

边坡变形的多因素时变预测模型

郑东健, 顾冲时, 吴中如

(河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 在深入分析边坡变形的影响因素及因子模式的基础上, 通过融合回归分析和递推模型的优点, 结合边坡位移时间序列实测资料, 建立了边坡变形的多因素回归时变预测模型, 并考虑了降雨和温度变化的影响。通过模型的预测值与实测数据的对比分析, 可以监控边坡的变形和稳定性。工程实例表明, 该方法具有预测精度较高且实时性强等特点, 有较大的应用价值。

关键词: 边坡工程; 边坡变形; 降雨; 时变模型; 预测

中图分类号: P 642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)17-3180-05

TIME SERIES EVOLUTION FORECASTING MODEL OF SLOPE DEFORMATION BASED ON MULTIPLE FACTORS

ZHENG Dong-jian, Gu Chong-shi, Wu Zhong-ru

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A lot of factors such as topography, geological conditions and rainfall influence slope deformation. The importance of rainfall is difficult to determine. Based on the analysis of the multiple factors of slope deformation and observation of monitoring deformations, a statistic method to correlate slope deformation and rainfall was developed including the hysteresis of rainfall. Whereafter, by applying observation to ordinary statistic model comprising rainfall, temperature and time factor, the main factors affecting slope deformation were extracted by stepwise regression. According to the factors extracted and time series observation, a recursion model was obtained with multilayer recursion analysis method of dynamic system forecasting. At the end, a time series evolution forecasting model of slope deformation was presented combining with regression model and recursion model. The model syncretizes the merits of regression analysis and recursive analysis for enhancing the capability of forecasting evolution of slope deformation. Through comparison between the forecasting and the observation of monitoring deformations, the deformation and stability of slope can be monitored. The engineering case analysis indicates that the model is effective and has big value for forecasting of slope deformation.

Key words: slope engineering; slope deformation; rainfall; evolution model; forecast

1 引言

边坡变形和稳定受地形地质条件和外在环境等多方面因素影响。边坡变形和稳定分析与预测研究方法大体上可分两种, 一种是通过有限元模型

和地质力学模型等数值仿真方法, 模拟边坡在各种因素作用下的行为特征, 预测边坡变形和稳定。由于高边坡变形及失稳时间预测预报所涉及的地质条件及岩体特性参数通常具有高度的非线性^[1, 2]以及岩土物理力学机制的复杂性, 考虑流变或几何非线性有限单元法虽是一个具有发展潜力的分析方法^[3],

收稿日期: 2005-02-24; **修回日期:** 2005-04-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412707); 国家自然科学基金重点项目(50139030)

作者简介: 郑东健(1965-), 男, 1985年毕业于河海大学水电系水工专业, 现为副教授, 主要从事水工建筑物安全监控理论 and 应用方面的教学与研究。E-mail: zhengdj@hhu.edu.cn.

但目前还难以广泛应用于工程实际。另一种是针对实测资料的时间序列建立模型进行分析^[4, 5]。重要工程的高边坡一般积累有长期的安全监测资料, 用以监控和预测高边坡在多因素作用下的稳定性。边坡动态观测一般包括位移变形观测、水文地质观测等。通过位移变形观测, 不仅能够获得不同部位滑坡变形的位移速度和滑动方向, 还能够通过观测资料的分析, 深入认识滑坡变形的机制、滑坡变形的性质和特征。这方面的研究有时间序列经验公式法和统计学方法等, 主要是通过研究资料时间序列的变化规律, 预测边坡变形趋势。例如, 1963 年日本学者斋藤迪孝提出的预报滑坡的经验公式及图解法——斋藤法; Hoek(智利, 1969 年)提出滑坡监测的时间-位移曲线外延法; F. O. Jones (1961 年), P. C. Stevenson(1977 年), T. H. Nilsen(1979 年), T. Endo(1970 年), E. Fussganger(1976 年), G. Guidicini (1976 年)等也先后对滑坡预报的经验法或统计学方法进行了研究。近年来, 鉴于边坡变形与稳定的高度非线性特征和影响因素的模糊不确定性, 文[6~9]应用灰色理论建立了边坡变形预测模型; 文[10, 11]提出了基于神经网络的边坡位移预测方法; 文[12]提出了边坡位移的进化算法识别模型; 应用模糊数学、人工智能理论、突变理论、系统控制论和小波分析等理论以及“3S”技术和混沌分形等非线性系统理论进行边坡变形和稳定预测的研究发展也很快^[13~17]。上述模型一般只关注资料时间序列变化趋势预测, 较少考虑降雨等环境因素对滑坡变形预测的影响。实际上, 边坡变形受降雨等环境因素影响显著, 通过模拟环境因素的影响模式建立回归模型, 可以体现各影响因素对边坡变形的作用和相关程度。但是由于降雨等环境量对边坡稳定的影响效应随时间呈动态变化, 常规方法建立的统计回归分析模型无法反映模型参数的时变特性, 用非时变参数模型来描述一个时变系统将降低模型的预测能力。相反, 递推分析模型参数具有时变特性, 但难以体现影响因素对预测量的相关程度。为此, 本文在深入分析边坡变形的影响因素及因子模式的基础上, 融合回归分析和递推模型的优点, 建立边坡变形的多因素回归时变预测模型, 利用边坡位移时间序列资料, 预测边坡变形的演化趋势, 比一般统计方法将具有更高的预测精度和更广泛的适应性, 对于边坡位移的实时监测和预警有重要意义。

2 边坡变形的多因素时变模型

2.1 边坡变形的影响因素分析

通过对高边坡变形观测资料的分析可知, 高边坡变形主要受时效、降雨量和温度等因素的影响。因此, 高边坡测点位移的统计模型可以由时效分量 δ_θ 、降雨分量 δ_U 和温度分量 δ_T 组成, 即

$$\delta = \delta_\theta + \delta_U + \delta_T \quad (1)$$

2.1.1 时效分量 δ_θ

高边坡产生时效变位的原因极为复杂。参考文献[5], 则位移变化的时效分量可表示为

$$\delta_\theta = c_1(\theta - \theta_0) + c_2(\ln \theta - \ln \theta_0) \quad (2)$$

式中: θ 为位移观测日至始测日的累计天数 t 除以100; θ_0 为建模资料系列第1个测值日到始测日的累计天数 t_0 除以100; c_1 , c_2 为时效因子回归系数。

2.1.2 降雨分量 δ_U

由于降雨入渗抬高地下水位, 改变边坡含水量, 从而对高边坡的变形产生影响, 且有一定时间的滞后作用^[18~20]。可选取观测日前期降雨量的均值作为降雨因子^[21], 即

$$\delta_U = \sum_{i=1}^n [b_i(U_i - U_{0i})] \quad (3)$$

式中: U_i 为观测日前期降雨量均值。前期降雨影响一般在15 d以内, 可由试算取复相关系数 R 较大的 n 个时段降雨均值作为因子; b_i 为降雨因子回归系数。

2.1.3 温度分量 δ_T

岩石边坡的温度影响裂隙开度和应力, 由此对边坡的稳定产生影响。一般缺少实测资料, 可采用下列周期项形式模拟, 即

$$\delta_T = \sum_{i=1}^m \left[b_{1i} \left(\sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi it_0}{365} \right) + b_{2i} \left(\cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi it_0}{365} \right) \right] \quad (4)$$

式中: t 为位移观测日到起始监测日的累计天数; t_0 为建模资料系列第一个监测日到始测日的累计天数; b_{1i} , b_{2i} 均为温度因子回归系数, $i=1, 2, \dots, m$ 为年周期、半年周期、……, 一般取1~2。

2.1.4 统计模型表达式

综上所述, 根据高边坡的特性并考虑初始测值的影响, 得到高边坡变形监测资料的统计模型为

$$\begin{aligned} \delta(t) = & a_0 + c_1(\theta - \theta_0) + c_2(\ln \theta - \ln \theta_0) + \\ & \sum_{i=1}^n [b_i(U_i - U_{0i})] + \\ & \sum_{i=1}^m \left[b_{1i} \left(\sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi i t_0}{365} \right) + \right. \\ & \left. b_{2i} \left(\cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi i t_0}{365} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: a_0 为常数项。

2.2 边坡变形的多因素时变模型

为了使分析模型能集递推方法与多元回归分析方法之优点,使之既能充分体现高相关因子在分析模型中的重要作用,又能对时变动态系统具有较强的适应能力,将式(5)反映变形参数时变特性的递推分析模型取为

$$\begin{aligned} \delta = & a_0 + c_1 \beta_1(t)(\theta - \theta_0) + c_2 \beta_2(t)(\ln \theta - \ln \theta_0) + \\ & \sum_{i=1}^n [b_i \beta_{i+2}(t)(U_i - U_{0i})] + \\ & \sum_{i=1}^m \left[b_{1i} \beta_{6+2i}(t) \left(\sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi i t_0}{365} \right) + \right. \\ & \left. b_{2i} \beta_{7+2i}(t) \left(\cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi i t_0}{365} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: c_i , b_i , b_{1i} , b_{2i} 均为回归系数; $\beta_i(t)$ 为相应回归系数的时变参数。

求解式(5)的基本思路为:先应用逐步回归分析方法求得各因子相对应的回归系数,然后将回归系数与其对应的影响因子的乘积看成是新的影响因子,再根据递推方法^[22]的计算步骤求得各新因子的时变参数,从而建立起递推回归分析时变模型。它依据大量的历史资料进行时间序列的分析,能较好地反映系统的历史演变规律,通过分析时变参数的变化达到状态变化分析误差的减小,步骤如下:

(1) 用逐步回归分析法求得回归系数 c_i , b_i , b_{1i} , b_{2i} 及常数项 a_0 后,令 $Y(t) = \delta(t) - a_0$, 用回归系数乘以式(2)~(4)的各项相应因子作为新的因子 $X_i(t)$, 则 $Y(t)$ 即为新的分析效应量, $X_i(t)$ 为新的影响因子。将 $Y(t)$ 和 $X_i(t)$ 代入式(5),有

$$Y(t) = \sum_{i=1}^m \beta_i(t) X_i(t) \quad (7)$$

此时应用递推方法中的时变参数跟踪递推算公式,即

$$\hat{\beta}_i(t) = \hat{\beta}_i(t-1) +$$

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^m [X_i(t)]^2} X_i(t) \left[Y(t) - \sum_{i=1}^m \hat{\beta}_i(t-1) X_i(t) \right] \quad (8)$$

对式(8)的时变参数进行跟踪,则可得到一系列的时变参数跟踪估值序列 $\{\hat{\beta}_i(t)\}$ 。 $\{\hat{\beta}_i(t)\}$ 的初值一般取为 1。

(2) 对计算得到的时变参数估值序列 $\{\hat{\beta}_i(t)\}$ 进行分析,根据其不同的变化特点,选取合适的时变参数模型,如 AR 模型递推法,建立时变参数演变规律模型 $\{\beta_i(t)\}$ 。

(3) 在上述计算的基础上,则可进一步建立起反应参数时变特性的测点位移数学模型,即

$$\hat{Y}(t) = \sum_{i=1}^m \beta_i(t) X_i(t), \quad \hat{\delta}(t) = a_0 + \hat{Y}(t) \quad (9)$$

3 工程实例

下面以东津大坝高边坡变形预测为例进行多因素时变模型的分析。

3.1 工程和位移监测概况

东津大坝左岸高边坡顶高程约为 290.0 m, 坡高约为 67 m, 经过加固后, 坡度为 (1:0.8)~(1:1), 在 190.0 m, 200.5 m, 215.0 m, 230.0 m 边坡上设有宽 2 m 的马道, 边坡以南被大冲沟所截。高边坡构造断裂发育, 中陡倾角断裂面有 4 组, 缓倾角断裂面有 2 组。其中以 NEE 组最发育, F_{59} 为其中最大的一条断层, 断层产状为 $NE \angle 65^\circ \sim 70^\circ$, $NW \angle 50^\circ \sim 65^\circ$, 断层带宽约 0.5~1.0 m, 充填松散角砾岩、糜棱岩夹石英角砾, 上、下面夹 2~3 cm 厚黄色断层泥。由于多组断裂面切割, 节理发育, 岩体属碎裂和层状碎裂结构。边坡岩体破碎, 断层构造发育, 稳定性差, 在溢洪道开挖过程中, 曾于 1993 年 12 月 23 日在泄槽桩号 0+33.0~0+124 m 范围发生过规模达 30 万 m^3 的大滑坡, 当时即进行了削坡和喷锚支护等处理。高边坡 F_{59} 断层内共布置了多点位移计 12 个, F_{59} 断层的上盘布置有 5 个垂直位移监测点 (GC-P1~GC-P5), 分布于高程 215.0~260.0 m 平台上, 每个月测一次。监测资料序列为 1995 年 8 月 8 日~2003 年 12 月 21 日。垂直位移测值以下沉为正, 上抬为负。从实测资料看, 边坡变形尚未稳定, 因此, 有必要根据资料序列对边坡的变形进行预测监控。

3.2 模型建立

下面以 F₅₉ 断层垂直位移 GC - P4 测点为例进行分析预测并用 2003 年 9~12 月测点位移值与实际测值进行比较。由式(5)可得 GC - P4 测点的垂直位移统计模型, 即

$$\delta(t) = -3.0401 + 0.38327\theta + 35.155\ln\theta - 0.058367U_4 + 1.1273\cos\frac{2\pi it}{365} \quad (10)$$

由式(10)可知, GC - P4 测点垂直位移有发展趋势, 经削坡和喷锚支护等处理后, 边坡变形与前期 4~7 d 的降雨过程有关。若考虑参数的时变性, 则式(6)变为

$$\delta(t) = -3.0401 + 0.383027\beta_1(t)\theta + 35.1555\beta_2(t)\ln\theta - 0.0580367\beta_3(t)U_4 + 1.1273\beta_4(t)\cos\frac{2\pi it}{365} \quad (11)$$

根据式(6)~(8)可计算得时变参数估值序列 {β_i(t)}, 用 AR 模型递推法, 建立时变参数演变规律模型 {β_i(t)}。利用时变参数演变规律模型由式(9)即可计算得在相应时间和环境量作用下测点的垂直位移预测值。表 1 为常规回归模型和多因素时变模型的预测结果。由表 1 可知, 多因素时变模型的预测结果比常规回归模型更接近实测值, 但随着预测时段的延长, 预测值的误差也相应增加。图 1 为高边坡变形监测布置图, 图 2 为实测值与多因素时变模型以及常规回归模型比较曲线。

表1 模型的预测结果比较

Table 1 Comparison between observational and forecasting deformations				mm
日期/年 - 月 - 日	实测值	常规回归模型	多因素时变模型	
2003 - 09 - 23	38.86	36.276	38.218	
2003 - 10 - 21	39.00	36.356	38.432	
2003 - 11 - 21	39.30	36.148	40.591	
2003 - 12 - 21	40.00	36.030	42.422	

4 结 语

影响边坡变形和稳定的因素是随时间变化的, 其预测模型的参数应反映这些影响因素的时变特

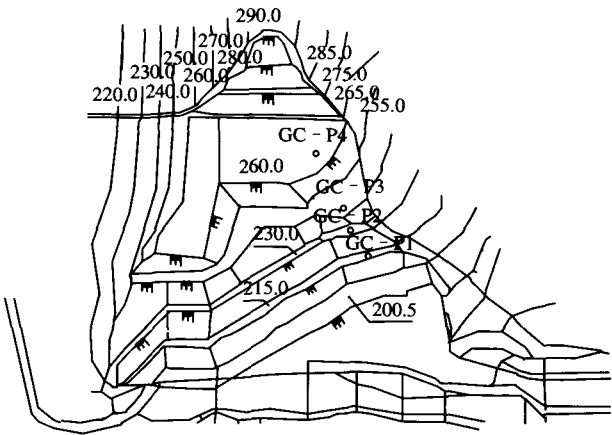


图 1 高边坡变形监测布置图(单位: m)

Fig.1 Layout of high slope deformation monitoring(unit: m)

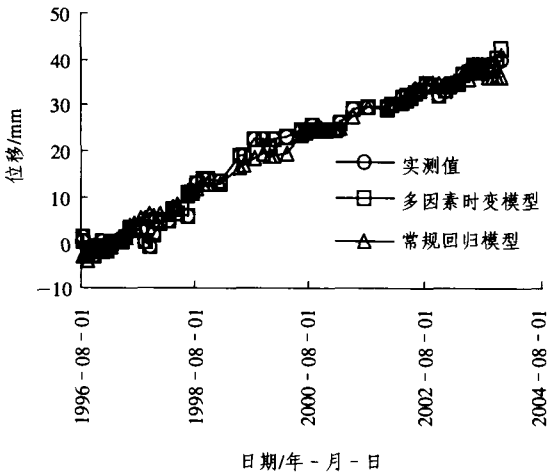


图 2 实测位移与预测位移的比较

Fig.2 Relationship between the monitoring and forecasting data

性。回归分析中, 回归系数反映了因子与预测量之间以及因子与因子之间的相关程度, 可分析各影响因素对边坡变形和稳定的影响效应但没有反映系统的时变特点。通过融合常规回归模型和时间序列递推模型的优势, 结合边坡变形影响因素因子模式的分析, 可使模型既具有时变特性又可以反映影响因素对预测量的内在本质联系, 从而提高模型的预测能力。由此建立的多因素时变预测模型将具有较好的预测边坡变形和监控边坡稳定的能力。

参考文献(References):

[1] 董建国, 赵锡宏. 高层建筑地基基础——共同作用理论与实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. (Dong Jianguo, Zhao Xihong. High-rise Foundation Ground—together Action Theory and Application[M].

- Shanghai: Tongji University Press, 1997.(in Chinese))
- [2] Chow Y K. Analysis of vertically loaded pile groups[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1986, 10: 59 - 72.
 - [3] 刘汉东. 边坡位移矢量场与失稳时预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 111 - 116.(Liu Handong. Testing study of displacement vector field and forecasting occurrence of slope failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 111 - 116.(in Chinese))
 - [4] 文海家, 张永兴, 柳源. 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.(Wen Haijia, Zhang Yongxing, Liu Yuan. A home and abroad investigative tendency of landslide forecast[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(1): 1 - 4.(in Chinese))
 - [5] 杨志法, 陈剑. 关于滑坡预测预报方法的思考[J]. 工程地质学报, 2004, 12(2): 118 - 123.(Yang Zhifa, Chen Jian. Thoughts on the prediction or forecast of landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(2): 118 - 123.(in Chinese))
 - [6] 靳晓光, 李晓红. 边坡变形模拟预测的普适灰色模型[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(2): 52 - 57.(Jin Xiaoguang, Li Xiaohong. General adequate grey model of modeling forecasting of slope deformation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2001, 12(2): 52 - 57.(in Chinese))
 - [7] 蒋刚, 林鲁生, 刘祖德, 等. 边坡变形的灰色预测模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 244 - 246.(Jiang gang, Lin Lusheng, Liu Zhude, et al. Prediction grey model for slope displacement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 244 - 246.(in Chinese))
 - [8] 高玮, 冯夏庭. 基于灰色 - 进化神经网络的滑坡变形预测研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 514 - 517.(Gao Wei, Feng Xiating. Study on displacement predication of landslide based on grey system and evolutionary neural network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4): 514 - 517.(in Chinese))
 - [9] 唐天国, 万星, 刘浩吾. 高边坡安全监测的改进 GM 模型预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 307 - 312.(Tang Tianguo, Wan Xing, Liu Haowu. Improved GM model for safety monitoring of high rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 307 - 312.(in Chinese))
 - [10] 黄志全, 崔江利, 刘汉东. 边坡稳定性预测的混沌神经网络方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3 808 - 3 812.(Huang Zhiquan, Cui Jiangli, Liu Handong. Chaotic neural network method for slope stability prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3 808 - 3 812.(in Chinese))
 - [11] 吕金虎, 陈益峰, 张锁春. 基于自适应神经网络的边坡位移预测[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(12): 124 - 129.(Lu Jinhu, Chen Yifeng, Zhang Suochun. Slope displacement forecast based on adaptive neural network[J]. Systems Engineering - Theory and Practice, 2001, 21(12): 124 - 129.(in Chinese))
 - [12] 杨成祥, 冯夏庭, 刘红亮, 等. 非线性位移时间序列分析模型的进化识别[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2004, 25(5): 497 - 500.(Yang Chengxiang, Feng Xiating, Liu Hongliang, et al. Evolutionary identification of analysis model for nonlinear displacement time series[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2004, 25(5): 497 - 500.(in Chinese))
 - [13] 单新建, 叶洪, 李焯芬, 等. 基于环境因子 AI-GIS 方法的天然滑坡危险性预测[J]. 地质科技情报, 2004, 23(3): 109 - 112.(Shan Xinjian, Ye Hong, Lee C F, et al. Prediction of regional landslide danger areas using AI-GIS based on environment factors: an example of Lantau island, Hong Kong[J]. Geological Science and Technology Information, 2004, 23(3): 109 - 112.(in Chinese))
 - [14] 李邵军, 冯夏庭, 杨成祥, 等. 基于三维地理信息的滑坡监测及变形预测智能分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 673 - 3 678.(Li Shaojun, Feng Xiating, Yang Chengxiang, et al. Landslide monitoring and intelligent analysis on deformation prediction based on three-dimensional geographic information[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 673 - 3 678.(in Chinese))
 - [15] 周创兵, 陈益峰. 基于相空间重构的边坡位移预测[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 205 - 208.(Zhou Chuangbing, Chen Yifeng. Application of phase space reconstruction in slope displacement forecasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 205 - 208.(in Chinese))
 - [16] 曾开华, 张忠坤, 吴九红. 分形在边坡预测中的应用[J]. 地下空间, 1999, 19(1): 35 - 39.(Zeng Kaihua, Zhang Zhongkun, Wu Jiuhong. Application of fractal theory in slope prediction[J]. Underground Space, 1999, 19(1): 35 - 39.(in Chinese))
 - [17] 徐梁, 陈有亮, 张福波. 岩体边坡滑移的系统学预报研究[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, 10(3): 259 - 263.(Xu Liang, Chen Youliang, Zhang Fubo. Application of systematological theory to landslide prediction[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2004, 10(3): 259 - 263.(in Chinese))
 - [18] Ayalew L. The effect of seasonal rainfall on landslides in the highlands of Ethiopia[J]. Bull Eng. Geol. Env., 1999, 58: 9 - 19.
 - [19] 刘小伟, 刘高, 谌文武, 等. 降雨对边坡变形破坏影响的综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 2): 2 715 - 2 718.(Liu Xiaowei, Liu Gao, Chen Wenwu, et al. Analysis of rainfall influence on slope deformation and failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.2): 2 715 - 2 718.(in Chinese))
 - [20] Brand E W, Premchitt J, Philipson H B. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong[A]. In: Proc. 4th Int. Symp. Landslides[C]. Toronto: [s. n.], 1984. 377 - 384.
 - [21] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.(Wu Zhongru. Safety Monitoring Theory of Hydraulic Structures and Its Application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.(in Chinese))
 - [22] 李邦宪. 动态系统预测的递推方法[M]. 北京: 气象出版社, 1996.(Li Bangxian. Multilayer Recursion Method of Dynamic System Forecasting[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1996.(in Chinese))