

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.02.07

基于关联度的滑坡位移特征分析

魏占玺¹, 董建辉^{2,3}

(1. 青海省环境地质勘查局, 青海 西宁 810007; 2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 四川省地质工程勘察院, 四川 成都 610072)

摘要: 关联度矩阵既是决策的原始依据, 又是系统优势分析的基础。在变形观测数列分析中, 它的一个重要作用就是选择变形模型的最佳因子子集。根据空间关联度矩阵内各元素的大小及变化规律对滑坡空间受力特点及变形性质进行分析, 通过关联度来分析判断该滑坡各监测点所处区域的同步性发展过程, 进一步丰富滑坡变形破坏机制研究的手段, 对滑坡治理以及预测预报则具有重要的理论和实际意义。本文通过东拉滑坡的地表位移监测数据进行整理分析, 建立关联度模型并计算出该滑坡地表位移监测点的关联度, 根据关联度分析说明该滑坡的中后部同步性较强, 力学联系较紧密, 是滑坡下滑动力来源; 滑坡前缘同步性较差, 力学联系较差, 也是该滑坡失稳的最关键区域, 从而进一步加深了对该滑坡变形破坏机制分析和发展趋势的认识。

关键词: 关联度; 矩阵; 东拉滑坡; 地表位移监测点; 同步性

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)02-0049-06

Analysis landslide displacement characteristics based on correlation degree

WEI Zhanxi¹, DONG Jianhui^{2,3}

(1. Qinghai Geological Survey, Xining, Qinghai 810007, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: Correlation matrix based on both the original decision, and is the basis of system benefits analysis. The number of columns in the deformation observation analysis, it is an important factor role is to select the best subset deformable model. Depending on the size and the variation of the elements of the space correlation matrix of landslide spatial mechanical properties and deformation characteristics of the analysis, you can analyze and judge the synchronization of the development process of the landslide monitoring points at the area according to relevancy, thus enriching the landslide deformation Failure of the mechanism means, which has targeted forecast of Landslide and have important theoretical and practical significance. In this paper, the East pulled by landslides surface displacement monitoring data consolidation analysis, correlation of the model and calculate the degree of association of the landslide surface displacement monitoring points, based on correlation analysis shows that the decline in the rear of the synchronization is strong, compared Mechanics close, falling power source landslide; landslide synchronization is poor, poor mechanical contact, also is the most critical area of the landslide, thus further deepening of the landslide deformation and failure mechanism analysis and understanding trends.

Keywords: correlation degree; matrix; Dongla landslide; surface displacement monitor; synchronization

0 引言

地质领域实质上是一个灰色系统。目前国内很多

学者将灰色系统应用于相关地质领域, 例如: 郭永海等人采用灰色关联度分析方法, 分析了地下水动力环境演化的影响因素^[1]; 戚蓝等人在实测地应力资料少的

收稿日期: 2015-08-08; 修订日期: 2015-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102190)

第一作者: 魏占玺(1977-), 男, 青海平安人, 学士, 工程师, 主要从事地质灾害调查以及治理的研究工作。E-mail: 911107214@qq.com

情况下运用系统工程灰色理论进行地应力场分析^[2];汪洋等人用灰色关联模型对滑坡的影响因子进行敏感性分析^[3];谢峰等人所提出的二阶残差权重修正 GM(1,1)模型大幅提高了预测精度和适应性^[4];郑明新等人以现场实测资料为依据,将 GM(1,1)灰色预测理论应用于桩顶位移预测^[5];陆显超应用 T-S 模糊神经系统的模糊系统和模糊逻辑,结合神经网络的自适应性,对灰色关联分析的数据取值以及取值区间进行重新定义和划分^[6];任风分析了地下水动力环境演化的影响因素影响因子与水位孔地下水位的关联程度,根据此关系建立了 MGM(1,n)模型^[7];朱连根建立了岩爆预测的灰色关联系统分析模型^[8]。

以往位移监测研究主要集中于滑坡所处的发育阶段,进而确定该滑坡目前所处的变形阶段。但是很少看出滑坡不同位移监测点的位移-时间曲线间的“关联度”的大小可直接反映该滑坡的下滑性质。对滑坡空间特征值与斜坡灾害间的联系缺乏定量描述,尤其是滑坡空间特征值的意义研究不足,因此也就无法将其与斜坡灾害空间预测联系起来。

本文以四川省凉山州木里县东拉滑坡为例,首先建立该滑坡关联性模型,依据滑坡位移监测点进行关联性计算和分析,依据分析对各个滑坡监测点进行分区,对滑坡体的位移趋势分析、稳定性动态评价、治理工程措施具有一定的适用性和指导意义。

1 关联度分析原理

灰色系统关联性实质上是曲线间几何形状的差别^[9],关联度是事物之间、因素之间关联性的“量度”^[10]。它根据评价因素之间的发展态势的相似或相异程度,来衡量评价因素之间的关联程度^[11-12]。它定量地描述了系统发展过程中,因素之间相对变化的情况。在系统发展过程中,如果两个因素变化的态势基本一致,即同步变化程度较高,则可以认为两者关联度较大,反之,两者关联度就小^[13]。一般来说,变形-时间曲线的关联度越大,滑坡整体性越强,滑动过程中滑坡体的挤压拉伸作用较小,反之,滑动整体性差,滑坡过程中滑坡体发生解体。如果发现滑坡的不同部位的变形-时间曲线间关联度很小,则说明该滑坡可能要发生多级滑动^[14]。本文以灰色系统关联度理论为基础,结合滑坡实例进行分析判断该滑坡各监测点所处区域的同步变形过程。

(1) 原始数据的生成

在变形监测中,各个位移监测点位移量差异较大,

为了便于直接比较因素或数列之间的关系,常常要对数列进行无量纲生成。在变形分析中,根据数列数值变化特征,一般选用均值化生成。

$$\begin{aligned} X_m^{(0)}(i) &= [\bar{X}_m^{(0)}(1)/\bar{X}, \bar{X}_m^{(0)}(2)/\bar{X}, \dots, \bar{X}_m^{(0)}(n)/\bar{X}] \\ &= [\bar{X}_m^{(0)}(1), \bar{X}_m^{(0)}(2), \dots, \bar{X}_m^{(0)}(n)] \end{aligned}$$

$$\text{其中 } \bar{X} = \sum_{i=1}^n \bar{X}_m^{(0)}(i)/n$$

(2) 计算关联系数

考虑 m 个时间序列:

$$\{X_1^{(0)}(i)\}, i=1, 2, \dots, N_1$$

$$\{X_2^{(0)}(i)\}, i=1, 2, \dots, N_2$$

$$\{X_3^{(0)}(i)\}, i=1, 2, \dots, N_3$$

$$\dots\dots\dots$$

$$\{X_m^{(0)}(i)\}, i=1, 2, \dots, N_m$$

式中: $N_1, N_2, \dots, N_m$ 均属于自然数集,且不一定相等,这 m 个序列代表 m 中因素。另外,再给定时间序列 $\{X_0^{(0)}(i)\}, i=1, 2, \dots, N$, 称为母序列,相应地, $\{X_k^{(0)}(i)\}, k=1, 2, \dots, m$, 被称为子序列。研究这 m 个子序列与母序列 $\{X_0^{(0)}(i)\}$ 的关联程度 $\gamma_{0i}(k)$ 。

$$\gamma_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta_{\max}}$$

$$\gamma_{0i} = \sum_{k=1}^m \gamma_{0i}(k)/n$$

其中: $\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)| (1 \leq i \leq m)$; $\Delta_{\min} = \min \{\Delta_{0i}(k)\}$; $\Delta_{\max} = \max \{\Delta_{0i}(k)\}$ 。

式中: $\Delta_{0i}(k)$ ——k 时刻两比较数列的绝对差;

$\Delta_{\min}$ ——m 个子数列在各个时刻的距离最小值

$\Delta_{0i}(\min) = \min \{|x_0(k) - x_i(k)|\}$ (因比较数列生成后存在同一起点或交点,故实际计算时取 $\Delta_{\min} = 0$);

$\Delta_{\max}$ ——m 个子数列在各个时刻的距离最大值

$\Delta_{0i}(\max) = \max \{|x_0(k) - x_i(k)|\}$;

ρ ——分辨系数,用来削弱 $\Delta_{\max}$ 数值过大而失真的影响,提高关联系数之间的差异显著性,使用时根据经验取 0.5。

(3) 排关联序。在关联分析中,各因素间关联度数值大小意义不大,关键是比较子数列相对母数列的大小。因此,关联序就是将 m 个子数列相对于同一个母数列的关联度,按从大到小的顺序排列起来的一组数列。它直观地反映了各个子数列相对于同一母数列的关联程度,即优劣关系。当 $\gamma_{0a} > \gamma_{0b}$ 时,表示子数列 $X_a^{(0)}$ 对于母数列 $X_0^{(0)}$ 的关联程度,要优于子数列 $X_b^{(0)}$ 对于母数列 $X_0^{(0)}$ 的关联程度。

(4) 关联矩阵。设有 n 个母数列: $y_1^{(0)}, y_2^{(0)}, \dots, y_n^{(0)} (n > 1)$, 相应地有 m 个子数列: $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_m^{(0)} (m > 1)$, 则各子数列对于母数列有关联度:

$$\gamma_{i1}, \gamma_{i2}, \dots, \gamma_{im} \quad i=1, 2, \dots, n$$

将 γ_{ij} 做适当的排列, 得关联度矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1m} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nm} \end{bmatrix}$$

(5) 关联度矩阵既是决策的原始依据, 又是系统优势分析的基础。在变形观测数列分析中, 它的一个重要作用就是选择变形模型的最佳因子子集合。根据空间关联度矩阵内各元素的大小及变化规律对滑坡空间受力特点及变形性质进行分析。一般规律是: ①如果出现最弱序列, 即除本身的关联度之外, 其关联度值均属于本行或本列最小值, 则说明最弱序列所代表监测点与其他部位的点发生了差异位移, 该部位的变形一般以松脱或多级滑移为主; ②如出现最强序列, 即除本身的关联度外, 其关联度值均是本行或本列最大值, 则表明该序列所代表监测类与其他点的变形同步性强, 力学联系紧密。变形主要以下滑压缩变形为主, 下滑动力源也往往处于该监测点附近。③如果空间关联

度矩阵各行、列元素大小没有优势特征, 则表明该斜坡或为均匀滑坡斜坡, 不产生明显的拉伸和挤压变形, 其滑坡形式为均匀下滑型; 表明该斜坡所处变形尖端为蠕动变形阶段, 斜坡各部位还没有出现明显的差异变形和趋势滑移。

2 滑坡实例应用

2.1 工程概况

东拉滑坡位于四川省凉山州木里县水洛乡东拉村 2 组。前缘高程 2110 m, 后缘高程 2340 m, 相对高差 230 m。滑体主要为碎石土, 下覆凝灰岩、硅质灰岩及局部板岩等组合, 岩层产状为 $42^\circ \sim 58^\circ \angle 50^\circ \sim 86^\circ$ 。滑坡平面似短舌状, 纵向长约 400 m, 横向宽约 740 m, 滑体平均厚度约 19 m, 滑坡体体积约 $600 \times 10^4 \text{ m}^3$, 整体滑动方向 65° , 属大型土质滑坡, 滑坡右侧区域持续变形更强烈, 为强变形区, 纵向长约 330 m, 横向宽约 415 m, 斜坡体平均厚度约 19 m, 体积约 $280 \times 10^4 \text{ m}^3$ [15-16]。安全监测主要集中布设在强变形区内, 其滑坡体上监测手段主要为 1) 测斜孔监测; 2) 地表位移监测; 3) 孔隙水压力监测 (图 1)。本文针对该地表位移监测数据进行重点分析和研究, 由于 TPdlhp-6、TPdlhp-9 在前期观测过程中遭到破坏, 故此次未进行分析 (表 1)。

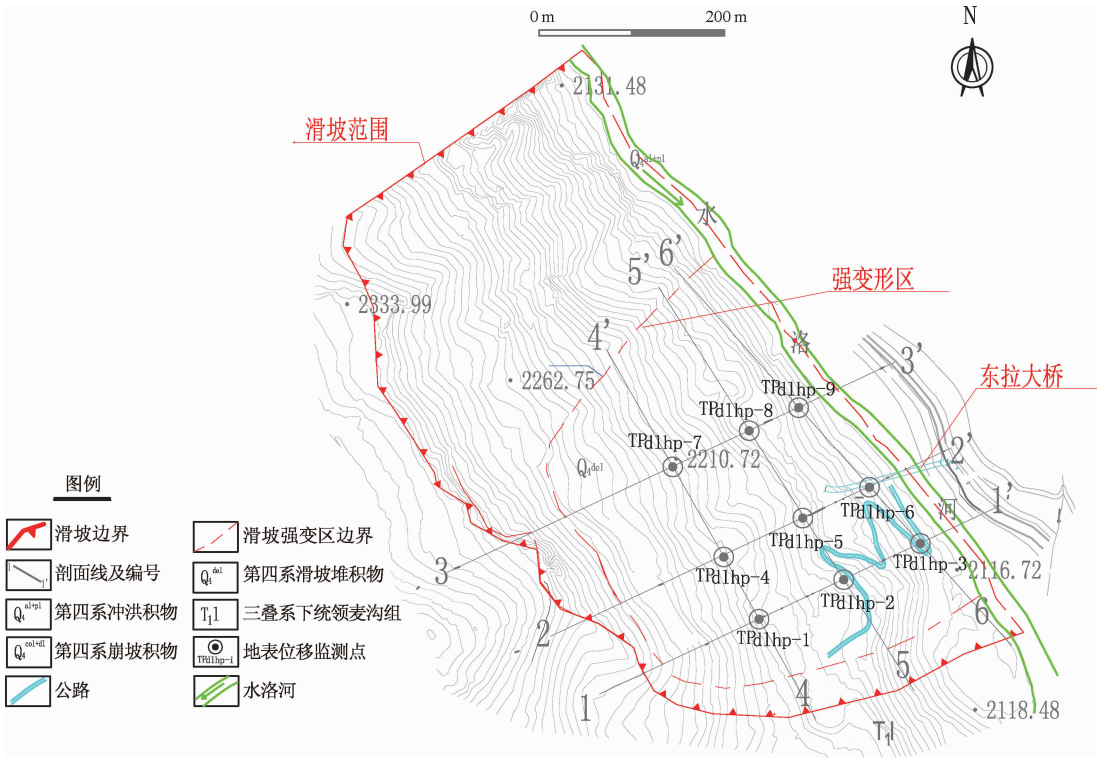


图 1 木里县水洛乡东拉滑工程地质平面图
Fig.1 Plan of the Dongla landslide in Shuiluo town of Muli city

表 1 地表位移监测点位移速率一览表 (mm/d)
Table 1 List of displacement rate of surface displacement monitor (mm/d)

观测时间	TPdlhp-1	TPdlhp-2	TPdlhp-3	TPdlhp-4	TPdlhp-5	TPdlhp-7	TPdlhp-8
12/11/06	0	0	0	0	0	0	0
12/11/15	392.33	106.70	24.27	512.57	241.27	578.10	456.67
12/12/15	1039.25	302.55	91.41	1424.70	661.61	1607.56	1309.47
13/01/16	662.42	193.77	57.00	1046.68	448.54	1154.87	973.71
13/02/20	565.78	161.71	58.62	819.10	350.50	897.73	735.74
13/03/15	206.09	52.47	16.93	316.46	129.94	346.72	281.70
13/04/15	179.52	37.26	15.76	255.87	94.86	276.22	185.47
13/05/11	165.52	36.91	14.60	220.96	86.25	260.27	169.94
13/06/15	129.82	38.92	11.58	208.59	85.75	216.37	174.55
13/07/15	385.50	74.61	20.02	273.55	99.78	299.48	351.29
13/08/15	490.37	137.87	25.18	827.79	345.33	922.02	615.73
13/09/18	470.14	110.79	27.17	737.59	237.56	729.81	589.64
13/10/16	330.96	92.58	10.69	415.70	182.51	445.82	333.74
13/11/14	142.12	29.51	2.41	186.73	76.68	205.14	154.96
13/12/15	60.54	25.23	11.47	72.36	33.44	80.36	55.83
14/01/17	60.60	25.27	11.64	72.36	33.50	80.36	55.83
14/02/15	19.20	9.14	3.58	25.48	10.42	25.62	14.07
14/03/15	19.22	9.17	3.62	25.48	10.44	25.63	14.08
14/04/15	34.10	-1.91	7.12	34.43	27.71	27.48	25.23
14/05/16	-6.27	24.54	-1.63	-5.18	-11.11	1.20	-0.90
14/06/12	39.93	-1.03	5.52	27.80	12.38	25.87	12.74
14/07/12	4.32	9.56	2.70	22.01	3.67	32.68	12.61
14/08/16	338.64	69.92	45.67	354.37	149.45	338.26	311.40
14/09/15	785.04	202.25	84.06	916.82	367.10	955.23	765.88
14/10/15	358.69	76.68	19.01	445.99	174.76	448.30	358.72
14/11/16	350.89	71.02	16.62	276.55	129.87	402.03	319.74
14/12/15	50.97	-3.09	-10.87	122.73	12.83	71.45	21.16
15/01/17	71.55	33.44	14.55	84.89	48.40	89.33	98.15
15/02/15	40.41	7.54	15.84	48.45	15.11	30.84	16.20
15/03/16	40.52	7.57	15.86	30.26	15.15	30.85	16.21

2.2 关联度模型建立 TPdlhp-3, TPdlhp-4, TPdlhp-5, TPdlhp-7, TPdlhp-8 地表
根据 GM(1,1) 模型,可算出 TPdlhp-1, TPdlhp-2, 位移观测曲线间的关联度。

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0.8583 & 0.7411 & 0.9205 & 0.7810 & 0.7724 & 0.7762 \\ 0.8660 & 1 & 0.7234 & 0.8559 & 0.7276 & 0.7296 & 0.7298 \\ 0.7160 & 0.7099 & 1 & 0.6928 & 0.6350 & 0.6122 & 0.6047 \\ 0.9219 & 0.8714 & 0.7326 & 1 & 0.7903 & 0.80996 & 0.8086 \\ 0.9165 & 0.8674 & 0.7433 & 0.7891 & 1 & 0.7829 & 0.7846 \\ 0.9083 & 0.8628 & 0.7271 & 0.8093 & 0.7837 & 1 & 0.8059 \\ 0.9025 & 0.8657 & 0.7266 & 0.8126 & 0.7901 & 0.8102 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3 结算结果分析 示如下:

从上面地表位移监测点的关联矩阵可以看出第三
列 (TPdlhp-3) 和第一列 (TPdlhp-1) 关联度分别为整个
关联矩阵中最弱序列和最强序列,即除本身的关联度
之外,其他关联度值均属于本行最大值和最小值,可表

$$\gamma(i,1) = [1 \quad 0.8660 \quad 0.7160 \quad 0.9129 \quad 0.9165$$

$$0.9083 \quad 0.9025]^T$$

$$\gamma(i,3) = [0.7234 \quad 1 \quad 0.7236 \quad 0.7433 \quad 0.7271$$

$$0.7271 \quad 0.7266]^T$$

TPdlhp-1 (位于东拉滑坡强变形区后部) 位移速率观测曲线与其他地表位移监测点曲线关联度最强, 则表明该序列所代表监测类与其他点的变形同步性强, 力学联系紧密。变形主要以下滑压缩变形为主, 下滑动力源也在该监测点附近。

TPdlhp-1 与 TPdlhp-3 (位于东拉滑坡强变形区前缘) 位移速率观测曲线与其他地表位移监测点曲线关联度最小, 表明了东拉滑坡前缘点与中后部点的位移同步性较弱, 发生了一定的差异位移。产生这种差异性位移的原因, 一是前缘与中后缘的力学联系很弱, 即产生了下滑推力的分异, 从而产生压缩; 其二是由于坡体中后部的压缩变形过大而造成与前缘监测点位移速率的差异。TPdlhp-3 监测点区域是该滑坡失稳的最关键区域。

TPdlhp-4、TPdlhp-7 (位于东拉滑坡强变形区后缘)、TPdlhp-2 (位于东拉滑坡强变形区中后部) 与 TPdlhp-1 的曲线关联度偏大, 表明了该位移监测点区域的同步性较强, 力学联系较紧密, 是滑坡推力产生的部位。

TPdlhp-5、TPdlhp-8 (位于东拉滑坡强变形区中前部) 与 TPdlhp-1 曲线关联度偏小, 表明了该位移监测点区域的同步性较弱, 力学联系较弱, 也发生了一定的差异位移, 是该滑坡失稳的较为关键区域。

选取 1-1' 剖面的监测点进行重点剖析, 其中 TPdlhp-1、TPdlhp-2、TPdlhp-3 各代表了滑坡后部、中部、前缘。

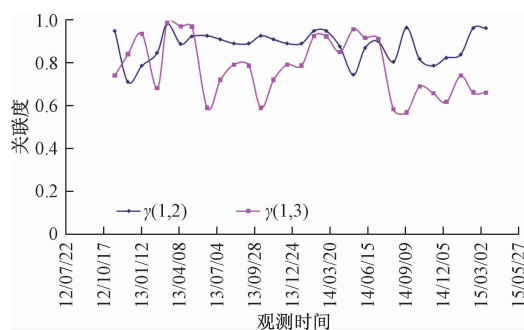


图2 $\gamma(1,2)$ 、 $\gamma(1,3)$ 关联系数-时间曲线图

Fig.2 Correlation coefficient-time curve of $\gamma(1,2)$ 、 $\gamma(1,3)$

从图2可以看出, $\gamma(1,2)$ 关联度是 0.8819, 其关联系数整体上随着时间一直都较大, 说明 TPdlhp-1 与 TPdlhp-2 的同步性较好, 力学联系较紧密; $\gamma(1,3)$ 关联度是 0.7790, 其关联系数整体上随着时间一直都较小且波动较大, 说明 TPdlhp-1 与 TPdlhp-3 的同步性较弱, 力学联系不太紧密, 为该滑坡失稳关键区域。说明

该滑坡的中后部同步性较强, 力学联系较紧密, 是滑坡下滑动力来源; 滑坡前缘同步性较差, 力学联系较差, 也是该滑坡阻滑力最大的地方。

3 结论

(1) 关联度矩阵既是决策的原始依据, 又是系统优势分析的基础, 它能提供变形模型的最佳因子集合。丰富了滑坡变形机制研究手段, 对滑坡治理以及预测预报都具有重要的理论和实际意义。

(2) 通过滑坡实例可知, 东拉滑坡前缘与中后部的位移同步性较弱, 前缘与中后部的力学联系很弱, 即产生了下滑推力的分异, 从而产生压缩。东拉滑坡中后部变形同步性强, 力学联系紧密, 变形主要以下滑压缩变形为主, 下滑动力源也在该滑坡中后部。

参考文献:

- [1] 郭永海, 张作辰, 沈照理, 等. 河北平原地下水动力环境演化影响因素的关联度分析[J]. 工程地质学报, 1995, 3(3): 62-65.
GUO Yonghai, ZHANG Zuochen, SHEN Zhaoli, et al. Corelativity analysis of affect factors in evolution hydrodynamic environment in Hebei plan[J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 3(3): 62-65.
- [2] 戚蓝, 崔激, 熊开智, 等. 灰色理论在地应力场分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1547-1550.
QI Lan, CUI Wei, XIONG Kaizhi, et al. Application of grey theory to analysis of in-situ stress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1547-1550.
- [3] 汪洋, 殷坤龙, 安关峰. 滑坡敏感因子的灰色关联分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 91-93.
WANG Yang, YIN Kunlong, AN Guanfeng. Grey correlation analysis of sensitive factors of landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 91-93.
- [4] 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.
XIE Feng, ZHU Luming, WANG Lizhong. Modified grey system forecasting model and its application for analyzing information of landslide monitory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4099-4105.
- [5] 郑明新, 殷宗泽, 吴继敏. 抗滑结构稳定时间的预测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10):

- 2150-2154.
- ZHENG Mingxin, YIN Zongze, WU Jimin. New prediction method of stability time for anti-slide structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2150-2154.
- [6] 陆显超, 龚民, 汤连生, 等. 基于 T-S 模糊神经系统的灰色关联分析方法—以广东省滑坡危险性评价为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(3): 143-146.
- LU Xianchao, GONG Min, TANG Liansheng, et al. Improved grey association analysis method based on T-S fuzzy neural network model—application in evaluating of landslide hazards in Guangdong Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(3): 143-146.
- [7] 任凤, 赵贤威, 杨永文. 基于灰色模型在大坪滑坡中的预测[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(5): 627-630.
- REN Feng, ZHAO Xianwei, YANG Yongwen. Forecasting of daping landslide based on the grey model [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011, 8(5): 627-630.
- [8] 朱连根, 黄曼. 岩爆预测的灰色关联系统分析与评价[J]. 工程地质学报, 2011, 19(5): 664-668.
- ZHU Liangen, HUANG Man. Analysis and evaluation of grey incidence system for rock burst prediction[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(5): 664-668.
- [9] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1985.
- DENG Julong. Grey Cybernetics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1985.
- [10] 张永伟, 李世华, 冯克印, 等. 裂隙岩溶含水系统的灰色关联度分析——以山东鲁能运河发电有限公司供水水源地为例[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(3): 47-50.
- ZHANG Yongwei, LI Shihua, FENG Keyin, et al. Grey relation analysis of fissure-karst water-bearing system—a case study of the source of water supply of SEPCO Canal [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(3): 47-50.
- [11] 刘海松, 范敏, 倪万魁, 等. 灰色关联度法在公路地质灾害危险性评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(3): 24-32.
- LIU Haisong, FAN Min, NI Wankui, et al. Application of the method of gray correlation in risk evaluation of highway geological hazard [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(3): 24-32.
- [12] 王鲁男, 晏鄂川, 李兴明, 等. 沟谷空间特征与斜坡灾害发育关联性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(2): 97-102.
- WANG Lunan, YAN Echuan, LI Xingming, et al. Correlation analysis on spatial characteristics of gully and slope disasters [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(2): 97-102.
- [13] 张军, 刘祖强, 邓小川, 等. 滑坡监测分析预报的非线性理论和方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- ZHANG Jun, LIU Zuqiang, DENG Xiaochuan, et al. Landslide deformation monitoring analysis and prediction based on nonlinear theory and method[J]. Beijing: China Water&Power Press, 2010.
- [14] 贺可强, 阳吉宝, 李显忠, 等. 堆积层滑坡预测预报及其防治[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
- HE Keqiang, YANG Jibao, LI Xianzhong, et al. Prediction and prevention of accumulative landslide [J]. Beijing: Seismological Press, 1996.
- [15] 董建辉, 唐晓玲, 舒中潘, 等. 木里县水洛乡东拉滑坡复活机制及稳定性研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(S1): 122-129.
- DONG Jianhui, TANG Xiaoling, SHU Zhongpan, et al. Study on mechanism of reactivation and its stability in Dongla landslide, Shuiluo town, Muli city [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(S1): 122-129.
- [16] 董建辉, 魏良帅, 唐然, 等. 木里县水洛乡东拉滑坡安全监测及变形破坏分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 543-547.
- DONG Jianhui, WEI Liangshuai, TANG Ran, et al. Safety monitoring and deformation damage of Dongla landslide in Shuiluo of Muli county [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science&Technology, 2015, 13(3): 543-547.