

## 滑坡的多模型综合预测预报研究

万 全, 范书龙, 林 炎

(中国路桥集团总公司, 北京 100011)

**摘 要:** 由于滑坡的复杂性以及预报模型和方法的局限性, 简单地利用单一的滑坡预测预报模型准确地预报滑坡的滑动时间还很困难。为了提高滑坡预报的准确度, 提出了在滑坡原型调研和机制研究的基础上, 以滑坡的监测资料为依据, 通过监测点的选取、监测信息的处理和变形阶段的判别, 选择多个与所预报滑坡相适宜的预测预报模型对滑坡的滑动时间进行预测预报, 并对多个模型的预报结果进行综合评判得出预报结果, 最后以黄龙西村滑坡实例进行了应用。

**关键词:** 滑坡; 定量预报; 预报模型; 多模型综合预测预报; 多模型综合预测预报模块

**中图分类号:** P642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2005)05-0181-05

## Study on Multi-models Comprehensive Forecasting of Landslides

WAN Quan, FAN Shu-long, LIN Yan

(Road and Bridge Group Corporation of China, Beijing 100011, China)

**Abstract:** Because of complexity of landslides and limitation of forecasting models and methods, it is difficult to forecast sliding time of landslides. In order to improve precision of forecasting landslide, a multi-models comprehensive forecasting method is presented, which is based on investigating landslides on the spot and researching their mechanism, according to monitoring data, multi-models agreeing with the forecasted landslide were chosen to forecast sliding time of landslides after selecting monitoring point, processing monitoring information and judging deformation stage, the forecasting result was concluded by comprehensively judging on the forecasting results of multi-models, at last Huanglongxicun landslide is applied as an example.

**Key words:** landslide; quantitative prediction; forecasting model; multi-models comprehensive forecasting; multi-models comprehensive prediction module

滑坡的预测预报, 特别是滑动时间的预测预报是世界公认的尖端课题。滑坡预报从 20 世纪 60 年代日本学者斋藤(M. Satio)提出的滑坡时间预报经验公式开始, 经过广大学者的潜心研究和探索, 预报的理论和方法有了较大的发展。尤其在定量预报方面, 提出了许多预测预报模型和方法。具有代表性的如基于岩土体蠕变理论的斋藤迪孝模型<sup>[1]</sup>、HOCK 法<sup>[1]</sup>及苏爱军模型<sup>[2]</sup>等, 基于现代数学理论的灰色 GM (1, 1) 模型<sup>[3]</sup>、生物生长模型<sup>[4]</sup>以及基于非线性理论的协同预报模型<sup>[5]</sup>、突变理论模型<sup>[6]</sup>和动态分维跟踪预报模型<sup>[4]</sup>等, 并且还提出了一些具有适用价值的预报思想, 如非线性预报<sup>[6]</sup>、实时跟踪预报<sup>[4]</sup>、系统综合预报<sup>[7]</sup>和全息预报<sup>[8]</sup>等。这些研究成果大大推进了滑坡预报的研究历程, 并且利用这些预报理论和方法成功地预报了一些滑坡的发生(如我国的新滩滑坡、甘肃黄茨滑坡等)。尽管如此, 由于滑坡的复杂性以及预报模型和方法的局限性, 简单地利用单一的滑坡预测预报模型准确地预报滑坡的滑动时间还很困难。为了提高滑坡预报的准确度, 本文对滑坡的多模型综合预测预报的关键技术和具体内容做进一步探讨。

### 1 滑坡多模型综合预测预报的技术方法体系

滑坡的多模型综合预测预报是对滑坡进行定量的预测预报, 主要是在滑坡原型调研和机制研究的基础上, 依据滑

坡动态变形监测资料, 选择多个合适的预测预报模型对滑坡的变形趋势和滑动时间做出预测预报。其技术方法体系如图 1 所示<sup>[4]</sup>。

(1) 首先, 在原型调研和机制研究的基础上, 对滑坡监测点进行筛选, 选择能代表斜坡变形状况的监测点时序资料作为预报的依据。特别要找出控制坡体稳定的“关键部位”, 并将其作为滑坡预报的基本信息源。定时获取信息源的各种量化信息(如位移、声发射等), 选择具有代表性的特征性作为预报参数。为了增强监测信息的有效信息, 削弱干扰信息和系统噪声, 可采用插值、滤波、累加生成、归一化等数据处理方法对单点量化信息进行处理; 为了避免以点代面, 以偏概全的现象, 可利用多点信息融合以及多元信息融合的数据处理方法对多个监测点的信息以及多元监测信息进行融合处理。

(2) 利用滑坡宏观现象和有效的量化信息, 分别采用定性判断和定量判别方法对滑坡状态(或所处阶段)进行判别。

(3) 根据滑坡所处的变形阶段, 选择多个相应的预报模型, 对滑坡分别进行长期预报、中短期预报和临滑预报。长期预报模型以极限分析法为代表, 可判断斜坡的稳定性; 中短期预报模型主要有曲线回归模型、生物生长模型、突变理论模型、时序模型以及 BP 神经网络模型等, 以预报滑坡的变形趋势和滑动时间为主; 临滑预报模型包括斋藤迪孝模型、苏爱军预报模型、灰色 GM (1, 1) 模型以及协同模型等, 可以

确定滑坡的滑动时间。

(4) 利用预报模型对滑坡进行预报时,要及时获取最新监测信息对滑坡动态进行“实时跟踪预报”,使预报时间逐渐逼近滑坡的实际发生时间。

(5) 利用多个模型进行预报必然产生多个结果,通过对多模型结果进行综合评判,得出滑坡滑动时间的预报结果。将预报结果与滑坡原型进行反馈对照和检验,逐步提高滑坡的预报精度,最后得出预报结论。

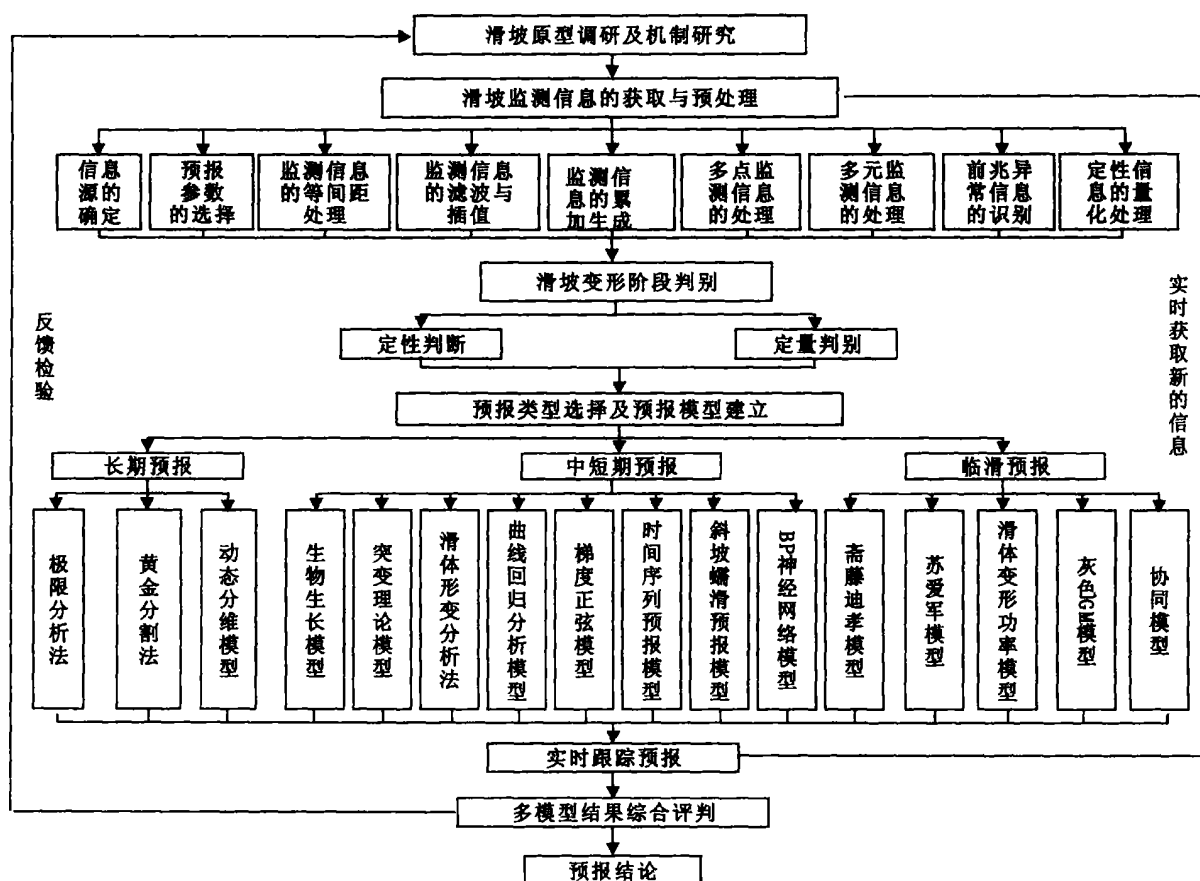


图1 滑坡多模型综合预测预报的技术方法体系

## 2 滑坡多模型综合预测预报的主要内容

### 2.1 监测点的选取和监测信息的预处理

滑坡的多模型综合预测预报是建立在滑坡长期监测基础之上的,滑坡监测是滑坡时间预报的基石,没有滑坡监测,滑坡时间预报就成为空中楼阁<sup>[7]</sup>。监测点选取的恰当与否以及监测信息的精度,直接影响着滑坡预报的准确度。

实践证明,变形斜坡不同部位监测点的参量值的时间序列各不相同,有的甚至相差很大。因此,必须在众多的监测点中,选取能真正代表斜坡变形状态的关键点的监测时序资料进入预报。而关键点的选择与确定,需要开展大量的基础研究。一般监测点的选择是通过对斜坡类型、结构、变形破坏现象、环境条件等的深入调查和分析,查明斜坡的变形破坏机制,并以此为基础确定控制斜坡稳定性的“关键部位”,那么位于这些部位的监测点就可以作为预报参数的监测点。

由于滑坡经常受降雨、地震、人类工程活动以及其它随机因素的影响,滑坡监测信息往往是模型预报所需要的信息和各种干扰信息的叠加。因此,在运用监测信息进行定量预报时,必须对滑坡体的监测信息进行预处理。通常采用的预处理方法有:AGO累加、滤波、插值和平滑处理等方法。此外,还应对照滑坡体上的多点监测信息、多元监测信息采用信息融合等技术方法获得一个反映滑坡体发展演化过程的综合信息,以便充分利用滑坡的监测信息反映滑坡体的真实演

化变形状况。

### 2.2 变形阶段的判别

斜坡变形破坏的阶段不同,预报的类型和内容也就不同,相应选用的预报方法也就不同。如何有效地判定滑坡变形所处的阶段,是滑坡定量预报工作的基本问题之一。根据目前的研究,可采用以下两类方法判别:

(1) 定性判别。是将滑坡体的监测信息与滑坡体在演化工程中所表现出来的宏观变形迹象和前兆特征以及影响滑坡进程的降雨、地震等外界因素的变化等结合起来进行综合判断。简言之,就是将滑坡监测资料与宏观地质分析及斜坡变形破坏现象的阶段结合起来综合判定。

(2) 定量判断。方法一:利用滤波处理后的累计位移时序资料进行定量判定<sup>[4]</sup>。观测数据经过滤波处理后,其随机波动性将大大降低,其历时曲线变成了一条光滑曲线。当斜坡处于初始变形或等速变形阶段时,变形速率逐渐减小或趋于一常值;当斜坡进入加速变形阶段时,变形速率将逐渐增大。因此,可以根据累计位移的滤波资料的切线角 $\alpha$ 来判断斜坡所处的变形阶段,即用切线角的线性拟合方程的斜率值 $A$ 进行判断。 $A$ 值的计算公式如下<sup>[4]</sup>:

观测资料为等间隔时序时:

$$A = \sum_{i=1}^n (\alpha - \bar{\alpha}) (i - \frac{n+1}{2}) / \sum_{i=1}^n (i - \frac{n+1}{2})^2 \quad (1)$$

观测资料为非等间隔时序时:

$$A=\sum_{i=1}^n\left(t_i-\bar{t}\right)\left(a_i-\bar{a}\right) / \sum_{i=1}^n\left(t_i-\bar{t}\right)^2 \quad(2)$$

上式中,  $i(i=1, 2, 3, \dots, n)$ ——时间序号;  $t_i$ ——监测累计时间;  $\bar{t}$ ——时间  $t_i$  的平均值;  $\bar{a}$ ——累计位移  $X(i)$  的切线角,  $\bar{\alpha}$ ——切线角  $\alpha$  的平均值。

$\alpha$  由下式进行计算:

$$\alpha=\arctan \frac{X(i)-X(i-1)}{B\left(t_i-t_{i-1}\right)} \quad(3)$$

其中  $B$  为比例尺度, 即:

$$B=\frac{X(n)-X(1)}{B\left(t_n-t_1\right)} \quad(4)$$

当  $A<0$ , 边坡处于初始变形阶段, 应对斜坡进行长期预报, 分析斜坡的稳定性; 当  $A=0$ , 边坡处于稳定变形阶段, 则需进行中期预报, 判别斜坡的变形趋势和滑动时间; 当  $A>0$ , 边坡处于加速变形阶段, 则需进行短期和临滑预报, 目标为坡体整体滑动时间。方法二: 其原理是先对变形监测资料滤波, 然后采用指数函数  $A e^{B \cdot x}$  拟合速度与时间的关系, 用  $B$  值判断滑坡所处变形阶段。当  $B>0$  时, 变形进入加速趋势;  $B=0$  时, 变形基本处于匀速变形阶段;  $B<0$  时, 认为变形趋于收敛。

表 1 滑坡预报模型和方法总结

滑坡预报模型及方法		基本特点	适用阶段	备注
确定性 预报模型	斋滕迪孝方法 HOCK 法	用严格的推理方法, 特别是数学、物理方法, 进行精确分析, 得出明确的推理判断	加速蠕变阶段	以蠕变理论为基础, 建立了加速蠕变经验方程, 其精度受到一定的限制
	K · KAWAWURA 苏爱军模型			
	福围斜坡时间预报法		临滑预报	以蠕变理论为基础考虑了外动力因素 以滑体变形功率作为时间预报参数 适用于黄土滑坡
	蠕变样条联合模型		临滑预报	
	滑体变形功率法		中短期预报	
	滑坡形变分析预报法		长期预报	
极限分析法				
统计 预报模型	灰色 GM (1, 1) 模型(传统 GM (1, 1) 模型、非等时距序列的 GM (1, 1) 模型、新陈代谢 GM (1, 1) 模型、优化 GM (1, 1) 模型、逐步迭代法 GM (1, 1) 模型等)	以因果关系分析和统计关系分析为基础建立的各种预报模型	短临预报	模型预测精度取决于模型参数的取值, 优化 GM (1, 1) 模型也适用于滑坡的中长期预报, 逐步迭代法 GM (1, 1) 模型计算精度较高
	生物生长模型(Pearl 模型、Verhulst 模型、Verhulst 反函数模型)		短临预报	在加速变形阶段预报精度较高
	曲线回归分析模型			
	多元非线性相关分析法			
	指数平滑法			
	卡尔曼滤波法			
	时间序列预报模型			
	马尔科夫链预测		中短期预报	多属趋势预报和跟踪预报, 当滑坡处于加速变形阶段时, 可以较准确地预报剧滑时间
	模糊数学方法			
	泊松旋回法			
	动态跟踪法			
	斜坡蠕滑预报模型(GMDH 预报法)			
	梯度—正弦模型			
	正交多项式最佳逼近模型			
	灰色位移向量角法		短期和临滑预报	主要适用于堆积层滑坡
	非线性 预报模型		BP 神经网络模型	中短期预报
协同预测模型		临滑预报		
滑坡预报的 BP—GA 混合算法		中短期预报	联合模型预报精度较单个模型高	
协同- 分岔模型		临滑预报		
突变理论预报(尖点突变模型和灰色尖点突变模型)		中短期预报		
动态分维跟踪预报		中长期预报		可跟踪预报斜坡的最短安全期
非线性动力学模型		长期预报		
位移动力学分析法		长期预报		
类比 分析法	宏观信息预报模型	变形阶段预报		
	黄金分割法	中长期预报		
	力学图解分析法	用作崩塌判据, 可以判定破坏形式		

### 2.3 预报模型及其适用性分析

滑坡预报方法的研究已有 40 余年的历史,通过对这一期间滑坡预报模型和方法及其适用性进行分析总结,结果如表 1<sup>[1-14]</sup>。

### 2.4 多模型预报结果判别

采用多个模型预报滑坡,必然产生多个结果。如何取舍或评判多个模型的预报结果,是滑坡多模型综合预测预报的关键问题。具体的评判方法如下<sup>[14,15]</sup>:

对于任一滑坡监测位移时间序列,设含有  $n$  个监测值  $(X_1(T_1, D_1), X_2(T_2, D_2), \dots, X_n(T_n, D_n))$ , 选用  $m$  个预报模型  $(M_1, M_2, \dots, M_m)$  对其进行预报,得到相应的  $m$  个预报结果  $(R_1, R_2, \dots, R_m)$ 。

(1) 首先利用各个模型计算  $T_1, T_2, \dots, T_n$  监测时刻的位移值  $D_{ij}$  称为模型计算位移值,其中  $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ :

(2) 求模型计算位移值与实测位移值的相对误差  $\xi$

$$\xi_{ij} = \left| \frac{D_j - D_{ij}}{D_j} \right| \quad i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

(3) 求模型对该滑坡的相对误差,简称模型相对误差  $\epsilon$

$$\epsilon = \frac{\sum_{j=1}^n \xi_{ij}}{n} \quad i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

(4) 求模型对该滑坡的相对适宜度  $\eta$

$$\eta = 1 - \epsilon \quad i=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

(5) 求模型适宜权重:

$$\omega_i = \frac{\eta_i}{\sum_{i=1}^m \eta_i} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (8)$$

(6) 计算最终预报结果:

$$R = \sum_{i=1}^m \omega_i \times R_i \quad (9)$$

## 3 滑坡多模型综合预测预报模块

为了实现滑坡的多模型综合预测预报,使上述的预报理论和方法更具实用性和可操作性,运用 VB 高级程序设计语言设计并研制了滑坡多模型综合预测预报模块<sup>[15,16]</sup>。该模块针对不同类型滑坡,各种影响滑坡的因素及边界条件,依据滑坡所处的变形阶段,建立和开发适用不同条件的滑坡预测预报模型,为分析滑坡变形、失稳时间提供理论依据。但是,单独采用某点的监测资料或某种模型对滑坡进行预测预报势必有一定的局限性,利用多种监测资料分析处理手段和多种模型进行分析对比,不失为一种提高滑坡预报准确率的可尝试方法。

滑坡的多模型综合预测预报模块将滑坡监测信息的处理、变形阶段的判别、预报模型的选择和计算以及多模型预报结果评判有机地结合在一起,综合分析滑坡滑动时间的预测预报。该模块主要包含以下三个子模块(图 2):

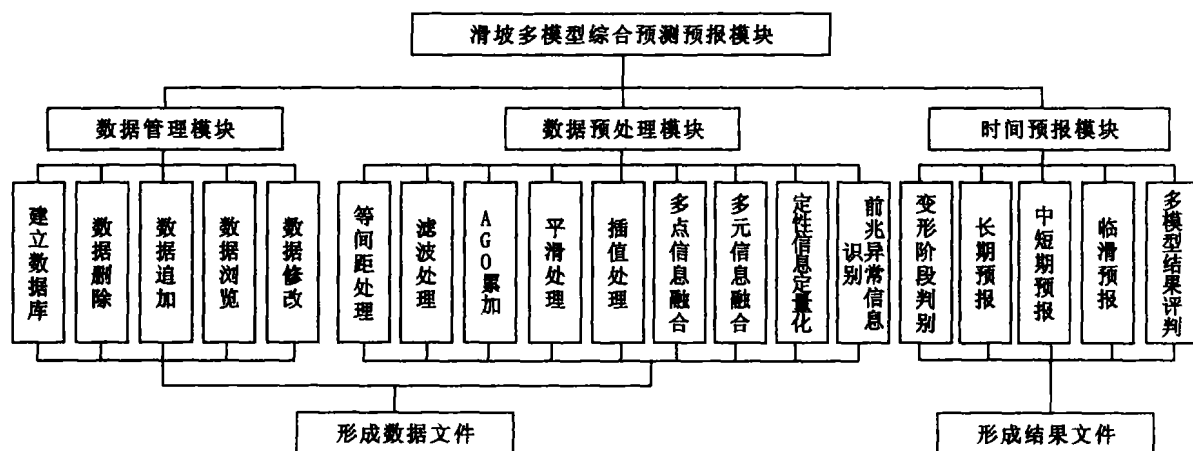


图 2 滑坡多模型综合预测预报模块结构图

(1) 数据预处理模块。该模块具有对单监测点数据进行插值、滤波、累加生成、平滑处理等功能,以及多监测点信息融合、多元信息融合、定性信息定量化以及前兆异常信息识别等功能。选择数据处理方法时,必须在监测量化信息与滑坡变形机制的基础上,并考虑预报模型对资料的要求。

(2) 时间预报模块。该模块是滑坡多模型综合预测预报的核心,该模块主要包括监测点的选择、监测信息的处理、变形阶段判别、长期预报、中短期预报和临滑预报以及多模型结果评判等内容,汇集了 30 多个预测预报模型,这些模型从不同角度、不同阶段、用不同参数,对各种滑坡的变形趋势和滑动时间进行分析和综合判断。

(3) 数据管理模块。主要是采用数据库技术,对滑坡的各种信息进行管理。滑坡信息的系统化和科学化的管理,是实现滑坡预测预报的基础。

## 4 实例分析

以甘肃黄龙西村滑坡为例对滑坡的多模型综合预报加以应用。

甘肃天水黄龙西村滑坡,发生于 1963 年 9 月 27 日 17 时,属于黄土高势能滑坡,滑体体积  $3.9 \times 10^3 \text{ m}^3$ 。滑坡前缘抵达渭河,并破坏了铁路建筑物,覆盖了部分村舍农田。滑坡发生前数日的位移监测资料如表 2<sup>[4]</sup>。

表 2 黄龙西村滑坡位移监测时序资料

监测日期	1963-09-22	1963-09-23	1963-09-24	1963-09-25	1963-09-26	1963-09-27
测点位移值/m	0.025	0.032	0.055	0.100	0.300	0.600

依据滑坡进入加速变形阶段的位移监测时序资料,选择与加速变形阶段相适宜的短期和临滑预报模型: Verhulst 模型、协同模型和二阶回归模型对黄龙西村滑坡进行预报,将

位移监测时序资料分别代入各个模型进行计算, 并对计算结果按上述多模型预报结果评判方法进行综合评判, 得出综合预报结果。利用 vb 编的滑坡多模型综合预测预报模块程序

预报的结果如图 3~ 图 5。从图中可看出, 通过综合评判后的预报结果为 1963 年 9 月 27 日 13 时, 与实际滑动时间相差 5 h, 取得了较好的预报效果。

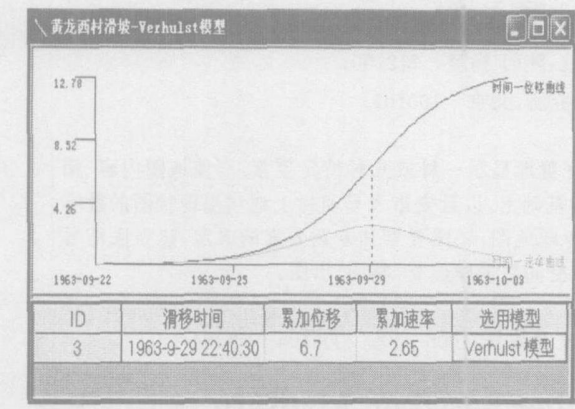


图 3 黄龙西村滑坡 Verhulst 模型预报结果

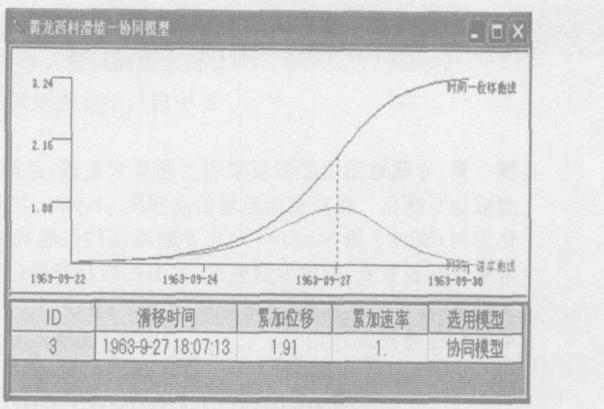


图 4 黄龙西村滑坡协同模型预报结果

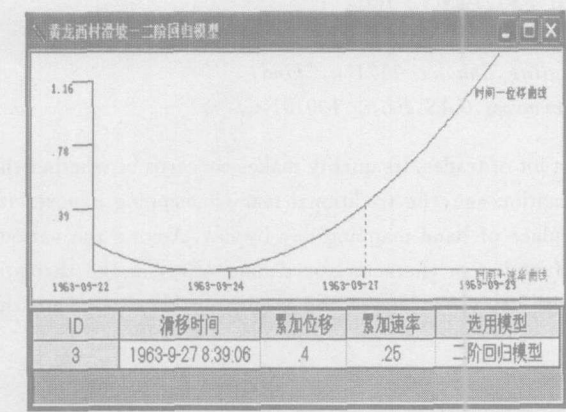


图 5 黄龙西村滑坡回归模型预报结果

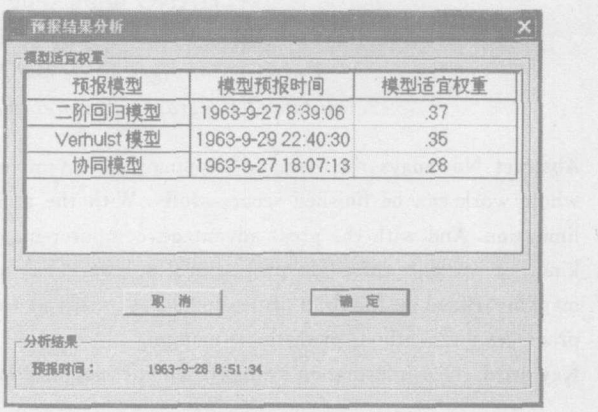


图 6 黄龙西村滑坡综合预报评判结果

本文提出了以滑坡的监测资料为依据, 通过监测点的选取和变形阶段的判别, 然后选择多个与所预报滑坡相适宜的预测预报模型, 并对多个模型的预报结果进行综合评判的多模型综合预报方法, 并以甘肃黄龙西村滑坡为例对该方法进行

行了应用、验证和分析。分析结果表明, 利用多模型综合预报方法不失为一种确定最终预报结果和提高预报精度的可尝试性方法。

参考文献:

[1] 于济民 滑坡动态监测预报技术[J] 中国铁道科学, 1992, 13(2): 81- 91

[2] 苏爱军 滑坡预报方法探讨[J] 水文地质工程地质, 1990, (5): 50- 51

[3] 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] 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

[5] 黄润秋, 许强 斜坡失稳时间的协同预测模型[J] 山地研究, 1997, 15(1): 7- 12

[6] 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

[7] 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

[8] 黄润秋, 许强 工程地质广义科学分析原理及应用[M] 北京: 地质出版社, 1997

[9] 郑孝玉 滑坡预报研究方法综述[J] 世界地质, 2000, 19(4): 370- 374

[10] 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

[11] Rat,M. The landslide at La Clapiere: monitoring and prediction of failure[J] International Journal of Rock M echanics and M ining Sciences & Geomechanics, 1996, 33(6): 420- 430

[12] D Sornettea, et al Towards landslide predictions: two case studies[J] Physica A , 2004, 338: 605- 632

[13] 王尚庆, 等 长江三峡滑坡监测预报[M] 北京: 地质出版社, 1998

[14] 李秀珍, 等 滑坡预报模型和预报判据[J] 灾害学, 2003, 18(4): 71- 78

[15] 王秋明, 蔡耀军, 等 滑坡监测数据处理预报软件研究及应用[J] 水力发电, 1998, (4): 49- 51

[16] 殷坤龙 滑坡灾害预测预报研究[M] 北京: 中国地质大学出版社, 2004