

广州北部丘陵区岩溶塌陷形成条件与易发性评价

王忠忠, 庄卓涵, 胡飞跃, 黄文龙

Formation conditions and susceptibility assessment of karst collapses in the northern hilly area of Guangzhou City

WANG Zhongzhong, ZHUANG Zhuohan, HU Feiyue, and HUANG Wenlong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202311008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广州夏茅村岩溶地面塌陷成因机理与塌陷过程分析

Analysis on formation mechanism and process of karst collapse in Xiamao Village, Guangzhou City of Guangdong Province

郭宇, 周心经, 郑小战, 李晶晶 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 54-59

广州市白云区夏茅村岩溶地面塌陷特征及致灾因素和风险分析

Karst collapse characteristics, disaster factors and risk analysis in Xiamao Village, Baiyun District, Guangzhou City

周心经, 郭宇, 郑小战, 李晶晶, 张俊岭, 朱照宇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 63-71

广州市花都区花山镇、花东镇岩溶发育规律初探

Karst development law of Huashan Town and Huadong Town in Huadu District of Guangzhou City

丁琛 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 122-129

广东佛山市高明区李家村岩溶塌陷群成因机理分析

Analysis on the formation mechanism and development process of karst collapses in Lijia Village, Gaoming District of Foshan City

韩庆定, 罗锡宜 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 56-64

地质灾害易发性评价因子分级的AIFFC算法优化

Classification optimization of geological hazard susceptibility evaluation factors based on AIFFC algorithm

陈宾, 李颖懿, 张联志, 屈添强, 魏娜, 刘宁, 黄春林 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 72-81

独库高速公路克扎依—巩乃斯段雪崩易发性评价

Avalanche susceptibility evaluation of the Kezhayi to Gongnaisi section of the Duku expressway

程秋连, 刘杰, 杨治伟, 张天意, 王斌 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 60-71



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202311008

王忠忠, 庄卓涵, 胡飞跃, 等. 广州北部丘陵区岩溶塌陷形成条件与易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 163-172.
WANG Zhongzhong, ZHUANG Zhuohan, HU Feiyue, et al. Formation conditions and susceptibility assessment of karst collapses in the northern hilly area of Guangzhou City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 163-172.

广州北部丘陵区岩溶塌陷形成条件与易发性评价

王忠忠, 庄卓涵, 胡飞跃, 黄文龙
(广东省地质调查院, 广东广州 510080)

摘要: 岩溶塌陷是广州北部丘陵区主要地质灾害之一, 对人民群众安全生产、和谐生活造成实际威胁, 制约了当地乡村振兴发展。文章在分析广州北部丘陵区岩溶发育程度、覆盖层土体条件、地下水动力条件等岩溶塌陷形成条件的基础上, 选择岩溶发育程度、土层厚度、土层结构、地下水水位年变幅、断裂影响范围、塌陷点密度等 6 个评价指标, 利用层次分析法确定各指标权重, 运用综合指数法建立岩溶塌陷易发性评价模型, 进行广州北部丘陵区岩溶塌陷易发性评价。结果表明: 广州北部丘陵区岩溶塌陷高、中等和低易发区面积分别为 4.77, 14.24, 21.71 km², 已发生的岩溶塌陷均分布在高易发区 (94.29%) 和中等易发区 (5.71%), 易发性分区评价合理。研究成果可为当地岩溶塌陷地质灾害预警和防治区划提供依据。

关键词: 广州北部丘陵区; 岩溶塌陷; 形成条件; 层次分析法; 易发性评价

中图分类号: P642.25

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)04-0163-10

Formation conditions and susceptibility assessment of karst collapses in the northern hilly area of Guangzhou City

WANG Zhongzhong, ZHUANG Zhuohan, HU Feiyue, HUANG Wenlong
(Guangdong Geologic Survey Institute, Guangzhou, Guangdong 510080, China)

Abstract: Karst collapse is one of the main geological disasters in the northern hilly area of Guangzhou City, posing practical threats to public safety and affecting harmonious living conditions, thereby constraining local rural revitalization and development. This study analyzes the formation conditions of karst collapses in the northern hilly area of Guangzhou, including karst development degree, conditions of overlying soil layers, and hydrodynamic conditions of groundwater. Based on this analysis, six evaluation factors—karst development degree, soil layer thickness, soil layer structure, annual variation range of groundwater level, extent of fracture influence, and density of collapse points—are selected. The weight of each factor is determined by analytic hierarchy process (AHP), and a comprehensive index method is employed to establish the susceptibility assessment model for karst collapses in the northern hilly area of Guangzhou City. The results show that the areas of high, moderate, and low susceptibility to karst collapses in this region are 4.77, 14.24, 21.71 km², respectively. Karst subsidence occurrences are predominantly distributed in high vulnerability areas (94.29%) and moderate vulnerability areas (5.71%), validating the rationality of vulnerability zoning assessment. The research findings provide a basis for geological disaster early warning and prevention zoning for local karst collapse, and also provide geological support for promoting rural revitalization

收稿日期: 2023-11-12; 修订日期: 2024-01-23

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (12120114022301; DD20160252-06; DD20160257-04); 广东省地质勘查与城市地质专项 (2019-2; 2020-11)

第一作者: 王忠忠 (1982—), 男, 江苏南通人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查评价研究。E-mail: ntwz928@163.com

and development.

Keywords: northern hilly area of Guangzhou City; karst collapse; formation condition; analytic hierarchy process; susceptibility assessment

0 引言

广州北部丘陵区是广州重要的山地生态片区和主要的生态公园地区(《广州市国土空间总体规划(2018—2035 年)》草案),是城乡融合示范区、特色生态农业产业和乡村旅游功能区(《广州市从化区国土空间总体规划(2021—2035 年)》草案),也是推进乡村振兴发展和建设美丽宜居岭南乡村的重要地区。近几十年来,随着人类工程活动加剧和极端气候频发的影响,从化区鳌头镇、良口镇和吕田镇等广州北部丘陵区累计发生 35 处岩溶塌陷地质灾害,造成了数十间房屋损毁和农田破坏、田间作物受损。岩溶塌陷地质灾害严重影响了当地经济社会发展,持续威胁着当地人民群众安居生活。

前人对广州市岩溶塌陷方面的研究成果丰硕,但主要关注地区为广花盆地^[1-5]和金沙洲^[6-7]—大坦沙^[8]等地,而广州北部丘陵地区研究程度相对较低,仅在部分塌陷区开展应急物探调查^[9]和地质灾害调查^[10],圈定出土洞、岩溶发育地段,分析其诱发因素并提出防治措施,对岩溶塌陷形成条件分析和易发性评价工作相对缺乏。本文以从化区鳌头镇、良口镇和吕田镇等广州北

部丘陵区为研究范围,分析岩溶塌陷形成条件,在此基础上建立岩溶塌陷易发性评价模型并进行易发性评价,为广州北部丘陵区岩溶塌陷地质灾害预警和防治区划提供依据。

1 地质环境概况

研究区地形上总体呈北高南低,以丘陵地貌为主(图 1a);年均降雨量达 1 800 ~ 2 178 mm,雨量丰沛且集中在 4—9 月。区内三叠系、侏罗系、白垩系侵入岩发育,分布广泛;泥盆系、石炭系、三叠系、白垩系及第四系地层分布相对较少(图 1b)。其中,可溶岩地层发育于下石炭统石磴子组(C_1s)、上泥盆统—下石炭统长埗组(D_3-C_1cl)和上泥盆统天子岭组(D_3l),面积 40.72 km²,主要呈条带状隐伏分布于山间沟谷,偶有出露,岩性以灰岩、白云质灰岩和泥质灰岩为主。研究区在区域上属罗霄—云开弧盆系三级构造单元,先后经历海西—印支运动、燕山运动及喜马拉雅运动等多期次构造运动,断裂发育,主要发育北东向广从断裂带和东西向佛冈—丰良断裂带^[11]。

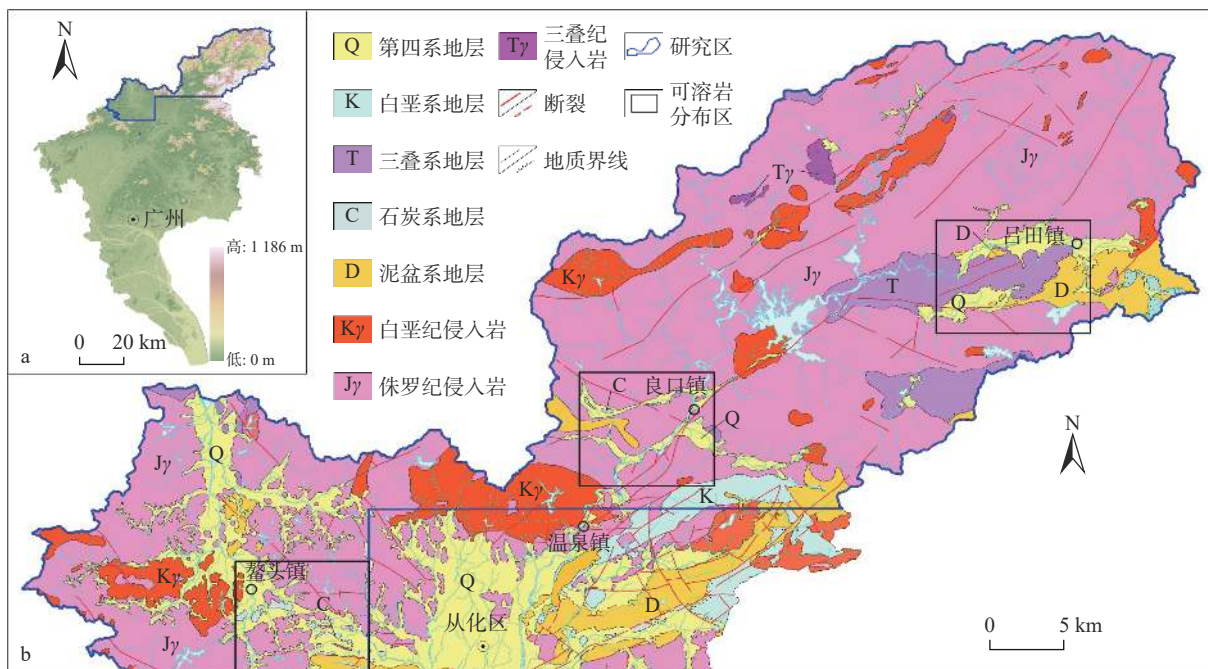


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Sketch geological map of the study area

2 岩溶塌陷形成条件

已有的岩溶塌陷研究一般认为其基本形成条件有岩溶发育程度、覆盖层土体条件、地下水动力条件^[12-15]。

2.1 岩溶发育程度

受岩性、地质构造、地下水活动、可溶岩与非可溶岩接触情况等条件影响,研究区浅层岩溶普遍发育。从钻探揭露情况来看,在鳌头镇、良口镇、吕田镇可溶岩

区岩溶形态以溶洞、溶蚀裂隙、溶孔为主,土洞次之;平均线岩溶率分别为 9.00%、33.50% 和 45.42%,钻孔见洞率分别达到 46.67%、57.89%、57.14%。岩溶发育深度普遍较浅,一般 7.10~57.05 m,80.18% 的溶洞发育深度为 10~40 m。溶洞在纵向上通常呈串珠状发育,一般 2~5 个(图 2),最多达 18 个,洞高 0.05~17.80 m,84.82% 的溶洞洞高小于 3 m,以小型规模溶洞为主。

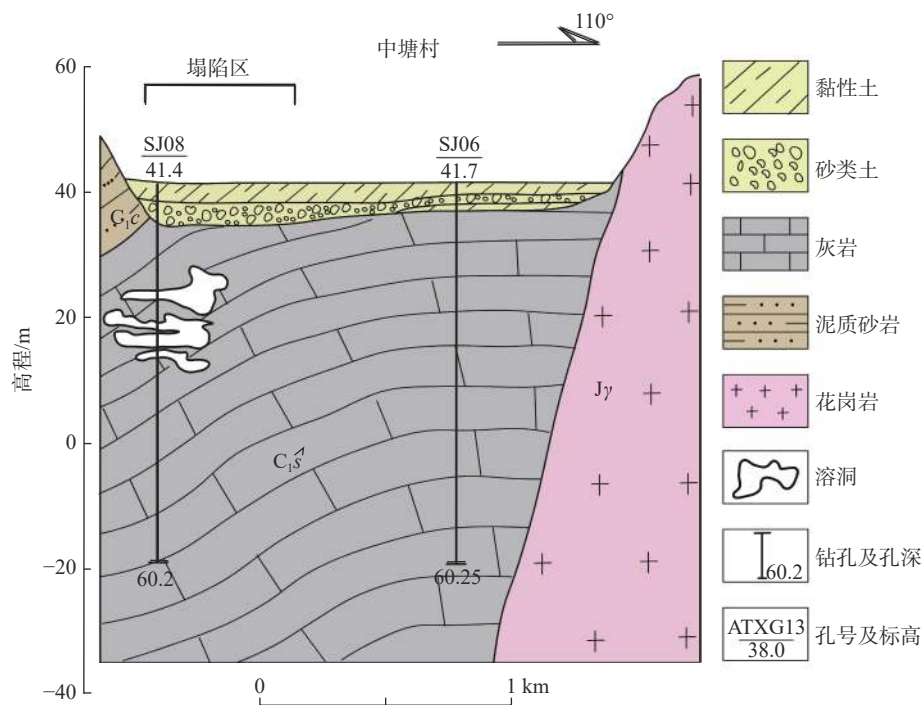


图 2 鳌头镇中塘塌陷区地质剖面图
Fig. 2 Geological profile of collapse area in Aotou Town

在综合考虑岩溶发育有利因素的基础上,根据钻孔线岩溶率和见洞率划分岩溶发育程度分区。结果表明:岩溶强发育区面积 22.30 km²,主要分布在鳌头镇中塘

村和大氹村以东地区(图 3a)、良口镇少沙—石岭地区和流溪河沿岸(图 3b)、吕田镇狮象村—联丰村、安山村—草铺村一带(图 3c),97.14% 的岩溶塌陷(34 处)发

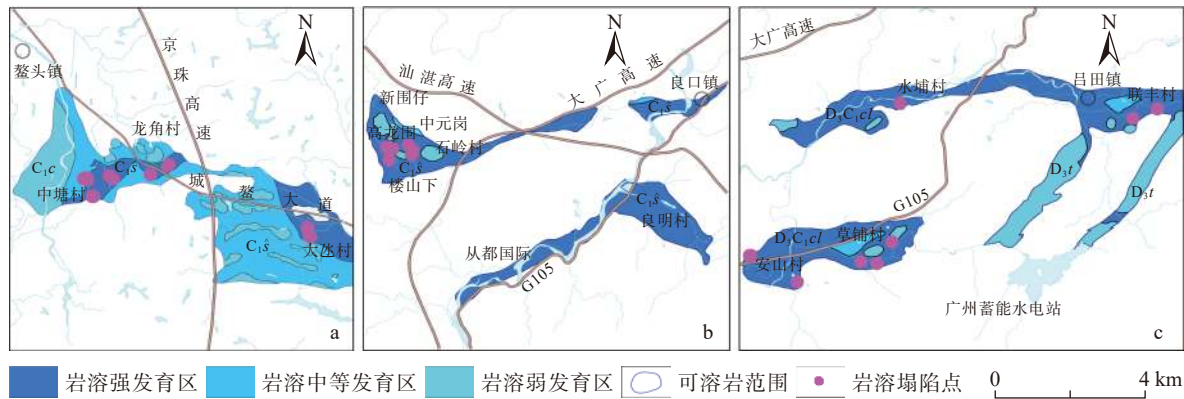


图 3 岩溶发育程度分区图
Fig. 3 Zone map of karst development degree

生在该区域;岩溶塌陷中等发育区面积 9.88 km², 主要分布在鳌头镇中心村、人和、铺锦村一带(图 3a), 仅有 1 处岩溶塌陷发生在该区域。岩溶弱发育区内暂时未有岩溶塌陷发生。

2.2 覆盖层土体条件

研究区第四纪松散堆积物为冲洪积相和河流相沉积, 厚度总体上比较薄, 平均厚 18.40 m, 局部达到 37.60 m,

在山前地区一般小于 10 m, 开阔地带或河流周边地区 12.20 ~ 25.00 m。土层结构主要为单层结构, 分布在低山丘陵山前, 岩性为黏性土或砂砾石土; 其次是双层结构和多层结构土层, 分别分布于山间洼地较开阔平缓地带和河流沿岸(图 4), 岩性主要为黏性土(局部为淤泥质土)和砂土、卵砾类土组合。

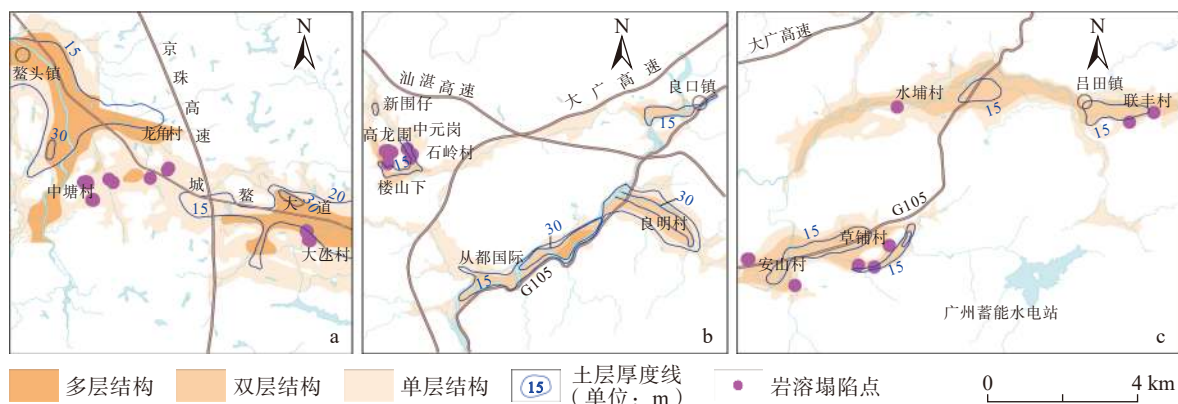


图 4 覆盖层土体厚度与结构分区图

Fig. 4 Zone map of soil thickness and structure of overburden

从覆盖层土体条件和岩溶塌陷发生数量的统计关系上看(图 5), 91.43% 的岩溶塌陷(32 处)发生在土层厚度小于 15 m 的地区, 另外 3 处发生在土层厚度 15 ~ 30 m 的地区, 土层厚度大于 30 m 地区未有塌陷发生; 单层结构的岩溶塌陷中有 91.30%(21 处)、双层结构中有 87.50%(7 处)以及多层结构全部(4 处)发生在土层

厚度小于 15 m 的地区; 表明土层厚度对岩溶塌陷的影响大于土层结构, 土层为多层结构或双层结构且厚度小于 15 m 的地区更易有利于岩溶塌陷的形成, 如发生 11 处岩溶塌陷的鳌头镇中塘塌陷区, 土层厚度非常薄, 仅 7.70 ~ 18.20 m, 土层结构以双层结构为主, 其次为多层和单层结构(图 5)。

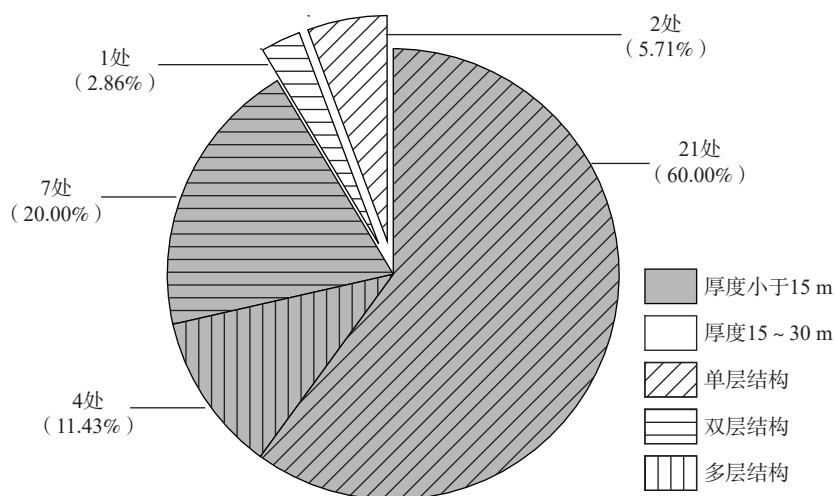


图 5 覆盖层土体条件与岩溶塌陷发生数量关系图

Fig. 5 Relationship between overburden soil conditions and the occurrence of karst collapses

2.3 地下水动力条件

鳌头镇、良口镇、吕田镇可溶岩区地下水类型为富

水性贫乏的松散岩类孔隙水和贫乏—中等的碳酸盐岩裂隙溶洞水, 补给来源以大气降水为主。地下水水位

年变幅 0.07 ~ 2.28 m(图 6), 山前地区受火成岩裂隙水侧向补给, 地下水水位年变幅小于 0.5 m, 山间沟谷地带为地下水径流—排泄区, 地下水水位年变幅一般大于 1.0 m。

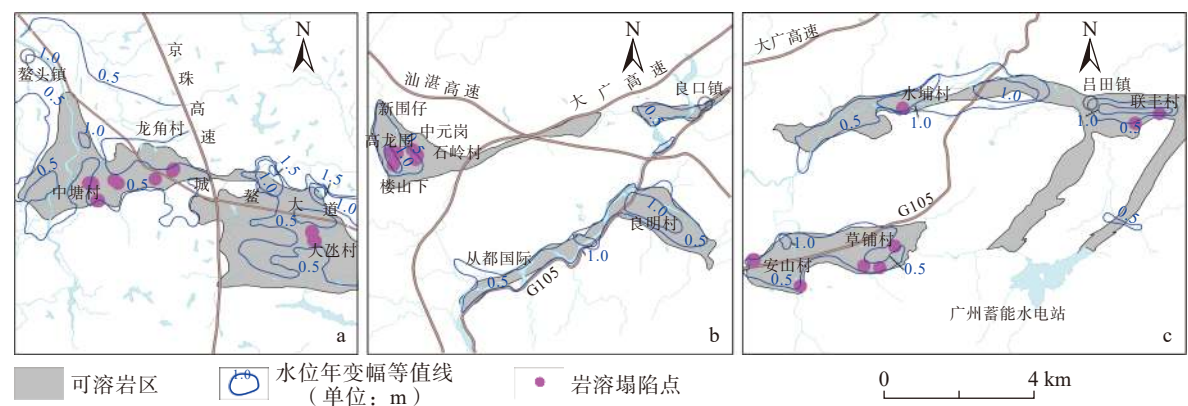


图 6 地下水水位年变幅分区图
Fig. 6 Zone map of annual variation of groundwater level

强烈活动的地下水是岩溶塌陷的主要“驱动力”, 岩溶塌陷一般发生在地表水—孔隙水—裂隙溶洞水联系密切、地下水水位起伏变化大的地区^[16-17]。2009 年以前, 由于大理石矿山疏干排水, 地下水水位变幅可达 3 m 以上, 期间区内矿山周围发生 17 处岩溶塌陷, 在矿山全部闭坑停采后地下水水位恢复正常, 岩溶塌陷发生数量锐减。

目前影响研究区地下水动力条件的因素主要为大气降水, 其地下水水位波动与大气降水的丰枯水期降水量基本吻合, 具有明显的季节性, 每年 6—9 月为高水位

期, 出现高峰 1 ~ 2 次, 10 月前后水位缓慢下降, 12 月到来年 1 月水位最低。以良口镇石岭塌陷区(9 处岩溶塌陷)和吕田镇水埔塌陷区(1 处岩溶塌陷)为例, 大气降水补给下的塌陷区裂隙溶洞水响应迅速, 见图 7(a)、图 7(b), 降水量峰值多数有裂隙溶洞水水位峰值正向反馈。这主要由于研究区内的岩溶塌陷地区在接受大气降水为主的人渗补给后, 上覆土层相对较薄导致地下水下渗途径短, 孔隙水与裂隙溶洞水通过基岩面溶蚀裂隙、溶洞、溶孔等连通(图 2), 因而大气降水—孔隙水—裂隙溶洞水水力联系密切。

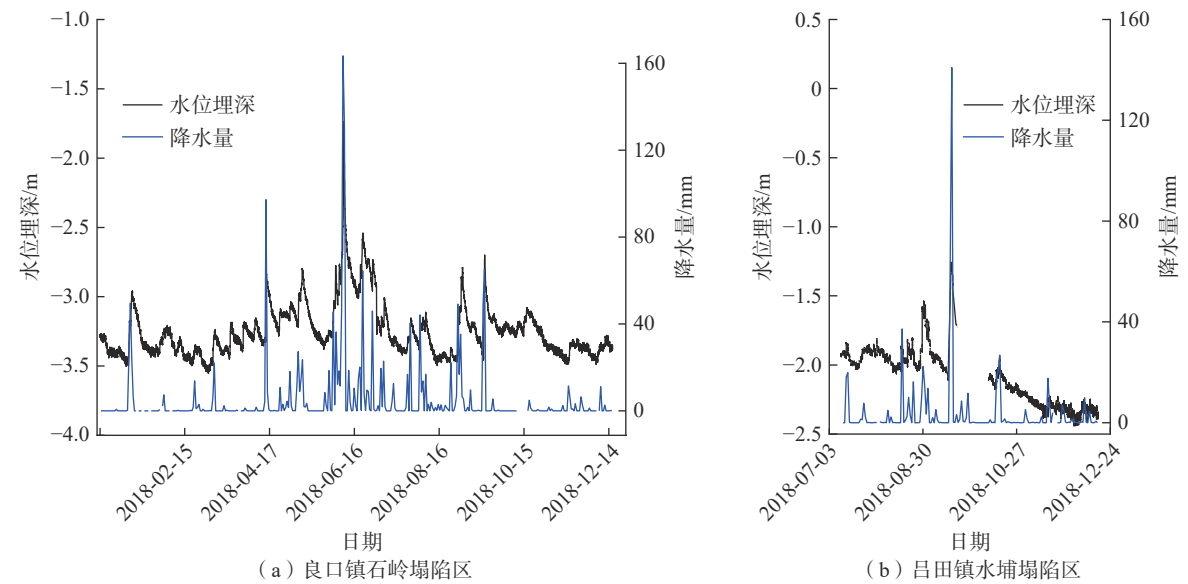


图 7 岩溶塌陷地区碳酸盐岩裂隙溶洞水水位埋深—降雨量历时曲线图
Fig. 7 Duration curve diagram of fissure-cavern water depth-rainfall in karst collapse area

3 岩溶塌陷易发性评价

岩溶塌陷易发性评价是对岩溶塌陷自身形成条件的综合评价^[18],评价步骤包括评价方法选择、评价指标确定、指标权重确定和易发性评价。

3.1 评价方法选择

岩溶塌陷易发性评价的方法研究成果颇丰,主要有神经网络学习法^[19-20]、层次分析法^[21-22]、模糊综合法^[23-24]、综合指数法^[18,25]、证据权法^[26-27]、信息量法与层次分析法综合^[28-29]、地理探测器和随机森林法^[30]等。考虑到岩溶塌陷发育地质环境条件的复杂性等,本次评价采用具有综合性好、客观性强和灵敏度高等特点的综合指数法进行评价,该方法的数学评价模型公式为(1)。

$$P_i = \sum_{j=1}^m a_j w_j \quad (i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: P_i ——第*i*单元的易发性指数;
 a_j ——第*j*个评价指标在第*i*评价单元的赋值;
 w_j ——第*j*个评价指标的权重;
 i ——评价单元;
 j ——评价指标;
 m ——评价指标数;
 n ——评价单元数。

3.2 评价指标确定

岩溶塌陷易发性评价指标选取是以充分分析岩溶塌陷形成条件为基础,以指标便于量化分析和完整获取,同时各指标与岩溶塌陷关联性好且尽量相互独立为原则下确定。本次研究选取岩溶发育程度、覆盖层土层厚度和土层结构、地下水活动情况(地下水水位变幅)等岩溶塌陷形成条件作为基本评价指标,另外选取断裂影响范围和塌陷点密度作为潜在发生塌陷指标,共同构成岩溶塌陷易发性评价指标(表 1)。

表 1 岩溶塌陷易发性评价指标分类
Table 1 Classification of karst collapse susceptibility evaluation indexes

一级评价指标	二级评价指标	对岩溶塌陷的影响			权重
		强	中	弱	
基岩	岩溶发育程度	强发育	中等	弱发育	0.271 7
覆盖层土体	土层厚度/m	<15	15 ~ 30	>30	0.196 0
	土层结构	多层结构	双层结构	单层结构	0.100 8
地下水	地下水变化幅度/(m·a ⁻¹)	>1.0	1.0 ~ 0.5	<0.5	0.215 7
地质构造	断裂影响范围/m	<100	100 ~ 300	>300	0.080 0
已发岩溶塌陷	塌陷点密度(个/10 km ²)	>10	2 ~ 10	<2	0.135 9

3.3 指标权重确定

评价指标的权值直接关系到评价工作的科学性和准确性。层次分析法(AHP)是一种层次权重决策分析方法,该方法简便有效,能够将决策者的经验决断等非定量事件或因素作定量分析,许多需要确定权重的地质环境评价问题利用层次分析法获得了合理的结果^[31-32]。该方法基本程序是^[33-34]:建立模型的目标层(*A*)—指标层(*B*)结构;建立评价指标两两之间关系的判断矩阵式(2),矩阵元素 b_{ij} 是根据九标度方法按照重要程度赋分确定;计算评价指标的有序权向量,建立特征要素指数划分表和归一化处理;按照式(3)和(4)对判断矩阵一致性检验。

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

式中: B_{ij} ——判断矩阵;
 n ——指标数量;
 CI ——一致性指标;
 $\lambda_{\max}$ ——判断矩阵最大特征根;
 CR ——一致性比率;
 RI ——随机一致性指标,可查表^[33]。

在建立岩溶塌陷易发性层次模型的基础上,根据专家经验调整九级标度法判断矩阵(表 2),最终形成判别因子指标权重结果(表 1)。判断矩阵一致性比率(CR): 0.052 6<0.1,满足一致性检验。

3.4 岩溶塌陷易发性评价

根据研究区面积及控制精度,并保证评价单元内有关岩溶塌陷易发性的地质信息完整,选择单元面积为

表 2 岩溶塌陷易发性评价指标判断矩阵表

Table 2 Judgment matrix of karst collapse susceptibility evaluation index

评价指标	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
岩溶发育程度(B_1)	1	2	2	2	2	2
土层厚度(B_2)	1/2	1	3	1/2	3	2
土层结构(B_3)	1/2	1/3	1	1/2	2	1/2
地下水变化幅度(B_4)	1/2	2	2	1	2	2
断层影响范围(B_5)	1/2	1/3	1/2	1/2	1	1/2
塌陷点密度(B_6)	1/2	1/2	2	1/2	2	1

2.5×10^{-3} km²(50 m×50 m)正方网格进行评价单元划分。将各评价指标矢量图按表 1 中对岩溶塌陷影响的强、中、弱三级分别量化赋值为 3、2、1, 基于 MapGIS 软件平台将参与评价的岩溶发育程度、土层厚度、土层结构、地下水水位年变幅、断裂影响范围、岩溶塌陷点密度(图 8)等各指标(图层)量化数值分配到各个评价单元上。

利用综合指数法计算出各单元地质灾害易发程度指数(P), 将易发程度指数数据进行三角格网剖分, 按照

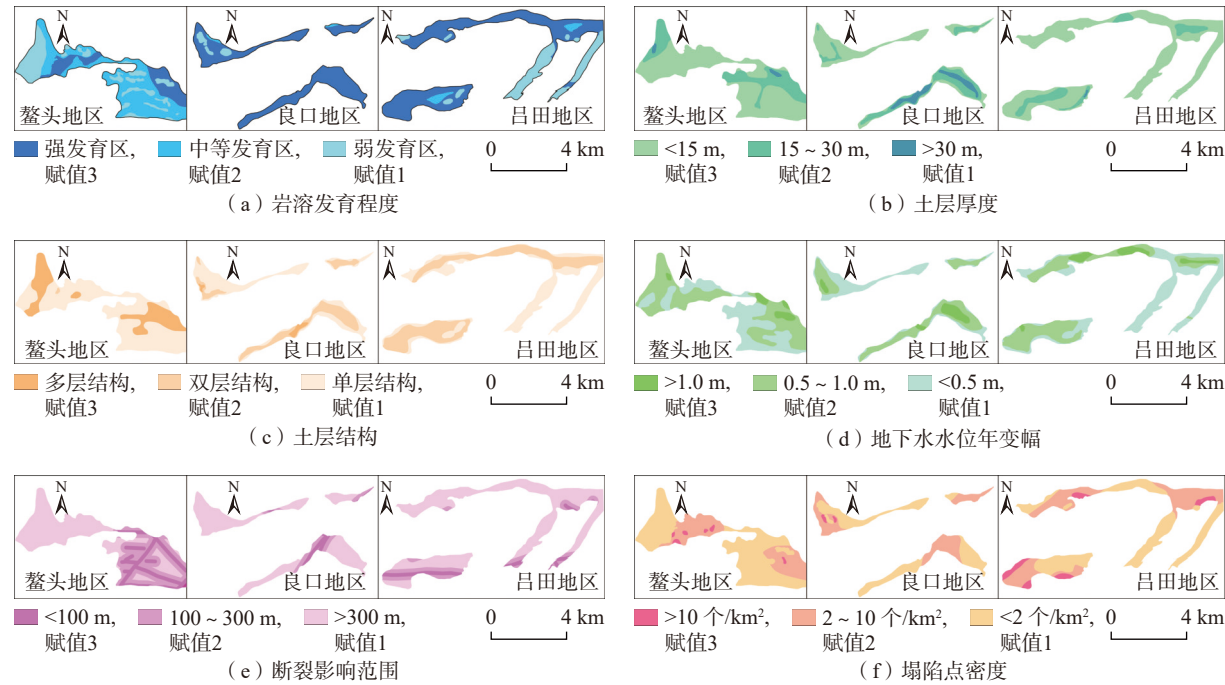


图 8 易发性评价因子量化赋值图

Fig. 8 Quantitative assignment diagram of susceptibility evaluation factors

岩溶塌陷易发性等级(表 3)分成高易发性、中等易发性、低易发性三级, 并对应划分出岩溶塌陷高易发区、中等易发区、低易发区, 最终获得广州北部丘陵区岩溶塌陷易发性评价结果。

表 3 岩溶塌陷易发性分级表

Table 3 Susceptibility classification table of karst collapse

等级	高易发性	中等易发性	低易发性
易发性指数	>2.26	1.88 ~ 2.26	<1.88

研究区岩溶塌陷高易发区面积 4.77 km², 占可溶岩区 11.71%, 主要分布于鳌头镇中塘村、白水塘北、大石古北西侧和大沘村荣桂庄, 良口镇石岭村南部及东部, 吕田镇狮象村周边、联丰村石脚下一耕村、安山村塘田和东门、草铺村龙屋—孙屋等地(图 9), 区内岩溶发育

程度强, 土层厚度小于 15 m, 土层结构以多层—双层结构为主, 地下水水位年变幅大于 1.0 m, 累计已发生 33 处岩溶塌陷; 中等易发区面积 14.24 km², 占可溶岩区 34.97%, 主要分布于鳌头镇中心村、中塘村—龙角村、旗杆地区的虎塘岭东和大沘村—高禾村北侧, 良口镇石岭村北部和少沙村南部、塘料—良明村的流溪河沿岸, 吕田镇狮象村—水埔村—吕新村—联丰村以及安山村的中部地区, 区内岩溶发育程度强—中等, 土层厚度 15 ~ 30 m, 土层结构以单层—双层结构为主, 地下水水位年变幅小于 1.0 m, 发生 2 处岩溶塌陷; 低易发区面积 21.71 km², 占可溶岩区 53.32%, 分布于高、中等易发区以外的可溶岩区, 区内岩溶发育程度弱—中等, 土层厚度大于 15 m, 土层结构以单层结构为主, 地下水水位年变幅小于 0.5 m, 暂时未有岩溶塌陷发生。

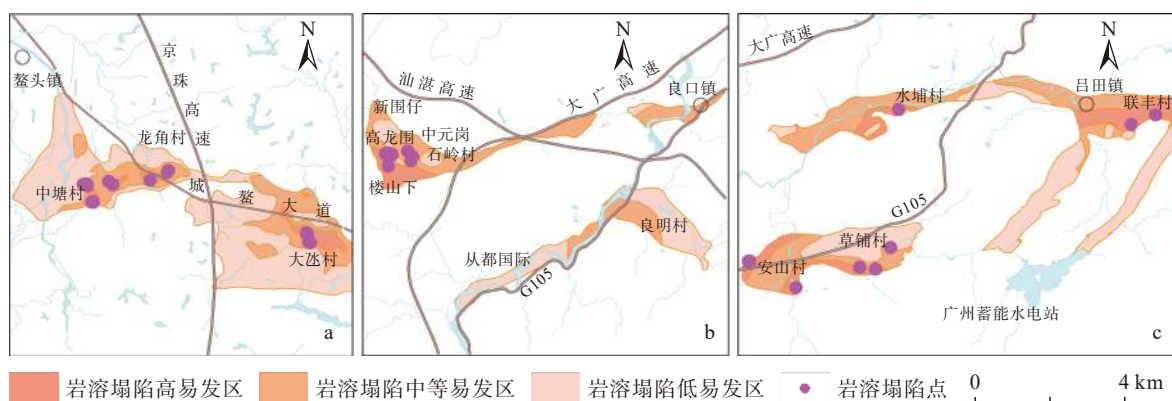


图 9 岩溶塌陷易发性分区图

Fig. 9 Zoning map of karst collapse susceptibility

4 结论与建议

(1)研究区岩溶塌陷形成条件主要特征为:浅层岩溶普遍发育,97.14%的岩溶塌陷发生在岩溶强发育区;覆盖层土体厚度比较薄,土层结构主要为单层结构,土层条件为多层结构或双层结构且厚度小于15 m的地区更有利于岩溶塌陷的形成;岩溶塌陷区地下水水力交替活动较强,大气降水是区内目前地下水水位波动的主要因素。

(2)选择岩溶发育程度、土层厚度、土层结构、地下水水位年变幅、断裂影响范围、塌陷点密度等6个评价指标,运用层次分析法确定各指标权重,利用综合指数法建立岩溶塌陷易发性评价模型,对广州北部丘陵区进行岩溶塌陷易发性评价;划分出岩溶塌陷高易发区、中等易发区、低易发区,面积分别为4.77 km²、14.24 km²和21.71 km²,94.29%的岩溶塌陷分布在高易发区,5.71%的岩溶塌陷分布在中等易发区,易发性评价分区合理。

(3)岩溶塌陷高易发区和中等易发区内村落聚集,分布有特色生态农业区和乡村旅游区,岩溶塌陷危害性较大。建议在岩溶塌陷中等以上易发区应加强监测预警工作,做到群测群防和专业监测相结合;工程建设时充分开展前期地质勘查工作,禁止或限制大量抽排地下水,做好排水管道防渗防漏,并提前做好应急处置预案;大力科普岩溶塌陷防治知识,提高当地群众的认识,全面提升防灾减灾能力。

参考文献(References):

- [1] 柳柳,王俊.广花盆地东北部岩溶地质特征及对城际铁路隧道影响分析[J].铁道勘察,2022,48(4):72-78. [LIU Liu, WANG Jun. Characteristics of karst in the northeast Guanghua basin and analysis of its influence on intercity railway tunnels[J]. Railway Investigation and Surveying, 2022,

48(4): 72-78. (in Chinese with English abstract)]

- [2] 蒙彦.广花盆地岩溶塌陷多参数监测预警与风险防控[D].武汉:中国地质大学,2020. [MENG Yan. Multi-parameter monitoring, early warning and risk prevention of karst collapse in Guanghua Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 蒙彦,郑小战,祁士华,等.岩溶塌陷易发区地下水安全开采控制——以珠三角广花盆地城市应急水源地为例[J].中国岩溶,2019,38(6):924-929. [MENG Yan, ZHENG Xiaozhan, QI Shihua, et al. Safe pumping in areas prone to karst collapses: A case study of the urban emergency water source of the Guanghua Basin in the Pearl River Delta [J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(6): 924-929. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 周心经,郭宇,郑小战,等.广州市白云区夏茅村岩溶地面塌陷特征及致灾因素和风险分析[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(6):63-71. [ZHOU Xinjing, GUO Yu, ZHENG Xiaozhan, et al. Karst collapse characteristics, disaster factors and risk analysis in Xiamao Village, Baiyun District, Guangzhou City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 63-71. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 易顺民,卢薇,周心经.广州夏茅村岩溶塌陷灾害特征及防治对策[J].热带地理,2021,41(4):801-811. [YI Shunmin, LU Wei, ZHOU Xinjing. The formation investigation and remediation of sinkhole in the Xiamao Village, Guangzhou [J]. Tropical Geography, 2021, 41(4): 801-811. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 贾龙.城市岩溶地面塌陷隐患识别与评价研究——以金沙洲为例[D].武汉:中国地质大学,2021. [JIA Long. Early warning and assessment of cover-collapse sinkhole induced by urban construction in karst area [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李卓骏,蒙彦,董志明,等.土洞型岩溶塌陷发育过程气

- 体示踪试验研究——以广州金沙洲为例 [J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 238 - 245. [LI Zhuojun, MENG Yan, DONG Zhiming, et al. Experimental study of gas tracer simulation of karst collapse development process: An example of Jinshazhou, Guangzhou [J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 238 - 245. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 卢薇, 易顺民. 广州市大坦沙岛岩溶塌陷成因分析及防治对策 [J]. 安全与环境工程, 2021, 28(4): 121 - 130. [LU Wei, YI Shunmin. Formation analysis and prevention and remediation measures of karst collapse in datansha island, Guangzhou [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(4): 121 - 130. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 广州市地质调查院. 广州从化市鳌头镇大沘村岩溶地面塌陷隐患区应急调查物探报告 [R]. 2014. [Guangzhou Geological Survey Institute. Geophysical report on emergency investigation of karst ground collapse hidden danger area in Dadang Village, Aotou Town, Conghua City, Guangzhou [R]. 2014. (in Chinese)]
- [10] 广州市综合勘探大队. 广东省从化市良口镇石岭大理石矿突水诱发地面变形地质灾害调查报告 [R]. 2004. [Guangzhou Comprehensive Exploration Brigade. Investigation report on ground deformation geological disaster induced by water inrush in Shiling marble mine, Liangkou Town, Conghua City, Guangdong Province [R]. 2004. (in Chinese)]
- [11] 王忠忠, 黄文龙, 庄卓涵, 等. 珠三角丘陵区岩溶塌陷发育特征及地质模式——以广州北部为例 [J]. 地质与勘探, 2023, 59(6): 1304 - 1314. [WANG Zhongzhong, HUANG Wenlong, ZHUANG Zhuohan, et al. Development features and geological models of karst collapse in hilly areas of the Pearl River Delta: A case study of northern Guangzhou [J]. Geology and Exploration, 2023, 59(6): 1304 - 1314. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 颜李冰清. 桂林市岩溶塌陷发育特征及发展趋势分析 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2022. [YAN Libingqing. Analysis on development characteristics and development trend of karst collapse in Guilin City [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 康晓波, 王宇, 张华, 等. 云南高原岩溶塌陷发育特征及成因机制 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 50 - 58. [KANG Xiaobo, WANG Yu, ZHANG Hua, et al. Characteristics and formation mechanism of karst collapse in Yunnan Plateau [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 50 - 58. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 姜巽, 曹聪, 刘智, 等. 歌乐山地区隧道工程诱发的岩溶塌陷发育规律与形成条件 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 181 - 191. [JIANG Xun, CAO Cong, LIU Zhi, et al. Development and formation conditions of karst collapse induced by tunnel engineering in the Gele Mountain Area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 181 - 191. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 孙伟. 广东省英德市城南社区岩溶塌陷发育特征及成因分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(5): 74 - 80. [SUN Wei. Development characteristics and causal analysis of karst collapses in Chengnan community, Yingde City, Guangdong Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(5): 74 - 80. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张少波, 简文彬, 洪儒宝, 等. 水位波动条件下覆盖型岩溶塌陷试验研究 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 659 - 667. [ZHANG Shaobo, JIAN Wenbin, HONG Rubao, et al. Experimental study on collapse of covered Karst under water-level fluctuation [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(3): 659 - 667. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 贾龙, 蒙彦, 雷明堂, 等. 粤港澳大湾区岩溶水源地塌陷监测预警与安全开采 [J/OL]. 中国地质. (2024-05-16) [2024-05-26]. [JIA Long, MENG Yan, LEI Mingtang et al. Development characteristics and hazard assessment of the Pangcun landslide, Xizang [J/OL]. Geology in China. (2024-05-16) [2024-05-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20240515.1825.004.html>. (in English with Chinese abstract)]
- [18] 涂婧, 刘长宪, 姜超, 等. 湖北武汉岩溶塌陷易发性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 94 - 99. [TU Jing, LIU Changxian, JIANG Chao, et al. Susceptibility assessment of karst collapse in Wuhan City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 94 - 99. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 毛世榕, 管振德, 阎春恒. 基于小波包分形和神经网络的地震与岩溶塌陷识别 [J]. 地震学报, 2018, 40(2): 195 - 204. [MAO Shirong, GUAN Zhende, YAN Chunheng. A technique for earthquake and Karst collapse recognition based on wavelet packet fractal and neural network [J]. Acta Seismologica Sinica, 2018, 40(2): 195 - 204. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 贺占勇. 基于神经网络评价模型的地质灾害信息系统设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014. [HE Zhanyong. Design and realization of the geological disaster information system based on neural network evaluation model [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 吴远斌, 刘之葵, 殷仁朝, 等. 基于 AHP 和 GIS 技术的湖南怀化地区岩溶塌陷易发性评价 [J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 21 - 33. [WU Yuanbin, LIU Zhikui, YIN Renchao, et al. Evaluation of karst collapse susceptibility in Huaihua Area, Hunan Province based on AHP and GIS [J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(1): 21 - 33. (in Chinese with English abstract)]

- abstract)]
- [22] 曾斌, 杨木易, 邵长杰, 等. 基于层次分析法的杭长高速岩溶塌陷易发性评价 [J]. 安全与环境工程, 2018, 25(1): 29 – 38. [ZENG Bin, YANG Mui, SHAO Changjie, et al. Susceptibility assessment of karst collapse of Hangchang expressway projects based on analytic hierarchy process [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(1): 29 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 管斌. 基于 GIS 技术和模糊综合评判法的铜陵市地质灾害易发性评价研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021. [GUAN Bin. Study on geological hazard susceptibility evaluation base on GIS and fuzzy comprehensive evaluation In Tongling City [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 张杰, 毕攀, 魏爱华, 等. 基于模糊综合法的烟台市栖霞中桥岩溶塌陷易发性评价 [J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 215 – 220. [ZHANG Jie, BI Pan, WEI Aihua, et al. Assessment of susceptibility to Karst collapse in the Qixia Zhongqiao district of Yantai based on fuzzy comprehensive method [J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 215 – 220. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 吴亚楠, 王延岭, 周绍智, 等. 基于综合指数法的泰莱盆地岩溶塌陷风险性评价 [J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 391 – 399. [WU Yanan, WANG Yanling, ZHOU Shaozhi, et al. Risk assessment of karst collapse in the Tailai Basin based on the synthetic index method [J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(3): 391 – 399. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 肖金水. 证据权法在岩溶塌陷风险分析中的应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013. [XIAO Jinshui. A research in the application of the weights of evidence method in the risk analysis of karst collapse [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 孙琳, 任娜娜, 李云安, 等. 基于证据权法的公路路基岩溶塌陷危险性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(3): 94 – 100. [SUN Lin, REN Nana, LI Yun'an, et al. Risk assessment on Karst collapse of the highway subgrade based on weights of evidence method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 94 – 100. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 吴丽清, 廖婧, 王威, 等. 基于 AHP-信息量法的武汉地区岩溶地面塌陷危险性评价 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(4): 43 – 47. [WU Liqing, LIAO Jing, WANG Wei, et al. Risk assessment of karst surface collapse in Wuhan Region based on AHP-information method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(4): 43 – 47. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 代领. 基于 GIS 的信息量法在宁远县地质灾害易发性评价中的应用 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016. [DAI Ling. Application of GIS-based information acquisition method on assessment of geohazard susceptibility in Ningyuan County [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 任涛, 田国亮, 宁志杰, 等. 基于地理探测器和随机森林的岩溶塌陷易发性评价 [J]. 灾害学, 2023, 38(3): 227 – 234. [REN Tao, TIAN Guoliang, NING Zhijie, et al. Evaluation of karst collapse susceptibility based on geodetector and random forests [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 227 – 234. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 孙剑锋, 马超, 胡金树, 等. 基于灰色关联度与层次分析法耦合的地质灾害易发性评价——以浙江省云和县崇头镇为例 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(2): 538 – 551. [SUN Jianfeng, MA Chao, HU Jinshu, et al. Susceptibility evaluation of geological hazard by coupling grey relational degree and analytic hierarchy process: A case of Chongtou town, Yunhe County, Zhejiang Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(2): 538 – 551. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 曾伟, 谢韶宜, 王观石, 等. 基于 AHP 层次分析法的离子型稀土矿原地浸出边坡稳定评价研究 [J]. 中国矿业, 2023, 32(4): 72 – 80. [ZENG Wei, XIE Shaoyi, WANG Guanshi, et al. Study on slope stability evaluation system for ionic rare earth ore *in situ* leaching process based on AHP [J]. China Mining Magazine, 2023, 32(4): 72 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 郑小战. 广花盆地岩溶地面塌陷灾害形成机理及风险评估研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010. [ZHENG Xiaozhan. Research on genetic mechanism and risk evaluation of the karst collapse in Guanghua Basin [D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 陈菊艳, 朱斌, 彭三曦, 等. 基于 AHP 和 GIS 的矿区岩溶塌陷易发性评估——以贵州林歹岩溶矿区为例 [J]. 自然灾害学报, 2021, 30(5): 226 – 236. [CHEN Juyan, ZHU Bin, PENG Sanxi, et al. Assessment of susceptibility to karst collapse in mining area based on AHP and GIS: A case study in Lindai karst mining area in Guizhou [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(5): 226 – 236. (in Chinese with English abstract)]