

# 基于动态指数平滑模型的降雨诱发型滑坡预测

段功豪<sup>1</sup> 牛瑞卿<sup>1</sup> 赵艳南<sup>1</sup> 张凯翔<sup>1</sup> 咬登魁<sup>2</sup>

1 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,湖北 武汉,430074

2 安徽省地质环境监测总站,安徽 合肥,230001

**摘要:**为了快速而准确地分析降雨型滑坡的变形趋势,以指数平滑法为数学基础,从滑坡的实际演化阶段出发,建立外界主要诱发因素与模型参数的关联,引入月累积降雨量作为模型参数动态评估因子,对白家包滑坡 90 期累积位移数据进行了拟合及预测。最终拟合的累计位移平均绝对误差和相关系数分别为 11.346 和 0.933。与传统的静态参数方法相比,这种方法更符合降雨型滑坡发展的一般规律,预测精度更高。

**关键词:**指数平滑法;动态参数;滑坡;诱发因素;预测

**中图法分类号:**P258

**文献标志码:**A

滑坡是自然界中最主要的地质灾害之一,具有灾害影响大、发生次数频繁、区域范围分布广以及运动速度快等特点<sup>[1-2]</sup>。滑坡的位移量或位移速率对滑坡稳定性评价具有直接作用,有效利用各类监测数据,建模分析滑坡位移的趋势,已成为滑坡预测领域未来的研究方向<sup>[3-6]</sup>。目前,滑坡位移预测模型多采用数值拟合算法如 Arima 算法、指数平滑法、粒子群-高斯过程回归耦合算法等算法,支持向量机背景下的最佳核函数法等建立预测模型,进而分析滑坡时序的发展规律<sup>[7-10]</sup>。但由于各类滑坡组成物质和演化过程各异,易受实时地质条件和水文环境的综合作用而形成一个复杂的系统,并且由静态历史数据衍生的预测模型无法体现过程的时效性<sup>[11]</sup>。三峡库区内堆积层滑坡一般由次生堆积体构成,在具备了滑坡发育的地质条件时,降雨在很大程度上是库区内堆积层滑坡诱发的最主要因素,降雨型滑坡属于受降雨因素影响较大的滑坡种类<sup>[12]</sup>。库区常年降雨充沛,约有 95% 的堆积层滑坡发生于雨季。从定量指标上来看,特大降雨引发的地下水位波动,会持续性地影响降雨诱发型滑坡软弱面的稳定系数;从定性指标上来看,库区地理环境复杂,各个滑坡的所处地质环境、产状、组成物质等具体因素各异,单一的模型参数难以响应滑坡地质条件的具体变化。目前,对降雨型滑坡的预测多是从数

据挖掘的角度出发,利用静态数据的规律,建立合适的数学模型,而并未与滑坡实际演化过程建立关联。因此,在提升模型数学精度的同时,如何科学研究滑坡演化过程,考虑非线性动态因素(降雨量)对降雨型滑坡位移的影响,对该类滑坡稳定性评价具有重要作用。

## 1 理论模型原理和方法

### 1.1 指数平滑法

指数平滑法是一种特殊的加权平均法,它的特点是对离预测期较近的历史数据较敏感,对离预测期远的历史数据关注度低,权数按照由近到远的规律依次递减。滑坡稳定性评估是一项复杂的工作,这种方法优点体现在建模时间短且不依赖过多训练数据,二次指数平滑法是在一次指数平滑的基础上再做一次指数平滑,并考虑偏差值和滞后性的影响,研究曲线的总体发展趋势。在大多数情况下,只要利用三个训练数据和一个参数值便可建立预测模型并确定预测值,所以该算法适用性较强,符合滑坡位移数据的特异性。

线性二次指数平滑法的公式如下:

$$S_{t(1)} = aY_{t-1} + (1-a)S_{t-1(1)} \quad (1)$$

$$S_{t(2)} = aS_{t(1)} + (1-a)S_{t-1(2)} \quad (2)$$

式中, $S_t$ 、 $S_{t-1}$  分别为  $t$  期和  $t-1$  期的滑坡累计位

移二次指数平滑值; $a$  为平滑系数,即阻尼系数; $Y_{t-1}$  为  $t$  时刻前一期的实际位移值,在  $S_{t(1)}$  和  $S_{t(2)}$  已知的条件下,二次指数平滑法的预测模型为:

$$F_{t+T} = a_t + b_t T \quad (3)$$

$$a_t = 2 S_{t(1)} - S_{t(2)} \quad (4)$$

$$b_t = a(S_{t(1)} - S_{t(2)}) / (1 - a) \quad (5)$$

式中, $T$  为预测超前期数; $F_{t+T}$  为  $t+T$  期的滑坡累计位移预测值; $a_t$ 、 $b_t$  均是第  $T$  期数据的参数。本次研究应用二次指数平滑法进行预测时,考虑到观测周期较长,初始训练样本对模型影响不大,采用前 2~5 个观测值的平均值代替。

## 1.2 平滑参数对预测模型的影响

从 § 1.1 的模型公式中不难看出,平滑参数  $a$  的值起到了至关重要的作用,它反映了预测值与当期数据值的接近程度。实际应用中,参数  $a$  是介于 0~1 之间的常数, $a$  越接近 1,预测值与当前时间的滑坡累计位移量越接近,与历史数据的平滑值差别越大,累积位移的斜率(速率)变化越快,曲线上将呈现不平滑的趋势; $a$  越接近 0,预测值与历史数据的平滑值越接近,曲线越平滑。传统的静态平滑参数法主要是针对受环境因素影响不大的数据实体,而在滑坡预测的具体研究中,受降雨、库水等诸多外界诱发因素影响,滑坡累计位移曲线具有较明显的分段性、周期性、趋势性和随机性。本次研究考虑到降雨诱发滑坡的特点,建立模型平滑参数的动态影响因子,结合白家包滑坡实际地质背景和二次指数平滑模型,在滑坡各演化阶段设立不同的参数值,形成最终的优化模型。

## 2 实验与分析

### 2.1 白家包滑坡地质背景及演化阶段划分

白家包滑坡位于湖北省秭归县归州镇向家店村,处于三峡库区长江支流——香溪河右岸,距离原香溪镇约 1.5 km。所处地貌部位为低山区凹形斜坡内,斜坡坡度约  $20^\circ$  左右,斜坡类型为切向坡。滑坡所在地区气候属三峡地区亚热带季风区,滑带为崩坡积物与下伏基岩接触面,属于相对隔水层,主滑方向为  $75^\circ \sim 85^\circ$ 。滑坡体主要物质由含碎块石粉质粘土和块裂岩组成,结构松散、杂乱。粉质粘土为褐黄色,硬塑,碎块石岩性以长石砂岩为主,含量为 10~40%,粒径变化大,呈棱角状至次棱角状,风化程度中等-微风化。滑坡及周围出露地层为侏罗系下统桐竹园组,岩性以长石砂岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩为主,岩层倾向

$260^\circ \sim 285^\circ$ , 倾角  $30^\circ \sim 40^\circ$ 。滑坡体属坡积、崩积、残积堆积体,为土质斜坡,松散结构<sup>[13]</sup>。滑坡前缘基本没于香溪河中,在库区蓄水至 175 m 时,滑坡部分坡体将处于水体浸没下。受降雨和库水位的长期波动影响,水体对滑动面的润滑作用加强,逐渐形成前缘临空面,共同影响滑坡的稳定性。白家包滑坡主滑坡面上布设了 ZG324 和 ZG325 监测点位,在滑坡中下部设置了 ZG323 和 ZG326 隔月测量,在失稳概率较大的月份(6~9 月)会相应增加监测次数,白家包滑坡专业监测剖面如图 1 所示。

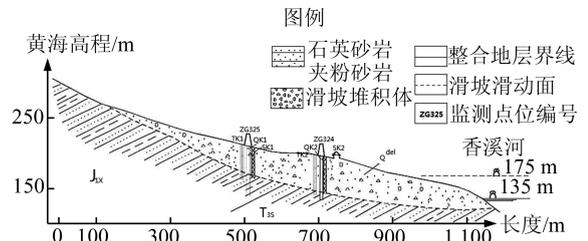


图 1 白家包滑坡监测剖面图

(据三峡库区地质灾害防治工作指挥部)

Fig. 1 Profile Map of Baijiabao Landslide

提取白家包滑坡现有 4 个监测点的累积位移数据,绘制累积位移-时间散点图,图 2 反映了 ZG323-ZG326 监测点累积位移的整体情况。

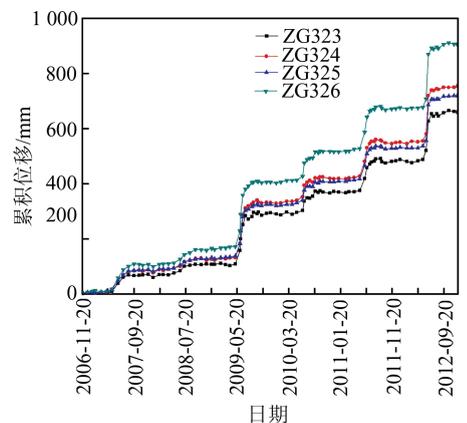


图 2 白家包滑坡累积位移-时间散点图

Fig. 2 Deformation to Time Plotmatrix

从累积位移数据散点分布情况可以看出,各点位数据比较完整,无明显突变值,不同监测部位形变趋势大致相同:滑坡在每年 6~9 月的期间发生或大或小的位移增进;从发生形变的部位上来看,前缘位移没有中后缘位移大,并且南部整体形变趋势大于滑坡北部;所有监测数据截止于 2013 年初。相关研究表明,滑坡位移与其所处演化阶段有着重要联系。为了提高算法的运算效率,本

研究提取位移趋势较大、受降雨排泄作用敏感的中后缘监测点 ZG326 在 2006~2012 年间的 74 项记录值,作为评价滑坡演化阶段的基础数据。建立 K-means 聚类模型,将月相对位移粗分为 6 类,各类别相似度(簇间距离)如表 1 所示。

表 1 聚类相似度  
Tab. 1 Cluster Similarity

	类 1	类 2	类 3	类 4	类 5	类 6
类 1	0					
类 2	0.98	0				
类 3	0.58	0.40	0			
类 4	0.30	0.69	0.29	0		
类 5	0.76	0.22	0.18	0.47	0	
类 6	0.11	0.87	0.47	0.18	0.65	0

白家包滑坡属典型堆积层降雨型滑坡,滑坡物质构成较复杂,参照月相对位移间相似度,根据堆积层滑坡时空演化特征,合并聚类-2、聚类-3、聚类-5 定义为剪切破坏阶段;合并聚类-4 和聚类-6,定义为整体位移阶段;聚类-1 单独作为压密变形阶段,最终得到各演化阶段对应的月相对位移区见间:压密为 0.191~14.132 mm,整体位移为 16.122~61.361 mm,剪切破坏为 114.996~191.358 mm。白家包滑坡演化阶段划分如图 3 所示。

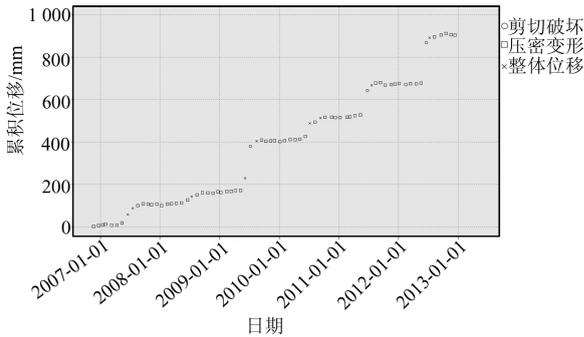


图 3 变形阶段划分图

Fig. 3 Diagram of Deformation Phase

### 2.2 平滑参数动态评估因子的产生

从图 3 中可以看出,滑坡位移曲线呈阶跃式特征,比较危险的剪切破坏阶段基本都出现在 6~9 月份,这期间降雨比较集中,如 2012 年 6 月份 ZG326 的月相对位移达到了 190 mm。白家包滑坡属降雨诱发型滑坡,暴雨极易改变坡体堆积物的力学性能,并且受到库区水位波动的影象,所产生的动静水压力将降低边坡抗剪强度,促使滑坡进入加速变形阶段,最终导致剧烈滑移的发生。白家包滑坡属归州雨站监测范围内,降雨量以日为单位进行存储,三峡库区库水位作为监测指标,

同样以日为单位进行存储,具体情况见图 4。

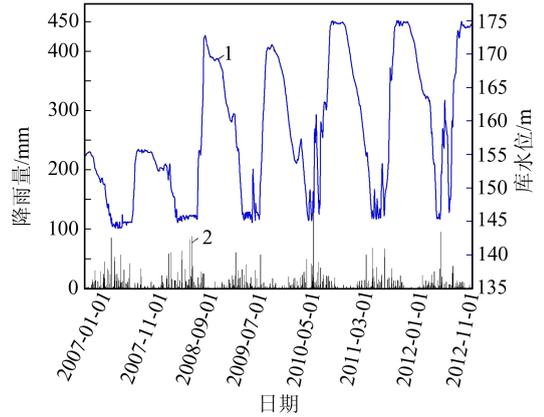


图 4 归州降雨量与库区库水位组合图  
(据三峡库区地质灾害防治工作指挥部)

Fig. 4 Annual Rainfall of Guizhou and Water Level Fluctuation of the Three Gorges(2007-2010)

在 SPSS Clementine 字段选项卡的分箱功能中,设置分箱字段为月累积降雨量、月最大降雨量、月平均降雨量,主管字段定为变形阶段,对降雨监测指标分箱进行处理。

为了尽量消除各类降雨数据的滞后特性,对白家包滑坡各类降雨因子分组进行相关分析,其中月累积降雨量最大,相关系数为 0.998;其次为月平均降雨量,相关系数为 0.827;月最大降雨量为 0.447。这是因为:白家包滑坡由于前缘坡体涉水,滑坡表面结构较松散,一次性降雨较易形成地下水从而涌入香溪河,导致短期降雨对滑坡位移作用不大,持续性的大暴雨是影响滑坡稳定性的重要因素。最终选择月累积降雨量作为降雨动态评估因子,分割处理情况如下:3.5~62.1 mm, 62.1~124.1 mm, 124.1~151.1 mm, 151.1~316 mm。

### 2.3 模型应用与结果分析

在降雨评估因子的研究中,月累积降雨量从侧面反映了滑坡所处的演化阶段。滑坡累计位移曲线具有较明显的分段性、周期性、趋势性和随机性,在降雨比较集中的月份,滑坡极有可能失稳,累积位移曲线的斜率(速率)将发生显著变化,当前位移值将远离历史数据的平滑趋势,二次指数模型的平滑参数应接近 1;而在月累积降雨量较小的阶段,位移速率变化不大,当前位移值应接近历史数据的平滑值,二次指数模型的平滑参数应接近 0。在月累积降雨量与滑坡演化阶段的关联支持下,动态优化平滑参数  $\alpha$  的取值,如表 2 所示。

表 2 模型参数动态优化

Tab. 2 Dynamic Parameters

月累积降雨量	演化阶段	平滑参数
3.5~62.1	压密变形	0.3
62.1~124.1	整体位移	0.5
124.1~151.1	整体位移	0.7
151.1~316	剪切破坏	0.9

根据表 2 提出的优化原则,动态监测月累积降雨量,获取滑坡三类演化阶段下平滑参数的取值,另选用 0.7 作为固定平滑参数生成对比模型,均以白家包滑坡 2006~2011 年数据为模型初始拟合的训练样本,预测 2012 年滑坡的月累计位移量。对比结果如图 5 所示。

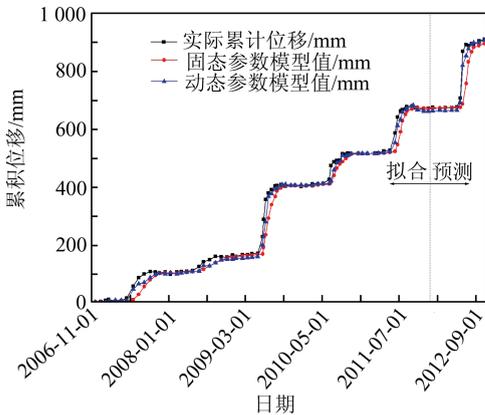


图 5 实测值与模型预测值

Fig. 5 Measured Values and Predicted Values

从图 5 可见,静态参数模型下的拟合及预测值与实测值变化趋势基本一致,但在累计位移数值转折点处误差相对较大,且明显存在滞后性,在每年的 6~9 月,滑坡受外界降雨作用较明显,静态参数模型没能及时响应时间序列斜率上的变化,2012 年滑坡预测值偏离实测值较远;动态参数模型预测及拟合效果明显优于前者,2012 年的预测值与实测值相关性较好,改善了一定的滞后效应,原因在于,根据月累积降雨量,将白家包滑坡分为三种演化阶段,利用先验知识判断滑坡失稳阶段,通过设置不同过程的平滑参数,实时响应了时间序列的斜率变化,使拟合情况得到了显著提升。利用平均绝对误差(MAE)和相关系数( $r$ )评价模型的预测精度:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |Y(t) - \hat{Y}(t)| \quad (6)$$

$$r = \frac{\sum [(A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})]}{\sqrt{\sum (A_i - \bar{A})^2} \times \sqrt{\sum (B_i - \bar{B})^2}} \quad (7)$$

式中, $Y(t)$ 为实际值,另一变量代表模型预测值, $n$ 为数据期数; $A_i$ 、 $B_i$ 分别表示实际值和模型预测

值, $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ 分别表示数据的均值。MAE 越小,模型误差越小; $r$  越大,表明拟合数据与滑坡实测位移的相关性越高,评价结果如表 3 所示,可以看出,动态优化参数模型的拟合和泛化能力均比传统静态参数模型的优。滑坡下一期累计位移经模型预测为 905.234 mm,相对位移为 0.872 mm,尚处于稳定阶段。

表 3 模型精度评价

Tab. 3 Performance of Models

模型	MAE	相关系数( $r$ )
静态参数模型	21.46	0.847
动态参数模型	11.34	0.933

### 3 结 语

本文提出的参数动态优化模型能够自适应地根据降雨量监测指标实时评估并修正模型参数,相比于传统的二次指数法,考虑了实际环境因素对降雨型滑坡系统的影响,在滑坡各演化阶段设立不同的平滑参数值,使得预测模型的实用性和时效性得到提高,且能很好地和地灾监测系统平台相结合。进一步的工作将着眼于扩展适用该模型的滑坡范围,以使其能够得到广泛应用。

### 参 考 文 献

[1] Wen Baoping, Li Yuan, Wang Xinglin, et al. Forecast and Countermeasures of Typical Loess Landslides[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997(文宝萍,李媛,王兴林,等.黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究[M].北京:地质出版社,1997)

[2] Cojean R, Ca Y J. Analysis and Modeling of Slope Stability in the Three-Gorges Dam Reservoir (China)—the Case of Huangtupo Landslide[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011(2): 166-175

[3] Niu Ruiqing, Han Ge. A Technological Flow For Processing Landslide-monitoring Data Based on Data Mining[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(7): 869-872(牛瑞卿,韩舸.利用数据挖掘的滑坡监测数据处理流程[J].武汉大学学报·信息科学版,2012,37(7):869-872)

[4] Baker R. Inter-relations Between Experimental and Computational Aspects of Slope Stability Analysis [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2003,27(5):379-401

[5] Iverson R M, Reid M E. Acute Sensitivity of Landslide Rates to Initial Soil Porosity [J]. *Science*,

- 2000,290 (5 491):513-521
- [6] Nefeslioglu H A, Sezer E, Gokceoglu C, et al. Assessment of Landslide Susceptibility by Decision Trees in the Metropolitan Area of Istanbul, Turkey [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010, doi:10.1155/2010/901095
- [7] Wang Shangqing, Xu Jinjun, Luo Mian. Study on Warning of Dangerous State of Baishuihe Landslide in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(10): 1 218-1 221 (王尚庆,徐进军,罗勉. 三峡库区白水河滑坡险情预警方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009,34(10): 1 218-1 221)
- [8] Yin Guangzhi, Zhang Weizhong, Zhang Dongming, et al. Forecasting of Landslide Displacement Based on Exponential Smoothing and Nonlinear Regression Analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007(8): 1 725-1 728(尹光志,张卫中,张东明,等. 基于指数平滑法与回归分析相结合的滑坡预测[J]. 岩土力学, 2007(8):1 725-1 728)
- [9] Duan Gonghao, Niu Ruiqing. A Methods Research Of Dynamic Data Mining For Landslide-Monitoring Data[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013(5):38-41(段功豪,牛瑞卿. 滑坡监测动态数据挖掘方法研究[J]. 长江科学院院报, 2013(5): 38-41)
- [10] Xu Chong, Liu Baoguo, Liu Yunkai, et al. Intelligent Analysis Model of Landslide Displacement Time Series Based on Coupling PSO-GPR[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011(6):1 669-1 675(徐冲,刘保国,刘开云,等. 基于粒子群-高斯过程回归耦合算法的滑坡位移时序分析预测智能模型[J]. 岩土力学, 2011(6): 1 669-1 675)
- [11] Rm I, Rainfall J M J. Ground Water Flow and Seasonal Movement at Minor Creek Landslide, Northwestern California: Physical Interpretation of Empirical Relations[J]. *Bulletin of Geological Society of America*, 1987, 99(4):466-476
- [12] Yin Kunlong, Chen Lixia, Zhang Guirong. Regional Landslide Hazard Warning and Risk Assessment [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 85-97(殷坤龙,陈丽霞,张桂荣. 区域滑坡灾害预测预警与风险评估[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 85-97)
- [13] Peng Ling, Niu Ruiqing. Analysis on Deformation Characteristics and Influential Factors of Baijiabao Landslide in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2011(4):1-7(彭令,牛瑞卿. 三峡库区白家包滑坡变形特征与影响因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011(4): 1-7)

## Rainfall-induced Landslide Prediction Based on Dynamic Exponential Smoothing Model

DUAN Gonghao<sup>1</sup> NIU Ruiqing<sup>1</sup> ZHAO Yannan<sup>1</sup> ZHANG Kaixiang<sup>1</sup> YAO Dengkui<sup>2</sup>

1 Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2 Anhui Institute of Geo-Environment Monitorin, Hefei 230001, China

**Abstract:** We analyze the accuracy trends in landslide deformation, based on the exponential smoothing method and the practical stage of evolution landslide. We establish a connection between the main predisposing factor and model parameters, introducing monthly cumulative rainfall as the evaluation factor for the dynamic model parameter. We use cumulative displacement data from Baijiabao landslide for fitting and forecasting. The result shows that the absolute error and correlation coefficients in our final modal were 11.346 and 0.933. Compared with the conventional method using static parameters, the proposed more in line with the general laws of development of rainfall-induced landslides, and is more accurate.

**Key words:** exponential smoothing; dynamic parameters; landslide; predisposing factors; forecast

**First author:** DUAN Gonghao, PhD candidate, specializes in applications of spatial database. E-mail: vipdgh@163.com

**Foundation support:** The National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China, No. 2012AA121303; the National Basic Research Program (973 Program) of China, No. 2011CB710601; the Important Scientific Research Projects of Geological Hazard Prevention in Three Gorges Reservoir, No. SXKY3-3-2.