

广东省英德市城南社区岩溶塌陷发育特征及成因分析

孙 伟

Development characteristics and causal analysis of karst collapses in Chengnan community, Yingde City, Guangdong Province

SUN Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209010>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广西桂林市规划中心城区岩溶塌陷时空分布规律及成因分析

§{suggestArticle.titleEn}

江思义, 吴福, 刘庆超, 黄希明, 李海良 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(3): 65-72

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

青海省滑坡崩塌泥石流灾害时空分布特征

Temporal and spatial characteristics of landslide, rockfall and debris flow disasters in Qinghai Province during the period

魏正发, 曹小岩, 张俊才, 应忠敏, 严慧, 魏赛拉加 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 134-142

广西桂林市规划中心城区岩溶发育特征及分布规律

§{suggestArticle.titleEn}

江思义, 吴福, 刘庆超, 李海良, 吴莹莹 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(3): 120-128



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209010

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.

广东省英德市城南社区岩溶塌陷发育特征及成因分析

孙 伟

(广东省化工地质勘查院, 广东 广州 518000)

摘要:以广东省英德市英城街道城南社区地面塌陷为研究对象,在系统收集研究区及周边区域地质环境条件、历史灾情、水位监测等资料的基础上,通过地面调查、物探、钻探等技术手段,查明研究区岩溶塌陷发育特征,分析岩溶塌陷的主要成因。结果表明:(1)研究区内塌陷坑单体规模以小型为主,少量为中、大型;共连续发生 31 处岩溶塌陷,影响面积 0.6 km²,岩溶塌陷地质灾害规模为特大型。塌陷坑平面形态以圆形、椭圆形为主,剖面形态以圆柱状为主。(2)研究区岩溶塌陷主要受地质构造、覆盖土层、水文地质、大气降雨及人类活动等因素影响,综合分析认为,地质构造、覆盖土层与水文地质条件为主导因素,大气降雨和人类活动为诱发因素。(3)综合以上分析,可将研究区岩溶塌陷总结为“傍河型隐伏岩溶区地面塌陷模式”,在对河道附近岩溶塌陷成因研究中,可首先考虑河道水位涨落及人类抽水、排水的影响因素,再结合实际情况考虑其他影响因素,此规律可为后期针对河道附近岩溶塌陷的研究提供参考。

关键词:岩溶塌陷;发育特征;分布规律;成因分析

中图分类号: P642.25

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)05-0074-07

Development characteristics and causal analysis of karst collapses in Chengnan community, Yingde City, Guangdong Province

SUN Wei

(Chemical Geological Exploration Institute of Guangdong, Guangzhou, Guangdong 518000, China)

Abstract: This research endeavors to investigate the development characteristics, spatial-temporal distribution, and cause of karst collapses in Chengnan community, Yingcheng Street, Yingde City, Guangdong Province. Various technological means such as ground investigation, geophysical exploration, and drilling were employed to examine the collapses discovered in the study area, along with systematic data collection on environmental geologic conditions, historical disasters, and water-level monitoring in the study area and its surrounding areas. The results show that: (1) The karst collapses in the study area constitute an extremely large geological disaster, affecting an area of 0.6 km², with 31 consecutive eruptions. Most of the surface collapse pits in the study area are small-scale, while a few are medium and large-scale. The planar shape of the collapse pits is primarily circular and elliptical, while the cross-section shape is mainly cylindrical. (2) The occurrence of karst collapses in the study area is influenced by geological structure, covering-layer of soil, atmospheric rainfall, hydrogeological characteristics, and human activities. Among these factors, geological structure, covering-layer of soil, and hydrogeological characteristics are considered as primary factors, whereas atmospheric rainfall and human activities act as inducing factors after a comprehensive assessment. (3) To conclude, the karst collapses erupted in the study area can be categorized as “the mode of collapse near rivers in subsurface karst areas”. During the causal analysis, priority should be given to considering water level fluctuations, pumping,

收稿日期: 2022-09-07; 修订日期: 2022-11-29

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 广东省英德市岩溶地面塌陷地质灾害应急勘查项目(2020-050)

作者简介: 孙 伟(1991-),男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士,工程师,主要从事地质灾害防治工作。E-mail: 1079673573@qq.com

and drainage. Subsequently, other influencing factors should be taken into account based on specific conditions, providing valuable insights for future research on karst collapses erupted near rivers.

Keywords: karst collapse; development characteristics; distribution pattern; causal analysis

0 引言

英德市位于广东省中北部,北江中游,是珠三角与内地接壤的交通要道^[1]。前人对广东地区的岩溶地面塌陷研究主要集中在珠三角地区,研究方向主要为岩溶地面塌陷的分布规律、成因机制及防灾减灾措施等,对岩溶地面塌陷同样较为发育的粤北山区的研究相对较少^[2]。

英德市英城街道城南社区“11·28”特大型岩溶塌陷地质灾害,自2020年11月28日至2021年3月16日期间,先后共计发生岩溶塌陷31处。本次岩溶塌陷共计直接经济损失1000余万元,直接受灾群众600余人,潜在威胁人员2000余人^[3]。

本文依托“广东省英德市英城街道城南地面塌陷地质灾害应急勘查”项目,以“11·28”特大型地质灾害期间所发生的31处岩溶塌陷为研究对象,以岩溶塌陷区及外扩影响范围为研究区,在系统收集研究区及周边区域地质环境条件、历史灾情、水位监测等资料的基础上,通过调查、物探、钻孔等工作方法,查明岩溶塌陷特征、时空分布规律,分析岩溶塌陷的主要成因,为该地区岩溶塌陷的防治工作提供科学指导^[4]。

1 研究区地质环境条件

研究区位于广东省清远市英德市英城街道城南社区,大致呈南北长,东西窄的不规则形展布,面积约0.6 km²。研究区地貌类型为岩溶盆地边缘的峰丛谷地地貌,区内地形平缓,东北部主要分布有居民区、污水厂,西北部主要为农田及鱼塘分布,中部主要为住宅及建筑工地,南部主要为英金水泥厂及荒地(图1)。研究区降雨丰沛且集中,主汛期为每年4月15日至10月15日,期间降雨量约占全年的80%,旱季为每年11月至次年3月,降雨量较少,本次岩溶塌陷即发生在旱季。研究区东侧紧邻北江,地处北江与滙江交汇口西岸,近年北江河道最高水位为31.49 m,研究区地面标高为25.47~32.92 m。

1.1 地层岩性

研究区地表广泛为第四系土层覆盖,下伏下石炭统石磴子组(C_{1s})地层。第四系地层主要包括冲积层(Q^{al})、坡积层(Q^{dl})、残积层(Q^{el}),各地层岩性简要描述见表1。

1.2 地质构造

研究区大部分被第四系土层覆盖,仅东南山脚处有少量基岩出露。根据瞬变电磁法探测,区内发现三条带状异常,推测为3条断裂带。通过钻探验证,有30个钻孔揭露断裂构造,其分布与物探推测基本吻合,可判定研究区内发育3条断裂构造,自西向东依次编号为F₁₋₁、F₁₋₂、F₁₋₃(图1、表2)。

1.3 水文地质

研究区为北江右岸地下水的排泄区,地下水类型包括松散岩类孔隙水和碳酸盐岩类裂隙溶洞水两类^[5]。

松散岩类孔隙水赋存于第四系土层中,含水层透水性中等—差,富水性弱,直接受大气降水、上游侧向径流及地表水入渗补给;碳酸盐岩类裂隙溶洞水赋存于下伏基岩岩溶孔洞、裂隙中,含水层透水性中等,富水性中等,主要受地下水侧向径流和北江的侧向补给,局部通过漏斗、落水洞直接接受地表水体入渗补给,部分经上覆松散层接受降雨及地表水补给^[6]。区内雨季补给大于排泄,地下水位升高,地表水补给地下水;旱季补给小于排泄,地下水位降低,地下水补给地表水。区内地下水主要排泄方式为蒸发和向北江排泄。

1.4 岩溶发育

在研究区内施工的256个钻孔中,有206个钻孔揭露溶洞,钻孔见洞率80.5%,钻孔线岩溶率0.96%~88.68%,平均33.38%,整体岩溶强发育。平面上,研究区中部岩溶发育强烈,平均线岩溶率达20%以上;北部、南部区域岩溶发育相对较弱,钻探线岩溶率小于5%,局部介于5%~20%,越靠近中部岩溶发育程度越高。垂直方向上,物探解译及钻探揭露均表明,研究区内岩溶强烈发育带主要分布于-20~20 m标高范围,其中-10~20 m标高内岩溶发育较强烈,发育密度和发育规模均较大;-20~-10 m标高段,发育密度略低,但溶洞规模较大;20 m标高以上及-20 m标高以下,岩溶发育程度较低(图2、图3)。

2 岩溶塌陷发育特征

2.1 塌陷坑平面形态

研究区内共发生31处岩溶地面塌陷,塌陷坑平面形态有圆形、椭圆形、近似圆形及近似椭圆形四种^[7](图4)。以较为规则的圆形、椭圆形为主,圆形13处,

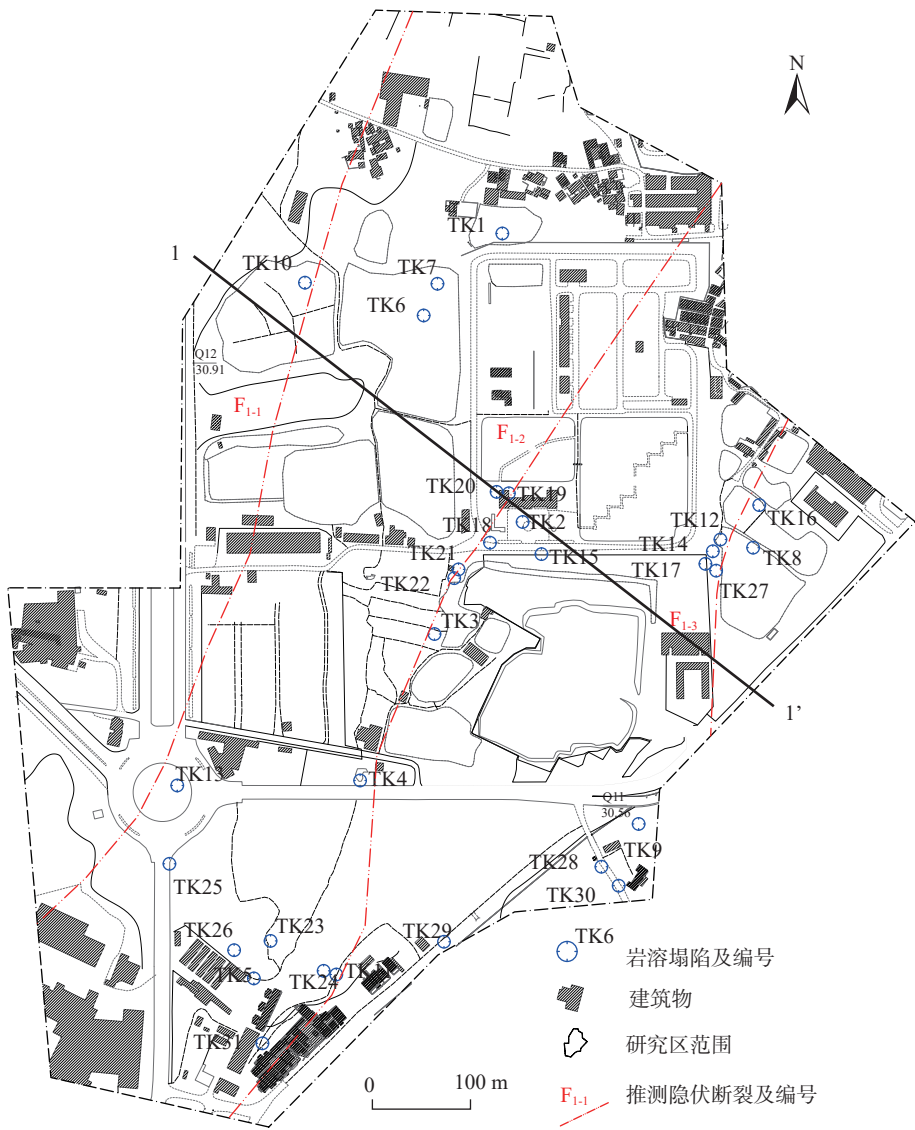


图 1 研究区岩溶塌陷分布图

Fig. 1 Distribution map of karst collapses in the study area

表 1 研究区主要地层岩性表

Table 1 Lithology table of main strata in the study area

地质时代	地层单元及代号	岩性概述
第四系	冲积层(Q^{al})	岩性主要为淤泥质土、粉质黏土、粉砂及卵石,零星分布于研究区东北部的北江沿岸、浔阳湖周边及东部的污水厂附近
	坡积层(Q^{dl})	岩性主要为粉质黏土,局部含风化角砾,层厚0.1~17.3 m,平均层厚5.19 m,主要分布于研究区东北部、中部及南部
	残积层(Q^{el})	岩性主要为粉质黏土,含较多测水组泥质岩类风化残留物及泥岩碎块,局部夹黑色有机质,层厚1.3~28.5 m,平均层厚8.97 m,在研究区内大部分区域均有分布
石炭系	石磴子组(C_1s)	岩性以灰岩为主,次为炭质灰岩,发育网状方解石细脉,岩质脆硬,局部可见溶蚀现象

表 2 断裂特征统计表

Table 2 Statistical table of fracture characteristics

断裂名称	断裂特征
F ₁₋₁	NE向展布,走向约20°~40°为推测隐伏断裂,推测断裂层顶深度12.50~31.40 m,断裂宽度约50~100 m,区内延伸长度约1.0 km
F ₁₋₂	NE向展布,走向约25°~35°,为推测隐伏断裂,推测断裂层顶深度6.20~25.60 m,断裂宽度约50~100 m,区内延伸长度约1.1 km
F ₁₋₃	NE向展布,走向约5°~25°,为推测隐伏断裂,推测断裂层顶深度14.50~16.80 m,断裂宽度约20~30 m,研究区内延伸长度约0.3 km

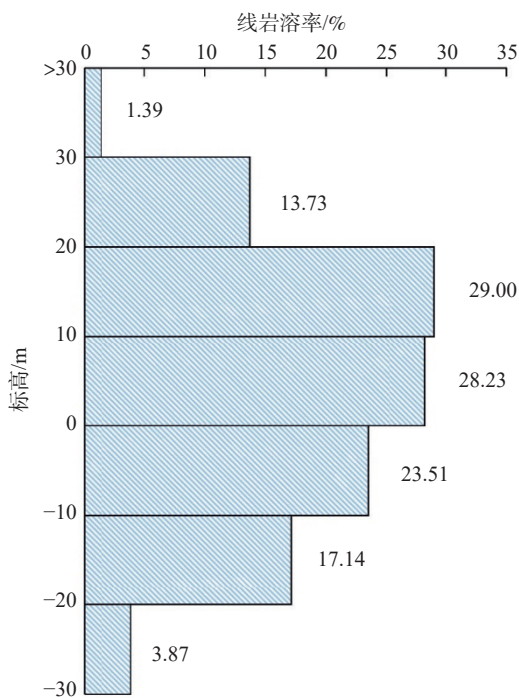


图 2 研究区各标高段线岩溶率分布图

Fig. 2 Distribution map of karstification rates in various elevation sections of the study area

占 41.9%，椭圆形 10 处，占 32.3%。另外，近似圆形 7 处，占 22.6%，近似椭圆形 1 处，占 3.2%。

2.2 塌陷坑规模

圆形及近似圆形塌陷坑共 20 处，直径 1~15 m，其中<10 m 共 18 处，10~20 m 共 2 处；椭圆形及近似椭圆形塌陷坑共 11 处，长轴 3.3~24.5 m，短轴 2.5~19.3 m，其中长轴<10 m 共 9 处，10~20 m 共 1 处，20~60 m 共 1 处(表 3)。根据塌陷坑直径(或长轴)大小，直径(或长轴)<10 m 的有 27 处，占比 87.1%，属小型规模；10~20 m 的有 3 处，占比 9.7%，属中型规模；20~60 m

的有 1 处，占比 3.2%，属大型规模。由此可见，研究区内单体塌陷坑以小型规模为主，少量为中、大型规模。研究区内先后连续发生 31 处岩溶塌陷，数量≥20 处，影响面积 $60\times 10^4\text{ m}^2\geq 10\times 10^4\text{ m}^2$ ，研究区岩溶塌陷群规模为特大型^[8]。

3 岩溶塌陷成因分析

岩溶塌陷的发生，是多种形成机制综合叠加的结果^[9]，根据研究区的调查研究及勘探揭露，综合分析区内岩溶塌陷的成因主要有以下几方面：

3.1 地质构造

研究区发育有三条 NE 向断裂构造，受构造运动影响，断裂带内岩体破碎、地下水活动强烈，极易形成岩溶强溶蚀带。根据钻探揭露，沿断裂带下伏可溶岩裂隙、溶洞发育，局部见有土洞，多数溶洞为空洞或半充填状，在研究区形成复杂的承压地下水管流系统，加剧了岩溶发育，为岩溶塌陷的形成提供了地下空间基础^[10]。

3.2 覆盖土层

研究区内覆盖土层成因以残积、坡积为主，单层结构，成分主要为粉质黏土，夹杂岩石风化碎屑。覆盖土层具有一定的黏聚力和透水性，有利于地下水潜蚀作用，形成土洞，为区内形成土洞的主要地质体^[11]。由于区内地形平缓，覆盖层较厚的区域，亦是下伏碳酸盐岩的地下溶沟、溶槽等溶蚀低洼地带，主要分布于研究区的中部、东部及北部的局部区域，岩溶塌陷大部分沿低洼地带的边缘分布。

3.3 水文地质条件

研究区东侧紧邻北江，地下水位与北江水位联系密切，雨季北江补给地下水，旱季地下水补给北江，研究区处于地下水强径流和强交换带上，地下岩溶管道发育，存在地下水动态变化迅猛、迳流通畅、流态多变等特

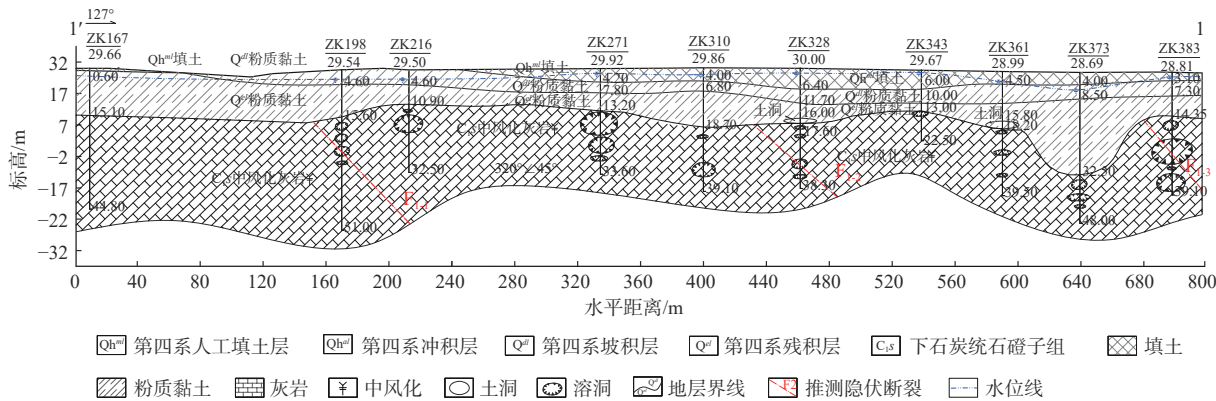


Fig. 3 Karst development profile in the study area



图 4 塌陷坑平面形态特征示例

Fig. 4 Site examples of the planar morphological characteristics of karst collapse sinkholes

点,为区内岩溶、土洞的发育提供有利的动力条件,同时也会直接诱发岩溶塌陷^[12]。

3.4 大气降雨

研究区 2020 年 7、8 月份的降雨量不足往年同期平均降雨量的一半,9 月的降雨量大于往年同期平均降雨量的 2 倍,10 月至发生地面塌陷期间几乎没有降雨。受短期内降雨量的大幅度变化,导致研究区内地下水位产生大幅度波动,致使承压地下水管流系统的溶洞、土洞产生真空负压作用或渗透潜蚀作用,打破天然条件下该系统的动态平衡状态,导致岩溶塌陷发生^[13]。大气降雨是诱发本次岩溶塌陷的自然因素。

3.5 人类活动

一方面,人类活动抽排地下水,改变研究区地下水流场。根据现场调查,研究区内及周边的建筑工地、三鸟市场、水泥厂等多处存在抽排地下水现象,抽排水量较大,造成局部地下水位下降,形成地下水降落漏斗;污水厂的污水渗漏造成地下水位的悬空补给,引起局部地下水位抬升。这些人类活动直接造成地下水坡度的频繁波动,水力坡度交替变化,加速地下土洞的形成和洞

顶上移,最终引起地表土层垮塌,形成地面塌陷。人类活动大量抽排地下水是诱发本次岩溶塌陷的主要人为因素。

另一方面,在人类工程活动作用下,溶洞或土洞产生机械贯穿或释压,导致可溶岩裂隙溶洞承压水水头倍增,从而将溶洞与地表水体贯通,使该管流系统相连的土洞真空负压进一步增大,引发地面塌陷^[14]。研究区内的多处建筑工地均有钻探、冲桩等工程活动,存在贯穿溶洞的可能。

4 结论

(1)研究区内塌陷坑单体规模以小型为主,少量为中、大型。共连续发生 31 处岩溶塌陷,影响范围面积 0.6 km²,岩溶塌陷地质灾害规模为特大型。塌陷坑平面形态以圆形、椭圆形为主,剖面形态以圆柱状为主。

(2)研究区岩溶塌陷主要受地质构造、覆盖土层、水文地质条件、大气降水及人类活动等因素影响,综合分析认为,地质构造、覆盖土层与水文地质条件为主导因素,大气降雨和人类活动为诱发因素。

表 3 研究区塌陷坑基本特征表

Table 3 Basic characteristics of karst collapse sinkholes in the study area

编号	直径或(长轴×短轴)/m	平面形态	发生日期
TK1	24.5×19.3	椭圆形	2020-11-28
TK2	9	圆形	2020-11-28
TK3	7	圆形	2020-11-28
TK4	5.8×3	椭圆形	2020-11-28
TK5	14×13.6	椭圆形	2020-11-28
TK6	4	近似圆形	2020-11-28
TK7	3	近似圆形	2020-11-28
TK8	10	近似圆形	2020-11-28
TK9	3.2	近似圆形	2020-12-01
TK10	5	近似圆形	2020-11-28
TK11	5.5×4.6	近似椭圆形	2020-11-28
TK12	6	近似圆形	2020-12-02
TK13	6	圆形	2020-12-03
TK14	5	圆形	2020-12-09
TK15	3.3×2.5	椭圆形	2020-12-01
TK16	9×5	椭圆形	2020-12-14
TK17	7	圆形	2020-12-16
TK18	15	圆形	2020-11-28
TK19	1	近似圆形	2020-11-28
TK20	2	圆形	2020-12-16
TK21	6×4.5	椭圆形	2020-11-28
TK22	3	圆形	2020-12-28
TK23	4.5	圆形	2020-11-30
TK24	2	圆形	2020-12-30
TK25	7	圆形	2020-12-29
TK26	6×4.2	椭圆形	2021-01-11
TK27	5	圆形	2021-02-11
TK28	4×3	椭圆形	2020-11-28
TK29	5×4	椭圆形	2021-03-06
TK30	5×4	椭圆形	2021-03-07
TK31	1.5	圆形	2021-03-16

(3)综合以上分析,可将研究区岩溶塌陷总结为“傍河型隐伏岩溶区地面塌陷模式”,在对河道附近岩溶塌陷成因研究中,可首先考虑河道水位涨落及人类抽水、排水的影响因素,再结合实际情况考虑其它影响因素,以此规律方便后期针对河道附近岩溶塌陷的研究。

参考文献(References):

[1] 赵建军. 广东省英德市地质灾害发育特征及形成条件研究 [J]. 地下水, 2018, 40(3): 108 – 109. [ZHAO Jianjun. Research on geological disaster development characteristics and formation conditions in Yingde City, Guangdong Province [J]. Ground Water, 2018, 40(3): 108 – 109. (in Chinese with English abstract)]

[2] 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)]

[3] 王恒, 赵魁, 赵建军, 等. 广东省英德市英城街道城南地面塌陷地质灾害应急勘查报告[R]. 广州: 广东省化工地质勘查院, 2021. [WANG Heng, ZHAO Kui, ZHAO Jianjun, et al. Emergency exploration report of ground collapse geological disaster in the south of Yingcheng sub district, Yingde City, Guangdong Province[R] Guangzhou: Guangdong Institute of Chemical Geology, 2021. (in Chinese)]

[4] 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)]

[5] 于贺艳. 武广客运专线英德段岩溶塌陷模式及致塌因素的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2006. [YU Heyan. Study on the karst collapse mode and the factors of collapse in Ying de df special railway line for passenger transport from Wu han to Guang zhou[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006. (in Chinese with English abstract)]

[6] 卢丽, 邹胜章, 赵一, 等. 桂林会仙湿地狮子岩地下河系统水循环对降水的响应 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 63 – 72. [LU Li, ZOU Shengzhang, ZHAO Yi, et al. Response of water cycle to precipitation in Shizhiyan underground river system in Huixian wetland of Guilin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 63 – 72. (in Chinese with English abstract)]

[7] 吴远斌, 罗伟权, 殷仁朝, 等. 重庆市龙泉村——庆丰山村岩溶塌陷分布规律与成因机制 [J]. 中国岩溶, 2021, 40(6): 932 – 942. [WU Yuanbin, LUO Weiquan, YIN Renchao, et al. Distribution law and genetic mechanism of karst collapse in Longquan Village-Qingfengshan Village, Chongqing [J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(6): 932 – 942. (in Chinese with English abstract)]

[8] 中国地质灾害防治工程行业协会. 岩溶地面塌陷防治工程勘查规范(试行): T/CAGHP 076—2020 [S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2020. [China Geological Disaster Prevention and Control Engineering Industry Association. Code for geological investigation of karst collapse prevention: China University of Geoscience Press, T/CAGHP 076—2020 [S].

2020. (in Chinese)]
- [9] 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)]
- [10] 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)]
- [11] 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)]
- [12] 李华明, 张永辉, 胡志平, 等. 峨汉高速庙子坪隧道岩溶发育特征及工程效应分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 92 – 98. [LI Huaming, ZHANG Yonghui, HU Zhiping, et al. Analysis of karst development characteristics and influence of Miaoziping tunnel in E-Han expressway [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 92 – 98. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 郑小战, 郭宇, 戴建玲, 等. 广州市典型岩溶塌陷区岩溶发育及影响因素 [J]. 热带地理, 2014, 34(6): 794 – 803. [ZHENG Xiaozhan, GUO Yu, DAI Jianling, et al. karst development and influencing factors in typical karst collapse districts of Guangzhou [J]. Tropical Geography, 2014, 34(6): 794 – 803. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 蔡建斯, 龚鹏, 任宏剑. 深圳市某片区岩溶塌陷致塌成因分析及预防措施 [J]. 中国矿业, 2022, 31(2): 173 – 179. [CAI Jiansi, GONG Peng, REN Hongjian. Cause analysis and preventive measures of karst collapse in a certain area of Shenzhen City [J]. China Mining Magazine, 2022, 31(2): 173 – 179. (in Chinese with English abstract)]