

湖北武汉岩溶塌陷易发性评价

涂 婧¹, 刘长宪¹, 姜 超¹, 郑晓明¹, 熊志涛¹, 廖明政¹, 李海涛²

(1. 湖北省地质环境总站, 湖北 武汉 430000; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 近年来, 武汉市岩溶塌陷地质灾害时有发生, 给城市建设和人民生命财产造成了一定的损失, 严重制约了武汉市社会经济的发展。为了提出科学合理的岩溶塌陷地质灾害防治措施和保障城市化进程的顺利进行, 开展岩溶塌陷易发性评价是一项十分重要的工作。本文在武汉市岩溶塌陷调查成果的基础上, 采用层次分析法和综合指数法相结合, 对武汉市主要城区的岩溶塌陷易发性进行了评价, 为制定武汉市岩溶塌陷地质灾害防治措施奠定了坚实的基础。

关键词: 岩溶塌陷; 评价指标体系; 层次分析法; 综合指数法

中图分类号: P642. 25

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)04-0094-06

Susceptibility assessment of karst collapse in Wuhan City

TU Jing¹, LIU Changxian¹, JIANG Chao¹, ZHENG Xiaoming¹, XIONG Zhitao¹, LIAO Mingzheng¹, LI Haitao²

(1. Geological Environment Center of Hubei Province, Wuhan, Hubei 430000, China;

2. China Institute for Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: In recent years, karst collapse in Wuhan has occurred frequently, which has caused certain losses to urban construction and people's lives and properties, and seriously restricted the social and economic development of Wuhan. In order to put forward scientific and reasonable measures to prevent and control karst collapse and ensure the smooth progress of urbanization, it is very important to carry out the susceptibility evaluation of karst collapse. Based on the survey results of karst collapse in Wuhan, this paper evaluates the susceptibility of karst collapse in Wuhan by using analytic hierarchy process (AHP) and the comprehensive index methods. And, the susceptibility evaluation results can provide basic materials for Karst collapse prevention in Wuhan City.

Keywords: karst collapse; evaluation index system; analytic hierarchy process; comprehensive index methods

0 引言

武汉市属于长江中游特大城市之一, 位于长江和汉江交汇处, 地处江汉平原东部, 也是我国主要的岩溶地区城市之一。近三十年来, 随着武汉市城市化进程的不断推进, 岩溶塌陷地质灾害时有发生, 给城市建设和人民生命财产造成了一定的损失, 严重制约了武汉市社会经济的发展。为了提出科学合理的岩溶塌陷地

质灾害防治措施和保障城市化进程的顺利进行, 开展岩溶塌陷易发性评价是一项十分重要的工作。

一般来说, 对地质灾害的评估主要包括易发性评价、危险性评价、易损性评价及风险评价等几个过程^[1]。地质灾害易发性评价主要针对地质灾害体自身条件的综合评价, 是地质灾害评价过程中的重要基础^[2-3]。对于岩溶塌陷来说, 岩溶塌陷易发性评价主要是针对岩溶体自身所处的地质环境条件进行综合性

收稿日期: 2019-10-10; 修订日期: 2019-11-25

基金项目: 中国地质调查局矿评项目(1212011220189)

第一作者: 涂 婧(1987-), 女, 湖北黄石人, 硕士, 工程师, 主要从事水工环方面的研究工作。E-mail: 445216579@qq.com

通讯作者: 李海涛(1979-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事水工环方面的研究工作。E-mail: liht@cigem.cn

评价。近年来,有关岩溶塌陷易发性评价的研究成果较多,如王爱云等^[4]提出了一种基于GIS技术和不均匀钻孔数据的岩溶地面塌陷易发性评价的新方法;周国清等^[5]采用模糊层次分析法,建立岩溶塌陷模型,完成了广西来宾市吉利村岩溶塌陷的定量评价。

本文在以往武汉市岩溶地质调查、勘查、监测资料和开展的1:5万岩溶塌陷调查成果资料^[6-9]的基础上,采用层次分析法和综合指数法相结合,评价了武汉市主要城区的岩溶塌陷易发性,可为武汉市城市规划、防灾减灾等工作提供技术支撑。

1 评价区概况

武汉市是我国中部重镇,在我国长江经济带发展战略规划中具有举足轻重的地位。评价范围覆盖武汉市主要7个中心城区(武昌区、洪山区、青山区、汉阳区、硚口区、江汉区、江岸区),4个远城区(蔡甸区、汉南区、江夏区、东西湖区)以及2个国家级开发区(武汉东湖新技术开发区、武汉经济技术开发区)(图1,红框内为评价区)。

评价区地貌可划分为湖冲积平原、剥蚀堆积垄岗和构造剥蚀丘陵。湖冲积平原主要分布在长江、汉江沿岸及各湖泊周围,为河流湖泊漫滩和一级阶地;剥蚀堆积垄岗地貌单元分布范围最广,地形呈波状起伏,为长江三级阶地台面;构造剥蚀丘陵主要呈近东西向念

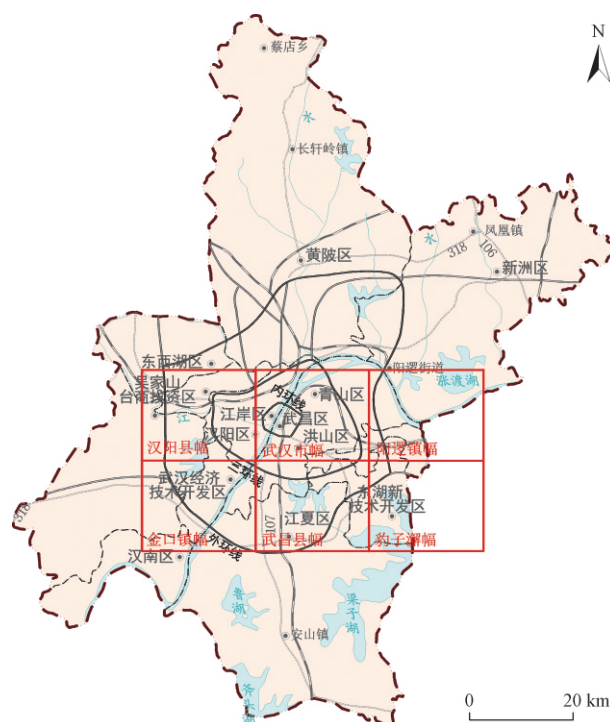


图1 武汉市交通位置图(图中红框为1:5万调查范围)

Fig.1 Location map of the Wuhan City

珠状有序产出、带状或零星残丘状分布,分布面积较小(图2)。

评价区详细的可溶岩分布及埋藏特征、岩溶层组类型、岩溶水发育特征、岩溶发育特征等可参考李慧娟

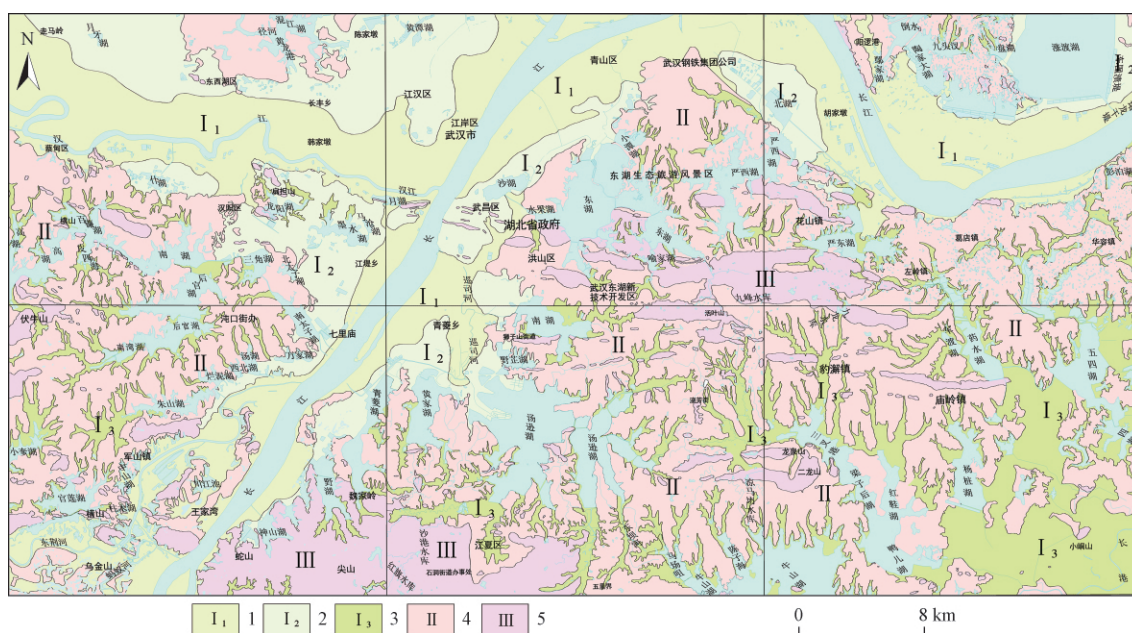


图2 评价区地形地貌图

Fig.2 Topographic and geomorphological map of the study area

1—冲积平原;2—湖冲积平原;3—湖积平原;4—剥蚀堆积垄岗地貌;5—构造剥蚀丘陵地貌

等^[1]文献,岩溶地质条件、第四系土层特征、水文地质条件可参考涂婧等^[2]文献。

2 岩溶塌陷易发性评价方法

由于影响岩溶塌陷的基本因素错综复杂且没有界限值,具有一定的不确定性、模糊性,难以用准确的数学描述方法去阐述岩溶塌陷的过程,但各影响因素之间又具有明显的空间相关性^[3],难以采用定量的方法对岩溶塌陷易发性进行评估,层次分析法是一种较为合理的定性定量相结合的系统分析方法^[4]。

易发性评价的基本流程如图3所示,主要包括评价指标体系的建立、评价指标权重的确定、评价模型的建立等主要环节。

3 武汉市岩溶塌陷易发性评价

3.1 评价指标体系

3.1.1 评价指标体系选择原则

评价指标体系的选择原则主要包括:

- (1) 选择指标要对岩溶塌陷有明显影响,且在评价区内有明显差异,且能出现临界值;
- (2) 尽量选择基础资料较完整,可进行计量或估量的指标,便于定量分析;
- (3) 尽量选择相对独立的指标。

3.1.2 评价指标体系选择

武汉市岩溶塌陷的孕育、发展和形成受到多种因素的影响。归纳起来,主要有3个影响因素:下伏基岩岩溶发育程度、上覆土层特征和地下水动力条件。岩溶发育程度是岩溶塌陷形成、发展最基础的控制性因素;覆盖土层是塌陷产生的物质来源,不同厚度、不同性质土层对塌陷形成具有不同的影响;地下水活动条件是岩溶发育、塌陷形成的最重要的动力因素。

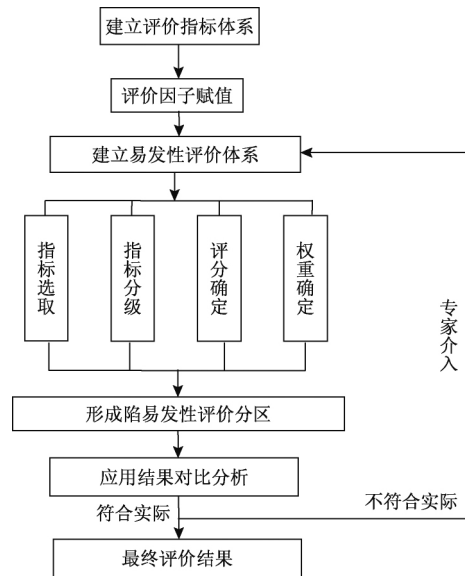


图3 易发性评价流程图

Fig.3 Flow chart of susceptibility assessment

根据武汉市岩溶塌陷调查成果资料及岩溶塌陷影响因素分析^[5],选择了4个条件、共8个指标因子,作为武汉市岩溶塌陷易发性评价指标,形成评价指标体系(表1)。

3.2 权重确定

权重确定是针对各评价因子之间的重要程度,构建一个能够反应评价因子两两之间关系的判断矩阵,再通过层次分析,计算出各评价因子的权重,并进行一致性检验以保证其客观性^[6]。根据层次分析法,计算、调整、确定指标权重(表2)。

3.3 评价模型

采用加权平均综合指数模型,进行岩溶塌陷易发性评价。加权平均法是将各个因子先按分级标准判断为四级,并将其从高易发到不易发依次评分为3、2、1、

表1 武汉市岩溶塌陷易发性评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of karst collapse susceptibility in Wuhan

评估指标				分级和取值		
条件层	代号	因子层	代号	高易发	中等易发	低易发
				3	2	1
岩溶	B ₁	岩溶发育程度	C ₁	强	中等	弱
		土层厚度/m	C ₂	≤15	15~30	>30
覆盖层	B ₂	土层结构	C ₃	多层结构	双层结构	单层结构
		底部土层岩性	C ₄	砂土、淤泥	粉土	碎石土、粉质黏土、黏土
		非可溶岩地层厚度/m	C ₅	≤10	10~30	>30
水文地质	B ₃	第四系孔隙水富水性	C ₆	丰富	中等	贫乏
		岩溶水承压性	C ₇	在基岩面上下反复波动	在基岩面以下波动	在基岩面以上波动
已有塌陷(土洞)	B ₄	塌陷坑(土洞)密度/(个·10 km ⁻²)	C ₈	≥10	2~10	<2

表 2 组合权重表

Table 2 Table of combination weights

指标	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	C 层总排序 权重 W
	0.24	0.45	0.08	0.23	
C ₁	1.00				0.24
C ₂		0.27			0.12
C ₃		0.16			0.07
C ₄		0.09			0.04
C ₅		0.48			0.22
C ₆			0.25		0.02
C ₇			0.75		0.06
C ₈				1.00	0.23

0 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。权值的引入反映出不同要素对岩溶塌陷的不同影响程度。其计算公式如下:

$$PI = \sum_{i=1}^n W_i \times C_i \quad (1)$$

式中: PI ——加权平均综合指数;

W_i ——权值。

根据表 1 和表 2,易发性评价模型为:

$$PI = 0.24 \times C_1 + 0.12 \times C_2 + 0.07 \times C_3 + 0.04 \times C_4 + 0.22 \times C_5 + 0.02 \times C_6 + 0.06 \times C_7 + 0.23 \times C_8。$$

将单因子得分值代入加权平均公式计算综合指数,最后确定易发性评价等级,由高到低依次为高易发区、中易发区、低易发区、不易发区等(表 3)。

3.4 易发性评价结果

在确定评价指标体系、指标权重值、评价模型等

后,根据调查成果资料,编制评价指标单要素图,利用评价模型,评价武汉市岩溶塌陷易发性,评价结果如图 4 所示。

表 3 岩溶塌陷易发性等级分级表

Table 3 Classification of susceptibility for karst collapse

等级	高易发区	中易发区	低易发区	不易发区
综合指数	$PI \geq 1.8$	$1.8 > PI \geq 1.5$	$1.5 > PI \geq 0.1$	$0.1 < PI$

根据评价结果(图 4、表 4),高易发区(含四个亚区)面积 149.62 km²,占评价区总面积的 5.61%,主要分布于长江一级阶地或单层黏土层较薄的覆盖型岩溶区,岩溶发育程度强-中等,岩溶地质条件脆弱,所有塌陷分布于高易发区;中易发区(含五个亚区)面积约 231.02 km²,占评价区总面积的 8.67%,主要分布于上覆较厚的单层黏土、岩溶强-中等发育的覆盖型岩溶区;低易发区(含五个亚区)面积约 384.35 km²,占调查区总面积的 14.42%,主要为岩溶弱发育或埋藏型岩溶区;其余为不易发区。

4 结论及建议

4.1 结论

本文结合武汉市岩溶地质条件,采用层次分析法和综合指数法相结合,对评价区岩溶塌陷易发性进行了评价。评价结果显示,岩溶塌陷易发程度在空间分布上具有明显的地带差异性:岩溶塌陷高易发区面积

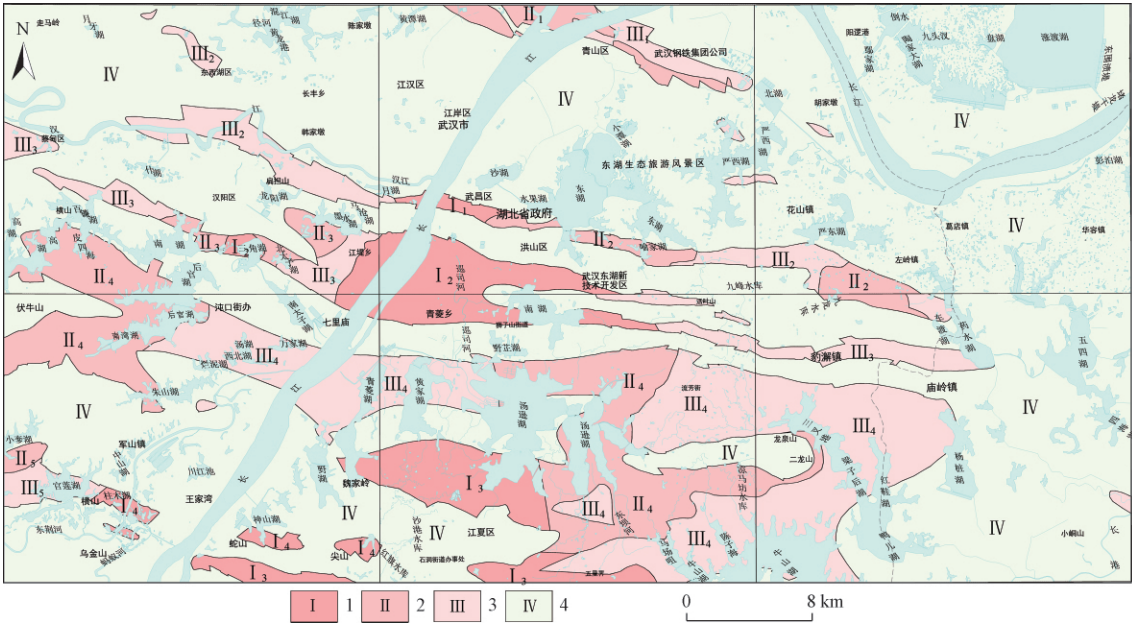


图 4 岩溶塌陷易发性评价分区图

Fig. 4 Zoning map of susceptibility assessment for karst collapse

1—高易发区;2—中等易发区;3—低易发区;4—不易发区

表 4 岩溶塌陷易发性评价分区结果统计表
Table 4 Statistic of susceptibility assessment results for karst collapse

易发性分区			分布范围	面积/ km ²	占调查总面积比例/%	发生 塌陷 次数
分 区	大区 代号	亚区 代号	位置			
高	I	I ₁	长江沿岸汉阳区莲花湖-武昌区小东门-洪山广场一带	5.42	0.20	1
		I ₂	三角湖、长江沿岸江堤乡-白沙洲-烽火村-巡司河-湖北省农科院-杨柳咀-小何村一带	68.19	2.56	34
		I ₃	长江东侧何家湖村-邢远村-红旗村-向阳村、曾家塆-肖榨坊村、陈家湾-八斗丘一带	64.56	2.42	3
		I ₄	东段柱木湖、小谢家-万李家、王家塆-肖家湾	11.45	0.43	0
			小计	149.62	5.61	38
中	II	II ₁	西段十大家村-冯家墩-天兴洲	18.28	0.69	0
		II ₂	东湖南侧-喻家湖-晏家村、潜力村-谢庄-新湾等地	22.90	0.86	0
		II ₃	长江西侧夏家嘴-打鼓渡、郭家湾、余家湾等地	13.73	0.52	0
		II ₄	西段高湖-大集街道-后官湖-南湾村-红焰村	172.53	6.47	0
		II ₅	月老棚-姜湾	3.58	0.13	0
			小计	231.02	8.67	0
低	III	III ₁	东段营盘山-武钢炼铁厂-红胜村等地	16.50	0.62	0
		III ₂	慈惠街道-市财政学校-琴断口、大熊村-方家村-许店村等地	47.86	1.80	0
		III ₃	蔡甸区齐联村-毛家咀-易家岭村、流芳咀、乔家山-活叶山、佛祖岭村-关山熊-豹澥镇-药水湖一带	52.00	1.95	0
		III ₄	长江沿岸汤湖-万家湖-青菱湖-黄家湖、条带西端流芳街-梁子湖-牛山湖一带	256.73	9.63	0
		III ₅	西侧官莲湖一带	11.26	0.42	0
			小计	384.35	14.42	0
无	IV		非岩溶区	1 900.87	71.30	0
合计				2 665.86	100	38

149.62 km²,主要分布于长江一级阶地或单层黏土层较薄的覆盖型岩溶区,岩溶地质条件脆弱;中易发区面积约 231.02 km²,主要分布于上覆较厚的单层黏土、岩溶强-中等发育的覆盖型岩溶区;低易发区面积约 384.35 km²,主要为岩溶弱发育或埋藏型岩溶区。

根据评价结果,武汉市主要城区的大部分区域为岩溶塌陷不易发区、低易发区或中易发区。高易发区虽然面积占比小,但目前的岩溶塌陷事件基本都发生

在高易发区,需要引起重视^[13]。

4.2 建议

(1) 岩溶塌陷易发性评价主要针对岩溶塌陷地质灾害体自身条件进行综合评价,还没有考虑外界因素或经济社会因素的影响,如大气降雨、地下水开采、人类工程活动、人口密度分布等,制定详细的岩溶塌陷防治措施,还需要进行危险性评价和风险性评价等研究工作。

(2) 根据岩溶塌陷易发性评价结果,在岩溶塌陷高易发区,原则上应该避免进行大规模的工程建设,如地下工程、超高建构筑物等;在中易发区,在进行大规模建设之前,应该对场地岩溶地质条件进行更为详细的勘查,并制定相应岩溶塌陷防治措施和预案;在低易发区或不易区,一般不会产生岩溶塌陷,适宜大多数工程建设,地下工程、建构筑物、道路交通等应优先选择

在这些区域。但武汉市岩溶地质条件是错综复杂的,仍需高度关注工程施工对地质环境造成的变化和影响,避免出现伤亡事故等。

参考文献:

[1] 倪师军,魏伦武,张成江,等. 城市地质环境风险性分区评价体系 [J]. 地质通报,2006, 25(11): 1279 – 1286. [NI S J, WEI L W, ZHANG C J, et al. Risk evaluation system for urban geoenvironment [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(11): 1279 – 1286. (in Chinese)]

[2] 霍斐斐. 陕西省永寿县地质灾害发育特征及易发性评价研究 [D]. 西安: 西北大学, 2012: 46 – 66. [HUO F F. The development characteristics and assessment on the susceptibility of geological hazards in Yongshou Country [D]. Xi ’ an: Northwest University, 2012: 46 – 66. (in Chinese)]

[3] 魏海霞. 滇西红层区地质灾害易发性评价研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007. [WEI H X. Study on the evaluation of geological disaster susceptibility in The red bed region in western Yunnan—a case study of Yongping Yunnan [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)]

[4] 王爱云,郑先昌. 基于 GIS 与稀疏钻孔数据的岩溶

- 塌陷易发性评价方法研究 [J]. 长春工程学院学报 (自然科学版), 2010, 11(1): 82–84. [WANG A Y, ZHENG X C. An research on evaluation method of liability to karst collapse based on GIS and sparse hole-drilling data [J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2010, 11(1): 82–84. (in Chinese)]
- [5] 周国清, 何素楠, 陈昆华, 等. 模糊层次分析法对岩溶塌陷易发程度的评估——以广西来宾市吉利村为例 [J]. 城市勘测, 2013(5): 155–159. [ZHOU G Q, HE S N, CHEN K H, et al. FAHP to evaluate prone degree of karst collapse—a case study of Laibin, Jili in Guangxi [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2013(5): 155–159. (in Chinese)]
- [6] 中国地质环境监测院, 湖北省地质环境总站. 武汉市岩溶塌陷调查子项目成果报告 [R]. 2016. [China Geological Environmental Monitoring Institute, Hubei Geological Survey. Report on theresults of the karst collapse investigation in Wuhan [R]. 2016. (in Chinese)]
- [7] 李慧娟, 金小刚, 涂婧, 等. 湖北武汉典型地区岩溶发育特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 40–47. [LI H J, JIN X G, TU J, et al. Analysis on characteristics of karst development in Wuhan of Hubei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4): 40–47. (in Chinese)]
- [8] 郑晓明, 金小刚, 陈标典, 等. 湖北武汉岩溶塌陷成因机理与致塌模式 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 75–82. [ZHENG X M, JIN X G, CHEN B D, et al. Mechanism and modes of karst collapse in Wuhan City, Hubei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 75–82. (in Chinese)]
- [9] 涂婧, 魏瑞均, 杨戈欣. 武汉市岩溶塌陷时空分布规律及其影响因素分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 68–73. [TU J, WEI R J, YANG G X. Analysis on spatial and temporal distribution characteristics of karst collapse and its influence factors in Wuhan City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 68–73. (in Chinese)]
- [10] 宾红卫. 层次因子综合预测法在岩溶地面塌陷地质灾害预测分析评估中的应用 [J]. 西部探矿工程, 2010, 22(4): 111–114. [BIN H W. Application of AHP in prediction and analysis of karst collapse geological disasters [J]. West-China Exploration Engineering, 2010, 22(4): 111–114. (in Chinese)]
- [11] 任凯珍, 冒建, 陈国济. 关于地质灾害孕灾因子权重确定的探讨 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 80–86. [REN K Z, MAO J, CHEN G H. A discussion on the weights of the influence factors of geological hazards [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(1): 80–86. (in Chinese)]
- [12] 金艳珠, 谈树成, 虎雄岗, 等. 基于层次分析法与GIS相结合的岩溶塌陷地质灾害易发性分区评估——以云南省师宗县为例 [J]. 热带地理, 2012, 32(2): 173–178. [JIN Y Z, TAN S C, HU X G, et al. Geo-hazard susceptibility zoning evaluation of karst collapse based on the combination of AHP and GIS: a case study of Shizong, Yunnan [J]. Tropical Geography, 2012, 32(2): 173–178. (in Chinese)]
- [13] 罗小杰. 武汉地区浅层岩溶发育特征与岩溶塌陷灾害防治 [J]. 中国岩溶, 2013, 32(4): 419–432. [LUO X J. Features of the shallow karst development and control of karst collapse in Wuhan [J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(4): 419–432. (in Chinese)]