

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.06125

最优加权组合模型在边坡变形预测中的应用

柏俊磊, 王乐华

(三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 利用某岩质边坡 2002 年- 2011 年的变形监测资料, 结合区域地质与气象背景, 运用莱茵达准则选定有效的监测数据, 分别建立了 GM(1, 1) 模型和趋势曲线预测模型; 最后, 基于最优加权组合原理, 建立了边坡变形的最优加权组合模型。运用组合模型对该岩质边坡的变形进行了拟合和变形预测, 模拟变形趋势与实际变形趋势对比结果表明, 组合模型的预测精度高于任何单一模型的拟合精度, 证明该组合模型合理、可靠。

关键词: 莱茵达准则; 最优加权组合模型; GM(1, 1) 模型; 趋势曲线预测模型; 变形预测

中图分类号: TU45; P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)06-0125-04

Application of Optimal Weighted Combination Model in the Prediction of Slope Deformation

BAI Jun lei, WANG Le hua

(College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Based on the deformation monitoring data of a rock slope from 2002 to 2011 and the geological and meteorological conditions of the area, "PauTa" rule was used to select the effective monitoring data, and the GM(1, 1) model and trend curve prediction model were developed. The optimal weighted combination model of slope deformation was established based on the optimal weighted combination principle. The combination model was used to predict the slope deformation. The comparison between the predicted and actual deformation trend suggested that the prediction accuracy of the combination model is higher than that of any single model, and therefore the combination model is more reasonable and reliable.

Key words: "PauTa" rule; optimal weighted combined model; GM(1, 1) model; trend curve prediction model; deformation prediction

目前用于岩土工程变形预测的数学方法中, 应用较多的有时序分析^[1-2]、灰色数学^[3-5]、神经网络^[6-7]、模糊数学^[8]等。通过这些方法建立的数学模型在边坡变形预测中各有优势, 但是由于岩土工程的复杂性, 很难用某个单一模型或方法来精确描述边坡的变形演化规律。Bates, J. M. 和 Granger. C. W. J.^[9]于 1969 年首次提出组合预测法, 比单个预测模型具有更高的预测精度和稳定性, 且能更好地适应未来环境变化, 因此, 将多种预测模型进行加权组合, 发挥各自单一模型的特点, 在实践中得到了广泛应用^[10-12]。

本文根据最优加权组合预测模型的建模原理和灰色系统 GM(1, 1) 模型, 以某水电站边坡 2008 年- 2011 年测点 A1 的变形监测资料为例, 分别建立了 GM(1, 1) 模型、多项式和指数趋势曲线预测 3 个单一模型, 进行优选后建立了最优加权组合预测模型, 用来预测 A1 测点未来的水平位移。

1 工程地质及环境量

某水电站边坡位于宽 V 型河谷右岸, 枯水期河水面高程 440 m, 水面宽 50~ 110 m, 岸坡高差 300~ 500 m, 监测区域的边坡高程为 600~ 850 m 之间, 自然坡角 30°~ 40°。边坡开挖地层为中三叠系江洞沟组砂岩夹泥页岩和少量灰岩, 表现出软硬相间的岩性组合特点。砂岩多为厚层、中厚层状, 矿物成分为石英、长石、绿泥石和云母等, 泥钙质胶结, 呈新鲜状态, 坚硬。泥页岩主要由黏土矿物组成, 含有极少量的有机质及细砂、粉砂、石英。边坡无较大断层发育。

该边坡 2002 年建成, 采用锚杆、混凝土挡墙及排水等处理措施维持稳定。运行期间随时对边坡的不同区域进行相应加固补充, 并对边坡位移变化情况及周边降雨量进行观测。降雨量采用翻斗式雨量计进行观测, 观测时间为 2002 年 1 月- 2012 年 1 月, 观测数据均为自动化采集。工程区年

收稿日期: 2013-06-17 修回日期: 2013-09-22 网络出版时间: 2013-10-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1028.025.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51279091); 三峡大学硕士学位论文培优基金项目(2013PY015); 三峡大学土木与建筑学院硕士研究生培优基金(PY201303)

作者简介: 柏俊磊(1988-), 男, 湖北十堰人, 硕士研究生, 主要从事岩石边坡工程设计与理论方面的研究。E-mail: bj18810@126.com

降雨主要分布在 5 月—8 月, 观测期间的年平均降雨量为 72.24 mm, 月平均降雨量见表 1。

2 观测数据的选取

本文选取数据比较完整的 A1 测点进行分析。根据观测资料可得 A1 测点的水平位移增量随时间的变化曲

表 1 多年月平均降雨量
Table 1 Average monthly precipitation

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
降雨量/mm	7.91	7.40	21.00	40.70	119.20	207.60	167.70	141.60	72.70	46.90	22.70	11.50

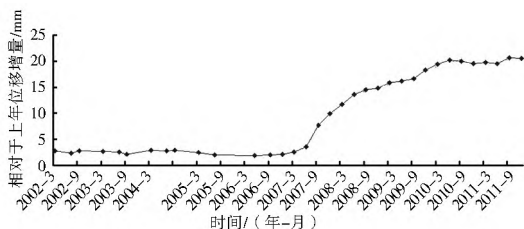


图 1 测点 A1 实际位移增量随时间变化

Fig. 1 Variation of actual displacement increment over time at the measuring point A1

受观测条件和仪器原因的影响, 任何观测数据都可能存在误差。为了提高预测精度, 在根据监测资料进行建模分析前, 应对原始的现场观测数据进行筛选。本文主要通过消除粗差的方式排除初始数据中的异常数据。粗差的判别方法很多, 考虑到自动化初始观测资料的丰富性以及等间隔性, 本文选择以莱因达准则^[13]为基础的粗差剔除方法。

莱因达准则又称“3σ 准则”, 其应用前提是测量次数要充分。实际测量中, σ 值常以贝塞尔公式算得的 S 值代替, 以 \bar{x} 值代替真值, 当对测值序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中的某个可疑数据 x_i 为异常点时, 其残差 δ_i 满足公式(1)。

$$|\delta_i| = |\bar{x} - x_i| > kS \quad (1)$$

式中: $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$, $\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n)$, 其中 n 值满足 $(n > 10)$; k 为阈值系数, 一般取 3(或 2)。根据误差理论, 3S 与 2S 的取值一般与显著性水平 α 有关, 3S 相当于 α = 0.01, 2S 相当于 α = 0.05^[12]。

基于以上理论, 同时考虑到测点 A1 的实际变化规律, 本文选取该边坡一个测点(A1) 2008 年—2011 年的数据进行粗差分析, 剔除奇异值, 选取等间隔的测值。筛选后所选测点数据见表 2。

表 2 测点 A1 实际测值筛选

Table 2 Screening of actual measured values at the measuring point A1

时间/年-月-日	监测值/m m	时间/年-月-日	监测值/m m
2008-03-10	11.74	2010-03-10	19.42
2008-06-10	13.57	2010-06-10	20.24
2008-09-10	14.51	2010-09-10	19.99
2008-12-10	14.89	2010-12-10	19.55
2009-03-10	15.83	2011-03-10	19.74
2009-06-10	16.21	2011-06-10	19.49
2009-09-10	16.65	2011-09-10	20.68
2009-12-10	18.35	2011-12-10	20.56

线见图 1。

从图 1 可以发现, 测点 A1 的水平位移增量在 2007 年以前的变化一直较为平稳, 且变量均较小; 2007 年 3 月—2010 年 9 月逐渐增大, 但在 2010 年 9 月之后监测值又变得平稳或略有增加。边坡水平位移先增大后逐渐减小的变化规律符合一般意义上开挖边坡渐进性破坏^[15]变形的发育规律。

3 最优加权组合预测模型

最优加权组合模型^[14]预测就是将多个单一预测模型按照一定的权重比例进行优化重组, 对作用较大的模型赋予较大的权值, 然后进行组合计算, 预测结果。

以 Y 为边坡变形监测对象, 其实际监测值向量为 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 。根据监测值构造选取了 m 种不同的单一预测模型 $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$, 在第 i 种单一预测模型 Y_i 的预测值为 $Y_i = (Y_{1i}, Y_{2i}, \dots, Y_{ni})$, 其中 $i = 1, 2, \dots, m$ 。设各单一预测模型在组合模型中的权重向量为 $P = [p_1, p_2, \dots, p_m]^T$, 且有 $\sum_{i=1}^m p_i = 1$ 。则组合预测模型为:

$$Y = p_1 Y_1 + p_2 Y_2 + \dots + p_m Y_m = \sum_{i=1}^m p_i Y_i \quad (2)$$

拟合残差为: $e_t = \sum_{i=1}^m p_i (y_t - \hat{y}_{ti})$, 其中令 $e_t = y_t - \hat{y}_{ti}$, $(t = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n)$ 构成 m 阶实对称拟合残差矩阵: $E = [\sum_{i=1}^m e_i e_i^T]$, 其中 $(i, j = 1, 2, \dots, m)$ 。根据最小二乘原理对误差平方和求解数学规划, 即可得到组合预测模型的最优权重。其目标函数和约束条件为:

$$\begin{cases} \min Q = \sum_{i=1}^m e_i^2 \\ s. t. \sum_{i=1}^m W_i = 1 \end{cases} \quad (3)$$

若令 $R = [1, 1, \dots, 1]^T$, 可得:

$$\begin{cases} Q = \sum_{i=1}^m e_i^2 = P^T E P \\ s. t. R^T P = 1 \end{cases} \quad (4)$$

对上式运用拉格朗日乘子法求解, 由 $\frac{d}{dP}(P^T E P - 2\lambda R^T P - 1) = 0$ 得 $EP - \lambda R = 0 \Rightarrow P = \lambda E^{-1} R$; 由 $\frac{d}{d\lambda}(P^T E P - 2\lambda R^T P - 1) = 0$ 得: $R^T P = 1, \lambda = \frac{1}{R^T E^{-1} R}$; 则最优权重向量为:

$$P_o = \frac{E^{-1} R}{R^T E^{-1} R} \quad (5)$$

4 灰色系统模型 GM(1, 1) 模型

目前, GM(1, 1) 模型^[15]是灰色系统法中应用最普通的一种预测方法。GM(1, 1) 模型具有的形式简洁、计算简单等优点, 多适用于等间距监测数据序列的模拟预测, 其建模原理如下。

设已知非负序列 $\{x(0)_1, x(0)_2, \dots, x(0)_n\}$, 对 $x(0)_{(i)}$ 作

一次累加生成序列 $\{x(1)_1, x(1)_2, \dots, x(1)_n\}$, 其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$, ($k=1, 2, \dots, n$); 再有 $z_1(k) = \frac{1}{2}(x_1(k) + x_1(k-1))$, $k=1, 2, \dots, n$ 。

若 $\hat{a} = [a, b]^T$ 为参数列, 且

$$Y = \begin{bmatrix} x_0(2) \\ x_0(3) \\ \vdots \\ x_0(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -Z_1(2) & 1 \\ -Z_1(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -Z_1(n) & 1 \end{bmatrix}$$

则GM(1, 1)模型的最小二乘估计参数列满足:

$$\hat{a} = [a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (6)$$

则白化方程的解(也称时间响应函数)为 $x_1(t+1) = [x_1(1) - \frac{b}{a}]e^{at} + \frac{b}{a}$, 对 $x_1(t)$ 做一次累减生成还原序列。

现以A1点的变形监测资料为例(见表1), 根据上述方法, 建立GM(1, 1)预测模型。GM(1, 1)预测模型如下: $y = 528.61e^{0.0275x} - 516.8727$, 其中($a = -0.0275, b = 14.2140$)

5 趋势曲线模型

用一条适当的曲线模型 $y = f(x)$ 近似描述观察测值随时间的变化关系, 这条曲线即为趋势曲线。常用的趋势曲线模型主要有线性模型、对数模型、多项式模型、幂函数模型、指数函数模型等。为了提高拟合精度, 本文采用一次累加数列进行曲线拟合, 拟合结果见图2(图中一个周期表示3个月)。

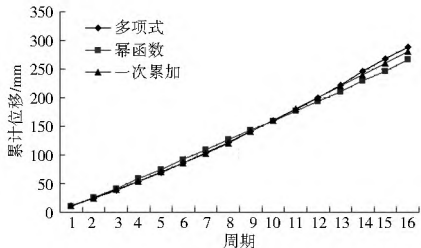


图2 趋势曲线模型拟合结果

Fig. 2 Fitting results of trend curve model

表3 监测位移及各模型拟合位移的预测值及残差比较

Table 3 Monitoring displacements and predicted values of model fitting displacement and the residuals

时间年-月-日	实测值	多项式预测	多项式残差	GM(1, 1)预测	GM(1, 1)残差	加权组合预测	加权组合残差
2008-3-10	11.74	11.90	-0.15	11.74	0.00	11.87	-0.13
2008-6-10	13.57	13.01	0.56	14.74	-1.17	13.28	0.28
2008-9-10	14.51	13.96	0.55	15.15	-0.64	14.15	0.37
2008-12-10	14.89	14.89	0.00	15.57	-0.68	15.00	-0.11
2009-3-10	15.83	15.80	0.04	16.00	-0.17	15.83	0.01
2009-6-10	16.21	16.65	-0.44	16.45	-0.24	16.62	-0.41
2009-9-10	16.65	17.45	-0.80	16.91	0.25	17.37	-0.71
2009-12-10	18.35	18.18	0.17	17.38	0.97	18.05	0.30
2010-3-10	19.42	18.82	0.61	17.86	1.56	18.67	0.76
2010-6-10	20.24	19.36	0.89	18.36	1.88	19.20	1.04
2010-9-10	19.99	19.78	0.21	18.87	1.12	19.63	0.36
2010-12-10	19.55	20.07	-0.52	19.40	0.15	19.96	-0.41
2011-3-10	19.74	20.21	-0.47	19.94	-0.20	20.17	-0.43
2011-6-10	19.49	20.20	-0.71	20.49	-1.01	20.24	-0.76
2011-9-10	20.68	20.01	0.68	21.06	-0.38	20.17	0.51
2011-12-10	20.56	19.63	0.93	21.65	-1.09	19.95	0.61
残差平方和	/	/	5.02	/	12.99	/	4.35
相关指数	/	/	0.979	/	0.944	/	0.982
剩余标准差	/	/	0.62	/	1.00	/	0.58

(1) 多项式模型: $y_1 = -0.0006x_4 + 0.0034x_3 + 0.4689x_2 + 11.589x - 0.1645$ 。

(2) 幂函数模型: $y_2 = 11.145x^{1.1569}$

其中, 多项式模型的相关系数为0.979, 指数模型的相关系数为0.942。

6 最优加权组合拟合结果对比及变形预测

6.1 最优加权组合模型

运用最优非负加权组合方法进行3个模型进行加权组合。

首先利用式(3)求得残差矩阵:

$$E = \begin{bmatrix} \sum u_1^2 & \sum u_1 u_2 & \sum u_1 u_3 \\ \sum u_1 u_2 & \sum u_2^2 & \sum u_2 u_3 \\ \sum u_2 u_3 & \sum u_2 u_3 & \sum u_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.61 & 4.12 & 2.40 \\ 4.12 & 12.88 & 8.97 \\ 2.40 & 8.97 & 14.64 \end{bmatrix}$$

再由式(5)得:

$$P_0 = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.899 \\ -0.1017 \\ 0.2026 \end{bmatrix}$$

最优权重中出现了负值, 说明幂函数预测模型在结果预测中起到负作用。弃用幂函数模型, 再重新组合多项式模型和GM(1, 1)模型:

$$E = \begin{bmatrix} \sum u_1^2 & \sum u_1 u_2 \\ \sum u_1 u_2 & \sum u_2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.61 & 2.4 \\ 2.4 & 14.64 \end{bmatrix},$$

$$\text{得 } P_0 = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8471 \\ 0.1529 \end{bmatrix}$$

故可得最优加权组合预测模型为:

$$Y = 0.8471Y_1 + 0.1529Y_2 \quad (7)$$

6.2 组合模型与单一模型拟合结果对比

基于以上各数学模型, 计算各模型具体结果见表3和图3。为更加清晰地比较各预测模型的拟合精度, 同时计算各个模型的残差平方和、相关指数、剩余标准差。见表3。

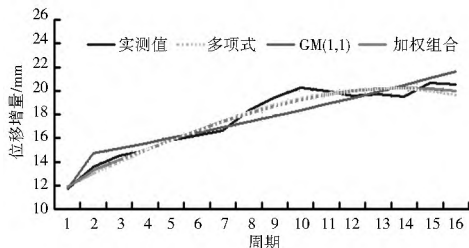


图 3 监测位移及各模型拟合位移随时间的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of monitoring displacement and predicted values of model fitting displacement over time

表 4 测点 A1 的位移变形预测值

Table 4 Predicted displacement deformation at the measuring point A1

时间	2012-03-10	2012-09-10	2013-03-10	2013-09-10	2014-03-10	2014-09-10
累计位移/mm	299.73	336.93	370.25	397.90	417.91	428.11
位移增量/mm	19.56	18.22	16.07	13.00	8.92	3.74

从表 4 可以发现,测点 A1 的累计位移在未来三年里仍然呈逐渐增大趋势,但增大趋势逐渐放缓,这种趋势可以从位移增量呈逐渐减小的趋势看出。

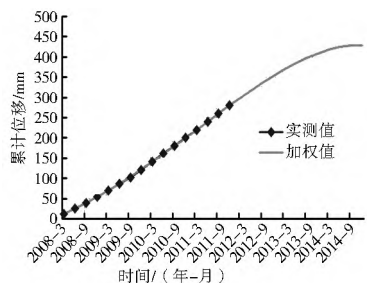


图 4 测点 A1 累计位移测值随时间变化曲线

Fig. 4 Variation curve of cumulative displacement over time at the measuring point A1

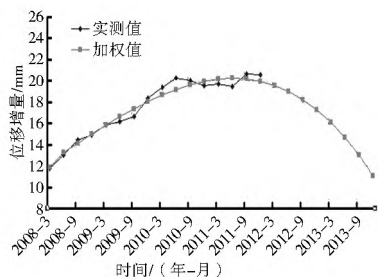


图 5 测点 A1 绝对位移测值随时间变化曲线

Fig. 5 Variation curve of absolute displacement over time at the measuring point A1

从图 4 可以发现,测点 A1 的累计位移随时间变化趋势呈先增大后趋于稳定趋势,最后位移增大到 430 mm 左右时,累计位移保持稳定;从图 5 可以发现,测点 A1 的位移增量随时间变化趋势呈先增大后减小趋势。

7 结论

以测点 A1 的自动化变形观测资料为例,根据最优加权组合合法建立了以灰色系统 GM(1,1)模型、多项式模型和幂函数模型,作为加权单一模型的最优加权组合模型,结果如下。

(1) 在该测点的加权组合模型中,由于幂函数模型的权重出现了负值,说明幂函数模型在组合预测模型中的贡献率

为负,因此在加权组合模型中幂函数模型应予剔除。从表 3 可以看出,利用最优加权组合预测模型计算的残差平方和、剩余标准差最小,而相关系数最大;从图 3 可以看出利用最优加权组合预测模型拟合的测值曲线与实测值曲线趋势更加相近。说明最优加权组合预测模型的拟合精度更高,采用最优加权组合预测模型进行预测的结果精度更高。

6.3 测点变形预测

将上述单一模型的预测值带入最优加权组合预测模型公式(7),预测该测点(A1)2012 年和 2014 年 9 月的边坡变形,结果见表 4、图 4 和图 5。

为负,因此在加权组合模型中幂函数模型应予剔除。

(2) 对比 4 种预测模型,发现最优加权组合预测模型的预测精度明显优于其他 3 种模型,结果更准确。

(3) 从图 1 中测点 A1 的水平位移增量随时间的变化关系得出的结论以及一般边坡位移变化的规律,不难发现测点 A1 的水平位移增量已有呈先增大后趋于稳定再减小的趋势,这与模型预测的趋势是相符的,同时考虑到 2010 年之后对边坡的加固措施改进工程的实施,进一步证明了最优加权组合预测模型在该边坡变形预测中的应用是合理的。

参考文献(References):

[1] 李强,李端有. 滑坡位移监测动态预报时间序列分析技术研究[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(6): 16-19. (LI Qiang, LI Duanyou. Research of Dynamic Prediction Technique for Landslide Displacement Monitoring[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(6): 16-19. (in Chinese))

[2] 史玉峰,孙保琪. 时间序列分析及其在变形数据分析中的应用[J]. 金属矿山, 2004, (8): 13-15. (SHI Yufeng, SUN Baoqi. Time Series Analysis and Its Application in Analysis of Deformation Data[J]. Metal Mine, 2004, (8): 13-15. (in Chinese))

[3] 巫德斌,徐卫亚. 基于 GM(1,1) 优化模型的岩石边坡变形预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 85-89. (WU Debin, XU Weiya. Forecasting of Rock Slope Displacement Based on GM(1,1) Optimized Model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(1): 85-89. (in Chinese))

[4] 何习平,华锡生,何秀凤. 加权多点灰色模型在高边坡变形预测中的应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1187-1191. (HE Xiping, HUA Xisheng, HE Xiufeng. Weighted Multi-point Grey Model and Its Application to High Rock Slope Deformation Forecast[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1187-1191. (in Chinese))

[5] 王穗辉,潘国荣. 基于 MATLAB 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 Multivariate Grey Model and Its Application in Deformation Prediction[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5): 24-27. (in Chinese))

(下转第 132 页)

- and Mineral Resources Exploration, Hebei Hydrological Station. The Underground Water Resources in Hebei Province Evaluation Report[R]. 1990. (in Chinese)
- [8] 刘俊龙, 李兰贵. 超采地下水引起的水文地质环境变化及对策[J]. 河北水利水电技术, 1996, (2): 29-32. (LIU Jun long, LI Lan gui. Hydrogeological and Environmental Changes Caused by Groundwater Over Exploitation and Its Countermeasures [J]. Hebei Water Resources and Hydropower Technology, 1996, (2): 29-32. (in Chinese))
- [9] 郭迎春, 张广录, 阮新, 等. 河北省气候变化对水资源和荒漠化的影响[J]. 地理学与国土研究, 2001, 17(2): 67-70. (GUO Ying chun, ZHANG Guang lu, RUAN Xin, et al. Influences of Chronological Variations of Air Temperature and Precipitation on Water Resources Desertization in Hebei Province[J]. Geography and Territorial Research, 2001, 17(2): 67-70. (in Chinese))
- [10] 郭永海, 王东胜, 沈照理, 等. 河北平原部分地区深层地下水开采的地沉效应及水资源属性再认识[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, (增刊): 75-81. (GUO Yong hai, WANG Dong sheng, SHEN Zhao li, et al. Effects of Pumping Deep Groundwater on Land Subsidence and Reevaluation of Characters of Deep Groundwater Resources in Part Regions of Hebei Plain [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994, (Supp.): 75-81. (in Chinese))
- [11] 朱建军, 李红, 郝东. 河北平原深层地下水环境恶化原因与对策[J]. 石家庄师范专科学校学报, 2002, 4(2): 40-42. (ZHU Jian jun, LI Hong, HAO Dong. Causes and Countermeasures of Deep Groundwater Worsen in Hebei Plain [J]. Journal of Shijiazhuang Teachers College, 2002, 4(2): 40-42. (in Chinese))
- [12] 朱延华, 刘淑芬, 郭永海. 河北平原地下水动力环境演化规律及影响因素[J]. 地球科学, 1995, (4): 433-437. (ZHU Yan hua, LIU Shu fen, GUO Yong hai. Groundwater Dynamic Environment Evolution and Its Constraints in Hebei Plain [J]. Earth Science, 1995, (4): 433-437. (in Chinese))
- [13] 张光辉, 王金哲. 海河流域中东部平原区深层地下水补给与释水机制探讨——兼谈深层地下水资源可利用性[J]. 水文, 2002, 22(3): 5-9. (ZHANG Guang hui, WANG Jin zhe. Mechanism of Confined Groundwater Recharge and Release in the Middle east Plain of Haihe River Basin [J]. Hydrology, 2002, 22(3): 5-9. (in Chinese))
- [14] 张光辉, 陈宗宇, 费宇红. 华北平原地下水形成与区域水文循环演化的关系[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 415-420. (ZHANG Guang hui, CHEN Zong yu, FEI Yu hong. Relationship Between the Formation of Groundwater and the Evolution of Regional Hydrologic Cycle in North China Plain [J]. Advances in Water Science, 2000, 11(4): 415-420. (in Chinese))
- [15] 赵秀兰, 陈宁生, 藏逸中. 深层地下水开采引起的生态环境问题及其治理[J]. 地下水, 2005, 27(1): 46-49. (ZHAO Xiu lan, CHEN Ning sheng, ZANG Yi zhong. Ecological Environmental Issues Caused by Exploitation of Deep Groundwater and Their Solution [J]. Groundwater, 2005, 17(1): 46-49. (in Chinese))

(上接第 128 页)

- [6] 邓跃进, 王葆元, 张正禄. 边坡变形分析与预报的模糊神经网络方法[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(1): 26-31. (DENG Yue jin, WANG Bao yuan, ZHANG Zheng lu. Application of Fuzzy Artificial Neural Network to the Deformation Analysis and Prediction of Side Slope [J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1998, 23(1): 26-31. (in Chinese))
- [7] 徐卫亚, 蒋晗, 谢守益, 等. 三峡永久船闸高边坡变形预测人工神经网络分析[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 27-31. (XU Wei ya, JIANG Han, XIE Shou yi, et al. Rock Slope Deformation Prediction by Artificial Neural Network Method in Three Gorges Project [J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 27-31. (in Chinese))
- [8] 谢全敏, 夏元友. 岩体边坡治理决策的模糊层次分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1117-1120. (XIE Quan min, XIA Yuan you. Fuzzy Hierarchy Analysis on Decision Making of Rockmass Slope Treatment Based on Entropy Weight [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1117-1120. (in Chinese))
- [9] Bates J M, Granger C W J. Combined Forecasting [J]. Journal of Operational Research, 1969, 20: 451-468.
- [10] 李秀珍, 孔纪名, 王成华. 最优加权组合模型在滑坡变形预测中的应用[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(2): 53-57. (LI Xiu zhen, KONG Ji ming, WANG Cheng hua. Application of Combined Model with Optimum Weight in Prediction of Landslide Deformation [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(2): 53-57. (in Chinese))
- [11] 朱忠荣, 蔡启龙, 寇国祥. 组合预测模型在土石坝沉降分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2005, 3(1): 53-57. (ZHU Zhong rong, CAI Qi long, KOU Guo xian. Application of Combined Forecasting Model in Settlement Analysis of Earthrock Fill Dam [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2005, 3(1): 53-57. (in Chinese))
- [12] 何薪基, 田斌, 周建军. 最优权组合模型与参数优化在安全监测分析中的应用[J]. 大坝观测与土工测试, 2000, 24(5): 24-33. (HE Xin ji, TIAN Bin, ZHOU Jian jun. Application of Combined Model With Optimum Weight and Parametric Optimization Method to Safety Monitoring Analysis [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2000, 24(5): 24-33. (in Chinese))
- [13] 沙定国. 实用误差理论与数据处理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993. (SHA Ding guo. The Practical Error Theory and Data Processing [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993. (in Chinese))
- [14] 张友兰, 周爱民. 最优加权组合预测及其应用[J]. 数量经济技术经济研究, 1997, (10): 66-68, 75. (ZHANG You lan, ZHOU Ai ming. Combined Model with Optimum Weight and Application [J]. The Journal of Quantitative & Technica Economics, 1997, (10): 66-68, 75. (in Chinese))
- [15] 周亚非. GM(1, 1) 的 MATLAB 实现及其应用[J]. 长春师范学院学报(自然科学版), 2010, 29(1): 32-35. (ZHOU Ya fei. The Implementation and Application of GM(1, 1) Using MATLAB [J]. Journal of Changchun Normal University (Natural Science), 2010, 29(1): 32-35. (in Chinese))