第 20 卷 第 2 期
2000 年 4 月

桂 林 工 学 院 学 报
JOURNAL OF GUILIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Vol. 20 No. 2
Apr. 2000

文章编号 1006－544X(2000)02－0112－05

桂林市西城区岩溶塌陷模糊层次综合预测*

陈学军 陈植华 陈先华 胡 成

(中国地质大学研究生院，武汉 430074)

摘 要 用大量的实际数据分析、论证了岩溶塌陷影响因素及影响程度，桂林市西城区岩溶塌陷灾害严重且典型，其覆盖层特征、岩溶发育程度、地质构造和地下水等自然因素是影响岩溶塌陷的基本因素，而地表水和工程活动的影响主要起加速和诱发作用，通过改变塌陷的基本条件而加速塌陷的形成。在此基础上，建立了西城区模糊层次结构预测模型，模型包括了 3 个层次（目标层、条件层、因子层），6 个条件（岩溶、覆盖层、构造、水文、地貌、人为）共 19 个因子，对西城区岩溶塌陷进行了预测并划分为稳定区、基本稳定区、次不稳定区、不稳定区和极不稳定区共 5 个区。

关键词 岩溶塌陷；影响因子；模糊；预测；桂林

中图分类号 P642.26；P642.254 **文献标识码** A①

1 问题的提出

西城区是桂林市重点开发的新城区，包括琴潭开发区和西城工业区。该区岩溶塌陷分布广泛、延续时间长、类型多、数量多、规模大、频率高，是我国岩溶塌陷较发育的城市之一。据不完全的调查统计，至 1999 年 1 月底，在西城区 42 km^2 范围内已产生岩溶塌陷 319 个，严重制约着西城区城市建设的发展和危及人民生命财产的安全。因此，对西城区进行岩溶塌陷预测和防治研究极为重要。

通过对西城区地质背景、岩溶塌陷影响因素的分析，认为西城区岩溶塌陷影响因素众多，各因素之间也相互制约和影响。然而就塌陷的本质和形成条件看，岩溶塌陷产生与否主要由自然因素所决定，在自然因素中，西城区的岩溶塌陷主要受覆盖层特征、岩溶发育程度、地质构造和地下水活动的控制，尤其是地质构造控制极为明显，不同的覆盖层岩性、厚度、结构，不同的构造部位，岩溶塌陷的数量和规模不同。它们共同构成了影响岩溶塌陷的基本因素，只要具备了塌陷的基本条件，岩溶塌陷就可能形成，只是时间问题。而地表水和人类工程活动的影响，主要起加速和诱发作用，通过改变塌陷的基本条件而加速塌陷的形成。在西城区，人为活动主要通过抽排地下水、改变地下水的流场而间接对岩溶塌陷产生影响。

在塌陷预测时，由于影响因素错综复杂且没有截然的界限值，具有明显的模糊性，难以用准确的数学描述工具严密地刻画出岩溶塌陷的孕育—发展—产生过程，但各影响因素之间又具有明显的相关性和归类性。因此，本文采用层次模糊数学方法进行预测。

2 岩溶塌陷模糊层次综合预测

2.1 建立预测结构模型

岩溶塌陷总是在若干特定的条件下产生的，

① 1999－11－08 收稿，2000－01－24 改回。
第一作者简介：陈学军（1961－），男，广西玉林人，副教授，在读博士研究生，岩土工程专业。
* 国家计委防灾减灾项目——计司国地［1996］12 项目资助。

而某种条件又是由若干因子所组成。通过对西城区岩溶塌陷条件分析，认为西城区的岩溶塌陷主要与岩溶条件（岩溶地层，岩溶发育程度）、覆盖层条件（厚度，岩性，结构）、构造条件（距断层距离，距褶皱轴距离，断层性质，构造组合，构造规模）、水条件（地下水面与基岩面距离，地下水位波动频率，地下水位变幅，地下水径流强度，距地表水体距离）、地形地貌条件（地形变化、地貌条件）、人为条件（距抽水井距离、抽排水强度）等因素有关，因此，本次预测将以上述 6 个条件共 19 个因子作为模糊层次评判预测因子，由此构造出桂林市西城区岩溶塌陷预测的层次结构模型，如图 1 所示。

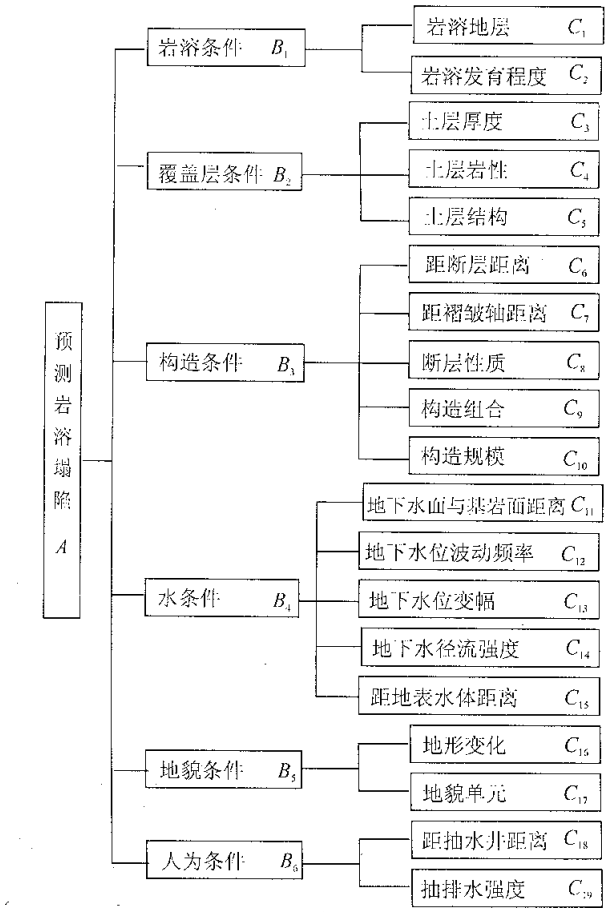


图 1　预测因子层次结构模型分析图

Fig.1　Model of layer structure for prediction divisor

A—目标层；*B*—条件层；*C*—因子层

2.2　预测因子权值的确定

判断矩阵是层次分析中权重值确定的重要一步，判断矩阵的元素反映了研究者对影响因子之间相对重要性的认识。根据该区岩溶塌陷条件及影响因素分析，结合专家经验，利用 A.L.Satty 提出的“1－9 标度”法，分别列出图 1 所示的预测因子层次结构中条件层和因子层的判断矩阵（岩溶塌陷的基本条件相对于预测岩溶塌陷目标的相对重要性比较和针对各基本条件的相关因子之间相对重要性的比较）。计算各判断矩阵的特征向量，经归一化后即得出岩溶塌陷各基本条件及相关因子的相对权重值，再通过条件层与因子层相对权重的连乘，可得到各预测因子的计算权重值。然后，分别选取几个塌陷程度不同，但已明确的单元进行反演，对个别矛盾的因子权重进行适当调整，调试合理后的权重值作为最终权重（图 2）。

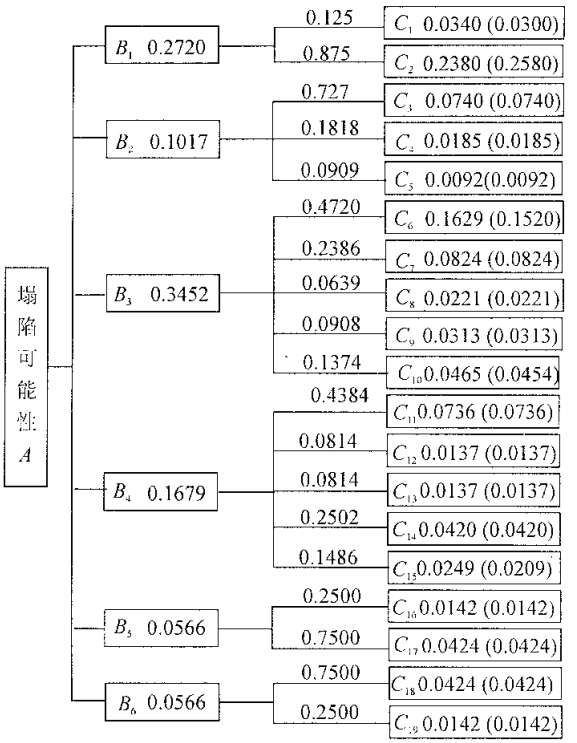


图 2　预测因子权重图

Fig.2　Weight for prediction divisor

A—目标层；*B*—条件层；*C*—因子层

2．3 预测因子的等级划分和取值

各预测因子的发育程度及其与预测单元的相对位置不同，对预测单元岩溶塌陷稳定性的影响程度也不尽相同。根据工作区岩溶塌陷形成条件和影响因素分析，确定本次预测的 19 个因子的等级指标，如表 1 所示。

表 1 西城区岩溶塌陷模糊评判因子等级划分

Fig.1 Classification of divisors for fuzzy opinion of karst collapse in west area of Guilin

指标			分级和取值				
条件层	因子层	代号	稳定级 (1)	基本稳定级 (2)	次不稳定级 (3)	不稳定级 (4)	极不稳定级 (5)
岩溶条件	岩溶地层	C_1	无	岩关阶 C_1y	东村组 D_3d	桂林组 D_3g	融县组 D_3r
	岩溶发育程度	C_2	无	较差	中等	较发育	强烈发育
覆盖层条件	土层厚度/m	C_3	>20(或=0)	20～12	12～8	8～4	4～0
	土层岩性	C_4	砂砾石	残积粘土	冲洪积粘土、残坡积红粘土	含砾粉质粘土	粉质粘土 粉土、粉细砂
	土层结构	C_5	无	多元	二元	一元	混杂
构造条件	距断层距离/m	C_6	>500	500～300	300～200	200～100	<100
	距褶皱轴距离/m	C_7	>1 000	1 000～600	600～400	400～200	<200
	断层性质	C_8	压性(或无)	压扭性	扭性	张扭性	张性
	构造组合	C_9	无	单一构造	二条但不相交	二组相交	多组相交
	构造规模/m	C_{10}	<20	20～100	100～200	200～300	>300
水条件	地下水面与基岩面距离/m	C_{11}	>15	15～10	10～5	5～2.5	<2.5
	地下水位波动频率	C_{12}	<10	10～15	15～20	20～25	>25
	地下水位变幅/m	C_{13}	<0.5	0.5～1.0	1.0～1.5	1.5～2.0	>2
	地水下径流强度	C_{14}	很弱	弱	中	较强	强
	距地表水体距离/m	C_{15}	>200	200～100	100～50	50～30	<30
地形地貌条件	地形变化	C_{16}	山头	坡地	平坦地	低洼地	沟谷
	地貌单元	C_{17}	峰丛	岗丘	一级阶地	峰林平原	洼地谷地
人为条件	距抽水井距离/m	C_18	>500	500～200	200～100	100～30	<30
	抽排水强度/($m^3\cdot d^{-1}$)	C_19	<300	300～500	500～1 000	1 000～1 500	>1 500

2．4 预测因子等级隶属函数确定

预测因子分定性指标和定量指标两类。定性指标是离散性取值，其隶属函数为其相应指标所对应的级别；定量指标常常是连续性区间取值，各级别虽有界限值，但实际上往往呈过渡状态，对定量指标隶属函数的取值原则是在 各级别界限值上、下各取 1/4 区间值作为各级别界限值的过渡函数，分属相邻级别共有；其余定量指标区间值隶属于相应级别。

2．5 建立模糊层次计算模型

根据工作区岩溶塌陷的空间分布特征，采用模糊数学方法，将预测层次结构模型（图 1）中的预测目标 A 划定评价集为：

A = {稳定级(a_1)，基本稳定级(a_2)，次不稳定级(a_3)，不稳定级(a_4)，极不稳定级(a_5)}。

相应的条件层各预测指标对 A 的评价模糊子集为：

$$B_i = \{b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4}, b_{i5}\} \quad (1)$$

相应的因子层各预测指标对 A 的评价模糊子集为：

$$C_i = \{c_{i1}, c_{i2}, c_{i3}, c_{i4}, c_{i5}\} \quad (2)$$

在所建立的模型中，基本条件层有 6 个评价指标，因子层有 19 个评价指标，则某评价单元 j 所构成的相应模糊子集为：

$$B_j = \{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6\}^{\mathrm{T}}$$

$$C_j = \{C_1, C_2, \cdots, C_{19},\}^{\mathrm{T}}$$

利用层次分析法确定各层指标权重的模糊子集 W。对基本条件层：$W_B = \{W_{b1}, W_{b2}, \cdots, W_{b6}\}$ 且

$$\sum_{i=1}^{6} W_{bi} = 1$$

对于因子层：$W_C = \{W_{c1}, W_{c2}, \cdots, W_{c19}\}$ 且

$$\sum_{i=1}^{19} W_{ci} = 1$$

于是得到某预测单元 j 评价集的计算模型：

$$A_j = W_B B_j = W_C C_j = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} \quad (3)$$

式中：a_1 代表稳定级，a_2 代表基本稳定级，a_3 代表次不稳定级，a_4 代表不稳定级，a_5 代表极不稳定级。

根据各单元评判的结果，按最大隶属度原则，确定其所处单元的级别，然后再根据各单元的级别进行工作区整体稳定性预测分区评价。

2.6　预测单元划分及模糊层次综合预测

在计算机中利用 ILWIS 提供的栅格化功能，将工作区内 42 km^2 划分为 100 m×100 m 共 4 200 个正方形单元格，作为预测单元，并通过 GIS 从属性库中读取每个预测单元的所有指标的实际值，确定各评价指标的隶属函数值，然后列出每个预测单元的隶属函数矩阵 C，再根据图 2 所确定的各评价因子的权重 W_c，运用模糊层次判别原理建立的计算模型：

$$A_j = W_c C_j \quad (j = 1,2,3,\ldots) \quad (4)$$

计算得出每个单元的模糊评价集：

$$A_j = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} \quad (5)$$

取最大值，该值所对应的级别即为该单元所处的级别。

举例说明：如第 1 单元，实际取值为（岩关阶，较差，2.40，粉质粘土，一元结构，290.00，3 736.00，无，无，0，0.77，16，0.70，弱，240.06，坡地，剥蚀残丘，189.73，180.00），相应模糊子集为 C_1：

$$C_1 = \begin{vmatrix} 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.20 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.06 & 0.94 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.15 & 0.85 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{vmatrix}$$

根据图 2 计算结果，因子层相对于目标层的权重值为 W_c：

$W_c = \{0.030\ 0, 0.258\ 0, 0.074\ 0, 0.018\ 5, 0.009\ 2, 0.152\ 0, 0.082\ 4, 0.022\ 1, 0.031\ 3, 0.045\ 4, 0.073\ 6, 0.013\ 7, 0.013\ 7, 0.420\ 0, 0.020\ 9, 0.014\ 2, 0.042\ 4, 0.042\ 4, 0.014\ 2\}$

则目标隶属函数计算结果为：

$$A_1 = W_c C_1 = \{0.22, 0.44, 0.17, 0.01, 0.17\}$$

取最大值为第二项，其所对应的稳定性级别为基本稳定级，则得第 1 单元稳定性为基本稳定级。

以上过程通过编制程序自动完成，并将评判结果存到各预测单元的属性库中，最后根据计算结果，把相同隶属度的单元划分为同一级别。从而得到西城区 岩溶塌陷模糊层次评判预测分区，即稳定区Ⅰ、基本稳定区Ⅱ、次不稳定区Ⅲ、不稳定区Ⅳ和极不稳定区Ⅴ（图 3）。

3　预测结果可信度分析

从预测方法来看，由于岩溶塌陷影响因素众多且复杂，各影响因素间相互制约，且其影响程度又具有很强的模糊性，因此对西城区岩溶塌陷预测，采用模糊层次模型，囊括了 3 个层次、6 个条件共 19 个因子，全面反映了自然和人为两大因素对岩溶塌陷的影响。所建模型实用且正确，方法可行。

从预测结果来看，西城区内稳定区、基本稳定区、次不稳定区、不稳定区和极不稳定区的面

积之比是 4.21∶1.00∶4.72∶2.14∶1.84；各分区的塌陷点个数分别占塌陷总数的 1.88%，2.82%，20.69%，30.09%，44.52%；平均塌陷密度之比为 0.10∶0.64∶1.00∶3.20∶5.52。绝大部分的塌陷密集区分布在极不稳定区和不稳定区，这是比较符合研究区的实际情况。说明层次－模糊预测模型的预测结果是比较客观合理的，具有较高的可信度。

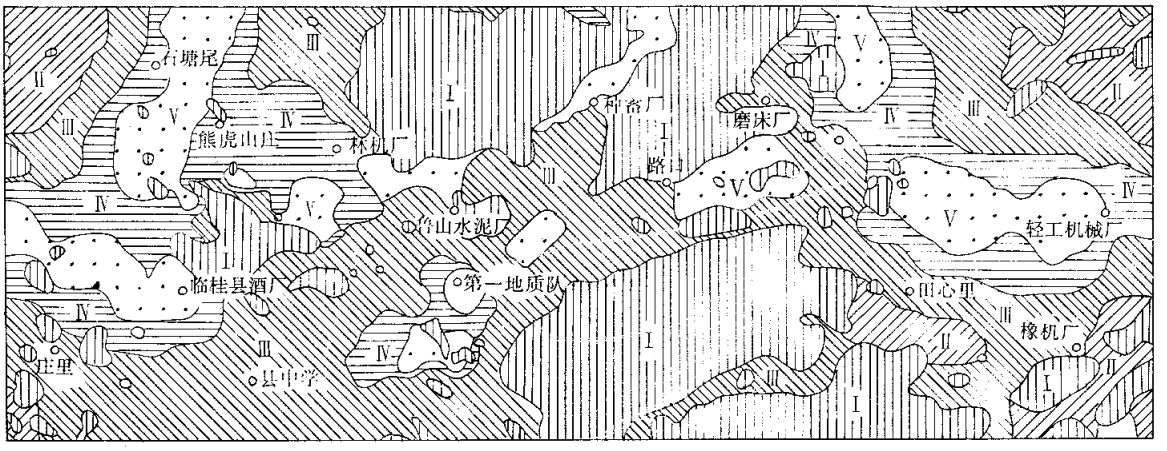


图 3 预测分区图

Fig.3 Sectors of prediction

Ⅰ—稳定区；Ⅱ—基本稳定区；Ⅲ—次稳定区；Ⅳ—不稳定区；Ⅴ—极不稳定区

参 考 文 献

[1] 陈学军. 水口山铅锌矿地面塌陷机制—形成模式分析[J]. 南京大学学报，1991. 11

[2] 付雁鹏. 模糊数学在水质评价中的应用[M]. 武汉：华中工学院出版社，1986

FUZZY－HIERARCHY PREDICTION OF KARST COLLAPSE IN THE WEST AREA OF GUILIN CITY

Chen Xuejun Chen Zhihua Chen Xianhua Hu Cheng

(*Graduate Faculty*, *China University of Geosciences*, *Wuhan* 430074)

Abstract The karst collapse disaster in the west area of Guilin city is very typical and serious. Based on the clarification of the geological background and the analysis of a good deal of data, this paper specifies the influencing factors and degrees of karst collapse, and then draws a conclusion that the characteristics of over－layer, the degree of karst development and geological structure are basic factors affecting the karst collapse, and that surface water and engineering activities play a speeding and inducing role in the occurrence of karst collapse by changing the basic conditions. On this basis, the paper establishes a fuzzy－hierarchy prediction model, which contains 3 hierarchies, 6 conditions and 19 factors. By the calculation of the model, the west area of Guilin city is divided into five zones: stable area, basic stable area, secondary instable area, instable area and extremely instable area.

Key words karst collapse; influencing factors; fuzzy; prediction; Guilin