

文章编号:1672-6561(2013)01-0097-06

基于地球多传感器网络信息的潜在滑坡判别模型

孔纪名^{1,2}, 韩培锋^{1,2,3}, 张 引^{1,2,3}

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 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; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:潜在滑坡的判别是滑坡预测预报中的关键问题, 潜在滑坡早期判别能够有效减少灾害的发生。基于滑坡灾害诱发的各种影响因素, 利用地球多源时空信息和多传感器网络, 遥感监测潜在滑坡体, 利用监测设备获取滑坡岩性、坡体结构、地貌形态、活动迹象等关键控制信息, 从中选取滑坡灾害诱发的主要控制要素作为判别指标, 建立基于多源信息的潜在滑坡多因素判别模型; 特别是根据滑坡的成灾规律, 分析潜在滑坡孕育过程中地貌形态改变、成灾条件变化与滑坡发生的临滑诱发条件, 建立基于不同信息源的滑坡控制因素判别模型。最后, 通过汶川地震灾区垮梁子滑坡体实例分析, 验证潜在滑坡综合判别模型并进行优化, 从而为滑坡灾害的早期判别预测提供依据。

关键词:潜在滑坡; 多传感器网络; 判别指标; 综合判别模型; 诱发因素; 地震灾区

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A

Potential Landslide Discrimination Model Based on Information of Earth Multi-sensor Net

KONG Ji-ming^{1,2}, HAN Pei-feng^{1,2,3}, ZHANG Yin^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Discrimination of potential landslide is the key question for landslides forecast, and the early discrimination of potential landslide can effectively reduced the disaster. Based on various factors induced by landslide disaster, potential landslides were monitored by the means of earth multi-source space-time information, earth multi-sensor net and remote sensing; the key information including landslide lithology, slope structure, landform shape and activity evidence were collected, and the main control factors induced by landslide disaster were selected from the key information; potential landslide multi-factor discrimination model was built based on multi-source information. Especially, according to the law of landslide disaster, the changes of landform shape, hazard condition and critical landslide induced condition during the potential landslides breed were analyzed, landslide control factor discrimination model was built based on different information sources. Finally, taking Kualiangzi landslide in Wenchuan earthquake disaster area as an example, the integrated discrimination model of potential landslide was verified and optimized in order to provide the basis of the early discrimination prediction of landslide disaster.

收稿日期: 2013-01-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)项目(2012AA121302)

作者简介: 孔纪名(1956-), 男, 四川成都人, 研究员, 博士研究生导师, E-mail: jimingk@imde.ac.cn。

Key words: potential landslide; multi-sensor net; discrimination index; comprehensive discrimination model; induced factor; earthquake stricken area

0 引言

中国是一个地质灾害多发的国家,尤其是在中国的西南山区,汶川地震导致大量山体破坏,成为潜在的滑坡体。汶川地震后,在各种自然因素和工程因素的诱发下,山体滑坡灾害事故频发,严重威胁当地人民的生命财产安全。由于中国财政经费有限,不可能对所有的潜在危险滑坡进行治理,如果能够提前准确预报滑坡的发生时间,就可以尽早采取相应的减灾防灾措施,使这类灾害造成的损失减少到最低限度。因此,开展潜在滑坡监测和判识,进行滑坡的早期预测,将成为应对滑坡灾害的最有效、最经济的方法^[1-3]。

滑坡监测是预报滑坡的最常用和有效的方法^[4-5]。国内外现有的滑坡监测方法和手段很多,监测工具从传统的经纬仪或三角测量、水准测量、全站仪导线和电磁波测距三角高程,进而发展到 GPS 卫星定位系统^[6]。但在实际应用中,监测效果并不理想,存在监测内容单一、精度低和劳动强度大等缺点,而精密监测方法都需要使用精密设备,虽具有精度高、简单、实用、劳动强度低的优点,但费用较高,而且还受诸多外界条件的限制^[7-8]。

潜在滑坡的早期判识是减灾防灾的一个经济且有效的手段,也是中国山区防灾减灾的基础性工作。目前,国内外专家虽已对潜在滑坡判识开展了多方面的研究,如滑坡防治、滑坡预测预报、滑坡稳定性、危险性评价等,但对潜在滑坡的早期判识模型方法的研究成果相对较少,已有的早期判识方法主要以定性判识方法为主,判识理论和方法总体比较零散,尚未形成一定的理论体系。

针对上述监测过程中存在的问题,基于无线网络信息传输技术,利用地球多源时空的信息和多传感器网络,监测并分别获取滑坡岩性、坡体结构、地貌形态、活动迹象、降雨和地下水作用等滑坡启动关键控制信息,分析指标对滑坡的影响程度,选取关键控制要素作为判识指标,建立基于多源信息的潜在滑坡多层次综合判识模型,并通过汶川地震灾区中江县垮梁子滑坡监测实例分析和验证该模型,从而为灾区滑坡判识和预报提供理论和技术支持。

1 多传感器多层次网络信息获取

由于滑坡地质灾害的成因机理、形成条件、诱发

因素等的复杂性与非线性,从而导致滑坡地质灾害所表现的动态信息极难捕捉。在实际的滑坡数据动态监测过程中,不可能对所有的影响因素都进行监测,因此潜在滑坡判识的影响因素选取就十分重要^[9]。判识因素选取的好坏将直接影响监测预报的准确性,为此要选取滑坡发生的关键控制性因子,通过监测并分析这些因子即可以准确判识滑坡是否发生^[10]。根据西南地区滑坡特点和各因子对滑坡影响的不同等级,结合前人研究滑坡的成果和室内物理模型试验分析,本文滑坡判识模型主要选取滑坡岩性、坡体结构、地貌形态、活动迹象、降雨和地下水作用这几个滑坡发生的关键控制因子,利用多传感器实时监测相关因子的变化情况,从而找出影响潜在滑坡滑动的主要控制因子,为潜在滑坡多层次综合判识模型提供理论支持。

现有的山体滑坡有线监测技术方法的设备成本高、性能差、数据传输实时性低,这些因素严重影响监测设备的大范围布置以及监测效果。为了弥补单一传感器在空间覆盖、时间覆盖和观测精度等方面的不足,为此设计和组建滑坡灾害监测传感器网络,使传感器网络协同观测,数据无缝多点传输。基于上述要求,在滑坡潜在区域,建立基于无线传感器网络,综合利用 GNSS、激光扫描、光学遥感影像、卫星雷达图像、倾斜仪、孔隙水压力计、温度湿度计、雨量计、土压力计、渗压仪、钻孔压力计、气象站和测量机器人等星载、机载和地面平台的区域和单点监测传感器,在典型滑坡灾害易发生区域,集成对地观测遥感系统和多种地面传感器,构建滑坡灾害监测智能多传感器网络。利用这些传感器分别动态监测潜在滑坡的各项关键控制因子,获取数据后利用无线网络技术及时将数据传输回来进行分析,从而能够及时有效地掌握潜在滑坡的滑动迹象,为潜在滑坡的判识、预报提供数据支持。

2 潜在滑坡判识指标建立

潜在滑坡判识指标体系研究是一项十分复杂、系统的工作。目前,虽然针对潜在滑坡的稳定性评价建立了一些评价指标,但总体上,已建的评价指标较为宽泛、笼统,层次性、适用性及可操作性等并不是很强,由于不同滑坡各种关键控制性因素对诱发滑坡的作用不尽相同,已有分级体系的研究并

没有针对不同类型边坡建立详细完备的判识指标体系。如何针对不同类型或不同工程阶段潜在滑坡的判识选择恰当的评价指标,并进行相对准确的指标值获取、量化,是潜在滑坡判识指标体系研究的重点和难点。

2.1 建立滑坡综合判识模型因子集

综合判识模型因子集 U 是由影响滑坡的 n 个因子组成的集合^[11],表示为 $U=(u_1, u_2, u_3, \dots, u_n)$,元素 u_i 为第 i 个因子集,可以根据影响滑坡的因子具体给定,每个因子集包括 m 个因素。

2.2 确定滑坡综合判识模型权重集

权重分配矩阵 W 是由 n 个权重组成, $W=(w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$,元素 w_i 为第 i 个影响因素的权重。采用层次分析法确定 W ,按照影响因素构建潜势度数量化判据的权重并进行归一化处理。根据分层因素建立递阶层次结构评价模型,以此为基础建立比较判识矩阵。权重向量计算通常按特征根法确定,为保证判识矩阵的准确性与可信度,同时完成对判识矩阵的一致性检验。

(1)因子权重向量计算^[12]。影响因素权重向量即评价因素的重要性排序,采用特征根法计算。设判识矩阵的最大特征根为 λ_{\max} ,特征向量为 w ,采用方根近似解法,则第 i 个影响因素的权重 w_i 与判识矩阵最大特征根 λ_{\max} 的计算公式为

$$W_i = \left(\prod_{j=1}^n b_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}$$

式中: b_{ij} 为矩阵中的一个量,代表滑坡的某个影响因子; $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$ 。

对向量 $W_i=(W_1, W_2, \dots, W_n)$ 做归一化处理,即

$$a_i = \frac{W_i}{W_j} \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

则

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{a_i}$$

式中: A 为所求特征向量; T_i 为向量 T 的第 i 个元素。

向量 T 为

$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}$$

(2)判识矩阵指标一致性检验。为了避免其他因素对判识矩阵的干扰以及保证判识矩阵排序的可信度和准确性,要求判识矩阵满足一致性,需要对判识矩阵进行一致性检验。

3 判识模式建立与优化

潜在滑坡诱发因素有很多,按照不同的划分方法,在潜在滑坡判识模型中,滑坡预报主要是基于时间的预报,提前预测滑坡发生的可能性,因此在潜在滑坡的判识模型中,最主要的是基于时间和空间的滑坡判识。美国著名学者 Voight 根据滑坡体在失稳前出现的宏观变形迹象,如滑坡前缘崩塌、地下水位变化、降雨、滑坡裂缝迅速扩大等,提出了一个多参数预报公式

$$t_f - t_x = \frac{\Omega_x^{1-\alpha} - \Omega_f^{1-\alpha}}{A(\alpha-1)} \quad (1)$$

式中: Ω_x 为初始值; Ω_f 为预报时测量值; t_x 为初始时间; t_f 为剧滑时间; A 和 α 为经验系数。

根据影响滑坡的关键因素,将各种控制性因素划分为静态控制因素和动态控制因素。静态指标主要包括滑坡岩性、坡体结构、地貌形态(影像分析、结构面解析、坡度与高差等地形解析);动态指标包括活动迹象判识指标、地貌形态改变指标(解析坡体位移、高程变化、裂缝变化与地形改变、解析坡体前缘缺损、后缘加载、地表汇流与渗流)。滑坡预报包括空间预报和时间预报两个方面。空间预报是指对滑坡发生地点、规模等的预测,时间预测是指对滑坡发生具体时间的预报,即对已获取的监测数据^[13],通过数学模型来预测未来某一时刻坡体的状态。但是这两种判识预报模型都存在一定的局限,为了解决这些问题,笔者基于地球多源时空信息和多传感器无线网络,在典型滑坡灾害易发生区域布设各种检测仪器,集成对地观测遥感系统与多种地面传感器系统,构建滑坡灾害监测智能多传感器网络。

根据滑坡现场调查、勘探取得的相关资料,结合前人研究成果和滑坡破坏室内物理试验研究,利用多传感器网络监测滑坡,获取影响滑坡的多个因素,建立潜在滑坡综合判识模型框架(图 1)。基于多因素权重计算,分析各因素权重,从而建立多因素综合矩阵,结合多参数预报公式建立潜在滑坡多因素时空综合判识模型,利用权重计算公式有效减小经验系数误差,从而提高参数预报模型的准确性。

4 实例分析

四川省中江县垮梁子滑坡位于亚热带湿润季风气候区,垮梁子滑坡区处于构造剥蚀深丘地貌单元。垮梁子滑坡滑体主要由厚层状浅红色、灰青色泥岩

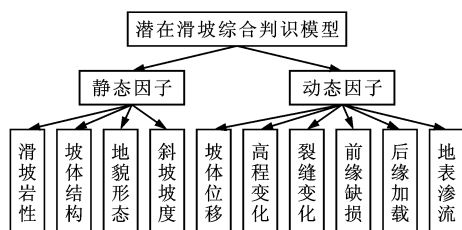


图 1 多层次综合判别模型框架

Fig. 1 Multi-level Comprehensive Discrimination Model Frame

组成。构造裂隙受地下水作用较强,滑坡区地下水渗流场为一个独立的水文地质单元,丘坡为入渗补给区和强烈交替带,前缘沟谷为埋藏储集区。滑坡周围谷宽 50~300 m,切深 100~170 m,沟谷中第四系堆积厚 5~10 m。滑坡边界较为明显,整体上后部以拉陷槽为界,左侧边界沿带状崩塌、滑塌带分布,剪出口附近小滑坡和泉点呈带状分布,滑坡诱发因素多,单一监测无法预测滑坡运动趋势,因此选择多传感器网络监测。

4.1 滑坡特征

垮梁子滑坡前后缘高差约 110 m,滑坡宽约 1 100 m,纵长 360~390 m,滑体平均厚度 50 m,最大厚度约 80 m,体积约 $2\,550 \times 10^4 \text{ m}^3$,为水平岩层滑坡。滑坡整体上呈长条形,近南北向展布,主滑方向近于正西向(图 2、3)。



图 2 垮梁子滑坡

Fig. 2 Kualiangzi Landslide

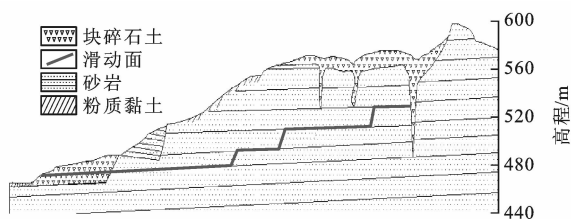


图 3 垮梁子滑坡剖面

Fig. 3 Profile of Kualiangzi Landslide

4.2 垮梁子滑坡监测

基于无线网络的多层次多传感器综合判别模型,在中江县垮梁子滑坡建立多层次多传感器监测

模型,综合利用 GNSS、激光扫描、光学遥感影像、卫星雷达图像、倾斜仪、孔隙水压力计、温度湿度计、雨量计、土压力计、渗压仪、钻孔压力计、气象站和测量机器人等星载、机载和地面平台区域和单点监测传感器监测影响潜在滑坡的因子,将监测得到的数据利用无线网络传输到数据处理中心,利用多层次综合判别模型处理数据。

(1)潜在滑坡静态因子。滑坡表层主要覆盖残积、坡积层,成分为粉质黏土夹少量块碎石;滑坡堆积层主要分布在垮梁子滑坡拉陷槽西侧的滑体部分,成分为完整的砂岩夹泥岩;崩积层主要分布在拉陷槽内,成分主要为块石,充填物主要为碎石和角砾。滑坡剪出口离侵蚀基准面高差约 30 m,其上为滑坡堆积体前缘,坡度约 30° ,高差约 12 m;滑坡中部地形较为平缓开阔,后部平均坡度约为 20° ,后缘为整体呈 3 级拉裂特征的拉陷槽。图 4、5 分别为 1968 年和 2004 年垮梁子滑坡遥感图,为了便于观看和分析,在遥感图上画出了滑坡体的前后缘,标记了监测点从 1 到 11 的位置,通过分析标记的监测点,可以发现滑坡位移、高程、裂隙变化明显。

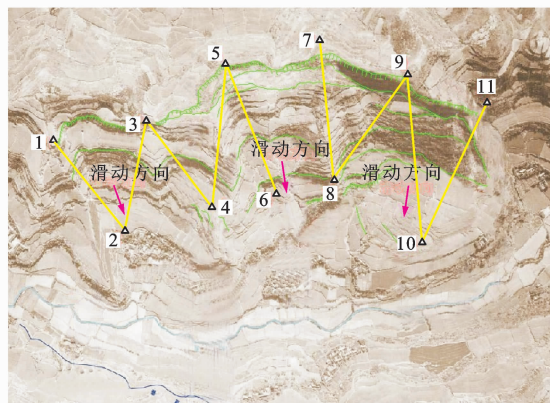


图 4 1968 年遥感监测垮梁子滑坡

Fig. 4 Remote Sensing Image of Kualiangzi Landslide in 1968

(2)潜在滑坡动态因子。在滑坡区域布设监测点,分别监测高程、地表位移、深部滑带位移、地下水位等参数的变化^[14]。利用多传感器监测,并通过无线网络传输到数据处理中心,监测数据见表 1 和图 6~9。

表 1 滑坡区 1968~2004 年变形位移

Tab. 1 Deformation Displacements of Landslide from 1986 to 2004

观测点	后缘	中间	山嘴	前缘	冲沟
位移/m	16.2	4.5	11.3	16.8	16.0

4.3 垮梁子滑坡监测数据分析及模型判别

通过现场踏勘和多传感器监测,分析综合判别

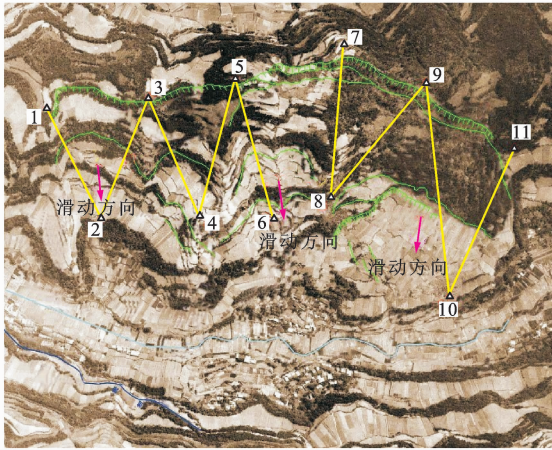


图 5 2004 年遥感监测垮梁子滑坡

Fig. 5 Remote Sensing Image of Kualiangzi Landslide in 2004

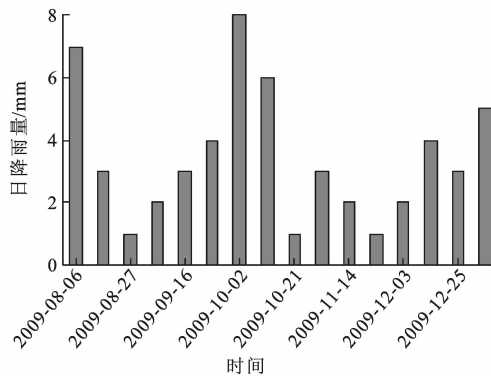


图 6 降雨量与时间的关系

Fig. 6 Relationship of Rainfall to Time

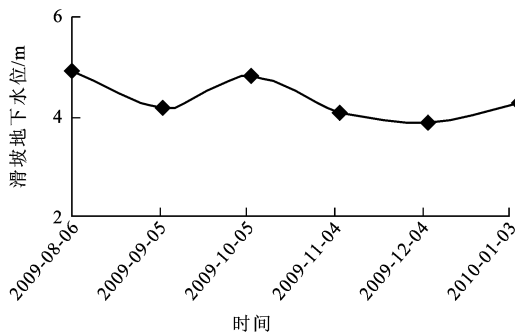


图 7 地下水位与时间的关系

Fig. 7 Relationship of Groundwater Level to Time

模型中各个影响因素变化情况,利用潜在滑坡多层次综合判识模型因子处理方法,对各因子指标进行分析、量化,将不同的观测因子按照因子矩阵进行权重计算分析,建立综合判识矩阵模型,将确定的权重代入多因素判识公式(1)中,从而确定 A 和 α 值,通过数据分析发现潜在滑坡移动缓慢,处于蠕动阶段。而现场实际观测的数据迹象表明滑坡处于缓慢蠕动

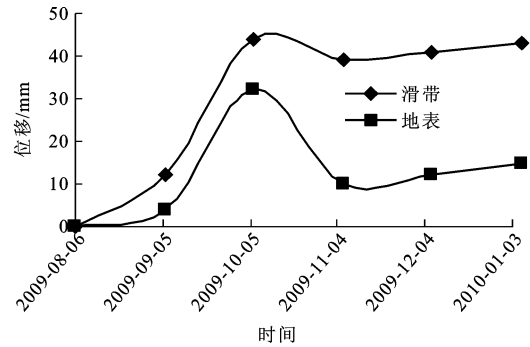


图 8 滑带、地表位移与时间的关系

Fig. 8 Relationships of Sliding Zone and Surface Displacements to Time

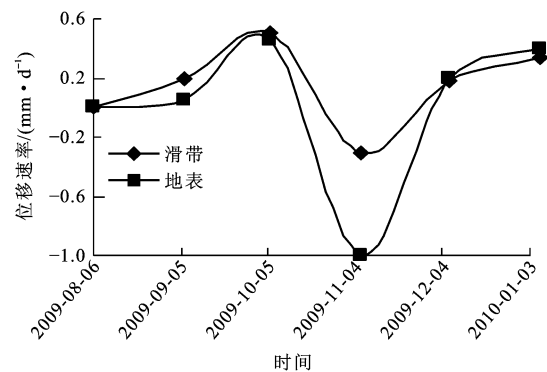


图 9 滑带、地表移动速率与时间的关系

Fig. 9 Relationships of Sliding Zone and Surface Travel Rates to Time

阶段,滑坡体表面位移速率明显低于滑带处,滑带周围岩体受到滑带下滑力作用,滑坡体地下水位低于滑带,水压力作用较小,监测结果与判识模型的判识结果基本吻合。

5 结 语

(1)滑坡灾害严重威胁中国经济和社会的发展,潜在滑坡综合判识是降低灾害程度、减小人员与财产损失的最有效和最经济的手段。

(2)相比于传统的有线网络,无线传感器网络成本低,不受地域限制;针对传统单点、单数据的缺点,设计和组建了滑坡灾害多传感器监测网络,综合利用 GNSS、激光扫描、光学遥感影像、卫星雷达图像、倾斜仪、孔隙水压力计、温度湿度计、雨量计、土压力计、渗压仪、钻孔压力计,在典型滑坡灾害易发生区域集成对地观测遥感系统与多种地面传感器,构建滑坡灾害监测智能多传感器网络。

(3)将滑坡影响因子分为静态因子和动态因子,建立综合判识因子集;采用层次分析法,确定权重分配矩阵,建立多层次综合判识模型,并根据室内物理

模型试验和相关资料优化判识模型。

(4)选择地震灾区垮梁子滑坡验证判识模型,多传感器布设到监测坡体,通过监测数据建立多层次综合判识模型预测滑坡,并与实际观测对比分析,发现预测结果基本吻合,从而证实该模型的可靠性。

参考文献:

References:

- [1] 李秀珍. 潜在滑坡的早期稳定性快速判识方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2010.
LI Xiu-zhen. Early and Rapidly Identification Methods for Stability of Potential Landslide[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2010.
- [2] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京:中国铁道出版社,2001.
XU Bang-dong. Landslide Analysis and Control[M]. Beijing:China Railway Publishing House,2001.
- [3] 邵铁全,彭建兵,刘云焕,等. 滑坡灾害超前预判技术研究[J]. 工程地质学报,2007,15(4):564-568.
SHAO Tie-quan,PENG Jian-bing,LIU Yun-huan,et al. Technique for Pre-estimation Geological Hazard of Landslide[J]. Journal of Engineering Geology,2007,15(4):564-568.
- [4] 姚顽强. 基于 GPS 的公路滑坡监测网数据处理[J]. 交通运输工程学报,2008,8(5):72-75.
YAO Wan-qiang. Data Processing Model of Highway Landslide Monitoring Network Based on GPS[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2008,8(5):72-75.
- [5] 刘龙武,郑健龙,缪伟. 膨胀土开挖边坡坡体变形特征的跟踪观测[J]. 中国公路学报,2008,21(3):6-12.
LIU Long-wu,ZHENG Jian-long,MIAO Wei. Track Monitoring of Deformation Behavior of Expansive Soil Cutting Slope[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(3):6-12.
- [6] 冯春,张军,李世海,等. 滑坡变形监测技术的最新进展[J]. 中国地质灾害与防治学报,2011,22(1):11-16.
FENG Chun,ZHANG Jun,LI Shi-hai,et al. A Review of the Latest Development of Landslide Deformation Monitoring Techniques[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2011,22(1):11-16.
- [7] 唐亚明,张茂省,薛强,等. 滑坡监测预警国内外研究现状及评述[J]. 地质论评,2012,58(3):533-541.
TANG Ya-ming,ZHANG Mao-sheng,XUE Qiang,et al. Landslide Monitoring and Early-warning: An Overview[J]. Geological Review,2012,58(3):533-541.
- [8] 胡颖. 基于无线传感器网络的山体滑坡监测预警系统设计与研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.
HU Ying. The Design and Research of Landslide Monitoring and Warning System Based on Wireless Sensor Network[D]. Chongqing:Chongqing University,2011.
- [9] 周平根. 滑坡监测的指标体系与技术方法[J]. 地质力学学报,2004,10(1):19-26.
ZHOU Ping-gen. Indicator System and Techniques of Landslide Monitoring[J]. Journal of Geomechanics,2004,10(1):19-26.
- [10] 李秀珍,许强. 滑坡预报模型和预报判据[J]. 灾害学,2003,18(4):71-78.
LI Xiu-zhen,XU Qiang. Models and Criteria of Landslide Prediction[J]. Journal of Catastrophology,2003,18(4):71-78.
- [11] 焦赞,王得楷. 滑坡发育潜势度的层次-模糊综合评判[J]. 甘肃科学学报,2012,24(3):51-55.
JIAO Yun,WANG De-kai. A Comprehensive Evaluation for Latent Landslide Development Based on Analytic Hierarchical Process and Fuzzy Mathematics[J]. Journal of Gansu Sciences,2012,24(3):51-55.
- [12] 刘莉,余宏明,程江涛. 层次分析-模糊综合评价法在滑坡工程中的应用[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2008,30(2):43-47.
LIU Li,YU Hong-ming,CHENG Jiang-tao. Application of Analytic Hierarchy Process-fuzzy Comprehensive Evaluation Method to Landslide Engineering[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences,2008,30(2):43-47.
- [13] 徐峰,汪洋,杜娟,等. 基于时间序列分析的滑坡位移预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(4):746-751.
XU Feng,WANG Yang,DU Juan,et al. Study of Displacement Prediction Model of Landslide Based on Time Series Analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(4):746-751.
- [14] 王智磊,孙红月,尚岳全. 基于地下水位变化的滑坡预测时序分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(11):2276-2284.
WANG Zhi-lei,SUN Hong-yue,SHANG Yue-quan. Time Series Analysis of Landslide Prediction Based on Groundwater level Variation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(11):2276-2284.