

doi:10.3799/dqkx.2016.060

多元时间序列分析的滑坡演化阶段划分

罗文强, 李飞翱, 刘小珊, 黄 丽

中国地质大学数学与物理学院, 湖北武汉 430074

摘要: 滑坡的时间一位移曲线一般具有 3 个阶段特征, 即初始变形阶段、等速变形阶段和加速变形阶段, 不同演化阶段加速度具有不同的变化特点。目前往往是依据对加速度曲线特征的分析来人为划分演化阶段, 缺少相应的理论支持和定量计算。针对上述问题, 选取月降雨量、月库水位高程变化量对滑坡的累计位移建立多因素的时间序列预测模型。然后利用 Chow 分割点检验理论, 以所建模型中 F 和 LR 统计量最大值点作为分割点对滑坡演化阶段进行划分。以新滩滑坡和三峡库区白水河滑坡为例, 利用累计位移、降雨及库水位变化数据进行计算验证。结果表明, 对多元时间序列模型进行 Chow 分割点检验可对滑坡的演化阶段进行准确划分, 为滑坡的临滑预警预报提供重要判据。

关键词: 滑坡演化; 多元时间序列; Chow 分割点检验; 阶段划分; 工程地质。

中图分类号: P642.22

文章编号: 1000-2383(2016)04-0711-07

收稿日期: 2015-09-03

Evolution Stage Division of Landslide Based on Analysis of Multivariate Time Series

Luo Wenqiang, Li Feiao, Liu Xiaoshan, Huang Li

School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Curves of cumulative displacement vs. time of the landslide generally include the stages of the initial deformation, constant speed deformation and accelerated deformation. Different deformation stages have their own different acceleration characteristics. Now the evolution of landslide can be divided by analyzing the characteristics of acceleration curve. But it lacks theoretical basis and quantitative calculation. To the above problems, the rainfall of current month and reservoir level fluctuation of current month are selected as influencing factors, and the multivariate time series model is adopted to predict the cumulative displacement. Taking the maximum points of F statistic and log-likelihood ratio statistic of the multivariate time series model as segmentation points divides the evolution stages of landslide based on the theory of Chow breakpoint test. This model is used to deal with the data of cumulative displacement, rainfall and reservoir level fluctuation of Xintan landslide and Baishuihe landslide in the Three Gorges reservoir area. The results indicate that the Chow breakpoint test on the multivariate time series prediction model based on the inducing factors and the landslide displacement has certain validity and application value. This division of the landslide evolution stage can provide an important criterion for the early-warning prediction of landslide.

Key words: landslide evolution; multivariate time series; Chow breakpoint test; stage division; engineering geology.

0 引言

大量监测资料表明, 滑坡的时间一位移曲线具有 3 个阶段特征, 即初始变形阶段、等速变形阶段和加速变形阶段。其中加速变形阶段还可以细分为初加速、中加速和临滑阶段(许强和曾裕平, 2009;

图 1)。一旦滑坡进入临滑阶段, 就预示着滑坡已进入失稳破坏状态, 滑坡即将发生。因此, 找到相关指标表征滑坡进入临滑状态, 对滑坡的预警预报具有重要理论和现实意义。许强和曾裕平(2009)依据加速度在滑坡进入临滑阶段前后呈现出的不同特点, 提出基于加速度的滑坡临滑预警方法和临滑预警指

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划) 项目(No.2011CB710605); 国家自然科学基金重点项目(No.41230637)。

作者简介: 罗文强(1963—), 男, 教授, 主要从事地质灾害评价预测的研究工作。E-mail: wqluo@cug.edu.cn

引用格式: 罗文强, 李飞翱, 刘小珊, 等, 2016. 多元时间序列分析的滑坡演化阶段划分. 地球科学, 41(4): 711-717.

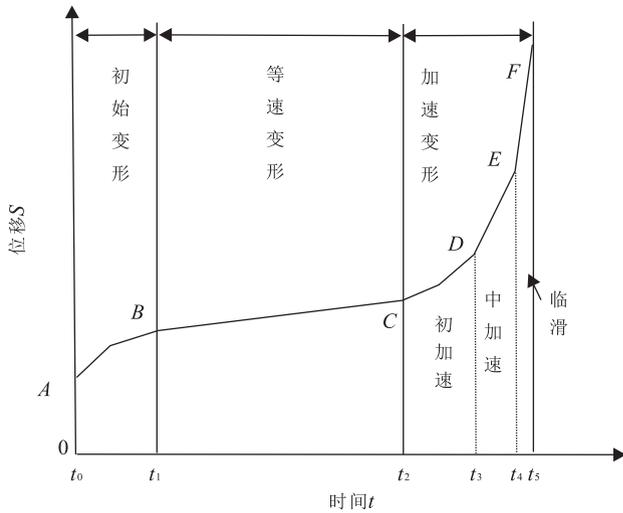


图 1 滑坡变形的三阶段演化

Fig.1 Evolution scheme of three deformation phases of landslide

标,具有一定的普适性.但其对于演化阶段划分和临滑预警指标的具体数值确定时,往往是依据对加速度曲线特征进行分析来人为划分并大致估计出相应指标的阈值,缺少相应的理论支持和定量计算(许强等,2008;樊晓一,2011).

滑坡的变形破坏,受到多种诱发因素,如降雨、库水位升降(库岸滑坡)、地震等的影响(郑东健等,2005;陈晓鹏等,2008;罗渝等,2014;吴益平等,2014).当前滑坡的演化阶段划分多是对位移这一单变量进行研究(王建锋,2003;许强等,2004;徐峰等,2011),未能考虑诱发因素对滑坡的影响.因此,将诱发因素包含到分析滑坡位移的演化阶段划分之中变的十分必要.本文先对滑坡累计位移建立多因素的时间序列模型,再利用 Chow 分割点检验理论对滑坡演化阶段进行划分,从而实现滑坡的临滑预警.

1 多元时间序列模型及 Chow 分割点检验

1.1 多元时间序列模型

对于库岸滑坡,其诱发因素主要是降雨(丁继新等,2004)和库水位升降,假定滑坡降雨序列为 $\{x_t\}$,库水位序列为 $\{z_t\}$,滑坡累计位移序列为 $\{y_t\}$,由于滑坡累计位移一般具有单调递增的特征,具有明显的指数增长趋势,是非平稳的时间序列,所以需要对其序列 $\{y_t\}$ 取对数,同时为了归一化,对降雨序列 $\{x_t\}$ 和库水位序列 $\{z_t\}$ 也取对数.

大量的监测资料表明,降雨对滑坡累计位移的影响存在滞后,当期降雨 $\{x_t\}$ 、前一期降雨 $\{x_{t-1}\}$ 、两月降雨量 $\{x_t + x_{t-1}\}$ 以及其一期滞后 $\{x_{t-1} + x_{t-2}\}$ 对累计位移的影响较大.而对于库水位,其当期的变动对累计位移影响较大(殷坤龙,2004;杜鹃等,2009;高连通等,2011).根据以上分析,笔者提出多元时间序列模型如下:

$$\ln y_t = \beta_0 + \beta_1 \ln y_{t-1} + \beta_2 \ln x_t + \beta_3 \ln x_{t-1} + \beta_4 \ln(x_t + x_{t-1}) + \beta_5 \ln(x_{t-1} + x_{t-2}) + \beta_6 (\ln z_t - \ln z_{t-1}) + \epsilon_t, \quad (1)$$

$\{\epsilon_t\}$ 为模型的残差序列.用最小二乘法对模型的系数进行估计时,由于滑坡累计位移在不同阶段对降雨量的响应程度不同,所以模型估计结果中对于估计系数 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 ,如果哪一项非常不显著,可以去掉该项.

1.2 Chow 分割点检验

对于滑坡的时间序列数据,因变量和解释变量之间的关系可能会发生结构变化,这可以作为滑坡演化阶段发生变化的表征,使用 Chow 分割点检验理论即可判断模型结构是否发生了显著变化.

Chow 分割点检验的基本思想是(高铁梅等,2009):先将样本观测值根据分割点划分为 2 个或 2 个以上的子集,并且这些子集包含的观测值个数必须大于方程待估计参数的个数;然后使用每个子集的观测值和全部样本的观测值分别估计方程;最后比较利用全部样本进行估计所得到的残差平方和(即有约束的残差平方和)与利用每个子集样本进行估计所得到的总的残差平方和(即无约束的残差平方和),判断模型的结构是否发生了显著变化. Chow 分割点检验是利用 F 统计量和 LR 统计量进行检验的, F 统计量计算方法如下:

考虑一个线性回归模型:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + u, u \sim N(0, \sigma^2). \quad (2)$$

检验线性约束:

$$H_0: R\beta - r = 0, \quad (3)$$

式中: x_i 为解释变量, u 为残差, R 是 $q \times k$ 矩阵, β 是估计参数的 k 维向量, r 是 q 维向量, q 是 H_0 包含的约束条件个数.在原假设 H_0 下,构造渐近服从 $\chi^2(q)$ 分布的 Wald 统计量如下:

$$W = (Rb - r)' (\hat{\sigma}^2 R(x'x)^{-1} R')^{-1} (Rb - r), \quad (4)$$

x 为解释变量向量, b 是无约束下得到的参数估计的 k 维向量, \hat{u} 是无约束残差向量, \tilde{u} 是有约束的模

型 OLS 估计的残差向量,则有

$$F = W/q = \frac{\tilde{u}'\tilde{u} - \hat{u}'\hat{u}}{\hat{u}'\hat{u}/(n - k - 1)}, \quad (5)$$

n 为样本个数,当检验是否存在一个分割点时,计算如下:

$$F = \frac{(\tilde{u}'\tilde{u} - \tilde{u}'_1\tilde{u}_1 - \tilde{u}'_2\tilde{u}_2)/(K + 1)}{(\hat{u}'_1\hat{u}_1 - \hat{u}'_2\hat{u}_2)/(n - 2k - 2)}, \quad (6)$$

$\hat{u}'_i\hat{u}_i$ 是基于第 i 个子样本进行参数估计后得到的残差平方和, $(k + 1)$ 是方程系数个数.如果两段区间没有发生显著变化, F 值应该很小,反之,当 F 值大于临界值时,可以认为出现了结构变化.

LR 统计量计算方法如下:

$$LR = -2(L' - L''), \quad (7)$$

L' 和 L'' 分别为有约束和无约束条件下通过对模型的估计得到的对数极大似然函数值.如果两段区间没有发生显著变化, F 和 LR 统计量的值应该很小,反之,当 F 和 LR 统计量的值大于临界值时,可以认为出现了结构变化.

2 滑坡实例分析

2.1 新滩滑坡演化阶段划分

新滩滑坡位于三峡西陵峡中的新滩镇,于 1985 年 6 月 12 日凌晨突然间发生滑坡(王尚庆,1999;周斌,2012).本文取其 1978 年 1 月到 1985 年 6 月共 90 个月的等时化插值处理后的累计位移监测数据作为变量 $Y(\text{mm})$,同时取 1978 年 1 月到 1985 年 5 月共 89 个月的降雨量监测数据作为变量 $X(\text{mm})$.图 2、图 3 分别为 X 的直方图和 Y 的观测曲线(周斌,2012).图 4 为新滩滑坡加速度—时间曲线.许强和曾裕平(2009)认为加速度在不同演化阶段表现出完全不同的变化特点,在初始变形阶段加速度有一个由 0 增大到一定值后很快降为 0 甚至为负值的过程,反映出此阶段滑坡变形突然启动后又迅速减弱的特点,在等速变形阶段,加速度主要以 0 为中心作上下震荡,其均值基本为 0.依据此特征,从图 4 可以看出滑坡在 1978 年到 1981 年加速度前后分别表现出初始变形和等速变形阶段的特征,为了有效划分,取 1978 年 1 月到 1981 年 12 月共 48 个月的累计位移和降雨量数据建立多元时间序列模型如下:

$$\ln y_t = 0.964 \ln y_{t-1} + 0.062 \ln(x_t + x_{t-1}) + \varepsilon_t, \quad (8)$$

模型的各项系数都非常显著,拟合优度 $R^2 = 0.982$,

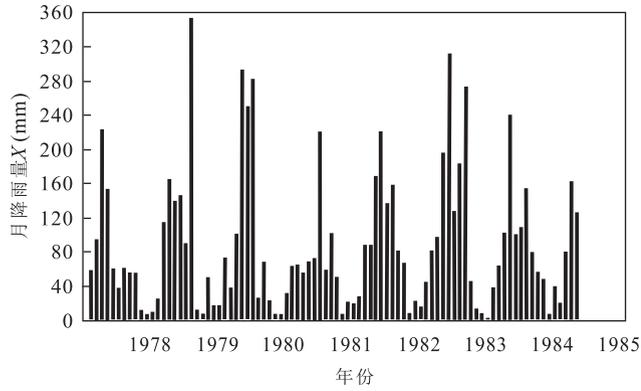


图 2 新滩滑坡降雨量直方图

Fig.2 Histogram of rainfall vs. time of Xintan landslide

据丁继新等(2004)

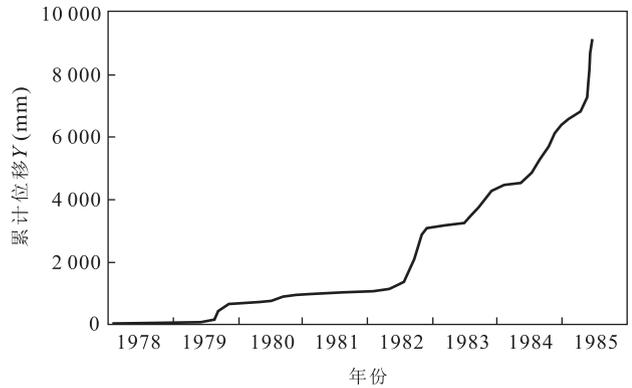


图 3 新滩滑坡累计位移—时间曲线

Fig.3 Curve of cumulative displacement vs. time of Xintan landslide

据丁继新等(2004)

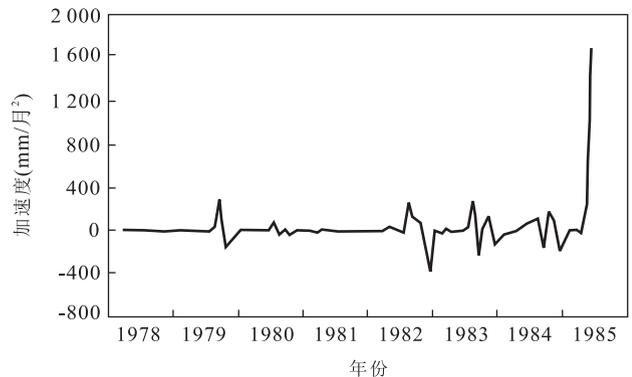


图 4 新滩滑坡加速度—时间曲线

Fig.4 Curve of acceleration vs. time of Xintan landslide

说明拟合结果良好.选取不同的划分点进行 Chow 分割点检验,在 5% 的置信水平下,将可以判断模型有显著结构变化的点挑选出来,为 1979 年 10 月、11 月、12 月,计算得 F 统计量的值和 LR 统计量的值

表 1 新滩滑坡 F 统计量和 LR 统计量值Table 1 F statistic and log-likelihood ratio statistic values of Xintan landslide

月份	F 统计量	相应概率值 P	LR 统计量	相应概率值 P
1979-10	2.31	0.037 1	4.80	0.030 2
1979-11	2.39	0.034 6	4.95	0.028 0
1979-12	2.33	0.036 4	4.84	0.029 7
1981-12	5.62	0.005 6	11.00	0.004 1
1982-01	5.92	0.004 4	11.53	0.003 1
1982-02	5.94	0.004 3	11.58	0.003 1
1982-03	6.06	0.003 9	11.80	0.002 7
1982-04	6.25	0.003 3	12.13	0.002 3
1982-05	6.25	0.003 3	12.13	0.002 3
1982-06	6.28	0.003 2	12.19	0.002 3
1982-07	6.05	0.003 9	11.77	0.002 8
1982-08	6.97	0.001 8	13.40	0.001 2
1985-05	4.68	0.009 2	9.24	0.009 9

见表 1, 以 1979 年 11 月为分割点时, 其 F 和 LR 统计量的值最大, 并且其相应的概率值 P 都小于 0.05, 于是可以认为模型结构在 1979 年 11 月发生了显著变化, 此点即为新滩滑坡初始变形阶段和等速变形阶段的划分点。

1979 年 11 月开始, 滑坡进入等速变形阶段。而从图 4 可以看出 1983 年前后滑坡的加速度表现出与等速变形阶段明显不同的特征, 其加速度仍在 0 附近震荡, 只是震荡幅度比等速变形阶段要强一些 (许强和曾裕平, 2009)。依据此特征, 滑坡可能在 1983 年附近进入了加速变形阶段, 为了有效划分, 取 1979 年 11 月到 1985 年 6 月共 68 个月的累计位移和降雨量数据建立多元时间序列模型如下:

$$\ln y_t = 0.994 \ln y_{t-1} + 0.017 \ln(x_{t-1} + x_{t-2}), \quad (9)$$

模型的各项系数都非常显著, 拟合优度 $R^2 = 0.996$, 说明拟合结果良好。选取不同的划分点进行 Chow 分割点检验, 在 1% 的置信水平下, 将可以判断模型有显著结构变化的点挑选出来, 为 1981 年 12 月到 1982 年 8 月, 计算得 F 统计量的值和 LR 统计量的值见表 1。以 1982 年 8 月为分割点时, 其 F 和 LR 统计量的值最大, 并且其相应的概率值 P 都小于 0.01, 于是可以认为模型结构在 1982 年 8 月发生了显著变化, 此点即为新滩滑坡等速变形阶段和加速变形阶段的划分点。

1982 年 8 月开始, 滑坡进入加速变形阶段。而一旦进入临滑阶段, 加速度的增长更加急剧。依据此特征, 为了将临滑阶段从加速变形阶段中划分出来, 取 1982 年 8 月到 1985 年 6 月共 35 个月的累计位移和降雨量数据建立多元时间序列模型如下:

$$\ln y_t = 0.987 \ln y_{t-1} + 0.034 \ln(x_{t-1} + x_{t-2}), \quad (10)$$

模型的各项系数都非常显著, 拟合优度 $R^2 = 0.970$, 说明拟合结果良好。选取不同的划分点进行 Chow 分割点检验, 在 1% 的置信水平下, 将可以判断模型有显著结构变化的点挑选出来, 为 1985 年 5 月, 其 F 统计量的值和 LR 统计量的值见表 1, 可以认为模型结构在 1985 年 5 月发生了显著变化, 1985 年 5 月新滩滑坡进入临滑阶段。其具体划分如图 5 所示。

新滩滑坡于 1985 年 6 月 12 日凌晨突然发生滑坡, 说明上述对于滑坡临滑阶段的划分是符合实际情况的, 如图 5, 可以以 1985 年 5 月作为进入临滑阶段的起点和预警点。

2.2 白水河滑坡演化阶段划分

三峡库区秭归县白水河滑坡位于长江南岸, 距三峡大坝 56 km, 2007 年 6 月预警区后缘出现座滑体, 东侧及后缘边界出现深大裂缝 (杜鹃等, 2009)。本文以监测点 ZG118 为代表, 取其 2004 年 1 月到 2007 年 12 月共 48 个月的等时化插值处理后的累计位移监测数据 Y (mm), 由于此滑坡受降雨和库水位影响较大, 所以同时取其 2004 年 1 月到 2007 年 12 月的降雨量监测数据 X (mm), 库水位监测数据 Z (m)。作 X 的直方图和 Y 、 Z 的观测曲线, 分别如图 6、图 7 和图 8 所示。

作白水河滑坡加速度—时间曲线, 如图 9 所示。依据上述加速度在初始变形阶段的特征, 从图 9 可以看出滑坡在 2004 年到 2006 年加速度前后分别表现出初始变形和等速变形阶段的特征, 为了有效划分, 取 2004 年 1 月到 2007 年 1 月共 37 个月的累计位移、降雨量和库水位数据建立多元时间序列模型如下:

$$\ln y_t = 0.976 \ln y_{t-1} + 0.046 \ln x_{t-1} - 0.706 (\ln z_t - \ln z_{t-1}) + \varepsilon_t, \quad (11)$$

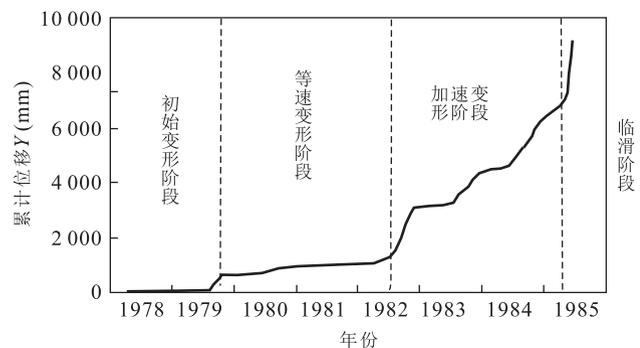


图 5 新滩滑坡阶段划分

Fig.5 Stages division of Xintan landslide

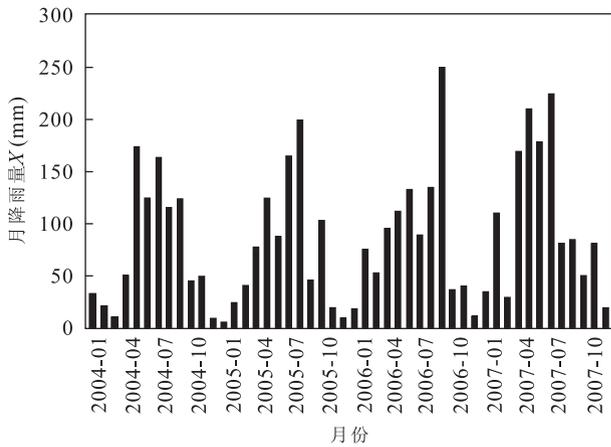


图 6 白水河滑坡降雨量直方图

Fig.6 Histogram of rainfall vs. time of Baishuihe landslide

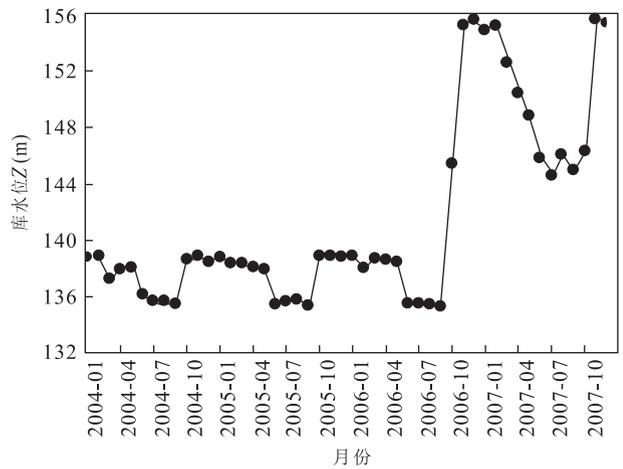


图 8 白水河滑坡库水位高程监测曲线

Fig.8 Curve of reservoir level elevation vs. time of Baishuihe landslide

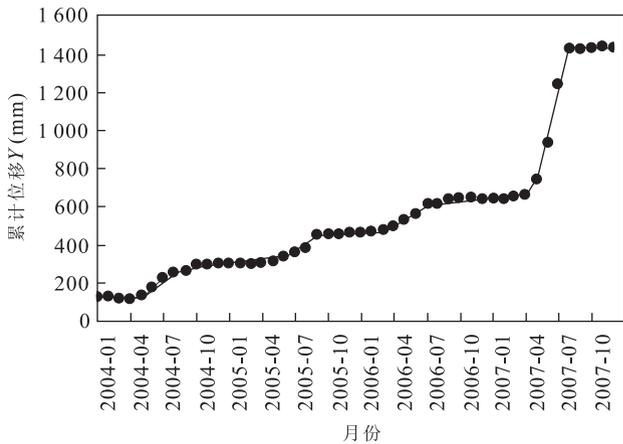


图 7 白水河滑坡 ZG118 监测点累计位移—时间曲线

Fig.7 Accumulated displacement-time curve of monitoring point ZG118 of Baishuihe landslide

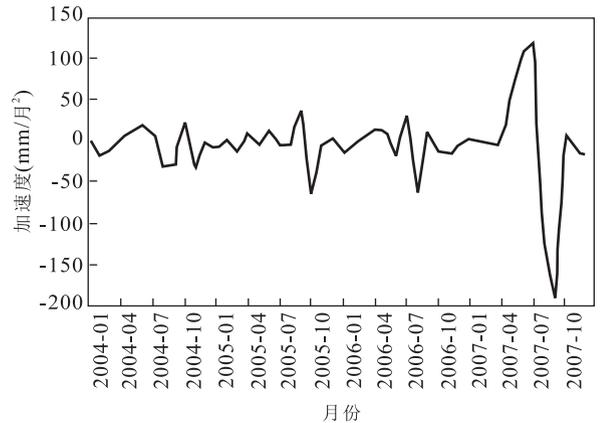


图 9 白水河滑坡 ZG118 监测点加速度—时间曲线

Fig.9 Acceleration-time curve of monitoring point ZG118 of Baishuihe landslide

模型的各项系数都非常显著,拟合优度 $R^2 = 0.990$,说明拟合结果良好.选取不同的划分点进行 Chow 分割点检验,在 1%的置信水平下,将可以判断模型有显著结构变化的点挑选出来,为 2004 年 8 月、9 月、10 月、11 月、12 月以及 2005 年 1 月,其 F 统计量和 LR 统计量的值及其相应概率值 P 见表 2.以 2004 年 8 月为分割点时,其 F 和 LR 统计量的值最大,并且相应的概率值 P 都远小于 0.01,可以认为模型结构在 2004 年 8 月发生了变化,此点即为白水河滑坡初始变形阶段和等速变形阶段的划分点.

2004 年 8 月开始,滑坡进入等速变形阶段.但从图 9 可以看出滑坡的加速度在 2007 年表现出与等速变形阶段明显不同的特征,表现出加速变形阶段的特征.为了有效划分,取 2004 年 8 月到 2007 年 12 月共 41 个月的累计位移、降雨量和库水位数据建立

多元时间序列模型如下:

$$\ln y_t = 0.982 \ln y_{t-1} + 0.039 \ln x_{t-1} - 0.691 (\ln z_t - \ln z_{t-1}) + \epsilon_t, \quad (12)$$

模型的各项系数都非常显著,拟合优度 $R^2 = 0.989$,说明拟合结果良好.选取不同的划分点进行 Chow 分割点检验,在 1%的置信水平下,将可以判断模型有显著结构变化的点挑选出来,为 2007 年 2 月、3 月、4 月、5 月、6 月、7 月,其 F 统计量和 LR 统计量的值及其相应概率值 P 见表 2.以 2007 年 6 月为分割点时,其 F 和 LR 统计量的值最大,并且相应的概率值 P 都远小于 0.01,于是可以认为模型结构在 2007 年 6 月发生了显著变化,此点即为白水河滑坡等速变形阶段和加速变形阶段的划分点,2007 年 6 月开始,滑坡进入加速变形阶段.其背景是滑坡在 4、

表 2 白水河滑坡 F 统计量和 LR 统计量值Table 2 F statistic and log-likelihood ratio statistic values of Baishuihe landslide

月份	F 统计量	相应概率值 P	LR 统计量	相应概率值 P
2004-08	15.88	0.000 0	34.45	0.000 0
2004-09	9.40	0.000 1	23.95	0.000 0
2004-10	5.22	0.004 9	15.12	0.001 7
2004-11	5.98	0.002 4	16.89	0.000 7
2004-12	6.05	0.002 3	17.06	0.000 7
2005-01	6.16	0.002 1	17.30	0.000 6
2007-02	6.10	0.001 9	17.23	0.000 6
2007-03	6.26	0.001 6	17.61	0.000 5
2007-04	9.32	0.000 1	24.08	0.000 0
2007-05	11.17	0.000 0	27.53	0.000 0
2007-06	13.82	0.000 0	32.04	0.000 0
2007-07	6.26	0.001 6	17.61	0.000 5

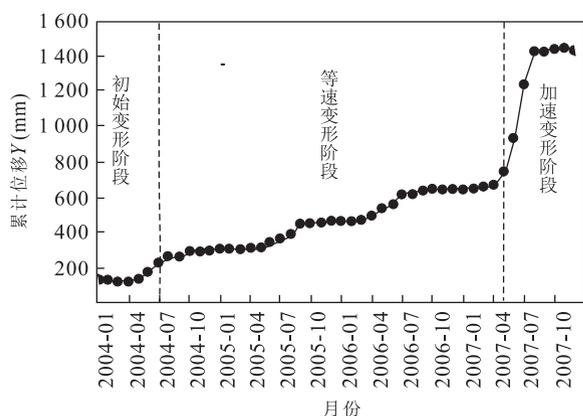


图 10 白水河滑坡阶段划分示例

Fig.10 Stages division of Baishuihe landslide

5 月份总降雨量 355 mm 及 5 月水位下降 4.68 m 的组合工况作用下,各监测点位移量陡增,形成了滑坡的整体变形。此外,白水河滑坡变形资料显示,到 2007 年 12 月,滑坡周界裂缝体系还未圈闭,整体滑动边界尚未形成(杜鹃等,2009)。加上长江汛期雨季即将过去,滑坡累计位移在 2007 年 8 月以后,累计位移—时间曲线几乎呈一条直线,变形又逐渐恢复平稳(图 7)。这表明白水河滑坡到 2007 年 12 月为止仍处于加速变形阶段初期,还未进入临滑阶段(图 10)。这与白水河滑坡实际状况吻合,当研究人员进一步取得滑坡的后续监测资料时,参考图 1,可以利用本文的方法继续滑坡演化阶段的划分。

3 结论

(1)采用多元时间序列方法,本文建立滑坡累计位移与时间、降雨、库水位升降(库岸滑坡)等多影响

因素的耦合模型,其拟合效果显著,很好地反映了降雨和库水位升降对滑坡的影响程度。

(2)利用 Chow 分割点检验理论,本文以所建模型中 F 和 LR 统计量最大值点作为分割点对滑坡演化阶段进行划分;并以新滩滑坡和白水河滑坡为例,对其初始变形阶段、等速变形阶段和加速变形阶段进行了划分。划分方法对滑坡的预警预报具有实际参考价值。

References

- Chen, X.P., Zhang, Q.Y., Liu, D.W., et al., 2008. Deformation Statistical Regression Analysis Model of Slope and Its Application. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27 (Suppl.2): 3673—3679 (in Chinese with English abstract).
- Ding, J.X., Shang, Y.J., Yang, Z.F., et al., 2004. New Method of Predicting Rainfall-Induced Landslides. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23 (21): 3738—3743 (in Chinese with English abstract).
- Du, J., Yin, K.L., Chai, B., 2009. Study of Displacement Prediction Model of Landslide Based on Response Analysis of Inducing Factors. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28 (9): 1783—1789 (in Chinese with English abstract).
- Fan, X., Y., 2011. Landslide Displacement Multifractal and Its Application to Prediction of Evolvement Trend. *Rock and Soil Mechanics*, 32 (6): 1831—1837 (in Chinese with English abstract).
- Gao, L.T., Yi, X.W., Li, X., et al., 2011. Case Study of Relationship between Typical Landslide Distortion and Water Changes in Three Gorges Area. *Geological Science and Technology Information*, 30 (4): 132—136 (in Chinese with English abstract).
- Gao, T.M., Liang, Y.F., Liu, Y.H., 2009. Methods of Econometric Analysis and Modeling. Tsinghua University Press, Beijing, 81—86 (in Chinese).
- Luo, Y., He, S.M., He, J.C., 2014. Effect of Rainfall Patterns on Stability of Shallow Landslide. *Earth Science*, 39 (9): 1357—1363 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.F., 2003. Quantitative Prediction of Landslide Using S-Curve. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 14 (2): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S.Q., 1999. The Monitoring and Prediction of the Landslide in the Three Gorges Region of Yangtze River. Geological Publishing House, Beijing, 13—20 (in Chinese).
- Wu, Y.P., Zhang, Q.X., Tang, H.M., et al., 2014. Landslide Hazard Warning Based on Effective Rainfall Rainfall Intensity. *Earth Science*, 39 (7): 889—895 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

- Xu, F., Wang, Y., Du, J., et al., 2011. Study of Displacement Prediction Model of Landslide Based on Time Series Analysis. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(4): 746—751 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Huang, R. Q., Li, X. Z., 2004. Research Progress in Time Forecast and Prediction of Landslides. *Advance in Earth Sciences*, 19(3): 478—483 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Tang, M. G., Xu, K. X., et al., 2008. Research on Space-Time Evolution Laws and Early Warning-Prediction of Landslides. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(6): 1104—1112 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Zeng, Y. P., 2009. Research on Acceleration Variation Characteristics of Creep Landslide and Early-Warning Prediction Indicator of Critical Sliding. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(6): 1099—1106 (in Chinese with English abstract).
- Yin, K. L., 2004. Landslide Hazard Prediction and Evaluation. China University of Geosciences Press, Wuhan, 8—9, 74—78 (in Chinese).
- Zheng, D. J., Gu, C. S., Wu, Z. R., 2005. Time Series Evolution Forecasting Model of Slope Deformation Based on Multiple Factors. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(17): 3180—3184 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, B., 2012. Analysis on Forecast of Xintan Landslide. *Subgrade Engineering*, (4): 182—185 (in Chinese with English abstract).
- 丁继新, 尚彦军, 杨志发等, 2004. 降雨型滑坡预报新方法. *岩石力学与工程学报*, 23(21): 3738—3743.
- 杜娟, 殷坤龙, 柴波, 2009. 基于诱发因素响应分析的滑坡位移预测模型研究. *岩石力学与工程学报*, 28(9): 1783—1789.
- 樊晓一, 2011. 滑坡位移多重分形特征与滑坡演化预测. *岩土力学*, 32(6): 1831—1837.
- 高连通, 易夏玮, 李喜等, 2011. 三峡库区典型滑坡变形与高水位涨落关系研究. *地质科技情报*, 30(4): 132—136.
- 高铁梅, 梁云芳, 刘玉红, 2009. 计量经济分析方法与建模 EVIEWS 应用及实例. 北京: 清华大学出版社, 81—86.
- 罗渝, 何思明, 何尽川, 2014. 降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响. *地球科学*, 39(9): 1357—1363.
- 王建锋, 2003. 滑坡发生时间预报分析. *中国地质灾害与防治学报*, 14(2): 1—8.
- 王尚庆, 1999. 长江三峡滑坡监测预报. 北京: 地质出版社, 13—20.
- 吴益平, 张秋霞, 唐辉明, 肖威, 2014. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警. *地球科学*, 39(7): 889—895.
- 徐峰, 汪洋, 杜娟, 等, 2011. 基于时间序列分析的滑坡位移预测模型研究. *岩石力学与工程学报*, 30(4): 746—751.
- 许强, 黄润秋, 李秀珍, 2004. 滑坡时间预测预报研究进展. *地球科学进展*, 19(3): 478—483.
- 许强, 汤明高, 徐开祥, 等, 2008. 滑坡时空演化规律及预警预报研究. *岩石力学与工程学报*, 27(6): 1104—1112.
- 许强, 曾裕平, 2009. 具有蠕变特点滑坡的加速度变化特征及临滑预警指标研究. *岩石力学与工程学报*, 28(6): 1099—1106.
- 殷坤龙, 2004. 滑坡灾害预测预报. 武汉: 中国地质大学出版社, 8—9, 74—78.
- 郑东健, 顾冲时, 吴中如, 2005. 边坡变形的多因素时变预测模型. *岩石力学与工程学报*, 24(17): 3180—3184.
- 周斌, 2012. 新滩滑坡预测预报分析. *路基工程*, (4): 182—185.

附中文参考文献

- 陈晓鹏, 张强勇, 刘大文, 等, 2008. 边坡变形统计回归分析模型及应用. *岩石力学与工程学报*, 27(增刊2): 3673—3679.