

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-17

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

韩庆定, 罗锡宜, 易守勇, 邹 杰
(广东省佛山地质局, 广东 佛山 528000)

摘要:以佛山市高明区三洲盆地作为研究区,在系统收集区内区域地质、构造、工程、水文、环境、历史灾害等基础上,通过野外走访调查,查明了研究区岩溶塌陷发育特征,并对其时空分布规律进行了分析。结果表明:(1)区内岩溶塌陷规模以小型为主,其平面形态以圆形、似圆形为主,其剖面形态以漏斗状居多,并且剖面形态随覆盖层厚度增大总体呈现由圆柱状—坛状—漏斗状—碟状的变化规律;(2)空间上岩溶塌陷的分布受地层岩性、地质构造、覆盖层厚度及结构、地下水迳流和人类工程活动等影响;(3)时间上人为塌陷的发生主要与采矿活动和钻探施工时间关系密切,而自然塌陷主要发生在每年旱涝交替期间(即3—4月份)。

关键词:岩溶塌陷特征;时空分布规律;三洲盆地;广东佛山市高明区

中图分类号: P642.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2021)03-0131-09

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

HAN Qingding, LUO Xiyi, YI Shouyong, ZOU Jie
(Foshan Geological Bureau of Guangdong Province, Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract: Sanzhou basin in Gaoming District of Foshan City is selected as the research area. data of regional geology, geological structure, engineering geology, hydrogeology, environmental geology and historical geological disasters in the study area are collected systematically, the characteristics of karst collapse are found out through field investigation. And the spatial-temporal distribution law is analyzed. The results show that: (1)The scale of karst collapse is mainly small, its plane shape features are mainly circular and quasi circular, and its profile shape features are mainly funnel-shaped. With the increase of the overburden thickness, the profile shape features of karst collapse generally change from circular-shape to jar-shape to funnel-shape and then to disc-shape. (2)The spatial distribution of karst collapse is affected by stratum lithology, geological structure, overburden thickness and its structure, groundwater runoff and human engineering activities. (3)The temporal distribution of man-made karst collapse is closely related to mining activity and drilling construction. The temporal distribution of karst collapse induced by nature is mainly during the alternate period of drought and flood (especially from March to April).

Keywords: characteristic of karst collapse; spatial-temporal distribution law; Sanzhou basin; Gaoming District of Foshan City Guangdong

收稿日期: 2020-06-02; 修订日期: 2021-03-01

基金项目: 广东省城镇典型岩溶地面塌陷防治研究(201603)

第一作者: 韩庆定(1987-),男,海南文昌人,硕士研究生,高级工程师,主要从事地质灾害防治工作。E-mail: 693479265@qq.com

0 引言

佛山是全国重要的制造业基地,国家历史文化名城,珠三角地区西翼经贸中心和综合交通枢纽^[1]。佛山市地处粤港澳大湾区腹地,经济发达,2019年全市国民生产总值初步核算总量为10 751.02亿元^[2],是广东省第三个国民生产总值超万亿的城市。然而佛山市地质环境条件极其复杂^[3],在南海区大沥镇、里水镇和高明区西江新城—明城一带岩溶分布广泛,其中,2008年在南海区大沥镇因武广客运专线金沙洲隧道出口段施工大降深抽排地下水引发了多处地面塌陷和面积地面沉降,造成黄岐二中、敦豪物流中心、部分工厂、酒店及民房损坏,直接经济损失近2亿元^[4];2011年高明区富湾安华路因钻探施工振动作用导致路面塌陷、楼房倾斜,引发了社会恐慌和媒体报道^[5]。因此,地面塌陷已是珠江三角洲城市乃至佛山市地质灾害的主要类型之一^[6],也将成为制约珠三角岩溶地区社会经济高质量发展的主要地质环境问题之一^[7],需加强对其认识并加以防范。

前人对珠三角地区岩溶相关研究主要集中在广花盆地、肇庆盆地和深圳龙岗等典型地区,主要研究方向以岩溶发育分布规律^[8-10]、岩溶塌陷成因机理^[11-12]、岩溶塌陷监测预警与风险评价^[13-14]和工程建设防灾减灾^[15]为主。而作为岩溶高发育、岩溶塌陷频发的三洲盆地目前相关研究程度较低、报道较少。

本文依托“广东省城镇典型岩溶地面塌陷防治研究”和“佛山市地质灾害监测预警与应急指挥平台”两个项目,以佛山市高明区三洲盆地为研究区,在系统收集区内区域地质、构造、工程、水文、环境、历史灾害等基础上,通过野外走访调查,查明其岩溶塌陷特征,并对其时空分布规律进行分析,从而加深对盆地岩溶塌陷地质灾害的认识,为该地区岩溶塌陷的科学防灾减灾奠定基础,保障当地人民群众生命财产安全和社会经济建设安全持续高质量发展。

1 研究区地质概况

研究区三洲盆地是以高明三洲为中心,东以西江为界,南至鹤山市白云地,北至高明富湾,西至高明明城,面积约550 km²(图1)^[16]。区内地层地表可见以第四系为主,零星还分布有南华系、寒武系、泥盆系、石炭系、三叠系和白垩系地层。区内可溶岩广泛隐伏分布,所属地层单位主要有晚泥盆系天子岭组(D₃t)、早石炭系石磴子组(C₁s)和早侏罗系金鸡组(J₁j)。

晚泥盆系天子岭组(D₃t):主要出露在研究区西南

侧丘陵地带,岩性为灰绿色中—薄层状泥—微晶灰岩、泥质灰岩、泥灰岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩,夹钙质泥岩、粉砂岩,与下伏春湾组呈整合接触。

早石炭系石磴子组(C₁s):广泛隐伏发育在研究区中部平原地带,岩性为灰—深灰色泥晶灰岩、微晶灰岩、泥质灰岩、白云质灰岩,夹角砾状灰岩、含炭质灰岩及含炭质钙质泥岩;岩石中常见裂隙发育,方解石脉充填,局部形成方解石晶洞,发育方解石晶芽;岩石中缝合线构造发育,岩层层面倾角较缓,一般10°~30°;与上覆地层测水组(C₁c)及下伏地层大赛坝组(C₁ds)均为整合接触。

早侏罗系金鸡组(J₁j):主要分布于研究区北东部富湾镇及西南部明城镇一带,以隐伏为主,岩性以灰白、紫红色中—厚层状中粗、中细、细粒长石石英砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、灰岩质砾岩、角砾状灰岩、灰岩质砾岩为主;于富湾镇多见灰岩质砾岩及角砾状灰岩隐伏于第四系之下,岩石中砾石含量55%~60%,成分主要为灰岩、方解石,占砾石总量60%~80%;其次成分为内碎屑或砂岩、粉砂岩,砾石大小0.2~5 cm,个别可达10 cm以上,磨圆度较好,呈次圆状—圆状为主,少量呈次棱角状;富湾一带钻孔揭露存在大量溶蚀、溶土洞现象。

研究区内主要有两个构造层,下构造层为海西构造层,是泥盆—石炭系硅泥碳酸岩建造,厚达2 000 m以上;上构造层为印支—燕山构造层,是上三叠统含煤碎屑岩建造,厚度大于600 m^[16]。受两个构造层叠加作用,盆地内形成了隐伏复式向斜地质构造,其轴部近东西向展布在盆地中部,呈“蛇”形弯曲展布于峰江石场—明城镇—西江新城一带,总体沿北东50°~60°方向展布,长27.5 km,宽约9 km,为区内规模最大的盖层褶皱构造。向斜槽地全线被第四纪沉积层覆盖,地貌上为长条带状的北东向洼地,核部为石炭系测水组(C₁c)地层,两翼依次为石磴子组(C₁s)和大赛坝组(C₁ds)地层。向斜构造迹象主要表现为岩石受挤压变形、具片理化、节理裂隙发育,裂隙面常见泥质或方解石充填,多呈舒缓波状,局部发育小揉皱。岩石局部见发育碎裂岩、构造角砾岩,发育方解石晶洞,其中构造角砾岩大小混杂,一般0.2~3.0 cm,多呈棱角状—次棱角状,成分为灰岩、泥质灰岩和方解石,多见为泥质或钙质胶结,胶结程度一般。

此外,在研究区北西侧、北东侧和东南侧发育三组控盆断裂组,分别为长坑滑脱断裂组、西江断裂组和桂田断裂组。

长坑滑脱断裂组:沿研究区北西侧长坑经凌云山至

明城镇北侧总体呈NE 40°~60°方向展布,由一组断面或轴面倾向南东或北西断裂和褶皱构成,可见延伸长度大于16 km、宽1.5~3 km。断面总体倾向南西,上部倾角较陡,一般为40°~50°,向下变缓至15°左右;沿断裂硅化角砾岩、硅化砂砾岩、角砾状灰岩发育,断裂构造岩带宽一般15~40 m,最宽大于100 m。断裂次级构造主要发育在上三叠统和下侏罗统中。该断裂带北东段与研究区富湾镇安华路—李家村塌陷群相距约1.2 km,西南段与研究区明城镇峰江石场塌陷群相距约3.2 km,复杂的构造形态对隐伏岩溶发育有重要影响。

西江断裂组:沿研究区北东侧西江展布,总体走向320°~340°,倾向北东,倾角一般大于70°,由西江断裂及其配套次级断裂组成,其断裂带及影响带宽约1.4 km,主要发育在下石炭统测水组碎屑岩和石磴子组灰岩中,断裂破碎带上部为石英、黏土质构造岩,下部为构造角砾岩,角砾成分以石英为主,次为长石,大小不一,一般2~3 mm居多,最大为1 cm左右,泥质胶结,固结程度较差,绿泥石化和绿帘石化强烈,构造岩主要有构造角砾岩,其次为硅化岩和碎裂岩,沿断裂两侧地层产状十分紊乱,时而波状弯曲,局部见强烈的揉曲和牵引现象,具两期活动特点,早期活动以压扭性为主,晚期活动以张扭性为主。该断裂组沿北西方向延伸指向富湾安华路—李家村塌陷群。

桂田断裂组:沿研究区东南侧三洲—桂田村展布,总体走向40°~60°,断面倾向南东或北西,倾角40°~70°,断裂构造岩有硅化岩、硅化碎裂岩、构造角砾岩,具有多期活动的特征,早期表现为压性断层,晚期表现为张性断层,各次级断裂的成生时间上存在显著差异,一部分为印支期构造活动产物,一部分为控制白垩纪红层的燕山期构造活动产物,反映本断裂组的断裂活动经历了漫长的地质演化历史。该断裂组沿北东方向指向荷城纪念中学—沧江路塌陷群。

2 岩溶塌陷发育特征

研究区可溶岩埋藏类型主要为覆盖型,岩溶发育与地层岩性、构造、地下水、工程地质条件和古河道等有关^[7]。本文通过系统收集研究区以往岩溶塌陷资料和野外走访调查,可知研究区内岩溶塌陷共有39处,其特征见图1和表1。

2.1 岩溶塌陷规模

2.1.1 塌陷坑深度

由表1可知,研究区内岩溶塌陷深度0.2~7.0 m(除2处塌陷深度不详外),其中,以深度≤2 m为主,有

20处,占塌陷总数的54%;其次为深度2~4 m,有10处,占塌陷总数的27%;再者为深度4~6 m,有4处,占塌陷总数的11%;最少为深度6~8 m,仅有3处,占塌陷总数的8%。

2.1.2 塌陷坑直径

由表1可知,研究区内岩溶塌陷直径(或长度)0.60~30 m,其中,以直径≤5 m居多,有27处,占塌陷总数的69%;其次为直径5~10 m、10~15 m和20~25 m,各有3处,各占塌陷总数的23%;再者为直径为15~20 m,有2处,占塌陷总数的5%;而直径25~30 m仅有1处,占塌陷总数的3%。由此可知,研究区内岩溶塌陷规模以小型(<10 m)为主,有30处,约占塌陷总数的77%;其余岩溶塌陷规模均为中型(10~50 m),有9处,约占塌陷总数的23%。

2.2 塌陷坑形态

2.2.1 平面形态

由表1可知,研究区内岩溶塌陷平面形态特征有圆形、似圆形、椭圆形、长条形四种,其中,以圆形居多,有21处,占塌陷总数的54%;其次为似圆形,有11处,占塌陷总数的28%;再者为椭圆形,有5处,占塌陷总数的13%;最少为长条形,仅有2处,占塌陷总数的5%;反映了研究区内地下岩溶发育平面分布总体呈不规则串珠状,溶土洞之间管道形式多为裂隙或小规模岩溶通道。

2.2.2 剖面形态

由表1可知,研究区内岩溶塌陷的剖面形态类型有漏斗状、碟状、坛状和圆柱状等四种(除10处塌陷剖面形态特征无资料查证外)(图2),其中以漏斗状居多,有14处;其次为碟状,有8处;再者为坛状,有5处;最少为圆柱状,仅有2处。

由图3可知,岩溶塌陷的剖面形态与覆盖层厚度具有一定的关系,并且随着覆盖层的厚度逐渐增大,塌陷形成的剖面形态总体呈现由圆柱状—坛状—漏斗状—碟状的变化规律,其中,当覆盖层厚度<15 m时岩溶塌陷剖面形态由圆柱状向坛状过渡,10~30 m时其剖面形态以漏斗状为主,超过30 m时以碟状为主,主要原因是在塌陷过程中各层土体重新堆积存在松散系数导致体积扩大所致,即上覆塌陷土层越厚所形成的松散土体体积越大,则塌陷深度相对不会呈线性变深。

3 岩溶塌陷时空分布规律

3.1 空间分布规律

由图1可知,研究区内岩溶塌陷主要集中分布于富湾

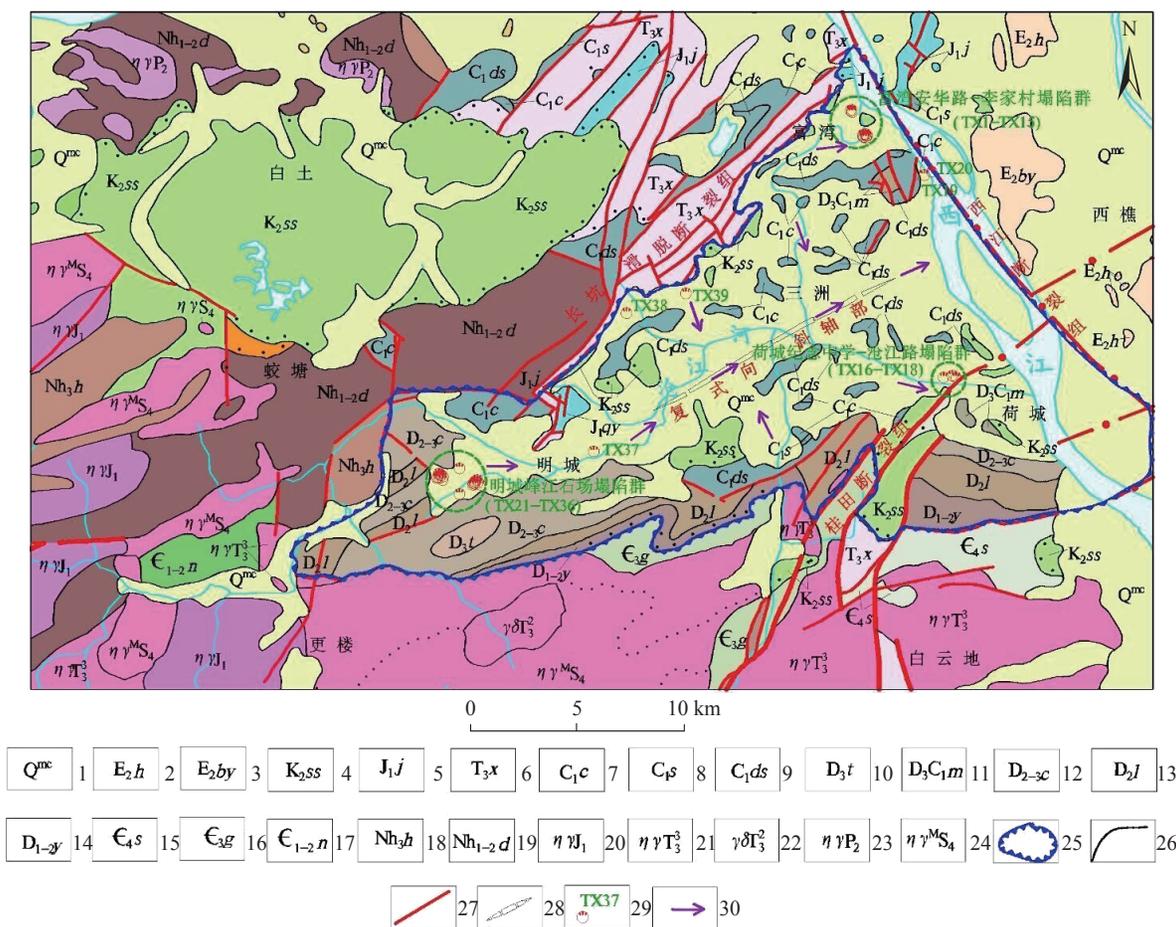


图 1 研究区地质图 (据 1 : 50 万广东省地质图修订)

Fig. 1 Geological map of the study area (According to 1 : 50 000 geological map revision of Guangdong Province)

1—第四系海陆交互相沉积层; 2—古近系华涌组; 3—古近系宝月组; 4—白垩系三水组; 5—侏罗系金鸡组; 6—三叠系小平坝组; 7—石炭系测水组; 8—石炭系石磴子组; 9—石炭系大赛坝组; 10—泥盆系天子岭组; 11—石炭-泥盆系帽子峰组; 12—泥盆系春湾组; 13—泥盆系老虎头组; 14—泥盆系杨溪组; 15—寒武系水石组; 16—寒武系高滩组; 17—寒武系牛角河组; 18—南华系活道组; 19—南华系大蚩山组; 20—侏罗系二长花岗岩; 21—三叠系二长花岗岩; 22—三叠系花岗闪长岩; 23—二叠系二长花岗岩; 24—志留系二长花岗岩; 25—三洲盆地范围; 26—地质界线; 27—断层; 28—向斜轴部; 29—岩溶塌陷点及编号; 30—地下水径流方向

安华路—李家村、荷城纪念中学—沧江路跨线桥和明城峰江石场周边等三个地带,其次零散分布于富湾佛山监狱门口、明城镇谭朗村和八达园大酒店附近地带,具有塌陷群形式集中发生的特点。研究区岩溶塌陷的空间分布与地层岩性、地质构造、覆盖层结构及厚度、地下水活动以及人类工程活动等因素密切相关,其分布规律如下:

3.1.1 空间分布与地层岩性关系

研究区内岩溶塌陷主要发育在早石炭系石磴子组 (C₁s) 和早侏罗系金鸡组 (J₁j) 两种地层内,前者分布于盆地内大部分地区,后者主要分布于盆地北西部富湾一带。其中,石磴子组 (C₁s) 中发育有 22 个,占塌陷总数的 56%,在金鸡组 (J₁j) 中发育有 17 个 (表 2),占塌陷总数的 44%;岩溶塌陷发育所在的岩性主要有角砾状灰

岩、微晶 (泥晶) 灰岩和白云质灰岩三种,其中,角砾状灰岩中发育有 21 个,占塌陷总数的 54%;微晶 (泥晶) 灰岩中发育有 14 个,占塌陷总数的 36%;白云质灰岩中发育有 4 个,占塌陷总数的 10%。由此可知,岩性中灰岩纯度越高、碳酸盐含量越高,加之颗粒越小、与水接触作用面积越大,发生溶蚀作用越大,即碳酸盐含量越高、溶洞越发育、塌陷发育概率越高。

3.1.2 空间分布与地质构造关系

研究区岩溶塌陷主要集中在区域性断裂带和向斜轴部,即在西江断裂组与桂田断裂组沿线以及隐伏复式向斜轴部 (图 1),其中,西江断裂组沿线岩溶塌陷有 17 处、桂田断裂组沿线岩溶塌陷有 3 处、隐伏复式向斜轴部沿线岩溶塌陷有 17 处;其余两处发生在可溶岩与非可溶岩的地质界线附近。

表1 研究区岩溶塌陷基本特征表

Table 1 Basic characteristics of karst collapse in the study area

序号	编号	位置	发灾日期	规模/(m×m×m)			形态 (平面/剖面)	覆盖层/m		诱因	
				长	宽	深		厚度	结构		
1	TX1	富湾李家村开田北侧		22.5	22	7	似圆形/漏斗状	28.00	双层	自然	
2	TX2	富湾西安河内	2005-04-25	直径: 5			圆形/未知*	26.80	双层	自然	
3	TX3	富湾李家村开田东侧		直径: 4.6			圆形/漏斗状	26.80	双层	自然	
4	TX4	富湾李家村开田北东侧	2005-05-08	18	15	7	似圆形/漏斗状	26.80	双层	自然	
5	TX5	富湾李家村开田东南鱼塘底		直径: 3.7			圆形/碟状	24.40	多层	自然	
6	TX6			10	6	3.5	似圆形/未知*	26.80	双层	自然	
7	TX7			直径: 5			圆形/未知*	29.90	双层	自然	
8	TX8	富湾西安河内	2006-03-10 干鱼塘时发现	直径: 4			圆形/未知*	27.60	多层	自然	
9	TX9			0.8	1	1.0	长条形/未知*	33.50	双层	自然	
10	TX10			0.8	1	1.0	长条形/未知*	31.50	多层	自然	
11	TX11	富湾关家村南侧	2005-11-14	直径: 14			—	似圆形/碟状	37.00	多层	钻探
12	TX12	富湾安华路中部	2011-01-13	直径: 30			4~5	似圆形/碟状	41.90	多层	钻探
13	TX13	富湾安华路北侧(6)号楼旁	2011-01-13	直径: 15			1~2	圆形/碟状	31.50	多层	钻探
14	TX14	富湾安华路北侧	2011年1月	直径: 2			0.5	似圆形/碟状	42.00	多层	钻探
15	TX15	富湾官棠村东侧甘蔗地内	1991-08-17	4.6	4	5	长条形/未知*	25.50	多层	钻探	
16	TX16	荷城街道纪念中学升旗广场	2012-09-30	直径: 20			0.2	圆形/碟状	43.80	多层	钻探
17	TX17	荷城街道纪念中学足球场	2012-09-10	直径: 25			1.5	圆形/碟状	43.80	多层	钻探
18	TX18	荷城街道沧江路跨线桥处	2008-03-06	直径: 3.2			3	似圆形/漏斗状	35.70	多层	钻探
19	TX19	富湾佛山监狱门口	2011-01-09	直径: 4			1.5	似圆形/坛状	30.20	多层	钻探
20	TX20	富湾佛山监狱门口以西西江河床	2011-01-09发现	直径: 3.2			3	圆形/未知*	30.20	多层	自然
21	TX21	明城西部滄江村西侧田间	2012-04-28	3.7	3.3	3	似圆形/漏斗状	11.90	多层	采矿抽水	
22	TX22	明城西部洞心村村口田间	2003-03-19	直径: 4			1.65	圆形/漏斗状	11.90	单层	采矿抽水
23	TX23	明城西部洞心村村口民房旁	2002年10月	直径: 2			1.5	圆形/漏斗状	11.90	单层	采矿抽水
24	TX24	明城西部三桠村东侧田间	2010-05-21	4			2	圆形/漏斗状	10.90	多层	采矿抽水
25	TX25	明城西部三桠村东侧水泥路	2010-06-13	10.5	7.3	2.8	长条形/坛状	10.90	多层	采矿抽水	
26	TX26	明城西部三桠村东南侧田间	2010-06-20	直径: 3			—	圆形/漏斗状	10.90	多层	采矿抽水
27	TX27	明城西部黎山村东侧水泥路	2010年7月	直径: 4			2	圆形/坛状	10.90	多层	采矿抽水
28	TX28	明城西部三桠村东侧	2010-08-19	直径: 4			1.2	圆形/坛状	10.90	多层	采矿抽水
29	TX29	明城西部三桠村南东侧	2011年5月	3	2	1.5	椭圆形/坛状	10.90	多层	采矿抽水	
30	TX30	明城西部黎山村南侧田间	2011-09-16	直径: 2			1.2	圆形/坛状	10.90	多层	采矿抽水
31	TX31	明城西部黎山村东侧	2012-03-05	直径: 1.5			0.8	圆形/漏斗状	10.90	多层	采矿抽水
32	TX32	明城西部朗心村北侧鱼塘边	2011-06-23	5.5	4	2.5	椭圆形/漏斗状	10.90	单层	采矿抽水	
33	TX33	明城西部下高朗东侧田间	2012-01-07	直径: 2			6	圆形/圆柱状	5.00	双层	采矿抽水
34	TX34	明城西部巷口村西侧田间	2009-09-16	直径: 2			1.2	圆形/未知*	12.50	单层	采矿抽水
35	TX35	明城西部朗心村南侧田间	2002-10-18	直径: 2			1	圆形/漏斗状	11.90	单层	采矿抽水
36	TX36	明城西部鲤江村南侧田间	2012-06-25	直径: 2			1.1	圆形/漏斗状	11.90	双层	采矿抽水
37	TX37	明城东部八达园大酒店东侧	2008-06-29	4.6	3.8	2	似圆形/漏斗状	28.60	单层	自然	
38	TX38	明城北部新岗陈村南侧	2008-10-16	3	2.6	1.1	似圆形/圆柱状	11.60	单层	自然	
39	TX39	明城谭朗村委海涌村西北侧	2016-10-11	7.5	4.3	1.8	椭圆形/坛状	8.00	单层	养殖抽水	

注: 未知*指的是因缺资料查证导致未知。

3.1.3 空间分布与覆盖层厚度及其结构关系

由图4可知, 研究区内岩溶塌陷主要发生覆盖层厚度10~30 m区域, 因为覆盖层过厚一般会存在多层隔水层或过厚隔水层不利于地下水径流交换侵蚀作用, 同时过厚覆盖层形成较大垂向压力, 易致塌从而影响土洞的进一步发展扩大; 而覆盖层过薄则易受外界因素影响

在土洞刚开始发育时已被破坏无法进一步发展扩大, 难以形成一定规模的土洞而引发岩溶塌陷。

由表1可知, 研究区内岩溶塌陷发生所在覆盖层结构以多层结构为主, 其次为双层结构, 再者为单层结构, 主要由于复杂的土体结构一方面能够为细小颗粒的运移、土洞形成与扩展提供了空间条件, 另一方面能够为



图 2 塌陷坑剖面形态特征示例

Fig. 2 The profile morphological characteristics of the study area

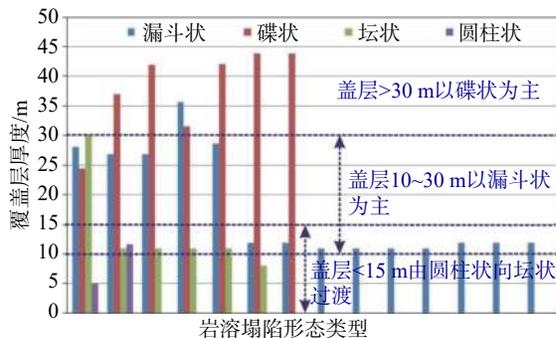


图 3 研究区岩溶塌陷剖面形态特征与覆盖层厚度关系图

Fig. 3 The relationship between the profile morphological characteristic and the overburden thickness

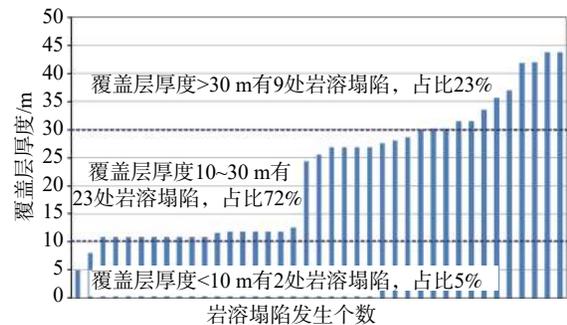


图 4 研究区岩溶塌陷发生数量与覆盖层厚度关系图

Fig. 4 The relationship between the number of karst collapse and the overburden thickness in the study area

形成土洞提供了物质基础。

3.1.4 空间分布与地下水迳流关系

由图 1 可知, 研究区内岩溶塌陷主要发生在沿着地下水强迳流带、江河两侧沿岸地下水交换频繁区域和矿山排水疏干区。地下水强迳流带和矿山排水疏干区可溶岩受到地下水强烈冲蚀作用, 易形成或扩大溶洞, 同时溶洞上覆土层小颗粒不断被水流冲蚀作用易形成土洞, 从而引发岩溶塌陷; 江河两侧沿岸地下水交换频繁, 长期地下水位变动, 在水力梯度作用下易产生潜蚀作用从而引发岩溶塌陷。

3.1.5 空间分布与人类工程活动关系

由表 1 可知, 研究区内人为诱发的岩溶塌陷有 26 处, 占塌陷总数的 67%。由图 1 可知, 研究区内岩溶塌陷主要分布在人类工程活动密集的城镇、工业区、新城、矿山开发区、道路沿线, 人类工程活动影响因素主要有钻探施工、桩基施工、地下工程建设、矿山开发等, 人类工程活动中产生的振动、揭穿岩溶顶板、降水等作用导致上覆岩土体失稳塌落形成岩溶塌陷。

3.2 时间分布规律

由表 3 可知, 研究区内岩溶塌陷主要集中发生在 2005—2006 年与 2010—2012 年两个时期, 即为研究区

表 2 研究区金鸡组地层中岩溶塌陷点岩土体特征表
Table 2 soil Characteristics of karst collapse in Jinji group in the study area

塌陷编号	塌陷点岩土体特征
TX1	①覆盖层土体自上而下分别为: 粉质黏土(3.90 m)、粉土(5.30 m)、细砂(17.30 m)、残坡积土(1.50 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX2	①覆盖层土体自上而下分别为: 粉质黏土(3.80 m)、含淤质粉土(2.70 m)、细砂(17.00 m)、砾砂(0.90 m)、残坡积土(2.40 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX3	①覆盖层土体自上而下分别为: 粉质黏土(3.90 m)、粉砂(11.10 m)、粉质黏土(2.20 m)、残坡积土(9.60 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX4	①覆盖层土体自上而下分别为: 粉质黏土(3.90 m)、粉砂(11.10 m)、粉质黏土(2.20 m)、残坡积土(9.60 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX5	①覆盖层土体自上而下分别为: 粉质黏土(3.90 m)、淤泥质土(6.40 m)、粉砂(4.20 m)、细砂(0.90 m)、粉土(1.80 m)、残坡积土(7.20 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX6	①覆盖层土体自上而下分别为: 粉质黏土(3.80 m)、含淤质粉土(2.70 m)、细砂(17.00 m)、砾砂(0.90 m)、残坡积土(2.40 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX7	①覆盖层土体自上而下分别为: 粉质黏土(2.60 m)、淤质粉土(3.40 m)、细砂(8.60 m)、粉砂(3.90 m)、残坡积土(11.40 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX8	①覆盖层土体自上而下分别为: 粉土(1.60 m)、粉砂(2.00 m)、淤泥质土(9.90 m)细砂(5.00 m)、粉质黏土(4.90 m)、残坡积土(4.20 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX9	①覆盖层土体自上而下分别为: 粉质黏土(5.20 m)、淤泥(1.80 m)、粉细砂(8.80 m)、淤泥质土(13.00 m)、粉细砂(4.70 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX10	①覆盖层土体自上而下分别为: 粉土(2.20 m)、细砂(3.50 m)、粉砂(1.70 m)、细砂(1.90 m)、淤泥质土(12.20 m)、淤质粉土(1.50 m)、细砂(7.00 m)、残坡积土(1.50 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX11	①覆盖层土体自上而下分别为: 粉质黏土(6.70 m)、粉土(2.40 m)、细砂(9.40 m)、淤泥质土(0.90 m)、细砂(2.20 m)、粉质黏土(1.60 m)、粉土(3.80 m)、残坡积土(10.00 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX12	①覆盖层土体自上而下分别为: 人工填土(1.80 m)、粉质黏土(1.50 m)、淤泥(7.20 m)、粗砂(13.10 m)、中砂(18.30 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX13	①覆盖层土体自上而下分别为: 人工填土(4.00 m)、粉质黏土(0.80 m)、淤泥(7.00 m)、中砂(5.40 m)、淤泥(9.00 m)、中砂(5.30 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX14	①覆盖层土体自上而下分别为: 人工填土(3.70 m)、淤泥(4.50 m)、粉砂(1.80 m)、淤泥(3.80 m)、粉砂(4.80 m)、中砂(13.70 m)、粉砂(9.70 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX18	①覆盖层土体自上而下分别为: 人工填土(7.50 m)、粉质黏土(5.50 m)、淤泥质土(5.00 m)、粉砂(2.80 m)、粗砂(3.20 m)、粉土(1.00 m)、粗砂(0.50 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX19	①覆盖层土体自上而下分别为: 人工填土(9.50 m)、粉质黏土(1.40 m)、含砂粉土(2.50 m)、中砂(0.40 m)、粉土(0.70 m)、含砂粉土(3.00 m)、粉质黏土(5.30 m)、粉土(3.20 m)、粗砂(4.20 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩
TX20	①覆盖层土体自上而下分别为: 人工填土(9.50 m)、粉质黏土(1.40 m)、含砂粉土(2.50 m)、中砂(0.40 m)、粉土(0.70 m)、含砂粉土(3.00 m)、粉质黏土(5.30 m)、粉土(3.20 m)、粗砂(4.20 m); ②下伏基岩为金鸡组角砾状灰岩

表 3 研究区不同时段岩溶塌陷发生频数表

Table 3 Frequency of karst collapse in different periods in the study area

时段	岩溶塌陷发生次数/处		
	总数	自然塌陷	人为塌陷
1995年以前	1	1	—
1995—2000年	0	—	—
2000—2005年	9	5	4
2005—2010年	14	6	8
2010—2013年	14	1	13
2013年以后	1	—	1

社会发展最快的时段, 其中, 2005—2006 年期间发生岩溶塌陷过 11 处、占塌陷总数的 28%, 主要与极端天气条件和富湾安华路钻探施工引发有关, 2010—2012 年期间发生岩溶塌陷过 19 处、占塌陷总数的 49%, 主要与明城镇峰江石场开采大量抽排水导致周边长时间形

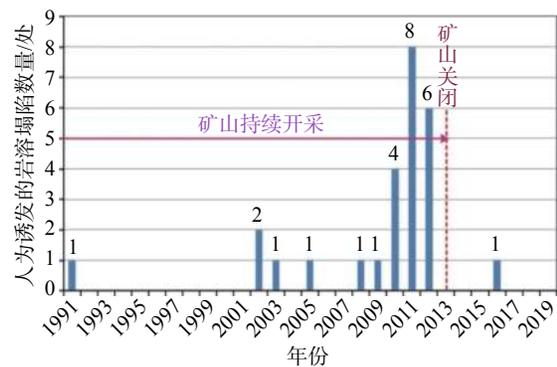


图 5 研究区人为诱发的岩溶塌陷数量与时间关系图

Fig. 5 The relationship between the quantity of karst collapse and time of induced by human activities in the study area

成地下水疏干区有关; 由图 5 可知, 自 2013 年明城峰江石场关闭后, 其周边岩溶塌陷地质灾害逐渐减少。

由图 6 可知, 研究区自然诱发的岩溶塌陷总体呈现

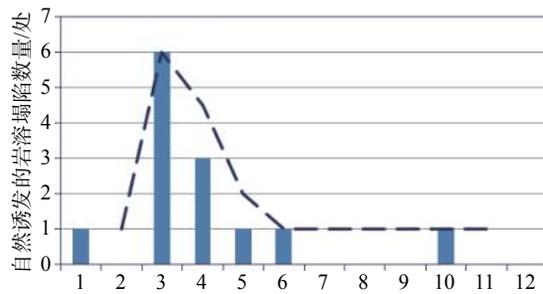


图 6 研究区自然诱发的岩溶塌陷数量与时间关系图

Fig. 6 The relationship between the natural karst collapse quantity and time in the study area

季节性规律, 主要集中在 3—6 月的汛期期间, 共计有 13 个, 约占自然诱发的岩溶塌陷总数的 85%, 尤其是在旱涝交替期间(即汛期与非汛期), 主要与该期间地下水位大幅度变化有关。

4 结论

(1) 研究区岩溶塌陷规模以小型为主, 其平面形态以圆形、似圆形为主, 其剖面形态以漏斗状居多, 并且剖面形态随覆盖层厚度增大总体呈现由圆柱状—坛状—漏斗状—碟状的变化规律。其中, 覆盖层厚度小于 15 m 时岩溶塌陷剖面形态主要由圆柱状向坛状过渡, 10~30 m 时其剖面形态以漏斗状为主, 超过 30 m 时其剖面形态以碟状为主。

(2) 空间上岩溶塌陷的分布受地层岩性、地质构造、覆盖层厚度及结构、地下水迳流和人类工程活动等所影响。碳酸盐含量越高、溶洞越发育、塌陷发育概率越高; 岩溶塌陷主要集中在区域性断裂带和向斜轴部; 覆盖层厚度 10~30 m 区域岩溶塌陷发生最多; 岩溶塌陷主要发生在地下水强迳流带上、江河两侧沿岸地下水交换频繁区域、矿山排水疏干区和人类工程活动密集区。

(3) 时间上人为塌陷的发生主要与采矿活动和钻探施工时间关系密切, 而自然塌陷主要在旱涝交替期间(即 3—4 月份), 因此, 在该期间做好岩溶塌陷地质灾害预防尤为关键。

致谢: 本文经本单位刘建雄教授级高工审阅指正, 特此表示感谢!

参考文献 (References):

[1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于佛山市城市总体规划的通知(国办函〔2016〕107号)[EB]. 2016. [General Office of the State Council. Notice on the overall planning of Foshan City[EB]. 2016.(in Chinese)]

[2] 佛山市统计局, 国家统计局佛山调查队. 2019年佛山市

国民经济和社会发展统计公报[R]. 2020. [Foshan Municipal Bureau of Statistics, Foshan investigation team of National Bureau of Statistics. National economic and social development statistics bulletin of Foshan in 2019[R]. 2020.(in Chinese)]

- [3] 广东省佛山地质局. 佛山市城市地质调查报告(2010年度)[R]. 2011. [Foshan Geological Bureau of Guangdong Province. Urban geological survey report of Foshan City(2010year)[R]. 2011.(in Chinese)]
- [4] 广东省佛山地质局. 广东省佛山市南海区大沥镇黄岐海北片区地质灾害勘查报告[R]. 2009. [Foshan Geological Bureau of Guangdong Province. Geological hazard investigation report of Huangqi Haibei area, Daili Town, Nanhai District, Foshan City, Guangdong Province[R]. 2009.(in Chinese)]
- [5] 广东佛山地质工程勘察院. 广东省佛山市高明区荷城街道富湾安华路地面塌陷地质灾害勘查报告[R]. 2011. [Guangdong Foshan Geological Engineering Survey Institute. Geological disaster investigation report of ground collapse of Fuwan Anhua Road, Hecheng Street, Gaoming District, Foshan City, Guangdong Province[R]. 2011.(in Chinese)]
- [6] 董好刚, 黄长生, 陈雯, 等. 珠江三角洲环境地质控制性因素及问题分析[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 539-549. [DONG Haogang, HUANG Changsheng, CHEN Wen, et al. The controlling factors of environment geology in the Pearl River Delta Economic Zone and an analysis of existing problems [J]. Geology in China, 2012, 39(2): 539-549. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 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)]
- [8] 蒙彦, 郑小战, 雷明堂, 等. 珠三角地区岩溶分布特征及发育规律[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 746-751. [MENG Yan, ZHENG Xiaozhan, LEI Mingtang, et al. Karst distribution and development in the Pearl River Delta [J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(5): 746-751. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张永定, 张澄博, 李洪艺, 等. 广州市西北区岩溶分布规律浅析[J]. 热带地理, 2011, 31(3): 257-261. [ZHANG Yongding, ZHANG Chengbo, LI Hongyi, et al. Distribution characteristics of karst in northwestern Guangzhou [J]. Tropical Geography, 2011, 31(3): 257-261. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘江龙, 刘会平, 吴湘滨. 广州市地面塌陷的形成原因与时空分布[J]. 灾害学, 2007, 22(4): 62-65. [LIU Jianglong, LIU Huiping, WU Xiangbin. Mechanism and temporal-spatial distribution of ground collapse in Guangzhou [J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(4): 62-65. (in Chinese with English abstract)]

- [11] 周长松, 邹胜章, 朱丹尼, 等. 广昆铁路复线秀宁隧道大皮坡—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)]
- [12] 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)]
- [13] 蒙彦, 黄健民, 贾龙. 基于地下水动力特征监测的岩溶塌陷预警阈值探索——以广州金沙洲岩溶塌陷为例 [J] . 中国岩溶, 2018, 37(3): 408–414. [MENG Yan, HUANG Jianmin, JIA Long. Early warning threshold of sinkhole collapse based on dynamic characteristics from groundwater monitoring: a case study of Jinshazhou of Guangzhou, China [J] . Carsologica Sinica, 2018, 37(3): 408–414. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 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, 2009. [ZHENG Xiaozhan. Research on Genetic Mechanism and Risk Evaluation of the Karst Collapse in Guanghua Basin [D] . Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 包全坡. 珠三角岩溶地区桥梁桩基成孔技术 [J] . 江苏建筑, 2012(6): 75–77. [BAO Quanpo. Bridge pile foundation drilling technology in Karst area of Pearl River Delta [J] . Jiangsu Construction, 2012(6): 75–77. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 杜均恩, 马超槐, 张国恒. 广东长坑金、银矿成矿特征 [J] . 广东地质, 1993(3): 1–8. [DU Jun'en, MA Chaohuai, ZHANG Guoheng. Metallogenic characteristics of gold and silver deposits in Changkeng, Guangdong Province [J] . Guangdong Geology, 1993(3): 1–8. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 罗锡宜, 韩庆定, 邹杰, 等. 佛山市高明区西江新城及周边岩溶发育规律探讨 [J] . 华南地震, 2017, 37(2): 34–38. [LUO Xiyi, HAN Qingding, ZOU Jie, et al. Study on Karst development law of xijiang new town and surrounding area in Gaoming district of Foshan [J] . South China Journal of Seismology, 2017, 37(2): 34–38. (in Chinese with English abstract)]

(上接第 83 页)

- [11] 胡世春. 西安地铁深基坑降水及降水引起的地表沉降分析 [D] . 西安: 西安建筑科技大学, 2014. [HU Shichun. Analysis of ground settlement caused by precipitation and precipitation Xi'an subway deep foundation pit [D] . Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [12] POULOS H G. A practical design approach for piles with negative friction [J] . Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering, 2008, 161(1): 19–27.
- [13] 汤光明. 悬挂式止水帷幕对深基坑降水的影响研究 [D] . 西安: 西安建筑科技大学, 2011. [TANG Guangming. The research of suspended waterproof curtain to the influence of deep foundation pit dewatering [D] . Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 等. 华北平原地下水驱动下的地面沉降现状与研究展望 [J] . 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 162-171. [GUO Haipeng, LI Wenpeng, WANG Liya, et al. Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 162-171. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 宋成年, 邓洋, 刘德兵, 等. 基坑不同水位降速下土石围堰松散粘质边坡渗流特性与开挖稳定性研究 [J] . 水电能源科学, 2021, 39(2): 69-73. [SONG Chengnian, DENG Yang, LIU Debing, et al. Study on seepage characteristics and excavation stability of loose cohesive slope of earth rock cofferdam under different dewatering speed of foundation pit [J] . Water Resources and Power, 2021, 39(2): 69-73. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张哲斐, 冯晓腊, 蔡兵华, 等. 深基坑多层承压含水层中混合井降水技术优化研究 [J] . 安全与环境工程, 2021, 28(1): 85-94. [ZHANG Zhefei, FENG Xiaola, CAI Binghua, et al. Optimization of precipitation technology of mixed wells in multi-layer confined aquifers of deep foundation pits [J] . Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(1): 85-94. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李瑛, 陈东, 刘兴旺, 等. 悬挂式止水帷幕深基坑减压降水的简化计算方法 [J] . 岩土力学, 2021, 42(3): 826-832. [LI Ying, CHEN Dong, LIU Xingwang, et al. Simplified calculation method of decompression dewatering for deep excavation with suspended waterproof curtain [J] . Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 826-832. (in Chinese with English abstract)]