

[文章编号] 1671-9727(2009)05-0504-07

# 模糊层次综合法在某新建机场 喀斯特塌陷危险性预测评价中的应用

邓启江<sup>1</sup> 王峥嵘<sup>2</sup> 李星宇<sup>3</sup> 岳永峰<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059;  
3. 云南地质工程勘察设计研究院, 昆明 650041)

**[摘要]** 喀斯特塌陷是某新建国际机场建设面临的最主要工程地质问题。根据工程区实际情况, 选取 3 个条件层的 15 个因子构建喀斯特塌陷预测模糊层次模型, 确定各因子的权重; 采用模糊数学方法, 以 MapGIS 为平台, 对含有不同权重的各因子进行空间迭置分析、计算, 来确定、划分工程区喀斯特塌陷的危险性分区。现状下, 喀斯特塌陷绝大部分处于危险性中等区和危险性大的范围内。预测评价结果客观可靠。

**[关键词]** 喀斯特塌陷; 危险性; 模糊层次综合法; 预测; 评价

**[分类号]** TU434 **[文献标识码]** A

某新建国际机场(以下简称新机场)位于云南省中部, 定位为大型枢纽机场和辐射东南亚、南亚地区的门户枢纽机场。工程区内碳酸盐岩出露面积约 16 km<sup>2</sup>, 占整个工程区总面积的近 3/4。喀斯特塌陷是新机场建设面临的最主要的工程地质问题。开展喀斯特塌陷危险性预测研究, 不仅对新机场防治喀斯特塌陷具有指导作用, 而且对其他地区类似工程的喀斯特塌陷防治工作也有借鉴意义<sup>[1]</sup>。

目前国内外对喀斯特塌陷的预测评价方法多种多样, 如定性分区、多元统计、图层迭置分析等<sup>[2~12]</sup>。本项目预测范围广、条件复杂多变、各影响因素标志及界限又模糊不清, 上述方法难以真正刻画各影响因素之间的组合效应。根据项目实际情况, 本次采用模糊层次综合法, 进行喀斯特塌陷危险性的预测评价研究。

## 1 地质环境条件简述

工程区属亚热带季风气候, 多年平均气温

14.6℃。本区多年平均降水量 836.57 mm, 5~10 月份为雨季, 降雨量占全年降水量的 78%; 11 月份至次年的 4 月份为旱季, 降水量仅占全年降水量的 22%。多年平均蒸发量为 2 086 mm<sup>[1]</sup>。

工程区地处螳螂江流域与牛栏江流域分水岭地带, 同属金沙江水系。工程区南侧宝象河自西向东径流, 经大板桥、官渡注入滇池, 全长 38 km, 多年平均径流量  $9.9 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/a, 属螳螂江流域。工程区北部石乾沟自南西向北东径流, 流量 2~50 L/s; 沟水在荷包地西侧落入地下变为伏流, 在地下径流约 900 m 后, 以泉水形式露出地表, 并最终汇入牛栏江(图 1)。

工程区地貌以溶蚀、剥蚀准平原为主, 其次是构造剥蚀低中山, 地形多呈波状起伏, 坡度相对平缓。地表喀斯特强烈发育, 微地貌形态有石牙、漏斗、洼地、落水洞等。

工程区分布地层以古生界为主, 其次是第四系松散层(表 1)。碳酸盐岩呈片状出露或是呈条

[收稿日期] 2009-01-13

[基金项目] 云南省科技计划项目(2006GG38)

[作者简介] 邓启江(1969-), 男, 高级工程师, 研究方向: 水文地质与工程地质, E-mail: dengqijiang@163.com。

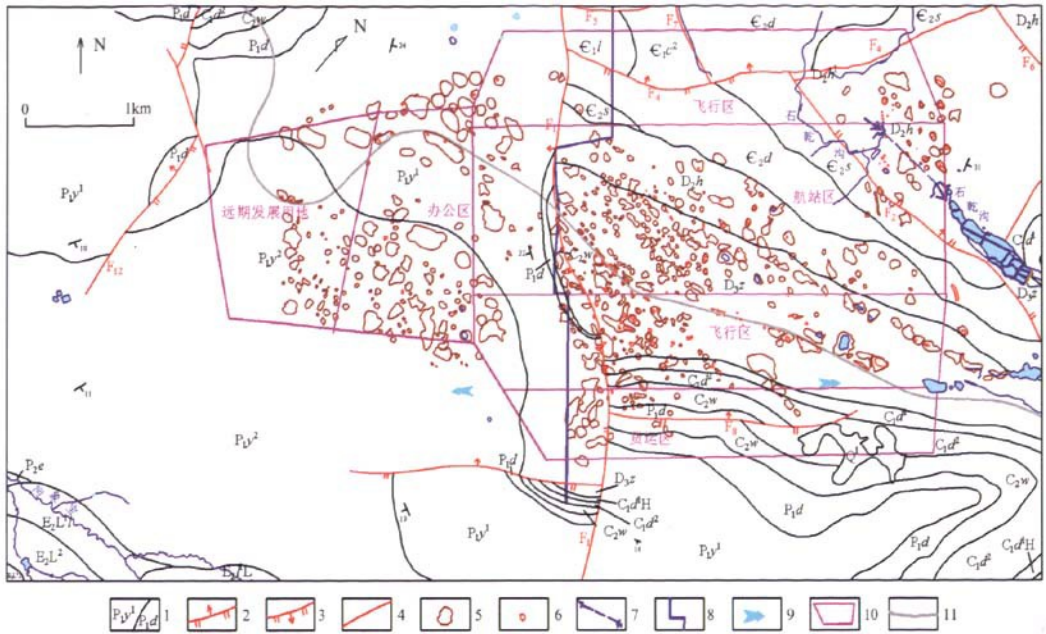


图1 新机场水文地质简图

Fig.1 Hydrogeologic sketch map of the new airport

1. 地层界线; 2. 正断层; 3. 逆断层; 4. 性质不明断层; 5. 喀斯特洼地; 6. 喀斯特塌陷; 7. 伏流进、出口及方向; 8. 地下水分水岭; 9. 地下水流向; 10. 机场边界及功能区名称; 11. 铁路

表1 工程区地层表

Table 1 The stratum chart of the building region

界	系	统	组	段	代号	厚度 δ/m	岩性特征简述
新生界	第四系	始新统			Q <sub>1</sub> <sup>1</sup>	5~10	薄—厚层状泥岩, 半固结
古 生 界	二叠系	下统	阳新组	茅口段	P <sub>1y2</sub>	296	中—厚层状灰岩夹白云岩
				栖霞段	P <sub>1y1</sub>	117	厚层状白云岩、灰岩
			倒石头组	P <sub>1d</sub>	10~20	薄—中层状泥岩、页岩	
	石炭系	中统	威宁组		C <sub>2w</sub>	42	中层状砂屑灰岩、鲕状灰岩
		下统	大塘组	上司段	C <sub>1d2</sub>	37	中—厚层状砂屑灰岩
				万寿山段	C <sub>1d1</sub>	<30	薄层状钙质泥岩、泥灰岩
		石炭系	上统	宰格组		D <sub>3z</sub>	63
	中统		海口组		D <sub>2h</sub>	230	薄—中层状灰岩、白云岩
	寒武系	中统		双龙潭组	Є <sub>2s</sub>	114	薄—中层状白云岩
				陡坡寺组	Є <sub>2d</sub>	131	薄—中层状砂岩、页岩
下统			龙王庙组	Є <sub>1l</sub>	101	薄—中层状灰岩、白云岩	
			沧浪铺组	乌龙阶段	Є <sub>1c2</sub>	111	页岩夹薄层泥质粉砂岩

带状与非碳酸盐岩相间分布(图1), 裸露型和覆盖型喀斯特发育<sup>[1]</sup>。

工程区主要发育 F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> 和 F<sub>3</sub> 三条断裂(图

1), 其中 F<sub>1</sub> 断裂对工程区地貌及喀斯特的形成和发展起控制作用。

根据现场调查, 工程区内现状下共发现 223

处喀斯特塌陷(图 1),喀斯特塌陷平均分布密度达  $10.5 \text{ km}^{-2}$ ;密度之大,在国内同类地区也是罕见的。据统计,工程区内的贵昆铁路浑水塘一秧田冲段(由于新机场建设,目前该段铁路已改线),自 1975 年至 1991 年,在长 10 km 的路段内已发生喀斯特塌陷 79 次,严重影响了列车的安全运行,曾因某次塌陷造成中断列车运行 61 小时 40 分的严重事故;在此期间,因喀斯特塌陷投入防治经费超过 600 万元<sup>[2]</sup>。喀斯特塌陷已成为制约当地社会发展的重要因素。

## 2 塌陷形成的基本条件和影响因素

### 2.1 喀斯特条件

工程区内分布的碳酸盐岩地层以二叠系阳新组、石炭系和泥盆系中、上统为主,它们的分布面积约占工程区碳酸盐岩分布总面积的 90%(图 1)。这些碳酸盐岩不仅出露面积广,喀斯特发育程度也高。以线喀斯特率、面喀斯特率作为衡量喀斯特化程度的指标<sup>[1]</sup>,工程区内主要碳酸盐岩地层喀斯特化程度自高向低依次排列为: $D_2h$ ,  $D_3z$ ,  $P_1y$ ,  $C_2w$ ,  $C_1d^2$  和  $\epsilon_2s$ 。调查、统计显示工程区内喀斯特化程度与塌陷频数具有一致的消长关系: $D_2h$  地层中喀斯特塌陷最为发育; $D_3z$  地层中次发育; $P_1y$ ,  $C_2w$ ,  $C_1d^2$  地层中较发育; $\epsilon_2s$  地层中少量发育。

### 2.2 松散盖层条件

工程区松散盖层以残坡积为主,岩性主要是一元均质黏性土。据统计,工程区内盖层厚度小于 15 m 的塌陷占塌陷总数的 94%;盖层厚度在 15~25 m 的塌陷占 6%;盖层厚度大于 25 m 的土层中未发现喀斯特塌陷发生。综合分析上述数据,可以看出,工程区内松散层厚度越小,越容易产生喀斯特塌陷<sup>[1]</sup>。

### 2.3 地下水

在全区 223 个喀斯特塌陷坑中,有 156 个塌陷坑的形成与地下水作用有关,占总数的 70%。以上数据表明,地下水的作用是影响本区喀斯特塌陷的活跃因素<sup>[1]</sup>。

地下水致塌条件包括以下几个方面:地下水位与基岩层距离、地下水位波动频率、地下水位变幅和地下水径流强度。总体而言,地下水位与基岩层距离越近,地下水位波动频率越高,地下水位变幅越大,地下水径流强度越大,则越容易诱发喀

斯特塌陷<sup>[1]</sup>。

### 2.4 大气降水和地表水

降雨也是影响喀斯特塌陷的重要因素之一。降雨影响喀斯特塌陷的机理在于,一定量的雨水在通过松散盖层向下渗入的过程中,可以引起细粒物质的位移,特别是在有开口溶洞或孔隙的岩土界面附近,这种作用更为显著<sup>[1]</sup>。

地表水体入渗可以改变局部水文地质条件,打破原有力学平衡状态,使可溶岩之上的盖层失稳破坏,引起喀斯特塌陷<sup>[1]</sup>。

工程区明显受大气降水影响的喀斯特塌陷占塌陷总数的 60%。

### 2.5 附加荷载

工程区内附加荷载主要是地面振动。现状下地面振动主要由工程活动引起<sup>[1]</sup>。据统计,区内与振动力作用有关的喀斯特塌陷坑有 45 个,占全区塌陷坑总数的 20%。

通过实际调查,现状下拟建东飞行区、航站区和西飞行区的东端和西端最容易发生喀斯特塌陷(见图 1)。

## 3 危险性预测评价

### 3.1 预测方法

本项目采用的预测方法是模糊层次综合预测法<sup>[13]</sup>。具体方法是:在分析各主要致塌因素对喀斯特塌陷影响的基础上,建立模糊层次评价模型,确定不同层次不同影响因子的权重;采用模糊数学方法,结合 MapGIS 空间分析工具,对含有不同权重的各致塌因素进行空间迭置分析计算,结合拟建工程布置来确定项目区喀斯特地面塌陷的危险性分区。

### 3.2 预测因子的确定及预测层次结构模型

通过对工程区喀斯特塌陷形成条件的综合分析,认为工程区内喀斯特塌陷主要与喀斯特条件(喀斯特地层、喀斯特发育程度)、盖层条件(厚度、性质、结构)、致塌动力条件(地下水面与基岩层距离、地下水位波动频率、地下水位变幅、地下水径流强度、上覆地表水体或浅层喀斯特水、地表降水入渗、地表外源水入渗、抽吸地下水、附加荷载、喀斯特介质空气与大气连通情况)等因素有关。本次预测将上述 3 个条件共 15 个因子作为模糊层次评判预测因子,构造出工程区喀斯特地面塌陷预测问题的层次结构模型,如图 2 所示<sup>[13]</sup>。

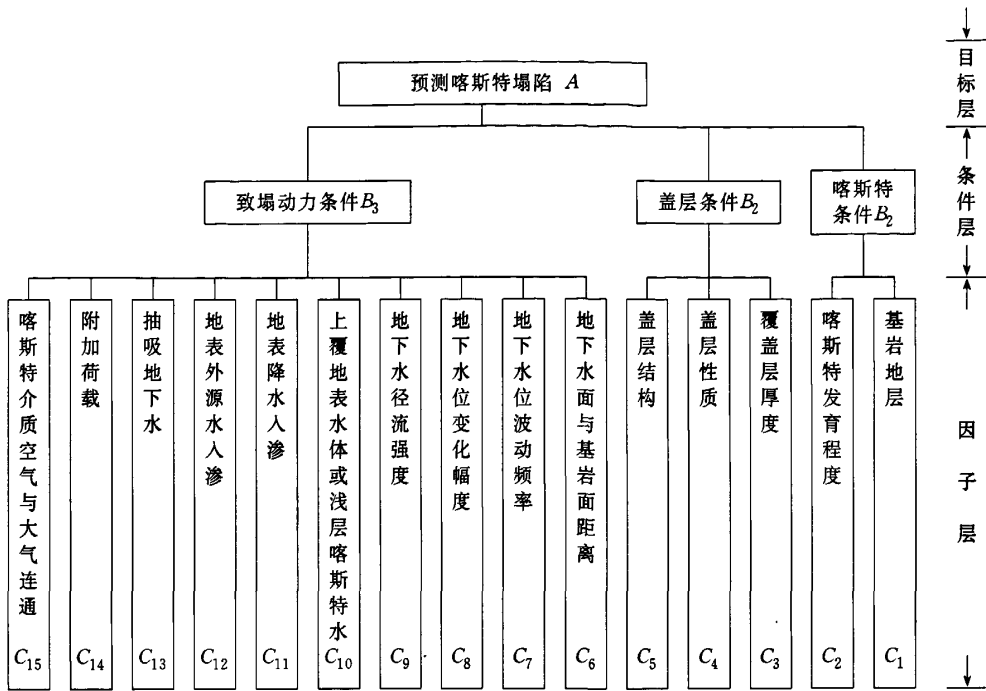


图 2 预测因子层次结构模型图  
Fig. 2 Model map of hierchial structure of predictive factor

3.3 预测因子权值的确定

根据工程区喀斯特地面塌陷条件及影响因素分析,分别列出图 2 所示的预测因子层次结构中条件层和因子层的判断矩阵<sup>[13]</sup>,见表 2、表 3。

表 2 条件层 B 相对目标层 A 的判断矩阵  
Table 2 Judgement matrix of Condition layer B relative to Object layer A

A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
B <sub>1</sub>	1	1/2	1/5
B <sub>2</sub>	2	1	1/5
B <sub>3</sub>	5	5	1

计算各判断矩阵的特征向量,经归一化后即得出喀斯特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<sup>[13]</sup>。经调试合理的权重值作为最终权重矩阵,即

$$W_B = \{0.11252, 0.17862, 0.70886\}$$

$$W_C = \{0.0375, 0.0750, 0.0893, 0.0447, 0.0447, 0.1725, 0.0549, 0.0568, 0.0211, 0.0396, 0.0375, 0.0375, 0.1249, 0.1027, 0.0613\}$$

3.4 预测因子的等级划分与取值

在对工程区喀斯特地面塌陷形成条件各因子

表 3 因子层 C 相对条件层 B 的判断矩阵  
Table 3 Judgement matrix of Factor layer C relative to Condition layer B

B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
C <sub>1</sub>	1	1/2	C <sub>3</sub>	1	2	2
C <sub>2</sub>	2	1	C <sub>4</sub>	1/2	1	1
			C <sub>5</sub>	1/2	1	1

B <sub>3</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>15</sub>
C <sub>6</sub>	1	3	3	3	3	5	5	3	3	3
C <sub>7</sub>	1/3	1	1	3	1	1	1	1	1/5	2
C <sub>8</sub>	1/3	1	1	3	1	1	1	1	1	1
C <sub>9</sub>	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/5	1/3
C <sub>10</sub>	1/3	1	1	3	1	1	1	1/3	1/3	1/3
C <sub>11</sub>	1/5	1	1	3	1	1	1	1/3	1/3	1/3
C <sub>12</sub>	1/5	1	1	3	1	1	1	1/3	1/3	1/3
C <sub>13</sub>	1/3	1	1	3	3	3	3	1	5	3
C <sub>14</sub>	1/3	5	1	5	3	3	3	1/5	1	3
C <sub>15</sub>	1/3	1/2	1	3	3	3	3	1/3	1/3	1

表 4 工程区喀斯特地面塌陷模糊评判因子等级划分表  
Table 4 The grade standard of fuzzy assessment factor of the karst collapses in the building region

条件层	指标		分 级 和 取 值					
	因子层	代号	稳定级	基本稳定级	次不稳定级	不稳定级	极不稳定级	
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
喀斯特条件	基岩地层	C <sub>1</sub>	非可溶岩	ε <sub>2s</sub>	P <sub>1y, C</sub>	D <sub>3zg</sub>	D <sub>2h</sub>	
	喀斯特发育程度	C <sub>2</sub>	无	较差	中等	较发育	强烈发育	
盖层条件	覆盖层厚度 δ/m (从石牙底部算起)		C <sub>3</sub>	0 或 >40	40~20	20~10	10~5	5~0
	盖层性质(指最下一层)	天然状态	C <sub>4</sub>	黏性土	红黏土	砾石	粉土	砂
		工程状态		具反滤层结构	压实细粒土	未压实细粒土	压实混粒土	未压实混粒土
盖层结构, 据透水性差异分层		C <sub>5</sub>	单—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	
致塌动力条件	地下水位与基岩层距离 d/m		C <sub>6</sub>	>15	15~10	10~5	5~2.5	<2.5
	地下水位波动频率		C <sub>7</sub>	≤2	2.1~10	10~50	50~100	>100
	地下水位变幅		C <sub>8</sub>	<0.5	0.5~2	2~5	5~10	>10
	地下水径流强度		C <sub>9</sub>	很弱	弱	中等	较强	强
	上覆地表水体或浅层喀斯特水		C <sub>10</sub>	无	暂时性地表水	暂时性地表水和浅层喀斯特水	暂时性地表水和常年浅层喀斯特水	常年地表水
	地表降水入渗		C <sub>11</sub>	无	长历时降水少量入渗	长历时降水大部入渗	长历时降水多数入渗	每次降水大部入渗
	地表外源水入渗		C <sub>12</sub>	无或偶然少量入渗	特殊情况有一定量入渗	一年内数次入渗, 量大	一年内多次大量入渗	时时大量入渗
	抽吸地下水		C <sub>13</sub>	无影响	一定距离, 低强度(未超采)	一定距离, 高强度, 某个时期	一定距离, 高强度; 每天	近距离, 高强度, 每天
	附加荷载		C <sub>14</sub>	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
	喀斯特介质空气与大气联通情况代号		C <sub>15</sub>	同步响应	局部不同步响应	小范围不同步响应	较大范围不同步响应	大范围不同步响应

进行综合分析的基础上, 对参与本次预测的 15 个因子进行分级并取值, 其结果如表 4 所示<sup>[13]</sup>。

3.5 模糊层次计算模型的建立

本文采用模糊数学方法建立计算模型, 预测层次结构模型(图 2)中的预测目标 A 划定评价集为<sup>[13]</sup>:

A = { 稳定级(a<sub>1</sub>), 基本稳定级(a<sub>2</sub>), 次不稳定级(a<sub>3</sub>), 不稳定级(a<sub>4</sub>), 极不稳定级(a<sub>5</sub>) }

相应的条件层对 A 的评价模糊子集为:

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

相应的因子层各预测指标对 A 的评价模糊子集为

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

某评价单元 j 的相应模糊子集为:

$$B_j = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix}, \quad C_j = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_{15} \end{bmatrix}$$

按“3.3”所述确定各层指标权重的模糊子集 W 为:

对基本条件层: W<sub>b</sub> = {W<sub>b1</sub>, W<sub>b2</sub>, W<sub>b3</sub>}

对因子层: W<sub>c</sub> = {W<sub>c1</sub>, W<sub>c2</sub>, ..., W<sub>c15</sub>}

于是得到某预测单元 j 评价集的计算模型:

$$A_j = W_b B_j = W_c C_j = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$$

式中: a<sub>1</sub> 代表稳定级; a<sub>2</sub> 代表基本稳定级; a<sub>3</sub> 代表次不稳定级; a<sub>4</sub> 代表不稳定级; a<sub>5</sub> 代表极不稳定级<sup>[13]</sup>。

最后根据综合评判分值, 对工程区喀斯特塌陷危险性按基本稳定区、危险性小区、危险性中等

区、危险性大区 4 级进行预测分区评价,分级标准分值为: <40 为基本稳定; 40 ≤ 危险性小 < 50; 50 ≤ 危险性中等 < 60; ≥ 60 为危险性大。

### 3.6 GIS 数据库的建立

本次研究以 MapGIS 为平台<sup>[14]</sup>,用图形数据和属性数据两种表达形式,建立机场区喀斯特地面塌陷基础数据库。图形数据与属性数据分别反映一个空间的位置信息和属性信息。这两种数据库表达形式的同时使用,对信息的储存、管理、查询、分析和应用极为方便。本次共建立 21 个基础数据库:工程区地形图、工程区地层分布图、钻孔分布图、喀斯特漏斗分布图、覆盖层厚度等值线图、地下水水位等势线图、C<sub>1</sub> 基岩地层分区图、C<sub>2</sub> 地貌地形分区图、C<sub>3</sub> 盖层厚度分区图、C<sub>4</sub> 盖层性质分区图、C<sub>5</sub> 盖层结构分区图、C<sub>6</sub> 地下水面与基岩面距离分区图、C<sub>7</sub> 地下水位波动频率分区图、C<sub>8</sub> 地下水位变幅分区图、C<sub>9</sub> 地下水径流强度分区图<sup>[13]</sup>、C<sub>10</sub> 上覆地表水体和浅层喀斯特水分区图、C<sub>11</sub> 地表降水入渗分区图、C<sub>12</sub> 地表外源水入渗分区图、C<sub>13</sub> 地下水开采影响分区图、C<sub>14</sub> 附加荷载分区图、C<sub>15</sub> 喀斯特介质空气与大气连通情况分区图。

### 3.7 模糊层次综合预测

建立好喀斯特地面塌陷基础数据库后,运用 MapGIS,从属性库中读取所有预测单元的各项指标的赋值,对基础数据图件进行综合叠加(图 3),确定评价指标的隶属函数值,计算出每个预测单元的隶属函数矩阵 C<sup>[13]</sup>;然后确定各评价因子的权重 W<sub>i</sub>;运用模糊层次预测计算模型: A<sub>j</sub> = W<sub>i</sub> \* C<sub>i</sub>, 计算出每个单元的模糊评价集 A<sub>j</sub> = (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>, a<sub>4</sub>, a<sub>5</sub>);用加权综合积分算法 M = A \* D

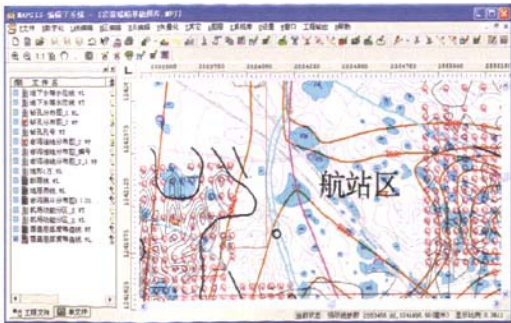


图 3 喀斯特塌陷基础图件综合叠加图  
Fig. 3 Combined-overlaid map from basic maps of the karst collapses

计算出每个单元的综合评判分值,根据综合分值确定每个单元的塌陷危险性级别。

## 4 危险性分区结果及可信度分析

根据以上所述的预测方法对新机场进行喀斯特塌陷危险性预测,各级评价预测统计详见表 5。

表 5 喀斯特塌陷危险性预测分类统计

Table 5 The statistical chart of incidence prediction of the karst collapses

分值段	低分值	高分值	A/km <sup>2</sup>	面积比例	危险性分区
20~40	28.25	39.55	4.6	19.9%	基本稳定区
40~50	40.01	49.99	13.4	57.9%	危险性小区
50~60	50.00	59.96	4.76	20.5%	危险性中等
60~70	60.07	67.57	0.40	1.7%	危险性大区
合计			23.16	100.0%	

综合上述评判分值和评级数据,将综合分值小于 40 的区域划为基本稳定区;分值为 40~50 的区域划为危险性小区,面积为 13.40 km<sup>2</sup>,占工程区的 57.8%;将分值为 50~60 的区域划为危险性中等区,面积为 4.76 km<sup>2</sup>,占工程区的 20.5%;将分值大于 60 的区域划为危险性大区,面积为 0.40 km<sup>2</sup>,占全机场区域的 1.7%(图 4)。

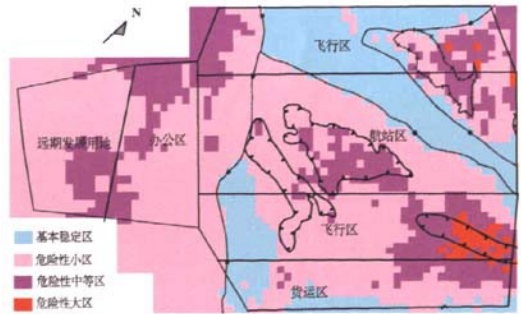


图 4 工程区喀斯特地面塌陷危险性分区图  
Fig. 4 Partition map of incidence prediction of the karst collapses in the building region

由于本项目预测范围较大、条件复杂多变、各影响因素标志及界线又模糊不清,需综合考虑不同影响因素所产生的影响程度,采用模糊层次综合法来进行喀斯特塌陷危险性预测评价是比较适宜的。

从预测的结果看,现状下已形成的喀斯特塌陷绝大部分处于危险性中等区和危险性大区(图 1 和图 4),与研究区的实际情况基本符合。

## 5 结论

本文根据工程区实际情况,选取 3 个条件层的 15 个因子构建模糊层次结构模型,确定各因子的权重;采用模糊数学方法,以 MapGIS 为平台,对含有不同权重的各影响因素进行空间选置分析、计算,来确定并划分工程区喀斯特塌陷的危险性分区。预测、评价结果比较客观、合理,可信度较高,可提供工程建设使用。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 邓启江,李星宇,吕琼,等. 昆明市岩溶塌陷发育特征和防治措施[J]. 中国岩溶, 2009, 28(1): 23-29.
- [2] 云南地矿局第一水文地质工程地质大队. 昆明市岩溶塌陷机理及防治对策研究阶段性报告[R]. 昆明: 云南地质工程勘察设计院, 1993.
- [3] 项式均,廖如松. 岩溶塌陷灾害的预测与评价[J]. 地质灾害防治, 1990, 1(1): 23-26.
- [4] 谭鸿增. 南昆铁路岩溶塌陷的预测与整治[J]. 工程地质学报, 2000, 8(增刊): 216-219.
- [5] 陈国亮. 岩溶地面塌陷机制、预测及整治研究[J]. 地质灾害防治, 1999, 1(3): 7-11.
- [6] 王洪涛,王恩志,范建明. 岩溶塌陷区划的选置分析方法和宏观减灾对策研究[J]. 长春地质学院学报, 1996, 26(3): 336-341.
- [7] 雷明堂,蒋小珍,李瑜. 岩溶塌陷预测评价系统及其应用——以唐山岩溶塌陷信息系统为例[J]. 中国岩溶, 1997, 16(2): 97-103.
- [8] 邱向荣. 岩溶塌陷稳定性的灰色模糊综合评判[J]. 水文地质工程地质, 2004, 26(4): 58-61.
- [9] 康彦仁. 中国南方岩溶塌陷[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1990.
- [10] 邹成杰,张汝清,光耀华,等. 水利水电岩溶工程地质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 217-224.
- [11] 刘传正. 地质灾害勘察指南[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [12] 陈国亮. 岩溶塌陷的成因与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994: 13-39.
- [13] 陈学军,陈植华,贾晓青,等. 桂林市西城区岩溶塌陷灾害危险性评价[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2004: 64-112.
- [14] 吴信才. MapGIS 地理信息系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

## Assessment of the karst collapses dangerous forecast at a new airport based on fuzzy-layer model

DENG Qi-jiang<sup>1</sup>, WANG Zheng-rong<sup>2</sup>, LI Xing-yu<sup>3</sup>, YUE Yong-feng<sup>3</sup>

1. Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. Yunnan Geological Engineering Prospecting Institute, Kunming 650041, China

**Abstract:** The karst collapse is the most important engineering geologic problem a faced by new international airport, so a research on the assessment of the karst collapses predetermination is necessary. According to the state of the building region, 15 factors belonging to 3 conditions-layers are chosen to construct the assessment model of the karst collapses predetermination using the fuzzy-layer model, then, to determine the weight of the different factors and depict the influence of the different factors to the karst collapses, and later, to assess the effect of the different factors using fuzzy mathematics and MapGIS to analyse and count space-laminated-construction formed by the different factors with different weights. Finally, the karst collapses dangerous zone is determined. At present, most of the karst collapses lie in the middle-rank dangerous zone and great-rank dangerous zone. The assessment result is objective and reliable.

**Key words:** karst collapse; danger; fuzzy-layer model; forecast; assessment