表水进入坡体,增加了坡体的自重;降雨由地表进入地下,转变成成为地下水,浸泡软化滑动面,降低了坡体的抗剪强度;边坡岩土体的干湿交替变化导致岩土体开裂,产生大量的节理裂隙;增大了孔隙水压力,使处于极限平衡状态的坡体发生滑动。

对于边坡来说,边坡岩土体的含水量必须达到某一界限值,才可能在某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某次降雨的降雨强度和降雨过程的总降雨量共同决定的。

为了研究降雨与滑坡之间的关系,本文搜集了重庆城区、涪陵和万县3个地区多年的滑坡和降雨资料。通过研究发现,滑坡与最大日降雨量(表征了降雨强度)和降雨过程的总降雨量关系最为密切。如1982年7月15~30日间,万县地区的云阳县出现了3次暴雨过程,降雨主要集中在15~17日,19~22日,26~30日三个降雨过程,日最大降雨量达到了283 mm,整个降雨过程的总降雨量高达632 mm。此次暴雨导致该地区的云阳县发生了2万多个崩塌滑坡,整个万县市地区各县(区)发生了大小崩滑达8万之多。1993年7~8月,万县地区再次出现了暴雨过程,7和8月份两个月的降雨量多达690 mm,占当年降雨总量的43.7%。此次暴雨过程在万县市各县(区)再次触发崩塌体1.1万处,直接经济损失高达1.8亿元。对涪陵地区的25个滑坡、重庆城区的27个滑坡和万县城区的36个滑坡的详细分析表明,在这些滑坡中,由暴雨诱发的滑坡分别占滑坡总量的84%,78%和83%。在这些降雨型滑坡中,大多数滑坡都发生在降雨过程的中后期或滞后几天,其中95%的滑坡发生在暴雨开始10 h后,86%的滑坡发生在暴雨开始24 h后,81%的滑坡发生在24~72 h之间,即暴雨开始后的第二、第三天中。滑坡滞后的时间还与滑坡体所处的地质条件、滑坡体本身的性质以及降雨的强度等多种因素有关,但滞后时间一般不会超过10 d。需要注意的是,在地质条件很差的地方,如果降雨量在短时间或者24 h内达到150 mm甚至200 mm以上,则很容易

在暴雨开始的当天就会发生滑坡。

由此可见,降雨尤其是暴雨是重庆地区滑坡发生的一个重要诱发因素,而对滑坡的发生影响最大的是最大日降雨量和整个降雨过程的总降雨量。

## 2 “双因素”分级叠合与降雨型滑坡时空预报

滑坡的气象预报预警研究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。但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,得出经验的滑坡预报模式<sup>[15~19]</sup>,或者通过多年的历史资料,确定某个地区触发滑坡的降雨量和降雨强度阈值<sup>[20,21]</sup>。由于这些预报模式中很少考虑地质地貌因素,因此滑坡预报的可靠性和准确性不是很高。

### 2.1 多因素相互作用关系矩阵

由于地质条件中涉及到了地形地貌、岩性、断层和节理、新构造运动、河流侵蚀、地下水等多种影响因子以及它们之间的相互作用和相互耦合,不仅涉及的因素多,而且其相互作用和相互耦合机制极其复杂,常规方法很难确定这些影响因子与地质条件的好坏程度之间的具体关系。因此,本文中引入多因素相互作用关系矩阵来半定量地评价多种影响因素共同作用下某个地区或者某个边坡所在位置的地质条件。

多因素相互作用关系矩阵是Hudson创立的岩石工程系统(RES)方法<sup>[22~25]</sup>的核心,通过它不仅确定每个影响因素在整个系统中所起的作用,而且还考虑到了不同影响因素之间的相互作用对整个系统的贡献。这种方法特别适用于解决地质条件定量评价之类的复杂问题。

通过研究可知,在地质条件中,地形地貌、岩性、断层和节理、新构造运动、河流侵蚀和地下水与重庆地区的滑坡关系最为密切,因此,本文就选择这6种影响因子组成相互作用关系矩阵。在这个关系矩阵中,每行的总和表示位于该行主对角线上的影响因子作用于其他影响因子而对地质条件产生的影响(称

为该因子的影响权重), 放在表 1 中最右侧一列; 每列的总和表示位于该列主对角线上的影响因子受其他影响因子作用而对地质条件产生的影响(称为该因子的受影响权重), 放在表 1 中最下侧一行。

为了定量地描述不同滑坡影响因子及其相互作用与地质条件之间的关系, 文中按照影响因子及其

相互作用对地质条件的影响程度, 将其划分为 4 级, 并分别用 0~3 来进行定量的表示: 0 表示没有影响或基本上没有影响; 1 表示有一定的影响, 但影响程度不大; 2 表示有强烈的影响; 3 表示有极其强烈的影响。对角线元素的值表示该影响因素本身对地质条件的影响, 其取值情况如表 2 所示。

表 1 地质条件定量评价相互作用关系矩阵

地形地貌	V <sub>1,2</sub>	V <sub>1,3</sub>	V <sub>1,4</sub>	V <sub>1,5</sub>	V <sub>1,6</sub>	$\sum_{j=1}^6 V_{1,j}$
V <sub>2,1</sub>	岩性	V <sub>2,3</sub>	V <sub>2,4</sub>	V <sub>2,5</sub>	V <sub>2,6</sub>	$\sum_{j=1}^6 V_{2,j}$
V <sub>3,1</sub>	V <sub>3,2</sub>	断层和节理	V <sub>3,4</sub>	V <sub>3,5</sub>	V <sub>3,6</sub>	$\sum_{j=1}^6 V_{3,j}$
V <sub>4,1</sub>	V <sub>4,2</sub>	V <sub>4,3</sub>	新构造运动	V <sub>4,5</sub>	V <sub>4,6</sub>	$\sum_{j=1}^6 V_{4,j}$
V <sub>5,1</sub>	V <sub>5,2</sub>	V <sub>5,3</sub>	V <sub>5,4</sub>	河流侵蚀	V <sub>5,6</sub>	$\sum_{j=1}^6 V_{5,j}$
V <sub>6,1</sub>	V <sub>6,2</sub>	V <sub>6,3</sub>	V <sub>6,4</sub>	V <sub>6,5</sub>	地下水	$\sum_{j=1}^6 V_{6,j}$
$\sum_{i=1}^6 V_{i,1}$	$\sum_{i=1}^6 V_{i,2}$	$\sum_{i=1}^6 V_{i,3}$	$\sum_{i=1}^6 V_{i,4}$	$\sum_{i=1}^6 V_{i,5}$	$\sum_{i=1}^6 V_{i,6}$	$\sum_{i,j=1}^6 V_{i,j}$

表 2 影响因子分级赋值表

地形地貌		岩性		断层和节理	
坡度范围/(°)	赋值	硬度	赋值	密集程度	赋值
0 ≤ S < 10	0	软弱	0	稀疏	0
10 ≤ S < 30	1	较软	1	中等	1
30 ≤ S < 50	2	坚硬	2	密集	2
S ≥ 50	3	极坚硬	3	极密集	3
新构造运动		河流侵蚀		地下水	
平均运动速度 V/mm · a <sup>-1</sup>	赋值	侵蚀强度	赋值	侵蚀程度	赋值
V < 5	0	较弱	0	一般	0
5 ≤ V ≤ 10	1	中等	1	中等	1
10 ≤ V ≤ 15	2	强烈	2	强烈	2
V > 15	3	极强烈	3	极强烈	3

采用(1)~(3)式来确定某个地区或者边坡所在位置的地质条件:

$$S = \sum_{i=1, j=1}^n V_{i,j}, \tag{1}$$

$$F = S_{\max}, \tag{2}$$

$$FEG = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{(2F)} \times 100\%, \tag{3}$$

式中, n 表示影响因子的个数(这里为 6), t 表示一个地区内边坡点的个数, 其取值范围为 1~n. S 是整个相互作用关系矩阵中所有元素之和, 表征了多种因素及

其之间相互作用对地质条件影响的强烈程度;  $F$  表示当相互作用关系矩阵中所有的  $V_{i,j}=3$  (即影响因子之间的相互作用对某个地区或某个位置处的地质条件有极其强烈的影响) 时, 整个矩阵中所有元素之和。  $FEG$  表征了某个地区地质条件的好坏程度, 称为“地质条件评价因子”。

某个地区或者边坡所在位置的“地质条件评价因子”  $FEG$  越大, 表明构成该处地质条件的各种影响因子及其之间的相互作用对地质条件的影响越强烈, 因此, 该处的地质条件就越差。

## 2.2 “双因素”分级叠合方法

本文通过“双因素”(即地质条件和降雨)分级叠合方法来研究地质条件和降雨与滑坡之间的关系。这种方法避开了直接分析每一种因素对滑坡的具体影响程度, 而是综合考虑二者的共同影响。可以通过(4)式来研究“双因素”——地质条件和降雨与滑坡之间的关系:

$$F_{LHP} = F_G \cdot F_R, \quad (4)$$

其中:  $F_G$  是地质条件对滑坡影响程度的量化表示, 称为“地质条件影响因子”;  $F_R$  是降雨对滑坡影响程度的量化表示, 称为“降雨影响因子”;  $F_G$  和  $F_R$  统称为“滑坡触发因子”;  $F_{LHP}$  表示两种滑坡触发因子对滑坡总的的影响程度, 由于它表征了滑坡的易滑(或稳定)程度, 因此将其称为“滑坡易滑程度判别因子”。

为了定量地描述各滑坡触发因子与滑坡之间的关系, 将地质条件按照其好坏程度、降雨按照其严重程度进行了分级, 并分别对与之相应的两种滑坡触发因子进行了赋值。通过对重庆地区影响滑坡灾害的主要地质条件进行统计分析, 采用多因素相互作用关系矩阵方法对地质条件进行分级。通过对重庆

市区、涪陵和万县的降雨资料以及 88 个滑坡历史资料进行统计分析, 采用概率方法对降雨进行分级。按照地质条件的好坏程度将其分为: 极好、好、中等、差、极差 5 级, 与之相应, “地质条件影响因子”  $F_G$  的取值也分别从 1~5。由于日最大降雨量和降雨过程的总降雨量是影响滑坡的两种最主要降雨指标, 因此本文中使用时最大降雨量和暴雨过程的总降雨量来表征降雨的严重程度, 在此基础上, 将降雨分为: 极轻微、轻微、中等、严重和极严重 5 级, 与之相应, “降雨影响因子”  $F_R$  的取值也从 1~5。  $F_G$  和  $F_R$  的值由 1~5 分别表示这两种滑坡触发因子对滑坡的影响程度由极弱到极强。各滑坡触发因子的分级和赋值如表 3 所示。

## 2.3 降雨型滑坡的时空预报

通过将这 2 种滑坡触发因子——“地质条件影响因子”和“降雨影响因子”进行分级叠合, 可以详细地分析这 2 种影响因子共同作用下滑坡的易发性, 即根据“滑坡易滑程度判别因子”  $F_{LHP}$  的值, 可以确定某个地区或某个滑坡的易滑程度, 从而可以对滑坡发生的可能性进行预测预报。本文根据滑坡的易滑程度将其分为 4 级: 滑坡极易发生(IV)、滑坡易发生(III)、滑坡难于发生(II)和滑坡几乎不发生(I)。

为了进行统计分析, 本文详细地研究了重庆地区的 24 个有降雨因素参与的滑坡, 并对每个滑坡建立了多因素相互作用关系矩阵。通过研究“地质条件影响因子”  $F_G$  与滑坡发生概率之间的关系, 发现当  $F_G < 3$  时, 也就是在好和极好的地质条件下, 只有 1 个滑坡发生, 滑坡发生概率为 4.2%; 当  $F_G \geq 3$  时, 滑坡发生概率为 95.8%, 如图 1 所示。这说明, 绝大部分滑坡是在地质条件极差、差和中等条件下发生的,

表 3 “滑坡触发因子”分级和赋值表

地质条件	“地质条件评价因子” $FEG/\%$	“地质条件影响因子” $F_G$ 值	降雨	日最大降雨量 /mm	降雨过程总降雨量 /mm	“降雨影响因子” $F_R$ 值
极好	0~20	1	极轻微	0~20	小于 50	1
好	20~40	2	轻微	20~50	50~100	2
中等	40~60	3	中等	50~100	100~150	3
差	60~80	4	严重	100~150	150~250	4
极差	80~100	5	极严重	150 以上	250 以上	5

在地质条件好和极好的情况下，很少会发生滑坡。通过研究“降雨影响因子” $F_R$ 与滑坡发生次数之间的关系，发现其中也只有 1 个滑坡发生在极轻微和轻微降雨条件下(即 $F_R$ 等于 1 和 2 的情况下)，而有 23 个滑坡发生在降雨极严重、严重和中等情况下(即 $F_R \geq 3$  的情况下)，如图 2 所示。因此，在计算“滑坡易滑程度判别因子” $F_{LHP}$ 时，只考虑 $F_G \geq 3$  和 $F_R \geq 3$  的情况，而将 $F_{LHP} < 9$  的情况(即 $F_G < 3$  和 $F_R < 3$  的情况)，作为滑坡基本不发生(I)的情况。此时，按照公式(2)， $F_{LHP}$ 的取值只有 9, 12, 15, 16, 20 和 25 六种情况。通过研究满足 $F_G \geq 3$  和 $F_R \geq 3$  情况的 23 个滑坡，发现 $F_{LHP}$ 与滑坡发生次数及发生概率之间存在着如表 4 所示的关系。

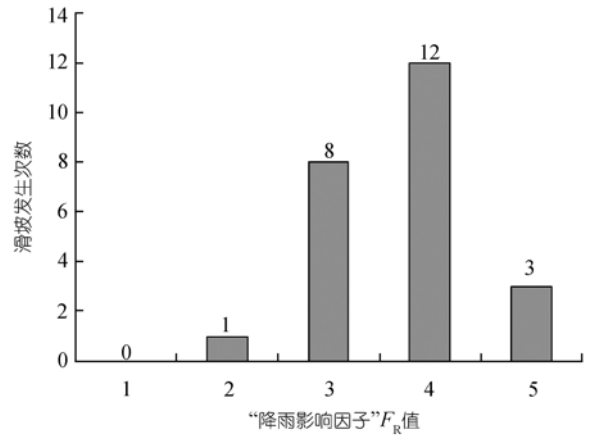


图 2 “降雨影响因子” $F_R$ 与滑坡发生次数之间的关系

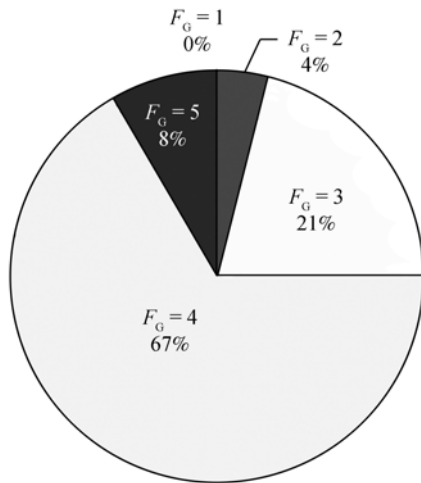


图 1 “地质条件因子” $F_G$ 与滑坡发生概率之间的关系

由表 4 可以看出，在满足 $F_G \geq 3$  和 $F_R \geq 3$  的条件下，当 $F_G$ 和 $F_R$ 中任何一个等于或者大于 4 时，滑坡已经很不稳定，这时滑坡发生的概率达到了 87.5%。其中，当 $12 \leq F_{LHP} \leq 15$  时，滑坡发生的频率为 25.00%；当 $16 \leq F_{LHP} \leq 25$  时，滑坡发生的频率为

62.50%。这说明某个地区的地质条件越差、降雨越严重，则该地区发生滑坡的可能性越大。 $F_G = 5$  或者 $F_R = 5$  属于一种非常极端的情况，针对这种情况，我们专门在重庆地区挑选了符合条件的 8 个古滑坡对其进行研究。研究发现，在地质条件为中等、差和极差的情况下 $F_R = 5$  时，或者在降雨为中等、严重和极严重的情况下 $F_G = 5$  时，全部发生了滑坡。因此，在表 4 中，将 $F_G = 5$  或者 $F_R = 5$ (即 $F_{LHP}$ 为 5 的整数倍)的情况均归为滑坡极易发生一类。

众所周知，目前的天气预报精度已经非常高，可以比较准确地预报某个地区几天甚至几周以后的降雨情况。这样，根据前述方法就可以获得准确的 $F_R$ 值。为了进行减灾防灾，可以对某些地区的一些危险边坡尤其是古滑坡进行重点研究。通过地质勘测，对某些危险边坡建立多因素相互作用关系矩阵，以得到其“地质条件评价因子” $F_{EG}$ 的值，并最终得到“地质影响因子” $F_G$ 的值。根据(4)式，可以计算得到这些危险边坡的“滑坡易滑程度判别因子” $F_{LHP}$ 的值。按照上述方法，根据 $F_{LHP}$ 的值可以判断这些危险边坡的易滑程度，也就是说对这些危险边坡发生滑坡的

表 4 “滑坡易滑程度判别因子” $F_{LHP}$ 与滑坡易滑程度之间的关系

滑坡	$F_{LHP}$ 取值					
	$F_{LHP} = 9$	$F_{LHP} = 12$	$F_{LHP} = 15$	$F_{LHP} = 16$	$F_{LHP} = 20$	$F_{LHP} = 25$
滑坡发生次数	2	6	3	10	1	1
滑坡发生频率	8.33%	25.00%		62.50%		
滑坡易滑程度	滑坡不易发生(II)		滑坡极易发生(IV)			



可能性进行预测预报. 由于这些危险边坡本身就决定了滑坡发生的空间范围, 而降雨预报则决定了滑坡发生的时间, 因此, 这种降雨型滑坡的“双因素”分级叠合方法真正实现了滑坡的时空预报.

### 3 滑坡实例分析

这里以重庆市云阳县鸡扒子滑坡为例, 来研究地质条件和降雨因素与滑坡之间的关系, 并进而探讨利用“双因素”分级叠合方法来对滑坡进行准确的时空预报的可行性.

鸡扒子滑坡位于云阳县城以东约 1 km 处的长江北岸, 是宝塔古滑坡的一部分. 1982 年 7 月 17 日到 18 日, 坡体发生滑塌, 滑坡总体积约为  $150 \times 10^4 \text{ m}^3$ . 其前缘约  $230 \times 10^4 \text{ m}^3$  的土石混合体滑入长江, 抬高河床 30~40 m, 造成了极其严重的经济损失.

#### 3.1 滑坡区的地质条件及降雨

滑坡发育于川东褶皱带中的故陵向斜北翼. 区域内陡坎发育, 梁槽交错, 并发育着一系列滑坡裂缝和四级台地. 区内出露基岩为侏罗系上统遂宁组泥岩夹少量石英砂岩和蓬莱镇组石英砂岩、长石石英砂岩与泥岩互层. 岩层中张性裂隙、压性裂隙及扭性裂隙均比较发育<sup>[26]</sup>. 滑体在主体上保持着宝塔古滑坡的三层物质结构, 即: 由上而下顺序为粉质黏土含钙质结核, 粉质岩土夹碎石和块石以及层状碎裂岩体. 其中岩石破碎、松动, 裂隙发育. 滑坡区南临长江, 东西两侧分别被北向南的大河沟和汤溪河所深切, 形成了三面临水的顺向岸坡, 坡顶标高 716 m, 高出长江枯水位 600 多米. 岸坡地下水补给条件差, 排泄条件良好, 地下水较为贫乏, 基本上不会影响坡体的稳定性.

1982 年 7 月中旬, 云阳出现了一次特大暴雨过程. 仅 16 和 17 日两天, 降雨量就高达 377.4 mm, 其中 16 日降雨量高达 199.3 mm. 自 16 日 4 时开始, 至 17 日 8 时的 28 h 内, 降雨量达到了 269.1 mm. 至 18 日 2 时坡体开始剧烈滑动的 46 h 内, 降雨量高达 333.1 mm. 大量的降雨渗入到碎裂松散的坡体中, 使滑带土处于饱水状态, 大大降低了其抗剪强度, 并最终导致坡体失稳, 产生剧烈滑动.

#### 3.2 滑坡稳定性判定

可以建立一个表征地形地貌、岩性、断层和节理、新构造运动、河流侵蚀以及地下水相互作用的关系矩阵, 来评价云阳鸡扒子滑坡的地质条件, 如表 5 所示.

根据(1)~(3)式对研究区的地质条件进行半定量评价. 经计算, 云阳鸡扒子滑坡的地质条件评价因子  $FEG$  为 50.7%, 按照表 3 中的判别方法, 此时  $F_G$  应当取值为 3, 即该处的地质条件为中等. 如果根据天气预报, 能够比较准确地预测出云阳县在 7 月 16 日会出现的这次暴雨过程, 也能比较准确地预测出此次暴雨过程的日最大降雨量会超过 150 mm, 降雨过程的总降雨量会超过 250 mm, 那么根据表 3 中的判别方法, 就可以预测出此时  $F_R$  取值应为 5. 根据(4)式, 计算出此时  $F_{LHP}$  的值为 15. 参照表 4 中所示的滑坡易滑程度判别方法, 当  $F_{LHP} = 15$  时, 边坡的稳定性极差, 属于滑坡极易发生(IV)一类. 由此可以看出, 只要能够准确地预测出日最大降雨量和降雨过程的总降雨量, 就可以预测出云阳鸡扒子处将极可能在这次暴雨过程中出现滑坡. 而随着天气预报精度的提高, 准确地预报降雨型滑坡可能性已经越来越大.

云阳鸡扒子滑坡的实例分析证明了利用“双因素”分级叠合方法来对降雨型滑坡进行比较准确的时

表 5 地质条件定量评价相互作用关系矩阵

地形地貌 2	1	3	1	3	3	13
2	岩性 3	3	0	2	3	13
3	3	断层和节理 2	2	3	3	16
3	3	3	新构造运动 1	2	2	14
2	2	2	1	河流侵蚀 2	1	10
2	2	1	0	1	地下水 1	7
14	14	14	5	13	13	73

空预测是完全可行的。

## 4 结论

根据本文的研究,可以得到以下几点结论:

(1) “双因素”(地质条件和降雨条)分级叠合方法是对降雨型滑坡进行准确时空预测预报的一种全新预报模式。该模式不仅可以通过“滑坡易滑程度判别因子”对降雨型滑坡的易滑度进行半定量的判定,而且判别原理简单、使用方便、滑坡预报精度高。

(2) 某个地区的地质条件涉及了地形地貌、岩性、新构造运动、断层和节理、水文地质条件等多方面的因素,这些因素本身以及它们之间的相互作用和相互耦合也会对该地区的地质条件产生严重影响。由于多因素相互作用关系矩阵方法综合考虑了各个影响因素本身及其相互作用对整个系统的影响,因此可以用其某个地区或者边坡所在位置的地形地貌条件进行半定量的评价,获得更加客观可靠的结果。

(3) 通过重点研究某个地区的一些危险边坡(包括古滑坡)的地质条件,结合比较准确的降雨预报,可以对这些危险边坡发生滑坡的可能性进行相对较为准确的预测预报。由于危险边坡的分布本身就确定了滑坡的空间分布,而精确的降雨预报决定了滑坡发生的时间,因此采用本文中“双因素”分级叠合方法可以真正实现半定量的降雨型滑坡时空预报,具有重要的科学意义和较高的实用价值。

**致谢** 国家气象局气候资料中心为本研究提供了重庆地区的降雨资料,并得到了中国科学院地质与地球物理研究所许兵研究员和陈剑博士的热心帮助,在此一并致以诚挚的谢意。

## 参 考 文 献

- 1 晏同珍,伍法权,殷坤龙. 滑坡系统静态规律及斜坡不稳定性空时定量预测. 中国地质大学学报: 地球科学, 1989, 14(2): 117—133
- 2 郑孝玉. 滑坡预报研究方法综述. 世界地质, 2000, 19(4): 370—374
- 3 秦四清,张俾元. 滑坡灾害可预报时间尺度问题探讨. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(1): 17—22
- 4 秦四清,张俾元. 非线性工程地质导论. 成都: 西南交通大学出版社, 1993
- 5 秦四清,张俾元,黄润秋. 滑坡灾害预报的非线性动力学方法. 水文地质工程地质, 1993, 20(5): 1—4
- 6 尤辉,秦四清,朱世平等. 滑坡演化的非线性动力学与突变分析. 工程地质学报, 2001, 9(3): 331—335
- 7 王在泉. 边坡动态稳定预测预报及工程应用研究. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 117—122
- 8 徐峻岭,廖小平,李荷生. 大型滑坡的预报及理论和方法. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(3): 18—25
- 9 罗文强. 斜坡稳定性概率理论和方法研究. 中国地质大学(武汉)环工学院博士论文, 1997
- 10 韩建中,闫素英,胡连生. 斜坡稳定性分析的模糊综合评判方法. 山西水利科技, 1999, 3: 75—77
- 11 吴益平,唐辉明. 滑坡灾害空间预测研究. 地质科技情报, 2001, 20(2): 87—90.
- 12 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. 成都理工学院学报, 2001, 28(1): 89—92
- 13 任幼蓉. 城市地质环境复杂程度与灾害的相关性. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(3): 1—4
- 14 张先发,李明华,张小刚. 长江上游暴雨与滑坡崩塌关系. 地理, 1995, 8(3): 102—106
- 15 Dai F C, Lee C F. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology*, 2001, 59: 253—266[DOI]
- 16 Finlay P J, Fell R, Maguire P K. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34: 811—824[DOI]
- 17 Au S W C. Rain-induced slope instability in Hong Kong. *Engineering Geology*, 1998, 51: 1—36[DOI]
- 18 Fausto Guzzetti, Mauro Cardinali, Paola Reichenbach, et al. Landslides triggered by the 23 November rainfall event in the Imperia Province, Western Liguria, Italy. *Engineering Geology*, 2004, 73: 229—245[DOI]
- 19 Caine N. The rainfall intensity duration control of shallow landslides and debris flows. *Geographica Annaler*, 1980, 62: 23—27
- 20 Pietro Aleotti. A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 2004, 73: 247—265[DOI]
- 21 Crosta G. Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. *Environmental Geology*, 1998, 35(2-3): 131—145[DOI]
- 22 Hudson J A, Arnold P N, Tamai A. Rock engineering mechanisms information technology (REMIT): Part I-The basic method; Part II-Illustrative case examples. In: *Proceedings of the seventh International congress of the ISRM, Sydney, 1991*, 1113—1119
- 23 Hudson J A. *Rock engineering systems: theory & practice*. Ellis Horwood, 1992
- 24 Hudson J A, Harrison J P. A new approach to studying complete rock engineering problems. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1992, 25: 93—105
- 25 Mazzoccola D F, Hudson J A. A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1996, 29: 37—56
- 26 王尚庆. 长江三峡滑坡监测预报. 北京: 地质出版社, 1999. 27—31