

滑坡综合预报方法研究

孔纪名^{1,2}, 李秀珍^{1,2}, 刘正梁^{1,3}, 宋书志^{1,3}

(1. 中国科学院山地灾害与表生过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 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; 3. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要: 滑坡综合预报是基于对滑坡发育状态的形成本条件类比分析和滑坡位移历时分析的综合方法, 从滑坡形成条件、变形状态、诱发因素的方式和影响程度的动态分析入手, 结合滑坡加速变形破坏阶段的位移历时特征, 建立滑坡预报模型, 实现对滑坡的预报。与其他滑坡预报方法相比, 滑坡综合预报方法的综合性强, 能较好的确定滑坡的发育状态, 分析滑坡发生剧烈滑动的可能性, 能对不同发育阶段的滑坡做出准确判别。

关键词: 滑坡; 综合预报; 地质条件类比分析; 位移历时分析

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

滑坡预报是滑坡科技工作者非常关注并努力去探索的难点问题。由于滑坡在发生的过程中形成条件、触发因素各不相同, 这给滑坡预报增加了很大的难度, 发育条件的复杂性也制约滑坡预报的发展。多年来滑坡工作者从不同的角度去研究滑坡的预报方法, 取得了一些进展, 提出了许多预报方法^[1-10], 如灰色系统模型^[3,4]、生长曲线预报模型^[5]、动态跟踪预报模型^[5]、卡尔曼滤波法以及非线性模型等^[6-10]。但由于滑坡的复杂性和预报模型的局限性, 以及有效的滑坡变形观测数据很难获取, 单纯利用某一种方法很难实现对滑坡的预报, 而数学预报模型则必须在取得较长时间的滑坡位移观测数据后才能进行, 这在我国西部的广大山区是很难做到的。实践表明, 要实现滑坡的准确预报, 必须采用定性分析和定量预报相结合的综合预报方法。王恭先等人^[7]初步提出了采用滑坡宏观变形迹象分析和观测数据分析计算相结合的方法, 并在甘肃黄茨滑坡的预报中, 取得了成功。鉴于滑坡形成条件的复杂性和多样性, 本文提出基于滑坡形成条件类比分析和滑坡位移历时分析相结合的综合预报方法, 是从滑坡的形成条件、变形状态、诱发因素的影响程度动

态分析入手, 从宏观整体上去确定滑坡的发育程度和危险性, 分析滑坡的发展趋势, 在此基础上根据滑坡的位移数据, 建立滑坡预报模型, 进行滑坡位移历时分析, 判断滑坡的发生时间。而与其他滑坡预报方法相比, 滑坡综合预报方法综合性强, 能较好地确定滑坡的发育状态, 分析滑坡发生剧烈滑动的定性和定量的可能性, 对处于不同发育阶段的滑坡做出较为准确的判别, 做出的综合预报结果的可靠性更大。我国西部山地幅员广阔, 滑坡形成条件多样, 滑坡综合预报方法能较好的解决单一方法预报滑坡的不足, 对减轻和避免滑坡灾害起到很好的作用。

1 滑坡综合预报技术方法

滑坡综合预报方法是由两个方面的基本内容构成, 即地质条件类比分析与滑坡位移历时分析。地质条件类比分析是从宏观上确定滑坡发育阶段、危险状态和发育趋势, 定性的判断滑坡危险程度。滑坡位移历时分析是通过建立非线性数值预报模型^[8], 对滑坡的发生趋势进行分析, 实现对滑坡的发生时间的定量预报。地质条件类比分析是滑坡预

收稿日期 (Received date): 2008-10-20; 改回日期 (Accepted): 2009-03-27.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金重点项目 (50639070). [Supported by the NSFC (50639070).]

作者简介 (Biography): 孔纪名 (1956-), 男 (汉族), 重庆人, 研究员, 主要从事斜坡变形破坏规律研究。[Kong Jiming (1956-), male, Professor, research director, landslide deformation and failure regularity.] E-mail: jiming@imde.ac.cn

报的基础, 滑坡位移历时分析是滑坡预报补充, 从定量的方法上确定滑坡的发生时间。从方法上讲, 滑坡综合预报的两项基本内容也是独立可进行的, 可根据滑坡勘测的不同程度, 分步骤的实施, 最终实现对滑坡的预报。

地质条件类比分析的基本内容包括: 滑坡形成地貌、结构、岩性的分析, 滑坡变形过程的动力作用分析, 诱发因素作用方式和影响程度的动态变化分析, 实现对滑坡发展趋势的定性预测。滑坡位移历时分析的内容包括: 根据滑坡观测数据, 采用非线性数值预报模型^[8], 通过对滑坡位移的拟合计算分析, 确定处于加速变形阶段滑坡破坏时间, 实现对滑坡的发生时间的预报。滑坡位移历时分析是滑坡地质条件类比分析预报方法的补充与完善。

滑坡综合预报方法的具体实施步骤如下:

1. 滑坡地质条件类比分析

在对滑坡进行详细工程地质调查的基础上, 通过类比分析滑坡的形成条件、变形状态及宏观变形迹象等, 从地貌、坡体结构、岩性组合、诱发因素等方面综合分析滑坡发育状态, 从宏观上定性确定滑坡发育条件的充分程度及稳定性。

2. 滑坡发育的危险性状态判别

根据滑坡地质条件类比分析结果, 确定滑坡所处的变形演化阶段, 从宏观上判别滑坡的危险状态及发展演化趋势。

3. 滑坡位移历时曲线分析

根据滑坡所处的不同变形演化阶段, 建立非线

性数值预报模型, 对滑坡的位移历时曲线进行分析, 对滑坡的变形演化趋势或滑动时间做出预测预报。

4. 滑坡预报的综合判断分析

在对滑坡地质条件类比分析和滑坡位移历时曲线分析的基础上, 综合滑坡地质条件类比分析和位移历时分析结果, 实现对滑坡的综合预报。

2 滑坡地质条件类比分析方法

2.1 滑动前后地貌条件分析

滑坡地貌变形过程中和发生前后, 一个最显著的变化是地貌形态的改变。表现在斜坡坡度降低, 滑坡四周坡面裂缝增加, 滑坡体上形成较多的台坎, 滑坡前缘临空面坡度发生变化等^[11]。这些地貌形态的变化所反映的滑坡稳定状态各不相同(表 1)。

2.2 动力作用分析预测

常用于分析滑坡稳定性的动力作用方式有: 滑坡体势能的变化, 滑坡体应力状态的变化, 滑面物理学性质的变化所引起阻力做功的变化^[12], 坡体应力卸荷引起岩体碎裂成块(碎)石, 能量快速释放(表 2)。

2.3 滑坡堆积物特征分析预测

滑坡发生后形成的堆积物在结构上将发生较大的变化, 其变化主要表现在滑坡体的碎(块)石在运动过程中出现一定程度的分选、原滑面的性质发生变化、坡体的孔隙率变化, 结构明显改变必然对滑坡的稳定性产生较大的影响^[12](表 3)。

表 1 滑坡发生后地貌形态变化对坡体稳定性的影响

Table 1 Influence by the landform shape changes to the stability of the slope

地貌类型	地貌现象	利于滑坡稳定的地貌现象	不利于滑坡稳定的地貌现象
坡度变化	滑坡发生使斜坡坡度发生变化。	坡度变缓。	坡度变陡, 特别是斜坡下部或滑坡体前缘变陡。
有效临空面变化	滑坡下滑后, 由于地形条件的变化, 可能使斜坡的有效临空条件发生变化(主要指斜坡下部或滑坡前缘)。	滑坡体前缘滑入沟底, 滑坡继续滑动的空间变小; 滑动受岩体的阻挡, 坡体已不具备克服阻力向前滑动的能量。	已发生的滑动的坡体仅为滑坡的一部分, 前缘滑动后, 临空面变陡, 临空面更加开阔。
滑坡后缘裂缝	斜坡下部有突出的基岩出露, 滑坡在滑动一定距离后有效临空面变窄, 形成束口。	滑坡下滑后, 两侧突出岩体阻挡坡体下滑, 使滑动空间变小。	临空面变陡, 临空面更加开阔。
	滑坡发生后在后缘和两侧会形成裂缝, 不同的裂缝对地表水排导作用不同。	滑坡后缘及两侧的裂缝发育成冲沟, 斜坡上部的地表水被排出滑坡体。	在滑坡后缘形成的主裂缝未与两侧的裂缝相通, 导致大量地表水渗入坡体, 促使滑坡失稳。

表 2 滑坡发生后动力特征与坡体稳定性

Table 2 The dynamic characteristic and slope stability after landslides occurrence

动力类型	动力作用特征	利于滑坡稳定的动力现象	不利于滑坡稳定的动力现象
势能变化	滑坡体高度降低后, 其势能降低, 一般说来对滑坡的稳定性都有所增加。	滑坡体已基本滑入沟底, 或坡体的相对高差已降低, 动能已大部分释放。	滑动后坡体仍保持相对较大的高差, 其势能基本未释放, 转化为动能的可能性大。
滑坡应力状态变化	由复合型滑面控制的滑坡, 当两侧岩体滑动方向指向轴线或背离轴线时, 应力分布将发生变化。	滑坡两侧的坡体在滑动过程中向轴线方向挤压时, 滑坡前部岩体被挤压加密、加厚, 形成应力支撑拱。	坡体滑动后成放射状滑动, 应力得以充分释放。
滑面力学性质变化	坡体滑动后, 原滑面的物理力学性质发生变化, 直接影响滑面摩擦力的大小。	滑坡体覆盖在由碎石块石构成的坡面上; 或覆盖在松散坡积层构成的坡面上, 滑面粗糙。摩擦力增加。	滑坡体覆盖在顺坡向岩层或顺坡向结构面的坡面上, 摩擦系数较小, 使滑坡体很容易沿这些结构面发生滑动。
卸荷释能	滑坡在滑动过程中解体, 应变能释放。	滑坡在滑动过程中解体成碎块, 松散的堆积在斜坡上, 坡体中聚集的应变能已释放。	滑动后相对完整, 应变能未被释放, 前缘可能形成崩塌或滑坡。

2.4 诱发因素分析预测

诱发滑坡发生的因素有水体作用、地震诱发作用、人类工程活动等, 对滑坡的诱发作用各不相同(表 4)。

3 滑坡位移历时分析方法

3.1 滑坡位移历时分析

滑坡随时间的发展而发生位移, 在位移过程中, 由于条件的改变位移发生波动性的变化, 因此, 滑坡位移历时分析应注意以下问题:

1. 滑坡观测通常都是由各分散的观测点组成,

各点的位移历时曲线间有其相似性和差异, 位移历时分析应区分其变形的共性和差异性。

2. 滑坡变形位移历时过程是一条波动性的曲线, 滑坡从缓慢变形到加速位移, 位移曲线斜率的总体趋势是由平缓到变陡, 甚至趋于直立。在位移的过程中, 由于滑坡发生条件的改变, 诱发因素的时有时无, 导致滑坡变形的波动性变化。因此, 位移历时分析应区分坡体变形过程中, 哪些是不可逆的条件, 哪些是可逆的条件, 变形可能因条件变化而变缓。

3. 在滑坡的加速变形过程中, 要注意区分是坡体整体出现失稳, 发生不可逆的破坏, 还是因为某种因素诱发坡体变形加快, 这种因素消失后坡体的变

表 3 滑坡堆积体结构变化与坡体稳定性

Table 3 Landslide structure changes and slope stability

结构类型	滑坡体或堆积物结构	利于滑坡稳定的堆积物特征	不利于滑坡稳定的堆积物特征
坡体结构变化	坡体在滑动过程中解体(形成碎块)石), 并在运动过程中发生分选, 形成不同的结构。	在堆积物剖面上, 颗粒上部细, 下部粗, 不利于新的滑面形成, 形成较稳定的坡体结构。	在堆积物剖面上, 颗粒上部粗, 下部细, 易于形成新的滑面, 形成不稳定的坡体结构。
		在坡面上, 斜坡下部颗粒粗, 上部细, 不利于新滑面形成。	斜坡下部颗粒细, 上部粗, 易于形成新的滑面。
滑面变化	坡体滑动后, 滑体堆积在坡面或岩层面上, 原滑面的性质发生变化, 重新滑动必须克服更大的阻力或形成新的滑面。	当滑体堆积在松散的含碎石的坡面或堆积在反坡向岩层构成的坡面上时, 原滑面的阻力增大或不易形成新的滑面, 有利于坡体的稳定。	当滑体堆积在顺坡向岩层构成的坡面或细颗粒物质覆盖的坡面时, 原滑面的摩擦力减小或有利于形成新的滑面, 坡体的稳定性降低。
坡体孔隙变化	坡体滑动后原坡体或堆积物结构发生变化, 引起的坡体地下水渗流状态变化。	滑动后坡体或堆积物形成上部细下部粗的结构, 有利于坡体排水, 含水率减少稳定性增加	滑动后坡体或堆积物形成上部粗下部细的结构, 不利于坡体排水, 含水率增加稳定性降低。

表 4 不同诱发因素对坡体稳定性的影响

Table 4 Influence of different inducing factors on the stability of the slope

类型	诱发因素作用方式与特征	对坡体稳定性的影响
水体作用	地表水渗入坡体的条件。	当地表条件有利于地表水渗入坡体(如滑坡后缘裂缝、冲沟), 滑坡的稳定性降低。
	水流对坡脚的淘蚀。	水流淘蚀坡脚后, 使抗滑段被削弱, 降低了滑坡的稳定性; 地下水水位越高, 作用于滑面(空隙)的静水压力越大; 滑面处地下水头差越大, 所承受的动水压力越大; 滑坡前部变陡, 地下水水力梯度增大, 渗透应力增加。
	地下水渗透应力包括静水压力和动水压力, 当坡体中地下水位升高时, 渗透应力增加。	
地震诱发作用	地震波引起坡体质点加速震动而产生的作用力对坡体的破坏起着促进作用。	对处于临界平衡状态的滑坡体在地震的作用下可能发生突然失稳。
工程活动	改变了滑坡体状态和受力条件。	在滑坡前缘开挖、后部加载, 改变坡面的径流状态, 都可能导致滑坡失稳。

形又将变缓。

3.2 滑坡发生的数值预报模式

滑坡发生的数值预报是基于对滑坡连续观测数据之上, 特别是有需要滑坡加速变形阶段的位移数据。位移数据通常采用统计分析、模糊数学、灰色理论等数学方法, 分析不同数据与滑坡变形的相关关系, 找出最能反映滑坡变形的数据量, 根据其数据的趋势预报滑坡发生的时间。

根据对滑坡位移观测数据的各种数学处理方法进行研究, 结合以往的工作成果, 优选出非线性灰色预报模型作为位移历时数据处理方法, 解决滑坡在加速变形阶段位移与历时的变化规律, 建立滑坡临滑预报模式, 以此预报滑坡发生。

基本原理如下:

设 $X^{(0)}(t)$ 为不同时间临测数据, 等间隔监测数据序列为

$$X^{(0)}(t) = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$$

对 $X^{(0)}(t)$ 作一次 AGO 变换, 得

$$X^{(1)}(t) = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)\}$$

以 $X^{(1)}(t)$ 建立的非线性微分方程

$$\frac{dX^{(1)}(t)}{dt} = aX^{(1)} - b(X^{(1)})^2 \quad (1)$$

式中 $\frac{dX^{(1)}(t)}{dt}$ 表示活坡位移速率, a, b 为待定系数, 可用最小二乘法求取, 计有

$$\hat{a} = [a \ b]^T = [B^T B]^{-1} B^T Y_N \quad (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)) & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Y_N = [X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n)]^T \quad (4)$$

式中 B 为时间数据阵, Y 为时间参数向量。

将求得的待定系数代入式(1)解得非线性微分方程的解为

$$\left. \begin{aligned} \hat{X}_{(k+1)}^{(1)} &= \left[X_{(1)}^0 - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (k > 1, \text{且为正整数}) \\ \hat{X}_{(1)}^{(1)} &= X_{(1)}^0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

对 $X^{(k+1)}$ 作累减生成得到拟合值

$$\hat{X}_{(k)}^{(0)} = [X^{(0)}(1) - \frac{u}{a}] (1 - e^{-a}) e^{-a(k-1)} \quad (6)$$

当拟合的程度越高, 预报的准确性就越大。

4 滑坡预报的综合判断分析

通过对滑坡进行地质条件类比分析和位移历时曲线分析, 根据滑坡的稳定程度, 可将滑坡的危险程度划分为极危险、危险、较危险、临界平衡、基本稳定、稳定 6 个等级, 以此作为滑坡综合预报的等级^[13](图 1)。

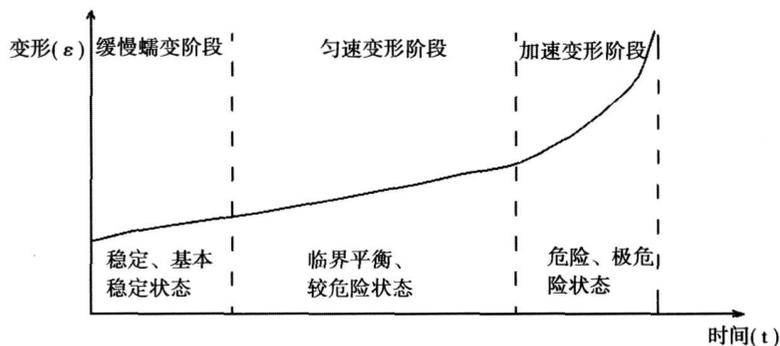


图 1 滑坡位移历时曲线与发育阶段、危险状态关系示意图

Fig 1 Relation schematic plan of displacement-time curve, developing stage and hazard state for landslides

1. 滑坡稳定状态

滑坡的发生条件已不具备, 坡体无变形。当有诱发条件作用时, 坡体的仍保持稳定状态。

2. 滑坡基本稳定状态

滑坡形成的部分条件具备, 坡体几乎无变形。当有诱发条件作用时, 坡体的部分形成条件将发生变化, 其稳定性降低, 导致坡体发生蠕变。

3. 滑坡临界平衡状态

滑坡形成的部分主要条件不利于滑坡的稳定, 坡体处于时断时续的缓慢变形状态, 当有诱发条件作用时, 滑坡有发生加速变形可能。

4. 滑坡较危险状态

滑坡形成的部分条件不利于滑坡的稳定, 坡体处于缓慢变形状态。当有诱发条件作用时, 滑坡可能发生加速变形, 最终导致坡体失稳。

5. 滑坡危险状态

滑坡的形成条件均不利于滑坡的稳定, 坡体变形处于加速的状态。在有其他诱发条件作用下, 滑坡将进一步加剧, 导致滑坡失稳。结合滑坡位移历时分析结果, 实现对滑坡的中短期预报。

6. 滑坡极危险状态

滑坡的各形成条件和诱发条件都不利于滑坡的稳定, 坡体处于加速变形状态。结合滑坡位移历时分析, 实现对滑坡的短期预报。

5 开县盛山滑坡综合预报实例

1. 滑坡特点与观测

盛山位于开县城北西, 山顶最高点海拔 627 m, 与城区相对高差 457 m。盛山是开县城郊绿地和公园, 盛山公园、刘伯承纪念馆都座落在盛山斜坡地带。盛山滑坡的变形主要集中在刘伯承纪念馆

下部坡体和盛山公园八仙台一带。

刘伯承纪念馆东侧一带滑坡变形坡体位于纪念馆下部和北侧, 长 200 m, 宽 260 m。坡体变形裂缝主要分布在纪念馆前北侧公路两侧和上山小道上。据变形体现场勘测, 该变形体岩性为坡积层。

盛山公园八仙台滑坡变形体位于盛山上部, 变形体北侧位于胡大林家墙壁和院子内, 南侧位于八仙台南冲沟, 变形体后缘位于八仙台平台内侧陡坎处, 长 100 m, 宽 250 m。八仙台变形体中部和南侧发育有 2 条冲沟, 使八仙台坡变形体破碎成 3 块。据调查, 八仙台坡体在 1989-07 大暴雨时曾发生过滑动, 并使得冲沟进一步加大。该变形体岩性为坡积层。变形体位移未形成统一的滑动面, 变形体出现部位坡体厚度不等。

由于盛山滑坡变形体处于极缓慢的蠕变阶段, 变形特征主要表现为在变形体的局部位置出现裂缝。因此, 滑坡观测采取地表裂缝观测、GPS 观测、精密大地测量观测等技术手段。

2. 滑坡地质类比分析判断与预报

运用工程地质类比法对盛山滑坡进行分析预报, 具体分析预报见表 5。

对盛山滑坡的预报结果为, 滑坡目前处于基本稳定状态。

3. 滑坡位移历时分析预报

根据盛山滑坡的 2001 年至 2002 年的变形监测资料 (表 6), 选取滑坡体上变形量最大的一组裂缝的位移值进行数值预报分析。建立盛山滑坡的非线性灰色预报模型, 并对非线性微分方程求解, 即得

$$X_{(k+1)} = 0.184 \exp(0.034k) \quad (7)$$

运用该模型对盛山滑坡进行预测预报, 计算结果如图 2 和表 6。

由图 1 和表 6 可知, 非线性灰色预报模型的预

报值与盛山滑坡的实际变形值非常吻合,反映滑坡呈缓慢的蠕滑变形状态。

为了预报盛山滑坡的发展变形趋势,利用灰色预报模型对2002年以后的变形进行了预报分析。随着时间的发展,盛山滑坡变形缓慢增加,变形值随

时间基本呈线性变化,滑坡位移增量相对较小。至2003-12平均月位移量约为0.04mm。这表明盛山滑坡在1a时间里,处于缓慢蠕滑状态,整体保持稳定。

表 5 盛山滑坡工程地质类比法预报

Table 5 Prediction for Shengshan landslide by using engineering geological analogy method

类比条件	滑坡所处状态	滑坡的危险程度等级					
		极危险	危险	较危险	临界平衡	基本稳定	稳定
地貌条件	坡度较陡,有多条冲沟,临空面好,地表水易于渗入坡体。			✓			
岩性条件	碎石土为主,结构松散,强度低。			✓			
坡体结构	没有顺坡向结构面,未形成统一滑面。						✓
诱发因素	在大暴雨中可能诱发表层滑动。坡积层空隙率高使渗透应力增加。			✓			
其他环境条件	自然环境较好,植被覆盖率约65%。滑坡上已作部分排水工程						✓
综合判断预报结果		基本稳定状态					

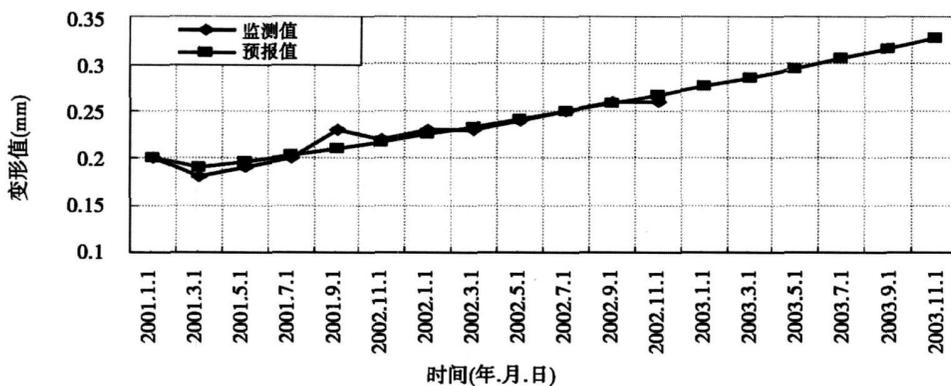


图 2 盛山滑坡变形监测值及非线性灰色预报模型预报值随时间的变化曲线

Fig. 2 The curve of observed and predicted value with time for Shengshan landslide

综合上述工程地质类比法分析和数值分析结果,判定盛山滑坡在未来的几年时间里,主要处于缓慢的蠕滑变形状态,整体基本保持稳定。经过近几年的观测,盛山滑坡目前仍然稳定,证明分析预报结果是正确的。

参考文献 (References)

[1] Wen Haijia, Zhang Yongxi, Liu Yuan. A Home and Abroad Investigative Tendency of Landslide Forecast [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(1): 1~ 4 [文海家,等. 滑坡预报国内外研究动态及发展趋势 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2004 15(1): 1~ 4]

failure [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics* 1996 33(6).

[3] Liao Yelan, Xie Mowen. Grey Prediction of Monitoring displacement [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996 15(3): 269~ 274 [廖野澜,等. 监测位移的灰色预报 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1996 15(3): 269~ 274]

[4] P. Lu and M. S. Rosenbaum. artificial neural networks and grey systems for the prediction of slope stability [J]. *Natural Hazards* 2003 (30): 383~ 398

[5] LI Tianbin, Chen Mingdong, Wang Lansheng. Landslide Real-time Tracking and Prediction [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1999 [李天斌,陈明东,王兰生,等. 滑坡实时跟踪预报 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999]

- Time [M]. Zhengzhou Yellow River Hydraulic Power Press, 1996
[刘汉东. 边坡失稳定时预报理论与方法 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996]
- [7] Wang Gongxian. Sliding mechanism and prediction of critical sliding of Huangci landslide in Yongjing county, Gansu province [J]. *Journal of Catastrophology*, 12(3): 23~27 [王恭先. 甘肃省永靖县黄茨滑坡滑动机理和临滑预报 [J]. 灾害学, 1997, 12(3): 23~27]
- [8] Qin Siqing. Nonlinear engineering geology lead [M]. Chengde: Southwest Jiaotong University Press, 1993 [秦四清, 等. 非线性工程地质学导引 [M]. 成都: 西南交大出版社, 1993]
- [9] Yuan Lifeng, Zhang Youshui. Debris flow hazard assessment based on support vector machine [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2006, 11(4): 897~900
- [10] Song Shujun, Zhang Baolei, Feng Wenkan, et al. Using Fuzzy Relations and GEM method to Evaluate Debris flow Hazard [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2006, 11(4): 875~881
- [11] Kong Jinming. The Non-computation Method to differentiate the stability of slope [J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(5): 446~451 [孔纪名. 滑坡稳定性判别的非计算方法 [J]. 山地学报, 2001, 19(5): 446~451]
- [12] Kong Jinming. Rock lump of landslide of Layue destruction feature analysis in Sichuan-Xizang highway [J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(2): 228~233 (Ch) [孔纪名. 川藏公路拉月滑坡的块状破坏特征 [J]. 山地学报, 2003, 21(2): 228~233]
- [13] Chen Yongbo, Wang Chenghua. Differentiating and Forecasting Landslide [J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(6): 559~562 [陈永波, 王成华. 滑坡发生的危险边坡判别及预测预报分析 [J]. 山地学报, 2000, 18(6): 559~562]

A Study of Comprehensive Prediction Method for Landslides

KONG Jinming^{1, 2}, LIX izhen^{1, 2}, LIU Zhengliang^{1, 3}, SONG Shuzhi^{1, 3}

(1 Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract According to analogy analysis the formation conditions, deformation states, inducing factors of landslides, comprehensive prediction for Landslides may be realized based on establishing prediction models by analyzing the features of displacement-time on the accelerated deformation and failure stage for landslides. Comparing with other prediction methods, the method with stronger comprehension may preferably decide the development state of landslides, and analyze the possibility of extremely sliding and better judge the different development stages for landslides.

Key words landslide; comprehensive prediction; analogy analysis of geological condition; analysis of varies of displacement with time