

## 岩溶塌陷危险性评价——以独山县交摆村为例

董鹏, 蔡云, 杨建华, 李燕

(中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**[摘要]** 岩溶塌陷是多因素相互影响, 成因机制较为复杂的地质灾害类型, 在空间上具有隐蔽性, 时间上具有突发性的特征。为有效预测、评价岩溶塌陷危险性, 本文采用 GRA-FAHP, 从岩溶条件、覆盖层条件、地下水条件、工程活动条件等因素出发, 选取 14 个主要影响指标构建定性与定量相结合的岩溶塌陷危险性评价模型, 以贵州省独山县交摆村岩溶塌陷区为例对模型进行验证。结果表明, 该模型对岩溶塌陷危险性评价与实际情况相符。可为今后岩溶塌陷危险性的预测、评价提供一些借鉴。

**[关键词]** 岩溶塌陷; GRA; FAHP; 危险性评价; 贵州独山县

**[中图分类号]** P642.21; P642.25 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-5943(2021)04-0437-06

岩溶塌陷是碳酸盐岩地区, 岩溶洞隙上方的岩土体在自然或人为因素的作用下引起突发性变形破坏的一种塌陷现象, 是我国主要地质灾害之一(康彦仁等, 1990), 主要分布在桂、黔、湘、赣、川、滇、鄂、冀、鲁、辽等地区(段先前等, 2016)。其发育过程十分复杂, 是多种因素长期相互作用和影响的结果, 并且具有时间上的突发性和空间上的隐蔽性, 在现实工作中很难全面对其进行预测和防治(雷明堂, 1998; 王滨等, 2011)。它的发生会给社会带来严重的影响, 甚至还会恶化生态环境, 造成严重的经济损失。因此, 对岩溶塌陷进行准确的预测和危险性评价具有理论指导意义和现实意义。

目前, 在岩溶塌陷危险性评价的研究领域, 许多工作者做出了大量的研究, 提出了岩溶塌陷多因素影响和多种评价方法。赵博超, 褚学伟等人介绍了岩溶塌陷的三个基本条件, 分析了岩溶发育、地形地貌、岩土性状、地下水条件、地质构造、人类活动等多重因素对岩溶塌陷的影响(赵博超等, 2015; 褚学伟等, 2015)。在评价方法中, 主要

有支持向量机预测模型(赖永标, 2008), 突变级数法(赵超等, 2016), Fisher 判别分析法(姜春露, 2012), 模糊数学法(张虎彪等, 2007), 灰色理论预测模型(蒙彦等, 2009), 以及 GIS 和 ANN 法(胡成等, 2003), BP 神经网络模型(朱庆杰等, 2003)等方法。这些评价方法对岩溶塌陷危险性评价准确、合理, 一定程度上起到积极的推动作用。但是, 岩溶塌陷是受多因素影响, 空间上的隐蔽性、时间上的突发性和致塌复杂性等特点, 给岩溶塌陷危险性评价工作带来较大的困难。加之, 其发育过程十分复杂, 是一个具有非线性动力特征的决策系统, 当中各因子对岩溶塌陷作用不是相互独立的, 各因子之间的关系虽不明确, 但实际上是存在的, 从本质来讲就是一种灰色关系(李博, 2015)。本文基于岩溶塌的以上特征, 运用灰色关联度和模糊层次分析法相耦合, 建立了定性和定量指标为一体的岩溶塌陷评价模型。该方法能够有效反映影响因素与岩溶塌陷之间非线性评判模型, 得出不同层次的危险性评价结果, 从而综合评价岩溶塌陷的危险性等级。

**[收稿日期]** 2021-08-03 **[修回日期]** 2021-10-14

**[作者简介]** 董鹏(1982—), 男, 高级工程师, 长期从事岩土工程勘察设计工作。

# 1 模糊层次分析法

模糊层次分析法 (FAHP) 是将定性和定量相结合的系统分析方法。是一些学者为了改进 T. L. Saat 的层次分析法中诸如判断一致与矩阵一致性的差异, 一致性检验的困难和缺乏科学性等问题提出来的, 是模糊数学与层次分析相结合的方法, 并运用到指标权重的确定。主要构造模糊互补判断矩阵、模糊一致性判断矩阵, 通过模糊一致性判断矩阵计算权重 (张吉军, 2000; 徐泽水,

2002; 李海华 等, 2013)。

## 1.1 构造模糊互补判断矩阵

在选取评价指标上下层次之间的隶属关系后, 作评价因子间的两两比较, 采用一个因子比另一个因子的重要程度来定量表示, 得到模糊判断矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ , 若模糊判断矩阵有  $a_{ij} + a_{ji} = 1$ , 且  $a_{ii} = 0.5, i, j = 1, 2, \dots, n$ 。则称 A 为模糊互补判断矩阵。关于某准则的相对重要程度得到定量描述, 通常采用如表 1 中的 0.1 ~ 0.9 标度法来给予数量标度。

表 1 0.1 ~ 0.9 标度说明表

Table 1 Explanation of scale 0.1 ~ 0.9

标度	含义
0.5	两个因素相比较, 同等重要
0.6	两个因素相比较, 一个因素比另一个因稍微重要
0.7	两个因素相比较, 一个因素比另一个因素明显重要
0.8	两个因素相比较, 一个因素比另一个因素强烈重要
0.9	两个因素相比较, 一个因素比另一个因素极端重要
0.1	
0.2	反比较, 若因素 $a_i$ 与元素 $a_j$ 相比较得到判断 $r_{ij}$ , 则 $a_j$ 因素与元素 $a_i$ 相比较得到判断为 $r_{ji} = 1 - r_{ij}$
0.3	
0.4	

## 1.2 构造模糊一致性判断矩阵

本文引用文献 (徐泽水, 2002) 将模糊互补矩阵转换为模糊一致性判断矩阵的公式:

$$r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (a_{ij} - a_{ji} + 0.5) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

## 1.3 模糊一致性判断矩阵权重计算

根据公式 (1) 构造模糊一致性判断矩阵  $R = [r_{ij}]_{n \times n}$ , 对其进行归一化处理得:

$$w_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{na} \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad (2)$$

其中, n 为模糊一致性判断矩阵 R 的阶数, 且  $a \geq \frac{n-1}{2}$ , 令  $a = \frac{n-1}{2}$ 。可得到各因素的权重向量, 即  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

密, 通过对因素之间的关联曲线进行比较, 并认为关联曲线几何形状越接近, 对应序列之间的关联度就越大, 反之就越小。本文通过求出因素间的关联系数与模糊层次分析法得到的权重相结合, 可以求得岩溶塌陷相对于标准序列的关联度, 关联度最大值所对应的标准序列等级即为整个岩溶塌陷的安全等级。基于以上思路, 建立灰色关联度和模糊层次分析法岩溶塌陷危险性评价的耦合模型 (王琪 等, 2014; 李博, 2015)。

## 2.1 确定评价对象和评价标准

参考数列 (评价标准) 记为:  $X_i = \{x_i(k), k = 1, 2, 3, \dots, n\}$ , 比较数列 (对价对象) 记为:  $X_j = \{x_j(k), k = 1, 2, 3, \dots, n\}$ , 为了消除量纲和量纲单位不同所带来的不可公度性, 必须对指标进行无量纲化处理。本文按均值化法对各指标数据进行无量纲化处理。具体公式如下:

$$x(k) = x_j(k) / \bar{X}, \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \quad ; i = 1, 2, \dots, n; j = 1,$$

$$2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

按上述公式对指标初值进行无量纲化处理得

# 2 岩溶塌陷的 GRA-FAHP 评价模型

灰色关联度分析法的基本思想是根据序列曲线的几何形状的相似程度来判断其联系是否紧

到如下矩阵:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix}$$

## 2.2 计算关联度系数计算公式如下:

$$\xi_i(k) = \frac{\mu + \rho\eta}{\Delta X_i(k) + \rho\eta} \quad (4)$$

式中: $\xi_i(k)$ 为第*i*个评价对象中第*k*个指标与第*k*个最优指标的关联度系数, $\Delta X_i(k) = |x_i(k) - x_j(k)|$ , $\mu = \min_i \min_k \Delta X_i(k)$ , $\eta = \max_i \max_k \Delta X_i(k)$ , $\rho$ 为分辨系数 $\rho \in (0, 1)$ 一般取0.5, $i = 1, 2, \dots, n$ , $k = 1, 2, \dots, m$ 。

由此可以得到关联度系数矩阵R

$$R = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \cdots & \xi_{1n} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \cdots & \xi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \xi_{n1} & \xi_{n2} & \cdots & \xi_{nn} \end{bmatrix}$$

## 2.3 计算灰色加权关联度

根据各个指标的关联度系数矩阵和模糊层次分析(FAHP)法确定的各指标的权重相结合,计算影响因子间权重差异的灰色加权关系度。

$$\ell_i = \sum_{k=1}^n w_k \xi_i(k) \quad (5)$$

## 2.4 危险性综合评价分析

根据灰色加权关联度的大小,对各评价对象进行关联排序,然后进行关联度的比较和分析。关联度越大,与等级集合程度的关联程度越好。由此,可判定出评价区岩溶塌陷的危险性等级,可对潜在岩溶塌陷区进行一个定量和定性综合性评价。

## 3 岩溶塌陷危险性评价等级划分

进行岩溶塌陷危险性评价,先要确定相应的评价因素指标,岩溶塌陷的发生必须满足以下三个条件:岩溶发育、具有一定的覆盖层以及地下水动力条件。根据贵州省岩溶塌陷调查研究及已有的研究成果表明(武运泊等,2015),工程活动对岩溶塌陷发生的影响作用越来越严重。因此,从评价指标

选取的可行性、代表性、准确性出发,本文主要选取了岩溶条件、覆盖层条件、地下水条件、工程活动为4个主控因素,将岩溶塌陷危险等级划分为5个等级。关于定量指标的确定,主要考虑国家标准以及已有研究成果。定性指标的确定则引用模糊数学方法,采用5级划分法进行综合评定,获得各个评价指标隶属度(蒋茹,2004),即优(0.1)、良(0.3)、中(0.5)、差(0.7)、劣(0.9),分值越大代表危险性越大。最后,根据研究区的实际情况,对评价指标进行量化处理,消除有不同的值、缺乏一致性、不便于比较的指标。评价指标及等级划分标准见表2(周国清等,2013;李公岩等,2008)。

## 4 工程实例

贵州省独山县交摆村地处亚热带季风性湿润气候区,年均降雨量1 150~1 198 mm。研究区为岩溶洼地地貌类型,地形较为平坦,且区内地下岩溶管道较为发育,地下水位埋深较浅,枯水季最高处2 m左右。区内地质构造较复杂且相互切割,主要沿近似南北向与东西向各发育两条。区域节理裂隙较为发育,其走向与两组断层走向基本一致。出露地层为第四系(Q<sub>4</sub>)盖层为双层结构,上部为耕植土,厚0~0.3 m;下部为粉砂质亚粘土,厚0.5~2 m;其下为黄色亚粘土,厚度为1~4 m。下伏基岩为石炭系下统大塘组上段(C<sub>1</sub>d<sup>2</sup>)中厚层灰岩。该地区地下水类型为裂隙-管道水,洼地的北部发现暗河入口,北东向发现泉点,流量约为0.2 L/s,主要接受大气降水补给,地下水位埋深1.5~3 m。水位变幅位0.5~3 m,地下水总体流向为由南至北排泄于北侧下江河。2011年8-9月份独山县正值干旱期间,当地居民通过在洼地北侧地下溶洞内抽取地下水,用来灌溉耕地和满足生活用水需要,抽水量为60~80 m<sup>3</sup>/h,连续抽水24 h,水位下降约1.2 m。造成29余处塌陷点和潜在塌陷点,总面积为0.77 km<sup>2</sup>。

### 4.1 研究区指标权重的计算

根据表2的影响因子评价指标层次。首先,我们以准则层为例,针对岩溶条件、覆盖层条件、地下水条件、工程活动4个评价指标,由多个领域专家打分法分别对各个因子作两两比较判断,构造出准则层相对于目标层的模糊判断矩阵A如下。

表2 评价指标及分级标准  
Table 2 Evaluation index and grading standard

评价指标		岩溶塌陷危险等级				
准则层	指标层	稳定( I )	基本稳定( II )	难塌( III )	易塌( IV )	极易塌( V )
岩溶条件	地形地貌	山头	坡地	平坦地	低洼地	河谷地
	岩性	非碳酸盐岩	泥质碳酸盐岩	碳酸盐岩夹碎屑盐	白云岩	灰岩
	岩溶发育程度	不发育	较差发育	较发育	发育	及其发育
	地质构造	无	单条	两组平行	两组交叉切割	多组交叉切割
覆盖层条件	土层厚度	50	50-30	30-10	10-5	<5 但不等于 0
	土层性质	砂砾石	黏性土	红黏土	粉土	砂土
	土层结构	无	一元	二元	多元	混杂
水动力条件	地下水水面与基岩面距离	>5	5~3	3~2	2~1	<1
	地下水变幅	<0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2	>2
	地下水径流强度	微弱	弱	中等	强	极强
	地表水入渗	无	偶尔少量入渗	少量入渗	经常大量入渗	持续大量入渗
工程活动	距抽水距离	>500	500~200	200~100	100~50	<50
	抽水强度	<300	300~500	500~1000	1 000~1 500	>1 500
	其他工程活动	无	较弱	一般	较强	强

$$A = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.6 \\ 0.5 & 0.5 & 0.3 & 0.5 \\ 0.4 & 0.7 & 0.5 & 0.8 \\ 0.4 & 0.5 & 0.2 & 0.8 \end{pmatrix}$$

根据公式(1)构造模糊一致性判断矩阵

$$\phi = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.325 & 0.138 & 0.439 \\ 0.675 & 0.5 & 0.328 & 0.561 \\ 0.862 & 0.675 & 0.5 & 0.675 \\ 0.561 & 0.439 & 0.328 & 0.5 \end{pmatrix}$$

再根据公式(2)计算权重

$$W_1 = (0.2833, 0.2167, 0.3167, 0.1833)$$

该权重是由模糊一致性判断矩阵计算得到,不需要进行一致性检验,与计算准则层权重的方法相同,按照模糊层次分析法计算出各个指标的权重见表3。

### 4.2 GRA-FAHP 的评价模型确定危险性等级

将研究区地下水条件的实测数值作为比较序列,同时将表2中的等级标准作为参考序列见表4。

表3 指标权重计算结果

Table 3 Results of index weight calculation

目标层	准则层	权重	指标层	权重	总权重	排序
岩溶塌陷危险性评价	岩溶条件	0.2833	地形地貌	0.1501	0.0425	12
			岩性	0.2604	0.0738	6
			岩溶发育程度	0.3684	0.1044	3
			地质构造	0.2211	0.0626	9
	覆盖层条件	0.2167	土层厚度	0.5123	0.1110	1
			土层性质	0.2953	0.0640	8
			土层结构	0.1923	0.0417	13
	地下水条件	0.3167	地下水水面与基岩面距离	0.2792	0.0884	4
			地下水变幅	0.3497	0.1107	2
			地下水径流强度	0.2208	0.0699	7
			地表水入渗	0.1503	0.0476	11
			距抽水距离	0.3333	0.0611	10
			抽水强度	0.4743	0.0870	5
工程活动	0.1833	其他工程活动	0.1923	0.0353	14	

表4 评价指标的比较序列和参考序

Table 4 Comparative sequence and reference sequence of evaluation index

准则层	指标层	比较序列	I	II	III	IV	V
地下水条件	地下水面与基岩面距离	4.05	5	3	2	1	0.5
	地下水变幅	3.45	0.5	1	1.5	2	2.5
	地下水径流强度	0.3	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
	地表水入渗	0.5	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9

4.2.1 无量纲化处理

由公式(3)对表4数据进行无量纲化处理得:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1.2345 & 0.7407 & 0.4938 & 0.2469 & 0.1235 \\ 1 & 0.1449 & 0.2899 & 0.4348 & 0.5797 & 0.7246 \\ 1 & 0.3333 & 1 & 1.6667 & 2.3333 & 3 \\ 1 & 0.2 & 0.6 & 1 & 1.4 & 1.8 \end{bmatrix}$$

$$\gamma_1 = [0.2792 \quad 0.3497 \quad 0.2208 \quad 0.1503] \times$$

$$\begin{bmatrix} 0.8100 & 0.6639 & 0.5704 & 0.5704 & 0.5329 \\ 0.5391 & 0.5847 & 0.6389 & 0.7041 & 0.7841 \\ 0.6000 & 1.0000 & 0.6000 & 0.4286 & 0.3333 \\ 0.5556 & 0.7143 & 1.0000 & 0.7143 & 0.5556 \end{bmatrix}$$

$$= [0.6306 \quad 0.7108 \quad 0.6655 \quad 0.6075$$

0.5801],最大灰色加权关联度  $\gamma_1 = 0.7108$ ,说明

研究区地下水条件危险等级为II级。

同理,按照以上步骤计算其他灰色加权关联

度如下:

$$\gamma_2 = [0.3393 \quad 0.4534 \quad 0.6391 \quad 0.9132$$

0.7106],最大灰色加权关联度  $\gamma_4 = 0.9132$ ,说明

研究区岩溶条件危险等级为IV级。

$$\gamma_3 = [0.5981 \quad 0.8546 \quad 0.9630 \quad 0.9645$$

0.8909],最大灰色加权关联度  $\gamma_4 = 0.9645$ ,说明

研究区覆盖层条件危险等级为IV级。

$$\gamma_4 = [0.6660 \quad 0.8763 \quad 0.9057 \quad 0.9167$$

0.8092],最大灰色加权关联度  $\gamma_4 = 0.9167$ ,说明

研究区工程活动条件危险等级为IV级。

4.2.2 差序列计算

由公式(4)差序列计算方法得:

$$\begin{bmatrix} 0.2346 & 0.2593 & 0.5062 & 0.7531 & 0.8765 \\ 0.8551 & 0.7101 & 0.5652 & 0.4203 & 0.2754 \\ 0.6667 & 0 & 0.6667 & 1.3333 & 2.0000 \\ 0.8000 & 0.4000 & 0 & 0.4000 & 0.8000 \end{bmatrix}$$

其中  $\eta = 2, \mu = 0, \rho = 0.5$

4.2.3 灰色关联度系数

由公式(4)计算灰色关联度系数如下:

$$X = \begin{bmatrix} 0.8100 & 0.6639 & 0.5704 & 0.5704 & 0.5329 \\ 0.5391 & 0.5847 & 0.6389 & 0.7041 & 0.7841 \\ 0.6000 & 1.0000 & 0.6000 & 0.4286 & 0.3333 \\ 0.5556 & 0.7143 & 1.0000 & 0.7143 & 0.5556 \end{bmatrix}$$

4.2.4 灰色加权关联度的计算

结合模糊层次分析法确定地下水条件的权重,按照公式(5)灰色加权关系度计算

4.2.5 研究区岩溶塌陷危险性等级计算

由上述计算出指标层灰色加权关联度与准则层权重如表5所示。

表5 研究区指标准则层权重及关联度

Table 5 index criterion weight and relevancy degree of the study area

准则层	权重	I	II	III	IV	V
岩溶条件	0.2833	0.3393	0.4646	0.6644	0.9119	0.7123
覆盖层条件	0.2167	0.6743	0.8740	0.9677	0.9644	0.8968
地下水条件	0.3167	0.6293	0.7354	0.6892	0.6035	0.5580
工程活动条件	0.1833	0.6700	0.8873	0.8906	0.8819	0.7749

由公式(5)对研究区进行岩溶塌陷危险性综合加权关联度得:

$$\gamma = [0.2833 \quad 0.2167 \quad 0.3167 \quad 0.1833] \times$$

$$\begin{bmatrix} 0.3393 & 0.4646 & 0.6644 & 0.9119 & 0.7123 \\ 0.6743 & 0.8740 & 0.9677 & 0.9644 & 0.8968 \\ 0.6293 & 0.7354 & 0.6892 & 0.6035 & 0.5580 \\ 0.6700 & 0.8873 & 0.8906 & 0.8819 & 0.7749 \end{bmatrix}$$

$$= [0.5475 \quad 0.7017 \quad 0.7665 \quad 0.8281$$

0.7264],由此可知综合分析最大灰色加权关联度  $\gamma = 0.8281$ ,说明该区岩溶塌陷危险等级为IV级,属于易塌陷区,该区发生岩溶塌陷可能性较大。

## 5 结论

(1)根据贵州省岩溶塌陷发育的基本条件和影响因素等特点,从岩溶条件、覆盖层条件、地下

水条件、工程活动条件从发,选取14个评价指标来建立定性和定量相结合的岩溶塌陷危险性评价模型体系。

(2)岩溶塌陷是成因机制较为复杂,受多因素相互影响的地质灾害。由此,本文在建立定量与定性指标为一体指标体系的基础上,引入灰色关联度分析法与模糊层次分析法相耦合,建立了多因素影响岩溶塌陷危险性评价模型,并运用到贵州省独山县交摆村岩溶塌陷区域,评价结果表明该模型在岩溶塌陷危险性评价中是可行的,为岩溶塌陷的危险性预测提供借鉴。

(3)本文存在不足之处,此方法得出综合性岩溶塌陷危险性评价,提供不同层次危险性评价结果及危险性排序。但运用其他区域时,评价因子及权重应该适当调整。

### [参考文献]

- 褚学伟,党爽,丁坚平. 2015. 贵州岩溶塌陷分布及其影响因素分析[J]. 人民长江,46(12):42-43.
- 段先前,褚学伟,李博. 2016. 基于集对分析的岩溶塌陷危险性预测评价[J]. 安全与环境学报,16(4):72-75.
- 胡成,陈植华,陈学军. 2003. 基于ANN与GIS技术的区域岩溶塌陷稳定性预测—以桂林西城区为例[J]. 地球科学—中国地质大学学报,28(5):557-562.
- 姜春露,姜振泉. 2012. 基于Fisher判别分析法的岩溶塌陷预测[J]. 地球科学与环境学报,34(1):91-94.
- 蒋茹,曾光明. 2004. 城市污水处理厂工艺方案选择的辅助决策模型[J]. 环境科学与技术,27(1):55-58.
- 康彦仁,项式钧,陈健,等. 1990. 中国南方岩溶塌陷[M]. 广西科学技术出版社,2-38.
- 赖永标,乔春生. 2008. 基于支持向量机岩溶塌陷的智能预测模型[J]. 北京交通大学学报,32(1):36-43.
- 雷明堂,蒋小珍. 1998. 岩溶塌陷研究现状、发展趋势及其支撑技术方法[J]. 中国地质灾害与防治学报,9(3):1-6.
- 李博. 2015. GRA-FAHP模型的煤层底板突水危险性评价[J]. 地质论评,61(5):1129-1134.
- 李博. 2015. 灰色关联—层次分析法的煤层顶板突水危险性评价模型[J]. 河南理工大学学报,34(3):333-338.
- 李公岩,李元仲,杨蕊英,等. 2008. 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,19(2):87-90.
- 李海华,赵红泽,李海强. 2013. 基于模糊层次分析法的煤矿工程评标指标权重确定[J]. 煤炭技术,32(2):54-55.
- 蒙彦,黄健民,雷明堂,等. 2009. 基于灰色Verhulst模型的岩溶塌陷定量预报预测方法[J]. 中国岩溶,28(1):17-22.
- 王滨,李治广,董昕,等. 2011. 岩溶塌陷的致塌力学模型研究—以泰安市东羊娄岩溶塌陷为例[J]. 自然灾害学报,20(4):119-125.
- 王琪,张建华,刘珺,等. 2014. 基于AHP和灰色关联分析法的开拓方案优选[J]. 现代矿业,4:15-19.
- 武运泊,王运生,曹文正. 2015. 基于AHP—模糊综合评判的岩溶塌陷危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,26(1):43-48.
- 徐泽水. 2002. 模糊互补判断矩阵的相容性及一致性研究[J]. 解放军理工大学学报,3(2):94-96.
- 张虎彪,陆栋,石建. 2007. 基于模糊数学和综合指标模型的岩溶塌陷评价[J]. 中国水运,5(12):60-61.
- 张吉军. 2000. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学,14(2):80-88.
- 赵博超,朱蓓,王弘元,等. 2015. 浅谈岩溶塌陷的影响因素与模型研究[J]. 中国岩溶,34(5):515-521.
- 赵超,余宏明,孔莹,等. 2016. 基于突变级数法的岩溶塌陷预测[J]. 低温建筑技术,6:90-101.
- 周国清,何素楠,陈昆华,等. 2013. 模糊层次分析法对岩溶塌陷易发程度的评价——以广西来宾市吉利村为例[J]. 城市勘测,5(5):155-159.
- 朱庆杰,刘挺权,张秀彦. 2003. 唐山市岩溶塌陷的神经网络预测模型[J]. 辽宁工程技术大学学报,22(6):754-755.

## Risk Assessment of Karst Collapse

——Taking Jiaoshang Village, Dushan County As an Example

DONG Peng, CAI Yun, YANG Jian-hua, LI Yan

(Power China Guizhou Electric Power Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, Guizhou, China)

[Abstract] Karst collapse is a geologic hazard caused by many factors and of complex genetic mechanism, it present concealment in space and burstiness in time respectively. In order to predict and assess the risk of karst collapse effectively, in this paper, according to the conditions such as karst, covering, groundwater and engineering activities, 14 main influence indexes has been chose to construct the quantitative and qualitative the karst collapse risk assessment model by the means of Grey Relational Analysis (GRA)—Fuzzy Analytic Hierarchy Process(FAHP). And the case of karst collapse area at Jiaobai village in Dushan county has been taken to validate the model. The results showed that the assessment on karst collapse was consistent with the actual situation. It provide some reference for the future risk prediction and assessment on karst collapse.

[Key Words] karst collapse; FAHP; GRA; Risk assessment; Guizhou; Dushan county