

文章编号: 1008-2786-(2007)5-741-06

# 灰色 GM (1, 1)残差修正模型在滑坡预测中的对比应用

李秀珍<sup>1, 2</sup>, 孔纪名<sup>2\*</sup>, 王成华<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:** 在传统 GM (1, 1)模型的基础上, 经过不同方式的残差修正, 分别建立了一阶残差修正 GM (1, 1)模型和二阶残差修正 GM (1, 1)模型。根据滑坡的监测资料, 对变形曲线为光滑型滑坡 (如黄龙西村滑坡、某滑坡) 和阶跃型滑坡 (如新滩滑坡、洒勒山新滑坡) 分别建立了传统 GM (1, 1)模型和一阶、二阶残差修正模型, 并对不同滑坡各模型的预测精度进行了分析比较。结果表明, 残差修正 GM (1, 1)模型的预测精度明显高于传统 GM (1, 1)模型的预测精度。对变形曲线为光滑型的滑坡, 二阶残差修正 GM (1, 1)模型的预测精度一般高于一阶残差修正 GM (1, 1)模型的预测精度; 对变形曲线为阶跃型的滑坡, 一阶残差修正 GM (1, 1)模型的预测精度高于二阶残差修正 GM (1, 1)模型的预测精度。

**关键词:** 传统 GM (1, 1)模型; 一阶残差修正 GM (1, 1)模型; 二阶残差修正 GM (1, 1)模型; 滑坡预测

**中图分类号:** P642.22

**文献标识码:** A

灰色系统理论是研究灰色系统分析、建模、预测、决策和控制的理论, 是我国著名学者邓聚龙教授于 1982年创立的一门新兴学科<sup>[1]</sup>。它把一般系统论、信息论、控制论的观点和方法延伸到社会、经济、生态等抽象系统, 结合运用数学方法, 发展了一套解决信息不完备系统即灰色系统的理论和方法。在短短 20余年的时间里, 灰色系统理论有了飞速的发展, 已在自然科学和社会科学的许多领域得到了日益广泛而深入的应用, 并取得了一系列重要成果<sup>[1-7]</sup>。以 GM (1, 1)模型为代表, 因其所需样本量少、计算简单等优点, 已被广泛应用于社会、经济、生态、农业、水文等各个领域<sup>[2-7]</sup>。为了提高 GM (1, 1)模型的预测精度, 人们提出了多种改进和优化方法<sup>[4-7]</sup>。本文采用两种残差修正方法对传统 GM (1, 1)模型进行修正, 并将其运用于变形曲线为光滑型滑坡 (如黄龙西村滑坡、某滑坡) 和阶跃型滑坡

(如新滩滑坡、洒勒山新滑坡) 的变形预测。实例验证分析表明, 残差修正模型的预测精度明显高于传统 GM (1, 1)模型的预测精度, 一阶、二阶残差修正模型的预测精度与滑坡的变形特性有关。对变形曲线为光滑型的滑坡, 二阶残差修正 GM (1, 1)模型的预测精度一般高于一阶残差修正 GM (1, 1)模型的预测精度; 对变形曲线为阶跃型的滑坡, 一阶残差修正 GM (1, 1)模型的预测精度一般高于二阶残差修正 GM (1, 1)模型的预测精度。

## 1 传统 GM (1, 1)模型

基本原理如下:

设滑坡等间隔位移监测数据序列为  $X^{(0)}$

$$X^{(0)} = \{X_{(1)}^{(0)}, X_{(2)}^{(0)}, \dots, X_{(k)}^{(0)}, \dots, X_{(n)}^{(0)}\}$$

式中  $k$  为时间序号;  $n$  为监测数据的总个数;  $X_{(k)}^{(0)}$

收稿日期 (Received date): 2007-04-11; 改回日期 (Accepted): 2007-07-05.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (50639070) 和中国科学院成都山地灾害与环境研究所青年种子基金 (1100001071) 资助。[National Natural Science Foundation of China No. 50639070; Youth Seed Fund of Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment]

作者简介 (Biography): 李秀珍 (1975-), 女 (汉族), 内蒙古乌盟人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事滑坡预测预报及防治技术研究。[Li Xiuzhen (1975-), female Assistant researcher majoring in landslide predicting and controlling]

\* 通讯作者 Corresponding author Kong Jinming Tel: 028-85227709, Email: jming@imde.ac.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

为第  $k$  个位移监测数据。

对  $X^{(0)}$  作一次累加生成 (AGO) 变换, 得

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

式中  $X_{(k)}^{(1)}$  为第  $k$  个监测数据的一次累加一成值。

以  $X^{(1)}$  拟合成一阶白化微分方程

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u \quad (1)$$

式中  $d$  为微分符号,  $t$  为时间变量,  $a$ ,  $u$  为待定系数, 可用最小二乘法求取, 计有

$$\hat{a} = [a, u]^T = [B^T B]^{-1} B^T Y_N \quad (2)$$

式中  $T$  为矩阵的转置符号;  $B$  为累加生成矩阵;  $Y_N$  为由原始监测数据构成的向量, 则

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

$$Y_N = [X_{(2)}^{(0)}, X_{(3)}^{(0)}, \dots, X_{(n)}^{(0)}]^T \quad (4)$$

将求得的待定系数代入式 (1) 解得微分方程的解为

$$\hat{X}_{(k)}^{(1)} = \left( X_{(1)}^{(0)} - \frac{u}{a} \right) e^{-a(k-1)} + \frac{u}{a} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中  $e$  为常数。对微分方程的解作一次累减生成, 即得还原序列  $\hat{X}_{(k)}^{(0)}$

$$\hat{X}_{(k)}^{(0)} = [X_{(1)}^{(0)} - \frac{u}{a}] (1 - e^{-a}) e^{-a(k-1)} \quad (6)$$

## 2 残差修正 GM (1, 1) 模型

为了有效地保证 GM (1, 1) 模型的预测精度, 可以用残差建立 GM (1, 1) 模型 (又称残差修正 GM (1, 1) 模型) 对原模型进行修正。本文采用两种残差修正模型, 一种是采用原始数据与 GM (1, 1) 模型预测值的残差作一次修正; 另一种是采用原始数据的一次累加生成值与 GM (1, 1) 模型白化微分方程的解之间的残差作一次修正, 其实质分别是一阶残差修正和二阶残差修正。

### 2.1 一阶残差修正 GM (1, 1) 模型

对原白化微分方程的解做一次累减生成后, 还原为  $\hat{X}_{(k)}^{(0)}$ , 建立一阶残差列为

$$E_{1(k)}^{(0)} = X_{(k)}^{(0)} - \hat{X}_{(k)}^{(0)}$$

对一阶残差列  $E_{1(k)}^{(0)}$  建立 GM (1, 1) 模型, 得到该模型

的解为

$$\hat{E}_{1(k+1)}^{(1)} = \left( E_{1(1)}^{(0)} - \frac{u_{e1}}{a_{e1}} \right) e^{-a_{e1}k} + \frac{u_{e1}}{a_{e1}} \quad (7)$$

式中  $E_{1(1)}^{(0)}$  为一阶残差序列的初始值,  $a_{e1}$ ,  $u_{e1}$  均为一阶残差修正 GM (1, 1) 模型中的待定系数, 其值与一样采用最小二乘法计算。

对原白化微分方程的解与残差列 GM (1, 1) 模型的解叠加得到修正后的解为

$$\hat{Y}_{1(k+1)}^{(1)} = \hat{X}_{(k+1)}^{(1)} + \hat{E}_{1(k+1)}^{(1)} \\ = \left( X_{(1)}^{(0)} - \frac{u}{a} \right) e^{-ak} + \left( E_{1(1)}^{(0)} - \frac{u_{e1}}{a_{e1}} \right) e^{-a_{e1}k} + \frac{u}{a} + \frac{u_{e1}}{a_{e1}} \quad (8)$$

对  $\hat{Y}_{1(k)}^{(1)}$  作一次累减生成, 得到还原值  $\hat{Y}_{1(k)}^{(0)}$ 。

### 2.2 二阶残差修正 GM (1, 1) 模型

对原始数据列作一次累加生成后, 与原白化微分方程的解建立残差列为

$$E_{2(k)}^{(1)} = X_{(k)}^{(1)} - \hat{X}_{(k)}^{(1)}$$

对二阶残差列  $E_{2(k)}^{(1)}$  建立 GM (1, 1) 模型, 得到该模型的解为

$$\hat{E}_{2(k+1)}^{(2)} = \left( E_{2(1)}^{(0)} - \frac{u_{e2}}{a_{e2}} \right) e^{-a_{e2}k} + \frac{u_{e2}}{a_{e2}} \quad (9)$$

式中  $E_{2(1)}^{(0)}$  为二阶残差序列的初始值;  $a_{e2}$ ,  $u_{e2}$  为二阶残差修正 GM (1, 1) 模型中的待定系数, 采用最小二乘法确定。

对  $\hat{E}_{2(k)}^{(2)}$  作一次累减生成, 还原为  $\hat{E}_{2(k)}^{(1)}$ , 再与原始白化微分方程的解  $\hat{X}_{(k)}^{(1)}$  叠加得到修正后的解  $\hat{Y}_{2(k)}^{(1)}$

$$\hat{Y}_{2(k+1)}^{(1)} = \hat{X}_{(k+1)}^{(1)} + \hat{E}_{2(k+1)}^{(1)} \\ = \left( X_{(1)}^{(0)} - \frac{u}{a} \right) e^{-ak} + \left( E_{2(1)}^{(0)} - \frac{u_{e2}}{a_{e2}} \right) e^{-a_{e2}k} + \frac{u}{a} + \frac{u_{e2}}{a_{e2}} \quad (10)$$

对  $\hat{Y}_{2(k)}^{(1)}$  作一次累减生成, 得到还原值  $\hat{Y}_{2(k)}^{(0)}$ 。

## 3 应用实例

### 3.1 变形曲线为光滑型滑坡

#### 1. 黄龙西村滑坡

根据文献<sup>[8]</sup>, 以黄龙西村滑坡发生前数日的位移监测资料为依据 (表 1), 运用前述灰色 GM (1, 1) 模型建模原理, 建立该滑坡的传统 GM (1, 1) 模型及其残差修正模型分别为:

传统 GM (1, 1) 模型:  $\hat{X}_{(k+1)}^{(1)} = 0.021e^{0.7539k} +$

0. 004(其中  $a = - 0. 7539$   $u = - 0. 0030$ )

一阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型:  $\hat{Y}_{1(k+1)}^{(1)} = 0. 021e^{0. 7539k} + 0. 0031e^{0. 8924k} + 0. 0008$ (其中  $a_{e1} = - 0. 8924$   $u_{e1} = 0. 0028$ )

二阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型:  $\hat{Y}_{2(k+1)}^{(1)} = 0. 021e^{0. 7539k} - 0. 0012e^{0. 9811k} + 0. 0052$ (其中  $a_{e2} = - 0. 9811$ ,  $u_{e2} = - 0. 0012$ )

表 1 黄龙西村滑坡位移监测资料<sup>[8]</sup>

Table 1 Displacement monitoring data for Huanglongxiun landslide

时间	1963- 09- 22	1963- 09- 23	1963- 09- 24	1963- 09- 25	1963- 09- 26	1963- 09- 27
位移 (m)	0. 025	0. 032	0. 055	0. 100	0. 300	0. 600

运用上述三个模型对该滑坡的位移值进行预测, 结果见图 1。

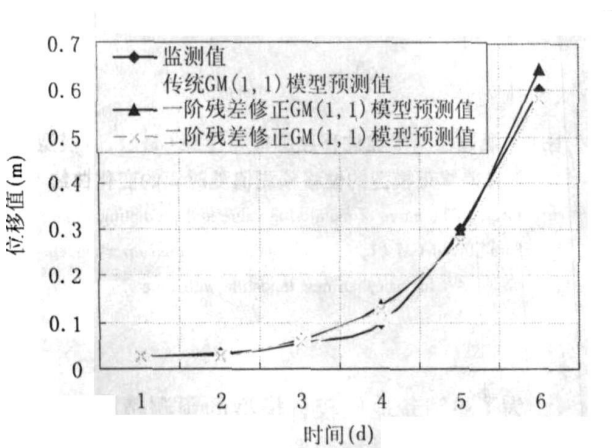


图 1 黄龙西村滑坡位移监测值和传统 GM ( 1, 1)模型及其残差修正模型的位移预测值随时间的变化曲线

Fig 1 The curve of monitoring value and predicting value of traditional GM ( 1, 1) and modified residual error models for Huanglongxiun landslide with time

2. 某滑坡

根据文献<sup>[9]</sup>, 以某滑坡的位移监测数据为依据(表 2), 建立该滑坡的传统 GM ( 1, 1)模型及其残差修正模型如下:

传统 GM ( 1, 1)模型:  $\hat{X}_{(k+1)}^{(1)} = 14. 9219e^{0. 3676k} - 8. 9219$ (其中  $a = - 0. 3676$   $u = 3. 2797$ )

一阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型:  $\hat{Y}_{1(k+1)}^{(1)} = 14. 9219e^{0. 3676k} + 0. 0049e^{0. 7297k} - 8. 9269$ (其中  $a_{e1} = - 0. 7297$   $u_{e1} = 0. 0036$ )

二阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型:  $\hat{Y}_{2(k+1)}^{(1)} = 14. 9219e^{0. 3676k} + 0. 3545e^{0. 4719k} - 9. 2765$ (其中  $a_{e2} = - 0. 4719$   $u_{e2} = 0. 1673$ )

运用各模型对该滑坡的位移进行预测, 结果如图 2所示。

表 2 某滑坡位移监测数据<sup>[9]</sup>

Table 2 Displacement monitoring data for some landslide

时间	1991- 06- 25	1991- 06- 26	1991- 06- 27	1991- 06- 28
位移 (m)	6	7	9. 4	14. 3

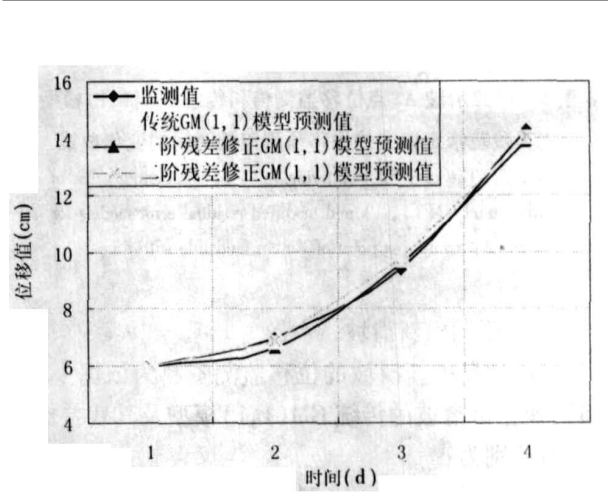


图 2 某滑坡位移监测值和传统 GM ( 1, 1)模型及其残差修正模型的位移预测值随时间的变化曲线

Fig 2 The curve of monitoring value and predicting value of traditional GM ( 1, 1) and modified residual error models for some landslide with time

3. 2 变形曲线为阶跃型滑坡

1. 新滩滑坡

以新滩滑坡 A<sub>3</sub> 测点 1979- 04至 1985- 01的监测资料为依据<sup>[8]</sup>(表 3)。运用上述灰色系统理论模型建模原理, 可建立新滩滑坡 A<sub>3</sub> 监测点的传统 GM ( 1, 1)模型及其残差修正模型分别为:

传统 GM ( 1, 1)模型:  $\hat{X}_{(k+1)}^{(1)} = 3. 7763e^{0. 1164k} - 3. 6993$ (其中  $a = - 0. 1164$   $u = 0. 4306$ )

一阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型:  $\hat{Y}_{1(k+1)}^{(1)} = 3. 7763e^{0. 1164k} - 0. 7584e^{0. 0654k} - 2. 9409$ (其中  $a_{e1} = -$

0.0654  $u_{e1} = -0.0496$ )

二阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型:  $\hat{Y}_{2(k+1)}^{(1)} = 3.7763e^{0.1164k} - 4.6148e^{0.0854k} + 0.9154$ (其中  $a_{e2} = -0.0854$   $u_{e2} = -0.3941$ )

运用上述三个模型对该滑坡 A<sub>3</sub> 点的位移值进行预测, 结果见图 3。

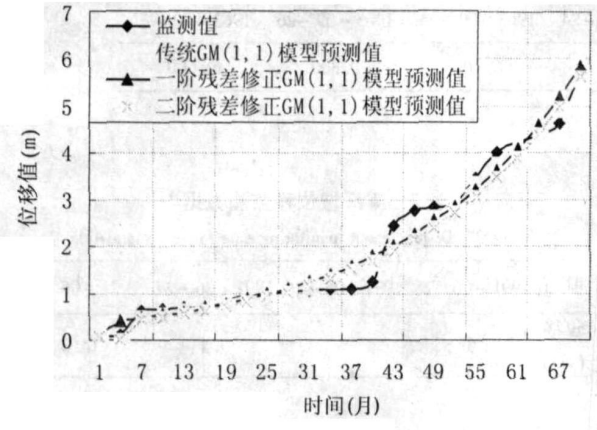


图 3 新滩滑坡 A<sub>3</sub> 点位移监测值和传统 GM ( 1, 1) 模型及其残差修正模型的位移预测值随时间的变化曲线  
Fig 3 The curve of monitoring value and predicting value of traditional GM ( 1, 1) and modified residual error models for A<sub>3</sub> monitoring point of Xintan landslide with time

2. 洒勒山新滑坡

以洒勒山新滑坡的位移监测资料为依据<sup>[8]</sup> (表 4), 建立该滑坡的传统 GM ( 1, 1) 模型及其残差修正模型分别为:

传统 GM ( 1, 1) 模型:  $\hat{X}_{(k+1)}^{(1)} = 0.1575e^{0.2739k} - 0.1095$ (其中  $a = -0.2739$   $u = 0.0300$ )

一阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型:  $\hat{Y}_{1(k+1)}^{(1)} = 0.1575e^{0.2739k} - 0.0334e^{0.1616k} - 0.0761$ (其中  $a_{e1} = -$

0.1616  $u_{e1} = -0.0054$ )

二阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型:  $\hat{Y}_{2(k+1)}^{(1)} = 0.1575e^{0.2739k} - 0.1466e^{0.1773k} + 0.0371$ (其中  $a_{e2} = -0.1773$   $u_{e2} = -0.0260$ )

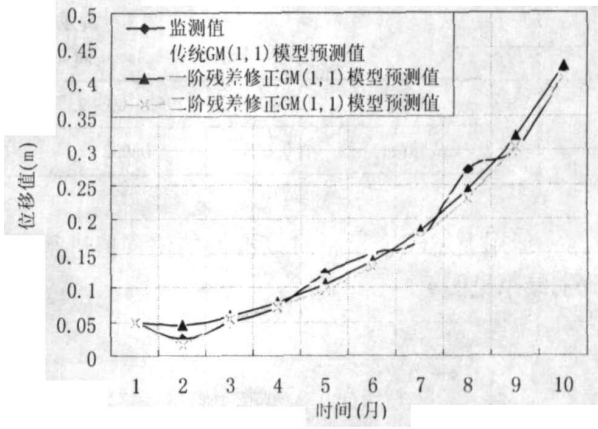


图 4 洒勒山新滑坡位移监测值和传统 GM ( 1, 1) 模型及其残差修正模型的位移预测值随时间的变化曲线  
Fig 4 The curve of monitoring value and predicting value of traditional GM ( 1, 1) and modified residual error models for Saleshan new landslide with time

为了更清楚地比较各模型的预测精度, 分别计算各模型在不同滑坡变形预测中的精度指标, 即计算各模型的残差平方和  $\sum u^2 = \sum (X - Y)^2$ 、相关指数  $R = \sqrt{1 - \frac{\sum (X - Y)^2}{\sum (X - \bar{X})^2}}$ 、剩余标准差  $S = \sqrt{\frac{\sum (X - Y)^2}{n - k - 1}}$  (其中,  $X$  为监测值,  $Y$  为预测值,  $k$  为因子个数), 结果见表 5。

表 3 新滩滑坡 A<sub>3</sub> 点监测资料<sup>[8]</sup>  
Table 3 Displacement monitoring data for A<sub>3</sub> point of Xintan landslide

时间	1979- 04- 01	1979- 07- 01	1979- 10- 01	1980- 01- 01	1980- 04- 01	1980- 07- 01	1980- 10- 01	1981- 01- 01
位移 (m)	0.077	0.092	0.615	0.65	0.69	0.738	0.846	0.962
时间	1981- 04- 01	1981- 07- 01	1981- 10- 01	1982- 01- 01	1982- 04- 01	1982- 07- 01	1982- 10- 01	1983- 01- 01
位移 (m)	1	1.03	1.061	1.077	1.1	1.23	2.46	2.754
时间	1983- 04- 01	1983- 07- 01	1983- 10- 01	1984- 01- 01	1984- 04- 01	1984- 07- 01	1984- 10- 01	1985- 01- 01
位移 (m)	2.83	2.92	3.46	4	4.23	4.38	4.615	5.77

表 4 洒勒山新滑坡位移监测资料<sup>[8]</sup>

Table 4 Displacement monitoring data for Saishan new landslide

时间	1985- 03	1985- 04	1985- 05	1985- 06	1985- 07
位移 ( m )	0. 048	0. 025	0. 048	0. 070	0. 120
时间	1985- 08	1985- 09	1985- 01	1985- 11	1985- 12
位移 ( m )	0. 150	0. 170	0. 270	0. 300	0. 410

表 5 各模型预测精度指标比较

Table 5 Comparing prediction accuracy indexes for each model in different landslide

滑坡变形 曲线类型	滑坡 名称	预测精度 指标	传统 GM ( 1, 1) 模型	一阶残差修正 GM ( 1, 1)模型	二阶残差修正 GM ( 1, 1)模型
光滑型	黄龙西村 滑坡	残差平方和 $\sum u^2$	0. 018 9	0. 003 1	0. 001 9
		剩余标准差 $S$	0. 068 7	0. 028 0	0. 022 1
		相关指数 $R$	0. 962 9	0. 993 9	0. 996 2
	某滑坡	残差平方和 $\sum u^2$	0. 391 0	0. 369 9	0. 180 7
		剩余标准差 $S$	0. 442 1	0. 430 1	0. 300 6
		相关指数 $R$	0. 995 2	0. 995 5	0. 997 8
阶跃型	新滩 滑坡	残差平方和 $\sum u^2$	2. 348 8	1. 963 6	2. 157 5
		剩余标准差 $S$	0. 326 7	0. 298 8	0. 313 2
		相关指数 $R$	0. 980 9	0. 984 0	0. 982 4
	洒勒山 新滑坡	残差平方和 $\sum u^2$	0. 004 6	0. 002 5	0. 003 0
		剩余标准差 $S$	0. 024 1	0. 017 6	0. 019 4
		相关指数 $R$	0. 984 1	0. 991 6	0. 989 7

从表 5 中可看出, 上述四个滑坡的一阶、二阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型的残差平方和、剩余标准差均小于相应的传统 GM ( 1, 1) 模型的残差平方和、剩余标准差, 而四个滑坡运用传统 GM ( 1, 1) 模型预测的相关指数均为最小。说明各滑坡的一阶、二阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型的预测精度均高于相应的传统 GM ( 1, 1) 模型的预测精度。对于变形曲线为光滑型的滑坡, 即黄龙西村滑坡和某滑坡, 二阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型的残差平方和、剩余标准差均小于一阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型, 而相关指数均高于一阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型。说明光滑型滑坡的二阶残差修正模型的预测精度高于一阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型。对于变形曲线为阶跃型的滑坡, 即新滩滑坡和洒勒山新滑坡, 正好与光滑型滑坡相反, 一阶残差修正模型的残差平方和、剩余标准差均小于二阶残差修正模型的残差平方和、剩余标准差, 而相关指数高于二阶残差修正模型。说明阶跃型滑坡的

一阶残差修正模型的预测精度高于二阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型。

4 结论

传统 GM ( 1, 1) 模型经过不同方式的残差修正后, 模型预测精度均有不同程度提高。一阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型与二阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型在滑坡变形预测预报中, 预测精度与滑坡的变形特性有关。通过对多个滑坡监测资料计算分析, 结果表明对变形曲线为光滑型 (如黄龙西村滑坡) 的滑坡, 二阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型的精度高于一阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型; 对变形曲线为阶跃型 (如新滩滑坡) 的滑坡, 一阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型的预测精度比二阶残差一阶残差修正 GM ( 1, 1) 模型的预测精度高。

## 参考文献 (References)

- [1] Deng Julong. Basic Methods of Grey System [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987. [邓聚龙. 灰色系统基本方法 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.]
- [2] 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): 51~55 [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): 51~55]
- [3] Wang Li, Zhang Shuangcheng, Li Yahong. Application of dynamic grey forecast model in dam deformation monitoring and forecast [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2005, 25(3): 328~332 [王利, 张双成, 李亚红. 动态灰色预测模型在大坝变形监测及预报中的应用研究 [J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(3): 328~332]
- [4] Li Xiaohong, Jin Xiaoguang, Kang Huiming et al. Application of GM (1, 1) Modified model to simulation-forecast of landslide [J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(3): 265~269 [李晓红, 靳晓光, 亢会明, 等. GM (1, 1) 优化模型在滑坡预测预报中的应用 [J]. 山地学报, 2001, 19(3): 265~269]
- [5] Xie Feng, Zhu Luming, Wang Lizhong. Modified grey system forecasting model and its application for analyzing information of landslide monitoring [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(22): 4099~4105 [谢峰, 朱陆明, 王立忠. 滑坡监控信息分析中的修正灰色系统预测模型及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4099~4105]
- [6] Qiu Shufang, Zhou Qihua, Wang Zewen. Improvement of GM (1, 1) model and its application on groundwater environments prediction [J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 2006, 29(2): 176~180 [邱淑芳, 周其华, 王泽文. 改进的 GM (1, 1) 模型及其在地下水环境预测中的应用 [J]. 东华理工学院学报, 2006, 29(2): 176~180]
- [7] Zhou Ning, Fu Heli, Guo Jianfeng et al. Correcting factor of gray with prediction model unequal interval time-varying parameters [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(6): 756~760 [周宁, 傅鹤林, 郭建峰, 等. 引入修正因子的非等距时变参数灰色预测模型及应用 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 756~760]
- [8] Li Tianbin, Chen Mingdong, Wang Lansheng. Landslide Real-time Tracking and Prediction [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1999 [李天斌, 陈明东, 王兰生. 滑坡实时跟踪预报 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999]
- [9] Lu Lishun, Zhu Haijun. Application of grey model in landslide time prediction [J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2001, 19(207): 50~52 [卢礼顺, 朱海军. 灰色模型在滑坡时间预测中的应用 [J]. 东北水利水电, 2001, 19(207): 50~52]

## Comparison and Application of Grey GM (1, 1) Modified Residual Error Models in Landslide Predicting

LIX Jizhen<sup>1,2</sup>, KONG Jiming<sup>2</sup>, WANG Chenghua<sup>2</sup>

(1. Civil Engineering College, Southwestern Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China)

**Abstract** Based on traditional grey GM (1, 1) model, first modified residual error GM (1, 1) model and second modified residual error GM (1, 1) model are established by different modified residual error ways. According to the monitoring data of Huanglongxian landslide, Xintan landslide, Saleshan new landslide and some landslide, traditional grey GM (1, 1) models, first and second modified residual error GM (1, 1) models for each landslide are established and prediction accuracy indexes of each model in different landslide are analyzed and compared. It is indicated that prediction accuracy of modified residual error models is much higher than traditional GM (1, 1) model. Second modified residual error GM (1, 1) model is higher than first modified residual error GM (1, 1) model for the landslide which has smooth deformation curve, such as Huanglongxian landslide; however, first modified residual error GM (1, 1) model is higher than second modified residual error GM (1, 1) model for the landslide which has step deformation curve, such as Xintan landslide.

**Key words** traditional grey GM (1, 1) model; first modified residual error GM (1, 1) model; second modified residual error GM (1, 1) model; landslide predicting