

基于两级模糊数学综合评判法的岩溶塌陷危险性评价

——以安顺市中心城市规划区为例

杨荣康, 杨元丽, 蒋镇涛, 王 乾, 刘腾飞

(贵州省地质环境监测院 贵州省环境地质研究所, 贵州 贵阳 550004)

[摘要]以安顺市中心城市规划区作为研究对象,收集、综合分析研究区有关地质资料,结合实地调查、物探、钻探、监测、高精度遥感解译等成果,选取6个一级评价因子,15个二级评价因子,建立研究区基于两级模糊数学综合评判法的岩溶塌陷危险性评价方法体系。在此基础上,量化各级指标及权重取值,开展研究区岩溶塌陷危险性评价。结果显示,安顺市中心城市规划区内总体岩溶塌陷危险性中区和高区所占比重较大,占研究区总面积的70.35%,危险性高区主要分布于头铺—幺铺一线,占研究区总面积的13.56%。评价结果与岩溶塌陷历史事件相符,具有较高的可信度。

[关键词]安顺市;地质灾害;岩溶塌陷;模糊数学法

[中图分类号]P642.26;O159 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2017)02-0109-07

岩溶塌陷发育主要受岩溶洞穴发育程度、松散盖层情况和岩溶地下水水动力条件三个基本条件的控制(康彦仁,1988;程星,2006;王顺祥等,1998),其危险性评价是评价岩溶塌陷发生潜在的危險程度,确定岩溶塌陷活动的规模、强度、发生概率及可能造成危害的区域范围(杨全成,2010)。在目前城市建设用地日益紧张背景下,进行危险性评价对于岩溶塌陷的防治有着重要的意义(赵德君,2012)。岩溶塌陷危险性评价方法很多,有经验公式法、人工神经网络法、多元统计分析法、层次分析法以及地理信息系统(GIS)评价等(雷明堂,2001;赵德君,2012),国内已开展了基于各种方法的岩溶塌陷危险性评价和相关研究(曾玉莹,2007;钟宇,2015;陈邦松,2015;王恒恒等,2016;徐贵来,2016;赵超,2016)。

岩溶塌陷是受多种外在因素共同作用和控制的结果,各种因素之间具有明显的模糊性(包明惠,2001)。2001年,包明惠等进行岩溶塌陷两级模糊综合评判研究,2015年,武运泊等开展了基于AHP-模糊综合评判的岩溶塌陷危险性评价,

2012年,蒋小珍等进行了岩溶塌陷灾害的水动力条件危险性评价指标研究。前人研究逐步完善了岩溶塌陷危险性评价的指标体系(雷明堂,2001;蒋小珍,2003;蒋小珍,2012;戴建玲,2012;武运泊,2015年;徐贵来,2016;马超,2016)。

安顺市位于贵州省中部,毗邻国家级新区贵安新区,曾发生多次岩溶塌陷地质灾害,2007年以后,岩溶塌陷地质灾害发生的频率有明显递增的趋势,2016年9月,贵州省政府批复《安顺市城市总体规划(2016—2030年)》,要求加快“贵阳—安顺”城镇空间一体化步伐。随着安顺市社会经济发展和新型城镇化建设的推进,人类工程活动强度前所未有的,将对脆弱的地质环境产生巨大的威胁,尤其对岩溶塌陷影响不容忽视。

本研究在前人研究基础上,以安顺市城市总体规划中的中心城市规划区作为研究区,针对区域内地质条件和岩溶塌陷发育的主要影响因素,建立研究区内基于两级模糊数学综合评判法的岩溶塌陷危险性评价方法体系,开展岩溶塌陷危险

[收稿日期]2017-03-20

[基金项目]中国地质调查局地质大调查项目,《黔中地区岩溶塌陷调查》(水[2014]02-030-010)资助。

[作者简介]杨荣康(1986—),男,工程师,硕士学位,长期从事水文地质、环境地质调查工作。

性评价,绘制危险性分区图,为安顺中心城市规划区的城镇建设和岩溶塌陷灾害防治提供重要科学指导,同时为省内其它地质条件相似地区的岩溶塌陷危险性评价提供方法借鉴。

1 研究区概述

研究区地处黔中高原二级台面,为安顺市中心城市规划区,以安普高速、安顺西绕城高速、沪昆高速三条高速为界,总面积 215 km²,位于长江流域和珠江流域分水岭地带,覆盖型岩溶区面积 183 km²,占研究区总面积的 85%,是典型的浅覆盖型岩溶区。2014年,贵州省地质环境监测院开

展了该区岩溶塌陷调查工作,并结合物探、钻探、高精度遥感解译等工作手段,获取了研究区内最新地质资料和相关数据。

研究区地貌类型为溶丘谷地,总体地势平坦,出露地层为中生界三叠系中下统安顺组(T_{1-2a})、中统关岭组(T_{2g})和杨柳井组(T_{2y})地层,以安顺组(T_{1-2a})分布最为广泛,岩性以灰色中厚层状白云岩、白云岩和微晶灰岩互层为主,产状近水平。构造上位于贵州省五级构造单元中的织金穹盆构造变形区南部边缘,受北北东向、北东向构造控制明显,南部发育一条北东向的区域性断裂—头铺断裂,由平坝经安顺延伸至镇宁,在研究区内表现为单侧充水性(图1)。

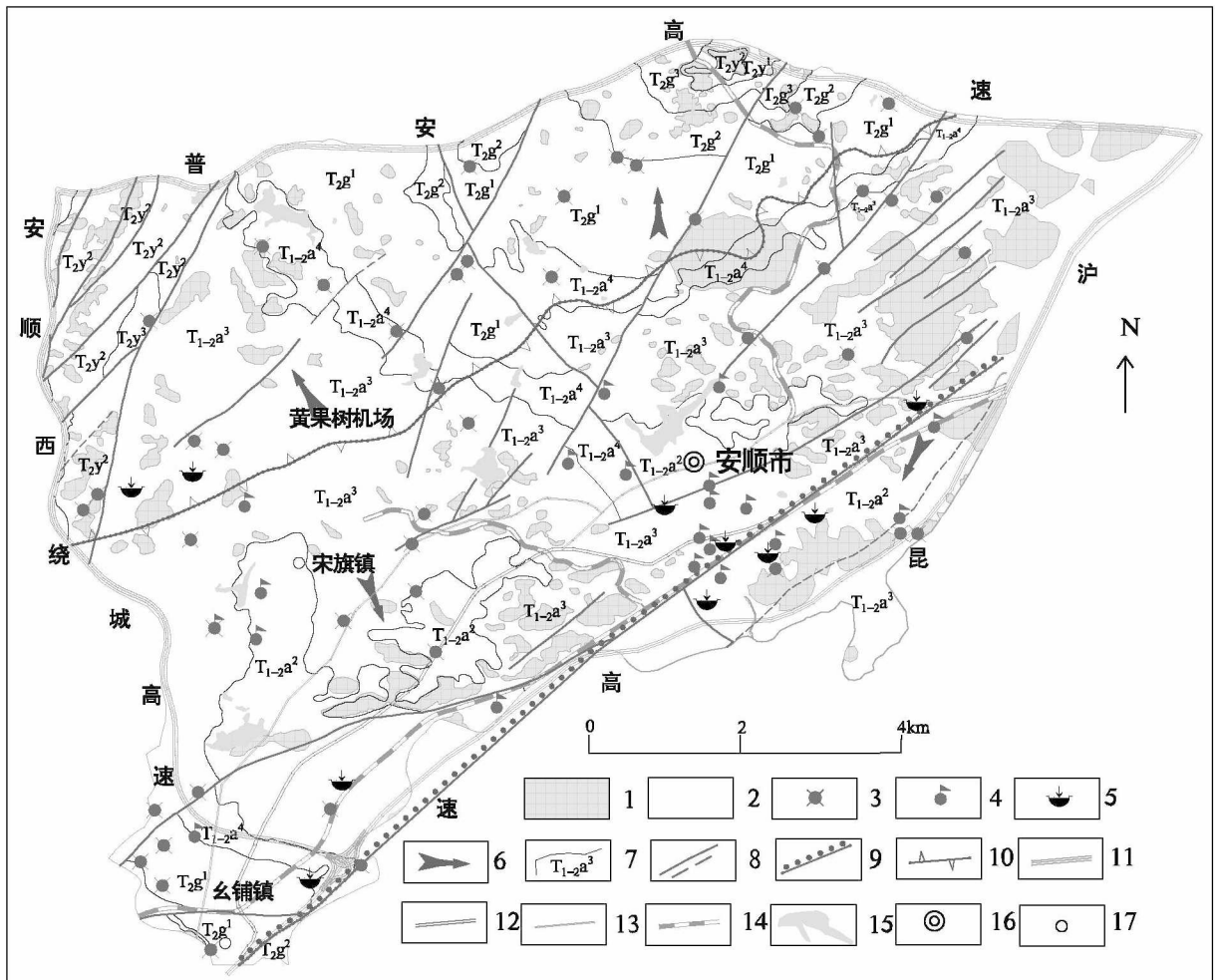


图1 研究区概况图

Fig. 1 General condition of the studying area

1—裸露型岩溶区;2—覆盖型岩溶区;3—地下水开采机井;4—地下水位监测点;5—岩溶塌陷点;6—地下水流向;7—地层界线及地质代号;8—断层及推测断层;9—单侧充水断层;10—地表水分水岭;11—高速公路;12—国道;13—省道;14—铁路;15—湖泊;16—市驻地;17—乡镇驻地

研究区岩溶发育中等,头铺断裂以南岩溶发育较强烈,幺铺镇及安顺市以北关岭组一段(T_2g^1)地层岩溶发育程度较低。区内岩溶地下水资源丰富,地下水埋深浅,通常在0 m~10 m之间,以岩溶裂隙溶洞水为主,地下水位动态变化较稳定,年平均变幅在6 m之内。第四系土层总体较薄,受隐伏岩溶发育控制,厚度分布不均匀,平均厚度在0.2 m~5 m之间,以单层粘土结构为主。

研究区城市由夜郎湖水库集中供水,城镇周边主要依赖地下水机井分散供水,累计正在使用的地下水开采机井近50余口,地下水开采较为集中。相关研究显示,地下水开采一定程度上可改变地下水天然流场(曾玉莹,2007),是区内岩溶塌陷发育的主要动力条件之一。

自上世纪80年代以来,西秀区周边发生岩溶塌陷37余处,较早的有玉碗井塌陷、风雷机械厂塌陷、绵纺厂塌陷、头铺塌陷、胶泥坝塌陷等,塌陷机理均为潜蚀致塌式。2000年以后,岩溶塌陷发育数量规模明显增加,数量占总塌陷点数量近50%以上。2015年,安顺市塔山东路、黄果树大街发生的岩溶塌陷事件引起公众媒体和当地政府

及国土部门的关注和重视。

2 评价方法

2.1 评价指标与危险性级别

影响岩溶塌陷的因素很多,各因素之间相互制约和影响,岩溶塌陷的影响因素错综复杂且没有截然明显的界限值,具有明显的模糊性,各影响因素之间又有明显的相关性和归类性(包明惠,2001),本次研究用二级模糊数学综合评判法进行岩溶塌陷的危险性评价。

依据研究区岩溶塌陷地质条件和主要诱发和影响因素,结合“1:50000岩溶塌陷调查规范”以及前人研究相关指标选取原则和分级方法,在影响岩溶塌陷三大基本条件的基础上,从诸多指标中选取能够真实全面反映岩溶塌陷危险性的评价指标为评价指标。本次研究采取了6个一级指标,15个二级指标,并将岩溶塌陷危险性级别划分为稳定区、危险性低、危险性中、危险性高四个级别,建立研究区二级模糊数学法岩溶塌陷危险性评价指标及危险性分级体系(见表1)。

表1 评价指标及分级标准

Table 1 Assessment index and classification norm

评价指标		危险性级别			
一级	二级	极低(1)	低(2)	中(3)	高(4)
基岩	岩性	非碳酸盐岩	泥质白云岩	白云岩	白云岩灰岩互层
	岩溶发育情况	不发育	弱	中	强
覆盖层	岩体结构	整体	块状	层状	破碎
	厚度(m)	0	>30	15~30	<15
地下水	底部土层液性指数	无	硬塑	可塑	流塑、软塑
	岩溶水波动情况	远离基岩面	基岩面上波动	基岩面下波动	基岩面上下波动
	水位变幅(m)	<1	1~5	5~10	>10
	波动频率(次/年)	<2	2~10	10~20	>20
地貌	径流强度($l/s \cdot km^2$)	<0.5	0.5~2	2~4	>4
	地貌单元	丘峰谷地	峰丛洼地	溶丘谷地	峰丛谷地
环境	地形特征(坡度)	<5	5~10	10~20	>20
	人工抽水强度(m^3/d)	<30	30~100	100~300	>300
塌陷坑	其他人工活动	无	弱	中	强
	密度(个/ $10 km^2$)	无	<2	2~10	>10
	稳定性	稳定	基本稳定	不稳定	极不稳定

注:量化指标按危险性级别赋值为1、2、3、4,其他二级指标赋值域分别为0、1、2、3、4之间,人类工程活动及塌陷坑稳定性赋值参照“1:50000岩溶塌陷调查规范”中相应评价方法评价结果分级赋值。

2.2 评价方法

在前人研究成果基础上,结合本次研究的评价指标和分级体系,根据模糊数学隶属函数的建立原则和方法,对各评价因子的分布特征进行统计分析,多数因子呈降半梯形分布,故采用降半梯形公布公式确定各因子的隶属函数,并计算其隶属度,计算公式如下:

$$U_{1(x)} = \begin{cases} 1 & x \leq x_1 \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} & x_1 < x \leq x_2 \\ 0 & x > x_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$U_{2(x)} = \begin{cases} 0 & 0 \leq x_1 x > x_3 \\ \frac{x - x_2}{x_2 - x_1} & x_1 < x \leq x_2 \\ \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2} & x_2 < x \leq x_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$U_{3(x)} = \begin{cases} 0 & 0 \leq x_2 x > x_4 \\ \frac{x - x_2}{x_3 - x_2} & x_2 < x \leq x_3 \\ \frac{x_4 - x}{x_4 - x_3} & x_3 < x \leq x_4 \end{cases} \quad (3)$$

$$U_{4(x)} = \begin{cases} 0 & x \leq x_3 \\ \frac{x - x_3}{x_4 - x_3} & x_3 < x \leq x_4 \\ 1 & x > x_4 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $x_1、x_2、x_3、x_4$ 分别为岩溶塌陷危险性分

级的界限值, x 为实测值, $U_{(x)}$ 为隶属度。

结合岩溶塌陷危险性评价的模糊矩阵和权重矩阵,建立两级模糊综合评价模型如下:

$$B_1 = W_j \cdot U_1 \quad (5)$$

其中: B_1 为评价结果; W_j 权重向量矩阵; U_1 模糊关系矩阵。

依据上述方法,确定各级评价指标权重值后,采用最大隶属度法,分别对二级因子、一级因子进行评价,确定研究区最终危险性级别。

3 岩溶塌陷危险性评价

3.1 评价参数及评价权重体系

采用专家经验法(包惠明,2001;雷晓东,2013;陈邦松,2015;赵超,2016;武运泊,等,2015),结合本次研究岩溶塌陷主要影响条件确定计算权重值,经反复的试算研究,最终建立各级评价因子权重取值表(表1),并使各级权重满足归一化原则。

在已有地质资料的基础上,通过实地调查、地下水动态监测、高密度电法剖面测量、地质雷达、水文地质钻探、工程地质钻探、遥感解译、岩土水样采样测试等工作手段和室内综合研究成果,量化二级评价指标中各评价指标取值,基于GIS软件,建立15个二级评价因子的基础图层,并赋予各图层评价指示取值的相应属性值,作为岩溶塌陷危险性评价的基础图件和数据。

表2 各级评价指标及权重取值表

Table 2 Assessment index of each class and weights

评价指标		权重		评价指标		权重	
一级	二级	一级	二级	一级	二级	一级	二级
地下水	岩溶水波动情况		0.4	基岩	岩性		0.3
	水位变幅(m)	0.2	0.25		岩溶发育情况	0.2	0.4
	波动频率(次)		0.2		岩体结构		0.3
环境	径流强度		0.15	覆盖层	厚度(m)	0.2	0.6
	人工抽水强度	0.2	0.6		底部土层液性指数		0.4
	其他人工活动		0.4		地貌	地貌单元	0.05
塌陷坑	密度(个/10 km ²)	0.15	0.6	地形特征(坡度)		0.4	
	稳定性		0.4				

3.2 评价结果

依据以上评价参数及重级因子权重体系,采用二级模糊数学综合评判法(公式1-5),依托

GIS软件的空间分析和属性计算功能,完成研究区岩溶塌陷危险性评价计算,并绘制了岩溶塌陷危险性评价分区图(图2),各分区面积及比例统计见表3所示。

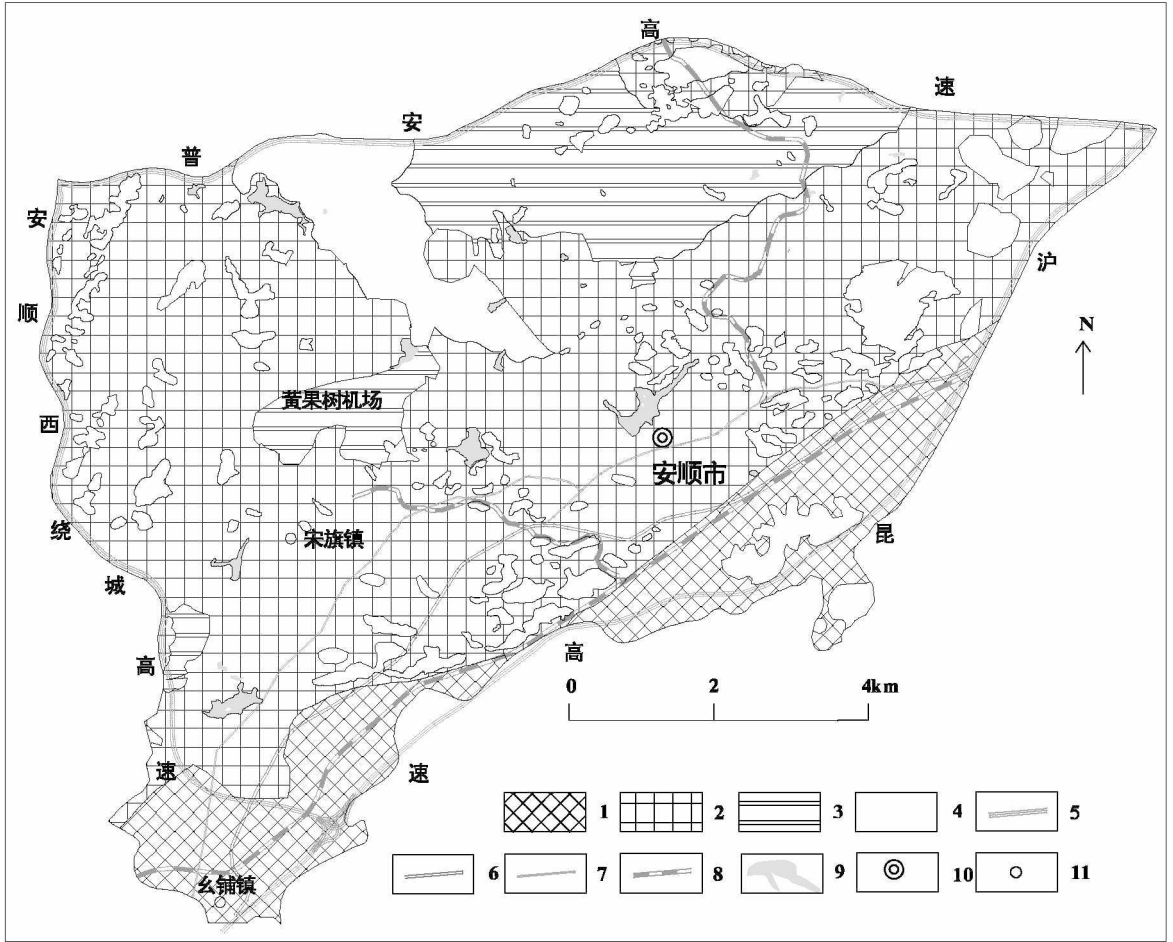


图2 岩溶塌陷危险性评价结果图

Fig. 2 Karst collapse risk evaluation

- 1—危险性高;2—危险性中;3—危险性低;4—危险性极低;5—高速公路;6—国道;7—省道;8—铁路;
- 9—湖泊;10—市驻地;11—乡镇驻地

表3 岩溶塌陷危险性评价结果统计表

Table 3 Results statistics of karst collapse risk evaluation

危险性级别	极低	低	中	高	合计
面积(km ²)	35.78	27.96	122.10	29.16	215.00
比例(%)	16.64	13.00	56.79	13.56	100.00

(1)危险性高区:分布于头铺断层东南的头铺—玉碗井—胶泥坝和风雷厂—幺铺镇以北覆盖型岩溶区,面积 29.16 km²,占研究区总面积的 13.56%,岩溶发育情况及地下水活动均较强烈,机井密集,地下水开采强度大,也是岩溶塌陷主要分布区域,尤其是头铺—玉碗井—胶泥坝沿线是

近年来岩溶塌陷高发区;

(2)危险性中区:分布于头铺断层西北大部安顺组(T₁₋₂a)地层中的覆盖型岩溶区,面积 122.10 km²,占研究区总面积的 56.79%,从地质结构角度看,均具备岩溶塌陷发育的基础地质条件,岩溶发育中等,但地下水活动和人类工程活动相对较弱,局部地下水开采强度较大区发生过岩溶塌陷,如宋旗镇西北面岩溶塌陷(2014年);

(3)危险性低区:分布于研究区以北邓家水井村、青山村、张官屯村区域,以及黄果树机场所在的覆盖型岩溶区,面积 27.96 km²,占研究区总面积的

13.00%，岩溶发育程度总体较低，黄果树机场周边虽岩溶发育程度为中等，但其覆盖层极薄，多为 0 m ~ 0.5 m，地处分水岭地带，地下水活动微弱，地下水开采强度弱，未发生过岩溶塌陷事件；

(4) 危险性极低区：集中分布于研究区以北白果寨村—石板寨村关岭组一段(T₂g¹)泥质白云岩大面积分布区，面积 35.78 km²，占研究区总面积的 16.64%，岩溶发育程度低，岩层富水性差，无开采机井。此外，还分布于头铺—沪昆高速—安顺东一线北面以及研究区安顺市城区东南面大片裸露型岩溶区和零星分布于安顺市城镇周边及西北面小片裸露型岩溶区，岩溶发育程度中等，基本无第四系覆盖层，可认为基本不具备岩溶塌陷发育的基础地质条件，加之人类工程活动相对微弱，发生岩溶塌陷的可能性极低。

4 结论与建议

(1) 结合研究区岩溶塌陷地质条件，建立基于 6 个一级指标，15 个二级指标的两级模糊数学综合评判法的岩溶塌陷危险性评价方法体系，经多次反复试算，评价指标选取和权重取值具有较高可信度。

(2) 将研究区岩溶塌陷危险性划分为 4 个等级，评价结果显示，研究区近年来岩溶塌陷均发生在高危险区和中危险区，评价结果比较客观合理，与历史事件相符。

(3) 安顺市中心城市规划区内，岩溶塌陷危险性中区和高危区所占比重较大，占研究区总面积的 70.35%，危险性高危区主要分布于头铺至幺铺一线，占研究区总面积的 13.56%，也是研究区内岩溶塌陷高发区，城市建设过程中应引起高度重视。

(4) 对于高危险区且多次发生过岩溶塌陷的区域，如玉碗井、开发区大屯村等地，建议定期对其周边变形迹象进行监测，可采用地质雷达等工具监测地下土洞发育情况，及时采取相应措施，降低岩溶塌陷的灾害风险。

(5) 贵州省岩溶区分布广，第四系覆盖层总体较薄，结构单一，岩溶塌陷主要受地下水开采等人类工程活动外在动力因素控制，潜蚀机理占主

导，岩溶塌陷主要地质模式及触发的动力因素与研究区大致相同，本次建立的岩溶塌陷两级模糊数学危险性评价方法体系，适用于省内其它机井密集，地下水活动频繁的浅覆盖层岩溶区，如六盘水、玉屏、兴仁、松桃等地，仅需根据不同区域地质条件和岩溶塌陷主控因素适度的调整二级因子量化指标、赋值区间和权重取值，具有较好的方法参考和应用价值。

[参考文献]

包惠明. 2001. 岩溶塌陷两级模糊综合评判[J]. 水文地质工程地质. (1):49-50.

程星. 2006. 岩溶塌陷机理及其预测与评价研究[M]. 北京:地质出版社. 64-70.

陈邦松. 2015. 湖北省武汉市某区岩溶塌陷风险评价研究[D]. 北京:中国地质大学(北京).

戴建玲,雷明堂,蒋小珍. 2012. 线性工程岩溶塌陷危险性评价研究[J]. 中国岩溶, (03):296-302.

蒋小珍,雷明堂,管振德. 2012. 岩溶塌陷灾害的水动力条件危险性评价指标——以广西贵港青云村为例[J]. 地下空间与工程学报, (06):1316-1321.

蒋小珍. 2003. 基于 GIS 技术的全国地面塌陷灾害危险性评价[J]. 地球学报, (05):469-473.

康彦仁. 1988. 岩溶地面塌陷的形成条件[J]. 中国岩溶. (01):11-20.

雷明堂. 2001. 贵州省六盘水市岩溶塌陷评价预测信息系统[A]. 中国地质科学院“九五”科技成果汇编[C]. 2.

雷晓东,邵景力,李娟,姚春梅,杨军. 2013. 基于地下水模型的岩溶塌陷风险性评价方法在临沂市城区的应用[J]. 城市地质, (03):50-57.

王顺祥. 1998. 贵州省六盘水市地质灾害研究[M]. 贵州:贵州民族出版社. 92-94.

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, (01):43-48.

王恒恒,张发旺,郭纯青,等. 2016. 基于层次分析法的城市岩溶塌陷危险性评价——以武汉市南部为例[J]. 中国岩溶, (06):667-673.

徐贵来. 2016. 武汉市覆盖层-岩溶地面塌陷形成机理与危险性评价[D]. 武汉:中国地质大学.

杨全城,姚春梅,邵景力,等. 2010. 模糊综合评判在临沂城区岩溶塌陷危险性评价中的应用[J]. 山东国土资源, 26(6):23-26.

曾玉莹,郑小战. 2007. 岩溶地面塌陷危险性模糊评价方法[J]. 工程地质学报. 15:63-65.

赵超,马俊超,万黎明,余宏明. 2016. 基于层次可拓分析法的采空区塌陷危险性评价研究[J]. 安全与环境工程, (06):35-40.

钟宇,张明堃,潘玲,等. 2015. 基于 GIS 的武汉市武昌区岩溶塌

陷危险性评价[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), (01):48-53.

赵德君,彭凤,杨建,宋群. 2012. 基于层次分析法的武汉市岩溶塌陷危险性分区评价[J]. 资源环境与工程, (S1):97-99.

Karst Collapse Risk Assessment Base on Two-level Fuzzy Mathematical Comprehensible Evaluation

——Taking the Urban Planning Area in Anshuan as an Example

YANG Rong-kang, YANG Yuan-li, JIANG Zhen-tao, WANG Qian, LIU Teng-fei

(*Guizhou Institute of Geo-environment Monitoring, Guiyang 550004, Guizhou, China;*
Guizhou Institute of Environmental Geology, Guiyang 550004, Guizhou, China)

[**Abstract**] In this paper, the urban planning area is taken as the objective, by collect and analysis the relative geologic information, with the results of field investigation, geophysical prospecting, drilling, monitoring and high precision Remote sensing, 6 first-class evaluation factor and 15 second-class evaluation factor are selected, the karst collapse risk evaluation system which is based on two-level fuzzy mathematical comprehensible evaluation method is founded. So the different norms and weights are quantized, the karst collapse risk in the studying area is assessed. The result shows the proportion of middle and high risk in the urban planning area is big (70.35% of the total area), the high risk area mainly distributed in the Toupu-Yaopu line (13.56% of the total area), the results are consisted with the karst collapse history events and believable.

[**Key words**] Anshun city; Geologic disaster; Karst collapse; Fuzzy mathematical method