

广东英德沙口镇岩溶地面塌陷发育特征及形成机理分析

赵建军

Analysis on development characteristics and formation mechanism of karst collapse in Shakou Town, Yingde City of Guangdong Province

ZHAO Jianjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202109018>

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

湖北武汉白沙洲隐伏岩溶区地质结构与岩溶塌陷分类

Types of geological structures and mechanism of karst collapses in Baishazhou, Wuhan City of Hubei Province

陈标典, 李喜, 李祖春, 姜超, 贾毅, 李慧娟, 刘鹏瑞 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 43-52

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

广东佛山市高明区三洲盆地岩溶塌陷发育特征与时空分布规律

Characteristics and spatial-temporal distribution law of karst collapse in Sanzhou basin in Gaoming District of Foshan City, Guangdong Province

韩庆定, 罗锡宜, 易守勇, 邹杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 131-139

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

湖北武汉市三环区岩溶地面塌陷发育规律及危险性评价

廖康, 吴益平, 郭进雪, 张龙飞 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(2): 78-85



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202109018

赵建军. 广东英德沙口镇岩溶地面塌陷发育特征及形成机理分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 59-65.

ZHAO Jianjun. Analysis on development characteristics and formation mechanism of karst collapse in Shakou Town, Yingde City of Guangdong Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 59-65.

广东英德沙口镇岩溶地面塌陷发育特征及形成机理分析

赵建军

(广东省化工地质勘查院, 广东 广州 510800)

摘要:近年,广东省粤北山区隐伏区岩溶地面塌陷日益增加,直接影响人民生活。英德市沙口镇某村地质环境复杂,第四系覆盖层厚度薄,底部卵石层与下覆天子岭组灰岩直接接触,溶洞与断层破碎带发育,溶洞与溶洞间连通性较好,岩溶地面塌陷地质灾害严重。在综合分析沙口镇某村地质环境条件基础上,从内、外两方面因素,对岩溶地面塌陷发育特征及形成机理进行分析,认为在长期地下水位波动、潜蚀及淘蚀等作用松散盖层土体颗粒流失形成土洞,地表水与地下水强烈交替形成正负压力等作用下,土洞上部盖层发生塌陷。研究结论为科学制定岩溶地面塌陷防治方案提供依据。

关键词:岩溶地面塌陷;地质环境条件;发育特征及形成机理;正负压力

中图分类号: P642.25

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)05-0059-07

Analysis on development characteristics and formation mechanism of karst collapse in Shakou Town, Yingde City of Guangdong Province

ZHAO Jianjun

(Chemical Industry Geological Prospecting Institute of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510800, China)

Abstract: In recent years, the collapse of hidden karst ground in the mountainous area of north Guangdong Province is increasing, which directly affects people's production and life. In a village of Shakou Town, Yingde City, where the geological environment conditions are complex and the quaternary overburden is thin, serious geological disaster of karst ground collapse has occurred due to the development of the karst cave and fault fracture zone and the connectivity between karst cave and karst cave. The direct contact between the bottom pebble layer and the overlying limestone of Tianziling Formation also accounts for the disastrous consequence. Based on the comprehensive analysis of the geological environment conditions of the village in Shakou Town, the development characteristics and formation mechanism of karst ground collapse from internal and external factors were analyzed. It is concluded that the loose cavern is formed by the loss of soil particles in the loose cavern under the interaction of long-term fluctuation of groundwater level, erosion and scouring; the strong alternation of surface water and groundwater forms the positive and negative pressure action; the ground collapse is caused by the loss of bearing capacity of the upper cavern. The conclusion of the research provides sufficient basis for making projects of preventing karst ground collapse scientifically.

Keywords: karst surface collapse; geological environment conditions; development features and formation mechanism; positive and negative pressure

收稿日期: 2021-09-17; 修订日期: 2021-12-21

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 广东省地勘事业发展经费(粤财工[2019]169号); 2019年清远市级地质灾害防治专项资金(清财农[2019]47号)

作者简介: 赵建军(1983-),男,江西上饶人,学士,高级工程师,主要从事地质灾害防治研究。E-mail: 512638379@qq.com

0 引言

2020 年 2 月英德市沙口镇某村发生 3 处岩溶地面塌陷^[1]。2020 年 4 月 26 日又连续发生 3 处岩溶地面塌陷, 单个塌陷坑最大面积 183 m², 深 4.9 m, 潜在危害该村 61 户 227 人生命财产安全。

岩溶地面塌陷的研究开展已久, 形成了抽排地下水、暴雨、洪水及振动等主要成因机理^[2-7]。针对本研究区岩溶地面塌陷灾害, 前期已开展了多轮调查工作。2006 年广东省地质环境监测总站完成了 1:10 万英德市地质灾害调查与区划, 2010 年广东省工程勘察院编制了《广东省英德市地质灾害防治规划(2011—2020 年)》, 2018 年广东省核工业地质调查院编制了《广东省英德市 1:5 万地质灾害详细调查报告》, 2013 年广东省化工地质勘察院编制了《英德市望埠镇奖家洲村岩溶地面塌陷地质灾害初步勘查评价报告》等, 分析研究了英德市岩溶地面塌陷地质灾害特点与规律。前人大量的岩溶地面塌陷地质灾害专项调查、区划、专项勘查为本文编写提供丰富的基础资料。

本次研究过程中, 采用了工程测量、工程地质测绘、高密度电法、地震面波法、地质钻探验证、抽水试验、室内岩土水测试分析、地下水动态监测等综合勘查手段^[8-10], 查明场地地质环境条件、隐伏岩溶发育与分布状况及岩溶地面塌陷发育特征, 对岩溶地面塌陷的形成机理进行分析。

1 研究区地质环境条件

1.1 研究区基本情况

研究区位于北江右岸, 地貌类型属河流堆积河漫滩地貌, 地形平缓。东侧北江, 西侧为山体, 山体陡立, 为典型灰岩峰林地形, 北侧为碎屑岩风化剥蚀低丘, 南侧由岩溶洼地逐渐向碎屑岩风化剥蚀低丘过渡(图 1)。

北江干流自北东向南西流经本区, 形成宽阔的纵向岩溶河谷, 北江河床宽约 400 m, 自 1978 年以来研究区北江最高水位 44.27 m, 最低水位 33.07 m。

1.2 地层岩性及水文地质特征

研究区地层为泥盆系上统天子岭组(D_{3t})灰岩、泥盆系上统帽子峰组(D_{3m})砂页岩和第四系更新统黄岗组粉质黏土、粉砂、卵石(Q_{2,3h}) (图 2)。研究区岩溶地面塌陷地段上覆松散盖层粉砂、卵石层中赋存丰富的松散岩类孔隙水, 下覆基岩可溶性碳酸盐岩中赋存裂隙溶洞岩溶水。粉砂层富水性与透水性均中等, 卵石层富水性与透水性, 岩溶水水量丰富, 地下水位年变化幅



图 1 研究区地形地貌图

Fig. 1 Geomorphological map of the study area

度为 4~6 m。

1.3 地质构造

研究区位于八里石背斜北西翼之次一级向斜核部。推断有 WF1 断裂经过 WTK5 及 ZK2, 走向大致呈北偏西 45°展布, 呈舒缓波状, 切割泥盆系天子岭组灰岩, 长度约 1 300 m, 宽度不明, 倾角较陡, 带内主要由构造角砾岩、断层泥、大理岩化灰岩及灰岩组成, 为逆断层。

2 岩溶地面塌陷发育特征

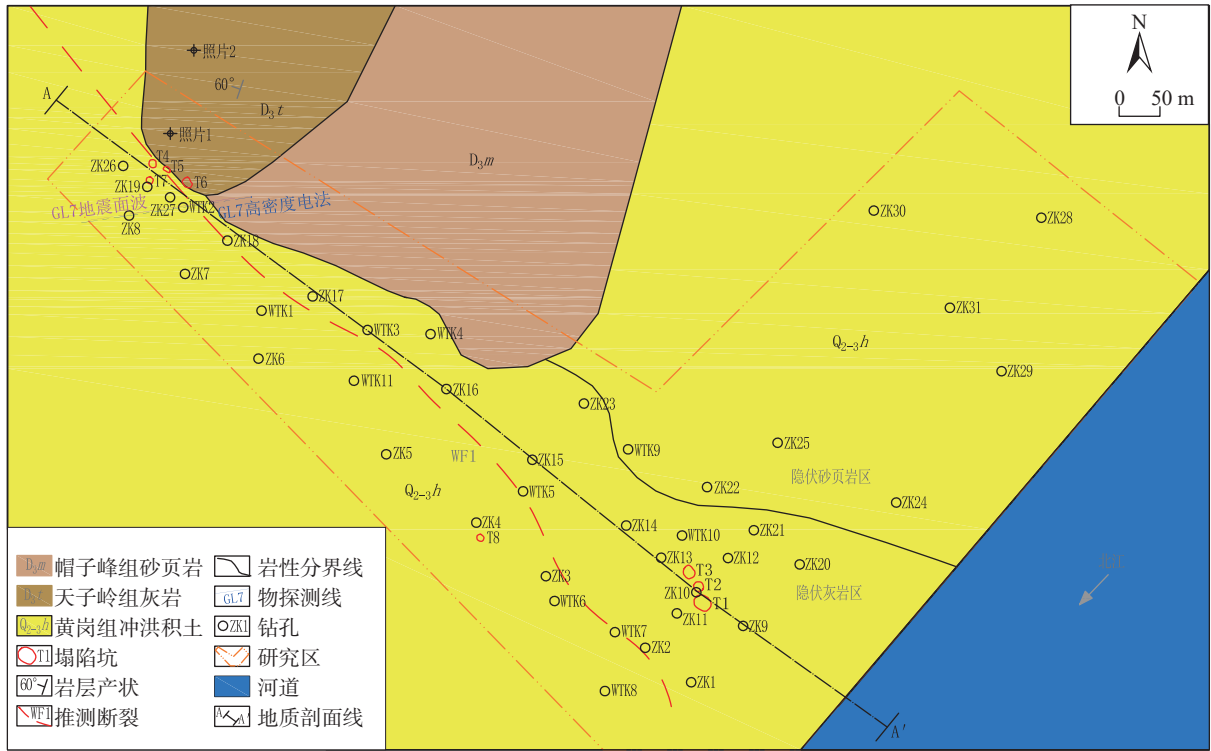
研究区共发现 8 处塌陷, 编号为 T1~T8, 塌陷统计见表 1, 分布位置见图 2, 照片见图 3。塌陷发育主要有方向性、同步性等 6 个特征。

(1) 塌陷多分布在土层较薄、土颗粒较粗地段: 塌陷为土层塌陷, 土体主要由粉质黏土、粉砂、卵石层组成, 卵石与下伏灰岩直接接触, 覆盖层厚度与第一层溶洞顶板厚度处于 12.4~15 m, 厚度较薄^[11]。如距 T1~T3 塌陷坑最近的 ZK10 钻孔覆盖层厚仅 11.60 m, 溶洞顶板厚 0.8 m; 距 T4~T7 塌陷坑最近的 ZK19 钻孔覆盖层厚仅 10.80 m, 溶洞顶板厚 2.1 m。

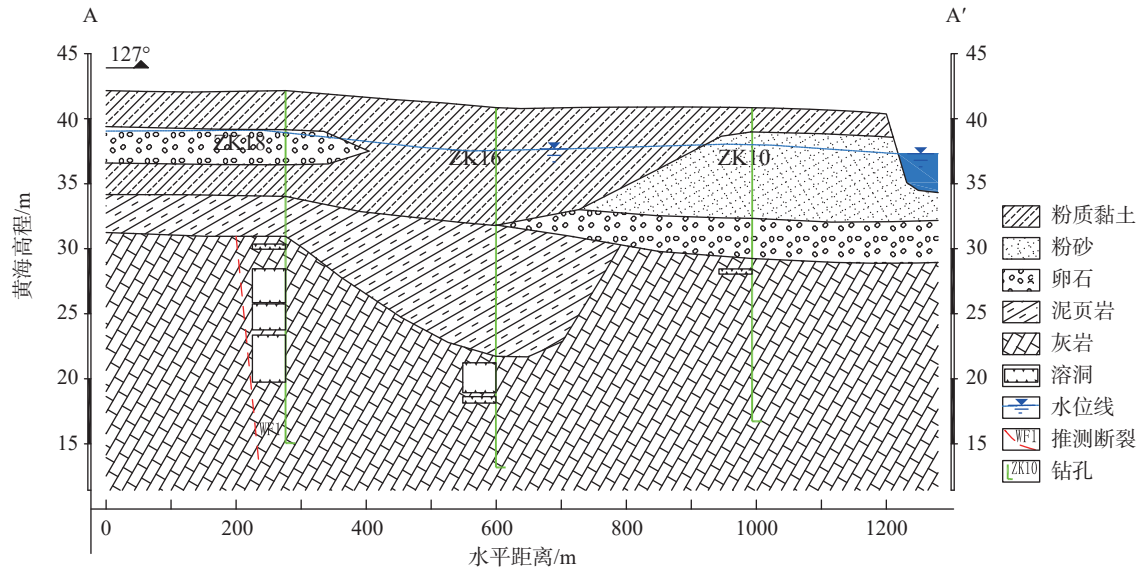
(2) 塌陷多分布在褶皱轴部^[12]: 塌陷区位于八里石背斜北西翼之次一级向斜核部地段, 地下水集中, 有利岩溶强发育。

(3) 塌陷多分布在断层影响带: 已发 8 个塌陷总体上位于 WF1 断裂影响带上, 其中 T1~T3 位于断层上盘约 80~100 m 处, T4~T7 总体位于断层带上, T8 位于断层下盘约 70 m 处, 断层破碎带处地下水富集, 径流强, 潜蚀作用下岩溶强发育, 为塌陷提供良好的地下空间。

(4) 塌陷分布于河床右岸: 地貌为河流阶地, 地形平



(a) 平面图



(b) 侧面图

图 2 研究区工程地质平面和剖面图

Fig. 2 Engineering geological map of the study area and a profile

缓,洪水期间被淹没,地下水动力条件改变快,易产生塌陷。

(5)方向性: T4—T6 塌陷发生于 2020 年 2 月,轴线方向为 NW300°; T1—T3 发生于 2020 年 4 月,轴线方向为 NW335°; T7 发生于 2020 年 7 月,位于 T4 南侧约 14m,塌陷坑长轴方向为 NW300°。塌陷虽不在同一时间发生,但塌陷坑平面分布位置具有明显的线性特征。

(6)同步性和持续性: 塌陷产生的时间快慢,主要受动力作用的强度和形成条件的差异影响。在两者共同影响下,可产生同步的塌陷群,如 T1—T3、T4—T6; 影响程度不同时,塌陷将陆续发生,在诱发因素消失作用前将持续发展,直至达到新的平衡。持续时间主要取决于诱发因素动力的强度,研究区塌陷始发于 1978 年,至今已长达 40 余年。

表 1 研究区岩溶地面塌陷统计表

Table 1 Statistical table of karst ground collapse in the study area

编号	发生时间	平面形态	地貌及第四系岩性	造成损失
T1	2020-04-26	呈16.45×14.03 m的椭圆形, 深4.9m	河流阶地, 粉质黏土、粉砂及卵石	毁田
T2	2020-04-26	呈直径9.5 m的近圆形, 深3.8 m	河流阶地, 粉质黏土、粉砂及卵石	毁田
T3	2020-04-26	呈12.1×10.03 m的椭圆形, 深3.8 m	河流阶地, 粉质黏土、粉砂及卵石	毁田
T4	2020-02-04	呈7.95×6.80 m的椭圆形, 深6.5 m	河流阶地, 粉质黏土、粉砂及卵石	毁田
T5	2020-02-05	呈7.7×4.4 m的椭圆形, 深6.5 m	河流阶地, 粉质黏土、粉砂及卵石	毁田
T6	2020-02-05	呈10.1×7.24 m的椭圆形, 深5.2 m	丘陵坡地, 粉质黏土	毁竹林
T7	2020-07-19	呈6.68 m的近圆形, 深4.3 m	河流阶地, 粉质黏土、粉砂及卵石	毁田
T8	1978年	呈5.0 m的近圆形, 深5.0 m	河流阶地, 粉质黏土、粉砂及卵石	毁田



(a) T1塌陷坑



(b) T3塌陷坑

图 3 研究区地面塌陷坑

Fig. 3 Ground collapse pits in the study area



(a) 风化裂隙岩溶发育



(b) 层间岩溶发育

图 4 地表岩溶发育特征

Fig. 4 Characteristics of surface karst development

3 深部岩溶发育状况

3.1 沿层面发育

地表溶蚀较强烈, 沿层面、风化裂隙发育。溶洞可见洞径 0.50 ~ 1.50 m, 且相互贯通; 溶蚀裂隙延伸长, 呈

0.1 ~ 0.2 m 开口状; 局部地段存在岩溶漏斗。地表岩溶特征见图 4, 照片位置见图 2。

3.2 钻孔见洞率高

揭露灰岩的 32 个钻孔中有 3 个钻孔共揭露 3 个土洞, 有 24 个钻孔共揭露 36 个溶洞, 其中有 1 个钻孔仅

揭露土洞未揭露溶洞, 钻孔见洞率 78.1%, 钻孔线岩溶率 3.57% ~ 71.02%, 平均 32.61%。岩面下 5 m 范围内岩溶发育, 在垂直方向一般发育 2 ~ 3 层溶洞, 最多发育有 4 层溶洞^[13]。钻孔揭露土洞、溶洞特征表见表 2, 土洞、溶洞大小、比例及充填特征见图 5。

3.3 物探异常区密集

33 条高密度电阻率法测线及 10 条地震面波法勘探测线, 共发现异常点 334 处, 物探解译为岩溶发育区, 多表现为溶沟、溶槽及溶洞, 岩面一带岩溶发育, 位置相近的岩溶发育带有连通性。代表性电阻率断面图及推测剖面图见图 6。

4 岩溶地面塌陷机理

4.1 地层组成及岩溶发育强度

塌陷所在区域地层主要为第四系冲洪积层与泥盆系上统天子岭组组成。天子岭灰岩位于向斜核部地带, 推测塌陷区有隐伏断裂经过, 岩溶强发育, 为地面塌陷形成具备空间条件。第四系土层主要由粉质黏土、粉砂及卵石组成, 土体结构松散, 孔隙大, 透水性强, 强烈的地下水活动作用对溶洞、洞隙通道中的松散充填物和上部第四系覆盖层产生潜蚀和淘蚀作用^[14], 有利于塌陷的产生。

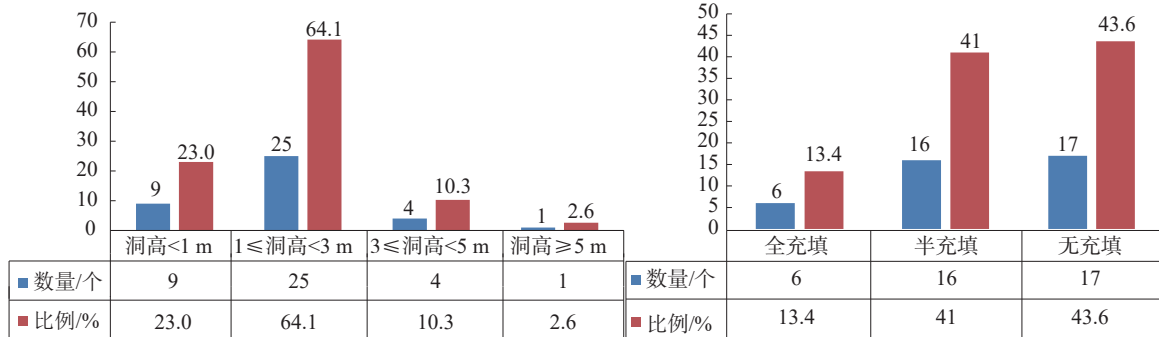
4.2 长期地表水与地下水剧烈波动

40 余年来, 北江河道塌陷区记录最高水位有 1994 年 6 月 18 日 43.67 m(高于房屋室外地面标高 3.17 m), 2006 年 7 月 16 日 44.27 m(高于房屋室外地面标高 3.77 m), 比勘查期间附近 WTK5 钻孔地下水位 37.24 m 高出 7.03 m。洪水淹没与退去时, 第四系冲积层中的潜水位和岩溶地下水位均随地表水位波动, 由于两者渗透性的差异, 在波动过程中不但可产生有利于渗透潜蚀作用的附加水头, 而且还产生正、负压力的作用^[15]。覆盖

表 2 钻孔揭露土洞、溶洞特征表

Table 2 Characteristics of cave and karst cave exposed by boreholes

孔号	岩面埋深/m	溶洞顶板埋深/m	洞高/m	充填情况	溶洞层数
WTK1	19.2	19.2	1.1	全充填	1
WTK2	13.4	13.8 17.1	2.8 1.8	半充填 半充填	2
WTK3	33.1	30.8(土洞)	1.1	无充填	4
		33.4	1.05	半充填	
		34.7	3.8	半充填	
		38.8	1.4	半充填	
WTK6	11.6	12.2	0.2	无充填	1
WTK7	17.6	18.3	0.6	半充填	1
WTK8	12.8	14.4	1.2	半充填	1
WTK10	30.3	31.6	0.7	半充填	1
WTK11	19.7	22.1	0.5	半充填	1
ZK1	12.2	13.4	1.5	全充填	1
ZK2	19.7	18.2	1.3	半充填	1
ZK3	18.6	16.4(土洞)	2.2	无	2
		18.7	1.6	全充填	
ZK4	12.3	12.4	0.5	全充填	2
		13.2	1.5	全充填	
ZK5	16.1	16.3	1.6	半充填	1
ZK6	20.2	20.7	2.4	半充填	2
		23.6	1.3	半充填	
ZK7	12.3	13.1	1.1	全充填	2
		15.1	1.8	全充填	
ZK8	12.1	12.5	2.3	全充填	1
ZK10	11.6	12.4	0.4	全充填	1
ZK12	20.9	21.0	4.2	全充填	2
		26.1	6.7	全充填	
ZK14	13.6	17.3	1.8	全充填	1
ZK15	21.4	18.1(土洞)	3.3	半充填	1
		19.6	2.3	全充填	
ZK16	19.1	22.2	0.5	全充填	2
		11.8	0.4	全充填	
ZK18	11.2	13.7	2.6	全充填	4
		16.4	2.0		
		18.8	3.6		
		18.8	3.6		
ZK19	10.8	12.9	1.9	无充填	2
		16.1	1.1	无充填	
ZK21	20.4	21.6	0.7	半充填	1
ZK26	15.6	15.9	1.3	半充填	1



(a) 单个洞高分级

(b) 充填特征

图 5 单个洞高分级与充填特征统计图

Fig. 5 Statistical diagram of height grading and filling characteristics of single hole

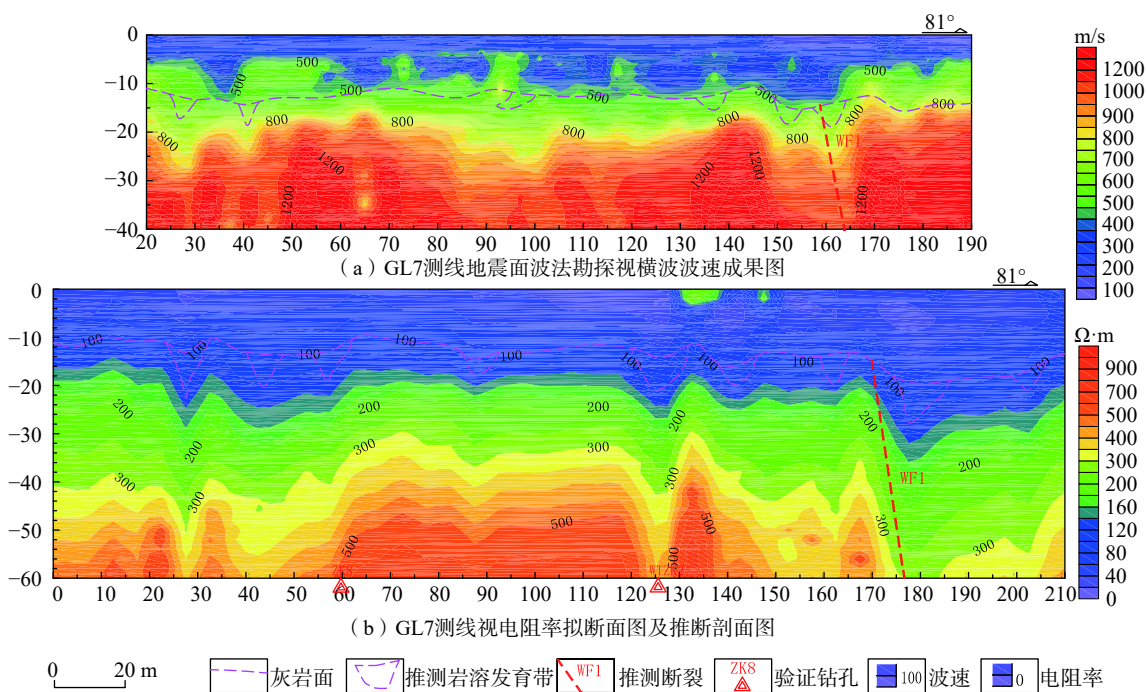


图 6 代表性测线地震面波及视电阻率推断剖面图

Fig. 6 Seismic surface and apparent resistivity inferences of representative survey lines

层中砂、卵石层较厚，卵石与下伏灰岩直接接触，卵石透水性强，与北江水力联系密切，因此洪水来临时地下水位迅速抬升，产生正压力作用，洪水退去时又产生负压力，加剧了土洞的形成(图 7)，给塌陷形成了空间条件。

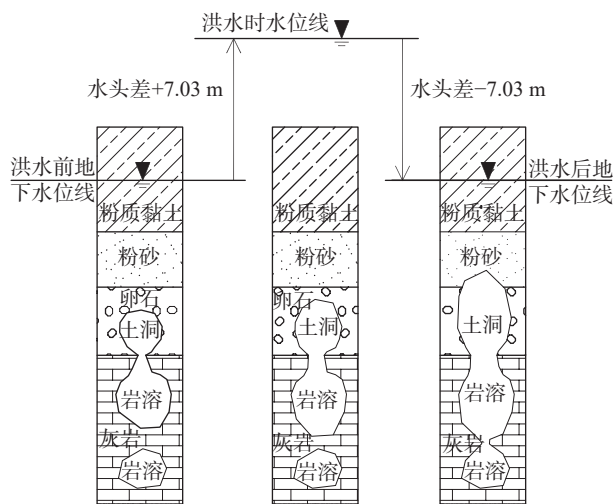


图 7 水位波动与土洞扩大关系图

Fig. 7 Diagram of water level fluctuation and soil cavity enlargement

4.3 地下水动力条件变化

11月至次年2月初为降雨量极少的冬季，地下水位为一年最低时期，地下水的浮托作用减少或者散失，引发T4—T6塌陷。4—7月降雨量集中，地表径流冲刷

强烈，地下水位迅速上升，溶蚀作用与搬作用强，改变了上覆土体物理力学性质，引发T1—T3、T7塌陷。

5 结论

沙口镇某村主要受地质构造及地下水影响，隐伏岩溶发育，在长期地下水位波动、潜蚀及淘蚀等作用下，上部松散盖层土体颗粒不断流失，进而形成土洞。随着土洞规模不断扩大，北江水位急剧变化形成正负压力等作用，土洞上部盖层散失承载能力发生塌陷。

岩溶地面塌陷已严重威胁沙口镇某村居民生命财产安全，并对其造成一定的伤害，当地居民十分恐慌。当地政府可采用回填与搬迁避让相结合的防治方案^[16]，尽快解决当地居民生产生活问题。

参考文献 (References):

[1] 刘传正. 地质灾害勘查指南 [M]. 北京: 地质出版社, 2000. [LIU Chuansheng. Geological hazard exploration Guide [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000. (in Chinese)]

[2] 韩庆定, 罗锡宜. 广东佛山市高明区李家村岩溶塌陷群成因机理分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(4): 56-64. [HAN Qingding, LUO Xiyi. Analysis on the formation mechanism and development process of karst collapses in Lijia Village, Gaoming District of Foshan City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(4):

- 56-64. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 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 Xiaoming, JIN Xiaogang, CHEN Biaodian, 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 with English abstract)]
- [4] 周长松, 邹胜章, 朱丹尼, 等. 广昆铁路复线秀宁隧道大皮坡一中村段岩溶塌陷成因 [J] . 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 146-152. [ZHOU Changsong, ZOU Shengzhang, ZHU Danni, et al. An analysis of the cause of Karst collapses near the Dapipo-Zhongcun section of the Xiuning tunnel of the Guangzhou-Kunming railway [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 146-152. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 刘勇健, 刘雅恒, 刘湘秋, 等. 广花盆地岩溶地面塌陷特征及形成机理研究 [J] . 广东工业大学学报, 2013, 30(1): 25-30. [LIU Yongjian, LIU Yaheng, LIU Xiangqiu, et al. Study of collapse characteristics of karst ground in the Guanghua basin and its formation mechanism [J] . Journal of Guangdong University of Technology, 2013, 30(1): 25-30. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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)]
- [7] 黄健民, 邓雄文, 胡让全. 广州金沙洲岩溶区地下水位变化与地面塌陷及地面沉降关系探讨 [J] . 中国地质, 2015, 42(1): 300-307. [HUANG Jianmin, DENG Xiongwen, HU Rangquan. The relationship between groundwater and ground collapse and land subsidence in Jinshazhou, Guangzhou City [J] . Geology in China, 2015, 42(1): 300-307. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 郑智杰, 敖文龙, 曾洁, 等. 综合物探法在柳州泗角村岩溶塌陷区调查中的应用 [J] . 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 143-149. [ZHENG Zhijie, AO Wenlong, ZENG Jie, et al. Application of integrated geophysical methods to karst collapse investigation in the Sijiao Village near Liuzhou [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 143-149. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 缪世贤, 黄敬军, 武鑫, 等. 徐州岩溶地质调查及其发育特征分析 [J] . 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 172-177. [MIAO Shixian, HUANG Jingjun, WU Xin, et al. Karst geological survey and analysis of its development characteristics in Xuzhou [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(2): 172-177. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 史箫笛, 黄勋, 康小兵, 等. 高密度电法在覆盖型岩溶地区探测中的应用 [J] . 人民长江, 2018(增刊2): 117-120. [SHI Xiaodi, HUANG Xun, KANG Xiaobing, et al. Application of high density electrical method in detecting covered Karst areas [J] . Yangtze River, 2018, 49(Sup 2): 117-120. (in Chinese)]
- [11] 易顺民. 广东省地面塌陷特征及防治对策 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(2): 127-131. [YI Shunmin. Distribution characteristics of ground collapse and its countermeasures in Guangdong Province [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(2): 127-131. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 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 Xiaojie. Features of the shallow karst development and control of karst collapse in Wuhan [J] . Carsologica Sinica, 2013, 32(4): 419-432. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 韩庆定, 罗锡宜, 易守勇, 等. 广东佛山市高明区三洲盆地岩溶塌陷发育特征与时空分布规律 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 131-139. [HAN Qingding, LUO Xiyi, YI Shouyong, et al. Characteristics and spatial-temporal distribution law of karst collapse in Sanzhou basin in Gaoming District of Foshan City, Guangdong Province [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 131-139. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 高宗军, 马海会, 王敏, 等. 岩溶地面塌陷预测模型初探 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(4): 66-71. [GAO Zongjun, MA Haihui, WANG Min, et al. Preliminary analysis on forecasting model of karst collapse [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(4): 66-71. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 余政兴, 金福喜, 段选亮. 河床透-阻型岩溶塌陷形成机理 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 57-66. [YU Zhengxing, JIN Fuxi, DUAN Xuanliang. Formation mechanism of karst collapse with unconfined aquifer-aquited system in riverbed [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 57-66. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 罗小杰. 覆盖型岩溶地面塌陷防治与应急处置 [J] . 人民长江, 2016, 47(5): 38-44. [LUO Xiaojie. Prevention, control and emergency disposal of covered karst ground collapse [J] . Yangtze River, 2016, 47(5): 38-44. (in Chinese with English abstract)]