

文章编号: 1000-7598(2009)06-1747-07

滑坡临滑预报的态矢量方法研究

姜彤, 王伟, 崔江利, 陈贤挺

(华北水利水电学院 资源与环境学院, 郑州 450011)

摘要: 态矢量是统计物理学中对连续场进行粗粒化描述的一种方法。将其引入滑坡预报中, 通过将滑坡危险区划分为 n 个子区域, 在各个时间窗内对一系列子区域的监测数据进行态矢量分析, 将监测数据与降雨量态矢量的模等归一化后叠加, 研究一段时间内滑坡位移态矢量的发展变化规律, 并提出利用态矢量进行滑坡预报的新方法。以新滩滑坡为例, 对累计水平位移进行态矢量分析, 发现在滑坡前态矢量的模和态矢量增量的模均发生了明显突变, 按态矢量曲线的变化规律, 依据滑坡预警分级方法提出 3 级滑坡预警, 最高预警级别预报的滑坡时间比实际滑坡时间提前 2 天。研究表明, 态矢量的急剧突变是滑坡发生的前兆, 可以用来进行滑坡的短期和临滑预报。

关键词: 态矢量; 滑坡预报; 归一化处理; 新滩滑坡

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

Landslide forecast based on state vector method

JIANG Tong, WANG Wei, CUI Jiang-li, CHEN Xian-ting

(College of Resources and Environmental Science, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: State vector is a method for describing coarse graining of continuous field in statistical physics. Introducing it into landslide forecasting, by dividing landslide hazard into n subregions, the state vector analysis is done to a series of monitoring data of subregion in every time window; through stacking modules of rainfall and monitoring data state vector after normalization, development and variations of state vectors of landslide displacements in a period are studied; and a new method is proposed to forecast landslide by using state vector. Taking Xintan Landslide for example, accumulative horizontal displacement is analyzed by state vector; it is found that the modulus and the incremental modulus of state vector both make mutation before the landslide obviously, according to the variation of state-vector curves, based on the grading method of landslide early warning, three-grade landslide early warning is put forward; the highest warning level forecasts the landslide time is two days earlier than that of actual landslide. The result shows that the mutation of state vector is the precursory of landslide, which can be used to predict the landslide in short time and imminent sliding.

Key words: state vector; landslide forecast; normalization; Xintan Landslide

1 引言

自古以来滑坡就因其巨大的危害性和不可预知性给人类的生产、生活带来数不尽的灾难, 造成许多不可弥补的损失和破坏。在我国每年因滑坡灾害造成的经济损失约 20~30 亿元, 给国家和人民生命财产带来巨大损失, 产生严重的社会影响^[1]。

由于滑坡地质过程、形成条件、诱发因素的复杂性、多样性及其变化的随机性、非稳定性导致滑坡动态信息极难捕捉, 同时滑坡动态监测技术和滑

坡研究理论的不成熟、不完善, 使得滑坡的预测被认为是世界公认的尖端课题^[2]。

滑坡预测预报的传统方法主要包括数值计算法、灰色系统理论、时间序列分析方法、遗传算法、地理信息系统等。近年来许多专家学者又提出了一些新的理论方法, 如黄志全等^[3]建立协同—分岔模型对新滩滑坡进行预测, 取得了较好的效果; 童志怡等^[4]根据滑坡位移随时间逐次变化的规律, 建立滑坡位移演化的逐代遗传模型, 求解滑坡每代的位移和稳定系数; 赵洪波^[5]预测边坡变形则采用了变

收稿日期: 2007-10-19

基金项目: 河南省科研人才创新工程项目 (No. 2005KYCX015); 华北水利水电学院高层次人才科研启动项目; 河南省青年骨干教师项目资助。

第一作者简介: 姜彤, 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程及地理信息系统方面的研究与教学工作。E-mail: jiangtong@ncwu.edu.cn

形时间序列模型的微粒群算法; 沈强等^[6]提出利用边坡实测位移序列来预测边坡未来时间位移的RBF神经网络方法。而将态矢量方法应用于滑坡预报尚未见相关报道。目前采用的方法, 从不同侧面为边坡稳定性分析和滑坡预测预报指明了研究方向。但这些方法都或多或少的存在一些不尽人意之处, 如不适宜地舍去某些影响因素, 导致预测结果精度较差; 仅能针对某一特殊类型的滑坡提出预测预报, 缺乏通用性; 理论较为抽象, 可操作性差; 某些方法计算工作量较大, 不宜在工程中推广等问题。

本文将统计物理学中的态矢量方法引入滑坡预测预报研究, 考虑降雨等影响因素的作用, 进行滑坡临滑预报。对滑坡区进行粗粒化处理划分为 n 个子区域, 建立描述滑坡在一段时间内各个时刻状态的态矢量, 并将计算结果归一化后与相同时间段内的降雨量等影响滑坡稳定的主要因素的态矢量归一化进行叠加, 研究曲线的变化规律, 依据滑坡预警分级机制提出滑坡预警, 达到滑坡临滑预报的目的。

2 态矢量方法

态矢量最初应用于统计物理学中, 近年来, 尹祥础等将其引入地震活动性分析中, 通过分析研究几个著名震例(海城地震、唐山地震、昆仑山口西地震), 发现地震前其态矢量均有显著的变化, 认为它可能是大地震的一种前兆, 而用之于地震预报^[7]。余怀忠等通过声发射技术试验, 对三轴应力条件下岩石试件内部微裂纹的产生和扩展进行了记录, 试验结果表明, 在岩石试件最终破坏之前, 表征态矢量的相关参量都发生了异常明显的变化, 这表明态矢量的异常变化可以被用作为岩石等脆性材料灾变的前兆^[8]。

2.1 态矢量基本概念

状态(波函数)用 Hilbert 空间的矢量描述, 称为态矢量, 这是态矢量在物理学中的概念表述。它是一个用于对连续场进行粗粒化描述的概念。

二维状态下划分物理场参见文献[7]。对于三维空间, 将一个物理量 $V(x, y, t)$ 的连续场分成 n 个子区域(如图 1)。在 t 时刻(或时间窗), 将子区域 i 内物理量 V 取平均值 V_i , 并将 V_i 作为矢量的第 i 个分量, 这样就形成 n 维矢量 $\vec{V}(t)$, 称之为态矢量。

$$\vec{V}_t = (V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n) \quad (1)$$

态矢量 $\vec{V}(t)$ 是 t 时刻对连续场 $V(x, y, t)$ 的粗粒化描述, 矢量 $\vec{V}_t$ 描述了物理量 V 在 t 时刻的状态(空间分布)。如果知道一系列时间 t 的态矢量 $\vec{V}(t)$, 就

可能刻画该物理场的时空演化。

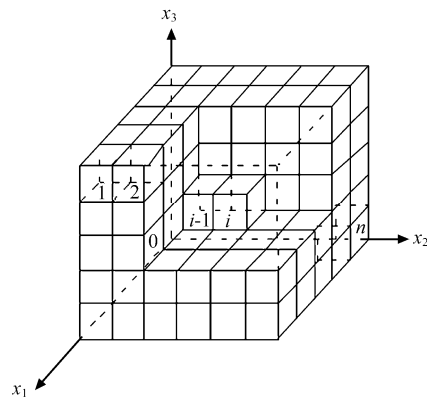


图 1 三维状态下将连续场分成 n 个子区域
Fig.1 Continuous field divided into n parts in three-dimensional state

相邻两时刻 $t-\Delta t$ 及 t 的态矢量之差, 称之为态矢量增量, 态矢量的增量也是一个 n 维矢量

$$\Delta \vec{V}_{t-\Delta t, t} = \vec{V}_t - \vec{V}_{t-\Delta t} \quad (2)$$

它反映了两相邻时刻态矢量的变化^[7]。

三维情况下态矢量的图示见图 2。

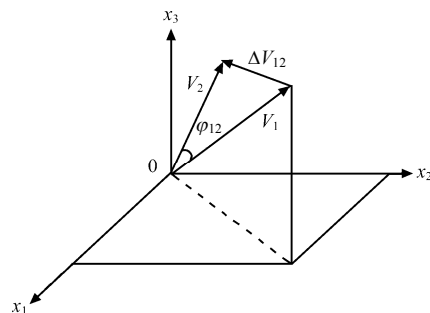


图 2 三维情况下的态矢量^[7]
Fig.2 State vector in three-dimensional state^[7]

为了利用态矢量的变化定量地描述物理场 $V_i(t)$ 的演化, 尹祥础等在文献[7]中定义了如下一系列标量值:

(1) 态矢量的模 $|\vec{V}_t|$ (以下用 M_0 表示), 它表征整个物理场的总体水平:

$$M_0 = |\vec{V}_t| \quad (3)$$

(2) 态矢量 $\vec{V}_{t-\Delta t}$, $\vec{V}_t$ 之间夹角的变化(以下用 φ 表示), 表征相邻两时刻态的变化:

$$\varphi_{t-\Delta t, t} = \arccos \frac{\vec{V}_{t-\Delta t} \cdot \vec{V}_t}{|\vec{V}_{t-\Delta t}| |\vec{V}_t|} \quad (4)$$

(3) 态矢量增量的模 $|\vec{V}_{t-\Delta t,t}|$ 随时间的变化(以下用 ΔM_0 表示), 从另一个角度反映了整个物理场的态的变化:

$$\Delta M_0 = |\vec{V}_{t-\Delta t,t}| \quad (5)$$

2.2 临滑预报态矢量模型的建立

态矢量方法在地震预报和岩石等脆性材料的灾变预报中的应用, 表明该方法可以在突变发生前根据某些信息量值的变化预测出突变的发生。对于滑坡, 如果 V 是反映边坡监测点位移、滑动速度、加速度或应力、应变等的物理量, 当边坡位移、滑动速度、加速度等监测量增大时, M_0 、 ΔM_0 的值就会明显增大; 而当边坡内部的应力、应变开始出现集中时, φ 、 ΔM_0 的值则会显著增加。当这些计算参量都发生异常明显的变化时, 意味着边坡将临近灾变破坏。因此, 态矢量能较为定量地刻画出边坡破坏的进程及其迫近程度, 从而能够对滑坡的发生做出预测。

该方法考虑降雨量等影响边坡稳定的一些主要因素的影响, 但由于累计位移、滑动速度、加速度与降雨量、应力等影响滑坡的因素存在数量级上相差较大、单位不统一等不利因素, 不便于数据的处理分析, 故采用将其分别归一化处理后再进行叠加方法。

数据归一化处理的公式如下:

$$M'_i = M_i / M_{\max} \quad (6)$$

式中: M'_i 为归一化处理后的数据; M_i 代表态矢量的模、态矢量增量的模、态矢量夹角等标量值及降雨量、速度、应力等数值; $M_{\max}$ 为 M_i 中数值最大的数据。

归一化方法是一种简单的数据调整方法, 一方面可使数据无量纲化, 便于数学处理; 另一方面使数据均化为最大值为 1 的无量纲数值, 这对于叠加和进行数据分析等具有很大的优势, 同时可以更加清晰、方便地从曲线图中找出预警线的位置, 进行滑坡时间的预报。

在滑坡预报应用中, 首先将滑坡研究区划分为 n 个子区域, 子区域的划分一般在二维状态下进行, 对于包括深部监测数据的情况应考虑采用三维状态的划分。鉴于滑坡监测点布置间距较大的实际情况, 划分子区域时应考虑将全部监测点分别置于不同的子区域内为宜。同时将研究时间段以一定的步长划分为一定量的时间窗, 时间窗的划分应以监测数据的时间跨度为依据, 一般以日、月、年等作为单位

步长。在选取的某一时间窗内将子区域 i 内物理量 V (以滑坡位移 S 为例) 取平均值 S_i , 作为该子区域的量值, 即矢量的第 i 个分量, 在此基础上形成 n 维滑坡位移矢量 $\vec{S}(t)$:

$$\vec{S}_t = (S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n) \quad (7)$$

将一系列时间窗内的滑坡位移矢量 $\vec{S}(t)$ 依据式 (3) 及式 (5) 计算出相应的滑坡位移态矢量的模 M_0 及滑坡位移态矢量增量的模 ΔM_0 :

滑坡位移态矢量的模 M_0 :

$$M_0 = |\vec{S}_t| \quad (8)$$

滑坡位移态矢量增量的模 ΔM_0 :

$$\Delta M_0 = |\vec{S}_{t-\Delta t,t}| \quad (9)$$

将以上所求的数据利用式 6 进行归一化处理, 将同一时间段内的降雨量等数据归一化处理后与以上处理的数据进行等维叠加, 绘制相应的曲线图, 分析曲线在研究时间段内的变化规律, 在其发生突变时提出滑坡预报。对于滑坡速度 V 、滑坡加速度 a 等均可以利用以上方法进行类似的计算, 并与降雨量等数据在归一化叠加后进行曲线的研究分析。滑坡位移、速度、加速度等除可以与降雨量进行叠加外, 还可以与地应力、孔隙水压力等监测数据进行归一化等维叠加。

该方法在滑坡预报中应用, 具有理论简单、可操作性强的特点, 对于各种类型的滑坡具有较好的通用性。

3 滑坡临滑预警分级

为了在滑坡发生前更好地指导灾害的防治和人员财物的转移, 提出滑坡预警机制, 并在不同预警级别里规定不同的工作重心, 从而可以指导人们有条不紊地进行滑坡前的一系列准备工作。

根据经验, 滑坡滑动速度达到或超过 10 mm/d 应提出滑坡预警, 本文将其作为第 1 级预警依据, 对于滑坡速度的历史最大值小于 10 mm/d 时, 可将滑坡速度的历史最大值作为第 1 级预警的依据; 第 2 级预警以滑坡位移 (或滑动速度、滑动加速度等) 与降雨量态矢量归一化叠加后的历史最大值作为预警的依据; 对于第 3 级预警, 通过对大量滑坡数据的统计分析, 本文提出以下公式:

$$A \geq kA_0 \quad (10)$$

式中: A 为第 3 级预警值; A_0 为滑坡位移 (或速度、加速度等) 与降雨量态矢量归一化叠加后的历史最

大值; k 为常数, 取 $k=1.2$ 作为第 3 级预警的依据, 此时的时间为滑坡发生时间。

式 (3) 是针对一般滑坡提出的经验公式, 其中 k 的取值应较为保守, 在一般的应用中式 (1) 取等号。

对于滑坡预报主要目的是为了有效地采取灾前防御措施, 降低灾害造成的损失。在不同的预警级别应进行不同的防滑准备工作, 第 1 级预警提出后, 应加强对滑坡的监测力度, 同时进行人员、财物转移的准备; 当第 2 级滑坡预警提出后, 应疏散滑坡影响区内的人员及财物到安全的地带, 同时计算第 3 级预警值, 以此推算出滑坡发生时间。当然也有可能滑坡位移与降雨量态矢量归一化叠加曲线在达到第 1 或第 2 级预警线后并未继续上升, 而是发生了下降, 此时应相应地降低预警级别, 即滑坡的预警级别应根据滑坡位移态矢量归一化与降雨量归一化叠加曲线的变化而相应变化, 曲线上升, 预警级别提高, 曲线下降, 预警级别相应降低。

4 实例分析

新滩滑坡位于长江三峡西陵峡上段兵书宝剑峡出口处, 距三峡水利枢纽仅 26.2 km, 一直是三峡库区边坡研究的热点。滑坡体走向近南北, 整体地势为北高南低的典型重力地貌。滑坡区多年平均降雨量为 1 086 mm, 雨季集中在 5~10 月间 (见图 3) [9]。1985 年 6 月 12 日凌晨 3 时 45 分发生总体积约为 3000 万 m^3 的巨型滑坡, 滑坡以整体滑动的方式从高程 910 m 直冲入高程 62.5 m 的长江江面, 涌浪高达 30 m, 波及新滩故镇上、下游 10 km 之远, 导致新滩故镇完全被毁。由于之前广大地质工作者建立表面变形监测系统对滑坡体进行了必要的监测, 并及时进行了临滑预警, 滑坡区内居民无一人伤亡, 成为滑坡预报研究史上的典范。

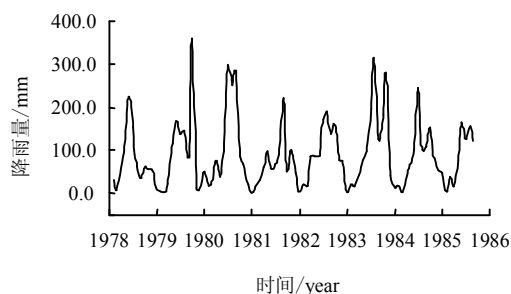


图 3 滑坡区降雨量曲线
Fig.3 Rainfall curve of landslide area

本文选取新滩滑坡具有代表性的关键部位——A3 和 B3 点 1978 年 1 月到 1985 年 6 月的位移监测数据作为态矢量分析的依据 (如图 4 所示), 时间窗口的步长为 1 个月, 对态矢量的模 M_0 及态矢量的增量的模 ΔM_0 进行分析, 分析结果见图 5 和图 6。

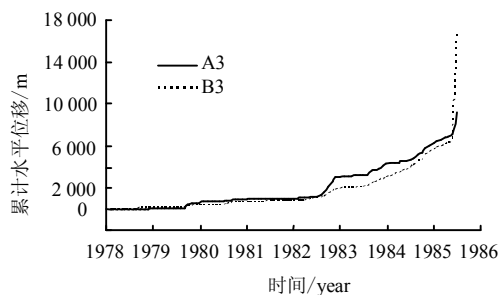


图 4 A3 与 B3 累计水平位移与时间曲线^[9-10]
Fig.4 Cumulative horizontal displacement and time curves of A3 and B3^[9-10]

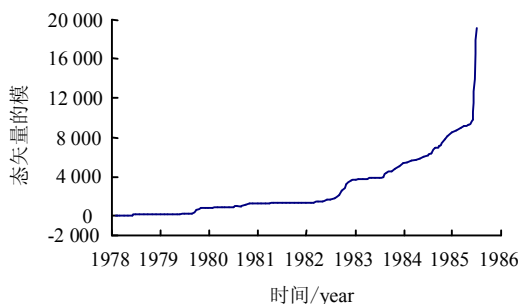


图 5 新滩滑坡前累计水平位移态矢量的模的演化过程
Fig.5 Evolution of state vector's modules of cumulative horizontal displacement before Xintan Landslide

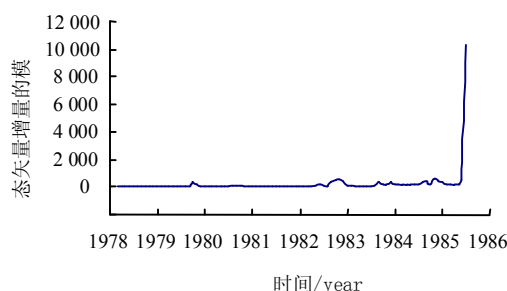


图 6 新滩滑坡前累计水平位移态矢量增量的模的演化过程
Fig.6 Evolution of increment's modules of state vector of cumulative horizontal displacement before Xintan Landslide

从图 5 和图 6 可以明显地看出, 在发生滑坡前态矢量 M_0 及态矢量的增量 ΔM_0 均发生了极为明显的突变, 对比分析新滩滑坡 1978 年 1 月到 1985 年 6 月 A3 与 B3 两监测点的累计位移曲线 (如图 4

所示)可以看出:

(1) 1978年1月到1979年8月为缓慢蠕变变形阶段, 滑坡累计位移量很小, 这段时间内图5和图6中的累计水平位移态矢量曲线的变化很不明显, 基本为一条直线;

(2) 1979年8月到1982年5月为等速蠕变阶段, 滑坡累计位移量曲线缓慢上升, 累计水平位移态矢量的模的曲线随之缓慢上升, 累计水平位移态矢量增量的模的曲线有较小的震荡;

(3) 1982年6月到1985年5月为加速蠕变阶段, 滑坡累计位移量曲线变化较大, 同时累计水平位移态矢量的模的曲线也随之发生较大的变化, 累计水平位移态矢量增量的模的曲线也有了较大的震荡;

(4) 1985年5月14日至1985年6月11日A3、B3两点均发生位移突变, 位移量分别高达8.7 m和13.7 m^[10], 相应的, 累计水平位移态矢量曲线也发生了非常明显的变化, 从较低点急剧上升, 尤其是累计水平位移态矢量增量的模的曲线表现得尤为明显, 这预示着滑坡即将发生。但何时会发生滑坡, 何时应提出滑坡预警, 由以上两幅图很难得出结论。

为了在滑坡发生前提出滑坡预警, 对累计水平位移与降雨量态矢量的模进行归一化叠加处理(见图7)。

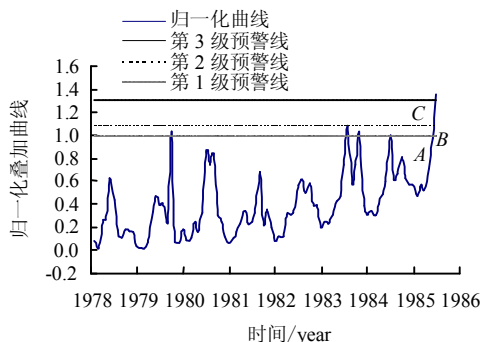


图7 新滩滑坡前累计水平位移态矢量的模与降雨量归一化叠加曲线及3条滑坡预警线

Fig.7 Evolution of cumulative displacement state vector's modules addition rainfall after normalization disposal curve before Xintan Landslide and 3 landslide warning lines

从图中可以明显地看出, 曲线随降雨量(见图3)的变化而变化, 在每年的丰水季节(5月到10月间), 曲线都出现较大的震荡, 在枯水季节曲线有所回落, 但随着累计水平位移量的增加, 回落明显减小。在滑坡发生前曲线又有一段明显的上升阶段,

而且超过历史最大值。

根据本文提出的滑坡临滑预报和预警分级标准, 对新滩滑坡滑动时间的预报和分级预警提出预警分级见表1。

表1 新滩滑坡三级预警时间

Table 1 Three levels of warning time of Xintan Landslide

预警级别	第1级预警	第2级预警	第3级预警
预警时间/年-月-日	1985-06-02	1985-06-05	1985-06-10

1985年6月12日凌晨, 新滩滑坡发生, 与本文提出方法计算的预警时间极为接近。由此可以看出, 当滑坡位移量比较小或处于等速蠕滑阶段时, 态矢量的变化很小; 随着滑动量的增大, 态矢量的变化也随之变大; 当位移量发生突变时, 相应的态矢量也表现出明显的突变, 与实际情况有非常好的吻合性。归一化叠加降雨量后, 分3级分别提出滑坡预警, 这种分阶段的滑坡预警机制更有利于人们开展防灾减灾工作, 将滑坡造成的灾害损失降至最低。

以上分析表明, 态矢量方法作为一种滑坡预报方法, 具有较高的准确性, 可以有效地进行滑坡的短期及临滑预报。

5 讨 论

降雨是滑坡发生的一个重要诱发因素, 许多滑坡都是在集中的、大规模降雨的情况下发生的, 本文采用位移叠加降雨量进行滑坡预报正是基于这个原因, 当然除了降雨之外, 态矢量方法还可以与地应力、孔隙水应力等影响滑坡的其他因素进行归一化叠加, 达到滑坡预报的目的。

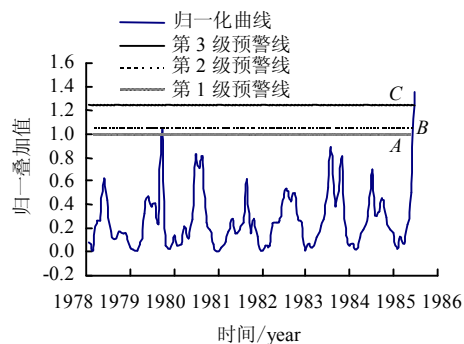


图8 新滩滑坡前滑动速度态矢量的模与降雨量归一化叠加曲线及3条滑坡预警线

Fig.8 Evolution of sliding speed state vector's modules and rainfall after normalization disposal curve before Xintan Landslide and 3 landslide warning lines

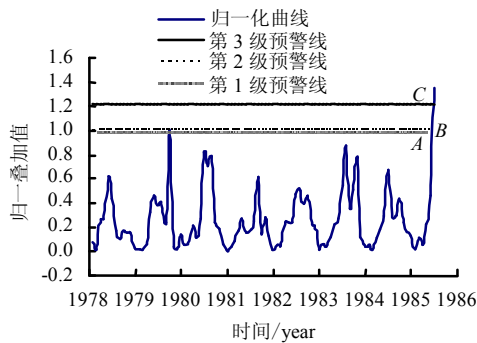


图9 新滩滑坡前滑动加速度态矢量的模与降雨量归一化叠加曲线及3条滑坡预警线

Fig.9 Evolution of sliding acceleration state vector's modules and rainfall after normalization disposal curve before Xintan Landslide and 3 landslide warning lines

本文采用位移与降雨量等进行叠加,亦可采用滑坡滑动速度或加速度等监测数据与降雨量等叠加,图8和图9分别为滑坡滑动速度矢量的模与降雨量归一化叠加曲线及滑坡滑动加速度矢量的模与降雨量归一化叠加曲线,从图中得到的预警时间如表2所示。

表2 滑坡滑动速度、滑动加速度态矢量的模与降雨量归一化叠加滑坡预警时间

Table 2 Forecast of landslide sliding speed and acceleration state vector's modules and rainfall after normalization disposal

预警级别	预警时间 /年-月-日	
	速度	加速度
第1级预警	1985-06-07	1985-06-07
第2级预警	1985-06-08	1985-06-07
第3级预警	1985-06-10	1985-06-10

对比表1可以看出,利用位移态矢量的模与降雨量归一化叠加的第3级预测的结果和利用滑动速度或加速度态矢量的模与降雨量归一化叠加的第3级预测结果基本相同,说明应用本文提出的方法进行滑坡的临滑预报具有较强的可操作性,可将研究结果推广使用。

6 结 论

(1) 态矢量方法作为一种全新的滑坡预报方法,不需要深入了解滑坡研究区内地质历史的演化过程,只需对一段时期内的态矢量演化进行分析即可;对应的物理量选择的范围很广,可以使用位移、应力、应变甚至地磁等物理量,作为态矢量分析的对象。

(2) 在滑坡位移量变化不大时其曲线表现为直线或较小的震荡,当位移量发生突变时曲线会随

之发生突变,这种突变相对于位移的变化表现得更为明显,从而能有效的指导人们对滑坡进行及时的预报;对于各种类型的边坡都具有较好的适用性;所用理论简单易懂,计算理论和方法具有很强的可操作性。

(3) 以新滩滑坡为例,利用累计水平位移态矢量的模与降雨量态矢量的模归一化叠加的方法对其进行分析研究,基于滑坡预警分级方法提出滑坡3级预警机制,为滑坡前进行有效的防灾减灾工作提供了依据,同时第3级预警即滑坡时间预报比实际滑坡提前2d,表明该方法具有较好的预报效果。

(4) 不可否认,态矢量方法对于监测数据的依赖性较强,在监测数据不足或不准确的情况下,预测结果会有很大出入。受现有数据的限制,本文仅对位移量、滑动速度、加速度与降雨量进行了态矢量归一化叠加分析,对于滑坡前发生变化的其他物理量,如应力、应变的态矢量分析有待进一步的研究。

态矢量方法在滑坡预报中的应用尚处于起步阶段,还需要进行深入研究探索。

参 考 文 献

- [1] 王恭先,徐峻龄,刘光代,等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [2] 王旭华,陈守煜,陈晓云. 边坡变形曲线的正态特性及模糊优选法定权研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3487—3491.
WANG Xu-hua, CHEN Shou-yu, CHEN Xiao-yun. Study on normal distribution characteristics of creep curves of slope deformation and weight determination with fuzzy optimization[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(19): 3487—3491.
- [3] 黄志全,张长存,姜彤,等. 滑坡预报的协同-分岔模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 498—501.
HUANG Zhi-quan, ZHANG Chang-cun, JIANG Tong, et al. Synergetic-bifurcated model of landslide prediction and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(4): 498—501.
- [4] 童志怡,陈从新,肖国峰. 滑坡演化的逐代遗传模型[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 206—208.
TONG Zhi-yi, CHEN Cong-xin, XIAO Guo-feng. Stepwise inherited model of landslide evolvement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 206—208.

- [5] 赵洪波. 边坡变形预测的群体智能模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1664—1669.
ZHAO Hong-bo. Swarm intelligent model for deformation predicting of slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1664—1669.
- [6] 沈强, 陈从新, 汪稔. 边坡位移预测的 RBF 神经网络方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 2883—2887.
SHEN Qiang, CHEN Cong-xi, WANG Ren. Method to forecast displacement of slope based on RBF neural network[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp1): 2883—2887.
- [7] 尹祥础, 余怀忠, 张永仙, 等. 态矢量——分析地震活动性的一种新方法[J]. 中国地震, 2004, 20(1): 73—79.
YIN Xiang-chu, YU Huai-zhong, ZHANG Yong-xian, et al. State vector—a new method to analysis seismicity[J]. **Earthquake Research in China**, 2004, 20(1): 73—79.
- [8] 余怀忠, 尹祥础, 张永仙, 等. 态矢量方法的实验研究[J]. 地震, 2004, 24(3): 1—7.
YU Huai-zhong, YIN Xiang-chu, ZHANG Yong-xian, et al. Experimental study of state vector[J]. **Earthquake**, 2004, 24(3): 1—7.
- [9] 贺可强. 堆积层滑坡位移信息分析与失稳趋势判据的研究——以长江三峡区典型堆积层滑坡分析为例[博士学位论文 D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
- [10] 傅冰清, 邓德润. 新滩滑坡立体监测系统研究[J]. 大坝观测与土工测试, 1989, 13(4): 3—7.
FU Bing-qing, DENG De-run. Xintan landslide three-dimensional monitoring system[J]. **Dam Observation and Geotechnical Tests**, 1989, 13(4): 3—7.