

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.01.016

基于确定性系数模型的地质灾害多因子权重计算方法

刘艳辉^{1,2}, 刘传正¹, 唐 灿¹, 温铭生¹, 连建发¹

(1. 中国地质环境监测院(国土资源部地质灾害应急技术指导中心), 北京 100081;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 地质灾害影响因子权重的确定是区域地质灾害评价和预警模型研究的关键。本文采用确定性系数模型(CF)实现复杂多因子数据的同区间量化, 基于 CF 值直接代表着各因子对地质灾害的贡献这一物理基础, 提出了一种基于 CF 的多因子叠加确定权重法。该方法通过三步完成权重计算: (1) 基于 CF 的地质灾害各影响因子量化, 使得各影响因子取值均介于 0~1; (2) 所有影响因子逐级叠加计算, 计算所有因子的相对贡献值; 除某计算因子外, 其他所有影响因子的逐级叠加计算, 得到除某计算因子外的其他所有因子的相对贡献值; (3) 通过相减的方法, 得到某计算因子的相对贡献值。同样方法分别得到所有因子的相对贡献值, 最后归一化处理分别得到所有因子的权重。最后, 以区域显式统计预警模型中潜势度计算为例, 分区计算确定了地质灾害各影响因子的权重, 并以潜势度计算结果进行效果检验, 验证了基于 CF 的多因子叠加确定权重法的有效性和实用性。

关键词: 多因子叠加确定权重法; 地质灾害潜势度; 确定性系数模型(CF 值); 区域评价

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)01-0092-06

CF-based multi-factor overlay method to determine weights of the factors for geo-hazards

LIU Yanhui^{1,2}, LIU Chuanzheng¹, TANG Can¹, WEN Mingsheng¹, LIAN Jianfa¹

(1. *China Institute of Geo-Environmental Monitoring(Technical Center for Geo-Hazards Emergency of MLR)*, Beijing 100081, China; 2. *Institute of geology and geophysics, CAS, Beijing 100029, China*)

Abstract: Determining the weights of geo-hazards factors is the key to regional geo-hazards evaluation and early warning model study. This paper, Certainly Factor model (CF) is used to quantify complex multi-factors in the same range. For the physical basis of CF value, which directly represents the contribution of each factor to geo-hazards, we propose a CF-based multi-factor overlay method to determine weights of factors for geo-hazards. The method is divided into three steps: (1) Each factor to geo-hazards is quantified with CF, so that the value of each factor in the range between 0~1. (2) All factors progressively overlay to calculate the relative contribution of all factors. For every calculation factor, all the other factors progressively overlay to obtain the relative contribution of other factors except it. (3) By subtraction method, we can obtain the relative contribution value of the calculation factor. With the same method, we can obtain the relative contribution value of all the factors. Finally, weights of all factors can be normalized to get their weights. In a case study, geo-hazards potentiality parameter evaluation in the early warning model, each factor weight of geo-hazard is calculated. With the result check of geo-hazard potentiality parameter, the method is effectiveness and practicality.

Keywords: multi-factor overlay method to determine weights; geo-hazards potentiality parameter; Certainly Factor model (CF); regional evaluation

收稿日期: 2014-10-11; 修订日期: 2014-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202217); 国家级地质环境监测与预报项目: 全国地质灾害气象预警预报(1212140501001-1)

第一作者: 刘艳辉(1978-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治、工程地质等方面的研究工作。E-mail: liuyh@mail.cigem.gov.cn

0 引言

地质灾害影响因子复杂多样,区域评价是地质灾害研究的重要手段之一,而影响因子权重的确定是区域地质灾害评价和预警模型研究的关键。权重是一个相对的概念,某一因子的权重是指该因子在地质灾害评价整体中的相对重要程度,代表了不同因子作用或贡献的大小。

常用的区域地质灾害评价体系中,确定权重的方法一般有德尔菲法(专家打分法)、层次分析法、本底因素贡献权重法、模糊权重法、神经网络法和熵值赋权法等^[1-11],归纳起来可以分为两类:一类是以德尔菲法(专家打分法)为代表,是通过充分挖掘专家的知识、经验,把专家经验变为数学语言表达,从而确定各因子的权重,该方法汇集了专家经验的综合优势,特别适用于缺少信息资料和历史数据,而又较多地受到其他因素影响的信息分析与预测。但也存在专家主观性较重,容易受到专家个体主观意识的制约,有可能出现专家在一些不太熟悉的区域或经验不足的情况,可能会出现给定权重偏差,因此影响区域评价的结果;另一类是层次分析法、模糊权重法为代表,该类方法主要是将专家经验与数学统计方法相结合,首先通过专家经验建立不同目标层(影响因子),然后通过数学统计方法比较每个因子相互作用大小,从而建立权重指标,该方法相对于完全依靠专家意见赋值得到的主观权重而言,通过各因子对历史灾害分布的数学计算来确定因子权重,显然更具有客观性。但往往又存在计算过程中复杂程度不一,计算中个人主观判别的参与,大量已知样本的获取难度,以及是否满足统计规律等限制,同时也易受到计算过程的复杂性和计算结果的可靠性的影响。

本文从广泛采用的确定性系数模型(CF)出发,基于CF值直接代表着各因子对地质灾害的贡献这一物理基础,提出了一种基于CF的多因子叠加确定权重法。该方法模型简单,应用方便,可以在滑坡等地质灾害因子权重研究中借鉴。

1 基于CF的因子量化

影响地质灾害的因子纷繁复杂,描述方式多以定性、不统一的方式表达,不能直接进行数学计算,如工程地质岩组(如坚硬至软弱薄层-层块状碎屑岩夹碳酸盐岩岩组),以离线定性表达形式存在;坡度(如25°)、年均雨量(如1000~1200 mm)等,虽以连续形

式存在,但数值量纲不同,所在区间不同,仍然不能直接进行数学计算。信息定量化统一表达是实现区域评价的难点和基础。前人有的依据丰富的专家经验分类分段赋值的方式实现因子量化^[12],也有的通过引入不确定性推理中的确定性系数模型(CF)实现因子量化。

确定性系数模型(CF)是一个概率函数,最早由Shortliffe和Buchanan(1975)提出^[13],由Heckerman(1986)进行了改进^[14],用来分析影响某一事件发生的各因子的敏感性。兰恒星将CF概率函数计算方法成功应用到区域性滑坡的因子敏感性分析之中^[15]。CF函数,具体表示为:

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & \text{if } PP_a \geq PP_s \\ \frac{PP_s - PP_a}{PP_s(1 - PP_s)} & \text{if } PP_a < PP_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: PP_a 为事件(地质灾害)在数据a类中发生的条件概率,应用时为数据类a中存在的地质灾害个数与数据类a面积的比值; PP_s 为地质灾害在整个研究区A中发生的先验概率,可以表示为整个研究区的地质灾害的个数与研究区面积的比值。

CF的变化区间为 $[-1, 1]$ 。正值代表事件发生确定性的增长,即地质灾害发生的确定性高,地质环境条件差;负值代表确定性的降低,即地质灾害发生的确定性低,地质环境条件好;CF值接近于0,说明确定性居中,不能确定地质环境的优劣。

采用确定性系数开展因子量化的基本假定是,在具备已知发生地质灾害地区的相似环境条件时,未来本区的斜坡就有可能发生类似的地质灾害。通过确定性系数函数,将地质灾害各影响因子实现了同区间 $[-1, 1]$ 的定量化,该方法实现了复杂多因子数据的同区间定量化的问题,并可合并计算。

2 多因子叠加确定权重法

确定性系数(CF)实现了地质灾害各影响因子的定量化表达,从确定性系数(CF)函数公式(1)可见,某单元格的每个因子的CF值直接代表了该因子对地质灾害多发与否的贡献值。从该物理意义出发,通过各因子之间的CF值数学统计计算,就有可能因此确定各因子之间相对权重的大小。因此,本文通过各因子CF值叠加相减的方法,提出了一种权重确定方法,命名为基于CF的多因子叠加确定权重法。具体的计算方法和步骤如下:

2.1 影响因子CF值叠加计算

通过将参与区域评价的地质灾害各影响因子逐一叠加计算,可以表达为参与合并计算的因子图层对地质灾害的综合贡献值。如果所有因子图层均参与叠加计算,则得到的就是所有因子图层的总贡献;如果参与叠加计算的是其中的两个因子,则结果即为这两个因子的综合贡献。

假定合并两个因子的 CF 值分别为 x 和 y ,合并后的结果为 Z ,合并公式如下式:

$$Z = \begin{cases} x + y - x \cdot y & x, y \geq 0 \\ \frac{x + y}{1 - \min(|x|, |y|)} & x, y < 0 \\ x + y + x \cdot y & x, y < 0 \end{cases} \quad (2)$$

为使合并结果易于解释,将合并后的 CF 值进行分类,分为 5 个级别(表 1),分别表示对地质灾害发生的贡献为贡献小、贡献较小、贡献不定、贡献较大和贡献大。

根据上式(2)逐步迭加合并所有影响因子,合并结果用 Z_{all} 表示,合并后各级别分段百分比用 Z_{all-i} ($i=1,2,\dots,5$) 表示;根据上式(2)逐步叠加合并各影响因子(某因子除外),合并结果用 $Z_{某因子}$ 表示,合并后各级别分段百分比分别用 $Z_{某因子-i}$ ($i=1,2,\dots,5$) 表示(表 1)。

表 1 CF 级别划分

Table 1 Division of CF value

分级	CF 值分段	对地质灾害的贡献	所有因子叠加	除某因子外其他所有因子叠加
1	< -0.6	小	Z_{all-1}	$Z_{某因子-1}$
2	$-0.6 \sim -0.2$	较小	Z_{all-2}	$Z_{某因子-2}$
3	$-0.2 \sim 0.2$	不确定	Z_{all-3}	$Z_{某因子-3}$
4	$0.2 \sim 0.6$	较大	Z_{all-4}	$Z_{某因子-4}$
5	≥ 0.6	大	Z_{all-5}	$Z_{某因子-5}$

2.2 某影响因子 CF 值的贡献计算

当计算某因子图层的 CF 值的贡献时,可根据式(3)计算该图层的 CF 值贡献。此步骤计算中也可以排除重复因子的贡献。

$$\Delta Z_{某因子-i} = Z_{all-i} - Z_{某因子-i} \quad (3)$$

其中: $\Delta Z_{某因子-i}$ ——某影响因子 CF 合并分段贡献值;

Z_{all-i} ——所有影响因子 CF 合并分段结果值;

$Z_{某因子-i}$ ——除该影响因子外其他所有因子 CF 合并分段结果值;

i ——CF 分段级别, $i=1,2,\dots,5$ 。

2.3 计算各因子权重

根据式(4),计算每个因子的相对贡献大小,最后经归一化后得到各因子的权重。

$$t = \sum_{i=1}^5 |\Delta Z_{某因子-i}| \quad (4)$$

其中: t ——某影响因子的权重;

$\Delta Z_{某因子-i}$ ——某影响因子 CF 分段贡献值;

i ——CF 分段级别, $i=1,2,\dots,5$ 。

3 模型方法应用

国家级区域地质灾害气象预警第二代模型方法——显式统计预警模型,是一种考虑地质环境变化与降雨参数等多因素迭加建立预警判据模型的方法^[16-18]。模型中将地质环境区域评价量化为“地质灾害潜势度”。模型通式为:

$$T = f(G, R_d, R_p) \quad (5)$$

其中: T 为预警指数,据此确定地质灾害气象预警等级。 R_d, R_p 为雨量指标,分别为日雨量和前期累计雨量。 G 为地质灾害潜势度,是地质环境区域评价的量化指标。

$$G = \sum_{j=1}^n a_j b_j \quad j=1,2,3,\dots \quad (6)$$

式中: G 为地质灾害潜势度指数; a_j 为单因子的量化取值; b_j 为单因子的权重; n 为价因子个数。

根据式(6),以 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的网格进行剖分,分区开展地质灾害潜势度计算(图 1),7 个大区分别为 A(东北)、B(华北)、C(东南)、D(西南)、E(黄土)、F(西北)、G(青藏)。其中选取 2020 个县市调查成果中崩滑流灾害点(17 万多个)作为历史灾害点(图 2),选取 17 个地质灾害影响因子(表 1)参与计算,分别为断层断裂、水系河流、年均雨量、年均气温、地震烈度、蒸发量、岩土体类型、第四系成因类型、水文地质类型、海拔高程、地形起伏、地貌类型、植被覆盖类型、人口密度、土壤侵蚀、第四系岩性和地层岩性。

首先采用确定性系数模型(CF)实现因子的同区间量化,以 C 区的地形起伏因子和岩土体类型因子为例,两个因子的分段及 CF 量化结果见图 3 和图 4。

地形起伏度是影响斜坡稳定性的最重要因素之一,起伏度的大小直接决定着斜坡的应力状态,控制着斜坡的稳定性。在 C 区(东南区)区域研究中,将地形起伏因子分为极大起伏、大起伏、中起伏、小起伏、丘陵和其他六类,由图 3 中 CF 值计算结果,该区域最有利于地质灾害发生的地形起伏度由大到小分别为大起伏(0.345)、中起伏(0.306)、小起伏(0.089),而丘陵、其他、极大起伏不利于地质灾害的发生。

斜坡岩土体类型作为地质灾害发生的物质基础,



图 1 潜势度计算大区划分

Fig.1 Zone division in geo-hazards potentiality evaluation

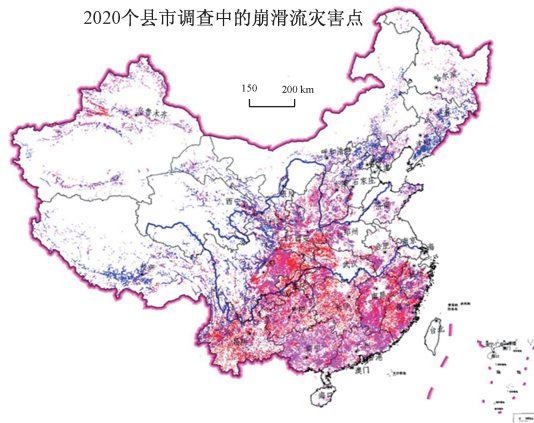


图 2 潜势度计算中地质灾害点分布示意图

Fig.2 Distribution of 2020 counties geo-hazards

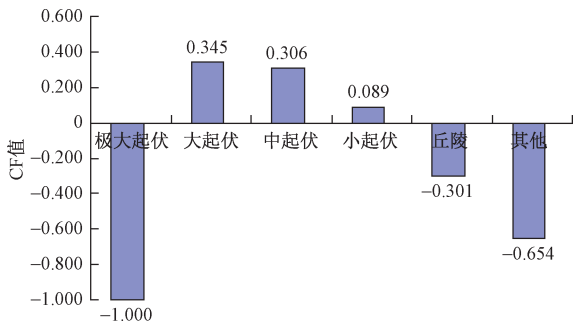


图 3 C 区地形起伏因子 CF 计算结果

Fig.3 CF value of terrain factor (c district)

是影响斜坡稳定的最重要因素,决定着斜坡岩土体的强度和应力分布,是变形破坏的基础。根据 C 区(东南区)的地质环境特征,将岩土体类型因子分为火成岩、碎屑岩、变质岩、碳酸盐岩、砂质土和其他土六类,由图 4 中 CF 值计算结果,该区域最有利于地质灾害发生的岩土体类型为火成岩(0.348),其次为变质

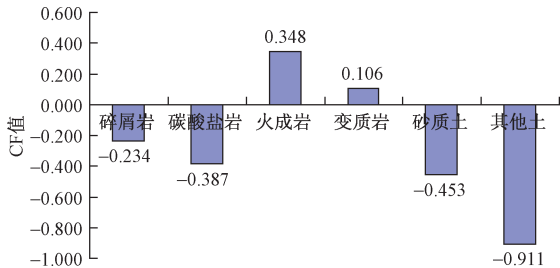


图 4 C 区岩土体类型因子 CF 计算结果

Fig.4 CF value of rock-soil type factor (c district)

岩(0.106)。

根据各因子 CF 量化结果,采用上节中“多因子叠加确定权重法”分区计算各影响因子权重见表 2。

表 2 各区地质灾害影响因子权重							
Table 2 Weight of geo-hazards factors for seven zones							
影响因子	各区权重						
	A	B	C	D	E	F	G
地层岩性	0.02	0.09	0.07	0.04	0.07	0.03	0.03
地貌类型	0.04	0.07	0.13	0	0.06	0.02	0.03
地形起伏	0.01	0.12	0.17	0.03	0.06	0.1	0.1
地震烈度	0.04	0.02	0	0.07	0	0.1	0.04
第四系成因类型	0.02	0.06	0.05	0.06	0.03	0.11	0.07
第四系岩性	0.03	0.04	0.07	0.03	0.02	0.09	0.03
断层断裂	0.05	0.07	0.05	0.05	0.02	0.06	0.04
海拔高程	0.01	0.07	0.09	0.07	0.09	0.1	0.03
年均气温	0.35	0.03	0.02	0.05	0.07	0.04	0.15
年均雨量	0.02	0.03	0.06	0.04	0.05	0.02	0.17
人口密度	0.05	0.04	0.03	0.14	0.23	0.01	0.01
水文地质类型	0.05	0.08	0.05	0.1	0.06	0.03	0.04
水系河流	0.04	0.03	0.01	0.01	0.04	0.09	0.04
土壤侵蚀	0.21	0.06	0.06	0.06	0.04	0.05	0.09
岩土体类型	0.04	0.11	0.06	0.04	0.06	0.02	0.03
蒸发量	0.02	0.03	0.02	0.11	0.06	0.06	0.04
植被覆盖类型	0.02	0.06	0.06	0.11	0.04	0.07	0.05

由于选取因子较多(17 个),每个因子的权重相对较小,权重差偏小。17 个因子的平均因子权重应为 1/17,即 0.06,因此当某个因子权重超过 0.06 时,可以认为该因子为地质灾害的敏感因子。如地震烈度图层在 B 区、C 区、E 区的权重最小,分别为 0.02、0、0,而在 D 区的地震烈度权重较高(0.07),F 区的地震烈度权重较高(0.10),B 区和 C 区地形起伏因子的权重最高,分别为 0.12 和 0.17,均符合经验认识。

将各区潜势度的计算结果,与历史灾害点的分布情况进行对比分析,校验潜势度是否能够体现地质环境的优劣程度,以 C 区(东南区)和 D 区(西南区)为例,见图 5 和图 6,其中横坐标为各网格单元的潜势度值,纵坐标为各网格单元内的平均灾害点密度。在各

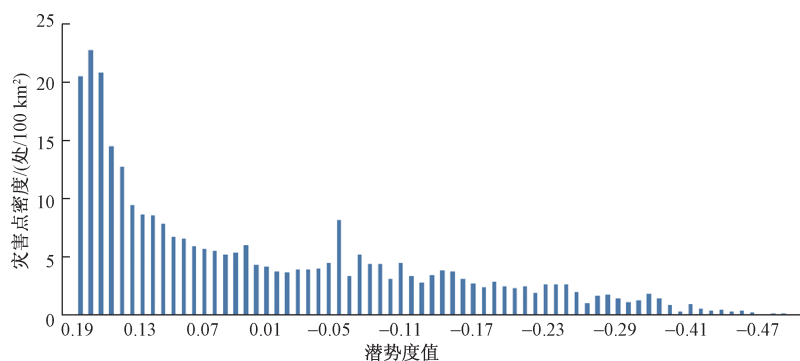


图5 地质灾害“潜势度”检验(C区)

Fig. 5 Geo-hazards “potentiality parameter” check of Zone C

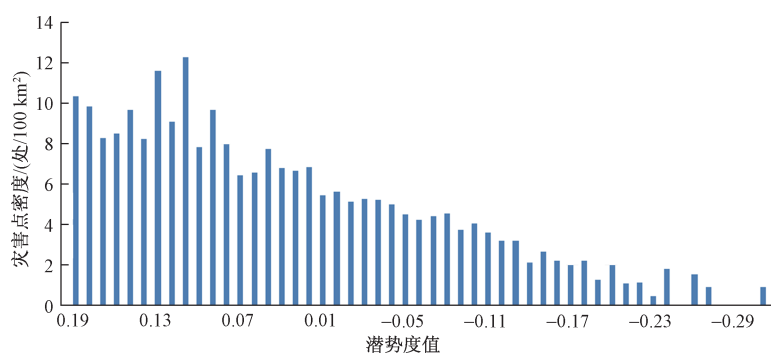


图6 地质灾害“潜势度”检验(D区)

Fig. 6 Geo-hazards “potentiality parameter” check of Zone D

区范围内,随着潜势度值从高向低,地质灾害点的密度逐步减少,反映了地质灾害潜势度大的区域历史灾害点分布频率大,地质灾害潜势度值小的区域,历史灾害点分布频率少,即地质灾害潜势度值的大小能够反映历史地质灾害点的多少,能够反映地质背景环境条件的优劣。因此,验证了基于 CF 的多因子叠加确定权重法的有效性和实用性。

4 结论

本文提出了基于 CF 的多因子叠加确定权重法,并以区域地质灾害气象预警中地质灾害潜势度计算进行验证。

(1)区域地质灾害评价研究中,影响地质灾害的因子纷繁复杂,描述方式多以定性、不统一的方式表达,不能直接进行数学计算,可以通过引入不确定性推理中的确定性系数模型(CF)实现复杂多因子数据的同区间量化。

(2)确定性系数(CF)实现了地质灾害各影响因子的量化表达,且每个因子的 CF 值直接代表了该因子对地质灾害多发与否的贡献值。从该物理意义出发,提出了基于 CF 的多因子叠加确定权重法。该方

法可分三步完成:1)基于 CF 的地质灾害各影响因子量化,使得各影响因子取值均介于 0 ~ 1;2)所有影响因子逐级叠加计算,计算所有因子的相对贡献值;除某计算因子外,其他所有影响因子的逐级叠加计算,得到除某计算因子外的其他所有因子的相对贡献值;3)通过相减的方法,得到某计算因子的相对贡献值,并归一化处理得到该因子的权重。

(3)通过区域地质灾害气象预警中地质环境指标(地质灾害潜势度)的计算,验证了该方法的有效性和实用性。

参考文献:

- [1] Seyed S H, Hamidreza N, Abas H. A new linear programming method for weights generation and group decision making in the analytic hierarchy process[J]. Group Decision and Negotiation, 2009, 18(6): 1-22.
- [2] Niels G, Jeff A. Correlation weights in multiple regression[J]. Psychometrika, 2010, 75(1): 58-69.
- [3] CHEN T, Xu X L, WANG S H. An intelligent prediction method based on information entropy weighted elman neural network [J]. Intelligent Computing and Information Science, 2010, 135(1):

- 142 - 147.
- [4] XU Z S, Cai X Q. Minimizing group discordance optimization model for deriving expert weights [J]. Group Decision and Negotiation, 2011, 20(3): 1 - 13.
- [5] 乔建平. 滑坡本底因子贡献率与权重转换研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(3): 73 - 78.
- QIAO Jianping. Study on the conversion between the contribution rate and weight of the controlling factors for landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(3): 73 - 78.
- [6] 刘伟涛, 顾鸿, 李春洪. 基于德尔菲法的专家评估方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(37): 189 - 204.
- LIU Weitao, GU Hong, LI Chunhong. Expert evaluation method based on delphi method [J]. Computer Engineering, 2011, 37(37): 189 - 204.
- [7] 任凯珍, 冒建, 陈国骅. 关于地质灾害孕灾因子权重确定的探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 80 - 86.
- REN Kaizhen, MAO Jian, CHEN Guohu. A discussion on the weights of the influence factors of geological hazards [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(1): 80 - 86.
- [8] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- XU Shubai. Principle of AHP [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988.
- [9] 唐凡, 林剑, 龙万学, 等. 基于模糊粗糙集的公路地质灾害影响因子的权重分配[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2012, 27(1): 73 - 78.
- TANG Fan, LIN Jian, LONG Wanxue, et al. The weights allocation of highway geological disasters impact factor based on fuzzy-rough set [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2012, 27(1): 73 - 78.
- [10] 张丽君, 江思宏. 区域性滑坡敏感性评价的数据驱动权重模型及应用[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(6): 33 - 36.
- ZHANG Lijun, JIANG Sihong. Data driven weight model for regional landslide susceptibility assessment and its application [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(6): 33 - 36.
- [11] 匡乐红, 徐林荣, 刘宝琛. 组合赋权法确定地质灾害危险性评价指标权重[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(6): 1063 - 1075.
- KUANG Leihong, XU Linrong, LIU Baochen. A combination weighting method for determining the index weight in geological hazard risk assessment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6): 1063 - 1075.
- [12] 刘传正, 李铁锋, 温铭生, 等. 三峡库区地质灾害空间评价预警研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4): 9 - 19.
- LIU Chuansheng, LI Tiefeng, WEN Mingsheng, et al. Assessment and early warning on geo-hazards in the Three Gorges reservoir region of Changjiang river [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(4): 9 - 19.
- [13] Shortliffe E H, Buchanan G G. A model of inexact reasoning in medicine [J]. Mathematical Biosciences, 1975, 23: 351 - 379.
- [14] Heckerman D. Probabilistic interpretation of MYCIN's certainty factors [A]. In: Kanal L N, Lemmer J F. Uncertainty in Artificial Intelligence [C]. New York: Elsevier, 1986. 298 - 311.
- [15] 兰恒星, 伍法权, 周成虎, 等. 基于 GIS 的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1500 - 1506.
- LAN Hengxing, WU Faquan, ZHOU Chenghu, et al. Analysis on susceptibility of GIS based landslide triggering factors in Yunnan Xiaojiang watershed [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1500 - 1506.
- [16] 刘传正, 刘艳辉, 温铭生, 等. 中国地质灾害区域预警方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 12.
- LIU Chuansheng, LIU Yanhui, WEN Mingsheng, et al. Method and application of regional warning for geo-hazards in China [M]. Beijing: Geological Publishing, 2009: 12.
- [17] 刘传正, 刘艳辉. 地质灾害区域预警原理与显式预警系统设计研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 11 - 18.
- LIU Chuansheng, LIU Yanhui. Early warning theory for regional geo-hazards and design of explicit statistical system [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(6): 11 - 18.
- [18] 刘艳辉, 刘传正, 连建发, 等. 基于显式统计原理的地质灾害区域预警方法初步研究[J]. 中国地质, 2008, 35(2): 344 - 350.
- LIU Yanhui, LIU Chuansheng, LIAN Jianfa, et al. Preliminary study of geo-hazards regional early warning based on explicit statistical theory [J]. Geology in China, 2008, 35(2): 344 - 350.