

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.02.02

背景值优化的多点灰色模型在滑坡变形预测中的应用

李世贵^{1,2}, 易庆林¹, 吴娟娟³, 杨巧佳¹, 胡大儒¹

(1. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;

2. 宜昌市测绘大队, 湖北 宜昌 443000; 3. 长江大学工程技术学院城市建设系, 湖北 荆州 434000)

摘要: 滑坡变形是一个高度复杂的非线性过程, 常用的单点灰色预测模型没有充分利用各变形监测点间的相关信息, 不足以反映滑坡整体的变形规律。多点灰色模型可以发挥相互影响的多个监测点间的整体积极作用, 从而更加完整和全面的反映坡体的变形状况。以三峡库区某滑坡为研究对象, 对布设在坡表的 6 个监测点进行聚类分析, 将彼此高度相关的 3 点纳入多点模型中。针对传统多点灰色模型在背景值取值方面存在的缺陷, 本文将基于背景值优化的多点灰色模型引入到滑坡变形预测中。计算结果表明, 与传统灰色模型相比, 背景值优化的多点灰色模型是解决贫信息条件下滑坡整体变形预测较理想的方法。

关键词: 滑坡; 变形预测; 聚类分析; 多点灰色模型; 背景值优化; 贫信息

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)02-0003-07

A multi-point model for background value optimization and its application to landslide deformation prediction

LI Shigui^{1,2}, YI Qinglin¹, WU Juanjuan³, YANG Qiaojia¹, HU Daru¹

(1. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Hubei province, Yichang, Hubei 443002, China;

2. Surveying and mapping team of Yichang, Hubei province, Yichang, Hubei 443000, China;

3. Yangtze University College of Engineering Technology, Hubei province, Jingzhou, Hubei 434000, China)

Abstract: Landslide deformation is a highly complex and nonlinear process. Single point forecasting models which is used frequently don't make full use of relevant information of each deformation monitoring points and can't reflect the integrated deformation regularity of landslide. Multi-gray model can play an integral positive role between a number of interacting monitoring points and reflect the slope of the deformation conditions more completely and comprehensively. Taking a landslide in the Three Gorges reservoir area for the study, six monitoring points on the surface of slope are analyzed by clustering, putting three points of highly correlated with each other into the multi-point model. In terms of the defect of background value in the traditional multi-point grey model, a multi-point model based on background value optimization be introduced into this paper. The results shows that, compared with the traditional gray model, the background value optimized gray model is ideal for solving the landslide overall deformation prediction under conditions of poor information.

Keywords: landslide; deformation prediction; clustering analysis; multi-point grey model; background value optimization; poor data information

收稿日期: 2013-12-13; 修订日期: 2014-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41104009); 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金资助项目(11-01-04)

第一作者: 李世贵(1985-), 男, 硕士研究生, 专业方向为防灾减灾及防护工程。E-mail: 546891311@qq.com

0 引言

20 世纪 80 年代以来,随着中国经济的腾飞,工程建设不断深入山区,规模逐渐增大,外加各种自然因素以及人为因素的影响,中国大型滑坡进入了一个新的活跃期,相继发生了 1982 年 7 月的重庆云阳鸡扒子滑坡、1985 年 6 月湖北秭归新滩滑坡、2003 年 7 月湖北秭归千将坪滑坡、2009 年 6 月重庆武隆鸡尾山滑坡以及 2013 年 1 月云南昭通山体滑坡等 30 余处特大型滑坡,给国民经济建设和社会发展造成重大损失^[1-2]。基于此,除了对潜在危险性滑坡进行全面治理外,最好的办法就是对滑坡灾害进行预测预报研究,进而减少灾区生命财产损失。

目前,基于滑坡地表位移监测数据的变形预测方法主要有:传统灰色预测法、生物生长法、回归分析、时间序列分析、小波分析、神经网络法、组合预测法等^[3-4]。但这些方法大多只针对单点乃至单方向的建模与预测研究。由于滑坡块体的时空特征明显,影响因素错综复杂,单点预测仅是对其进行局部变形研究,没有充分利用多个监测点间的关联信息,不足以反映整个块体的变形趋势和变形规律^[5-6]。而实际上,为了能准确的确定出滑坡的变形区域及变形规律,需要在滑坡体上布设多个观测点同时进行监测跟踪,在变形监测过程中同一块体上各监测点间彼此关联,相互影响。因此,很有必要建立符合滑坡块体变形趋势和规律的多点模型。文献[7]根据露天矿边坡各监测点的历史变形值,拟合出各个时刻的三维数学静态曲面模型,从而形成一个曲面模型集合,通过对该集合的参数序列进行预测来达到对模型序列的预测,进而可以对整个边坡实体变形进行预测,但运用该法拟合曲面时需要大量的监测点,而滑坡监测中往往仅布设有限的几个点,根本达不到三维拟合精度的要求。文献[8-9]将单点 GM(1,1)模型扩展为多点灰色模型,它可以从系统的角度反映和预测商住楼四个角点的沉降及围护桩桩体的水平位移状况。但传统的多点灰色模型中背景值的计算均采用紧邻均值法,当原始建模数据序列发生急剧阶跃时,模型预测效果不佳。

针对上述模型的缺陷,文献[10]从传统多点模型的白化微分方程解出发,采用非齐次指数函数重构背景值计算公式,得到优化的多点灰色模型,有效地提高了模型的模拟精度和预测精度。此优化模型是针对路基沉降的,预测的是小变形,作者将其引入到滑坡大变形监测领域,以期较好地解决滑坡整体位移预测的问题。

1 滑坡体上监测点聚类分析

滑坡体上布设有多个监测点,只有将彼此关联性较强的点纳入多点模型中才能有效地提高预测精度。在变形监测中,各监测点的关联性与之所处位置的地质环境和岩性结构相关。俗话说“物以类聚,人以群分”,显然,处在同一块体上的监测点,彼此之间的关联性要强于不在同一块体上的点。因此,多点预测首先要解决的问题是如何判断出哪些监测点处在同一块体上。尹晖^[11]、王穗辉^[8]等在研究危岩体沉降和深基坑围护结构变形中,运用灰关联度法成功解决监测点分类问题。但该法实际操作过于复杂,且未考虑滑坡区域滑移明显的特性^[12]。

最简单快捷的方法就是对监测序列进行相关性分析,根据以往经验,将相关系数值超过 0.90 的监测点划分在同一块体上^[7]。设 DX 、 DY 分别为随机变量 X 和 Y 的方差, $Cov(X, Y)$ 为协方差:

X 和 Y 的相关系数为

$$\rho_{XY} = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{DXDY}}, 0 \leq \rho_{XY} \leq 1 \quad (1)$$

2 背景值优化的多点灰色模型的建立

设某滑坡体有 n 个关联监测点,其 m 个周期的水平累计位移序列为 $\{x_i^{(0)}(k)\}$,经一次累加得 $x_i^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k x_i^{(0)}(j)$, 其中:

$(k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n)$ 。

考虑 n 个监测点相互关联和影响,对 $x_i^{(1)}(k)$ 建立 n 元一阶常微分方程组^[9,13]:

$$\begin{cases} \frac{dx_1^{(1)}}{dt} = a_{11}x_1^{(1)} + a_{12}x_2^{(1)} + \dots + a_{1n}x_n^{(1)} + b_1 \\ \frac{dx_2^{(1)}}{dt} = a_{21}x_1^{(1)} + a_{22}x_2^{(1)} + \dots + a_{2n}x_n^{(1)} + b_2 \\ \vdots \\ \frac{dx_n^{(1)}}{dt} = a_{n1}x_1^{(1)} + a_{n2}x_2^{(1)} + \dots + a_{nn}x_n^{(1)} + b_n \end{cases} \quad (2)$$

上式换成矩阵形式:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} = AX^{(1)} + B \quad (3)$$

$$A = (a_{ij})_{n \times n}, B = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$$

$$X^{(1)}(t) = [x_1^{(1)}(t), x_2^{(1)}(t), \dots, x_n^{(1)}(t)]^T.$$

式(3)的时间相应式^[9]:

$$X^{(1)}(t) = e^{At}(X^{(1)}(0) + A^{-1}B) - A^{-1}B \quad (4)$$

式(3)离散化可得^[14]:

$$X_i^{(0)}(k) = \sum_{j=1}^n a_{ij} z_i^{(1)}(k) + b_i \quad (5)$$

求取优化的背景值 $z_i^{(1)}(k)$ ^[10]

当 $x_i^{(0)}(k) \neq x_i^{(0)}(k-1)$ 时,有

$$z_i^{(1)}(k) = \frac{x_i^{(0)}(k)}{\ln \frac{x_i^{(0)}(k)}{x_i^{(0)}(k-1)}} + x_i^{(1)}(k) - \frac{(x_i^{(0)}(k))^2}{x_i^{(0)}(k) - x_i^{(0)}(k-1)} \quad (6)$$

当 $x_i^{(0)}(k) = x_i^{(0)}(k-1)$ 时,有

$$z_i^{(1)}(k) = 0.5x_i^{(1)}(k) + 0.5x_i^{(1)}(k-1) \quad (7)$$

($i=1,2,\dots,n; k=2,3,\dots,m$)。

由最小二乘法可求得模型参数 A 和 B 的估值

$$\hat{H} = (L^T L)^{-1} L^T Y \quad (8)$$

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} \hat{a}_{11} & \hat{a}_{21} & \cdots & \hat{a}_{n1} \\ \hat{a}_{12} & \hat{a}_{22} & \cdots & \hat{a}_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{a}_{1n} & \hat{a}_{2n} & \cdots & \hat{a}_{nn} \\ \hat{b}_1 & \hat{b}_2 & \cdots & \hat{b}_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$L = \begin{bmatrix} z_1^{(1)}(2) & z_2^{(1)}(2) & \cdots & z_n^{(1)}(2) & 1 \\ z_1^{(1)}(3) & z_2^{(1)}(3) & \cdots & z_n^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ z_1^{(1)}(m) & z_2^{(1)}(m) & \cdots & z_n^{(1)}(m) & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Y_i = [x_i^{(0)}(2), x_i^{(0)}(3), \dots, x_i^{(0)}(m)]^T \quad (11)$$

($i=1,2,\dots,n$)

从式(9)中可得 A 和 B 的辨识值 $\hat{A}$ 和 $\hat{B}$:

$$\hat{A} = (\hat{a}_{ij})_{n \times n}, \hat{B} = [\hat{b}_1, \hat{b}_2, \dots, \hat{b}_n]^T \quad (12)$$

式(2)写成离散化形式为

$$\dot{X}^{(1)}(k) = e^{\hat{A}(k-1)} (X^{(1)}(1) + \hat{A}^{-1} \hat{B}) - \hat{A}^{-1} \hat{B} \quad (13)$$

其中: $e^{\hat{A}(k-1)} = I + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\hat{A}^i}{i!} (k-1)^i$ 。

式(13)作累减还原,得

$$\dot{X}^{(0)}(k) = \dot{X}^{(1)}(k) - \dot{X}^{(1)}(k-1),$$

($k=2,3,\dots,m$)。

$$\text{式中: } X^{(1)}(1) = X^{(0)}(1) \quad (14)$$

模型的平均拟合精度为

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n V_i^T V_i}{nm} \quad (15)$$

其中, $V_i = \{v_i(1), v_i(2), \dots, v_i(m)\}^T$

($i=1,2,\dots,n; k=2,3,\dots,m$)

$$v_i(k) = x_i^{(0)}(k) - \hat{x}_i^{(0)}(k)$$

3 应用实例

三峡库区某牵引式滑坡,属古崩滑堆积体,滑坡后缘高程 380~400 m,前缘剪出口面临长江,高程约 70 m。滑坡主变形区面积约 $35 \times 10^4 \text{ m}^2$,总体积约 $1575 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑体上部主要以碎块石为主,下部主要以粉质黏土为主,土体结构较密实,低渗透性。滑坡东侧滑带主要成分为含碎石角砾粉质黏土,厚约 0.6~1.0 m;西侧发育两层滑带,浅层滑带物质为角砾土,厚约 1.0~1.2 m,深层滑带主要成分为粉质黏土,厚约 1.1~1.7 m。滑坡滑床从上至下依次为三叠系巴东组第三岩性段—第一岩性段($T_2b^3-T_2b^1$),其中, T_2b^3 、 T_2b^1 以紫红色泥岩、粉砂岩为主, T_2b^2 以浅灰、黄白色泥灰岩、灰岩为主,岩层产状倾向 $135^\circ \sim 205^\circ$,倾角 $10^\circ \sim 35^\circ$,与斜坡的组合关系为逆向坡。滑坡东侧及后缘边界已经贯通,裂缝继续张开、下沉;西侧滑坡边界裂缝普遍新增张开 3~20 cm,新增下沉量 5~18 cm,方向 $300^\circ \sim 360^\circ$,裂缝呈张剪性质,部分呈连通趋势^[15]。目前滑坡主变形区中后部较活跃,中前部变形较弱,一旦中部变形发生阶跃,将预示着滑坡有失稳的可能。坡体上呈三横两纵布置了 A、B、C、D、E、F 六个变形监测点,基本能够监控整个主变形区的地表变形(图 1)。

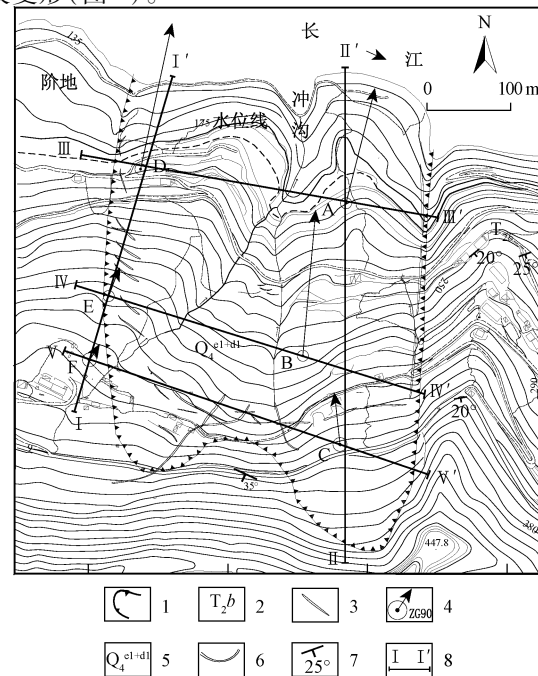


图 1 滑坡主变形区及监测点布置示意图

Fig. 1 Plane figure of landslide primary deformation zone and monitoring points

1—主变形区;2—三叠系中统巴东组地层;3—裂缝;4—GPS 监测点及编号;
5—第四系残坡积物;6—地层分界线;7—岩层产状;8—监测剖面及编号。

3.1 多点变形的聚类分析

该滑坡地质结构复杂,存在着多个不同尺度的块体,这些块体中不连续面的发育程度是影响滑坡稳定性的一个重要因素,有效地预测关键块体的变形不仅可以节约监测成本,同时对于滑坡分析和预报具有重要意义。首先给出各监测点从2006年3月—2011年12月的直观的水平累计位移—库水位—降雨量关系曲线图(图2),从图中初步判断各点间的相似程度,然

后对它们的关联度作定量分析。根据式(1)可得各监测点间的相关系数值如表1所示。由表可知,A、B、D三点间的相关系数均大于0.95,说明它们彼此间的关系紧密,可以视为处在同一块体上。结合前述分析及地表裂缝分布,坡体主变形区大致可分为三块(图3),同时将A、B、D纳入多点灰色模型中对关键块体1进行预测。

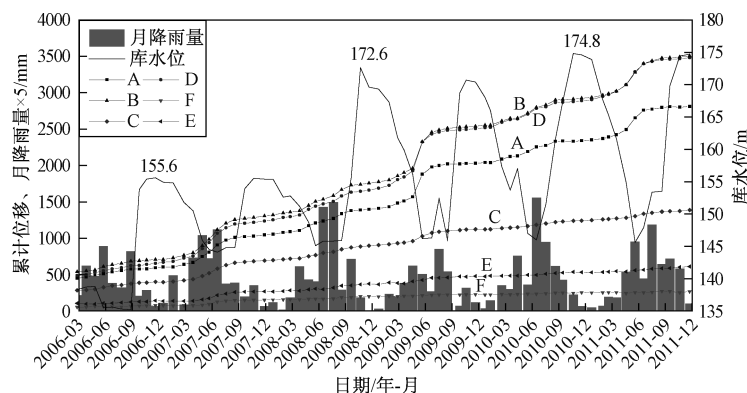


图2 滑坡水平累计位移—库水位—月降雨量关系曲线图(2006年3月—2011年12月)

Fig.2 Relationship of levels accumulative displacement of landslide-monthly rainfall-reservoir level (2006-3~2011-12)

表1 各监测点间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of monitoring points						
相关系数	A	B	C	D	E	F
A	1.000	0.982	0.783	0.988	0.441	0.303
B	0.982	1.000	0.815	0.977	0.445	0.313
C	0.783	0.815	1.000	0.764	0.555	0.474
D	0.988	0.977	0.764	1.000	0.437	0.271
E	0.441	0.445	0.555	0.437	1.000	0.545
F	0.303	0.313	0.474	0.271	0.545	1.000

3.2 背景值优化的多点灰色模型建立及预测结果分析

滑坡所处地区多暴雨,100 mm以上的暴雨主要发生6—7月;尤其是每年的6月份,库水位下降速度超过0.55 m/d,且由于坡体物质渗透性较弱,地下水位下降滞后于库水位下降,此时形成的向临空方向的动水压力也最大,因而地表变形也是最大的。从图2中可看出,6月份滑坡地表水平累计位移曲线发生明显的阶跃,最有可能导致滑坡失稳。

本文选取A、B、D三个监测点在2006年—2013年6月份的水平累计位移数据,建立背景值优化的多点灰色模型、传统的多点灰色模型^[10]和单点GM(1,1)模型^[13],分别对滑坡块体1的水平累计变形进行预测。总共选取 $m=8$ 个周期的水平累计位移序

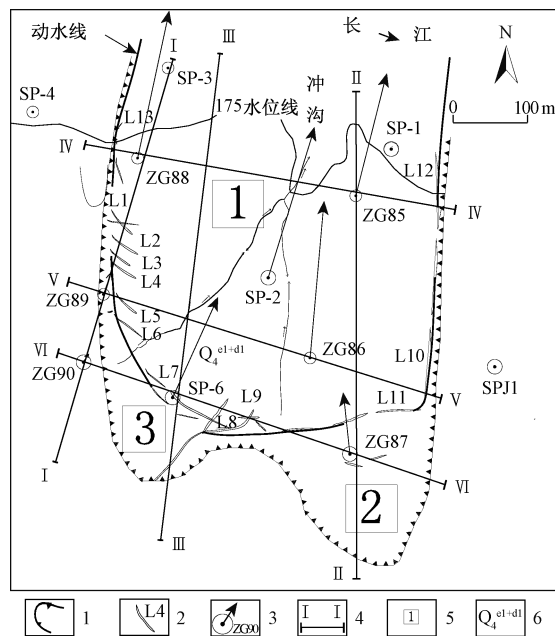


图3 滑坡块体划分图

Fig.3 Landslide block divided map

1—滑坡主变形区;2—裂缝;3—GPS监测点及编号;
4—监测剖面及编号;5—块体编号;6—第四系残坡积物。

列,其中前6个周期用来建模,后2个周期用作预测。3个监测点的实测数据序列如表2。

表 2 监测点实测数据序列

Table 2 Actual measured data sequence of monitoring points

日期/年-月	水平累计位移/dm		
	点 A	点 B	点 D
2006-6	5.11	6.11	5.51
2007-6	8.06	9.83	9.39
2008-6	12.08	15.05	14.39
2009-6	18.78	23.26	23.22
2010-6	21.91	27.19	27.04
2011-6	26.54	32.76	32.86
2012-6	31.88	39.37	39.79
2013-6	36.64	45.23	45.52

3 点的实测数据经一次累加生成之后按式(6)、(7)及式(8)可得模型参数为

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -16.8132 & 20.0290 & -6.3220 \\ -18.8203 & 23.5242 & -8.1677 \\ -25.1482 & 28.7313 & -8.2632 \end{bmatrix}$$
$$\hat{B} = [5.4266 \quad 5.8212 \quad 6.8249]^T$$

表 3 背景值优化的多点灰色模型的预测值与实测值比较

Table 3 Comparison between the results from optimization multi-point model prediction and those from actual measurement

日期/ 年-月	实测值/dm			拟合及预测值/dm			残差/dm		
	A	B	D	A	B	D	A	B	D
2006-6	5.11	6.11	5.51	5.11	6.11	5.51	0.00	0.00	0.00
2007-6	8.06	9.83	9.39	7.61	9.29	8.77	0.45	0.54	0.62
2008-6	12.08	15.05	14.39	12.82	15.93	15.42	-0.74	-0.88	-1.03
2009-6	18.78	23.26	23.22	18.12	22.47	22.30	0.66	0.79	0.92
2010-6	21.91	27.19	27.04	22.14	27.41	27.35	-0.23	-0.22	-0.31
2011-6	26.54	32.76	32.86	26.25	32.47	32.38	0.29	0.29	0.48
2012-6	31.88	39.37	39.39	31.32	38.77	38.62	0.56	0.60	0.77
2013-6	36.84	45.53	45.42	37.61	46.55	46.36	-0.77	-1.02	-0.94
平均拟合精度 σ^2								0.398	

表 4 传统多点及单点灰色模型的预测值与实测值比较

Table 4 Comparison between the results from traditional multi-point and single-point model prediction and actual measurement

日期/ 年-月	多点模型预测值/dm			残差/dm			单点模型预测值/dm			残差/dm		
	A	B	D	A	B	D	A	B	D	A	B	D
2006-6	5.11	6.11	5.51	0.00	0.00	0.00	5.11	6.11	5.51	0	0	0
2007-6	7.67	9.37	8.84	0.39	0.46	0.55	9.84	12.19	11.8	-1.78	-2.36	-2.41
2008-6	12.85	15.98	15.46	-0.77	-0.93	-1.07	12.74	15.78	15.41	-0.66	-0.73	-1.02
2009-6	18.65	23.15	23.06	0.13	0.11	0.16	16.48	20.41	20.12	2.3	2.85	3.1
2010-6	22.06	27.28	27.30	-0.15	-0.09	-0.26	21.32	26.4	26.28	0.59	0.79	0.76
2011-6	25.19	31.12	30.95	1.35	1.64	1.91	27.59	34.14	34.32	-1.05	-1.38	-1.46
2012-6	30.20	37.33	37.02	1.68	2.04	2.37	35.69	44.16	44.82	-3.81	-4.79	-5.43
2013-6	37.09	45.89	45.55	-0.25	-0.36	-0.13	46.18	57.13	58.53	-9.34	-11.60	-13.11
平均拟合精度 σ^2				1.016			21.120					

以监测点 A 为例,绘制出其 3 种模型预测曲线与实测曲线比较图(图 4)。

从图 4 及表 3、表 4 的比较结果可以看出,多点灰色模型要比单点灰色模型的拟合精度更高,预测效果

$$\hat{x}^{(1)}(1) = [5.11 \quad 6.11 \quad 5.51]^T$$
$$\hat{x}^{(1)}(1) + A^{-1}B = [69.0982 \quad 85.5453 \quad 86.1390]^T$$

由式(13)可得一次累加序列的预测值为:

$$\hat{X}^{(1)} = \begin{bmatrix} 5.11 & 6.11 & 5.51 \\ 12.72 & 15.40 & 14.28 \\ 25.54 & 31.33 & 29.70 \\ 43.66 & 53.80 & 52.01 \\ 65.79 & 81.21 & 79.35 \\ 92.04 & 113.68 & 111.73 \\ 123.36 & 152.45 & 150.35 \\ 160.97 & 199.00 & 196.71 \end{bmatrix}$$

最后按式(14)还原,得到 3 个监测点累计变形数据的拟合值及预测值 $X_i^{(0)}$ (表 3)。为了验证优化背景值多点灰色系统模型的优越性,运用相同的原始监测数据序列分别建立传统多点灰色模型及单点 GM(1, 1)模型,拟合及预测结果见表 4。

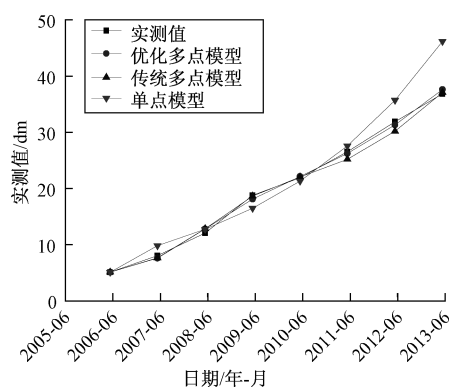


图4 点A三种模型预测值与实测值曲线比较图

Fig.4 Comparison between actual measurements and prediction curves of 3 models of the point A

4 结论

(1) 滑坡同一块体上各监测点的变形有其内在的规律性和彼此关联性,聚类分析可以定量地判断各点间的相互关系。

(2) 通过上述实例可看出,基于背景值优化的多点灰色模型不仅克服了目前滑坡变形预测模型中单点局部分析的不足,充分利用了滑坡同一块体上各监测点间的关联信息,而且弥补了传统多点模型在背景值取值方面的缺陷,大大提高了拟合及预测精度。

(3) 本文以年为周期,分米为单位,实现了贫信息条件下滑坡地表多个监测点变形的整体预测。随着监测数据的不断更新,可采用新陈代谢法不断排除旧信息干扰,调整模型参数,实时建模,对下一个周期进行可靠预测。

(4) 滑坡变形是一个十分复杂的非线性动态系统,受多种静、动态因素的影响,其不同块体上的变形规律不尽相同。目前文献中还未找到该多点优化模型成功应用于预测滑坡地表大变形的实例,因此该法的适用范围还有待进一步探讨和研究。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454.
- HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454.
- [2] 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]. 中国地质灾害防治学报, 2004, 15

(1): 1 - 4, 16.

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, 16.

- [3] 黄润秋, 许强, 戚国庆. 降雨及水库诱发滑坡的评价与预测[M]. 科学出版社, 2007.

HUANG Runqiu, XU Qiang, QI Guoqing. Evaluation and prediction of rainfall and reservoir induced landslides[M]. Science Press, 2007.

- [4] 卢书强, 易庆林, 易武, 等. 三峡库区卧沙溪滑坡变形失稳机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(2): 21 - 25.

LU Shuqiang, YI Qinglin, YI Wu, et al. Analysis on deformation and failure mechanism of Woshaxi landslide in the Three Gorges Reservoir Area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(2): 21 - 25.

- [5] 刘勇健, 李彰明, 张建龙, 等. 基于遗传 - 神经网络的深基坑变形实时预报方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 1 010 - 1 014.

LIU Yongjian, LI Zhangming, ZHANG Jianlong, et al. Real time prediction method based on genetic algorithm and neural network for deformation caused by deep excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 1010 - 1014.

- [6] 尹晖. 时空变形分析与预报的理论和方法 [M]. 北京: 测绘出版社, 2002.

YIN Hui. The theory and methods of deformation analysis and prediction of space and time [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2002.

- [7] 薄志毅. 露天煤矿边坡滑移变形预测理论及其应用研究[D]: 中国矿业大学, 2009.

BO Zhiyi. Research on prediction of open coal pit slope deformation [D]: China University of Mining and Technology, 2009.

- [8] 冯志, 李兆平, 李伟. 多变量灰色系统预测模型在深基坑围护结构变形预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 4319 - 4324.

FENG Zhi, LI Zhaoping, LI Wei. Application of a muliti-point grey model to deformation prediction of supporting structure for deep pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4319 - 4324.

- [9] 王穗辉, 潘国荣. 基于 MATIAB 多变量灰色模型及其在变形预测中的应用[J]. 土木工程学报, 2005,

- 38(5):24-27.
- WANG Suihui, PAN Guorong. A MATLAB-based multi-variate grey model and its application in deformation prediction[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5): 24-27.
- [10] 刘寒冰,向一鸣,阮有兴. 背景值优化的多变量灰色模型在路基沉降预测中的应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 173-181.
- LIU Hanbing, XIANG Yiming, RUAN Youxing. A multivariable grey model based on background value optimization and its application to subgrade settlement prediction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 173-181.
- [11] 尹晖,陈永奇,张琰. 贫信息条件下的多点变形预测模型及其应用[J]. 测绘学报,1997,26(4):365-372.
- YIN Hui, CHEN Yongqi, ZHANG Yan. Multi-point deformation prediction model with poor data information and its application[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,1997,26(4):365-372.
- [12] 薄志毅,张瑞新,邬捷. 边坡监测线整体变形预测研究与应用[J]. 煤炭工程,2009(9):108-110.
- BO Zhiyi, ZHANG Ruixin, Wu Jie. Research and application of the overall deformation prediction of slope monitoring line[J]. Coal Engineering, 2009(9):108-110.
- [13] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1990.
- DENG Julong. Gray system theory tutorial[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press,1990.
- [14] 崔立志,刘思峰,吴正朋. 基于向量连分式理论的MGM(1,n)模型[J]. 系统工程,2008,26(10):47-51.
- CUI Lizhi, LIU Sifeng, WU Zhengpeng. MGM(1,n) based on vector continued fractions theory[J]. Systems Engineering, 2008, 26(10): 47-51.
- [15] 易武,孟召平,易庆林. 三峡库区滑坡预测理论与方法[M]. 科学出版社,2011.
- YI Wu, MENG Zhaoping, YI Qinglin. Theory and method of landslide stability prediction in the Three Gorges Reservoir Area[M]. Science Press,2011.

(上接第2页)

袁占亭对各位院士、专家欣然接受邀请,并担任兰州市政府顾问表示感谢。他说,各位院士、专家都是我国工程地质力学和环境工程领域的学术带头人,而兰州又是地质灾害隐患十分突出的一个城市,需要大家提供在理论及实际操作层面的指导和帮助。首先,我们希望通过聘任顾问的方式与各位院士、专家建立长效联系机制,成立兰州市地质灾害预防与治理专家组,进行定期研究、评估与指导;其次,以皋兰山、九州等代表性区域为重点,提炼一批地质灾害治理项目,力争为同类地区和项目提供示范效应;第三,在国家“一路一带”战略框架下,为兰州建设丝绸之路经济带重要节点城市,特别是通过信息技术联通智能物流等提出意见和建议;第四,随着“一路一带”战略的实施,兰州正从开发开放的“后方”变为“前沿”,如何在“十三五”规划中提前谋划发挥通道、枢纽、基地作用,希望为我们提供咨询和决策。

王思敬代表与会院士、专家在发言时表示,通过实地参观和了解城市建设规划,兰州市把地质灾害治理与城镇化建设结合的做法给大家留下了深刻印象,这一由“相克”到“相辅”的转变对地质灾害防治创出了新的模式,希望今后双方共同努力使之更加深化、科

学,成为具有领先水平的城市化发展方式之一。同时,专家组将在城市规划层面推动兰州依托丝绸之路经济带成为物质、文化、科技等交流、汇集地,以及在城市疏散、极端灾害应对的深度研究和精细评估等方面,积极发挥应有的作用。

“按照需求开展地质灾害学术交流”是本次论坛的最大亮点,也是今后学会开展学术交流的努力方向。学术委员会主任殷跃平研究员在总结时深有感触。他说,现场考察记忆犹新、专题报告针对性强、专家研讨倍受启发,有几点思考与大家共勉:地质灾害要做到精细预报,就要开展精细调查,要摸清地质灾害隐患点;要加强基础地质问题研究,特别是加强地震活动断裂高发区的基础地质研究;城市规划与地质工作要紧密结合,要为城市建设提供依据;地质工作要当好先行,急需对黄土湿陷和回填区沉降问题开展深入研究;城镇化建设中的一些开发模式值得进一步论证,开发方案要优化,要逐渐建立城镇化开发模式与地质研究工作的标准和方案。

“本次论坛形式新颖,内容充实,成果丰富,超出了预期的目标,对推动我国西部城市化发展及其过程中地质灾害的科学防治具有重要的科学和现实指导意义。”代表们如是说。