

文章编号:1000-582X(2002)10-0152-04

# 山体滑坡滑移灾害的灰色系统预测分析\*

魏作安<sup>1,3</sup>, 尹光志<sup>1,2</sup>, 万玲<sup>1</sup>, 张东明<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400044;

2. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;

3. 南昌有色冶金设计研究院, 南昌 330002)

**摘要:**在综合分析蔗头山中段十年来山体滑坡滑移, 呈明显季节性的滑动规律的特征等, 以及滑坡监测数据的基础上, 取滑坡的滑移量  $s$  等于 150 mm 作为阈值  $\xi$ , 利用灰色系统预测 GM(1, 1) 模型, 对该滑坡的滑移量超过阈值  $\xi$ 、可能发生滑坡灾害的年限进行灾变预测, 预测结果显示与实际情况非常吻合。同时, 预测在 2002 年、2004 年和 2007 年该滑坡可能发生灾害险情, 应密切注意。

**关键词:**滑坡; 灰色理论; 预测

**中图分类号:** TU457

**文献标识码:** A

据有关资料统计显示, 滑坡灾害已成为威胁人类生存的主要自然灾害之一<sup>[1]</sup>。所以对滑坡灾害的防治显得尤其重要, 我国专门颁布了灾害防治法。就目前而言, 从技术和经济等方面综合考虑, 有些滑坡灾害是可以治理的或是必须治理的, 像长江的链子岩滑坡; 有些是治理不了的, 像蔗头山中段滑坡等, 对这些滑坡灾害只有采取监测, 对监测数据进行处理, 根据处理结果及时进行预测预报, 将灾害损失尽可能减少到最小。对滑坡灾害的监测手段很多, 仪器也很先进, 像 GPS 监测系统<sup>[2]</sup>等; 对监测获取的数据处理和预测预报方法, 目前也很多, 像经验公式法、线性回归分析法、因子叠加法、综合指标法<sup>[3]</sup>等, 但因影响滑坡滑移和灾变的因素多样性、复杂性和随机性, 使得预测结果的可靠性不高。为此, 近年来一些研究人员探索采用模糊数学和灰色理论等非线性预测方法来预测滑坡的滑移和灾变, 在实际应用中取得了较好的效果。尤其是灰色系统理论, 它特别适应于那些系统模型不明确、行为信息不完全、运行机制不清楚的系统, 很适合从与时间有关的离乱监测数据中获取事物的变化发展规律性。文章利用灰色系统预测 GM(1, 1) 模型, 根据多年监测获取的数据, 对蔗头山中段山体滑坡的滑移灾变进行预测分析, 结果显示与实际情况非常吻合, 可用于指导该滑坡灾害的预测预防。

## 1 山体滑坡概况

蔗头山自然山体潜在滑坡位于潘田盆地西南坡的

中段, 是一坡向为 NE, 走向为 NW 的单斜地形。该地区的水文、工程地质条件和区域地质构造特征表明, 该地区是一个滑坡易发、多发的自然灾害区。1990 年 5~6 月在几次大暴雨和邻近一次 5.6 级的地震的共同诱发作用下, 使得山体自标高 930~1 070 m 之间, 产生一条宽 400 m, 总长 600 m, 且基本对称的马蹄形张裂缝, 形成了一个潜在滑塌方量为 300 万  $m^3$  左右的滑坡体。由于滑坡体的下方有一个露天采矿场和一个有数百户居民的村庄, 所以滑坡灾害一出现, 立即引起有关部门的重视, 成立了滑坡灾害防治机构, 并建立了滑坡滑移监测网, 由专人负责进行监测工作。同时, 制定了一个以加强监测为基础, 实行预测预报, 一旦出现险情, 人员立刻撤离, 尽可能地将灾害损失减少到最低程度的减灾防灾方案。因此, 为了确保预测预报的准确性, 在实际的滑坡滑移灾变预测计算分析中, 采用了多种方法, 结果发现采用灰色系统模型的预测结果与现实情况比较吻合。

## 2 影响边坡稳定性的因素分析

滑坡工程实践证明, 影响边坡稳定性的因素是相当复杂的, 总体上分为地质因素和非地质因素两类, 前者是滑坡发生的地质基础或物质基础条件, 后者则为滑坡的发生提供了外力因素或触发条件<sup>[4]</sup>。就蔗头山边坡而言, 影响其稳定的主要因素有 2 个, 即岩土介质强度低和大气降雨。

\* 收稿日期: 2002-06-20

基金项目: 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目和重庆市科委项目(编号: 2000-6257)

作者简介: 魏作安(1965-), 男, 江西南昌人, 博士生, 高级工程师。主要从事滑坡灾害及岩土工程的研究。

2.1 岩土介质对边坡稳定性的影响分析

岩土介质的物理力学强度因素属于地质因素，也

是决定边坡是否稳定的关键因素。组成该边坡的岩土介质抗剪强度试验数据统计结果见如表 1。

表 1 岩土介质的抗剪强度试验数据统计结果

序号	岩土状态	强风化粉砂岩		洪坡积土层	
		粘结力/kg·cm <sup>2</sup>	内摩擦角/(°)	粘结力/kg·cm <sup>2</sup>	内摩擦角/(°)
1	天然状态值	17	27	39	22
2	饱和状态值	15	21	27	18
3	天然状态残余值	0	15.5	16	16

从表 1 可以看出，岩土介质的抗剪强度不但低而且波动很大。如强风化粉砂岩，其天然状态下的抗剪强度的残余值与峰值相比，粘结力降低了 100%，内摩擦角降低了 42.6%；同时，饱和状态与天然状态相比，粘结力降低了 11.76%，内摩擦角降低了 28.57%；洪坡积土层亦是如此。

表 2 为组成边坡岩土介质的含水量，从该表中可以看出，岩土体天然状态下的含水量与饱和状态的含水量相差较小，饱和度均在 80% 以上，有的达到 93.7%，所以从含水量上分析，组成边坡的岩土体只要稍微有水体补给就很容易达到饱和状态，而土体一旦达到饱和状态，其抗剪强度就会显著下降，造成边坡失稳。

表 2 组成边坡岩土介质的含水量

项目名称	洪坡积土层	残积土层	强风化砂岩
天然状态含水量	30	41	30
饱和状态含水量	35	49	32
两者差值	+5	+8	+2
饱和度/%	85.7	83.7	93.8

2.2 大气降雨对边坡的稳定性影响分析

从山体滑坡发生、发展的过程可以看出，大气降雨对边坡失稳破坏起到了一个诱发和“催化”作用。边坡先是在大暴雨的诱发作用下发生破坏失稳，形成初期的马蹄形裂缝，随着继续降雨，雨水沿着滑体裂缝的灌入，地下水位的抬高，滑坡体不断恶化，滑移量不断增加。同时，经过监测（结果见表 3），发现降雨一旦停止，则边坡就处于稳定状态。所以该滑坡具有：大雨大滑动，小雨小滑动，没有雨就不滑动，呈明显的季节性的滑动规律。

表 3 1995 年边坡主要监测点的监测结果

月 份	降雨量/mm	监测点 1#	位移量/mm 2#
1	47	0	0
2	101	0	0
3	169	18	4
4	85	8	3
5	175	10	6
6	298	35	31
7	220	50	26
8	304	120	107
9	34	4	9
10	10	0	3
11	13	5	2
12	27	0	0

3 灰色系统 GM(1,1)模型和滑坡预测分析

3.1 灰色系统 GM(1,1)模型

灰色系统 GM(1,1)模型的原理和计算过程为<sup>[5]</sup>：

设有原始数列

$$x^{(0)}(t) = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$$

按式(1)

$$x^{(0)}(t) = x_d^{(0)}(t) + x_w^{(0)}(t) \quad (1)$$

对  $x^{(0)}(t)$  作一次累加，得生成数列

$$x^{(1)}(k) = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$$

$x^{(1)}(k)$  的 GM(1,1) 模型白化形式的微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (2)$$

其中  $a, u$  为待定参数，将(2)式离散化，即得

$$\Delta^{(1)}(x^{(1)}(k+1)) + a\Psi^{(1)}(k+1) = u \quad (3)$$

式中， $\Delta^{(1)}(x^{(1)}(k+1))$  为  $x^{(1)}$  在  $k+1$  时刻的累减生成序列； $\Psi^{(1)}(k+1)$  为  $\frac{dx^{(1)}}{dt}$  在  $k+1$  时刻的背景值。

因为

$$\begin{aligned} \Delta^{(1)}(x^{(1)}(k+1)) &= x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k) = \\ &= x^{(1)}(k) + x^{(0)}(k+1) - x^{(1)}(k) = \\ &= x^{(0)}(k+1) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Psi^{(1)}(k+1) = \frac{1}{2}(x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k+1)) \quad (5)$$

将式(4)式(5)代入式(3)，得

$$x^{(0)}(k+1) = a \left[ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k+1)) \right] + u \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} x^{(0)}(2) &= a \left[ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) \right] + u, k = 1 \\ x^{(0)}(3) &= a \left[ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) \right] + u, k = 1 \\ &\vdots \\ x^{(0)}(n) &= a \left[ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)) \right] + u, \\ &k = n - 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

令  $y_n = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$ ,

$$\Psi = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) \\ \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)) \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

则式(7)可改写为

$$y_N = a\Psi + uE = [\Psi : E] \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = [\Psi : E] \hat{a} \quad (8)$$

令  $B = [\Psi : E], \hat{a} = [a, u]^T,$

$$\text{则有 } B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

于是(8)式改写为

$$y_N = B\hat{a} \quad (10)$$

式中参数向量  $\hat{a} = [a, u]^T$  可用最小二乘法求取,即

$$\hat{a} = [B^T B]^{-1} B^T y_N \quad (11)$$

将  $\hat{a} = [a, u]^T$  代入(1-2)式进行求解,即

$$\frac{dx}{dt} + ax = u, (a \neq 0, u \neq 0)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \left( x - \frac{u}{a} \right)$$

求解得微分方程得

$$x - \frac{u}{a} = c_0 e^{-at} \quad (12)$$

当  $t = t_0$  时,  $x(t_0) = x^{(0)}(1),$

$$\text{则 } c_0 = \left( x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right) e^a \quad (13)$$

将式(13)代入式(12),得时间响应函数为

$$\hat{x}(t) = \left[ \left( x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right) e^{a_0} \right] e^{-at} + \frac{u}{a}$$

当  $t = t_0$  时,  $t_0 = 0,$

$$\text{则 } \hat{x}(t) = \left( x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right) e^{-at} + \frac{u}{a}$$

当  $t = t + 1, x(t) = x(t + 1),$  即对于一次累加生成数列  $x^{(1)}(k),$  则有

$$\hat{x}^{(1)}(k + 1) = \left( x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right) e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (14)$$

式对(14)求导数,得还原模型为

$$\hat{x}^{(0)}(k + 1) = (-a) \left( x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right) e^{-ak} \quad (15)$$

式(14),式(15)称为 GM(1,1) 模型的时间响应函数模型,是 GM(1,1) 模型灰色预测的具体计算公式。

### 3.2 灰色系统模型预测与分析

蔗头山中段滑坡近十年滑移的监测(2\* 点)结果如表4所示。从表4中的数据 and 图1中的曲线可以看出,滑坡的滑移量起伏波动很大,说明数据很离散,如果按该数据以预测滑移量作为目标,则结果不会很理想,这方面相关资料有说明。而且实际所想要得到的结果是时间预测预报,是预报什么时候即哪年可能会发生大的滑动,产生滑坡灾害,以便提前作好防灾准备。基于这一目的,所以采用灰色系统的灾变预测,预测滑坡灾害发生的时间,即可能发生灾害的具体年份,这样效果更好,更有现实意义。

表4 滑坡滑移的(2\* 点)监测结果

时间(年)	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
实测结果	64	183	57	130	191	185	465	159	140	187	123

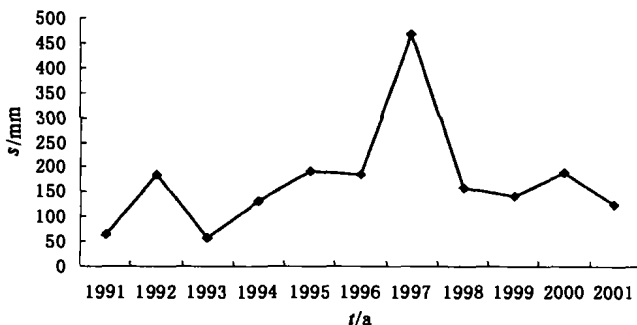


图1 滑坡滑移的监测结果曲线

按照灰色系统的灾变预测原理,先取一个阈值  $\mathcal{L}$ 。根据监测数据和常规经验,取

$$\mathcal{L} = 150 \text{ mm}$$

即认为滑坡体的年滑移量值大于 150 mm,则滑坡就有可能发生险情,就应该引起重视,提前作好防治准备。

从表4中可以看出,符合上述条件的年份有6个,它们分别是 {1992(183), 1995(190), 1996(185), 1997(465), 1998(159), 2000(187)}, 将其按顺序组成一列数列,即得

$$x^{(0)}(t) = \{2, 5, 6, 7, 8, 10\}$$

把它代入上述灰色系统 GM(1,1) 模型的计算公式,则可以求出有关参数和关系函数。

其中,离散时间响应函数为

$$\hat{x}^{(1)}(k + 1) = 26.798e^{0.1698k} - 24.798 \quad (16)$$

$$\text{或为 } \hat{x}^{(0)}(k + 1) = 4.5503e^{0.1698k} \quad (17)$$

计算结果见表5。

表 5 滑坡发生灾变的预测结果

序号	原始值	预测值	残差	误差
1	2	2	0	0
2	5	5.392	-0.392	-0.078 6
3	6	6.391	-0.391	-0.065 2
4	7	7.574	-0.574	-0.082 0
5	8	8.976	-0.976	-0.122 0
6	10	10.638	-0.638	-0.063 8
7		12.608		
8		14.941		
9		17.707		

对模型精度进行检验,其后验差比值

$$C = 0.1186 < 0.35$$

平均误差为 1.06%,小误差频率  $P > 0.95$ ,模型预测精度等级为好,可以用于滑坡灾变的预测。

按照该模型进行预测,结果显示(见表 5),将来发生滑坡滑移量大于 150 mm,即滑坡可能发生灾变的年份分别是:2002 年,2004 年和 2007 年。因此,在这些年份应该特别注意,加强现场监测,提前作好防灾和减灾的准备工作。

#### 4 结 语

从上面的预测结果可以看出,用灰色系统 GM(1,1)模型进行滑坡灾害的灾变预测,比单纯预测滑坡的滑移量等数据效果更好,精度亦很高,更有现实意义。同时,预测的结果与实际情况较吻合,可以作为对该滑

坡进行防治的依据。滑坡灾害的预测也是滑坡灾害防治的一种有效手段<sup>[6]</sup>。它包括滑坡发生地点的空间预报和滑坡发生时间的预报两个方面<sup>[7]</sup>。在目前的技术和经济条件下,很多滑坡灾害只有通过及时准确的预测预报来减轻灾害的损失。根据现实情况检验,利用灰色系统理论来预测预报滑坡灾害的发生发展,准确性更高,可靠度更好。

致谢:在本文的写作过程中,得到了许庆达教授级高级工程师的帮助,在此表示感谢!

#### 参考文献:

- [1] 杨达源, 阎国年. 自然灾害学[M]. 北京: 测绘出版社, 1993.
- [2] 马永潮. 滑坡整治及防治工程养护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- [3] 慎乃齐, 扬建伟. 基于神经网络的采空塌陷预测[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(3): 42-43.
- [4] 岩土工程手册编委. 岩土工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [5] 袁嘉祖. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [6] 魏作安, 金小萍. 福建蕉头山北段滑坡灾害成因分析及防治[J]. 工程地质学报, 2000, 8(增刊): 94-96.
- [7] 铁道部科学研究院西北研究所编. 滑坡防治[M]. 北京: 人民铁道出版社, 1977.

## Forecast and Analysis of Grey System in the Landslide Disaster

WEI Zuo-an<sup>1,3</sup>, YIN Guang-zhi<sup>1,2</sup>, WAN Lin<sup>1</sup>, ZHANG Dong-ming<sup>1,2</sup>

(1. College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. The Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resources & the Environmental Hazards Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. Nanchang Engineering & Research Institute of Non-ferrous Metal, Nanchang 330002, China)

**Abstract:** The forecast of landslide is always an important method for controlling landslide disaster. Based on synthetic analysis of the slippage characters and supervise data of the landslide at the middle part mountain of Zhe tou shan within ten years, it is show shows the slippage is closely relative to rain. A slippage value 155 mm is chose as a valve value  $\lambda$ , the Grey Model GM(1,1) is used to forecast what time the slippage value will exceed the valve value  $\lambda$  and when the disaster of slope slide e take place. The result is very suitable to the fact. At the same time, the result shows that the landslide disaster forecasted will probable take place in 2002, 2004 and 2007.

**Key words:** landslide; grey theory; forecast

(责任编辑 姚 飞)