

文章编号: 1000-7598(2012)03-0835-06

基于功效系数法的泥石流灾害预警研究

孟凡奇^{1,2}, 李广杰¹, 王庆兵², 秦胜伍¹, 赵海卿³, 金鑫^{1,4}

(1. 吉林大学 建设工程学院, 长春 130026; 2. 山东省地质环境监测总站, 济南 250014;
3. 沈阳地质矿产研究所, 沈阳 110033; 4. 辽宁省地质环境监测总站, 沈阳 110033)

摘要: 泥石流灾害破坏力巨大, 预测预报泥石流发生的可能性是防灾减灾的重要手段, 也是国内外学者研究的热点。基于功效系数法原理, 在综合分析泥石流灾害发生的气象、地质环境影响因素的基础上, 选取了山坡坡度、相对高差、植被覆盖率、沿沟松散物储量、5 d 累计降雨量、最大小时雨强和当日雨量为评价因子, 采用改进后的层次分析法计算评价因子的权重系数, 建立了泥石流预测预警模型。以岫岩地区泥石流为例对预警模型进行检验, 预测结果较好地反映了实际情况。表明基于功效系数法的泥石流预测预警模型具备较高的可靠性和实用性, 研究结果为泥石流预测预警提供了一种新的思路和方法。

关键词: 泥石流; 功效系数法; 改进层次分析法; 预警模型

中图分类号: TV 144

文献标识码: A

Research on early warning of debris flow based on efficacy coefficient method

MENG Fan-qi^{1,2}, LI Guang-jie¹, WANG Qing-bing², QIN Sheng-wu¹, ZHAO Hai-qing³, JIN Xin^{1,4}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Shandong Monitoring Center of Geological Environment, Jinan 250014, China; 3. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110033, China;
4. Liaoning Monitoring Center of Geological Environment, Shenyang 110033, China)

Abstract: For great destructive debris flow, predicting the likelihood of its early warning is an important means of disaster prevention and mitigation, as well as scholars focus on the key issues. Based on the principle of efficacy coefficient method, analyzing the meteorological and geological environmental factors synthetically; evaluation factors such as hill slope, relative height, vegetation cover, along the groove loose material reserves, 5 d cumulative rainfall, maximum rainfall intensity per hour, and intraday rainfall are selected. Using the improved analytic hierarchy process to calculate the weight coefficients of evaluation factors, a early warning of debris flow prediction model is established. Taking an early warning of debris flow in Xiuyan for example, the model is tested to predict the results which reflect the actual situation better. The debris flow early warning model has higher reliability and practicability, and it can provide new ideas and methods for early warning of debris flow prediction.

Key words: debris flow; efficacy coefficient method; improved analytic hierarchy process; early warning model

1 引言

泥石流是一种常见的山区地质灾害, 由降水引发, 携带有大量泥沙石块和巨砾的固、液两相流体。我国是多山之国, 在降水作用下常发生泥石流灾害, 尤其是在汶川地震之后, 泥石流作为地震引发的重要次生灾害严重威胁着人民的生命财产安全, 使国家和人民遭受巨大伤痛, 如: 云南贡山泥石流、甘肃舟曲特大山洪泥石流。因此, 对泥石流灾害的预

测预警是防灾减灾的关键课题, 不仅具有重要的学术意义, 更具有重大的社会意义。

对于泥石流预测预警的研究由来已久, 国内外学者多基于历史上灾害发生的降雨条件入手, 根据有效降雨量、雨强等因素, 采用各种理论和方法建立模型, 将预警预报等级分为 5 级, 对泥石流灾害进行预测预警^[1-3], 如人工神经网络法、灰色理论、可拓学理论、回归分析法等^[4-7], 取得了一定的研究成果。但传统方法往往对泥石流灾害发生时的降

收稿日期: 2010-12-07

项目基金: 中国博士后科学基金项目 (No. 20100471265)。

第一作者简介: 孟凡奇, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事地质工程及地质灾害防治研究。E-mail: mengfq08@mails.jlu.edu.cn

水进行研究, 由于受气象预报精度影响, 预测预警精度不高。而同一地区不同沟谷发生泥石流的临界雨量也不尽相同, 说明泥石流的发生除受降水条件限制外, 地质环境条件的影响也较为重要。因此, 建立基于地质环境条件与气象因素相耦合的泥石流预测预警模型是十分必要的。

功效系数法是根据多目标规划的原理, 把所要考核的各项指标按照多档次标准, 通过功效函数转化为可以度量的评价分数, 对评价对象进行总体评价的一种方法。该方法能够根据评价对象的复杂性, 从不同侧面对评价对象进行计算评分, 具有客观、准确、公正的特点。目前, 该方法多应用于财务风险预警、医疗质量综合评价、企业绩效评价、确定岩体优势面等领域^[8-12], 取得了较好的效果。

本文将功效系数法运用到泥石流预测预警中, 采用改进的层次分析法对气象、地质环境评价指标进行赋权, 将预警等级分为 5 级, 构建气象因素与地质环境条件相耦合的预测模型, 并以辽宁省岫岩县泥石流为例进行验证。

2 功效系数法基本原理

功效系数法是一种反映多个指标、综合分析的定量评价方法, 对每一项评价指标确定一个满意值和不允许值, 以满意值为上限, 以不允许值为下限, 计算各指标实现满意值程度, 并以此确定各指标的功效系数值, 再经过加权评价获得综合评价值, 从而确定被研究对象的综合状况^[13], 其评价过程如下:

(1) 选取评价指标

评价指标须具有代表性和典型性, 在评价体系中既要独立又能互补, 能够最大限度地反映出评价目标的综合状况。

(2) 确定评价指标的满意值和不允许值

对每个评价指标, 都要确定其满意值和不允许值。满意值是人们根据自身或行业经验给出的一个值, 不允许值一般取评价指标可接受的最低值或最高值。

(3) 评价指标的单项功效系数值

在评价指标体系当中, 根据各指标的特点, 可按照以下规则确定单项功效系数。共分为 4 种变量: 指标值越大、单项功效系数值越高的为极大型变量; 指标数值越小、单项功效系数值越高的为极小型变量; 当指标数值处于某一固定数值时, 单项系数最高的为稳定性变量; 指标数值在某一区间时其单项系数最高的为区间型变量。

极大型变量单项功效系数计算公式为

$$g_{1i} = \begin{cases} \frac{x_i - x_{ni}}{x_{yi} - x_{ni}} \times 40 + 60, & x_i < x_{yi} \\ 100, & x_i \geq x_{yi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: g_{1i} 为第 i 个极大型评价指标的单项功效系数值; x_i 为第 i ($i=1, 2, \dots, m$) 个评价指标的实际值; x_{yi} 为第 i 个评价指标的满意值; x_{ni} 为第 i 个评价指标的不允许值。

极小型变量单项功效系数计算公式为

$$g_{2i} = \begin{cases} \frac{x_i - x_{ni}}{x_{yi} - x_{ni}} \times 40 + 60, & x_i > x_{yi} \\ 100, & x_i \leq x_{yi} \end{cases} \quad (2)$$

稳定型变量单项功效系数计算公式为

$$g_{3i} = \left(1 - \frac{|x_i - x_{yi}|}{|x_{ni} - x_{yi}|} \right) \times 40 + 60 \quad (3)$$

区间型变量单项功效系数计算公式为

$$g_{4i} = \begin{cases} \left(1 - \frac{x_{\min} - x_i}{x_{\min} - x_{n\min}} \right) \times 40 + 60, & x_i < x_{\min} \\ 100, & x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \\ \left(1 - \frac{x_i - x_{\max}}{x_{n\max} - x_{\max}} \right) \times 40 + 60, & x_i > x_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x_{\max}$ 为区间型变量的最大值; $x_{\min}$ 为区间型变量的最小值; $x_{n\max}$ 为上限的不允许值; $x_{n\min}$ 为下限的不允许值。

(4) 总功效系数值

根据评价指标的单项功效系数, 再结合评价指标的权重系数, 计算评价对象的总功效系数值。

$$G = \sum_i^m (g_i \omega_i) \quad (5)$$

式中: G 为评价对象的总功效系数值; g_i 为第 i 个评价指标的单项功效系数值; ω_i 为第 i 个评价指标的权重系数。

3 泥石流预测预警模型

3.1 泥石流评价指标的选取

在参考前人研究成果及野外调查分析的基础上, 选取山坡坡度、相对高差、植被覆盖率、沿沟松散物储量、5 d 累计降雨量、最大小时雨强和当日降雨量为泥石流预测预警模型的评价指标。其中, 山坡坡度大小反映了坡面土壤颗粒的稳定条件和地面

水流动力条件, 影响径流的冲刷和搬运能力。沿沟松散物储量是泥石流物源的重要来源, 储量越大, 泥石流发生时可提供的固体碎屑物越多。相对高差则体现了泥石流沟的地形条件, 高差越大, 提供的势能越大, 水动力就越强。植被覆盖率指标反映了防止水土流失的能力, 覆盖率越高, 岩土体失稳所需的能量越大。低雨强、长历时的降雨较易使边坡深层土体的孔隙水压力增加, 土体产生滑动性破坏, 因此, 5 d 累计降雨量的大小则能反映土体的饱和液化程度^[14-16]。最大小时雨强是泥石流激发的重要启动因素, 强度越大, 岩土体失稳的可能性越高。当日雨量可由气象台 24 h 降雨预报提供, 雨量越大, 泥石流发生的可能性越大。

3.2 确定各评价指标的满意值和不允许值

参考前人泥石流调查研究经验^[17]和当地泥石流暴发临界降雨情况, 结合泥石流预警等级与评价指标关系, 给出各指标的满意值和不允许值。

3.3 评价指标的功效系数

在建立的泥石流预警评价指标体系中, 由于坡度过小, 坡面岩土体则不易失稳; 坡度过大, 松散堆积物易崩滑, 坡面物质难以积累, 因此, 山坡坡度的增加与坡面侵蚀量并不是呈简单的线性关系, 而是存在一个区间坡度, 在此区间内侵蚀堆积量可达到最大, 山坡坡度的单项功效系数按式(4)计算; 相对高差、沿沟松散物储量、5 d 累计降雨量、最大小时雨强和当日雨量属于极大型变量, 其单项功效系数可由式(1)获得。植被覆盖率指标属于极小型变量, 其单项功效系数可由式(2)获得。

3.4 改进的层次分析法确定权重

层次分析法(AHP)是系统工程中对非定量事件做出定性定量相结合的一种系统分析方法, 特别适用于处理多目标、多层次的综合评判问题^[18]。把系统分析归结为最底层相对于最高层的相对重要性权重或相对优劣次序的排序问题, 其中判断矩阵的一致性检验问题一直是一个难点。虽然在实际应用中, 可以凭借经验性的估计来调整判断矩阵, 但这样毕竟带有主观性和盲目性, 并且往往需多次调整才能通过一致性检验, 过程较为复杂。改进的层次分析法应用最优传递矩阵, 使判断矩阵在开始阶段就满足一致性要求, 可直接求出权重值, 避免了后期的一致性检验。

3.4.1 改进的 AHP 法原理

设实数矩阵 $A=(a_{ij})$, $B=(b_{ij})$, $C=(c_{ij}) \in R^{n \times n}$, 其中 a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 分别为矩阵 A 、 B 、 C 中的因子, 则以下的规定是成立的: 若 $a_{ij}=1/a_{ji}$, 且 $a_{ij}=a_{ik}/a_{jk}$, 则称

A 为互反矩阵, 且是一致的; 若 $b_{ij}=-b_{ji}$, 且 $b_{ij}=b_{ik}-b_{jk}$, 则称 B 是反对称矩阵, 且是传递的。可知, 若 A 是一致的, 则 $B=\lg A(b_{ij}=\lg a_{ij}, \forall i, j)$ 是传递的; 反之, B 是传递的, 则 $A=10^B(a_{ij}=10^{b_{ij}}, \forall i, j)$ 是一致的。若存在传递矩阵 C , 且使 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (c_{ij}-b_{ij})^2$ 最小, 则称 C 为 B 的最优传递矩阵。那么, 若 B 是反对称矩阵, 则 B 的最优传递矩阵 C 应满足 $c_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (b_{ik} - b_{jk})$ 。

传统的 AHP 法通过 1~9 标度法构造的判断矩阵: $A=(a_{ij})$, 具有 $a_{ij}>0$, $a_{ii}=1$, $a_{ji}=1/a_{ij}$ 的特点。显然可知: A 是互反矩阵, $B=\lg A$ 是反对称矩阵, 若 C 是 B 的最优传递矩阵, 构造矩阵 $A^*=10^{C_{ij}}$, 则由上述可知, 矩阵 A^* 是 A 的拟优传递阵, 并且 A^* 是一致的。所以, 由 A^* 就可直接求出权重值 (A^* 的特征值), 不必进行后面的一致性检验。

3.4.2 构建层次结构

将岫岩县泥石流预测预警作为层次结构的目标层, 提取与泥石流发生有关的地质环境要素和降雨情况作为准则层, 选择山坡坡度、植被覆盖率、5 d 累计降雨量、雨强等 7 个指标作为层次结构的指标层, 层次结构见图 1。

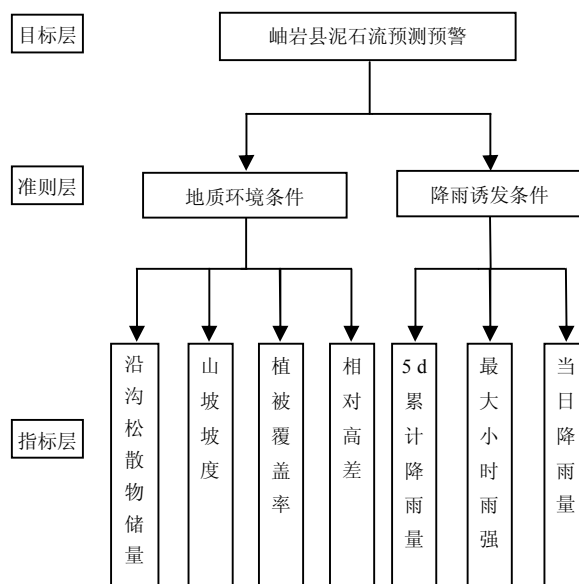


图 1 泥石流预警层次结构图

Fig.1 Hierarchical structure of debris flow early warning

3.4.3 构建判断矩阵

由于递阶层次结构确定了目标层、准则层与指标层之间的隶属关系, 根据 1~9 标度法, 逐项就任意两个评价指标进行比较, 构造两两比较判断矩阵。分别得到目标层与准则层的判断矩阵 $A-B$, 准则层和指标层的判断矩阵 B_1-C 和 B_2-C 。

$$\left. \begin{aligned} A-B &= \begin{bmatrix} 1 & 1/3 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} \\ B_1-C &= \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 2 & 1/5 \\ 3 & 1 & 5 & 1/3 \\ 1/2 & 1/5 & 1 & 1/7 \\ 5 & 3 & 7 & 1 \end{bmatrix} \\ B_2-C &= \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

3.4.4 权重确定

由于 AHP 法在检验一致性问题上往往需要对元素取值进行调整,其过程过于繁琐复杂。改进的 AHP 法是在不改动决策分析原理的前提下,基于最优传递矩阵对层次分析法进行改进,使之在开始阶段就满足一致性要求,直接求出权重值,避免了后期的检验过程。由改进 AHP 法原理所述步骤,拟得最优传递矩阵 A^* ,并求得泥石流影响因子权重分别为 $W_C=(0.026\ 4, 0.066\ 1, 0.015\ 2, 0.142\ 3, 0.122\ 5, 0.222\ 8, 0.404\ 7)$ 。

3.5 预警等级的确定

根据式(5)计算可得泥石流预测总功效系数。总功效系数大小与预警等级划分是根据功效系数法原理,参照王迎超等^[13]基于功效系数法预警分析结果的基础上,以总功效系数值作为评价标准(数值越大代表泥石流发生可能性越高)划分了泥石流预警等级。向社会发出的预警等级为Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ,并依次采用黄色、橙色、红色表示泥石流灾害发生的可能性为较大、大、很大。通过运用 Matlab 软件自编程序实现泥石流预警过程,泥石流预警等级判别表见表 1。

表 1 泥石流预警等级判别表

Table 1 Judgement of debris flow early warning level

预警等级	总功效系数	说明
I	≤ 60	可能性很小,不发布预警信息
II	60~70	可能性较小,不发布预警信息
III	70~80	可能性较大,发布黄色预警信息
IV	80~90	可能性大,发布橙色预警信息
V	≥ 90	可能性很大,发布红色预警信息

4 模型应用

4.1 研究区概况

岫岩县地处辽东半岛东部,东经 $122^{\circ}52'$ ~ $123^{\circ}46'$,北纬 $40^{\circ}00'$ ~ $41^{\circ}34'$,总面积为 $4\ 502\ \text{km}^2$,属温带湿润季风气候区。境内地貌比较复杂,以千

山山脉及其余脉为骨干,形成以低山为主,兼具丘陵和中山的地貌格局,地质构造复杂,地质环境质量较差。岫岩县地质灾害以泥石流为主,野外调查中共发现 358 条泥石流沟,在气候因素及人类工程活动的影响下,自建国以来共发生 3 次特大规模的群发性泥石流灾害,危害极大。

4.2 泥石流预警等级预测

选取岫岩地区 15 组近 30 年来发生灾害的泥石流沟为例,以《泥石流灾害防治工程勘查规范》^[19]中关于泥石流沟严重程度(易发程度)数量化方法及判别标准为依据,结合评价指标与研究区发生泥石流的实际情况进行统计分析,建立岫岩地区泥石流预警等级与评价指标的关系(见表 2)。

结合表 2 给出的泥石流评价指标的变量类型和取值区间,最终确定每个评价指标的满意值和不允许值(见表 3)。其中,满意值应尽可能地使用该项评价指标理论上所能获取的最高值。但由于地质条件比较复杂,如相对高差、沿沟松散物储量、降雨条件等的最高标准值在不同地区内各不相同,往往很难确定。不允许值是指该指标的理论上达到的最低水平,如山坡坡度、降雨条件等的最低理论值为 0,但在实际地理环境条件下,上述情况根本不会发生泥石流,进行预警也毫无必要。因此,在确定泥石流评价指标满意值和不允许值时,地质环境条件类的评价指标数值以规范^[19]泥石流沟易发程度中的严重和一般两种不同数值为基准进行划分,而降雨条件类的评价指标则根据评价指标数值与研究区泥石流发生与否的统计规律,结合前人研究成果进行划分。如仲桂清等^[20]、丛威青等^[21]指出当日雨量大于 $150\sim 200\ \text{mm}$ 雨强大于 $60\ \text{mm/h}$ 时、洪峰流量 $1\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 和雨强为 $50\sim 60\ \text{mm/h}$ 时,研究区易发生泥石流。

运用功效系数法泥石流灾害预测预警模型对选取的岫岩县 15 组泥石流沟进行计算分析结果见表 4。

4.3 结果分析

根据本文预警结果,除砬子沟需要发布黄色预警信息,罗圈沟(1982 年)、陈家南沟、二道沟、横山沟发布橙色预警信息外,其余各沟皆需要发布红色预警信息,结果符合岫岩县泥石流历史灾害发生规律。而砬子沟、横山沟在降雨条件不强的情况下爆发泥石流,说明了除降雨条件外,地质环境质量对泥石流灾害的发生影响也较为重要,建立气象和地质环境条件相耦合的泥石流预测预警模型是可行的。

表 2 岫岩地区泥石流预警等级与评价指标关系

Table 2 Relationships between evaluating indices and early warning levels of debris flow in Xiuyan area

预警等级	山坡坡度 /(°)	相对高差 /m	植被覆盖率 /%	沿沟松散物储量 /(10 ⁴ m ³ /km ²)	5 d 累积降雨量 /mm	最大小时雨强 /(h/mm)	当日雨量 /mm
I	<15	<200	>60	<1	<100	<30	<50
II	15~25	200~350	45~60	1~5	100~150	30~40	50~100
III	>45	350~500	30~45	5~10	150~200	40~50	100~150
IV	25~32	500~650	15~30	10~15	200~250	50~60	150~200
V	32~45	>650	<15	>15	>250	>60	>200

表 3 各评价指标的满意值和不允许值

Table 3 Satisfied values and unallowed values of evaluating indices

特征值		山坡坡度 ($^{\circ}$)	相对高差 /m	植被覆盖率 /%	沿沟松散物储量 ($10^4\text{ m}^3/\text{km}^2$)	5 d累积降雨量 /mm	最大小时雨强 (h/mm)	当日雨量 /mm
满意值		32~45	650	15	15	250	60	200
不允许值	上限	55						
	下限	15	200	60	1	100	30	50

表 4 泥石流发生情况与模型预测结果

Table 4 Predicting results of the model and historic debris flow events

泥石流沟	发生时间 /(年-月)	山坡坡度 /(°)	相对高差 /m	植被覆盖率 /%	沿沟松散物储量 /(10 ⁴ m ³ /km ²)	5 d 累积降雨量/mm	最大小时雨强/(h/mm)	当日雨量 /mm	本文预警结果
四道沟	1982-08	48.2	720.7	68.3	14.6	122.7	63.3	317.6	V
玉石矿沟	1982-08	32.7	547.2	54.7	10.4	121.0	64.0	358.0	V
罗圈沟	1982-08	23.6	272.6	46.3	9.5	132.1	59.8	132.1	IV
椅子山沟	1982-08	38.1	539.5	53.2	8.7	181.2	53.5	352.6	V
石棚沟	1987-08	24.8	564.7	43.5	11.4	243.7	50.4	241.2	V
铧草沟	1987-08	22.8	713.2	38.1	14.2	256.8	63.4	318.0	V
砬子沟	1987-08	18.6	363.3	40.6	12.4	222.1	43.5	104.8	III
后屋沟	1987-08	29.8	383.1	47.2	9.1	188.4	60.5	223.7	V
大闹沟	1989-07	23.7	498.7	42.8	12.5	197.2	70.3	287.4	V
破车沟	1989-07	31.6	584.6	50.3	9.4	163.8	65.6	264.8	V
罗圈沟	1989-07	23.6	272.6	46.3	8.9	246.2	67.5	249.8	V
陈家南沟	1989-07	26.7	263.8	56.5	10.7	74.3	73.8	184.6	IV
二道沟	1997-08	37.4	358.2	53.8	8.7	175.7	54.2	168.5	IV
古洞沟	2002-08	42.6	634.0	40.8	13.4	98.6	55.3	186.8	V
横山沟	2005-07	44.4	565.6	47.4	11.7	163.8	45.4	119.7	IV

5 结 论

(1) 应用最优传递矩阵对层次分析法进行了改进，避免了常规层次分析法为满足判断矩阵一致性在调整过程中带来的主观性和随意性，具有迅速、高效的优点。

(2) 首次将功效系数法引入到泥石流预测预警中，建立了地质环境条件与气象因素相耦合的评价指标体系，为泥石流预测预警提供了一种新的思路和方法。

(3) 利用 15 组岫岩地区历史上发生的泥石流对建立的泥石流预测预警模型进行验证，预警结果符合当地泥石流灾害发生规律，表明应用该模型进行泥石流预测预警是可行的、可靠的。

(4) 功效系数法的泥石流预警研究只是初步尝试，尚存在一些问题有待于进一步研究。如预警等

级与降雨指标的关系具有地域限制，需要根据当地泥石流爆发的临界降雨情况进行划分，切勿生搬硬套。

参 考 文 献

[1] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 11—15.
CUI Peng, YANG Kun, CHEN Jie. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: Taking the Jiangjia gully as an example[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1(1): 11—15.

[2] 刘传正. 区域滑坡泥石流灾害预警理论与方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, (3): 1—6.
LIU Chuan-zheng. Study of the early warning methods of landslide-debris flows[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, (3): 1—6.

- [3] 丛威青, 潘懋, 任群智, 等. 泥石流灾害多元信息耦合预警系统建设及其应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(4): 446—450.
CONG Wei-qing, PAN Mao, REN Qun-zhi, et al. Building and application of the debris flow warning system based on multi-information[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006, 42(4): 446—450.
- [4] 白利平, 王业耀, 龚斌, 等. 基于可托理论的泥石流灾害预警预报系统开发: 以北京市为例[J]. 现代地质, 2009, 23(1): 157—163.
BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GONG Bin, et al. Development of the debris flow forecasting system based on extension theory: A case study of Beijing[J]. *Geoscience*, 2009, 23(1): 157—163.
- [5] 彭涛, 徐刚, 夏大庆. 坡面泥石流暴发的自组织临界特征及其预测预报[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 104—108.
PENG Tao, XU Gang, XIA Da-qing. Occurrence of slope debris flow as self-organization criticality and its prediction and forecast[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(3): 104—108.
- [6] CAI Wen. Extension theory and its application[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(17): 1538—1548.
- [7] FANNIN R J, ROLLERSON T P. Debris flows: Some physical characteristics and behaviors[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30: 71—81.
- [8] 陶永宏, 祁爱琳. 基于功效系数法与 BP 神经网络的造船业风险预警研究[J]. 中国造船, 2010, 51(1): 191—198.
TAO Yong-hong, QI Ai-lin. Research on early-warning of China's shipbuilding industry risk based on efficacy coefficient method and BP neural network[J]. *Shipbuilding of China*, 2010, 51(1): 191—198.
- [9] 徐佳, 张勤, 吴继敏. 功效系数法在确定岩体优势面中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(4): 538—541.
XU Jia, ZHANG Qin, WU Ji-min. Application of efficacy coefficient method to determination of rock preferred structural plane[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2008, 36(4): 538—541.
- [10] 蒋洁. 功效系数法在高校财务风险预警中的应用[J]. 财务与金融, 2009, (5): 56—60.
JIANG Jie. Application of efficiency coefficient method in early warning of financial risks in colleges and universities[J]. *Finance and Financial*, 2009, (5): 56—60.
- [11] 周莉, 黄河清, 蒲勇健. 基于功效系数法的经营者相对业绩评价研究[J]. 软科学, 2006, 20(1): 40—44.
ZHOU Li, HUANG He-qing, PU Yong-jian. Relative performance evaluation of executives based on efficacy coefficient method[J]. *Soft Scientists*, 2006, 20(1): 40—44.
- [12] 刘恒, 巢健茜. 基于功效系数法的医疗质量综合评价[J]. 中国医院管理, 2008, 28(2): 25—26.
LIU Heng, CHAO Jian-qian. Comprehensive evaluation based on efficacy coefficient method quality[J]. *Chinese Hospital Management*, 2008, 28(2): 25—26.
- [13] 王迎超, 尚岳全, 孙红月, 等. 基于功效系数法的岩爆烈度分级预测研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 529—534.
WANG Ying-chao, SHANG Yue-quan, SUN Hong-yue, et al. Study of prediction of rockburst intensity based on efficacy coefficient method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 529—534.
- [14] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1055—1060.
GAO Hua-xi, YIN Kun-long. Discussion on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5): 1055—1060.
- [15] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 198—204.
LIN Hong-zhou, YU Yu-zhen, LI Guang-xin, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(1): 198—204.
- [16] GLADE T. Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology[J]. *Geomorphology*, 2005, 66(14): 189—213.
- [17] ZHOU C H, LEE C F, LI J. On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong[J]. *Geomorphology*, 2002, 43(3—4): 197—207.
- [18] 孟凡奇, 李广杰, 汪茜. 最优组合赋权法在泥石流危险度评价中的应用[J]. 人民长江, 2009, 40(22): 40—42.
MENG Fan-qi, LI Guang-jie, WANG Qian. Application of optimal combination weighting law in the debris flow risk assessment[J]. *Yangtze River*, 2009, 40(22): 40—42.
- [19] 中华人民共和国国土资源部. GT/T 0220—2006 泥石流灾害防治工程勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [20] 仲桂清, 张恒轩, 刘国海. 辽东山区泥石流成因和危险度区划研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(3): 81—91.
ZHONG GUI-qing, ZHANG HENG-xuan, LIU GUO-hai. The study of contributing factors and dangerous degree divisions debris flow in mountain areas of eastern Liaoning province[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, 15(3): 81—91.
- [21] 丛威青, 潘懋, 任群智, 等. 基于水文气象数据的泥石流灾害预报研究[C]//第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2006: 602—607.