

王恒恒,张发旺,郭纯青,等.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,2016,35(6):667-673.
DOI:10.11932/karst20160608

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

王恒恒¹,张发旺²,郭纯青¹,苏春田²

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院,广西 桂林 541004; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所,广西 桂林 541004)

摘 要:文章依据武汉市岩溶塌陷形成机理及影响因素,选取岩溶发育程度、土层厚度、覆盖层结构、岩溶水位波动幅度、抽水井影响、工程施工强度等 6 个评价因子,构建研究区岩溶塌陷危险性层次分析评价模型,对武汉市南部可溶岩分布区 183 个岩溶塌陷危险性评价单元进行岩溶塌陷危险性综合指数计算,绘制出了研究区岩溶塌陷危险性等级分区图。结果表明,高危险区有 3 个,主要集中在研究区西北侧青菱乡毛坦港、长征村—光霞村一带;中危险区有 92 个,主要为第四系中更新统黏土覆盖型岩溶区;低危险区有 88 个,包括部分覆盖型岩溶区以及所有埋藏型岩溶区。

关键词:岩溶塌陷;层次分析;综合指数模型;危险性评价

中图分类号:P642.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2016)06-0667-07

0 引 言

覆盖型岩溶塌陷是“岩溶—盖层—水”构成的系统在各种因素影响下表现出来的系统失稳过程在地表的宏观表现。随着人类工程活动的加剧,岩溶塌陷频发,严重影响了国民经济建设及人民正常生活。

危险性评价是评价岩溶塌陷发生潜在的危险程度,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^[1]。在目前城市建设用地日益紧张背景下,对研究区进行危险性评价,对于岩溶塌陷的防治有着重要的意义^[2]。有关岩溶塌陷危险性评价预测的方法很多,如:经验公式法、人工神经网络法、多元统计分析法以及地理信息系统(GIS)评价法等^[3]。然而,岩溶塌陷的形成是一个十分复杂的地质过程,影响因素繁多,各因素的影响和作用具有很强的不确定性,给准确评价岩溶塌陷危险性带来了困难;另外,传统方法评价时考虑的因素不够全面,计算结果偏保守。为此,国内学者引入模糊理论,模糊数

学评价可使计算结果不侧重于主观表现,避免了主观臆断^[4],取得了不错效果。邓启江等^[5]采用模糊层次综合法,划分某新建机场岩溶塌陷的危险性分区;杨全城等^[1]采用基于层次分析的模糊综合评判法对临沂城区岩溶塌陷进行危险性现状评价,综合得出危险性评价分级图;赵德君等^[2]采用层次分析法构建了岩溶塌陷危险性模型,对武汉市阮家巷至陆家街区一带进行了塌陷危险性评价;崔玉良等^[6]采用改进鱼骨模型,将联系密切的岩溶塌陷影响因素合并,对柳州地区进行岩溶塌陷风险评价。

依据前人研究成果,本文基于层次分析法对武汉市南部岩溶塌陷危险性进行综合评价。在对武汉市岩溶塌陷地质环境状况进行充分分析的基础上,选取岩溶发育程度、土层厚度、覆盖层结构、岩溶水位波动幅度、抽水井影响、工程施工强度等 6 个评价因子,构建武汉市南部地区岩溶塌陷危险性层次分析评价模型,进行岩溶塌陷危险性综合评价,绘制岩溶塌陷

基金项目:国家自然科学基金项目(41172230/D0213);中国地质调查项目(DD20160303)
第一作者简介:王恒恒(1991—),男,水利工程专业,硕士研究生。E-mail:1163430181@qq.com。
通信作者:张发旺(1965—),男,俄罗斯科学院外籍院士,二级研究员,博士生导师,主要研究方向:人类活动地质环境效应与控制。E-mail:Zhang-fawang@karst.ac.cn。
收稿日期:2016-06-15

危险性等级分区图,以此作为开展城市岩溶区科学研究工作的基础,将为城市的建设和发展提供重要指导。

1 研究区概况

武汉市地处亚热带季风气候区,降水量季节变化、年际变化大,降水主要集中在春夏两季。曹小雪^[7]统计分析了 1961—2012 年武汉市气候变化特征,其中 1983 年降水量达到最大值,为 1 894.9 mm,1966 年降水量最少,仅有 726.7 mm,二者相差 1 168.2 mm。另外,短历时暴雨是武汉市夏季常见的一种现象,强度大^[8]。武汉市的降水量波动引起地下水位频繁变动,进而在不断的侵蚀与吸蚀作用下,形成、扩大土洞,为岩溶塌陷形成创造条件。

研究区北起武汉市三环线野芷湖,南至江夏区纸坊街,东抵江夏区龙泉山,西达黄家湖(图 1),所涉及的江夏区、洪山区、东湖新技术开发区 3 个区正处于

高速发展阶段,人类工程活动较为活跃,各种道路桥梁、工民建筑处于快速建设中;另外,各种交通工具行驶引起地面震动,加快原有土洞的破坏,且建筑、贮存物品等增加了溶洞、土洞上部荷载,增大了致塌力。

受区域地质构造的控制,研究区隐伏可溶岩总体呈近东西向条带状分布。根据钻孔资料统计,研究区内二叠系岩溶总体发育程度强于三叠系岩溶,而石炭系岩溶发育最弱,在地域方面,区内西北角、长江沿岸冲积平原地段,岩溶发育较强。

研究区岩溶类型主要有覆盖型和埋藏型 2 种,覆盖型的特点是在碳酸盐岩上直接覆盖第四系松散堆积物,而埋藏型的特点是碳酸盐岩与第四系松散堆积物之间有白垩—古近系公安寨组红砂岩。

此外,研究区的地下水位与长江水位的涨落也存在明显对应关系,孔隙水与岩溶水联系紧密,当长江水位发生涨落时,加剧地下水的循环,促使地下溶洞发育。同时,受周边开采岩溶水的影响,部分呈现出水位降低的趋势,具人为开采动态特征。

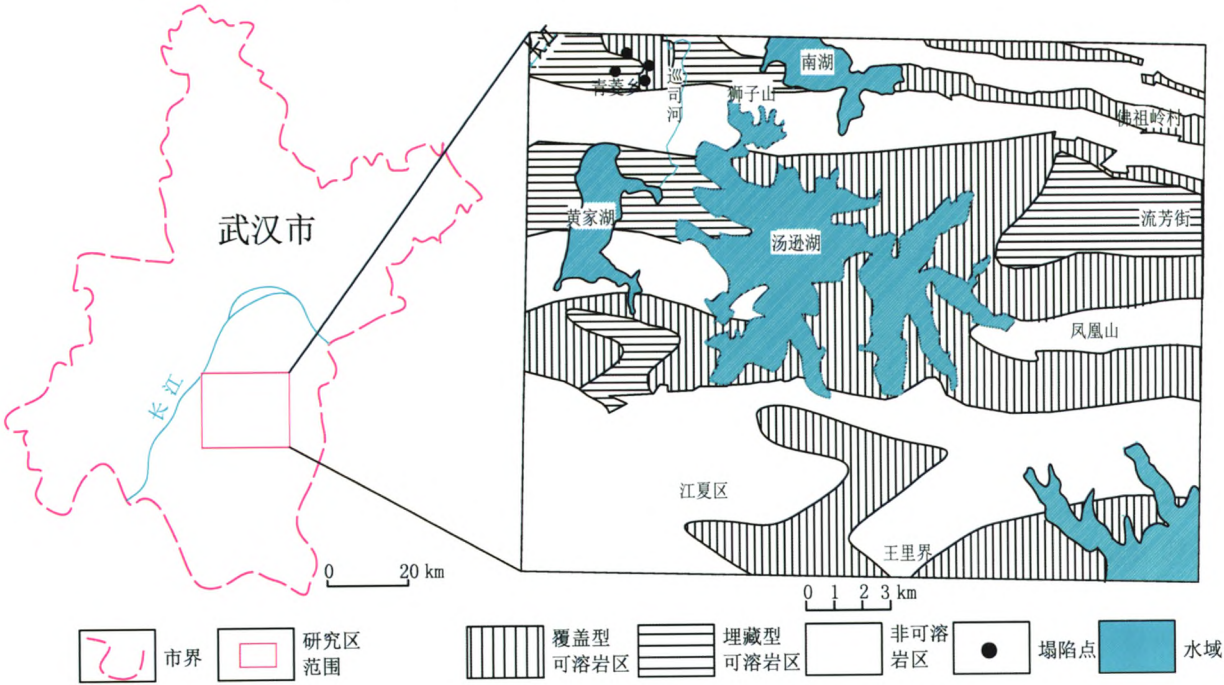


图 1 研究区概况图
Fig. 1 Map showing general situation of the study area

研究区地质灾害以岩溶塌陷为主,先后发生 4 处岩溶塌陷^[9],分布于洪山区白沙洲大道毛坦港小学—南湖变电站一带(研究区西北角)。4 处塌陷均处于人口多、人类活动密集区,人类活动因素对塌陷的影响不容小觑。

2 研究方法

本次研究区岩溶塌陷危险性评价采用基于层次分析的综合评判法,主要步骤包括分析研究区内的地质条件,确定评价因子及其权重,运用单元网格属性计算进行综合评价。

(1)层次分析法的计算步骤^[10]如下:

①建立层次结构模型:将需要判断的问题,分解成不同的影响因素,按照不同属性自上而下地分解成若干层次,同一层的诸因素从属于上一层的因素或对上层因素有影响,同时又支配下一层的因素或受到下层因素的作用。最上层为目标层,最下层通常为指标层,中间可以有一个或几个层次,通常为准则层。

②构造成对比较矩阵:分析系统中各因素间的关系,对同一层次各因素关于上一层次中某一准则的重要性进行两两比较,构造两两比较的判断矩阵。从层次结构模型的第 2 层开始,运用 T. L. Satty 1—9 标度(表 1),两两比较得到判断矩阵(T)。

表 1 层次分析法的判断矩阵标志及其含义

Table 1 Judgment matrix symbol and its implication of analytic hierarchy process

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有同等重要性
3	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素更为重要
9	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要
2,4,6,8	上述两相邻判断之中值,表示重要性判断之间的过渡性
倒数	因素 X_i 与 X_j 比较得到判断 u_{ij} , 则因素 j 与 i 比较的判断 $u_{ji} = 1/u_{ij}$

据此得到判断矩阵(T):

$$T = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1m} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \cdots & u_{mm} \end{bmatrix}$$

③计算权向量并做一致性检验:由于客观事物的复杂及对事物认识的片面性,构造的判断矩阵不一定是一致性矩阵(也不强求是一致性矩阵),但当偏离一致性过大时,会导致一些问题的产生。因此得到 $\lambda_{\max}$ 后,还需进行一致性和随机一致性检验。

一致性指标 $C.I$ 定义为:

$$C.I = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{n - 1}$$

式中: $C.I$ 为一致性指标; $\lambda_{\max}$ 为最大特征根; n 为矩阵阶数。

当 $C.I < 0$ 时,判断矩阵错误,应作调整;当 $C.I = 0$ 时,判断矩阵完全一致;当 $C.I > 0$ 时,值越大,判断矩阵不一致性程度越大。

平均随机一致性指标 $R.I$,是衡量不同阶判断矩阵是否具有满意一致性的,其对于 1~7 阶判断矩阵值如下表 2 所示。

表 2 1~7 阶判断矩阵 $R.I$ 值

Table 2 1-7 order judgment matrix

阶数 (n)	1	2	3	4	5	6	7
$R.I$	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32

当阶数大于 2 时, $C.I$ 与 $R.I$ 之比

$$C.R = C.I / R.I$$

称为随机一致性比率。一般地,只有当 $C.R < 0.10$ 时,判断矩阵具有满意的一致性,才认为评价结果是协调一致的,所获取值才是合理的。此时,求出相应于 $\lambda_{\max}$ 的特征向量,将其归一化即为权数分配。否则,就需要重新做出判断矩阵。

④计算各影响因素的组合权重,得到各方案对于总目标的总排序,即权重分配。

(2)对研究区岩溶塌陷危险性评价之前,首先采用规则单元划分方法,将研究区划分为 1 km×1 km 的等面积网格。对于边缘地带的网格处理:当边缘区域面积大于一半网格面积时,网格算为一个,当边缘区域面积小于一半网格面积时,该处网格不考虑^[11]。

(3)采用加权平均综合指数模型对岩溶塌陷地质灾害危险性进行评价。

加权平均法是将各个单因子先按分级标准判断并将其从高风险到无危险依次评分作为单因子得分值,将单因子得分值代入加权平均公式计算综合指数,确定单元等级。其计算公式如下:

$$PI = \sum_{i=1}^n W_i P_i$$

式中: PI 为加权平均综合指数; W_i 为权值; P_i 为各单因子得分值。

3 研究区岩溶塌陷评价

3.1 建立层次分析结构模型

影响岩溶塌陷的指标因素很多^[1-5,12-13],且各因素之间相互制约和影响,为了避免直接选取各种因素进行评价造成评价重复,产出较大偏差,根据评价指标的选取原则及研究区实际地质情况,从诸多指标中选取少数几个能够真实全面反映岩溶塌陷危险性的评价指标。本次选取了表 3 中 4 个条件 6 个因素作为评价指标,构建了岩溶塌陷危险性评价的层次分析结构模型(图 2)。

表 3 主要影响因素分级表
Table 3 Scale of main influence factors

指标		代号	分级和取值			
准则层	指标层		无危险区	低危险区	中等危险区	高危险区
			0	1	2	3
岩溶条件(B ₁)	岩溶发育程度	C ₁₁		弱	中等	强
覆盖层条件(B ₂)	覆盖层厚度/m	C ₂₁		>30	30~20	<20
	覆盖层结构	C ₂₂		埋藏型	单层黏土	上黏下砂双层
水文地质条件(B ₃)	岩溶水水位波动幅度/m	C ₃₁	<1	1~2	2~3	>3
人为条件(B ₄)	抽水井影响	C ₄₁	无			有
	工程施工强度	C ₄₂		弱	一般	强烈

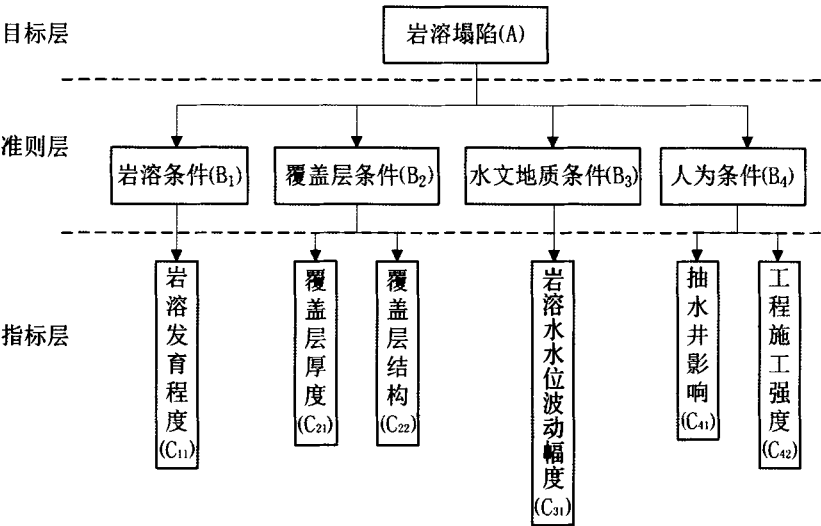


图 2 层次分析法结构图
Fig. 2 Analytic hierarchy process structure

3.2 评价因子权值的确定

根据岩溶塌陷影响因素,分别列出图 2 所示的评价因子层次结构中准则层和指标层的判断矩阵。根据上述方法计算、进行一致性检验,得到各评价指标的计算权重(表 4—表 7)。

表 4 准则层 B 相对于目标层 A 的判断矩阵
Table 4 Judgment matrix of criterion layer B relative to target layer A

评价指标	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
岩溶条件(B ₁)	1	1/5	3	3
覆盖层条件(B ₂)	5	1	5	5
水文地质条件(B ₃)	1/3	1/5	1	1/2
人为条件(B ₄)	1/3	1/5	2	1
C. I = 0.071 6 ; C. R = 0.080 4 < 0.10 满足检验				

表 5 指标层 C_{2j} 相对于准则层 B₂ 的判断矩阵
Table 5 Judgment matrix of indicator layer C_{2j} relative to criterion layer B₂

评价指标	C ₂₁	C ₂₂
覆盖层厚度(C ₂₁)	1	1/2
覆盖层结构(C ₂₂)	2	1

表 6 指标层 C_{4j} 相对于准则层 B₄ 的判断矩阵
Table 6 Judgment matrix of indicator layer C_{4j} relative to criterion layer B₄

评价指标	C ₄₁	C ₄₂
抽水井影响(C ₄₁)	1	1/3
工程施工强度(C ₄₂)	3	1

表 7 指标权重表
Table 7 Index weights

指标	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	C 层总排序 权重
	0.209 3	0.604 3	0.077 2	0.109 2	
C ₁₁	1.00	0	0	0	0.209 3
C ₂₁	0	0.33	0	0	0.201 4
C ₂₂	0	0.67	0	0	0.402 8
C ₃₁	0	0	0.10	0	0.077 2
C ₄₁	0	0	0	0.25	0.027 3
C ₄₂	0	0	0	0.75	0.081 9

3.3 评价结果

对研究区采用规则单元划分方法,划分为 1 km

×1 km 的等面积网格 434 个。针对可溶岩分布区的 183 个单元网格,以选取的 6 个基本危险性因素赋予每个单元网格特性,根据对应的权重,计算各网格岩溶塌陷危险性综合指数,根据加权平均模型危险性等级分级表(表 8),绘制研究区岩溶塌陷危险性等级分区图(图 3),达到可视化的效果。

表 8 加权平均模型危险性等级分级表
Table 8 Hazard grade scale for weighted average model

等级	低危险区	中等危险区	高危险性区
综合指数	<2.2	2.2~2.5	>2.5

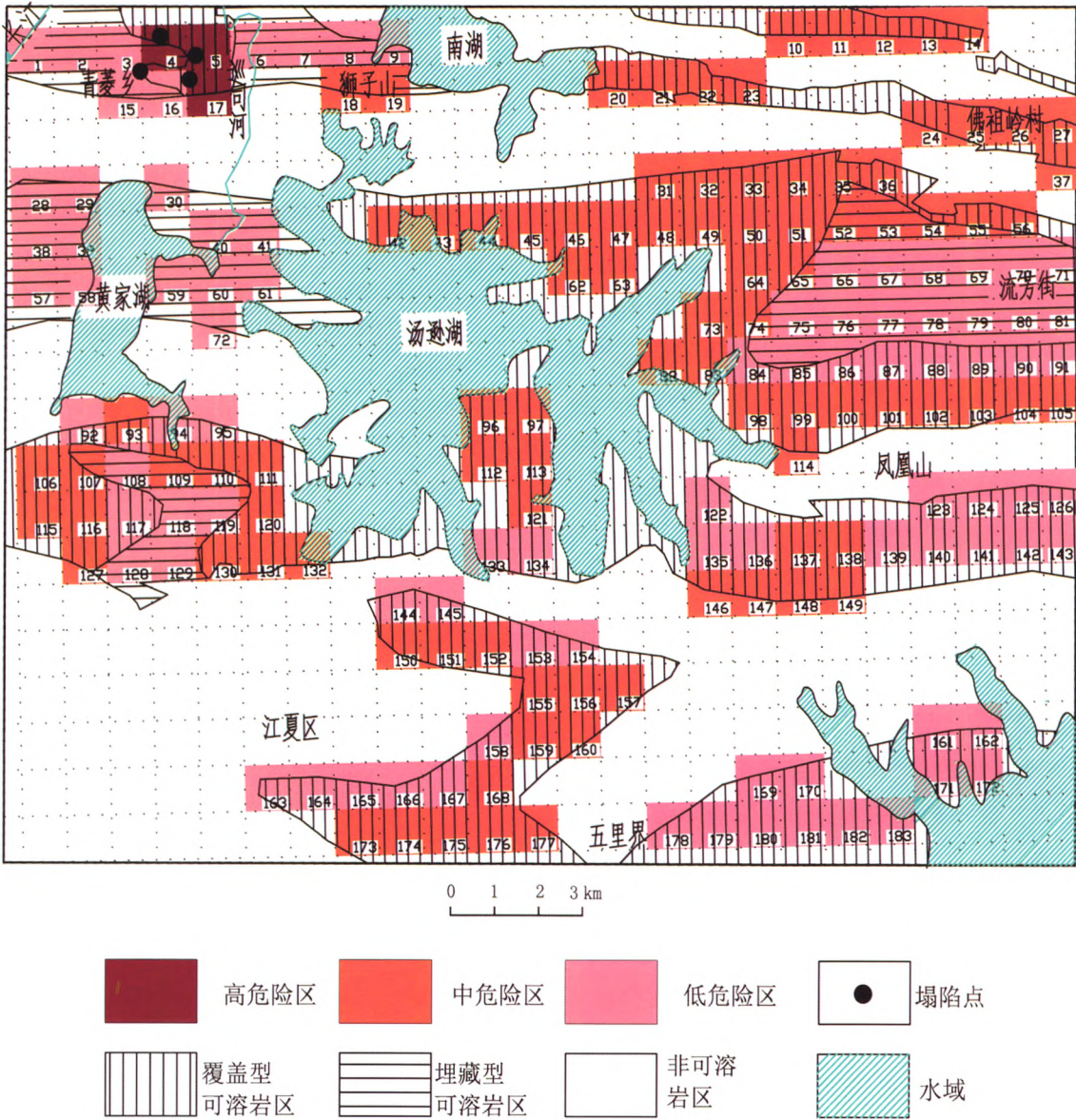


图 3 研究区岩溶塌陷危险性等级分区图

Fig. 3 Karst collapse hazard grade partition map of the study area

研究区可溶岩分布区 183 个岩溶塌陷危险性评价单元等级分区如下:高危险区 3 个,中危险区 92 个,低危险区 88 个。

(1)高危险区主要集中在研究区西北侧青菱乡毛坦港、长征村—光霞村一带,该区位于长江一级阶地,为冲积平原地貌。区内岩溶发育强烈,裂隙溶洞发育。该区为覆盖型岩溶,结构为“上黏下砂”双层结构,而且该区域位于武汉市三环线以内,人类工程活动强度大,在渗漏、震动等作用下很容易诱发塌陷。研究区 4 处岩溶塌陷均分布于该区内。

(2)中危险区主要为湖积平原或垄岗地貌,下伏灰岩岩溶较发育,局部地方发育强烈。该区均为覆盖型岩溶,上覆第四系中更新统黏土,厚 5~25 m。黏土黏聚力较强,一般不会发生塌陷。但由于上覆松散第四系较薄且与下伏碳酸盐岩直接接触,在人类工程活动中的震动、渗漏的作用下也可能引发塌陷。此区内历史上未曾发生过塌陷。

(3)低危险区包括部分覆盖型岩溶区以及所有埋藏型岩溶区。其中覆盖型岩溶区上覆盖单黏土层较厚,埋藏型岩溶区上覆盖层为第四系松散堆积层和白垩—古近系公安寨组红砂岩,一般不会发生岩溶塌陷,但由于该区在局部地段可能存在上覆松散第四系与下伏碳酸盐岩直接接触的天窗,在这些天窗地段不能排除岩溶塌陷发生的可能性。

4 结 语

(1)岩溶塌陷危险性评价是一个复杂的研究课题,建立一个实用的、完善的综合评价指标体系和科学的评价方法对于指导城市建设和安全预测有重要的现实意义。

(2)结合武汉市岩溶塌陷形成机理及影响因素,优选出 6 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,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。

(3)评价将研究区可溶岩地区划分为 3 个等级,近年来 4 处岩溶塌陷均发生在高危险区,评价结果是比较客观合理的,与历史事件相符。

(4)高危险区主要位于研究区的西北部,高危险区与中危险区占岩溶区面积的 50%,占研究区面积的 25%左右。这就要求我们在城市建设过程中要高度重视。

参考文献

[1] 杨全城,姚春梅,邵景力,等.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,2010,26(6):23-26.

[2] 赵德君,彭凤,杨建,等.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,2012,26(增刊):97-99.

[3] 武运泊,王运生,曹文正.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,2015,26(1):43-48.

[4] 钟宇,张明堃,潘玲,等.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),2015,35(1):48-53.

[5] 邓启江,王峥嵘,李星宇,等.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[J].成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(5):504-510.

[6] 崔玉良,王根厚,李志勇.基于改进鱼骨模型的岩溶塌陷区风险评价:以柳州地区为例[J].中国岩溶,2015,34(1):64-71.

[7] 曹小雪.1961—2012 年武汉市气候变化特征分析[D].武汉:华中师范大学,2015:11-17.

[8] 毛以伟.武汉短历时暴雨分析及预报研究[D].兰州:兰州大学,2013:13-19.

[9] 杨涛,涂静,殷美,等.武汉市岩溶塌陷分类及防治对策[J].资源环境与工程,2013,27(5):661-664.

[10] 许树柏.实用决策方法—层次分析法原理[M].天津:天津大学出版社,1988:42-49.

[11] 周森.基于层次分析法与概率计算综合法的广州市白云区岩溶塌陷风险分析[D].广州:华南理工大学,2012:83-95.

[12] 赵博超,朱蓓,王弘元,等.浅谈岩溶塌陷的影响因素与模型研究[J].中国岩溶,2015,34(5):516-521.

[13] 王延岭.山东省泰莱盆地岩溶地面塌陷影响因素分析[J].中国岩溶,2016,35(1):60-66.

Urban karst collapse hazard assessment based on analytic hierarchy process:
An example of southern Wuhan City

WANG Hengheng¹, ZHANG Fawang², GUO Chunqing¹, SU Chuntian²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Under the background of the increasingly tense of current urban construction land, the karst collapse hazard assessment of the study area is of great significance to the prevention and treatment of karst collapse. The study area is located in the south of Wuhan City. The mainly geological hazard of the study area is karst collapse, and there have occurred 4 karst collapses. By tectonism, concealed karst of the study area shows a nearly east-west banded distribution. Karst types are covered type and buried type, coverage type is Quaternary deposits which directly cover carbonate rocks, and the characteristics of the burial type is red sandstones of Cretaceous Paleogene Gonganzhai Group between carbonate rocks and Quaternary loose accumulation. The study area is in the stage of rapid economic development, and human engineering activities are more active. Based on the formation mechanism and influencing factors of karst collapse in Wuhan City, this paper selects 6 evaluation factors, development degree of karst, soil thickness, layer structure, karst water level fluctuation, well impact and construction intensity. And it uses analytic hierarchy process (AHP) to construct the hazard assessment model of karst collapse in the study area, and divides 183 hazard assessment units of karst collapse. For each unit of karst collapse, hazard comprehensive indexes are calculated, and karst collapse hazard zoning, and the karst collapse hazard grade partition are plotted. The results show that there are 3 high hazard units , 92 medium hazard units , and 88 low hazard units.

In this paper, combining the actual situation, using AHP the weight of each factor is determined. Through a number of tests, the judgment matrix is established to prove the consistency. The weights of factors have a higher credibility. And in recent years, 4 karst collapses occurred in high hazard areas, so the result is objective and reasonable, consistent with the historical events. High hazard areas are mainly located in the northwest of the study area. The high hazard area and the medium hazard area accounted for more than half of the total karst area, accounted for about 1/4 of the study area. These issues should receive much attention in the process of urban construction.

Key words karst collapse, analytic hierarchy process, comprehensive index model, hazard assessment

(编辑 黄晨晖)