

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.01.007

基于 AHP-模糊综合评判的岩溶塌陷危险性评价

武运泊,王运生,曹文正

(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)

摘要:我国 1/3 以上的国土面积有可溶岩分布,尤其是我国南方各地经常发生岩溶塌陷,且塌陷的数量多、规模大,严重影响国民经济建设;目前,用于岩溶塌陷危险性评价的方法很多,但普适性有限。在大量实地调研资料的基础上,选取 15 个因素并分成 4 个类别,运用层次分析法确定评价因子权重,以模糊数学理论为基础建立岩溶塌陷危险性评价两级综合评判模型,以岭形分布函数作为定量影响因素的隶属函数,并给出了确定岭形隶属函数的定量表达式;以某重大工程岩溶地基作为算例,评价结果与经验公式法评判结果吻合较好,表明评价结果真实可靠,可为工程设计、施工提供一定依据。

关键词:模糊综合评判;岩溶塌陷;层次分析法;隶属函数;危险性评价

中图分类号: P642.25

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)01-0043-06

Risk evaluation of karst collapse based on AHP & fuzzy comprehensive evaluation

WU Yunbo, WANG Yunsheng, CAO Wenzheng

(State Key Laboratory of Geo-hazards Prevention and Geo-environment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The distribution of carbonatite is over a third of China's land area, especially in southern China occurs large-number and large-scale karst collapse frequently, which seriously affects the national economic construction. Currently, there are a lot of methods used for risk evaluation of karst collapse, but the universal applicability is limited. This article selected 15 factors and divided them into four categories, and then used AHP to determine weights of the evaluation factors. The two-stage comprehensive evaluation model of karst collapse was establish based on fuzzy mathematics theory, and ridge-shaped distribution function was used as the membership function of a quantitative factors affecting. Additionally, a quantitative expression used to determine the membership function is given. Finally, the karst foundation of a major project was used as an example, and the evaluation result was in good agreement with that given by empirical formula, which indicates the result is reliable, and can provide some basis for engineering design and construction.

Keywords: fuzzy comprehensive evaluation; karst collapse; Analytic Hierarchy Process (AHP); membership function; risk evaluation

0 引言

我国碳酸盐岩分布面积(含埋藏在非可溶岩之下

者)达 346 km², 约占国土面积的 36%, 岩溶地面塌陷广泛分布于云、贵、桂、川、鄂、湘等 23 个省(市、自治区), 成为我国主要地质灾害之一^[1-2]。随着人类活

收稿日期: 2014-08-15; 修订日期: 2014-10-12

基金项目: 西南地区重大地质灾害调查与预警区划(12120113010100)

第一作者: 武运泊(1988-), 男, 安徽阜阳人, 在读硕士, 主要从事工程地质及地质灾害评价与预测等研究工作。E-mail: wuyunbo25@163.com

动的加剧,岩溶塌陷日益频发,严重影响国民经济建设及人民正常生活。因此,对岩溶区进行岩溶塌陷危险性评价就非常必要。有关岩溶塌陷危险性评价预测的方法很多,如:经验公式法^[3]、人工神经网络法^[4]、结构力学分析法^[5-6]、多元统计分析法^[7]以及地球信息系统(GIS)评价法^[8-9]等。然而,岩溶地面塌陷的形成是一个十分复杂的地质过程,往往是多种效应的复合叠加,影响因素也十分繁多,各因素的影响和作用大小不同,且具有很强的不确定性,给准确地评价岩溶塌陷危险性带来了一定困难^[10];另外,传统方法评价分析评价时考虑的因素不够全面,计算结果偏保守。为此,国内学者^[11-14]引入模糊理论,并取得了不错效果。但是其中仍存在不足之处:(1)影响因素选取不全面,或是忽略了某些重要因素;(2)确定因素权重时没能很好地与实际情况结合;(3)未能提出定性影响因素隶属函数的通用表达式;(4)未能给出构造隶属函数的定量方法。基于前人研究成果,本文将层析分析法与综合评判相结合进行岩溶塌陷危险性评价,并对以上不足之处作有益的补充完善。

1 岩溶塌陷危险性评价

1.1 两级模糊综合评判数学模型

评判对象受多种因素的影响,将各影响因素构成的集合称为因素集,表示为:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\} \quad (1)$$

进行两级模糊综合评判时,要对这 n 个因素进行分类,假设因素可划分成 p 类,则因素集又可表示成:

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_p\} \quad (2)$$

根据各因素对评判对象的影响程度大小,对各因素分配一个相应的权数 ω_i , $i=1, 2, \dots, n$ 。设第 k 类因素包含 l 个子因素,则第 k 类元素权重集可表示为:

$$W_k = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_l\} \quad (3)$$

根据每类因素的重要程度,赋予每类因素相应的权数,则因素类权重集可表示为:

$$W = \{e_1, e_2, \dots, e_p\} \quad (4)$$

评判结果是不确定的,将各种可能的结果组成的集合称为评判集,用 V 表示:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} \quad (5)$$

先进行一级模糊综合评判,设第 k 类因素中第 i 个子因素对评价集 V 中第 j 个元素的隶属度为 r_{ij} ,则可得单因素评判集 $(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$,对第 k 类因素的 l 个子因素的单因素评判集作矩阵

$$R_k = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{l1} & r_{l2} & \dots & r_{lm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由此,对第 k 类因素进行模糊综合评判,可得到评判集

$$B_k = W_k \circ R_k \quad (7)$$

其中,“ $\circ$ ”表示模糊合成运算,为了最大限度地减少信息丢失,本文采用矩阵乘法运算。

再进行二级综合评判,也就是在类之间进行综合评判。 p 个评判集 $B_k (k=1, 2, \dots, p)$ 构成模糊评判矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \circ R_1 \\ W_2 \circ R_2 \\ \vdots \\ W_p \circ R_p \end{bmatrix} \quad (8)$$

将因素类权重 W 与模糊评判矩阵 R 进行模糊合成,可得二级模糊评价指标 D :

$$D = W \circ R = W \circ \begin{bmatrix} W_1 \circ R_1 \\ W_2 \circ R_2 \\ \vdots \\ W_p \circ R_p \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.2 评价因子及塌陷等级的确定

岩溶塌陷的发生是多种因素综合作用的结果。通过大量工程实例及前人^[10,15]研究成果分析,优选出 15 个影响因素作为评价因子,并将其划分为 4 个类别,分别为:岩性、水、覆盖层及人类工程活动。

根据《工程地质手册(第四版)》及《中国岩溶学》中的相关规定,将岩溶塌陷危险性划分为 5 个等级,则评判集可表示为:

$$V = \{\text{稳定, 基本不塌, 难塌, 易塌, 极易塌}\}。$$

岩溶塌陷危险性评价因子及危险性等级分级标准见表 1。

1.3 用 AHP 确定评价因子权重

AHP(层次分析法)是 20 世纪 70 年代由美国运筹学教授 T. L. Saaty 提出的,对于求解评价因子权重十分有效,具体求解过程如下^[16]:

首先,运用 1~9 标度法确定各类评价因素 (U_1, U_2, U_3, U_4) 及因素类 (U) 的判断矩阵(表 2~表 6)。

表 1 评价因子及分级标准

Table 1 Factor for evaluation and standard for classification			级别				
因素类	因素	代号	稳定(1) v_1	基本不塌(2) v_2	难塌(3) v_3	易塌(4) v_4	极易塌(5) v_5
岩性 U_1	岩性	u_1	非碳酸盐岩	泥质灰岩	白云岩夹灰岩	灰岩夹白云岩	灰岩
	岩溶程度	u_2	<0.1	0.1~0.25	0.25~0.4	0.4~0.55	>0.55
	岩体结构	u_3	整体	块状	层状	碎裂	散体
	基覆面特征	u_4	平整	微起伏	中等起伏	起伏较大	起伏很大
水 U_2	地下水位与基覆面垂距	u_5	>5	5~3	3~2	2~1	<1
	地下水位变幅	u_6	<0.2	0.2~0.8	0.8~1.5	1.5~2.0	>2.0
	地下水的波动频率	u_7	<3	3~8	8~13	13~18	>18
	地下水 PH 值	u_8	>7	7~5.5	5.6~4.4	4.3~3.0	<3.0
	地下水径流强度	u_9	很弱	弱	中等	强	很强
	地表水入渗	u_{10}	少量入渗	特殊情况一定量入渗	一年内数次入渗	一年内多次大量入渗	时时大量入渗
覆盖层 U_3	覆盖层厚度(m)	u_{11}	>30 或 0	30~20	20~10	10~5	5<
	覆盖层性质	u_{12}	黏性土	红黏土	砾石	粉土	砂
	覆盖层结构特征	u_{13}	单一层,基本均匀	双层,上部弱透水,下部强透水	多层或不均匀,上部弱透水,下部强透水	多层或不均匀,上部强透水,下部弱透水	双层,上部强透水,下部弱透水
人类工程活动 U_4	人抽排水强度	u_{14}	很弱	弱	中等	强	很强
	地面附加荷载	u_{15}	无	静荷载	频繁变化动荷载	相对固定振动荷载	位置变动振动荷载

表 2 U_1 因素判断矩阵

Table 2 The judgment matrix of U_1 factors				
	u_1	u_2	u_3	u_4
u_1	1	1/2	2	5
u_2	2	1	4	6
u_3	1/2	1/4	1	4
u_4	1/5	1/6	4	1

表 3 U_2 因素判断矩阵

Table 3 The judgment matrix of U_2 factors						
	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}
u_5	1	2	2	7	3	3
u_6	1/2	1	2	6	3	3
u_7	1/2	1/2	1	5	2	2
u_8	1/7	1/6	1/5	1	1/5	1/2
u_9	1/3	1/3	1/2	5	1	2
u_{10}	1/3	1/3	1/2	2	1/2	1

表 4 U_3 因素判断矩阵

Table 4 The judgment matrix of U_3 factors			
	u_{11}	u_{12}	u_{13}
u_{11}	1	2	2
u_{12}	1/2	1	1/2
u_{13}	1/2	2	1

表 5 U_4 因素判断矩阵

Table 5 The judgment matrix of U_4 factors		
	u_{14}	u_{15}
u_{14}	1	2
u_{15}	1/2	1

表 6 因素类(U)判断矩阵

Table 6 The judgment matrix of factor categories				
	U_1	U_2	U_3	U_4
U_1	1	1/2	2	5
U_2	2	1	4	6
U_3	1/2	1/4	1	4
U_4	1/5	1/6	4	1

然后,根据以下公式求解各类因素的权重集以及因素类权重集:

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{c_{ij}}{\sum_{k=1}^n c_{kj}} (i = 1, 2, \cdots, n)$$

(10)

式中: ω_i 为一级因素(或因素类)权重; c_{ij} 、 c_{kj} 为判断矩阵元素; n 为判断矩阵阶数。由此可求得岩溶塌陷 4 类影响因素权重集 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 及因素类权重集 W :

$$W_1 = (0.187, 0.293, 0.412, 0.108)$$
$$W_2 = (0.330, 0.255, 0.1710, 0.037, 0.124, 0.082)$$
$$W_3 = (0.490, 0.198, 0.312)$$
$$W_4 = (0.667, 0.333)$$
$$W = (0.280, 0.497, 0.163, 0.059)$$

由于标度各元素对评价对象相对影响大小时具有一定的主观性,可能产生逻辑上的混乱与矛盾,故最后对判断矩阵一下进行一致性检验:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij} \omega_j}{\omega_i}$$

(11)

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} (n > 1) \quad (12)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (13)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵最大特征值; CI 为一致性指标; RI 为随机一致性指标, 其值可由表 7 查得; CR 为一致性比率。若 $CR < 0.1$, 则认为判断矩阵通过一致性检验, 所求权重集是合理的。

表 7 随机一致性指标 RI 取值表

Table 7 The Value of RI

阶数	3	4	5	6	7
RI	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36

由公式 (11) ~ (13) 可求得各判断矩阵一致性比率, 且均满足 $CR < 0.1$ (表 8)。

表 8 各判断矩阵一致性比率 CR

Table 8 Calculated value of CR

判断矩阵	U_1	U_2	U_3	U_4	U
CR	0.027	0.027	0.052	0	0.035

1.4 隶属函数的建立

隶属函数的确定是模糊综合评判中的重要内容, 隶属函数的值 (隶属度) 是表征评价因子隶属于某个评价等级的程度。经综合分析比较, 对于定量作用因素采用岭形分布隶属函数来确定各因素对各评价等级的隶属度。并依据以下原则确定隶属函数图像 (图 1): ①当变量 x 位于两界限值中间 $1/2$ 步长范围内时, 隶属度为 1; ②当 x 逐渐离开此范围时, 该变量对某等级的隶属度从 1 减小至 0; ③当 x 取评价等级界限值 (a_1, a_2, a_3, a_4) 时, 隶属度为 0.5。隶属度函数公式如下:

$$A_1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq x_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{x_2 - x_1} \left(x - \frac{x_2 + x_1}{2} \right) & x_1 < x \leq x_2 \\ 0 & x > x_2 \end{cases} \quad (14)$$

$$A_2(x) = \begin{cases} 0 & x \leq x_1 \text{ 或 } x > x_4 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{x_2 - x_1} \left(x - \frac{x_2 + x_1}{2} \right) & x_1 < x \leq x_2 \\ 1 & x_2 < x \leq x_3 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{x_4 - x_3} \left(x - \frac{x_3 + x_4}{2} \right) & x_3 < x \leq x_4 \end{cases} \quad (15)$$

$$A_3(x) = \begin{cases} 0 & x \leq x_3 \text{ 或 } x > x_6 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{x_4 - x_3} \left(x - \frac{x_3 + x_4}{2} \right) & x_3 < x \leq x_4 \\ 1 & x_4 < x \leq x_5 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{x_6 - x_5} \left(x - \frac{x_5 + x_6}{2} \right) & x_5 < x \leq x_6 \end{cases} \quad (16)$$

$$A_4(x) = \begin{cases} 0 & x \leq x_5 \text{ 或 } x > x_8 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{x_6 - x_5} \left(x - \frac{x_5 + x_6}{2} \right) & x_5 < x \leq x_6 \\ 1 & x_6 < x \leq x_7 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{x_8 - x_7} \left(x - \frac{x_7 + x_8}{2} \right) & x_7 < x \leq x_8 \end{cases} \quad (17)$$

$$A_5(x) = \begin{cases} 0 & x \leq x_7 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{x_8 - x_7} \left(x - \frac{x_7 + x_8}{2} \right) & x_7 < x \leq x_8 \\ 1 & x > x_8 \end{cases} \quad (18)$$

其中:

$$x_1 = \frac{1}{4}(5a_1 - a_2), x_2 = \frac{1}{4}(3a_1 + a_2)$$

$$x_3 = \frac{1}{4}(a_1 + 3a_2), x_4 = \frac{1}{4}(3a_2 + a_3)$$

$$x_5 = \frac{1}{4}(a_2 + 3a_3), x_6 = \frac{1}{4}(3a_3 + a_4)$$

$$x_7 = \frac{1}{4}(a_3 + 3a_4), x_8 = \frac{1}{4}(5a_4 - a_3)$$

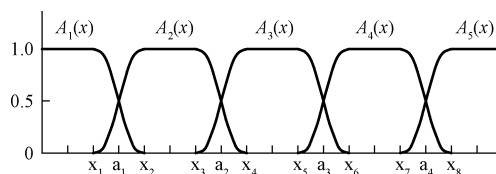


图 1 岭形分布隶属函数图像

Fig. 1 Ridge-shaped distribution membership function

对于定性作用因素可以按一定的原则对其进行离散赋值, 对应于 $\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ 分别赋值 1、2、3、4、5, 值越大越岩溶地面越容易塌陷, 然后采取相邻隶属度减半的方法来计算隶属度^[17]:

$$U_{si} = \left(\frac{1}{2} \right)^{|x - x_i|} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (19)$$

其中, U_{si} 表示隶属度; x_i 表示某因素对应于岩溶塌陷易发性第 i 等级的离散赋值; x 为因素实际评分

值。例如,某岩溶地段地下水抽水强度为弱,实际评价得分为2,带入公式(12)可得一个单因素模糊评判集(0.5,1,0.5,0.25,0.125)。

2 工程实例

贵州省某重大工程位于云贵高原,乌蒙山脉北段,为剥蚀-溶蚀浅中丘地貌,年平均降雨量813.5 mm,降雨多集中在夏季。根据工程地质测绘、钻探及物探资料,主体建筑物地基发育多处岩溶洼地及溶蚀破碎带,第四系覆盖物为粉质粘土及少量粉土,厚度0.5~12.5 m,平均厚度2.8 m,基覆面起伏近10 m;下伏基岩岩性为石炭系上统马平群(C_3mp)灰岩夹少量泥岩、石炭系中统(C_2hn)黄龙群灰岩,岩体成层状结构,岩芯柱长8~35 cm,岩溶裂隙发育,钻孔遇洞率24.1%。地下水为孔隙水、岩溶水,PH值为7.3,地下水平均埋深8.7 m,地下水位到基覆面垂距5.9 m,地下水位年平均变幅1.6 m,地下水波动频率为10,径流强度大;人工抽排水强度弱,对地下水位的影响小;区内岩溶地面承受房屋设施静荷载作用。

将上述定量影响因素取值及定性影响因素实际评分值带入隶属函数(14)~(19),可得模糊判断矩阵

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.0625 & 0.125 & 0.25 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0.684 & 0.316 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.25 \\ 0.125 & 0.25 & 0.5 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.017 & 0.983 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.891 & 0.109 & 0 & 0 & 0 \\ 0.125 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.125 \\ 0.125 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.125 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0.5 & 0.25 & 0.125 & 0.063 \\ 0.125 & 0.25 & 0.5 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 0.5 & 0.25 & 0.125 \\ 0.5 & 1 & 0.5 & 0.25 & 0.125 \end{bmatrix}$$

利用上文数学模型进行先进行一级评判,可求得4类因素评判集:

$$B_1 = (0.128, 0.457, 0.605, 0.407, 0.344)$$

$$B_2 = (0.389, 0.056, 0.279, 0.457, 0.103)$$

$$B_3 = (0.237, 0.177, 0.205, 0.337, 0.659)$$

$$B_4 = (0.500, 1.000, 0.500, 0.250, 0.125)$$

再进行二级评判,可求得模糊评价指标 D :

$$D = W \circ R = (0.298, 0.244, 0.371, 0.411, 0.263)$$

依据最大隶属度原则,某重大工程地基岩溶塌陷危险性评价结果为易塌陷(v_4)。在设计、施工及运营阶段都应引起重视。

工程地质钻探在某重大工程主体建筑物地基处共揭露出9个溶洞,根据经验公式法进行溶洞稳定性评价,其中有6个溶洞是不稳定的,场地为易塌区。可见,根据综合评判的结果与经验公式法评价结果有较好的吻合性。

3 结论

根据本文对岩溶塌陷危险性模糊综合评判模型的建立及其实际应用,可以得出以下结论:

(1)优选出15个影响因素作为岩溶塌陷危险性评价因子,对因素进行合理分类,结合实际情况运用层次分析法确定各因素权重及因素类权重,通过多次试算,判断矩阵通过一致性检验,权重有较高可信度。

(2)以AHP与模糊理论为基础建立两级模糊综合评判模型,模型逻辑清晰,评价因子选取全面,可广泛应用。

(3)经综合分析,采用岭形分布函数作为隶属度函数,并给出了构造岭形隶属函数的定量表达式,可供其他学者参考使用。

(4)以某重大工程主体建筑物岩溶地基作为算例,评价结果与经验公式法评价结果吻合较好。

参考文献:

- [1] 张丽芬,曾夏生,姚运生,等.我国岩溶塌陷研究综述[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(3):126-127.
ZHANG Lifeng, ZENG Xiasheng, YAO Yunsheng, et al. Review on karst collapse in China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(3): 126-127.
- [2] 莫阳春,周晓军.侧部岩溶隧道围岩变形特征数值模拟分析[J].水文地质工程地质,2008,35(2):30-34.
MO Yangchun, ZHOU Xiaojun. Numerical simulation analysis on surrounding rock deformation characteristic of tunnel with karst cave beside [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(2): 30-34.
- [3] 田月明,郭纯青,李志宇,等.某工程场地岩溶地基不稳定分区综合研究[J].中国水运,2014,14(2):289-290.
TIAN Yueming, GUO Chunqing, LI Zhiyu, et al.

- The comprehensive study of an engineering venue in karst foundation unstable partition[J]. China Water Transport, 2014, 14(2): 289-290.
- [4] 贺玉龙, 杨立中, 黄涛. 人工神经网络在岩溶塌陷预测中的应用研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(14): 86-90.
- HE Yulong, YANG Lizhong, HUANG Tao. Research on application of artificial neural network in the prediction of karst collapse[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 10(14): 86-90.
- [5] 汪华斌, 刘志峰, 赵文峰, 等. 桥梁桩基荷载下溶洞顶板稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 3651-3656.
- WANG Huabin, LIU Zhifeng, ZHAO Wenfeng, et al. Research on stability of cave roof under pile loading in bridge construction engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 3651-3656.
- [6] 刘善军, 宋长斌, 常允新, 等. 隐伏碳酸盐岩区第四系松散盖层稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 18-21.
- LIU Shanjun, SONG Changbin, CHANG Yunxin, et al. Stability analysis of Quaternary loose cover in carbonate rock region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(1): 18-21.
- [7] Kaufmann, James E. Proceedings of the 11th multi-disciplinary conference-sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst[C]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2008: 257-268.
- [8] Koutepov V M, Mironov O K, Tolmachev V V. Assessment of suffosion-related hazards in karst areas using GIS technology[J]. Environmental Geology, 2008, 54(5): 957-962.
- [9] 雷明堂, 蒋小珍, 李瑜. 地理信息系统(GIS)技术在地质灾害信息管理系统中的应用-以桂林市溶塌陷信息系统为例[J]. 中国岩溶, 1998, 17(2): 126-131.
- LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen, LI Yu. The application of geographic information system in geological disaster information management system-to Guilin karst collapse information system as an example[J]. Carsologica Sinica, 1998, 17(2): 126-131.
- [10] 包惠明, 胡长顺. 岩溶塌陷两级模糊综合评判[J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(1): 49-50.
- BAO Huiming, HU Changshun. Two magnitude fuzzy comprehensive evaluation for karst collapse[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2001, 28(1): 49-50.
- [11] 魏爱华, 马凤山, 邓清海, 等. 广东省某隧道区岩溶塌陷危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 57-60.
- WEI Aihua, MA Fengshan, DENG Qinghai, et al. Evaluation of karst collapse risks along tunnels[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(1): 57-60.
- [12] 李公岩, 李元仲, 杨蕊英, 等. 山东省枣庄市岩溶塌陷的层次模糊预测评判[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 87-90.
- LI Gongyan, LI Yuanzhong, YANG Ruiying, et al. Hierarchic-fuzzy prediction and evaluation of karst collapse in Zaozhuang city, Shangdong province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(2): 87-90.
- [13] 曾玉莹, 郑小战. 岩溶地面塌陷危险性模糊评价方法[J]. 工程地质学报, 2007, 15(1): 63-65.
- ZENG Yuying, ZHENG Xiaozhan. Fuzzy evaluation method for karst collapse risks[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(1): 63-65.
- [14] 李公岩, 李元仲, 杨蕊英, 等. 模糊数学评判山东省枣庄地质灾害现状与发展趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(3): 81-84.
- LI Gongyan, LI Yuanzhong, YANG Ruiying, et al. Evaluation of the geological hazards and development tendency in Zaozhuang using a fuzzy mathematic model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(3): 81-84.
- [15] 邓启江, 李星宇, 王嵘嵘, 等. 某新建国际机场岩溶塌陷易发性预测评价研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 815-817.
- DENG Qijiang, LI Xingyu, WANG Zhengrong, et al. Assessment of the karst collapse predetermination at a new international airport[J]. Chinese Journal of underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 815-817.
- [16] 彭祖赠, 孙韞玉. 模糊(fuzzy)数学及其应用(第二版)[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- PENG Zuzeng, SUN Yunyu. Fuzzy mathematics and its application (2nd ed)[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007.
- [17] 何书, 王家鼎, 朱忠, 等. 基于模糊贴近度的岩溶塌陷易发性研究[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 10-11.
- HE Shu, WANG Jiading, ZHU Zhong, et al. Fuzzy approach degree-based research on occurrence of karst collapse[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(1): 10-11.