

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0125

杨宏伟,胡江,槐先锋,等.基于多变量时间序列局部异常系数的滑坡预警方法[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1227-1237. YANG H W, HU J, HUAI X F, et al. Multivariable local outlier factor based early warning method for slope landslides[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1227-1237. (in Chinese)

# 基于多变量时间序列局部异常系数的滑坡预警方法

杨宏伟<sup>1</sup>, 胡江<sup>2</sup>, 槐先锋<sup>1</sup>, 马福恒<sup>2</sup>, 马梓昇<sup>1</sup>

(1. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038; 2. 南京水利科学研究院, 南京 210029)

**摘要:**针对蠕变型滑坡变形具有渐变性、阶段性和变异性等特征,应用数据挖掘技术提出基于多变量监测时间序列的滑坡预警方法。采用动态时间规划方法度量边坡变形多测点时间序列间的相似性,确定边坡的时空变形规律;考虑主要影响因素和边坡变形等多变量,利用多变量局部异常系数划分滑坡变形演化阶段;基于统计学方法拟定基于局部异常系数的滑坡预警阈值,提出基于多变量局部异常系数阈值的滑坡预警方法。卧龙寺和新滩滑坡验证算例结果表明,提出的方法对累计位移、变形速率和加速度均较敏感,比已有估算方法更具时效性,能防止因环境因素波动而造成的误判,具有更好稳健性。提出的方法应用于某渠坡滑坡预警,结果表明渠坡现阶段较为稳定。因此,提出的方法可为蠕变型滑坡预警提供参考。

**关键词:**边坡;变形;滑坡;预警;数据挖掘

中图分类号:TV91;P642 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



具有蠕变特点的滑坡从变形启动到整体破坏一般要经历初始、匀速和加速变形等3个阶段,各阶段变形特点各不相同。为此,已有研究<sup>[1-2]</sup>根据各变形阶段特点提出了多种基于累计位移、变形速率、加速度等阈值的滑坡预警方法。例如:许强等<sup>[3-4]</sup>认为变形加速度的变化特征与累积位移、变形速率不同,一旦进入临滑阶段,加速度剧增,呈现出明显突变特征,从而提出了将突变点作为进入临滑阶段的分界点,作为临滑预警指标;秦四清<sup>[5]</sup>采用基于一阶差分的高通滤波法提取变形异常点,给出了异常识别准则;龙辉等<sup>[6-7]</sup>建立了尖点突变模型,以突变特征值突降至0作为滑坡前兆特征;罗文强等<sup>[8]</sup>利用分割点检验理论,以分割点划分滑坡演化阶段,为预警提供判据。然而,人为判断和划分变形及演化阶段受经验限制较明显。

近年来在受关注边坡上逐渐布置了安全监测仪

器,并获取了大量可用安全监测数据。为此,已有研究将数据挖掘技术应用到滑坡预警方面,以便从监测数据中获取直观、有价值的信息。如:刘小珊等<sup>[9]</sup>采用关联规则挖掘滑坡变形过程中累积位移、变形加速度等与演化阶段的关联关系,发现滑坡演化阶段与变形加速度变化特征关联性强,从而将变形加速度阈值作为划分滑坡演化阶段的指标,通过滑坡实例验证了可靠性;赵久彬等<sup>[10]</sup>提出了一种前后部项约束关联规则的并行化算法,综合考虑降雨量、库岸水位等诱发因子对滑坡变形的影响,挖掘了研究区滑坡的危险性因子,获得了关联规则,以此提出基于规则前后部项约束关联规则的滑坡预警方法。然而,数据挖掘技术在滑坡预警中的应用尚处于起步阶段,忽视了多变量和滑坡变形的空间特性,缺少滑坡演化机理、多场信息挖掘方面的研究。

诱发因子、滑坡变形的时间序列是滑坡演化阶

收稿日期:2020-12-19 修回日期:2021-07-15 网络出版时间:2021-07-29

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210728.1331.004.html

基金项目:国家自然科学基金项目(51879169;51779155);南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y720002;Y720003)

作者简介:杨宏伟(1976—),男,吉林扶余人,高级工程师,主要从事水利水电工程运行管理。E-mail:249639631@qq.com

通信作者:胡江(1983—),男,湖南衡阳人,高级工程师,博士,主要从事水工结构老化病害及安全监控研究。E-mail:huj@nhri.cn

段判别的基础,要更合理地实现滑坡预警,应研究提出更科学的方法。本文采用动态时间规划(dynamic time warping, DTW)度量变形测点时间序列间的相似性,在此基础上,考虑主要影响因素和变形等多变量,利用多变量局部异常系数(local outlier factor, LOF)划分滑坡演化阶段,基于统计学方法拟定 LOF 预警阈值,提出基于多变量 LOF 的滑坡预警方法,并以实例验证预警方法的有效性,进而应用到某渠坡蠕变式滑坡预警中,为蠕变型滑坡稳定状态判断和滑坡预警提供参考。

## 1 边坡变形破坏时空演化规律

### 1.1 边坡变形破坏的时间演化规律

大量蠕变型滑坡变形监测结果表明,从开始出现变形到最终失稳破坏一般会经历如图 1 所示的初始、匀速和加速变形等 3 个阶段。在滑坡 3 阶段基础上,部分研究将加速变形阶段细分为初加速(CD 段)、急剧加剧(临滑阶段,DF 段)等 2 阶段;部分研究更是将急剧加速阶段再细分为中加速(DE 段)、急剧加速(EF 段)阶段。准确捕捉进入临滑阶段的预警参数特征,判定滑坡变形阶段尤其是进入加速变形阶段的时间是滑坡预警的基础<sup>[3-4,11-13]</sup>。

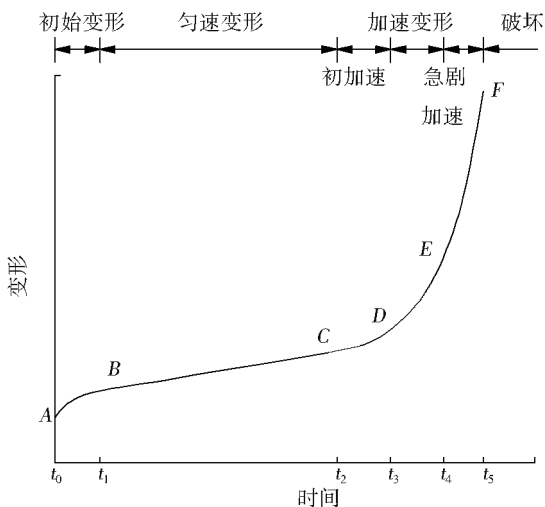


图 1 边坡滑坡变形的 3 个阶段演化

Fig. 1 Evolution scheme of three deformation phases of gradual slope landslide

滑坡预警须选取反映内在机理的指标作为预警参数:初始变形阶段变形速率会随外界因素减弱逐渐降低,加速度为负值;匀速变形阶段变形速率基本维持恒定,加速度基本为 0;加速变形阶段变形速率不断增加,加速度为正值且呈逐渐增大趋势。进入临滑阶段后,累积变形、变形速率及加速度均急剧增长,这一显著前兆特征可作为滑坡临滑预警的重要依据。

累积变形、变形速率和加速度等参数作为滑坡最直观指标,受内在机理影响,各阶段指标值各不相同,不同滑坡在相同阶段指标值可能相差数倍甚至数十倍,同一边坡内部与表层、不同位置的变形也具有不协调性,这些都导致变形指标值大不相同。虽然精确地确定滑坡变形指标值作为预警判据相当困难,但依据蠕变特点的阶段性演化特征,可探索采用数据挖掘方法划分滑坡演化阶段、识别多测点多变量的不协调性。

### 1.2 边坡变形破坏的空间演化规律

蠕变型滑坡破坏具有时空双重特征。斜坡岩土体承受压力,就会在体积、形状或宏观连续性等方面发生变化,宏观连续性无显著变化者称为变形,否则称为破坏。空间上,滑坡破坏不是整体同时发生的,而是经历了局部变形、应力转移、变形破坏扩展、断裂面贯通整体失稳的空间过程<sup>[3,14-15]</sup>。

在滑坡预警中,每一个阶跃都可能被认为进入临滑阶段前兆,从而作出错误预警。实践表明,减少这种误判应将时间、空间演化特性有机结合、综合分析。结合空间演化规律判断所处变形阶段,以牵引式蠕变型滑坡为例,变形起始于坡体前缘,滑移从滑坡体下部逐步向上部发展,根据滑坡体由下而上变形的特性,并结合宏观特征(如裂缝)判定其滑坡可能性。同时,滑坡破坏受降雨、水位升降(库岸滑坡)、地震等多种诱发因素影响,将诱发因素包含到滑坡变形阶段分析十分必要。

## 2 基于多变量 LOF 的滑坡预警方法

### 2.1 基于 DTW 的变量相似性度量

DTW 算法能最大程度减少时间偏移和失真的影响,允许对时间序列进行弹性变换,在财经、电力、水文等领域得到了广泛的应用<sup>[16]</sup>。它对不同波动幅度、时间尺度的相似形状的检测具有极高效率,因而对相似性计算具有更好的稳健性。给定长度为  $N$  的测试时间序列  $\mathbf{X}$ 、长度为  $M$  的参考时间序列  $\mathbf{Y}$ :

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_N) \quad (1)$$

$$\mathbf{Y} = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_j, \dots, y_M) \quad (2)$$

式中: $x_i$  和  $y_j$  分别表示  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$  2 个序列第  $i$ 、 $j$  个测点的测量值。

DTW 目标是在  $O(NM)$  时间内找到最优解。序列的最优排列即是通过最小化代价函数(即距离)来排列序列测点。算法首先建立距离矩阵  $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{N \times M}$  表示  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$  间成对测点的距离,这个距离矩阵称为  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$  2 个对齐序列的局部成本矩阵,定义为

$$C_i \in \mathbf{R}^{N \times M}; c_{ij} = \|x_i - y_j\|, i \in [1, N], j \in [1, M] \quad (3)$$

式中:  $C$  是局部成本矩阵, 矩阵的第  $(i, j)$  元素为  $x_i$ 、 $y_j$  间的距离  $c_{ij}$ 。

当序列相似时, 距离函数值小; 反之, 距离函数值大。一旦建立了局部成本矩阵, 可找到低成本区域的对齐路径, 该对齐路径定义了元素  $x_i \in X$  到元素  $y_j \in Y$  的对应关系, 边界条件将  $X$  和  $Y$  的第一个和最后一个元素指定给彼此。DTW 建立弯曲路径  $p$  是定义  $X$  和  $Y$  间映射的一组连续的矩阵元素集合。 $p$  的第  $l$  个元素定义为  $p_l = (p_i, p_j) \in [1, N] \times [1, M], l \in [1, K] (\max(N, M) \leq K \leq N + M - 1)$ ,  $K$  是弯曲路径长度。

弯曲路径受以下条件约束: (1) 边界条件,  $p_1 = (p_1, p_1)$ 、 $p_K = (p_N, p_M)$ , 要求弯曲路径从矩阵的对角单元开始和结束; (2) 单调性条件, 给定  $p_l = (p_a, p_b)$ , 则  $p_{l-1} = (p_{a'}, p_{b'})$ , 其中,  $a - a' \geq 0, b - b' \geq 0$ , 要求  $p$  在时间上是单调间隔; (3) 连续性条件, 给定  $p_l = (p_a, p_b)$ , 则  $p_{l-1} = (p_{a'}, p_{b'})$ , 其中,  $a - a' \leq 1, b - b' \leq 1$ , 限制弯曲路径中允许到相邻单元步数(包括对角相邻单元)。

与路径相关联的总成本函数  $c_p$  定义为

$$c_p(X, Y) = \sum_{l=1}^K c(x_{i_l}, y_{j_l}) \quad (4)$$

式中:  $c(x_{i_l}, y_{j_l})$  是弯曲路径第  $l$  个元素中 2 个数据点索引间的距离。

序列  $X$  和  $Y$  间相似性度量  $D_{ij}$  是使代价最小化的最佳弯曲路径  $p^*$ 。为克服最优路径指数增长, 应用动态规划(dynamic programming, DP)得到在一定约束条件下的最优匹配为

$$DTW(X, Y) = c_{p^*}(X, Y) = \min\{c_p(X, Y), p \in \mathbf{P}^{N \times M}\} \quad (5)$$

式中:  $p^* = \{p_1^*, p_2^*, \dots, p_l^*, \dots, p_K^*\}$ ,  $\mathbf{P}^{N \times M}$  是所有可能弯曲路径的集合, 并构建累积成本矩阵或全局成本矩阵  $D$ , 其定义为

$$\begin{aligned} D(1, j) &= \sum_{k=1}^j c(x_1, y_k), j \in [1, M] \\ D(i, 1) &= \sum_{k=1}^i c(x_k, y_1), i \in [1, N] \\ D(i, j) &= \min\{D(i-1, j-1), D(i-1, j), \\ &D(i, j-1)\} + c(x_i, y_j), i \in [1, N], j \in [1, M] \end{aligned} \quad (6)$$

一旦成本矩阵建立了弯曲路径, 就可按贪婪策略从  $p_{\text{end}} = (p_N, p_M)$  到  $p_{\text{start}} = (p_1, p_1)$  进行回溯。这种方法会造成时间序列  $X$  的大量点映射到  $Y$  的单一, 以致找不到最佳映射。为此, 使用 Sakoe

Chuba(S-C)带和 Itakura 平行四边形全局约束限制允许弯曲路径沿对角线方向来解决。其中, S-C 带沿主对角线  $i=j$  运行, 并在固定宽度  $T_0 \in N$  时约束弯曲范围。

S-C 带限制强制递归路径在某一阈值  $T_0$  停止, 全局成本矩阵  $D$  计算如下

$$D(i, j) = \begin{cases} \min\{D(i-1, j-1), D(i-1, j), \\ D(i, j-1)\} + c(x_i, y_j), & |i-j| < \delta \\ \infty, & |i-j| \geq \delta \end{cases} \quad (7)$$

S-C 带在  $N \sim M$  时工作良好。一般地, S-C 宽度取时间序列长度的 10%。在安全监测中, 变量具有特殊物理特性。以边坡变形为例, 变形一般滞后于地下水位、库水位(渠道水位)15 d 左右, 因此 S-C 宽度初定 15 d, 并通过改变带宽来确定 S-C 最佳弯曲宽度。

在 DTW 相似性度量的基础上进行层次聚类。具体步骤为: 采用 DTW 计算序列间距离, 得到初始距离矩阵; 基于 Huygens 定理的 Ward 标准确定分组, Huygens 定理允许分解组间、组内方差, Ward 准则使聚合两组时每步总方差增长最小, 当  $Q-1 \sim Q$  组方差增加远大于  $Q \sim Q+1$  组方差增加时, 建议划分为  $Q$  组。

## 2.2 基于多变量 LOF 的滑坡预警方法

异常点检测是指找出行为不同于预期对象的过程, 分监督、无监督方法。无监督检测假定正常对象在某种程度上是聚类的。作为一种无监督方法, 基于密度的异常点检测方法精度较高。方法核心是: 把检测对象周围点的密度与邻域周围点的密度比较, 正常点周围点的密度与其邻域周围点的密度相似, 而异常点显著不同。基于密度的聚类算法与异常检测相结合, 即为 LOF 概念<sup>[16]</sup>。

对训练集  $X = [x_1, x_2, \dots, x_N] \in \mathbf{R}^{D \times N}$ , 可通过下式获得  $x_a (a=1, 2, \dots, N)$  的  $k$  近邻:

$$d(x_a, x_b) = \sqrt{\sum_{n=1}^D |x_{an} - x_{bn}|^2} \quad (a \neq b) \quad (8)$$

$x_a$  的  $k$  近邻记为  $KNN(x_a)$ 。 $x_a$  的  $k$  距离记为  $k_d(x_a)$ , 通过计算  $x_a$  与  $k$  近邻距离得到。 $x_a$  与另一个对象  $x_b$  的可达距离定义为

$$d_r(x_a, x_b) = \max\{k_d(x_b), d(x_a, x_b)\} \quad (9)$$

从而, 局部可达密度定义为  $x_a$  的  $k$  近邻的平均可达密度的倒数

$$l_{dr}(x_a) = \frac{k}{\sum_{x_b \in KNN(x_a)} d_r(x_a, x_b)} \quad (10)$$

LOF 可通过计算  $x_a$  和  $x_b$  的局部可达密度得到

$$LOF(x_a) = \frac{1}{k} \sum_{x_b \in KNN(x_a)} \frac{l_{dr}(x_b)}{l_{dr}(x_a)} \quad (11)$$

LOF( $x_a$ )值越大,越可能是异常值。因为  $x_a$  和 KNN( $x_a$ )的密度相似,如  $x_a$  不是异常值,LOF( $x_a$ )应该接近 1。因为  $x_a$  和 KNN( $x_a$ )的相对密度很小,如  $x_a$  是一个异常值,LOF( $x_a$ )应明显大于 1。特别是,如  $x_a$  和 KNN( $x_a$ )小于或等于 1,那么  $x_a$  是聚类的核心。LOF 值为 1 表示一个理想的条件,即样本的局部可达密度与其 KNN( $x_a$ )的平均密度相同。

LOF 算法从安全监测时间序列中检测出异常。步骤为:对时间序列进行 LOF 计算;从统计值中选择控制限值作为阈值;计算多变量的 LOF 值,比较 LOF 值及其分布,在小时间尺度上发现多变量异常。

采用 LOF 时间曲线对初始、匀速和加速变形阶段进行划分,基于统计学原理,选取不同置信水平下的阈值作为相应预警等级划分标准。

### 2.3 滑坡时空演化特征识别和预警方法

滑坡安全监测变量主要可分为 2 类:一是自变量(预测因子),如降雨、水位升降(库岸、渠道边坡滑坡)、地下水位、地震等;另一类是因变量(预变量),如变形、应力应变等,因变量响应是多种外界影响因素作用的结果。一般地,只有自变量、因变量均为异常值才能作为异常即阶段演化的判据。

安全监测主要任务是根据监测时间序列识别异常和评估结构状态。结构状态评估首先应对不确定情况下检测结构状态中的异常,回答“结构是否按照预期运行”,如未得到验证,则表示在类似荷载条件下,因变量响应发生了变化。

滑坡时空演化特征识别和预警方法包括 5 步:(1)数据预处理,时间序列平滑和归一化处理;(2)寻找 S-C 最佳弯曲窗口,采用 DTW 度量变形测点间

相似性;(3)确定主要的外界影响因素;(4)采用 LOF 识别外界影响因素、测点变形多变量 LOF 分布特征;(5)利用 LOF 分析识别多变量异常值,辨识滑坡演化阶段。

## 3 验证算例

### 3.1 卧龙寺滑坡

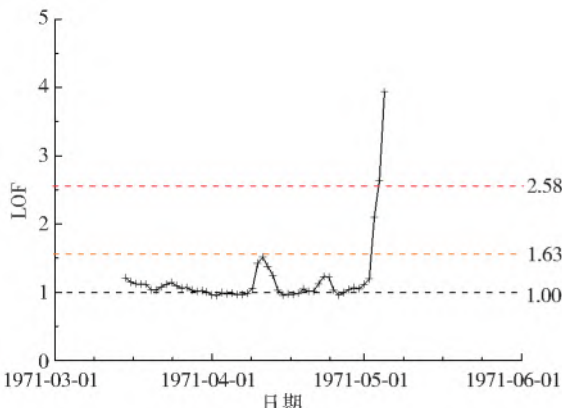
卧龙寺滑坡是塬边黄土滑坡,是自然滑坡的典型实例。1971 年 3 月 11 日开始观测,5 月 5 日发生滑破破坏。以 5 号测点位移观测数据<sup>[17-19]</sup>为例(图 2),累计位移、变形速率的 LOF 值见图 3。



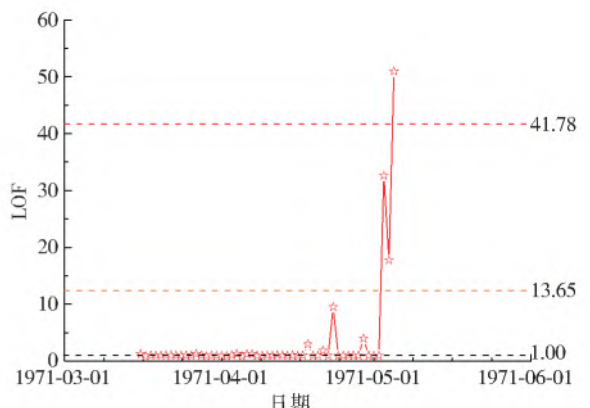
图 2 卧龙寺滑坡变形过程

Fig. 2 Displacement vs time curve of Wolongsi's landslide

置信度为 95%、99%时,累计位移 LOF 阈值分别为 1.63、2.58,变形速率的 LOF 阈值分别为 13.65、41.78。5 月 3 日,累计位移、变形速率的 LOF 值均已超过置信度为 95%时的阈值,5 月 4 日的 LOF 值仍超过置信度为 99%时阈值。这与已有文献<sup>[17-18]</sup>中判断 5 月 3 日为加速变形阶段的临界点一致。



(a) 累计位移的 LOF 值变化



(b) 变形速率的 LOF 值变化

图 3 卧龙寺滑坡累计位移和变形速率的 LOF 值变化过程线

Fig. 3 LOF curves of accumulative displacement and deformation rate vs time

### 3.2 新滩滑坡

7 年多的位移观测资料(图 4)和实地观察结果均表明,新滩滑坡经历了初始、匀速、加速和急剧变形等

4 阶段,最终在 1985 年 6 月 12 日发生滑坡<sup>[17-19]</sup>。

1979 年 8 月以前为初始变形阶段,主滑区开始产生变形,坡体有向下蠕动趋势,变形速率小于

10 mm/月;1979年8月—1982年7月为匀速变形阶段,变形缓慢、平稳,累计变形逐渐增大,月变形速率10~50 mm/月;1982年7月—1985年5月为加

速变形阶段,主滑区变形速率加快,累计位移曲线持续上升;1985年5月中旬—6月11日为急剧变形阶段,变形剧烈,临滑前兆明显。

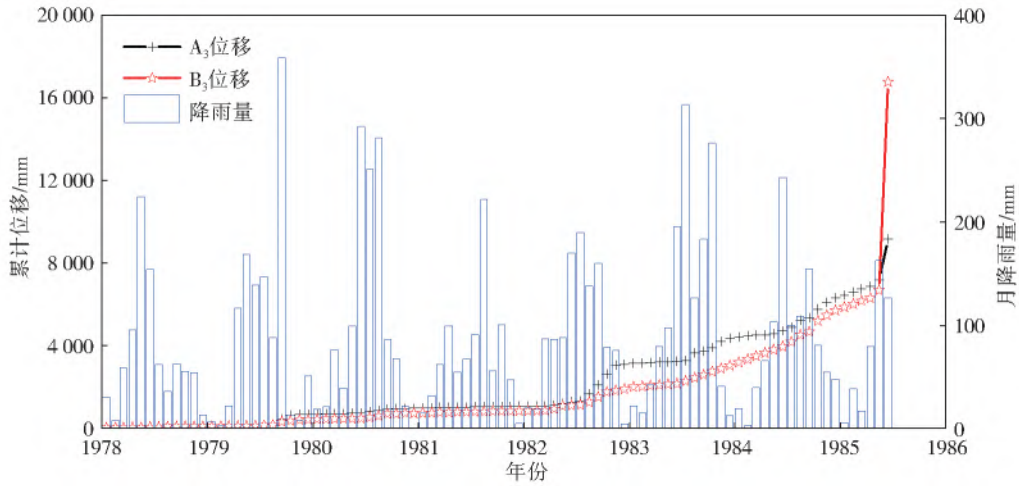


图4 新滩滑坡累计位移和月降雨量过程线

Fig. 4 Relationship between cumulative displacement and monthly rainfall of Xintan landslide

以  $A_3$ 、 $B_3$  测点进行分析,其位移变化过程见图4,将两时间序列标准化后采用DTW计算相似度(欧氏距离值为294),DTW曲线见图5,两测点

具有极高相似性。 $A_3$ 、 $B_3$  累计位移、变化速率、加速度的LOF值分别见图6(a)~6(c),图中标出了置信度为95%、99%时LOF阈值。

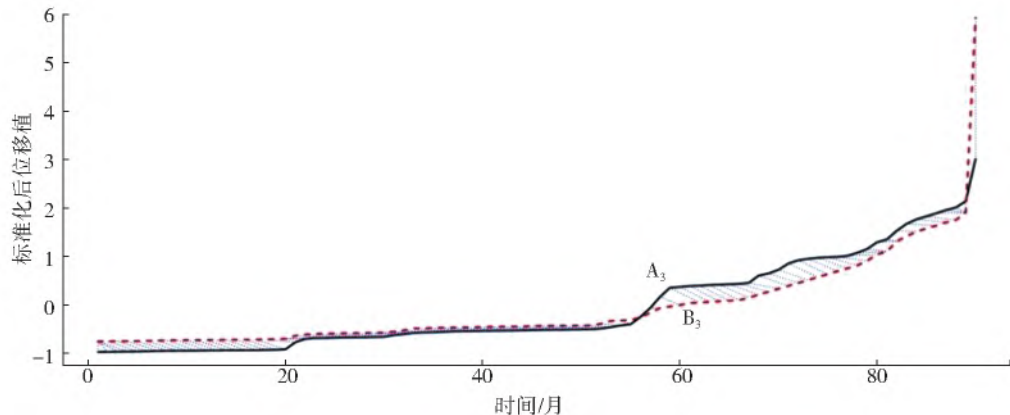


图5 新滩滑坡  $A_3$ 、 $B_3$  相似性度量

Fig. 5 Displacement similarity between monitoring points  $A_3$  and  $B_3$

以  $B_3$  为例分析,匀速变形阶段每年雨季累计位移LOF值都会有一个增大的过程。1982年5月,累计位移的LOF值达到了2.83,超过了置信度为95%时的阈值即2.40,之后LOF值持续升高,直到8月达到了3.86,接近置信度为99%时的阈值即4.17。相应地,已有文献<sup>[17-18]</sup>指出,1982年7月进行了加速变形阶段,1982年8月雨期后,边坡变形明显加剧。LOF值较早地识别了加速变形阶段。

1982年4月变形速率开始增大,5月达4.95,8月则达8.09,超过了置信度为95%时的阈值即7.29。与累计位移不同,之后变形速率LOF值处于较高值,1984年7月开始多次超过7.29,甚至超过置

信度为99%时的阈值即10.62;1985年5月变化速率急剧上升,超过10.62。加速度LOF值表现出与变形速率相似的规律。尽管LOF值波动幅度不一,但是  $A_3$  点表现出与  $B_3$  点类似规律。

可见,LOF值对累计位移、变形速率、加速度更敏感,比人为判断时效性更好。同时,变形速率、加速度LOF值表现出与累积位移变化不完全相同的特点。累计位移的LOF值相对比较平稳,而变形速率、加速度的LOF值相对更为敏感,波动较大。一旦进入临滑阶段,累计位移的LOF值骤然剧增,呈现出突变特征;而变形速率、加速度则会处于阈值附近波动,之后急剧上升。

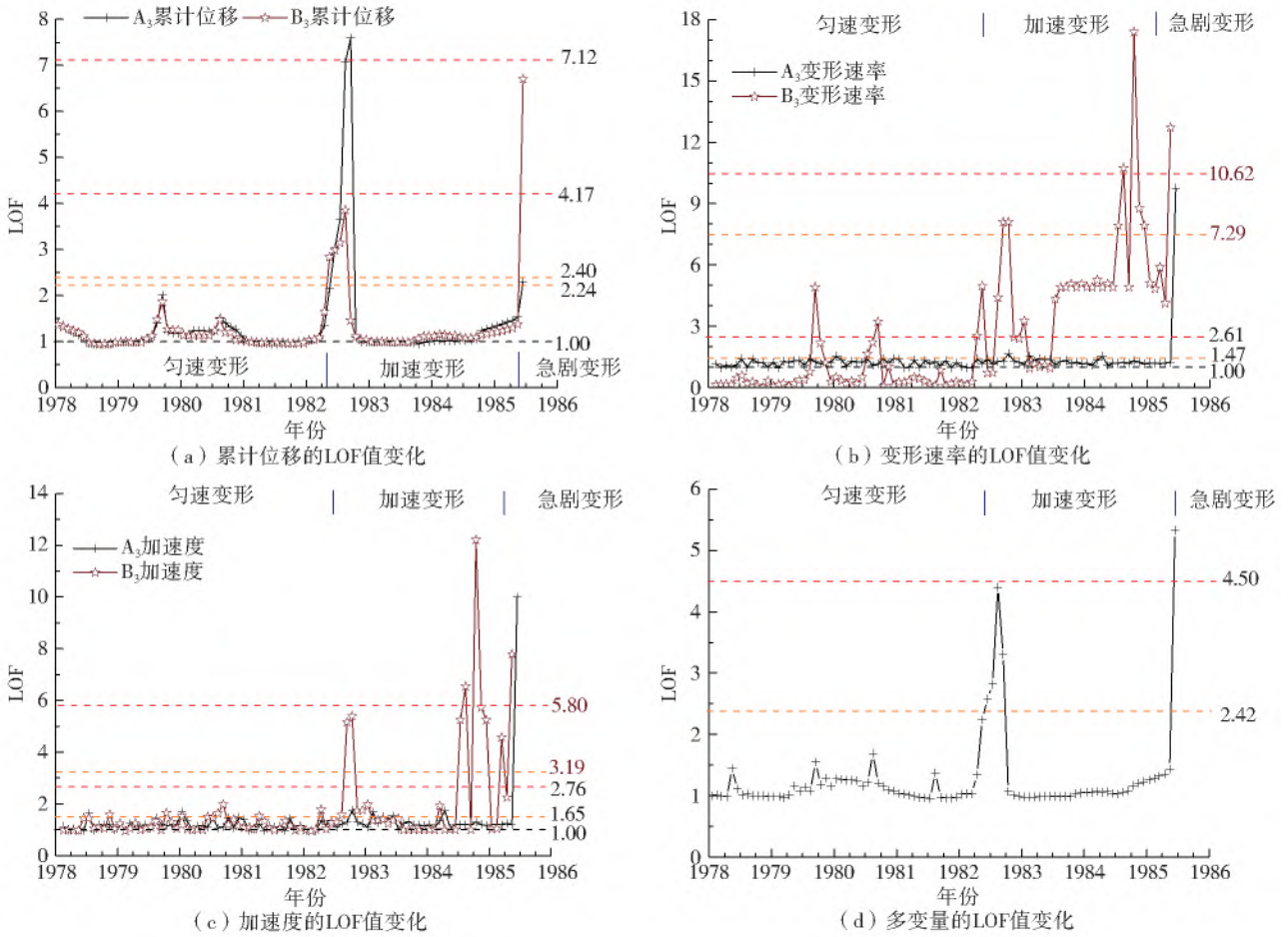


图 6 新滩滑坡变形累计位移、变形速率、加速度及多变量的 LOF 值变化过程线

Fig. 6 LOF curves of accumulative displacement, deformation rate and acceleration vs time

对此,可综合累计位移、变形速率和加速度,及外界诱发因素如降雨等,提出多变量、多测点临滑预警方法和预警指标。这里,以降雨量及  $A_3$ 、 $B_3$  测点变形为例,计算多变量 LOF 值(图 6(d)),可见,多变量预警也较为稳健。

## 4 实例分析

### 4.1 某渠坡和安全监测概况

某调水工程桩号 X+740~X+860 为深挖方渠段,断面结构见图 7。其中:左岸渠坡挖深 34~39 m,渠道底宽 13.5 m;过水断面坡比 1:3.0;一级马道宽度 5 m,以上每 6 m 设一级马道,一级至四级马道坡比为 1:2.5,四级马道以上坡比为 1:3。

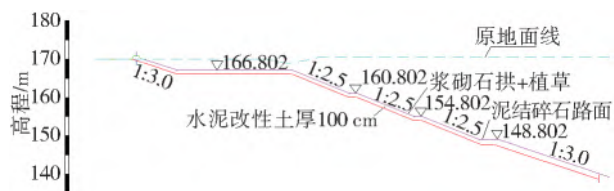


图 7 渠坡断面结构

Fig. 7 Structural diagram of channel slope section

2017 年 6 月,渠坡采取了加固措施,并安装了测斜管、渗压计等监测设施(图 8),测斜管埋深 21.5~31.5 m,测斜管表面测点累计位移过程线见图 9。以 805-3、805-3-m 两个测点为例说明图 8 中测点表示的含义,805-3 表示桩号 805 断面上三级马道上的测点,805-3-m 表示桩号 805 断面上三级边坡上的测点。

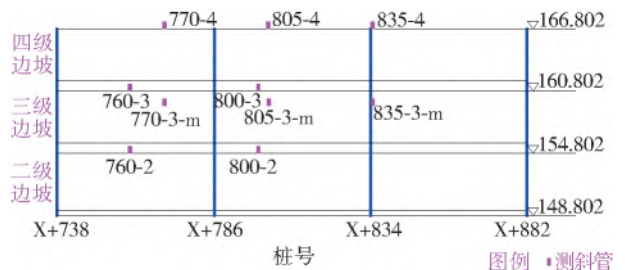


图 8 安全监测设施平面布置

Fig. 8 Layout of safety monitoring equipment

### 4.2 边坡变形时空演变规律分析

在 DTW 度量的基础上,采用层次聚类法对图 8 的变形测点 2017 年 7 月 31 日—2020 年 6 月 30 日的数据进行聚类分析。典型测点相似性度量见图

10,分组结果见图 11。结合图 9、图 11 可知加固处理后渠坡变形有以下特点:渠坡向渠道内变形量逐渐增大;二级与四级马道间渠坡变形同时发生,具有相似变形过程曲线和良好同步响应性;各处变形量并不相同,具有较明显空间不均一性,在干湿循环条件下,二级与三级边坡间变形量最大;渠坡经历了从变形到逐步稳定的过程,加固处理调整 2 个月左右。相应地,渠坡经历了加速变形到稳定发展的阶段,2017 年 11 月后,变形趋于稳定,但存在一定的周期性波动。

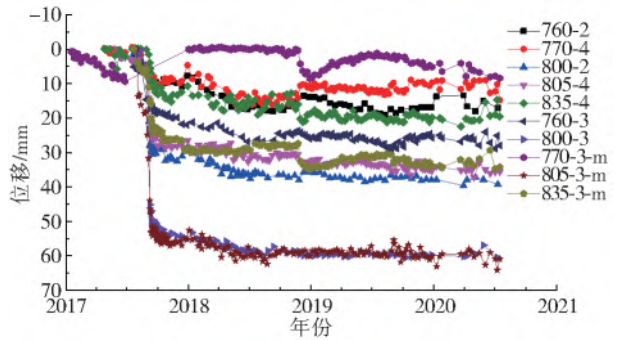


图 9 各测斜管表面测点位移过程线  
Fig. 9 Displacement records of surface measuring points of the installed inclinometer tubes

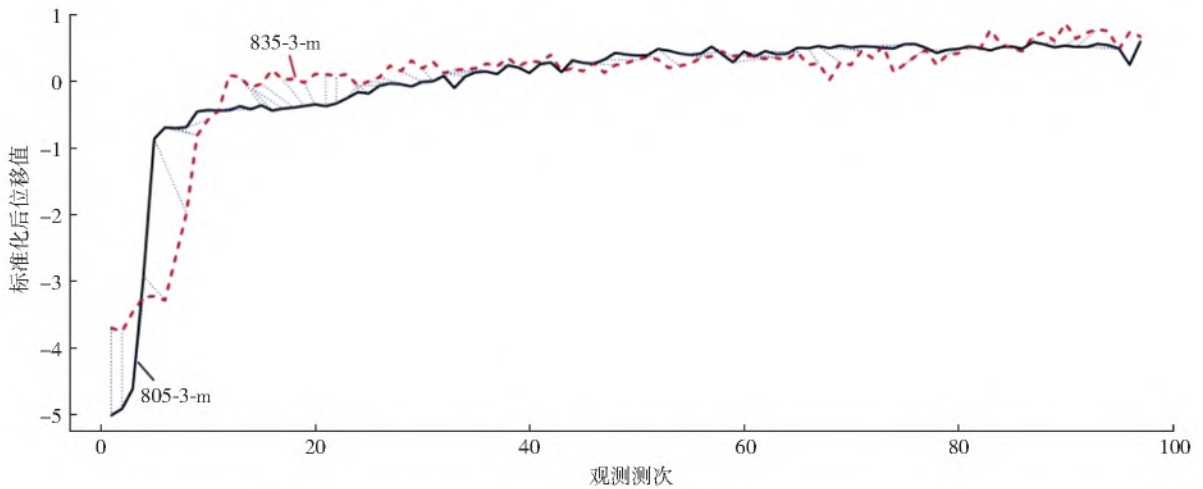


图 10 基于 DTW 的典型测点(805-3-m,835-3-m)相似性度量  
Fig. 10 Displacement similarity between typical monitoring points (805-3-m,835-3-m) based on DTW

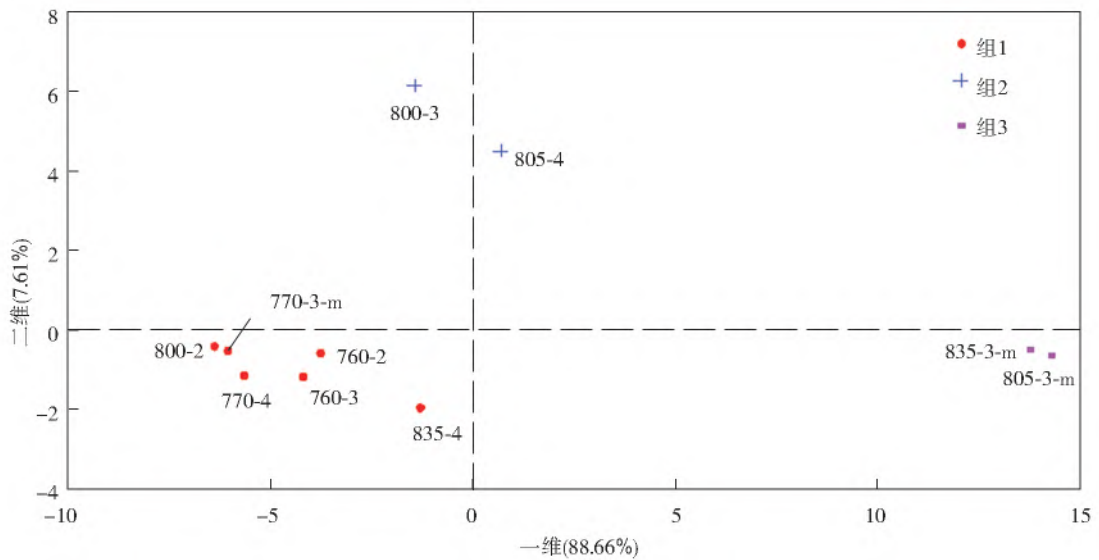


图 11 变形测点分区  
Fig. 11 Schematic diagram of zoned deformation measuring points

### 4.3 基于多变量 LOF 的滑坡预警

采用 Pearson 相关性分析度量外界环境因素与渠道变形相关性。在有效降雨量、渠道水位、地下水位等外界环境影响因素中,渠道变形与降雨量关系

最为密切,相关系数为-0.41,相关性为 0.4~0.6,为中等程度相关,这与已有成果<sup>[20]</sup>相符。

以变形较大的组 3 内的 805-3-m、835-3-m 两测点为例,对有效降雨量、两个测点变形进行多变量

LOF 计算,805-3-m 测点的累计位移、变形速率、加速度及 805-3-m、835-3-m 两个测点累计位移的 LOF 值结果分别见图 12(a)、12(b),图中标出了置信度为 95%、99% 时 LOF 阈值。

后进入稳定发展阶段。LOF 值主要受降雨、地下水位等因素影响,在汛期有波动但幅度小,805-3-m、835-3-m 两个测点的 LOF 值均未超过 95% 置信度的阈值,即 3.73、2.02(图 12(b))。

考虑降雨量及 805-3-m、835-3-m 两测点累计位移等 3 个变量,得到的多变量 LOF 值见图 12(c)。由图 12(c)可知:多变量 LOF 相对较稳健,即使是初始变形阶段,多变量 LOF 值波动幅度也不大;进入稳定发展阶段后,多变量 LOF 值波动幅度较小,且远小于置信度为 95% 时的阈值即 2.30。

## 5 结 论

(1)基于 DTW 的相似性度量能较好地反映边坡变形测点的位移时间序列间的相关性,在此基础上的边坡变形测点聚类方法能较合理地对待测点进行分区,从而可以较好地反映边坡变形测点的空间相似性和异质性,便于识别边坡变形的剪切特征。

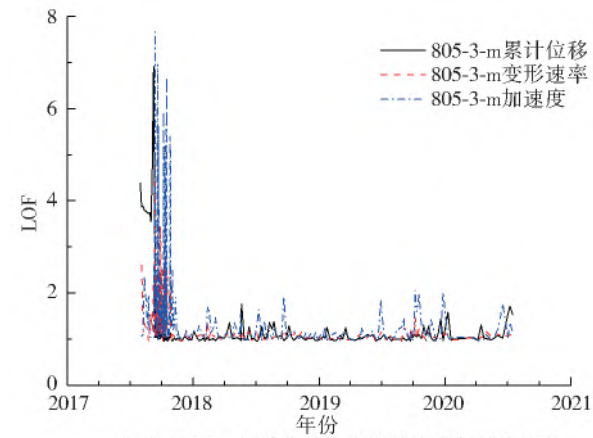
(2)变形 LOF 的时间过程线在初始、加速变形阶段都具有显著突变特征,在此基础上,基于统计学方法拟定的滑坡预警 LOF 阈值,能克服人为判断划分变形及其演化阶段的限制,且 LOF 值对时间较敏感,比人为判断时效性更强,从而使得提出的基于多变量 LOF 的滑坡预警方法效果较好、可靠性较高,可为采取应急处置措施争取到更多时间。

(3)多测点变形和主要影响因素构成的多变量的 LOF 值具有较高的自我调整适应能力和较好的稳健性,多变量 LOF 值的时间过程线能定量地反映滑坡变形所处阶段,避免因偶然因素引起变形波动而造成的误判。

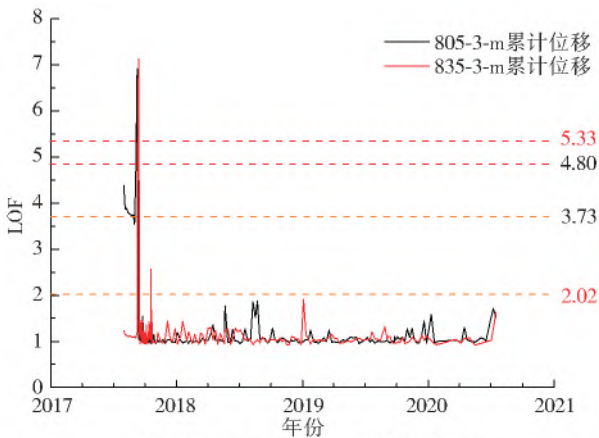
滑坡受到降雨、地下水位、库水位或渠道水位等多因素的影响,下一步可采用相似性度量方法确定外界主要影响因素,从内外因上综合判别和预报滑坡,建立更准确的滑坡预警方法,进一步提高预警水平。

### 参考文献(References):

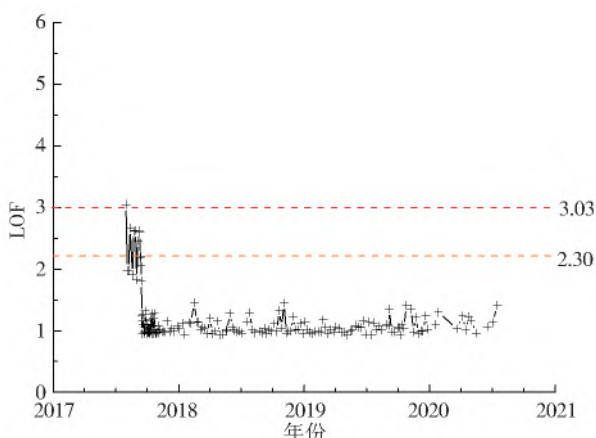
- [1] 唐亚明,张茂省,薛强,等. 滑坡监测预警国内外研究现状及评述[J]. 地质论评,2012,58(3):533-541. (TANG Y M, ZHANG M S, XUE Q, et al. Landslide monitoring and early warning: An overview [J]. Geological Review, 58(3): 533-541. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;DZLP. 0. 2012-03-015.
- [2] 王珣,李刚,刘勇,等. 基于滑坡等速变形速率的临滑预报判据研究[J]. 岩土力学,2017,38(12):3670-3679. (WANG X, LI G, LIU Y, et al. Critical sliding predic-



(a) 805-3-m 累计位移、变形速率和加速度 LOF



(b) 805-3-m 和 835-3-m 累计位移 LOF



(c) 多变量 LOF

图 12 测点累计位移、变形速率、加速度及多变量 LOF 值变化过程线

Fig. 12 LOF curves of accumulative displacement, deformation rate and acceleration vs time

由图 12(a)可知:在加固处理后,渠坡经历了 2 个月的初始变形阶段,在这 2 个月内测点的累计位移、变形速率和加速度的 LOF 值波动相对较大;之



- tion criterion of landslide based on constant deformation rate[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(12): 3670-3679. (in Chinese)) DOI:10.16285/j. rsm. 2017. 12. 035.
- [3] 许强,汤明高,徐开祥,等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(6): 1104-1112. (XU Q, TANG M G, XU K X, et al. Research on space-time evolution laws and early warning prediction of landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(6): 1104-1112. (in Chinese)) DOI:10.3321/j. issn:1000-6915. 2008. 06. 003.
- [4] 许强. 滑坡的变形破坏行为与内在机理[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(2): 145-151. (XU Q. Theoretical studies on prediction of landslides using slope deformation process data[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(2): 145-151. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: GCDZ. 0. 2012-02-001.
- [5] 秦四清. 斜坡失稳过程的非线性演化机制与物理预报[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(11): 6-13. (QIN S Q. Nonlinear evolutionary mechanisms and physical prediction of instability of planar-slip slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(11): 6-13. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j. issn:1000-4548. 2005. 11. 001.
- [6] 龙辉,秦四清,朱世平,等. 滑坡演化的非线性动力学与突变分析[J]. *工程地质学报*, 2001, 9(3): 331-335. (LONG H, QIN S Q, ZHU S P, et al. Nonlinear dynamic model and catastrophe analysis of slope evolution[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(3): 331-335. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1004-9665. 2001. 03. 021.
- [7] 龙辉,秦四清,万志清. 降雨触发滑坡的尖点突变模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(4): 502-508. (LONG H, QIN S Q, WANG Z Q. Catastrophe analysis of rainfall-induced landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(4): 502-508. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j. issn:1000-6915. 2002. 04. 010.
- [8] 罗文强,李飞翱,刘小珊,等. 多元时间序列分析的滑坡演化阶段划分[J]. *地球科学*, 2016, 41(4): 711-717. (LUO W Q, LI F A, LIU X S, et al. Evolution stage division of landslide based on analysis of multivariate time series[J]. *Earth Science*, 2016, 41(4): 711-717. (in Chinese)) DOI:10.3799/dqkx. 2016. 060.
- [9] 刘小珊,罗文强,李飞翱,等. 基于关联规则的滑坡演化阶段判别指标[J]. *地质科技情报*, 2014, 33(2): 160-164. (LIU X S, LUO W Q, LI F A, et al. Identification index of landslide evolution stage based on association rule[J]. *Geological Science and Technology Informa-*
- tion*, 2014, 33(2): 160-164. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: DZKQ. 0. 2014-02-027.
- [10] 赵久彬,刘元雪,刘娜,等. FRFPF 模型滑坡监测预警关联规则挖掘分析:以三峡库区江津到奉节段为例[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(3): 492-500. (ZHAO J B, LIU Y X, LIU N, et al. Association rules of monitoring and early warning using landslides FRFPF model: Case study of Jiangjin-Fengjie reach in Three Gorges Reservoir area [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(3): 492-500. (in Chinese)) DOI: 10.11779/CJGE201903011.
- [11] 李聪,朱杰兵,汪斌,等. 滑坡不同变形阶段演化规律与变形速率预警判据研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1407-1414. (LI C, ZHU J B, WANG B, et al. Critical deformation velocity of landslides in different deformation phases [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(7): 1407-1414. (in Chinese)) DOI: 10.13722/j. cnki. jrme. 2015. 1548.
- [12] 王珣,李刚,刘勇,等. 基于滑坡等速变形速率的临滑预报判据研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(12): 3670-3679. (WANG X, LI G, LIU Y, et al. Critical sliding prediction criterion of landslide based on constant deformation rate[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(12): 3670-3679. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j. rsm. 2017. 12. 035.
- [13] 卢书强,张国栋,易庆林,等. 三峡库区白家包阶跃型滑坡动态变形特征与机理[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(3): 144-149. (LU S Q, ZHANG G D, YI Q L, et al. Characteristics and mechanism of dynamic deformation of Baijiabao landslide with stepwise in Three Gorges Reservoir area [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(3): 144-149. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 03. 025.
- [14] QIN S, JIAO J, WANG S. A nonlinear dynamical model of landslide evolution [J]. *Geomorphology*, 2002, 43(1/2): 77-85. DOI:10.1016/S0169-555X(01)00122-2.
- [15] REICHENBACH P, ROSSI M, MALAMUD B, et al. A review of statistically-based landslide susceptibility models[J]. *Earth Science Reviews*, 2018, 180: 60-91. DOI:10.1016/j. earscirev. 2018. 03. 001.
- [16] HU J, MA F H, WU S H. Anomaly identification of foundation uplift pressures of gravity dams based on DTW and LOF[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2018; 25(5): e2153. DOI:10.1002/stc. 2153.
- [17] 贺小黑,王思敬,肖锐铨,等. 协同滑坡预测预报模型的改进及其应用[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(10):

- 80-89. (HE X H, WANG S J, XIAO R H, et al. Improvement and application of synergetic forecast model for landslides[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 80-89. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;YTGC. 0. 2013-10-011.
- [18] 贺可强, 陈为公, 张朋. 蠕滑型边坡动态稳定性系数实时监测及其位移预警判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1377-1385. (HE K Q, CHEN W G, ZHANG P. Real-time monitoring of dynamic stability coefficient and displacement criterion of the creep slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1377-1385. (in Chinese)) DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2015. 1535.
- [19] 郭璐, 贺可强, 贾玉跃. 水库型堆积层滑坡位移方向协调性参数及其失稳判据研究[J]. 水利学报, 2018, 49(12): 98-106. (GUO L, HE K Q, JIA Y Y. Research on the displacement direction coordination parameter of colluvial landslide induced by reservoir and its warning destabilized criterion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(12): 98-106. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20180520.
- [20] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1065-1073. (KONG L W, CHEN J B, GUO A G, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1065-1073. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-4548. 2007. 07. 017.

### Multivariable local outlier factor based early warning method for slope landslides

YANG Hongwei<sup>1</sup>, HU Jiang<sup>2</sup>, HUAI Xianfeng<sup>1</sup>, MA Fuheng<sup>2</sup>, MA Zi'ao<sup>1</sup>

(1. Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Creep-type landslides generally have three stages from deformation to failure such as initial deformation, uniform deformation and accelerated deformation. According to the characteristics of deformation stages, a variety of landslide warning methods, based on thresholds such as cumulative displacement, deformation rate, and acceleration being proposed. In recent years, data mining technique has been applied to landslide warning. However, related researches have neglected the mining of the spatial deformation characteristics of multiple measuring points and the evolution laws of multivariable for landslides. Therefore, the data mining technique was applied to propose a landslide warning method based on the threshold of local outlier factors of multivariate monitoring time series. The proposed method can provide a reference for the judgment of the creep-type slope stages and the early warning of landslides.

The dynamic time warping method (DTW) was used to calculate the distances among the deformation time series of multiple measuring points of the slope, and the Huygens theorem-based ward standard was employed to determine the clusters of the deformation measuring points. The similarities of the deformation laws of multiple measuring points were identified, and the spatiotemporal deformation evolution law of the slope was analyzed. Considering the multi-variables such as the main influencing factors and the multiple deformation measuring points, the local outlier factors (LOF) of the multi-variable time series were calculated, and the abnormality existing in the multi-variable change processes was analyzed. Based on the statistical methods, the early warning thresholds of LOFs under different confidence levels were determined, to divide the initial, uniform, and accelerated deformation stages of the landslide. Examples of Wolongsi and Xintan landslides were used to verify the effectiveness of the proposed method, and then applied to the creep-type landslide early warning of a canal slope.

Two days before the landslide is the critical point of the accelerated deformation stage of the Wolongsi landslide. The LOF values of the cumulative displacement and the deformation rate of the deformation of the measuring points exceeded the thresholds at 95% and 99% confidence levels before two days and one day of landslide. The Xintan landslide experienced four stages: initial deformation, uniform deformation, acceleration deformation, and sharp acceleration deformation. The landslide entered the accelerated deformation stage in July 1982 and occurred on June 12, 1985. The time series of the two measuring points A<sub>3</sub> and B<sub>3</sub> have high similarities. During the uniform deformation stage, the LOF values of the cumulative displacement in each rainy season had a corresponding increase process. In May 1982, the LOF values of the cumulative displacement exceeded the 95% confidence threshold. The LOF values continued to increase, approached the threshold of 99% confidence in August, and the LOF values of the deformation rate began to be at a higher value. In July 1984, the LOF values of the deformation rate exceeded the 95% confidence threshold many times, and in May 1985, it rose sharply and exceeded the 99% confidence threshold. The LOF values can identify the accelerated deformation stage earlier. The canal section X+740~X+860 of a water transfer project had a deep ex-

cavation slope. Three variables such as the rainfall and the cumulative displacements of the two measuring points 805-3-m and 835-3-m were considered. The LOF values of multivariate fluctuate slightly during the initial deformation stage. After entering the stable development stage, the multivariate LOF values fluctuate slightly, much less than the threshold when the confidence level is 95%. This canal slope was in a relatively stable development stage.

The DTW based similarity measurement method can better reflect the correlation between the displacement time series of slope deformation measurement points. The clustering of the time series of the deformation measuring points can reasonably divide the measuring points into clusters. These can reflect the spatial similarity and heterogeneity of the change laws of the slope deformation measurement points, and facilitate the identification of the shear characteristics of the slope deformation. The LOF values of the deformation process have significant abrupt changes in the initial and the accelerated deformation stages. The LOF threshold based statistical methods for early warning of landslide is determined to divide the deformation stage and its evolution process can overcome the limitation of human estimation. The LOF value is more sensitive to time than human judgment estimation. The proposed early warning method based on the multivariable LOF is highly reliable and can gain more time for taking emergency measures. The multivariable LOF values among multi-measuring points and external factors have the higher self-adjustment ability and better robustness. The landslide warning based on the multivariable LOF value thresholds can avoid the misjudgment of the landslide caused by the fluctuation of the measured value of accidental factors.

**Key words:** slope; deformation; landslide; early warning; data mining

习近平总书记在深入推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的重要讲话中强调，要科学分析当前黄河流域生态保护和高质量发展形势，把握好推动黄河流域生态保护和高质量发展的重大问题，咬定目标、脚踏实地，埋头苦干、久久为功，确保“十四五”时期黄河流域生态保护和高质量发展取得明显成效，为黄河永远造福中华民族而不懈奋斗。

（摘自《中国水利报》2021年10月29日 第4951期 水利部党组理论学习中心组专题学习研讨习近平总书记在深入推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的重要讲话精神）