

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.01.06

三峡库区某滑坡变形影响因素的灰色关联分析

代贞伟¹, 魏云杰², 吕 韬³, 罗建华³, 姚 望³

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081;
3. 重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队, 重庆 401121)

摘要: 有效利用滑坡监测资料掌握滑坡变形特征及其影响因素的主次关系是开展滑坡变形预测及工程治理的重要前提。因此, 以三峡库区某滑坡为研究对象, 基于滑坡位移监测、降雨量和库水位变化相关资料, 对滑坡变形特征进行分析, 研究表明该滑坡的变形与库水位下降及集中降雨具有明显的相关性; 在此基础上, 以滑坡位移变形速率为系统特征变量, 选取当月降雨量、前两月降雨量、月库水位下降量、库水位下降速率为相关因素变量, 运用灰色关联分析方法研究了系统特征变量与相关因素变量之间的响应程度, 由灰色关联度的分析结果可知, 前两月降雨量与当月降雨量、与该滑坡变形速率的响应程度最高, 该滑坡变形的最大影响因素为降雨量, 其次为库水位下降。鉴于此, 建议进一步完善滑坡区排水系统, 采取相应的工程防治措施。

关键词: 三峡库区; 顺层基岩滑坡; 变形特征; 影响因素; 灰色关联

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)01-0032-06

Deformation influence factors of a landslide in Three Gorges Reservoir area based on grey correlation analysis

DAI Zhenwei¹, WEI Yunjie², LYU Tao³, LUO Jianhua³, YAO Wang³

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. China Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100081, China;
3. Nanjiang Hydrogeological & Engineering Geology Brigade, Chongqing 401121, China)

Abstract: The landslide deformation characteristic and the primary and secondary relations of influencing factors, based on the effective utilization of landslide monitoring data, is the important prerequisite of landslide deformation forecast and engineering control measures. Taking a landslide in three gorges reservoir area for the research object, based on the related information of landslide displacement monitoring, rainfall and water level change, characteristics of landslide deformation is analyzed, research shows that the landslide deformation has intense correlation with water level decline and concentrated rainfall. Considering the landslide displacement deformation rate as the system characteristic variable, and selecting the monthly rainfall, two months rainfall, the drawdown of reservoir water level per month, water level decline rate as related factors variables, the response degree between the system characteristic variable and the related factors variables is studied by the method of grey correlation analysis. The gray correlation analysis shows that variables of the two months rainfall and monthly rainfall have the highest response degree with the landslide deformation rate, the biggest influence

收稿日期: 2015-03-12; 修订日期: 2015-04-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑项目(2012BAK10B01); 国家自然科学基金项目(41172254); 中国地质调查局基金项目(1212011220124)

第一作者: 代贞伟(1986-), 男, 安徽寿县人, 地质工程专业, 博士研究生, 主要从事工程地质与地质灾害研究工作。E-mail: daizhenwei@163.com

通讯作者: 魏云杰(1973-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事地质灾害、岩土工程等相关研究工作。E-mail: wyj1973@126.com

factor of landslide deformation is rainfall, followed by water level decline. In view of this, it is suggested to strengthen the landslide drainage system, and to take corresponding engineering measures.

Keywords: Three Gorges Reservoir; bedding rock landslide; deformation characteristics; influence factors; grey correlation

0 引言

滑坡是一个复杂的地质综合体,其位移变形除了与基础地质条件相关之外,更取决于诱发影响因素的动态作用,而滑坡变形的影响因素各异,处于滑坡变形破坏不同阶段,各因素的影响程度也呈现出动态变化的特征^[1-2]。如何定量反应各动态影响因素对滑坡变形的影响程度是进行滑坡变形预测及防治工程的重要前提。

滑坡变形及其影响因素的监测数据是两类相对独立的随机样本,难以用一般的解析方法描述其响应关系。目前,滑坡变形分析研究主要集中在依据滑坡监测信息资料,综合运用时间序列分析、灰色系统理论、人工神经网络、遗传算法、集对分析、支持向量机等一种或多种方法或理论对滑坡未来某时间段变形发展趋势进行预测^[3-8]。而对滑坡变形速率与其影响因素的相关性分析,已有的文献成果以定性的分析方法为主,认为滑坡变形速率与库水位的升降、降雨量等存在一定的相关性,但运用相应的数学理论方法进行定量分析的研究成果较少见^[9-14]。而灰色关联分析方法可以有效的处理系统在发展过程中各影响因素间相对变化的动态情况,明确系统中各因素间主次关系。为此,本文选取了三峡库区某滑坡为研究对象,以滑坡变形监测数据为基础对滑坡变形特征进行了定性分析,并应用灰色关联方法定量分析其位移变形速率与库水位的升降、降雨之间响应程度。

1 滑坡工程地质概况

该滑坡位于三峡库区长江南岸(图1),其平面形态呈斜歪倒立古钟状,前宽后窄,滑坡前部沿长江河道处最宽,达1100 m,滑坡后缘则仅宽580 m左右,滑体最大纵长约1800 m,面积约 $1.78 \times \text{km}^2$;后缘高程约705 m,前缘高程约95 m,平均坡度为 25° ,陡缓相间,总体呈折线型斜坡地形;滑体平均厚度50.8 m,体积约 $9000 \times 10^4 \text{ m}^3$,主滑方向 $340^\circ \sim 350^\circ$,属于巨型顺层基岩滑坡。

滑坡区位于故陵向斜扬起端附近东南翼,无区域性大断裂通过,亦无小断层通过。出露地层岩性主要

为上覆第四系全新统残坡积层($Q_4^{\text{dl+el}}$)、冲洪积层($Q_4^{\text{al+pl}}$)、滑坡堆积层(Q_4^{del})及下伏侏罗系下统珍珠冲组(J_{1z})基岩组成。其滑床主要由侏罗系中下统珍珠冲组下段(J_{1z})灰-深灰色、中-厚层状、细粒-中粒砂岩、局部夹炭质页岩或灰-深灰色粘土岩组成,滑床面的前部埋深约130 m,中部埋深约50 m,出露于滑坡后部,滑带为灰褐色-灰黑色粘土岩夹页岩,层厚0.5~3.2 m,其中页岩层厚0.2~0.5 m。滑坡区地下水主要为赋存于珍珠冲组砂岩之中的基岩裂隙水,没有统一的地下水位,地下水受大气降水补给影响较明显,以潜流的形式向长江运移排泄。

滑坡区地表植被发育,主要为柑橘种植林地。滑坡区域冲沟较发育,切割深度3~6 m,大部分地表水顺冲沟排泄。此外,该滑坡具有多级多期次滑动特点,主要表现为三级滑动形式。

2 滑坡变形影响因素分析

受三峡工程试验性蓄水影响,该滑坡近年来发生了较大变形迹象。据不完全统计,滑坡区域已发现因蓄水诱发的大小裂缝超过160条;每年雨季滑坡各区域均有不同程度的变形迹象。因此,与大多数水库性滑坡变形特征类似,库水位波动及降雨是引起滑坡位移速率变化的主要环境诱发因素。

2.1 位移变形速率与降雨量之间关系

基于滑坡的位移监测数据,选取典型监测点MJ05、MJ06、MJ07、MJ08、TN03(图1),对其位移变形速率与降雨量、库水位变化进行了统计分析,其位移变形速率与降雨量之间的关系见图2。

由图2分析可知该滑坡区域年降雨量的70%主要分布在5~9月,具有集中降雨时域分布特征,受集中降雨影响,滑坡位移变形速率呈现出一定的变化规律,即滑坡位移变形速率峰值或突变点均出现在降雨量达到峰值或持续集中降雨时段,但具有一定延迟性,例如2012年6月降雨量达到了峰值,除TN03以外的监测点的变形速率于7月出现突变点。由此表明滑坡位移变形速率与降雨量具有较明显的相关性。

究其原因,该滑坡滑体物质的透水性较好,集中降雨将使大量降水经地表渗透转入滑体中,滑体部分饱

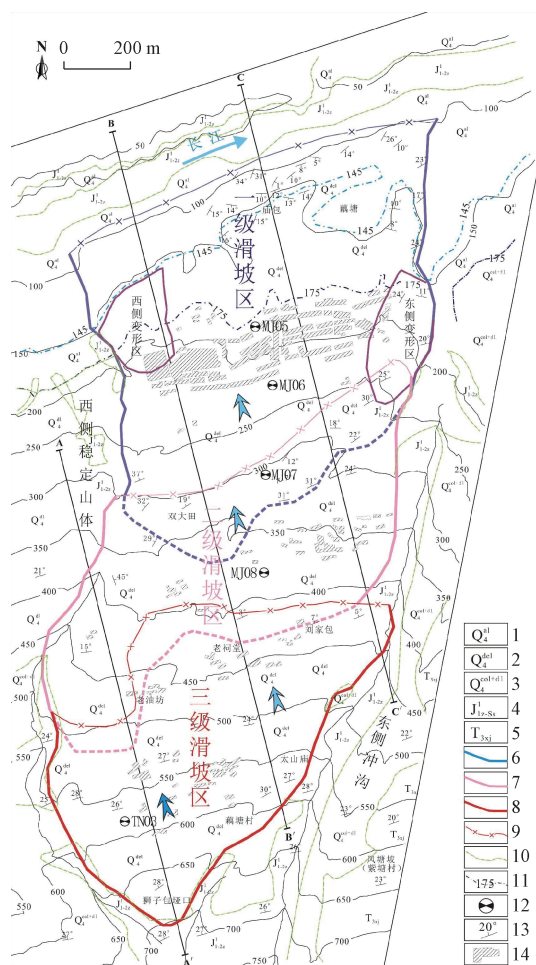


图1 滑坡工程地质平面图

Fig.1 Scheme of engineering geology of landslide

1—第四系全新统冲积层;2—第四系全新统崩积层;3—第四系全新统滑坡堆积层;4—侏罗系下统珍珠冲组砂岩;5—三叠系上统须家河组;6—一级滑坡边界;7—二级滑坡边界;8—三级滑坡边界;9—滑坡剪出口;10—地层分界线;11—水位线;12—地表 GPS 监测点及编号;13—岩层产状;14—房屋建筑。

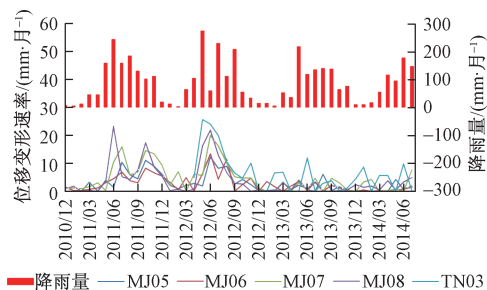


图2 滑坡位移变形速率与降雨量变化关系

Fig.2 Correlation curves of displacement deformation rate and Rainfall distribution change with time of landslide

水,从而增加滑坡体的自重和下滑力;此外,滑带为炭质粘性土层相对隔水,集中降雨将使水在该层面上富

集,使泥化物含水量大大增加,软化滑带土,使抗滑强度降低,滑坡体易发生变形。

2.2 位移变形速率与库水位变化之间关系

由于三峡水库运行期间的库水位采用枯水期和汛期不同的调度方案,即每年6~9月汛期期间,水位降低至防洪限制水位145 m左右;9月中旬至10月底水库蓄水,库水位逐步升高至175 m,并保持高水位运行到12月份,次年1月份库水位开始大幅度的缓慢下降,直到6月初降至最低水位145 m,因此,库水位变化也呈现周期性升降规律,位移变形速率与库水位变化之间关系见图3。

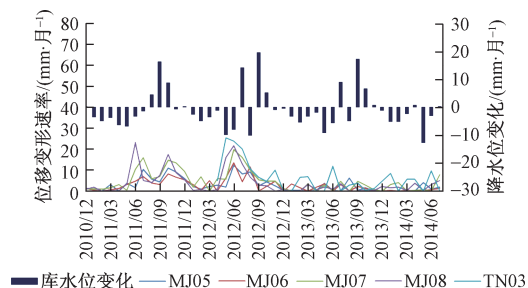


图3 滑坡位移变形速率与库水位变化关系

Fig.3 Correlation curves of displacement deformation rate and reservoir water level change with time of landslide

由图3分析可知滑坡位移变形速率的峰值或突变点通常出现在库水位持续下降或下降速率达到最大期间,但具有一定的延迟性,例如2011年6月份库水位下降速率达到最大,但部分监测点的位移变形速率峰值出现在7月。由此可知滑坡的位移变形速率与库水位下降具有一定的相关性。其主要原因在于库水位的快速持续下降导致坡体内外地下水落差而形成一定的渗透压力,渗透力指向坡体外侧,促进滑坡变形加剧。

3 滑坡变形及影响因素的灰色关联分析

灰色关联法的基本原理是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密,曲线越接近,相应序列之间的灰关联度越大,反之越小。简而言之,灰色关联法是通过计算系统特征变量序列与相关因素变量序列之间的关联度,建立灰关联矩阵,利用优势分析原则,得出各影响因素的顺序,以确定主要影响因素^[15]。

3.1 系统特征变量及相关因素变量

相关专家学者对于降雨量与滑坡关系的研究表明,前一到两个月的有效降雨量对滑坡的变形有明显的促进作用^[16]。据上述滑坡变形特征分析,并参考大量的水库型滑坡变形研究成果,选取滑坡位移变形速

率为系统特征变量,即参考序列;选取当月降雨量、前两月降雨量、月库水位下降量、库水位下降速率为相关因素变量。

3.2 灰色关联度计算分析过程

3.2.1 构建灰色关联指标矩阵

假设滑坡变形灰色系统具有 n 个灰因子序列,表征滑坡变形及其影响因素的时间序列;而每个灰因子数列包括 m 个时刻的指标,将第 i 个灰因子序列的第 j 个时刻指标值记为 $x_{ij} (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m)$,由此构成灰色关联指标矩阵 $X = [x_{ij}]_{n \times m}$ 。即 $X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5] = [\text{当月降雨量, 前两月降雨量, 月库水位下降量, 库水位下降速率, 位移变形速率}]$ 。

3.2.2 构建无量纲化指标矩阵

由于滑坡变形及其影响因素的时间序列量纲或单位不一定相同,且有时指标数值的数量级也相差悬殊,因此,系统中原始各时间序列的几何曲线比例不同,造成原始数据很难直接进行比较。

为了能反映出各时间序列之间的内在关系,需要对其进行无量纲化,消除量纲或单位。通常数据无量纲化的方法有均值化、初值化等。然而对于分析目标类型的不同,无量纲化的方法也将不同。

其中均值化变换具有量纲为一,其值大于 0,且大部分近于 1,数列曲线互相相交的特点,比较符合滑坡变形及其影响因素时间序列之间特点,均值化变换方法见公式(1):

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij}} \quad (1)$$

利用公式(1)可得无量纲化指标矩阵 $Y = [y_{ij}]_{n \times m}$ 。

3.2.3 构建灰色关联系数矩阵

根据灰色系统理论,以无量纲化处理后指标矩阵中 y_{kj} 为参考序列进行灰色关联分析,则第 i 时间序列的第 j 指标与参考序列指标的灰色关联系数:

$$\xi_{ij} = \frac{\min_{1 \leq i \leq n} \min_{1 \leq j \leq m} |y_{ij} - y_{kj}| + \eta \max_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq j \leq m} |y_{ij} - y_{kj}|}{|y_{ij} - y_{kj}| + \eta \max_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq j \leq m} |y_{ij} - y_{kj}|} \quad (2)$$

式中: $\eta \in [0, 1]$, 称为分辨系数,其意义是在于削弱最大绝对差数值太大引起的失真,提高关联系数之间的差异显著性。通常,取 $\eta = 0.5$ 。通过式(2)对灰关联系数的计算,可构建灰关联系数矩阵 $\xi = [\xi_{ij}]_{s \times m}$, 其中 $s = n - 1$ 。

3.2.4 构建灰色关联度及关联序

关联度的计算实质上是对时间序列数据进行几何

关系比较,序列间的关联度是以各个时刻的关联系数平均值表征,则滑坡各影响因素的时间序列相对于参考数列的关联度计算公式为:

$$\gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^m \xi_{ij}}{m} \quad (3)$$

按公式(3)计算可得关联序,据此可对滑坡变形系统中各影响因素进行主次排序。

3.3 灰色关联度计算结果分析

为了掌握该滑坡的变形速率与库水位下降及降雨的响应程度,以 MJ05 监测点时间序列为分析样本(表 1),由此可构建灰色关联的指标矩阵 $X = [x_{ij}]_{5 \times 30}$;按照公式(1)对各指标进行均值化处理,可得相应的无量纲化指标矩阵 $Y = [y_{ij}]_{5 \times 30}$;按照公式(2)计算可得灰色关联系数矩阵为 $\xi = [\xi_{ij}]_{4 \times 30}$;按照式(3)计算可得相关因素变量序列 X_1, X_2, X_3, X_4 相对于参考序列 X_5 关联度为: $R = (0.7276, 0.7820, 0.6923, 0.6964)$, 由此可知对于 MJ05 监测点而言,各影响因素对其位移变形速率的影响顺序为:前两月降雨量 > 当月降雨量 > 库水位下降速率 > 月库水位下降量,其中,前两月降雨量对位移变形速率的响应程度最高,其关联度为 0.7820。

表 1 MJ05 监测点位移及其影响因素基础数据

Table 1 Basic data of monitoring point MJ05

相关因素变量序列				参考序列
当月降雨量 X_1/mm	前两月降雨量 X_2/mm	月库水位下降量 X_3/m	库水位下降速率 $X_4/(\text{mm}/\text{d})$	位移变形速率 $X_5/(\text{mm}/\text{月})$
6.6	15.6	3.46	0.11	0.3
12.6	19.2	4.81	0.16	0.14
45.9	58.5	3.61	0.12	3.33
45.1	91	6.27	0.2	0.87
159.5	204.6	6.62	0.22	3.97
243.8	403.3	3.15	0.07	1.53
158.8	402.6	1.35	0.04	10.33
112.4	214.5	0.58	0.03	9.09
12.1	31.5	2.49	0.08	2.16
2.9	15	4.8	0.16	0.95
64.4	67.3	3.48	0.11	2.23
105.1	169.5	1	0.03	2.77
275.5	380.6	9.75	0.31	2.03
60	335.5	7.79	0.24	12.34
112.5	341.6	9.94	0.33	9.12
34	88.9	0.84	0.02	2.48
16.1	50.1	0.29	0.01	0.36
15	31.1	3.14	0.1	0.21
5.8	20.8	5.37	0.19	0.4
52	57.8	3.3	0.11	0.03
37	89	1.76	0.04	0.51
219.1	256.1	9.11	0.34	3.98

按照上述的计算步骤,分别对 MJ06、MJ07、MJ08、TN03 监测点位移变形速率与各影响因素的关联度进行计算,分析结果统计见表 2。

表 2 位移变形速率及其影响因素的关联度值

Table 2 Correlation values between displacement deformation rate and its influencing factors

监测点编号	关联度			
	X_1	X_2	X_3	X_4
MJ05	0.7276	0.7820	0.6923	0.6964
MJ06	0.7193	0.7577	0.6817	0.6706
MJ07	0.7194	0.7600	0.6776	0.6755
MJ08	0.7523	0.7521	0.7097	0.7112
TN03	0.7258	0.7128	0.6999	0.6953
Σ	3.6444	3.7646	3.4612	3.449

- 由表 2 提供的灰色关联度计算结果可以看出:
- (1) MJ06 监测点位移变形速率与其影响因素的响应程度顺序为:前两月降雨量 > 当月降雨量 > 月库水位下降量 > 库水位下降速率;
- (2) MJ07 监测点位移变形速率与其影响因素的响应程度顺序为:前两月降雨量 > 当月降雨量 > 月库水位下降量 > 库水位下降速率;
- (3) MJ08 监测点位移变形速率与其影响因素的响应程度顺序为:当月降雨量 > 前两月降雨量 > 库水位下降速率 > 月库水位下降量;
- (4) TN03 监测点位移变形速率与其影响因素的响应程度顺序为:当月降雨量 > 前两月降雨量 > 库水位下降速率 > 月库水位下降量;

由于选取的滑坡位移监测点较多,无法直观的确定最优因素,故考虑采用各监测点的关联度 Σ 值评价各影响因素对滑坡位移变形的整体影响程度,其影响程度顺序为:前两月降雨量 > 当月降雨量 > 月库水位下降量 > 库水位下降速率,即滑坡位移变形速率最大影响因素为前两月降雨量和当月降雨量,二者的灰关联 Σ 值分别为 3.7646 和 3.6444,远大于月库水位下降量和库水位下降速率的灰关联 Σ 值。由此可知与该滑坡位移变形速率响应程度最高的影响因素为降雨量,其次为库水位下降。

4 结论

通过以上应用灰关联分析方法对滑坡变形的影响因素进行分析计算可以得到以下结论:

(1) 灰色关联法可用较少的数据样本计算出影响滑坡变形的各诱发因素的主次关系,是一种简捷、有效的分析方法。

- (2) 三峡库区降雨量具有集中降雨时域分布特征,库水位变化也具有周期性升降规律,影响滑坡位移变形速率的主要因素包括降雨量和库水位下降。
- (3) 对于多个监测点位移变形速率及其影响因素的分析过程中,往往出现不同监测点所对应的影响因素关联序排列不同的情况,以各监测点的关联度 Σ 值评价各影响因素对滑坡位移变形的整体影响程度,评价结果为前两月降雨量与当月降雨量与滑坡变形速率响应程度最高。
- (4) 灰关联分析结果显示,对三峡库区某滑坡位移变形速率影响程度最大的因素为降雨量,其次为库水位的下降,由此建议制定相应的滑坡工程治理措施,加强建设滑坡区的排水系统。

致谢:在野外地质调查和资料收集过程中,得到了重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 殷坤龙. 滑坡灾害预测预报[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2004.

YIN Kunlong. Landslide hazard prediction and evaluation [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2004.

[2] 杜娟,殷坤龙,柴波. 基于诱发因素响应分析的滑坡位移预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1783 - 1789.

DU Juan, YIN Kunlong, CHAI Bo. Study on the displacement prediction model of landslide based on the response analysis of inducing factors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1783 - 1789.

[3] 吴益平,滕伟福,李亚伟. 灰色-神经网络模型在滑坡变形预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 632 - 636.

WU Yiping, TENG Weifu, LI Yawei. Application of grey-neural network model to landslide deformation prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 632 - 636.

[4] 刘晓,唐辉明,刘瑜. 基于集对分析的滑坡变形动态建模研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2371 - 2378.

LIU Xiao, TANG Huiming, LIU Yu. Landslide displacement dynamics modeling research based on set pair analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2371 - 2378.

- [5] 曹洋兵, 晏鄂川, 谢良甫. 考虑环境变量作用的滑坡变形动态灰色-进化神经网络预测研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 848-852.
CAO Yangbing, YAN Echuan, XIE Liangfu. Study of landslide deformation prediction based on gray model-evolutionary neural network model considering function of environmental variables [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 848-852.
- [6] 徐飞, 徐卫亚. 基于支持向量机—马尔可夫链的位移时序预测[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 944-948.
XU Fei, XU Weiya. Prediction of displacement time series based on support vector machines-Markov chain [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 944-948.
- [7] 陈玉萍, 袁志强, 周博, 等. 遗传算法优化 BP 网络在滑坡灾害预测中的应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 114-119.
CHEN Yuping, YUAN Zhiqiang, ZHOU Bo, et al. Application of back propagation neural networks with optimization of genetic algorithms to landslide hazard prediction[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 114-119.
- [8] 易庆林, 曾怀恩, 黄海峰. 利用 BP 神经网络进行水库滑坡变形预测[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 124-128.
YI Qinglin, ZENG Huaen, HUANG Haifeng. Reservoir landslide deformation forecast using BP neural network [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 124-128.
- [9] 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.
- [10] 彭令, 牛瑞卿. 三峡库区白家包滑坡变形特征与影响因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(4): 1-7.
PENG Ling, NIU Ruiqing. Analysis on deformation characteristics and influential factors of Baijiabao landslide in the Three Gorges Reservoir area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(4): 1-7.
- [11] 张婷婷, 晏鄂川, 胡显明, 等. 基于因子分析法的滑坡变形分析[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(4): 21-25.
ZHANG Tingting, YAN Echuan, HU Xianming, et al. Landslide deformation analysis based on factor analysis [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(4): 21-25.
- [12] 李长明. 关键致灾因子对滑坡稳定性的影响—以三峡库区黄莲树、曾家棚滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 40-45.
LI Changming. Analysis and discussion on the influence and relationships between crucial hazard factors and landslide stability—take Huanglianshu and Zengjiapeng in Three Gorges reservoir area as examples [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 40-45.
- [13] 高伊航, 刘之葵, 唐克静, 等. 重庆瀘渡场北崩滑体变形特征及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 148-152.
GAO Yihang, LIU Zhikui, TANG Kejing, et al. Deformation characteristics and forming factors of the Chongqing Northern Rangduchang landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 142-158.
- [14] 刘艳辉, 方志伟, 温铭生, 等. 川东北地区强降雨诱发崩滑流灾害分析[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 111-115.
LIU Yanhui, FANG Zhiwei, WEN Mingsheng, et al. Analysis of geo-hazards and rainfall in northeast of Sichuan province, China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 111-115.
- [15] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 218-238.
DENG Julong. Basis for grey theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002: 218-238.
- [16] 张桂荣. 基于 WEBGIS 滑坡灾害预测预报与风险管理[D]. 武汉: 中国地质大学, 2005: 54-65.
ZHANG Guirong. Spatial prediction and real-time warning of landslides and its risk management based on WEBGIS [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2005: 54-65.