

张宗胜. 佛山黄岐海北片区岩溶地面塌陷地质灾害成因与趋势分析[J]. 中国岩溶, 2022, 41(6): 880-894.

DOI: 10.11932/karst20220603

佛山黄岐海北片区岩溶地面塌陷地质 灾害成因与趋势分析

张宗胜

(广东省佛山地质局, 广东 佛山 528000)

摘要: 佛山市南海区大沥镇黄岐海北片区地处珠江三角洲北部广花盆地边缘地带, 第四纪软土、砂土以及隐伏岩溶发育, 早期因区内人类工程活动强烈, 诱发了群发性岩溶地面塌陷。文章在分析地质环境概况的基础上, 研究了区内岩溶地面塌陷的发育特征和成因机理, 认为溶洞土洞发育是先决条件, 导水断裂发育是必要条件, 因施工引发的地下水位下降是主要触发因素, F1断裂带附近仍具备发生岩溶塌陷的可能性, 控制地下水水位标高在-3.0 m以内, 地下水水位波动范围在1.5 m以内, 可以大幅度降低岩溶塌陷发生概率, 可以以此作为预警报警阈值。研究结果可以为佛山市城镇化建设过程中岩溶地面塌陷防治提供依据, 也可以为其他类似地区防灾减灾提供借鉴。

关键词: 岩溶地面塌陷; 成因机制; 趋势分析; 施工降水; 导水断裂; 佛山市

中图分类号: P642.26 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2022)06-0880-15

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

佛山市地处粤港澳大湾区腹地, 是广东省第三大城市, 经济发达, 2019年全市国民生产总值已超万亿元^[1], 人口密度大, 城镇化率高, 城市建设发展快速, 是珠三角地区西翼经贸中心和综合交通枢纽^[2]。近年来, 随着城市建设加快, 佛山市出现了大量的地质环境问题, 2005-2012年, 高明区明城镇因明城石场地下开采灰岩每年均引发地面塌陷, 造成大量村道破坏和鱼塘、耕地损毁; 2008年, 南海区大沥镇、里水镇因武广客运专线建设引发了多处地面塌陷和大面积地面沉降, 造成道路、学校、物流中心、工厂、酒店及民房损坏, 直接经济损失近2亿元^[3]; 2009年, 南海区桂城街道, 因广佛地铁建设, 造成夏北片区大面

积地面沉降, 厂房墙体开裂、地面变形和路面塌陷, 严重影响了工厂的正常生产与道路通行^[4]; 2011年高明区富湾安华路, 因钻探施工振动, 导致路面塌陷和楼房倾斜, 引发了社会恐慌并被媒体报道^[5]; 2011年顺德区乐从镇因罗浮宫家具城深基坑工程引发沙滘东村大范围地面沉降, 导致民房倾斜、开裂, 造成村民恐慌^[6]; 2015年顺德区乐从镇因佛山新城深基坑开挖引发小涌村大范围地面沉降, 导致民房倾斜、开裂、路面沉降, 造成村民恐慌^[7]; 2017年禅城区南庄镇因地铁2号线盾构施工引发瓷海国际大面积地面沉降^[8]。可见, 佛山城市地质环境问题带来的安全隐患不可忽视, 尤其是岩溶地面塌陷, 已成为威胁佛山市乃至珠江三角洲岩溶区城市环境安全的主要地质灾害^[9], 给地方经济和社会高质量发展带来了严重的负

资助项目: 佛山市南海区大沥镇黄岐海北片区地质灾害勘查(X20090203); 佛山市城市地质调查(2010204); 佛山市地质灾害监测预警与应急指挥平台(X20190436)

作者简介: 张宗胜(1967-), 男, 高级工程师, 从事地质灾害监测预警与防治研究工作。E-mail: 641970838@qq.com。

收稿日期: 2022-03-30

面影响及财产损失,需要高度关注并加强防范。

前人对珠三角地区岩溶地面塌陷相关研究主要以区域性为主,如1:5万岩溶塌陷地质灾害综合调查^[10-12];在广花盆地、肇庆盆地、深圳龙岗和三洲盆地等典型地区以岩溶发育分布规律^[13-17]、岩溶塌陷成因机理^[18]、岩溶塌陷监测预警与风险评价^[19-20]和工程建设防灾减灾^[21]等方向为主。

本文依托“佛山市南海区大沥镇黄岐海北片区地质灾害勘查”、“佛山市城市地质调查(2010年度)”和“佛山市地质灾害监测预警与应急指挥平台”项目,以佛山市南海区大沥镇黄岐海北片区为研究区,系统收集区内地质环境和历史岩溶塌陷地质灾害资料,并在此基础上对岩溶地面塌陷发育特征、形成机理、发展趋势进行了总结分析,对区内岩溶地面塌陷预警作了尝试性的讨论,可以为佛山市岩溶地面塌陷防治和其他类似地区防灾减灾提供依据。

1 研究区概况

研究区位于佛山市南海区大沥镇黄岐海北片区泌冲村东部一带,地处广花盆地南缘,珠江三角洲北部丘陵区和平原区过渡地带,区内地势平坦,交通便利。近年来,区内工程施工,如高铁、地铁、地下采灰岩矿等人类工程活动强烈,诱发了大量的岩溶地面塌陷和地面沉降,尤其是2008年2月至2009年9月间,受灾范围达1.2 km²,区内先后发生岩溶地面塌陷15处,地面沉降量最大达87 cm,塌陷和沉降造成黄岐二中、物流中心、工厂及民房出现不同程度损坏,直接受影响人数2 000多人,直接经济损失近2亿元。

研究区属亚热带季风气候,表现为春湿、夏长酷热、秋冬暖而无霜。研究区年均气温为21.9℃,年降水总量为1 400~1 900 mm,多年平均降水量1 613.5 mm,降雨集中分布在4-9月份,约占降雨总量的80%,多年平均蒸发量1 153 mm。

1.1 地层岩性

研究区仅出露全新统桂洲组(Q_hg)(图1),但隐伏地层有下石炭统石磴子组(C₁s)与测水组(C₁c)、上石炭统壶天组(C₂h)、下侏罗统金鸡组(J₁j)、上白垩统大塍山组(K₂dl)和第四系残积层(Q^{el})(图2)。研究区基岩埋深浅,一般为-10.60~-24.0 m,局部深达

-40.8 m,基岩面起伏变化较大,古地貌总体为一北东向展布的凹槽,局部为古岩溶漏斗。各地层单位特征概述如下表1。

1.2 地质构造

研究区发育1条由5组断层组成的断裂带。属于广从断裂带南西方向延伸部分的沙贝断裂带,自北西向南东编号依次为F1-1-F1-5(图2),此外该组断裂还发育次级分叉复合小断层,其断裂特征概述如表2。各组断裂沿东北向断续分开、复合贯通。受断裂影响,带内构造岩主要为构造角砾岩、碎裂岩、硅化碎裂岩等,岩石固结性差,松散、破碎,为地下水运移提供良好通道,也为溶洞发育提供了有利的条件,继而控制区内的岩溶发育走向。

1.3 工程地质

根据沉积年代、成因、岩性及物理力学性质差异,将研究区岩土体自上而下划分为15个工程地质层,其中第(1)层为人工填土层,第(2)~(8)为冲淤积层,第(9)层为残积层,第(10)~(15)为基岩,各层特征概述如表3。

由表3可知,研究区岩土体分层多,区域变化大,岩土工程地质条件复杂。其中,第(2)、(5)层为淤泥和淤泥质土,属高压缩性、含水量高、高孔隙比和低强度、低渗透性软土,工程性质极差,空间上主要分布于研究区建设大道以北和黄岐二中一带,厚度一般大于4 m,是地面沉降的孕灾载体;第(4)与(7)、(8)层为砂土,是较好的含水和透水层,第(4)层砂土在研究区西南部黄岐二中一带形成一条东西向较厚的分布区;第(9)层残积土,空间层位不稳定,主要分布于紫兰蒂内衣有限公司、武广客运专线DK2196+000~+300和DK2195+700及黄岐二中等地,成分杂,与上层砂土一起,沿灰岩基岩起伏面形成较好的岩面流水通道。隐伏灰岩基岩面起伏变化大,溶蚀现象发育,特别是敦豪物流中心一带,岩面钻进漏水严重。

1.4 水文地质

根据地下水赋存介质条件,将研究区地下水划分为松散岩类孔隙水、覆盖型碳酸盐岩类裂隙溶洞水、覆盖型基岩裂隙水和覆盖型红层裂隙水四种类型,各类地下水特征概述如表4。

其中松散岩类孔隙水发育1~2个含水层,皆为全新统海冲积相砂层(Q^{mc})。空间上,上部含水层连

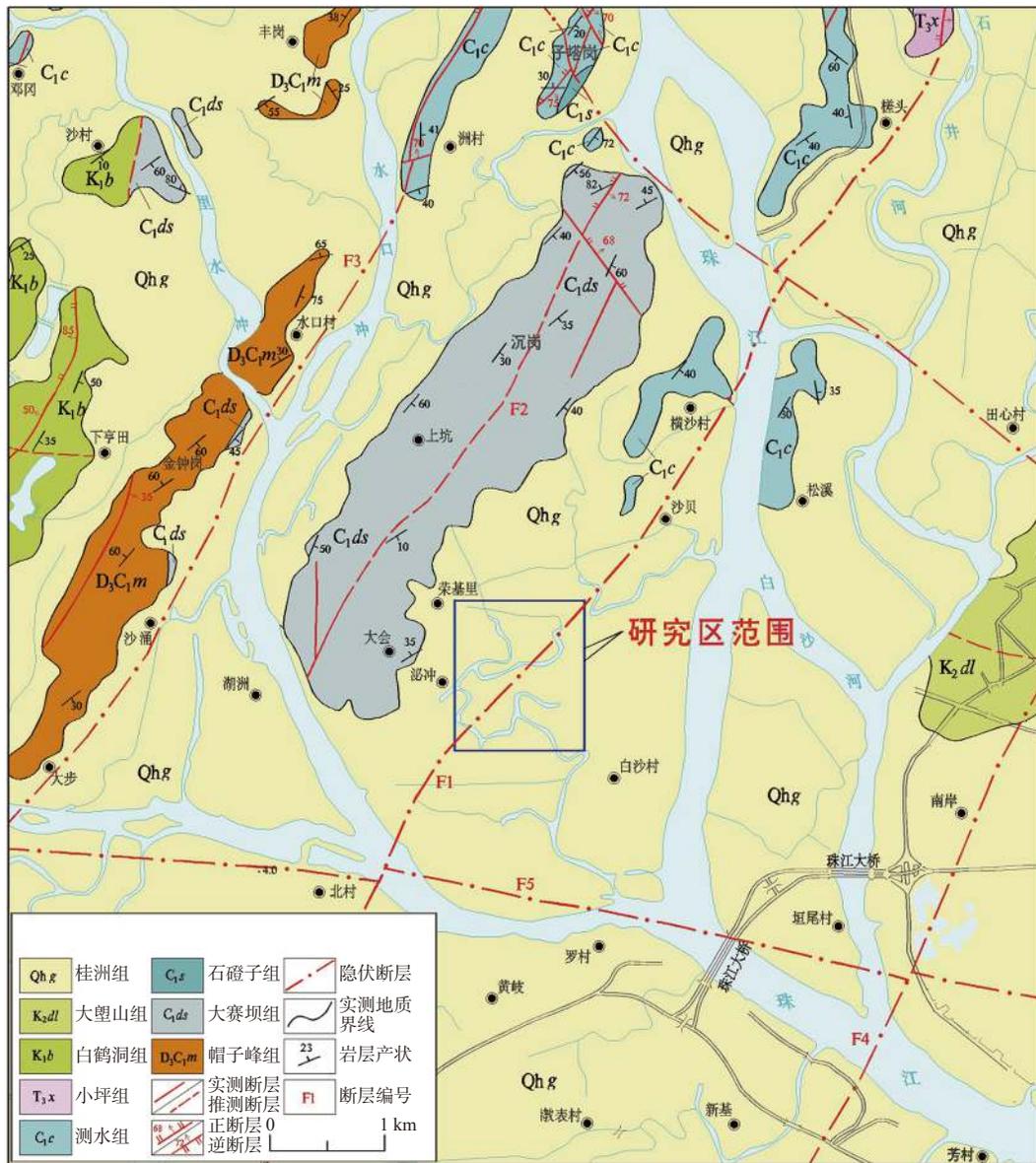


图 1 研究区区域地质概况

Fig. 1 Regional geological overview of the study area

续性较差,主要分布于紫兰蒂内衣有限公司、黄歧二中及其南侧两处;下部含水层分布于紫兰蒂内衣有限公司、黄歧二中及南侧、研究区东南角一带、犇力电子厂一带,展布大致与断裂走向一致但不连续分布,而多数下部含水层的底部即为第(9)层残积土,此为残积土发育土洞提供水力条件。此外,研究区武广铁路北段局部地段出现基岩顶层即为下部含水层,这又直接为底部基岩及断裂带提供了岩土之间的地下水径流通道。

覆盖型碳酸盐岩类裂隙溶洞水呈北东向条带状分布于研究区内中部,受上部松散岩类孔隙水的赋存分布,基岩构造的展布、破碎程度、侵蚀基准面,

以及地下水循环条件的控制,表现出鸡组(Jj)灰岩质砾岩富水性最好,壶天灰岩次之,石磴子组灰岩更次之,而富水性又是岩溶发育的先决条件。

2 岩溶发育特征及岩溶地面塌陷概况

2.1 土洞发育特征

研究区内共收集 266 个钻孔,其中有 16 个钻孔揭露到土洞,见洞率为 6.35%。平面上,土洞自西南向东北沿断裂带呈串珠状分布(图 2),土洞埋藏较浅,标高在-8.85~ -34.79 m,大小悬殊,洞高 0.4~ 4.68 m。土洞中,无充填的有 4 个,其余均为半充填,充填物

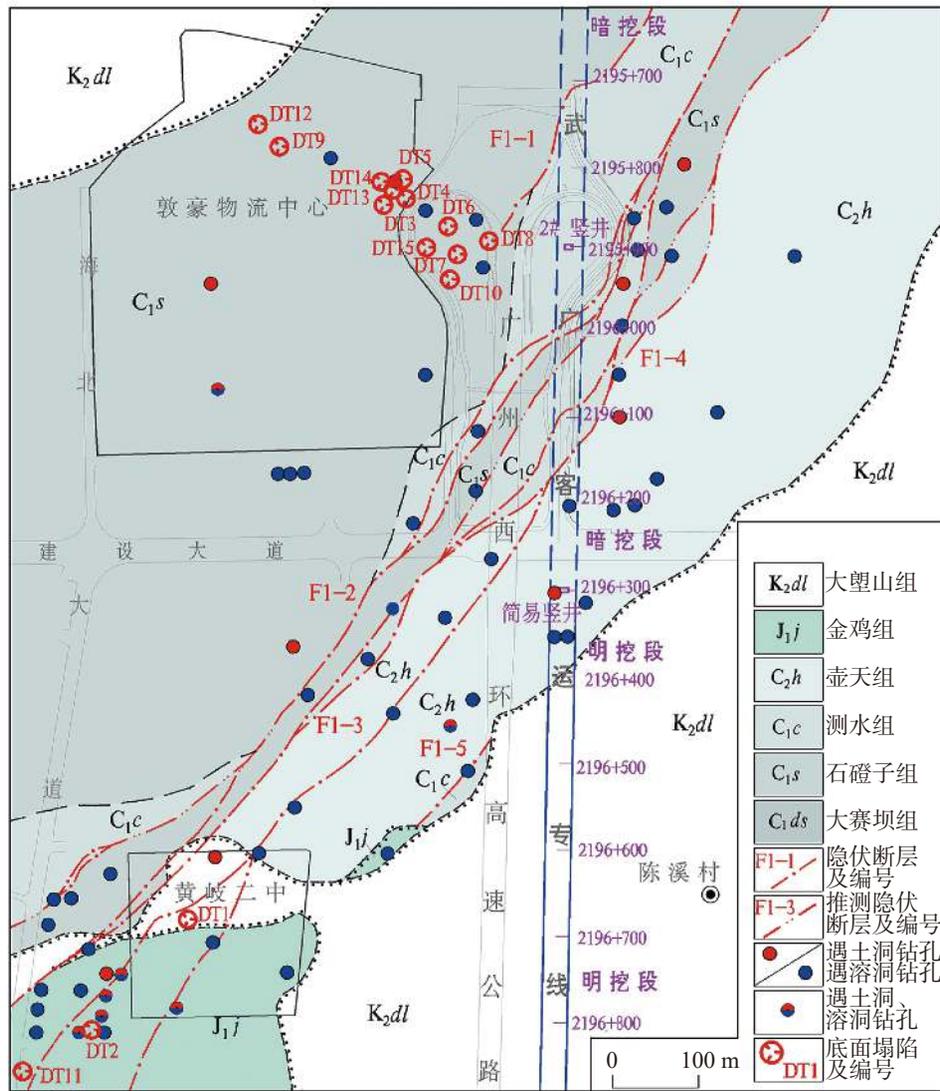


图 2 研究区基岩地质与岩溶地面塌陷分布图

Fig. 2 Distribution of bedrock geology and karst ground collapse in the study area

表 1 研究区地层单位特征概述

Table 1 Characteristics of stratigraphic unit in the study area

地质年代	地层单位(代号)	岩性组合特征
第四纪全新世—晚更新世	桂洲组(Q _{kg}) 残积层(Q ^{el})	淤泥、淤泥质土,黏土、粉质黏土、粉砂、细砂、中砂、粗砂 黏性土、砂土,含碎石,局部发育土洞
白垩纪晚白垩世	大塍山组(K _{2dl})	棕红色、紫红色砂砾岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩,底部为复成份砾岩,夹石膏
侏罗纪早侏罗世	金鸡组(J _{1j})	灰岩质砾岩,砾石成份为浅灰色、灰色、紫红色灰岩,次圆状,砾石大小1~6 cm,红色钙质胶结,该岩层溶洞十分发育
石炭纪晚石炭世	壶天组(C _{2h})	灰色、浅灰色,厚层状灰岩、生物碎屑灰岩、白云质灰岩,该岩层溶洞极其发育
石炭纪早石炭世	测水组(C _{1c})	深灰色、黄褐色粉砂岩、砂岩、泥岩及黑色炭质页岩为主,夹透镜状灰岩及煤线,该岩层发育少量溶洞
	石磴子组(C _{1s})	深灰色、灰黑色灰岩、白云质灰岩、生物碎屑灰岩,夹少量炭质页岩、砂岩,灰岩缝合面发育有炭质薄膜,该岩层溶洞极其发育

有淤泥、黏粒、碎石等。从土洞的分布层位来说,分布第四系底部之黏土层的有 5 个,分布残积土层的

有 10 个,而分布在测水组(C_{1c})强风化泥质粉砂岩和灰岩交界处的仅有 1 个,说明残积土是土洞的主要

表2 研究区断裂特征概述

Table 2 Overview of fracture characteristics in the study area

断裂带名称	断层组	断层特征概述
广从断裂带 沙贝断裂	F1-1断层	该断层向北东方向延伸;据武广客运专线隧道开挖工作面地质调查记录资料显示,构造岩为黑色强风化炭质页岩,分支断层较多,围岩走向与隧道轴线的夹角变化大,由0°~70°,结构面间距小于0.2 m或0.2~0.4 m,组数大于4组
	F1-2断层	该断层向南西、北东方向延伸,两端各有分支断层与F1-3复合;构造岩为构造角砾岩、硅化碎裂岩、碎裂岩,岩石固结差,较松散,该断层具有多期活动特征
	F1-3断层	该断层向南西、北东方向延伸,在中段及西南端有分支断层与F1-2复合;据武广客运专线隧道开挖工作面地质调查记录资料显示,断层带为碎石带,岩石风化严重,围岩走向与隧道轴线的夹角变化大,由0°~70°,结构面间距小于0.2 m或0.2~0.4 m,组数大于4组;构造岩为硅化碎裂岩、构造角砾岩,岩石固结性差,破碎、较松散
	F1-4断层	该断层向南西分叉延伸,向北东方向与F1-3复合;下石炭统石磴子组(C _{1s})含炭质灰岩逆冲于白垩系褐红色砂岩之上,灰岩发育磨砾岩,红层泥岩片理化,岩芯强烈挤压破碎,构造岩为硅化碎裂岩,岩石强烈破碎
	F1-5断层	该断层构造岩为构造角砾岩,角砾为1~5 cm,原岩为炭质泥岩、泥灰岩,岩石固结差,较松散

表3 研究区岩土体特征概述

Table 3 Characteristics of rock and soil mass in the study area

地层带号	层序及岩性	土体/岩体特征表述	备注
Q ^{ml}	(1)素填土	全分布,厚度0.80~6.10 m;紫红色、灰黄色,黏性土为主,含砂粒,局部见少量碎石、瓦片、砖块,稍经压实或松散。	透水性弱
	(2)淤泥、淤泥质土	广泛分布,厚度0.70~14.60 m;深灰色、灰色,流塑,味臭,污手,含有机腐殖质,局部夹淤泥质粉土、粉砂薄层	透水性极微
	(3)黏土、粉质黏土	广泛分布,厚度0.50~16.80 m;灰黄色、黄色、褐黄色,上部软塑,中下部可塑,黏性较强,局部含粉细砂或粗砂	透水性微弱
	(4)粉砂、细砂	局部分布,厚度0.30~11.26 m;浅灰、灰色,稍密为主,局部中密,饱和,分选较差,含泥质,局部上部由粉土逐渐过度到底部中粗砂	透水性弱—中等
Q ^{mc}	(5)淤泥质土	广泛分布,厚度1.20~13.60 m;浅灰色、灰色,流塑,味臭,污手,含有机腐殖质,局部含少量粉砂	透水性极微
	(6)黏土、粉质黏土	局部分布,厚度0.90~5.80 m;灰黄色、黄色、褐黄色,可塑,局部硬塑,黏性一般,局部含较多粉细砂或粗砂	透水性微弱 偶发土洞
	(7)粉砂、细砂	局部分布,厚度1.10~7.20 m;浅灰、灰色,局部灰黄色,稍密~中密,饱和,分选较差,含较多黏粒,局部夹粉土、粗砂或淤泥质土透镜体	透水性微弱
	(8)中砂、粗砂	透镜分布,厚度0.70~8.90 m;灰白色、灰黄色,石英颗粒为主,饱和,密实;分选差,含较多泥质,以中、粗砂为主,局部过渡为砾砂、圆砾	透水性中等
Q ^{el}	(9)残积土	广泛分布,厚度0.80~17.30 m;灰黄色,可塑,成份较杂,由粉质黏土和粗石英砂组成;土质差异较大,以黏粒、砂砾含量的不同,可分为粉质黏土、粉土、粉砂、中砂等	透水性微弱
C _{1c}	(10)全风化砂岩	零星分布,厚度6.40 m;灰黄色,呈密实砂土状,质软,易捏碎	/
C _{1c} 、K _{2dl}	(11)强风化岩	零星分布,以泥质粉砂岩、泥岩、炭质页岩为主,厚度1.30~24.90 m,黑色、褐红色,岩质极软,岩石经风化呈半岩半土状,岩芯易磨损,手捏易碎;局部出现强风化灰岩等,厚度4.10~21.4 m,灰色,岩芯柱状,半岩半土状,岩质软,手捏易碎	/
	(12)中风化砂岩、泥岩	局部分布,厚度1.00~13.50 m;棕红色,岩质软,岩芯较破碎,呈短柱状	/
K _{2dl}	(13)微风化泥岩、粉砂岩	局部分布,厚度2.20~6.50 m;褐红色,岩芯完整,呈中—长柱状,岩质坚硬,钻进缓慢	/
J _j	(14)微风化灰岩质砾岩	局部分布,厚度0.9~6.00 m;红色、灰色,岩芯短柱状,灰岩成份为灰岩,次圆状,砾石大小1~6 cm,红色钙质胶结,厚层状,岩质坚硬,钻进慢,溶蚀现象较发育	溶洞发育层
C _{1s} 、C _{1c} 、C _{2h}	(15)微风化灰岩	广泛分布,厚度0.10~26.70 m;浅灰色、灰色,岩芯短柱状、柱状,岩芯较完整,岩质坚硬,钻进慢,可见溶蚀现象	溶洞发育层

表 4 研究区地下水类型及富水等级划分

Table 4 Classification of groundwater types and grades of water abundance in the study area

地下水类型	地层代号	含水层岩性	富水性	单井涌水量/m ³ ·d ⁻¹	断裂带的导水性
松散岩类 孔隙水	Q ^{mc}	第一层: 粉细砂 第二层: 中砂、粗砂	贫乏	<100	第四系松散层富水性贫乏、微—极微透水, 覆盖层可视为隔水层, 但局部含水层下伏基岩, 构成径流补给通道
覆盖型碳酸盐岩 裂隙溶洞水	C _{1s} 、 C _{2h} 、J _j	灰岩、炭质灰岩、生物碎屑灰岩、白云质灰岩、灰岩质砾岩	中等	100~1 000	岩溶裂隙及溶洞连通性较好, 断裂带是区内基岩地下水的主要通道
覆盖型 基岩裂隙水	C _{1c}	粉砂岩、炭质页岩	贫乏	<100	岩石破碎, 完整性差, 裂隙发育至极发育, 加之断裂的破坏, 其渗透性及透水性较强
覆盖型 红层裂隙水	K _{2dl}	泥岩、泥质粉砂岩、砂岩	贫乏	<100	以泥岩为主, 渗透性极弱

发育地带。垂向上, 溶土洞连通结构的有 4 个, 底部基岩主要为金鸡组(J_j), 溶洞土洞能连通, 一方面说明基岩岩溶发育, 另一方面说明岩土的水力联系密切, 而此类土洞空间上分布于研究区西南侧断裂带覆盖层之上, 如此结构又为断裂带提供了水源补给。

2.2 溶洞发育特征

受钻孔的分布密度影响, 所收集的灰岩地带 200 个钻孔中有 44 个钻孔揭露到溶洞, 见洞率达 22%, 溶洞发育概述如表 5。平面上, 溶洞的发育与土洞分布基本一致, 依然受断裂带的影响并沿其分布(图 2)。而从溶洞的分布层位来说, 见洞率最高的地区集中在研究区西南侧黄岐二中一带, 下伏基岩为下侏罗统(J_j)灰岩质砾岩, 其见洞率高达 50.00%, 溶洞以单一结构为主, 标高约在-9.46~-33.50 m, 洞高 0.70~6.20 m, 埋藏较浅, 规模不大, 相对密集的溶

洞发育, 说明这一带的岩溶水相对丰富, 岩土水力联系强, 又受断裂带的影响, 溶洞连通性相对较好。

2.3 岩溶地面塌陷概况

研究区已发地面塌陷有 15 处(图 2), 各岩溶塌陷地质灾害特征概述如表 6。形态上, 塌陷呈圆形—椭圆形, 直径 1.5~9.0 m, 深度一般小于 2 m, 仅 3 处深度达 3.30~4 m; 时间上, 2008 年 2 月份发生 2 处, 2008 年 10~11 月份发生 6 处, 2009 年 3-6 月份发生 7 处; 空间上, 靠近武广客运专线 2#竖井的敦豪物流中心东北部一带有 12 处, 其余 3 处位于研究区西南角黄岐二中一带; 从岩溶塌陷的分布层位, 集中在研究区石磴子组(C_{1s})隐伏灰岩分布区。

此外, 研究区岩溶地面塌陷发生的同时, 伴有大面积地面沉降地质灾害的发生, 两者虽未造成人员伤亡, 但已造成黄岐二中、敦豪物流中心、工厂及民

表 5 研究区溶洞发育特征概述

Table 5 Characteristics of karst cave development in the study area

地层代号	洞顶标高/m	溶洞高度/m	顶板厚度/m	同地层见洞率/%	分布结构及比例/%	充填物情况
C _{1s}	-9.46~-33.50	0.40~6.20	0.2~6.4	该层 113 个钻孔, 17 个揭露, 占比 15.04	单层结构: 64.71 双层结构: 23.53 三层结构: 5.88 四层结构: 5.88	充填淤泥、黏粒、砂、泥炭、碎石等, 全充填占比 61.54%, 半充填占比 19.23%, 无充填占比 19.23%
C _{1c}	-27.53	5.00	0.10	该层 21 个钻孔, 1 个揭露, 占比 4.76	单层结构	无充填物, 严重漏水
C _{2h}	-11.63~-30.54	0.40~22.90	0.10~8.90	该层 38 个钻孔, 12 个揭露, 占比 31.58	单单层结构: 91.76 双层结构: 8.33	充填软泥、黏粒、碎石等, 全充填占比 53.84%, 半充填占比 23.08%, 无充填占比 23.08%
J _j	-14.86~-31.72	0.70~6.20	0.50~11.5	该层 28 个钻孔, 14 个揭露, 占比 50.00	单层结构: 92.86 双层结构: 7.14	充填软泥、黏粒、砂、碎石等, 全充填占比 20.00%, 半充填占比 60.00%, 无充填占比 20.00%

表 6 研究区岩溶塌陷地质灾害特征概述
Table 6 Geological disaster characteristics of karst collapse in the study area

编号	形状	规模/m	深度/m	面积/m ²	发生时间	灾害情况
DT1	圆形	直径1.5	/	7	2008.2	位于黄岐二中操场,距武广客运专线平距约400 m,及时进行了回填
DT2	圆形	直径5	/	15	2008.10.3	黄岐二中西南约30 m的公园草地再次发生塌陷,距武广客运专线平距约540 m,及时进行了回填
DT3	近圆形	直径2.2	0.50	4	2008.11.4	位于泌冲村敦豪物流中心东北部B2栋南侧发生塌陷,及时进行了填埋;塌陷坑距武广客运专线平距约200 m
DT4	近圆形	直径2.2	0.40	初始4 扩至21	2008.11.11	位于DT3北约10 m再次发生塌陷,塌陷坑未及时处理,2008年12月18日塌陷坑扩大一倍;塌陷坑距武广客运专线平距约200 m
DT5	椭圆形	长轴2.2, 短轴1.8	0.60	2.5	2008.11.30	位于DT4塌陷坑西约3 m处再次发生的塌陷,塌陷坑距武广客运专线平距约200 m
DT6	椭圆形	长轴3.8, 短轴3.0	1.65	9	2008.2	此3个塌陷坑位于广州西环浔峰洲南行入口环岛内侧,距武广客运专线平距约150 m。呈近东西向排列,DT6位于最西面,DT8位于最东面,DT7位于DT6塌陷坑东约10 m,DT8位于DT7塌陷坑东约4.2 m
DT7	椭圆形	长轴6.5, 短轴5.0	4.00	30	2008.11	
DT8	圆形	直径4.0	2.00	12	2008.11	
DT9	圆形	直径4.2	0.55	21	2009.3.19	位于泌冲村敦豪物流中心西北部
DT10	近圆形	直径3.5	1.50	10	2009.3.19	同在DT9东侧广州西环高速浔峰洲入口环岛内侧DT6塌陷坑西南约6 m处
DT11	椭圆形	长轴9.0, 短轴7.0	1.00	50	2009.4.4	位于南海区大沥镇黄岐海北片区泌冲永澄村海北大道西侧人行道上
DT12	圆形	直径1.3	1.50	2	2009.4.8	位于泌冲村敦豪物流中心西北部东侧DT9南约3 处
DT13	圆形	直径5.5	3.50	25	2009.6.16	位于泌冲村敦豪物流中心南门,距离南门收费亭以北约5 m的道路中间处
DT14	近圆形	直径6.7	/	30	2009.6.12	位于敦豪物流中心东北部B2栋南侧,DT5塌陷坑西约3 m处
DT15	近圆形	直径3.4	3.30	10	2009.6.26	位于广州西环浔峰洲南行入口环岛内侧DT6塌陷坑西南约3 m处

房损坏,直接受影响人数 2 000 多人,直接经济损失近 2 亿元,其中黄岐二中已于 2008 年 12 月 3 日搬迁避让,转移师生 1 300 人,其灾害灾情属特大型,该事件在当时经济社会中影响巨大。

3 岩溶地面塌陷成因机理分析

3.1 溶洞土洞发育是形成岩溶地面塌陷的先决条件

岩溶地面塌陷(土层塌陷)是上覆土体被地下水侵蚀,土体被带走至岩溶管道,使之在基岩面之上形成了空腔^[22],随着水位波动持续或反复作用,持续侵蚀空腔的顶部乃至侧部,带走腔内与腔底的土体,使空腔逐渐变大,当“空腔”顶板达到极限顶托力后,顶部土体下陷,在地表产生坑洞或下陷的现象^[23]。

从地面塌陷形成的过程来说,地表的塌陷坑是前述的“空腔”在垂向上的“位移”,换言之,只有

在基岩面先形成“空腔”(裂隙或溶洞作为管道),在地下水径流波动影响下,使基岩之上的土体也形成“空腔”,之后土体“空腔”逐步变大,直到坍塌至顶部,地表反映出来就是地面塌陷。而塌陷与“空腔”的位置关系仅是垂向关系,不一定是垂直关系,因为塌陷通道的走向既受上层土体重力的影响,也与周边土体的性质相关。相对而言,砂层是最先被地下水径流带走的,其次是淤泥,由于复杂的土层结构,地下水径流造成“空腔”发育层位的不一样,使塌陷通道变得复杂不定。

而所述“空腔”就是溶洞土洞,溶洞土洞是否发育,一方面决定了土体是否有管道空间来逐步向上“位移”,另一方面也决定了顶部土体是否有空间来向下“换位”存储。为此,研究区自身的溶洞与土洞发育,且在空间上沿断裂带分布,有了“空腔”这个管道,为地面塌陷提供了先决性条件,也属内在因素的

表现。

3.2 断裂带作为岩土体的径流通道是必要条件

续前所述,“空腔”既然发育了,要将土体带走或使“空腔”变大乃至发生塌陷,则需要水动力作用或软化影响,因而地下水的径流路径控制了岩溶地面塌陷的发生位置。地下水径流路径分为土体与岩体两部分。研究区第四系的 2 层含水层在空间上分布不连续,说明第四系松散岩类孔隙水在区域上不会形成一个大规模的地下水水流场,即土体的地下水径流路径是局限性的。

从已发地面塌陷的分布位置来看,一处是集中在敦豪物流中心东北部一带,另一处却在研究区西南角黄岐二中一带,两者空间上相距约 1 km,说明诱发两地灾害的地下水水流场不同,即发灾时刻的地下水径流路径是不一样的。

研究区西南角黄岐二中一带,DT1~2、DT11 区域第四系 2 层含水层均发育,但含水层不与武广客运专线 2#竖井和简易竖井中心联通发育,且相距约 800 m,说明上部的土体径流路径是局限性的;DT1~2、DT11 又位于 F1-2~4 断层带之上,如此远距说明这 3 处地面塌陷是通过断裂带将上部松散岩类孔隙水导走至掏蚀土层而诱发的,F1 断裂带起到了远程导水作用。

研究区敦豪物流中心东北部一带,DT3~10、DT12~15 距 2#竖井 130~220 m,所处区域第四系含水层并不发育;从该片区监测井的岩溶裂隙水水位来看,地下水流场自西北向东南朝武广客运专线暗挖段方向流动,这与下伏基岩起伏面一致,说明该片区松散岩类孔隙水先自西北沿基岩凹槽向东南古岩溶漏斗处汇聚,再通过 F1 断裂快速导流至武广客运专线暗挖段,使该片区第四系土层快速达到疏干区,从而诱发了这 12 起地面塌陷,F1 断裂带起到了近距快速导水作用。

断裂带是天然导水通道,为第四系水与岩溶水联通提供了径流通道,也是溶洞裂隙水的存储通道,当地下水获得补给之后,亦能通过断裂带快速导流补给到周边的疏干区地带,起控水、导水作用,这就极大的影响了地下水的波动性和突变性,是形成岩溶地面塌陷的必要条件。

3.3 施工降水是诱发岩溶地面塌陷的激发因素

据武广客运专线金沙洲隧道出口段 2009 年 3

月 12 日至 6 月 17 日抽水量监测数据可知,日抽水量达 $3\ 100\sim 21\ 700\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,6 月 17 日至 7 月 10 日抽水时断时续,抽水量 $300\sim 500\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,7 月 10 日后抽水基本停止。此时段该区域地下水水位处于持续稳定最低水位,水位埋深最低在 21.3 m,2009 年 5 月 14 日后,地下水水位开始快速回升,2009 年 8 月 1 日基本恢复到正常水位,随即发生岩溶地面塌陷。

为了验证施工降水是诱发岩溶地面塌陷的激发因素,本文运用 Visual MODFLOW 软件,建立了研究区地下水数值模拟模型,首先对研究区水文地质单元概念模型进行数学描述,然后选取合适的求解方法进行建模计算。根据模拟区的水文地质条件、钻孔、地下水水位动态等资料,建立地下水系统数值模拟模型,对于非均质、各向异性、空间三维结构、非稳定地下水流系统,使用地下水流连续性方程及其定解条件式来描述。

本次数值模拟模型的识别与检验过程采用试估—校正法,数值模拟结果的可靠性通过比较计算的地下水水位与实测地下水水位的拟合程度来检验。研究区内武广客运专线施工共有两个竖井抽水,抽排水量分别为 $900\sim 8\ 100\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $1\ 800\sim 13\ 300\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,在模型中设置两个竖井分别按相应流量抽水来进行流场数值模拟计算。

通过模拟分析,武广客运专线施工降水地下水水位降落漏斗与地面塌陷的分布关系如图 3 所示。从降落漏斗的降深分布来看,地下水径流路径整体与断裂走向吻合,降落漏斗的影响范围与已发塌陷位置重叠,且地面塌陷的位置基本都分布在降深大于 21 m 的地段,因此施工降水是诱发岩溶地面塌陷的主要触发因素。

3.4 岩溶地面塌陷的形成机理

如前所述,研究区岩土体的“空腔”发育为岩溶塌陷提供了先决条件,而地下水的波动则使“空腔”扩大,乃至触发岩溶塌陷的临界条件,除了地下水波动的影响,地面的频繁动荷载及周边工程施工的振动影响也是影响因素之一。笔者根据研究区 15 处地面塌陷的发生时间、发生地点及地下水水位变化情况总结其形成机理,分析如下:

DT1、DT6 均发生在 2008 年 2 月份,此时武广客运专线金沙洲隧道出口段正处施工(包括 2#竖井、暗挖段、简易竖井、明挖段),研究区地下水水位处

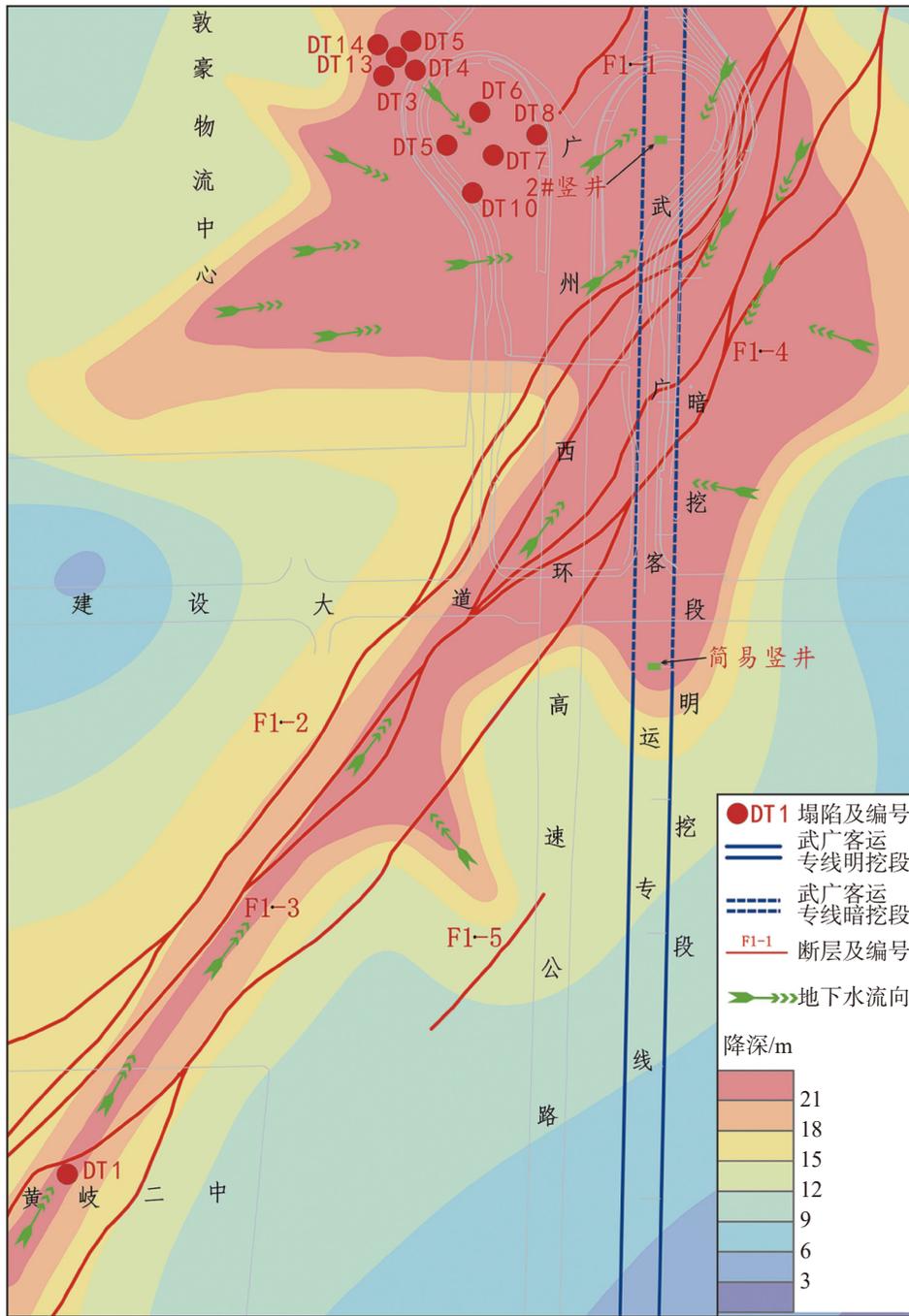


图3 武广客运专线施工降水地下水水位降落漏斗与地面塌陷的分布关系图

Fig. 3 Distribution relationship between ground water falling funnel and ground collapse during the construction of Wuhan-Guangzhou high-speed railway

于急剧下降阶段(图4),两者发生地点又相距甚远,说明这2起塌陷主要触发因素是地下水的急速下降,是通过断裂带这条天然导水通道快速的疏干排水而引发的地面塌陷。

DT2~5、DT7~8均发生在2008年11月份左右(图4),此时武广客运专线DK2196+000~DK2196+140段洞身正处施工,施工阶段全线持续抽排地下水,

整个区域上地下水水位已接近最低位。这6起塌陷中,DT2位于黄岐二中西南一带的公园草地上,受震动因素小,说明其引发原因主要还是地下水波动影响;而地下水波动影响有两种可能,一是土洞发育较深,前期的水位下降,仅使“空腔”变大(发育期),随着后期持续的降深,水托力逐渐失去,“空腔”不断变大,导致“空腔”顶板失去顶托力而引发塌陷(发灾

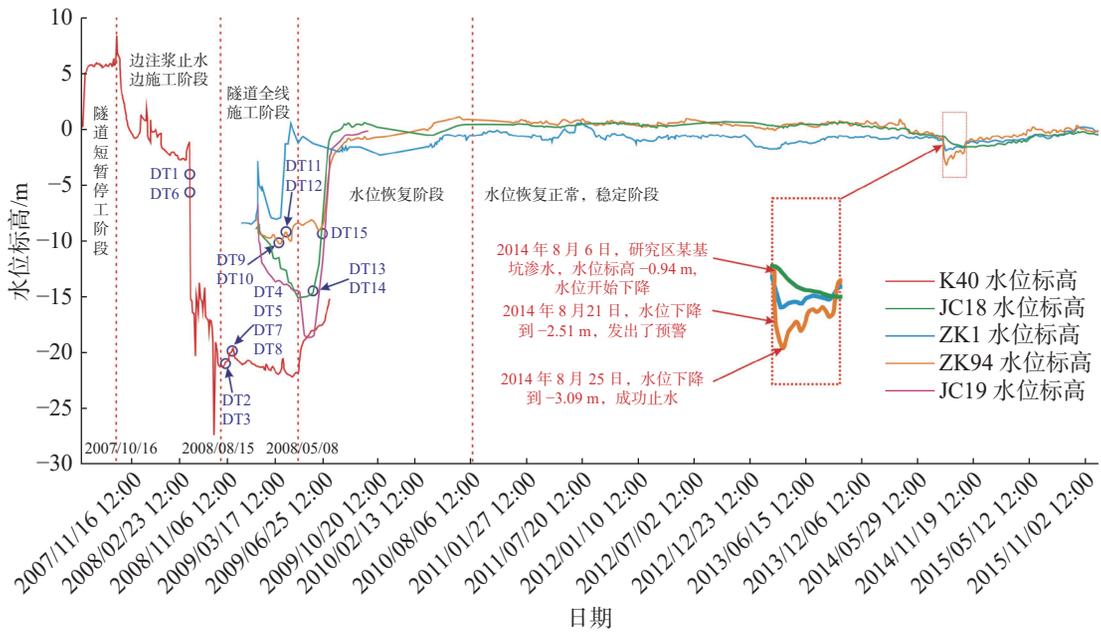


图 4 隧道施工抽排地下水与岩溶地面塌陷对应关系^[24-25]

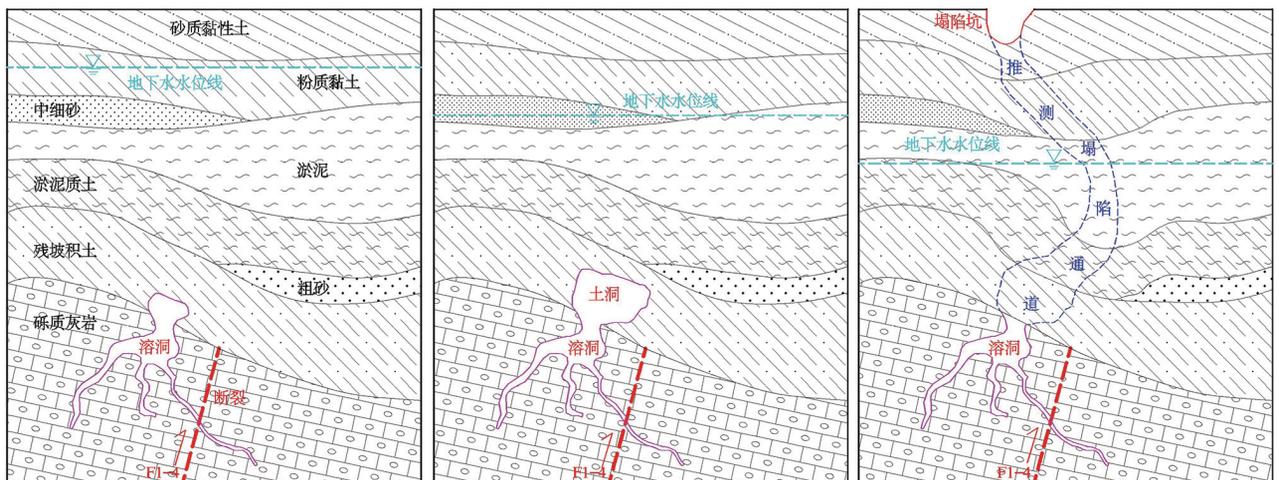
Fig. 4 Corresponding relationship between groundwater pumping during tunnel construction and karst ground collapse^[24-25]

期),其发灾过程如图 5 所示;二是土洞发育较浅,前期的水位快速下降仅使“空腔”变大(发育期),但不足以使其坍塌,但后期受地表雨水渗入影响后,土体饱水软化,地表补给的地下水向下径流(此时地下水水位已降至-20 m 左右)掏蚀、带走“空腔”底部或腔内的土体,从而引发了地面塌陷,其发灾过程如图 6 所示。其余 5 起塌陷位于泌冲村敦豪物流中心及广州西环浔峰洲南行入口环岛内侧一带,发灾地点较近,且离地下水降漏漏斗较近,引发的原因除了与前文分析的地下水波动影响因素有关之外,因为该片

区地处物流中心,塌陷的形成可能还受载重较大的货车频繁动荷载及施工的振动的影

响。DT9~12 发生在 2009 年 3-4 月份(图 4),此时武广客运专线全面施工,整个区域上地下水水位已达最低位。这 4 起塌陷位于泌冲村敦豪物流中心及广州西环浔峰洲南行入口环岛内侧一带,引发原因与前文所述的地下水波动以、车辆动荷载和工程施工振动等影响有关。

DT13~15 发生在 2009 年 6 月份(图 4),此时武广客运专线已施工结束。经武广客运专线施工期间



孕灾期：溶土洞发育，形成了“空腔”

发育期：地下水波动影响，水位下降后“空腔”变大

发灾期：地下水波动影响，水位急降后“空腔”向上发展

图 5 持续地下水下降波动型岩溶地面塌陷发灾过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of karst ground collapse caused by continuous groundwater decline

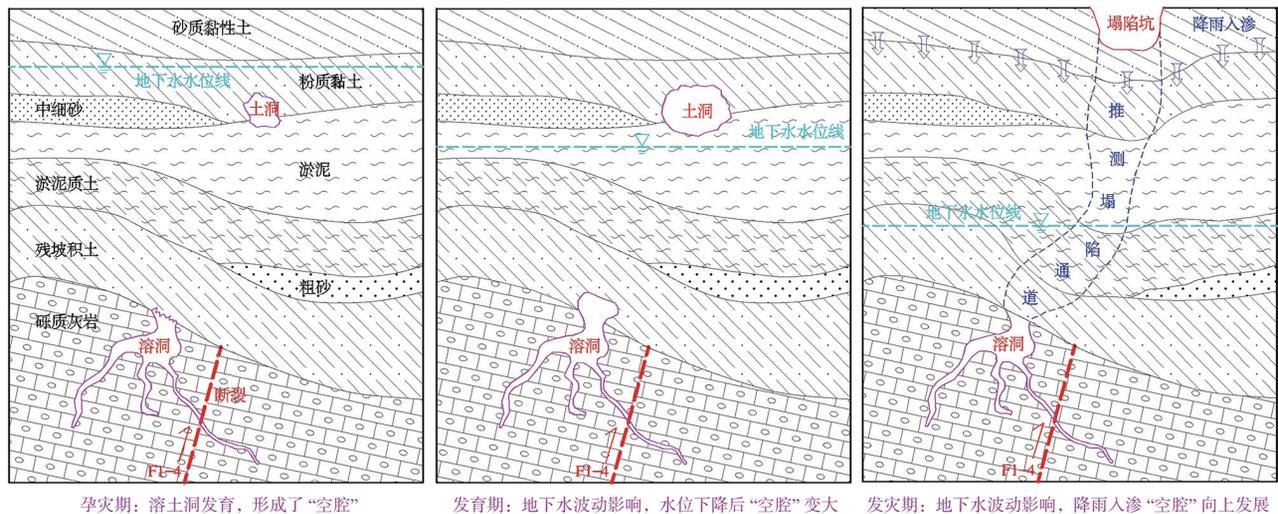


图6 持续地下水下降波动+降雨入渗型岩溶地面塌陷发灾过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of karst ground collapse caused by continuous groundwater decline and rainfall infiltration

的长期、大量的抽排,疏通了断裂带这个天然的导水通道,使断裂带富水性更好、导水性更强,以致前期地下水呈快速上升恢复之势,后期整个区域地下水水位逐步恢复正常。这3起塌陷位于泌冲村敦豪物流中心及广州西环浔峰洲南行入口环岛内侧一带,引发原因是地下水波动影响。而地下水波动影响同样也有两种可能,一是在地下水水位前期快速上升的过程中,上部土体由于长期处于地下水水位以上,相对固化或干化,在地下水水位回升后,土体饱水软化,之前的腔壁发生坍塌扩大“空腔”,或“空腔”顶部土体软化顶托力下降而引发塌陷;二是汛期雨水的入渗致塌。此外,依然不排除受车辆动荷载等振动因素的影响。

4 岩溶地面塌陷发展趋势

4.1 发展趋势分析

随着武广客运专线施工的结束,地下水逐步恢复。从长期的监测数据表明,武广客运专线施工期,地下水水位变化在0.39~18.65 m之间,一般地下水水位标高在-3 m以下,最大降深标高可达-27.5 m。在武广客运专线施工结束后天然条件下,地下水水位变化在0.49~3.31 m之间,变化幅度0.50~1 m之间,一般地下水水位标高在-1.5 m以上。除恢复过程中仍有诱发塌陷外(DT13~15),2010年8月水位恢复到正常后,研究区再未发生新的岩溶地面塌陷,已有未回填塌陷坑亦未再发生形变。

但从现有揭露的溶土洞分布情况来看(图2),因受现有钻孔分布密度的限制,不能完全判断F1断裂带中间地段溶土洞的发育程度;根据武广客运专线明挖大量抽排地下水期间可知,F1断裂带中间地段均未引发岩溶地面塌陷,可以判定的是,F1断裂带中间地段地下水在同样降深情况下引发地面塌陷地质灾害的可能性比其两侧会低,但是不排除其在施工降水及水位恢复期间土体已发生扰动破坏的可能,可能只是扰动位置较深或者土洞规模较小还没有达到塌陷的临界条件。

为此,从岩溶地面塌陷趋势来说,今后伴随城镇化的建设,仍需高度注意F1断裂带东北与西南两侧一带,尤其是已发生岩溶塌陷的地带,若今后深基坑的开挖涉及到基岩地带尤其是F1断裂带附近,则需密切关注西南角与东北角岩溶地面塌陷的防治与监测,同时务必做好基坑的止水措施;若深基坑的开挖涉及到基岩以下且地下水降深超过20 m,F1断裂带中间地段引发地面塌陷的风险则大大增加。

4.2 塌陷预警讨论

值得讨论的是,岩溶地面塌陷属潜伏性突发性灾害,对其精准预警是当今公认的技术难题。通过前述,地下水波动影响因素是发灾的触发因素,所以通过水位的长期监测可以实时掌握地下水的波动状况,但水位波动致灾阈值的设定是相当困难的,因为岩溶塌陷发生与土洞的大小、充填、层高、层位以及周边的土体均有密切关系,也与地形地貌、地质构造、水文地质等基础地质条件密切关联,每

个点水动力条件不一样,其对每一个土洞的影响程度也不一样,在目前难以量化致灾阈值的情况下,结合水位的长期监测,分析汛期与非汛期的水位波动范围,可设定短时间内的水位异常波动允许值并以此作为报警值,同时设定一定的水位标高线作为塌陷的预警值,以密切关注地下水动态变化情况,预防塌陷的发生。

从地下水监测井的水位变化情况来看(图4),2014年8月25日研究区内某深基坑的开挖发生基坑涌水,ZK94地下水水位呈快速下降之势,地下水水位标高由-0.94 m降至-2.51 m,降幅已超过1.50 m,大于研究区常年地下水水位波动范围值,若持续水位下降,则可能引发地面塌陷。工程收到及时报警提示并立即采取了基坑止水,抑制了地下水的持续下降,使地下水标高从-3.09 m逐步恢复至正常,此过程未诱发塌陷,这是通过地下水水位监测为岩溶地面塌陷的预防提供了有效预警的典型实例。说明研究区地下水水位标高在-3.09 m以上诱发岩溶地面塌陷的可能性较小,故水位标高在-3 m处可以设为研究区岩溶地面塌陷的预警值,同时将水位异常波动允许值1.50 m设为研究区岩溶地面塌陷水位监测的异常报警值。事实证明,自2014年8月25日以来,研究区再未发生岩溶地面塌陷,说明此预警值与报警值的设定是科学的,对研究区岩溶地面塌陷防控起到了非常重要的作用。

5 结 论

(1)研究区岩溶地面塌陷发生的内因是岩土体自身“空腔”的发育,“空腔”是地下水与土体的流通管道,也是土体“换位”存储的载体,是先决因素;

(2)研究区F1断裂是天然的导水与储水通道,为岩土体提供了径流通道,是引发岩溶地面塌陷必要条件,断裂带控制着溶洞裂隙水的径流方向,起控水、导水作用,既控制了已发岩溶地面塌陷的分布位置,也控制了今后岩溶地面塌陷的发育趋势;

(3)研究区岩溶地面塌陷属典型的人类工程活动诱发型地面塌陷,工程施工降水是岩溶地面塌陷的主要触发因素,局部也伴随着振动荷载和降雨入渗的叠加作用。通过模拟分析,施工期间地下水水位降落漏斗径流路径与地面塌陷的分布关系均吻合一致;

(4)研究区岩溶地面塌陷的形成机理主要是受地下水的波动影响,地下水的波动影响分为“持续地下水下降波动型”、“持续地下水下降波动+降雨入渗型”、“地下水快速上升恢复型”以及单独的“降雨入渗型”;

(5)研究区武广客运专线施工结束后,通过监测预警预报实例总结分析,将地下水水位标高-3 m设定岩溶地面塌陷预警值,将地下水水位异常波动允许值1.50 m设定为基于地下水水位监测异常的岩溶塌陷报警值,通过预警值和报警值的综合控制,研究区近十年再未在发生过岩溶塌陷,起到了不错的效果。

参考文献

- [1] 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]. 佛山市统计局, 2020.
Foshan Investigation Team of National Bureau of Statistics. Statistical Bulletin of Foshan National Economic and Social Development in 2019 [R]. Foshan Statistics Bureau, 2020.
- [2] 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.
- [3] 张宗胜, 易守勇, 黄继春, 马威, 黄芝惠, 叶伟何, 赵亚甜, 廖恒源, 任荣, 罗鑫, 邱瑞山, 杨帆. 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]. 广东省佛山地质局, 2009.
ZHANG Zongsheng, YI Shouyong, HUANG Jichun, MA Wei, HUANG Zhihui, YE Weihe, ZHAO Yatian, LIAO Hengyuan, REN Rong, LUO Xin, QIU Ruishan, YANG Fan. Geological hazard investigation report of Huangqi Haibei area, Daili Town, Nanhai District, Foshan City, Guangdong Province[R]. Foshan Geological Bureau of Guangdong Province, 2009.
- [4] 张宗胜, 马威, 易守勇, 谭新强, 贝永辉, 易国雄, 黄芝惠, 叶伟何, 黄继春, 劳贤昌. 广东省佛山市南海区桂城街道夏北片区地面沉降地质灾害勘查报告[R]. 广东佛山地质工程勘察院, 2009.
ZHANG Zongsheng, MA Wei, YI Shouyong, TAN Xinqiang, BEI Yonghui, YI Guoxiong, HUANG Zhihui, YE Weihe, HUANG Jichun, LAO Xianchang. Geological disaster investigation report of ground collapse of Xiabei area, Guicheng Street, Nanhai District, Foshan City, Guangdong Province[R]. Guangdong Foshan Geological Engineering Survey Institute, 2009.
- [5] 张宗胜, 马威, 李锋, 张涛, 黄焕强, 黄冠滔, 黄芝惠, 叶伟何, 黄继春, 易守勇, 廖恒源, 毛政球, 向新生. 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]. 广东佛山地质工程勘察院, 2011.

- ZHANG Zongsheng, MA Wei, LI Fong, ZHANG Tao, HUANG Wenqiang, HUANG Guantao, HUANG Zhihui, YE Weihe, HUANG Jichun, YI Shouyong, LIAO Hengyuan, MAO Zhengqiu, XIANG Xinsheng. Geological disaster investigation report of ground collapse of Fuwan Anhua Road, Hecheng Street, Gaoming District, Foshan City, Guangdong Province[R]. Guangdong Foshan Geological Engineering Survey Institute, 2011.
- [6] 潘成球. 广东省佛山市顺德区乐从镇沙滘东村地面沉降区岩土工程勘察与监测报告[R]. 广东省佛山地质局, 2011.
- PAN Chengqiu. Geotechnical engineering investigation and Monitoring report of Land subsidence area of Dongcun, Shajiao, Lechong Town, Shunde District, Foshan City, Guangdong Province[R]. Guangdong Foshan Geological Engineering Survey Institute, 2011.
- [7] 彭峰. 广东省佛山市顺德区乐从镇小涌村地面沉降地质灾害应急调查报告[R]. 广东省环境监测总站, 广东省佛山地质局, 2011.
- PENG Feng. Geotechnical disaster emergency investigation report of Land subsidence of Xiaocong village, Lechong town, Shunde district, Foshan City, Guangdong Province[R]. Guangdong Provincial Geological Environment Monitoring Station, Guangdong Foshan Geological Engineering Survey Institute, 2011.
- [8] 欧智德, 罗锡宜, 邵山, 邹毅智, 龙家耀, 张忠进, 吴克宁. 广东省佛山市禅城区南庄镇瓷海国际地面沉降地质灾害调查报告[R]. 广东佛山地质工程勘察院, 2011.
- OU Zide, LUO Xiyi, SAO Shan, GUI Yizhi, LONG Jiayao, ZHANG Zhongjin, WU Kening. Geotechnical disaster investigation report of land subsidence of Cihai international, Nanzhang town, Shunde district, Foshan City, Guangdong Province[R]. Guangdong Foshan Geological Engineering Survey Institute, 2011.
- [9] 董好刚, 黄长生, 陈雯, 张宏鑫, 支兵发, 赵信文. 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, ZHANG Hongxin, ZHI Bingfa, ZHAO Xinwen. 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.
- [10] 黄继春, 罗锡宜, 李日伟, 廖恒源, 邓飞, 戴春, 骆邵军, 任荣, 刘放. 佛山市城市地质调查报告(2010年度)[R]. 广东省佛山地质局, 2011.
- HUANG Jichun, LUO Xiyi, LI Riwei, LIAO Hengyuan, DENG Fei, DAI Chun, LUO Shaojun, REN Rong, LIU Fang. Urban geological survey report of Foshan City(2010year)[R]. Foshan Geological Bureau of Guangdong Province, 2011.
- [11] 蒙彦, 雷明堂, 贾龙. 1:5万珠三角地区岩溶塌陷地质灾害调查[R]. 中国地质调查局.
- MENG Yan, LEI Mingtang, JIA Long. 1:50,000 Geotechnical disaster investigation report of karst collapse in the Pearl River Delta[R]. China Geological Survey.
- [12] 韩庆定, 罗锡宜, 易守勇, 邹杰, 徐明宇, 陈胜, 彭峰, 陈裕明, 赖桂林, 黄少飞, 欧智德, 谭新强, 廖恒源, 任荣. 广东省城镇典型岩溶地面塌陷防治研究[R]. 广东省佛山地质局, 2011.
- HAN Qingding, LUO Xiyi, YI Shouyong, ZOU Jie, XU Mingyu, CHEN Sheng, PENG Feng, CHE Yuming, LAI Guilin, HUANG Shaofei, OU Zide, TAN Xinqiang, LIAO Hengyuan, REN Rong. Prevention and control research of typical karst ground collapse in The Town Guangdong Province[R]. Foshan Geological Bureau of Guangdong Province, 2011.
- [13] 蒙彦, 郑小战, 雷明堂, 李卓骏, 贾龙, 潘宗源. 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, LI Zhuojun, JIA Long, PAN Zongyuan. Karst distribution and development in the Pearl River Delta[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 746-751.
- [14] 张永定, 张澄博, 李洪艺, 梁森荣, 邱锦安, 陈仲如, 林涛. 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, LIANG Senrong, QIU Jin'an, CHEN Zhongru, LIN Tao. Distribution characteristics of karst in northwestern Guangzhou[J]. *Tropical Geography*, 2011, 31(3): 257-261.
- [15] 刘江龙, 刘会平, 吴湘滨. 广州市地面塌陷的形成因与时空分布[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.
- [16] 罗锡宜, 韩庆定, 邹杰, 易守勇. 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, YI Shouyong. 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.
- [17] 韩庆定, 罗锡宜, 易守勇, 邹杰. 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, ZOU Jie. 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.
- [18] 郑晓明, 金小刚, 陈标典, 刘鹏瑞, 杨戈欣, 李海涛, 杨涛. 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, LIU Pengrui, YANG Gexin, LI Haitao, YANG Tao. 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.

- [19] 蒙彦, 黄健民, 贾龙. 基于地下水水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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 冯亚伟. 山东省岩溶塌陷分布规律及成因机制[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 205-214.
FENG Yawei. Distribution and genesis of karst collapse in Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 205-214.
- [23] Sophie Messerklinger. Formation mechanism of large subsidence sinkholes in the Lar valley in Iran[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2014(47): 237-250.
- [24] 黄健民, 吕镁娜, 郭宇, 陈小月. 广州金沙洲岩溶地面塌陷地质灾害成因分析[J]. 中国岩溶, 2013, 32(2): 167-174.
HUANG Jianmin, LV Meina, GUO Yu, CHEN Xiaoyue. Research on the for geologic disaster by karst reason surface collapse at Jinshazhou in Guangzhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(2): 167-174.
- [25] 黄健民, 邓雄文, 胡让全. 广州金沙洲岩溶地下水变化与地面塌陷及地面沉降关系探讨[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 300-308.
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): 300-308.

Origin and trend analysis of karst collapse in Huangqi and Haibei communities, Foshan City

ZHANG Zongsheng

(Foshan Geological Bureau of Guangdong Province, Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract The study area is located in the eastern part of Michong village, north Huangqi community, Dali town, Nanhai district, Foshan City. Situated in the southern margin of Guanghua basin and the transitional zone between hilly region and plain region in the northern Pearl River Delta, the area is flat in terrain and convenient by transportation. The study area is characterized by wet spring, long hot summer, warm autumn and winter without frost, with south subtropical monsoon climate. The annual average temperature in this area is 21.9 °C with an annual average precipitation of 1,400-1,900 mm and a multi-year average of 1,613.5 mm. Rainfall is concentrated from April to September, accounting for about 80% of the whole year, and the multi-year average evaporation is 1,153 mm, which is generally less than the rainfall.

In recent years, intensive human engineering activities such as the construction of high-speed rail, underground engineering of subway and pile foundation construction in the area have induced a large number of karst ground collapses and ground subsidence. Especially from February 2008 to September 2009, the affected area reached 1.2 km², and 15 karst ground collapses occurred successively in the area, with the maximum land subsidence amounting to 87 cm. Damage, in different degrees, to Huangqi No.2 Middle School, DHL logistics Center, some factories and residential buildings was caused by the collapse and subsidence, in which more than 2,000 people were directly affected, and the direct economic loss was nearly 200 million yuan.

The only exposed stratum in the study area is Holocene Guizhou formation (Q_hg), but the hidden strata include lower Carboniferous ShiDengzi formation (C₁s) and Ceshui formation (C₁c), upper Carboniferous Hutian formation

(C_2h), lower Jurassic Jinji formation (J_j), upper Cretaceous Dayangshan formation (K_2dl), and Quaternary residual layers (Q^{el}). There is one fault zone with 5 groups in the study area, belonging to Shabei fault zone extending from the south-west direction of the fault zone. The fault zone provides a good channel for groundwater migration and favorable conditions for the development of karst caves, and then controls the development trend of karst in the area. The rock and soil mass in the study area is divided into 15 engineering geological layers from top to bottom, and the groundwater can be divided into four types, pore water of loose rock, fissure cave water of overlying carbonate rock, fissure water of overlying bedrock and fissure water of overlying red bed. Quaternary soft soil and sandy soil are relatively developed.

Hidden karsts are developed in the study area. Of a total of 266 boreholes collected in the area, soil caves in 16 boreholes were exposed with a cave-spotting rate of about 6.35 %, and karst caves were exposed in 44 boreholes with a cave-spotting rate of 22%. In the study area, there have been 15 ground collapses accompanied by geological disasters such as ground subsidence over a large area. Though the collapse and subsidence did not cause casualties, they brought about damage to Huangqi No.2 Middle School, DHL Logistics Center, some factories and residential buildings. Huangqi No.2 Middle School was relocated on December 3, 2008, and 1,300 teachers and students were evacuated. The disaster was then estimated as an oversize one, posing a huge impact on the economy and society of the study area at that time.

The development characteristics and causative mechanisms of karst ground collapse in the study area, show that the development of karst caves and soil caves is the prerequisite; the development of water-conducting fractures is the necessary condition; and the construction precipitation is the main trigger factor. The formation mechanism is closely related to the fluctuation of groundwater level, whose types can be divided into "continuous groundwater decline", "continuous groundwater decline + rainfall infiltration", "recovery of rapid groundwater rise" and "rainfall infiltration". There is still possibility of karst collapse near F1 fault zone in the study area. Controlling the groundwater level elevation within -3.0 meters and the fluctuation range of groundwater level within 1.5 meters can greatly reduce the probability of karst collapse, which can be used as the warning threshold.

The research results can provide a basis for prevention and control of karst ground collapse in urbanization of Foshan City, and also provide a reference for disaster prevention and reduction in other similar areas.

Key words karst collapse, mechanism, trend analysis, construction precipitation, water-conducting fracture, Foshan city

(编辑 张玲 杨杨)