

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.02.06

# 湖北武汉白沙洲隐伏岩溶区地质结构与岩溶塌陷分类

陈标典<sup>1</sup>, 李喜<sup>2</sup>, 李祖春<sup>1</sup>, 姜超<sup>1</sup>, 贾毅<sup>1</sup>, 李慧娟<sup>1</sup>, 刘鹏瑞<sup>1</sup>

(1. 湖北省地质环境总站, 湖北武汉 430034;

2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074)

**摘要:**武汉市可溶岩大多隐伏于第四系土层及白垩—古近系红层下部,可溶岩分布地区地质结构与岩溶地面塌陷关系密切,已发生的岩溶地面塌陷中上黏下砂地质结构占绝大部分。以白沙洲岩溶条带长江两岸为研究区,根据盖层黏性土、砂性土、软弱土、非可溶岩(红层)的上下叠置关系及地面塌陷特征,将可溶岩分布区地质结构划分为3类、5型;岩溶塌陷的实质是土体塌陷,在岩溶区地质结构研究的基础上,根据土体物理力学特征差异,受力后塌陷过程中土颗粒的运移方式,即黏土块体塌落、砂颗粒漏失、软弱土流失,系统将研究区岩溶塌陷机理分为土洞型、沙漏型、泥流型3类,同时也存在多种类型复合型岩溶塌陷。

**关键词:**白沙洲岩溶条带;地质结构;岩溶地面塌陷;塌陷机理

中图分类号: P642.25

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)02-0043-10

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

CHEN Biaodian<sup>1</sup>, LI Xi<sup>2</sup>, LI Zuchun<sup>1</sup>, JIANG Chao<sup>1</sup>, JIA Yi<sup>1</sup>, LI Huijuan<sup>1</sup>, LIU Pengrui<sup>1</sup>

(1. Hubei Geological Environment Station, Wuhan, Hubei 430034, China;

2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** Most of the soluble rocks in Wuhan lie in the quaternary soil layer and the lower part of the chalk-paleogene red layer, the geological structure of the distribution area of soluble rock is closely related to the karst ground collapse, most of the happened ground collapse in the stratum with the upper clay-lower sand. The study area is on the both sides of the Yangtze River along the Baishazhou karst belt, according to the thickness and the superimposed relation of overburdened clay, sandy soil, soft soil, non-soluble rock (red bed) and surface collapse, the geological structure of the solvable rocks is classified into 3 categories and 5 types. The essence of karst collapse is soil collapse, based on the geological structure and the physical and mechanical characteristics of soil, as well as the migration mode of soil particles during collapse including the clay mass collapse, sand particle leakage and the loss of soft soil, the mechanism of karst collapse is classified into three types, such as soil cavity type, hourglass type and mud flow type, and there are 2 or 3 types of compound karst collapse.

**Keywords:** Baishazhou karst band; geological structure; karst ground collapse; collapse mechanism

## 0 引言

武汉市位于江汉平原东部,其碳酸盐岩分布面积约 1 100 km<sup>2</sup>,占市域面积近 13%<sup>[1]</sup>。武汉市正处于一个高速发展的阶段,岩溶也一直是城市规划、建设重点考

虑的因素之一<sup>[2]</sup>。

根据可溶岩的埋藏条件,一般可划分为裸露型、覆盖型和埋藏型岩溶三种。武汉市以覆盖型和埋藏型岩溶为主,覆盖型岩溶为直接覆盖于第四系土层下的岩

收稿日期: 2020-05-05; 修订日期: 2020-06-07

基金项目: 武汉市多要素城市地质调查示范项目(ZSHJ-WHS-FW-2018-112; ZSHJ-WHS-FW-2019-162; WHHC-2020-ZC001)

第一作者: 陈标典(1990-),男,湖南邵东人,硕士,工程师,主要从事水工环地质及岩溶地质灾害方面的研究。E-mail: 593192274@qq.com

溶,埋藏型岩溶为覆盖于第四系土层及白垩—古近系的红砂岩(红层)以下的岩溶。

对于岩溶塌陷成因机理的研究从开始的“潜蚀论”(巴普洛夫)、“真空吸蚀论”(徐卫国)到后面康彦仁等根据大量地面塌陷调查资料,按诱发因素和受力状态总结归纳的“重力致塌、潜蚀致塌、冲(气)爆致塌、吸蚀致塌、振动致塌、荷载致塌、溶蚀致塌和根蚀致塌”8种致塌模式<sup>[2-4]</sup>。以上机理均立足于地质现象,强调作用及其结果,呈“一塌陷一机理”模式,未成系统。

武汉市已发生的岩溶地面塌陷均为覆盖层土体塌陷,即下伏岩溶洞隙发育,在自然或人为因素作用下,上覆土层逐渐向洞隙中漏失,最终失稳产生地面塌陷,塌陷的主体是上覆土层。同时,覆盖层的岩性及其物理力学性质不同,其变形破坏方式及过程也不同。因此,对岩溶塌陷机理研究首先必须弄清可溶岩上覆土体性质。

本文以白沙洲岩溶条带分布的长江两岸为研究区,依托“武汉市多要素城市地质调查示范项目—岩溶地面塌陷调查一期”专项调查工作取得的资料和成果,对

研究区岩溶区的地质结构类型进行划分,并在此基础上,根据上覆土体性质及受力后运动方式,对岩溶塌陷机理进行系统分类,以期为武汉市地下空间资源开发利用及岩溶塌陷防治提供理论依据及思路。

### 1 研究区概况

研究区位于白沙洲岩溶条带长江两岸,面积 123.68 km<sup>2</sup>,属于湖北省武汉市三环内主城区,交通位置优越,见图 1(a)。位于武汉市中南部,属中亚热带过渡的湿润季风气候,温暖湿润、四季鲜明、热量丰富、降水充沛、光照充足,雨热同季。年平均气温在 17℃左右,多年平均降水量 1 233.3 mm;地貌以平原地形为主,沿长江两岸及各湖泊周缘分布,沿北东、北西向逐渐过渡至垄岗、残丘。地形多平坦、开阔,建筑密集,人类工程活动强烈见图 1(b)。

区域构造上位处扬子准地台-武汉台褶束,受南北向构造应力的挤压,武汉台褶束内地层构成了一系列近东西向的紧密线状褶皱,研究区可溶岩位于其中②新

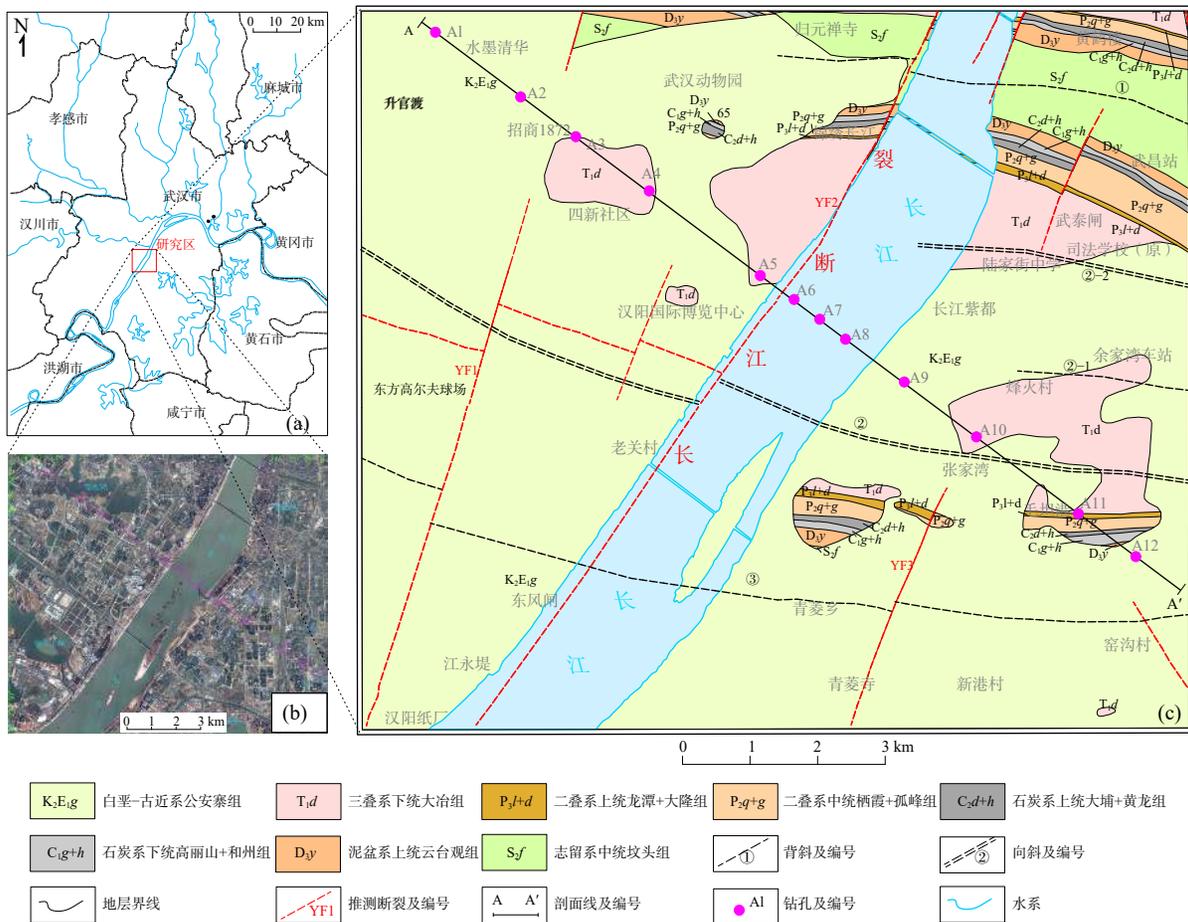


图 1 研究区地理位置及地质构造简图

Fig. 1 The geographical location and geological structure map of the study area

隆-豹懈复式倒转向斜部位; 研究区基岩多隐伏于第四系土层之下, 地层由志留系至三叠系及白垩-古近系红

砂岩盖层组成见图 1(c)。地下水主要以第四系孔隙承压水和裂隙岩溶水为主(图 2)。

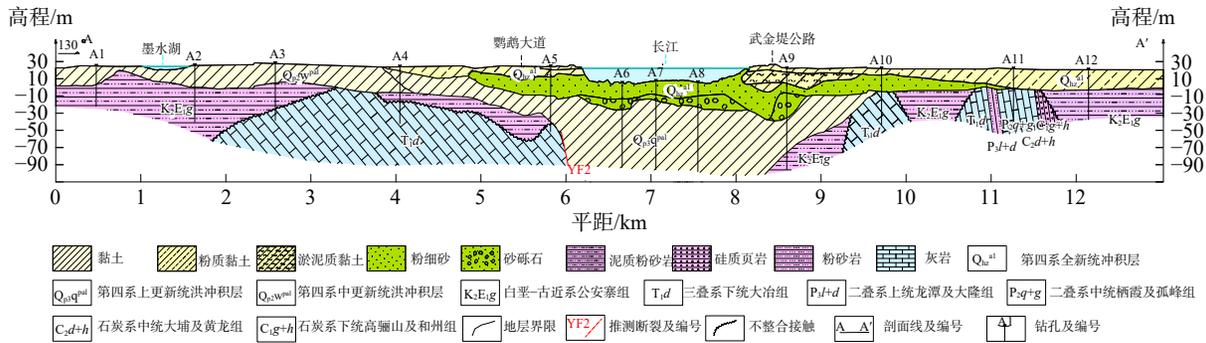


图 2 研究区水文地质剖面图  
Fig. 2 Hydrogeological section of the study area

研究区内先后发生过 22 处(27 次)岩溶塌陷(少数塌陷同一地点发生两次或多次), 塌陷坑 61 个。塌陷均为现代土层塌陷。除极少数时间较早的塌陷为自然因素引起外, 其余均为人为因素引起的塌陷。

## 2 可溶岩区地质结构类型及其分布

### 2.1 上覆土体类型

上覆土体根据其塑性指数的大小, 可以划分为黏性土( $I_p > 10$ )和无黏性土( $I_p < 10$ )<sup>[5]</sup>。

黏性土具有较高的黏聚力( $c$ )和相对较小的内摩擦角( $\varphi$ ), 根据其工程特性和液性指数可划分为一般黏性土( $I_L < 0.75$ )和软弱土( $I_L \geq 0.75$ )。一般黏性土(包括砾石土和碎石土)主要包括区内长江一级阶地的冲积、洪冲积呈可塑、硬塑黏性土, 以及二级、三级阶地的老黏土, 其抗剪强度相对较高; 软弱土主要包括区内第四系湖积层淤泥、淤泥质黏性土。其因具有高含水量、低抗剪强度而易流失变形。

无黏性土黏聚力很小或等于 0, 内摩擦角大。主要包括第四系冲积层的砂、砾石等砂性土, 其孔隙多, 透水性好。在饱水条件下, 由于孔隙水压力作用, 其有效应力减小, 土颗粒自由度较大, 易在重力和渗流作用下漏失。

### 2.2 地质结构类型

岩溶区地质结构是指上覆盖层和下伏可溶岩之间的空间组合关系。根据研究区内可溶岩的上方砂性土、黏性土、软弱土、非可溶岩(红层)的上下叠置关系及地面塌陷特征, 将地质结构划分为 3 类、5 型, 具体见图 3、表 1 所示。

划分地质结构时, 3 类土层的厚度一般不小于 1 m。

对于黏性土和砂性土互层的多层结构, 根据底部单层土的岩性、厚度及其在塌陷变形中土颗粒的活动特点, 归于②(底部为砂性土)和④(底部为黏性土)型地质结构。

#### 2.2.1 I 类地质结构

该类地质结构中, 上部为黏性土或黏性土+红层, 下部为可溶岩。分布面积较大, 约 14.95 km<sup>2</sup>。

主要分布于研究区东部蛇山、起义门、巡司河以东一带, 南部新港村一带, 西南角汉阳纸厂一带, 西北部四新一带。

该大类中, 黏性土黏聚力值较大, 土颗粒自由活动受到限制, 在土体中通常呈“黏粒团块”形式“一块一块”地塌落在黏性土层底部形成土洞(土拱)<sup>[6]</sup>。上部仅有黏性土结构, 土洞的形成主要与地下水吸蚀和冲刷作用相关, 即地下水沿岩土界面的波动引起的反复真空负压吸蚀作用以及水位波动导致土体浸湿、冲刷、溶蚀等作用并流失形成, 在外部因素诱发下, 土洞顶板拱效应失效时发生地面塌陷; 上部为黏性土+红层结构, 因红层的阻隔, 土洞难以形成, 岩溶塌陷的可能性极小。

#### 2.2.2 II 类地质结构

该类地质结构中, 均有砂性土层。根据砂性土层上部、下部黏性土和红层的有无, 进一步细分为②③④型地质结构。分布面积最大, 约 37.36 km<sup>2</sup>。主要分布于研究区中部长江两岸西至江城大道、东至巡司河, 局部位于研究区南部青菱湖以北地带和新港村以东一带。

该大类中, 砂性土颗粒黏聚力  $c$  值基本为 0, 常在重力和地下水潜蚀的联合作用下“一颗一颗”地漏失形成沙漏土洞, 在外部因素的诱发下, 直接发生或可溶岩上黏性土、红层遭受破坏时砂颗粒漏失而产生地面塌陷。

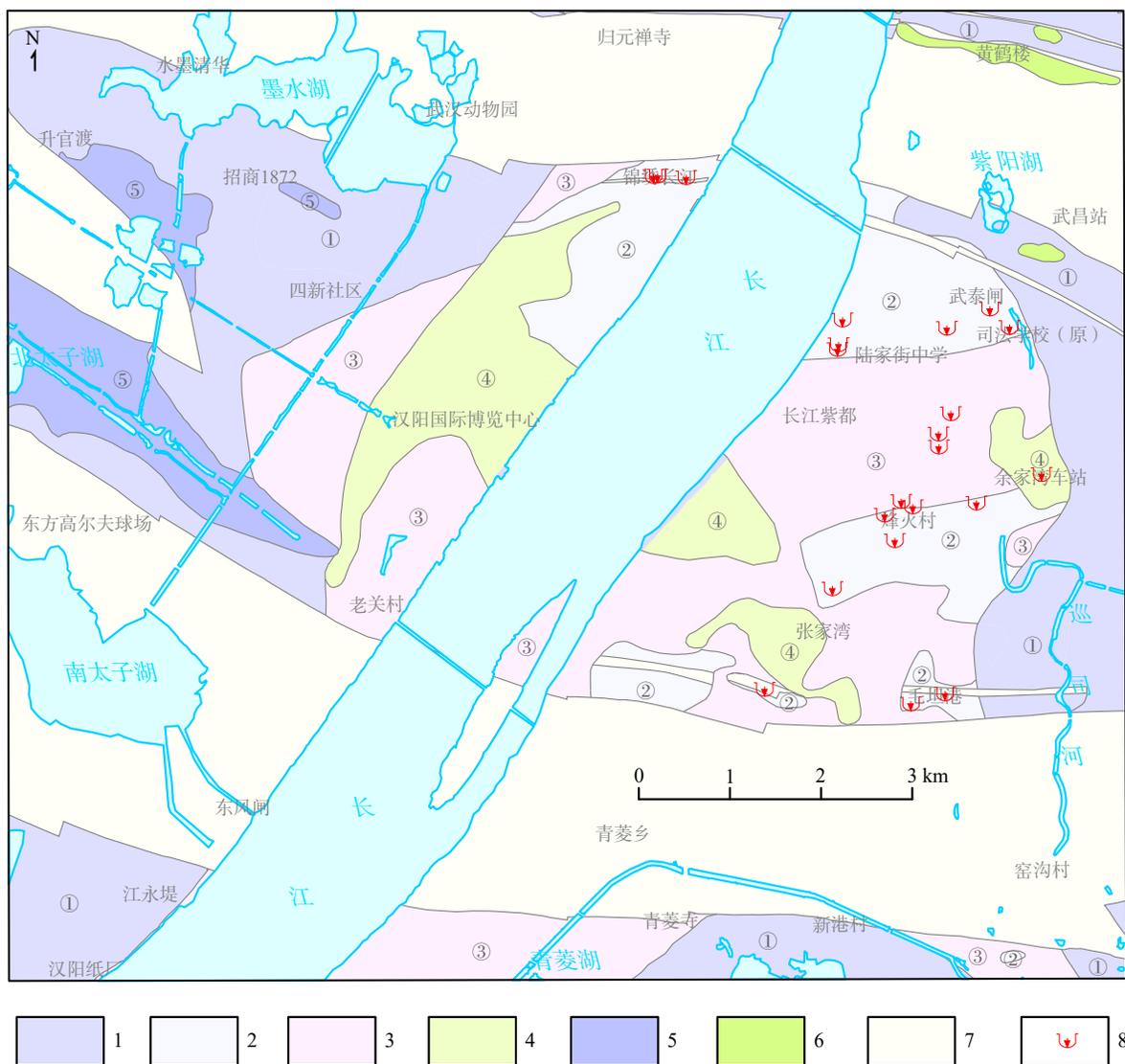


图 3 研究区岩溶地质结构类型分区图

Fig. 3 Zoning map of karst geological structure in the study area

1—①型; 2—②型; 3—③型; 4—④型; 5—⑤型; 6—基岩出露; 7—非可溶岩区; 8—岩溶塌陷

### 2.2.3 III 类地质结构

该类地质结构中,上部为软弱土,下部为可溶岩,中部为黏性土和红层。分布面积最小,约 3.3 km<sup>2</sup>。主要分布于研究区西北部北太子湖-江城大道一带及村一带。

该类结构中,软弱土通常在重力或吸力作用下流失而形成土洞<sup>[4]</sup>。在外部因素诱发下,中部黏性土层和红层遭受破坏时,软弱土体流失导致地面塌陷。

### 2.2.4 地质结构与地貌关系

岩溶区地质结构是指可溶岩与其上方一定厚度土层的上下叠置关系,它与地层时代,特别是第四纪地层密切相关。因为一定的地质结构都是在地质时期特定的地质环境中形成的,具有自己特定的、与沉积环境相适应的岩性组合。

岩溶区地质结构由下伏可溶岩和上覆第四纪松散堆积层构成,第四系与地貌密切相关,因而岩溶区地质结构与地貌关系密切。如长江一级阶地分布区主要为②、③、④型地质结构;在二级阶地、剥蚀垄岗等地的老黏土分布区,则以①型地质结构为主;挽近时期在老黏土分布区形成湖泊区域,多见⑤型地质结构。

### 3 岩溶塌陷机理分类及其基本特征

第四系覆盖区岩溶地面塌陷可以定义为:岩溶洞隙提供土体运移通道和储存空间,在外部诱发因素作用下导致黏土塌落<sup>[6-11]</sup>、砂颗粒漏失<sup>[12-14]</sup>、软弱土流失<sup>[5,15]</sup>而引起的地面沉降变形现象。上覆土体是岩溶塌陷的主体,岩溶和诱发因素只是分别提供了土体塌陷的空间

表1 研究区岩溶区地质结构类型划分

Table 1 Classification of karst geological structure of the study area

类型	亚类	模型图	结构特点	主要分布
I	①		黏性土(黏性土+红层)直接覆盖于可溶岩上;可发生土洞型塌陷	研究区东部黄鹤楼以北、起义门、毛坦港巡司河以西一带以及墨水湖南侧招商1872至四新社区一带;属于长江二级阶地、一级阶地后缘、剥蚀垄岗区
II	②		上部为黏性土,中部为砂性土,下部为可溶岩;可发生沙漏型塌陷或沙漏型-土洞型复合型塌陷	主要分布于研究区中部长江两岸,以西锦绣长江一带,以东陆家街-司法学校一带;属于长江一级阶地覆盖型岩溶区
	③		上部为黏性土,中上部为砂性土,中下部为红层,下部为可溶岩;红层破坏后可发生沙漏型塌陷或沙漏型-土洞型复合型塌陷	主要分布于研究区中部长江两岸,以西老关村-四新社区一带,以东长江紫都-烽火村和张家湾-毛坦港一带、江心洲;多属于长江一级阶地埋藏型岩溶区
④		上部为黏性土,中上部为砂性土,中下部为黏性土(黏性土+红层),下部为可溶岩;中下部黏性土(黏性土+红层)破坏后可发生沙漏型塌陷或沙漏型-土洞型复合型塌陷	主要分布于研究区中部长江西侧锦绣长江以西一带,及东部余家湾车站一带;属于长江一级阶地可溶岩上部残积层分布区	
III	⑤		软弱土和可溶岩之间夹有厚度大于1 m的黏性土(黏性土+红层);黏性土(黏性土+红层)破坏后可发生泥流型塌陷	主要分布于研究区西北部北太子湖-江城大道一带及村一带,零星少量分布于招商1872一带;属于长江二级阶地

条件和作用力。土体受外力作用后土颗粒运动方式决定了其塌陷的机理,即岩溶区不同的地质结构,其岩溶塌陷的机理也不同。因此,在岩溶区地质结构研究的基础上,根据土体受力后塌陷过程中土颗粒的运移方式,即黏土块体塌落、砂颗粒漏失、软弱土流失,可将研究区岩溶塌陷机理分为块体塌落型、沙漏型、泥流型3大类,同时也存在2种类型复合的岩溶塌陷。

### 3.1 块体塌落型塌陷

在黏性土层中,尤其老黏土,其具有弱—微透水性,在塌陷过程中基本不能形成稳定的渗流场,渗流潜蚀作

用很小。研究区黏性土往往通过地下水位波动引起的冲刷、吸蚀以及砂土漏失等方式在黏性土底部形成土洞(土拱),并不断向上扩展,在自然或人为因素诱发下,顶板失稳引起塌陷。

发生在黏性土层中,由于黏土一块一块塌落致土洞洞顶拱效应失效而产生的地面塌陷现象称为土洞型塌陷。研究区I类、II类、III类地质结构均可能发生。以研究区上覆盖层为单一黏性土的可溶岩地区(①型地质结构)为例,土洞型地面塌陷过程可分为土洞形成与演化和地面塌陷两个阶段。土洞形成与演化阶段时间往

往比较长,是一个渐变过程。土洞塌陷阶段是在外部因素诱发后地面塌陷突然发生的过程,时间短暂。

土洞型塌陷可以概括为如下地质过程:如图 4(a)所示,土洞岩基岩面初步形成,洞顶土体坍塌,不断向上发展,土洞规模增大,土洞顶板逐渐变薄;如图 4(b)所示,坍塌下来的土体堆积在土洞底部,或被保存下来,或被地下水带入溶蚀洞隙中,土洞向上扩展和迁移;土洞顶板在其周围土体侧压力产生的摩擦力作用下保持平衡状态(拱效应);如图 4(c)所示,在外界因素诱发或土洞顶板继续变薄时,四周摩擦力不能平衡土洞顶板,顶板迅速塌落;如图 4(d)所示,塌陷形成临空面后坑壁向塌陷中心滑移,造成地面倾斜,形成环状地裂缝。土洞型塌陷中,塌陷坑壁常常较陡,有时甚至直立,塌陷坑四周地面向坑内缓倾,如位于研究区周边的江夏区大桥新区鹏湖湾二期工地塌陷,其剖面图见图 5。

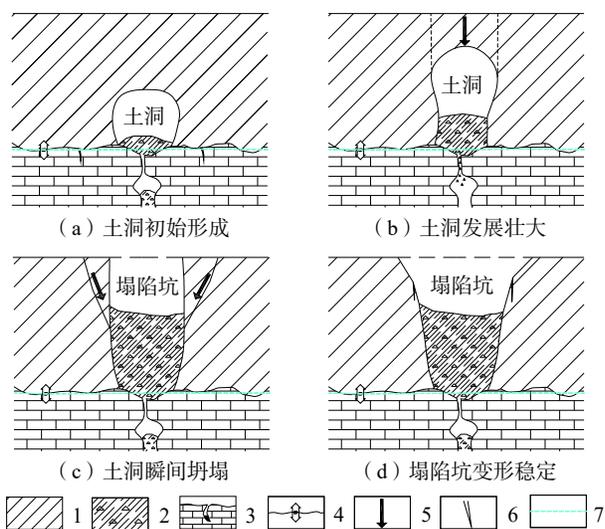


图 4 块体塌落型岩溶塌陷地质模型示意图

Fig. 4 Geological model of soil cave collapse

1—黏性土;2—塌陷堆积物;3—溶洞及充填物;4—地下水水位上下频繁波动;5—土体位移方向;6—裂缝;7—地下水水位

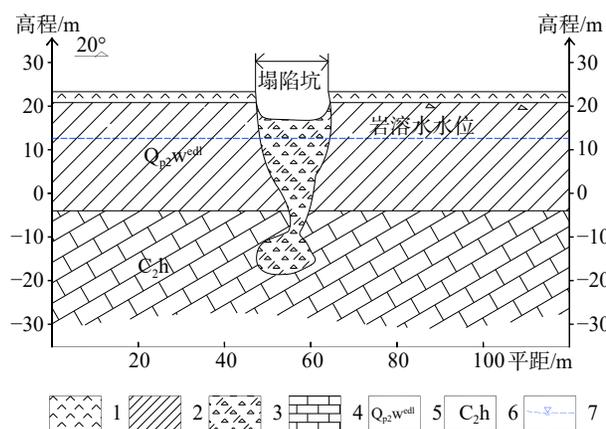


图 5 鹏湖湾二期工地岩溶塌陷地质剖面图

Fig. 5 Geological section of karst collapse in Penghu Bay second-stage construction site

1—耕植土;2—黏性土;3—塌陷堆积物;4—灰岩;5—第四系中更新统王家店组残坡积层;6—石炭系上统黄组;7—地下水水位

### 3.2 沙漏型塌陷

当盖层为单一砂性土时,沙漏是非常典型的松散砂土塌陷的物理模型。松散砂性土颗粒自由度高,不能像黏性土那样产生拱效应形成土洞,当砂颗粒通过下伏岩溶洞隙漏失后,直接在地表产生沉降变形效应,即地面塌陷。研究区主要位于长江一级阶地,土层结构以“上黏下砂”二元结构为主,在外界诱发因素下砂颗粒向下伏溶蚀洞隙中漏失后,在黏性土和砂性土界面处会形成沙漏土洞,土洞规模不断扩大,黏性土顶板突然失稳坍塌而产生地面塌陷。发生在砂性土中、由砂颗粒漏失而产生的地面塌陷现象称为沙漏型塌陷。研究区 II 类地质结构可能发生,区内已发塌陷均属于此类型(表 2)。其有以下基本特点: a 重力是沙漏产生的必要条件,地下水的参与加快了塌陷速度,缩短了塌陷时间; b 沙漏型塌陷需要有砂颗粒漏失通道和储存空间; c 发生沙漏型塌陷往往需要有外部因素诱发; d 沙漏型塌陷是砂颗粒漏失造成的,从开始漏失到塌陷过程很迅速。

表 2 研究区内岩溶塌陷类型分类表

Table 2 Classification table of karst collapse types in the study area

序号	发生时间	塌陷名称(地点)	塌陷规模	塌陷灾情	地质结构	诱发因素	塌陷机理
1	1931年8月	武昌区丁公庙	—	江堤溃口,白沙洲淹没,导致人畜伤亡。	②	地下水水位波动	沙漏型
2	1977年9月	汉阳区汉阳中南轧钢厂	中型	1栋民房倒塌,1500t烟煤和600t钢材被埋,工厂停产。	②	开采地下水	沙漏型
3	1983年7月	武昌区白沙洲阮家巷	中型	倒塌民房1间,上万块砖瓦被埋,破坏房屋5栋。	②	地下水水位波动	沙漏型
4	2005-08-22	武昌区白沙洲阮家巷	中型	道路破坏,工地长约10m围墙和工棚倒塌,自来水管断裂。	②	桩基施工	沙漏型
4	1988年5月	武昌区陆家街	中型	10间民房倒塌,20间房屋墙体开裂,输电线路破坏,学校停课。	②	地下水水位波动	沙漏型

续表 2

序号	发生时间	塌陷名称(地点)	塌陷规模	塌陷灾情	地质结构	诱发因素	塌陷机理
5	1999-04-22	洪山区青菱乡毛坦港小学	中型	毁坏公路、水渠、农田,致使交通中断,危及配电房,对京广铁路构成潜在威胁。	②	地下水位波动	沙漏型
6	2000-02-22	武昌区涂家沟市司法学校	中型	3栋楼房毁坏、学生食堂墙体开裂、配电房开裂、水塔开裂、水塔罐体倾斜,进出校门道路开裂,学校停课。	②	降雨	沙漏型
7	1997年 2000年3月 2000-04-06	洪山区青菱乡烽火村乔木湾	小型 小型 大型	42栋230余间房屋开裂倒塌,19栋房屋受损,直接经济损失达611万元,间接经济损失达510万元。	②	开采地下水 开采地下水 开采地下水	沙漏型
8	2005-08-10	洪山区青菱乡烽火村江南竹木大市场	小型	1栋平房受损。	②	地下水位波动	沙漏型
9	2006年4月	武昌区白沙洲长江紫都花园	中型	工棚倒塌,新建楼房墙体拉裂。	②	钻探施工	沙漏型
10	2009-06-10 2009-12-16	武昌区武泰闸	小型 中型	道路破坏,一辆货车受损。 道路破坏。	②	钻探施工,载重 车辆荷载和振动 桩基施工	沙漏型 沙漏型
11	2009-06-17 2009-06-27	洪山区烽火村	中型 中型	道路破坏,一辆货车受损,司机受轻伤。 道路破坏,交通主干道中断。	②	钻探施工 钻探施工、载重 车辆荷载和振动	沙漏型 沙漏型
12	2009-11-24	洪山区白沙洲大道张家湾段	中型	道路破坏,交通主干道中断,供水管破裂。	②	桩基施工振动	沙漏型
13	2009-12-22	洪山区烽火村钢材市场	中型	主供水管道破裂,道路破坏,4间房屋开裂。	②	桩基施工	沙漏型
14	2010-01-28	洪山区青菱乡光霞村五组	中型	钻具及钻杆被埋,菜地受损。	②	钻探施工	沙漏型
15	2010-04-18	青菱乡烽火村白沙洲大道	小型	道路破坏。	②	载重车辆荷载和 振动	沙漏型
16	2010-07-19	青菱乡张家湾南湖变电站	中型	变电站主建筑物南段墙面、立柱开裂,10 kV消弧线圈室停止工作并拆除,梅家山至张家湾一带工业及民用电受到威胁。	④	桩基施工振动	沙漏型
17	2011年5月	武昌南湖红旗村	中型	一台打桩机被埋。	②	桩基施工	沙漏型
18	2013-04-14	洪山区青菱乡毛坦港佳兆业·金城天下三期	中型	延误工程工期。	③	钻探施工	沙漏型
19	2014-06-04— 2014-06-26	洪山区烽火村还建项目H10、H11地块	中型	影响施工安全和建筑物稳定	②	钻探施工	沙漏型
20	2015-08-10	汉阳区鹦鹉大道乐福园酒楼锦绣长江店北	中型	塌陷造成两名人员失踪,2层的活动板房遭受破坏。	②	钻探和桩基施工	沙漏型
21	2015-08-07	汉阳区鹦鹉大道地铁6号线K12+583	小型	地铁施工暂停。	②	钻探和桩基施工	沙漏型
22	2017-05-23	洪山区青菱街烽火村烽胜路保利新武昌小区西侧	中型	2间工棚宿舍严重倾斜、工地围墙垮塌约30 m、毁坏景观树1棵、花坛4座、广告牌1个;路面路基损毁约100 m <sup>2</sup> 及该路段自来水管、路灯电线、通讯电缆等;人行道路面和工地地面多处开裂。	②	钻探和桩基施工	沙漏型

研究区覆盖层多为上黏下砂的二元结构(②型地质结构),溶蚀洞隙为砂性土颗粒提供漏失通道、储存以及运移空间。在外部因素的诱发下,砂颗粒逐渐漏失,形成初步的沙漏土洞。随着砂颗粒漏失量的增大,在自重、荷载等作用下,土体失稳垮塌,在地表形成规模较大的塌陷坑,即发生岩溶地面塌陷,如图6所示。

在砂层与可溶岩之间发育有黏性土层(④型地质结构)或红层(③型地质结构)时,当人类工程活动,如钻

探、桩基施工等揭穿中部黏性土层或红层,并连通砂性土和下部可溶岩中的通道时,也可发生类似的岩溶地面塌陷现象,如青菱乡张家湾南湖变电站岩溶塌陷、毛坦港佳兆业·金城天下3期岩溶塌陷(图7);当黏性土厚度相对较大时,下部砂性土漏失形成沙漏土洞产生的致塌力不够时,上部黏性土通过冲刷、吸蚀等作用渐渐塌落,最终失稳产生塌陷,属于沙漏-土洞复合型塌陷。

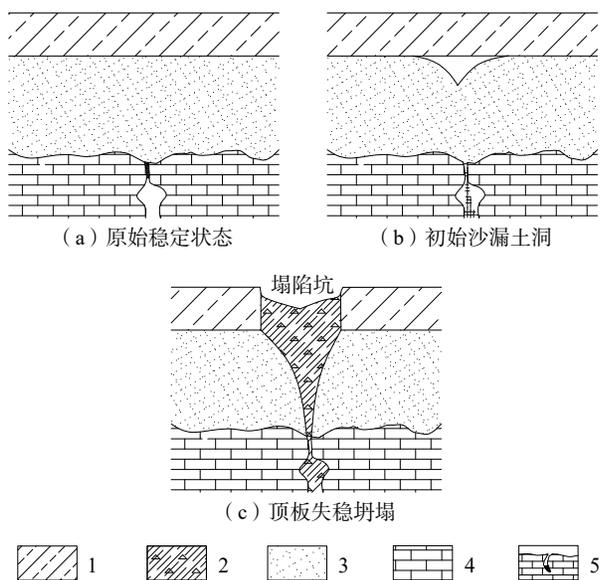


图 6 沙漏型岩溶塌陷地质模型示意图

Fig. 6 Geological model of hourglass-type subsidence

1—黏性土; 2—塌陷堆积物; 3—砂性土; 4—可溶岩; 5—溶洞及填充物

即可发生泥流型岩溶塌陷。

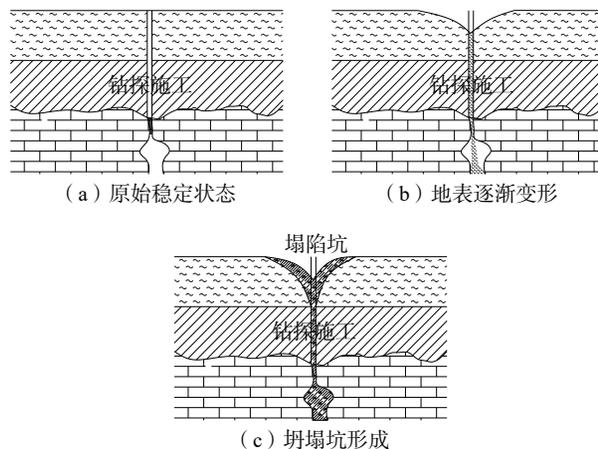


图 8 泥流型岩溶塌陷地质模型示意图

Fig. 8 Geological model of mud flow subsidence

1—黏土; 2—塌陷堆积物; 3—淤泥; 4—可溶岩; 5—溶洞及填充物

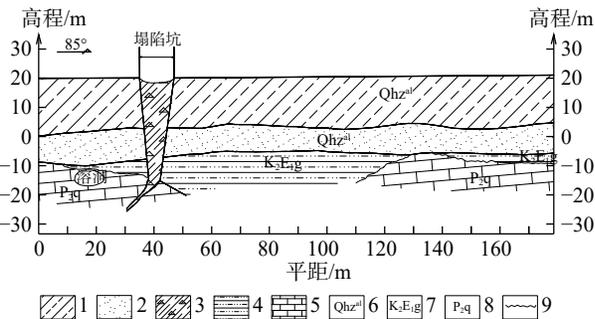


图 7 佳兆业·金域天下 3 期岩溶塌陷地质剖面图

Fig. 7 Geological section of Jiazhaoye-Jinyu karst collapse in practical project

1—黏土; 2—粉细砂; 3—扰动土; 4—粉砂岩; 5—灰岩; 6—第四系全新统走马岭组冲积层; 7—白垩-古近系公安寨组; 8—二叠系中统栖霞组; 9—不整合接触界线

### 3.3 泥流型塌陷

软弱土体含水率高、孔隙比大、干密度低,呈软塑-流塑状,具低抗剪强度,因而具有较强的触变性及流变性,极易发生变形,条件具备时即可以流失。

由软弱土体流失而导致的地面塌陷称为泥流型塌陷(图 8)。研究区 III 类地质结构可能发生。可溶岩上方发育有厚层软弱土体及黏性土层(红层),受到外界因素(钻探施工等)诱发后,软弱土体沿岩溶洞隙通道发生流动变形,逐渐在地表产生变形;随着变形量的不断增大,在地面形成宏观塌陷坑(图 8)。研究区及武汉南湖一带分布有⑤型地质结构,南湖一带软弱土层相对较厚,当人类活动(如钻探、桩基施工)揭穿中部黏性土层,并连通上部软弱土和下部可溶岩中的岩溶洞隙时,

### 4 岩溶塌陷诱发因素

覆盖型岩溶区在天然情况下是处于平衡稳定状态,没有外部因素的诱发,一般不会或很难发生岩溶地面塌陷。诱发因素主要通过使地下水位波动或连通土体与下部岩溶孔洞,上覆土体往岩溶洞隙中丧失,逐渐失稳而产生塌陷。地下水位波动可产生地下水渗流、侵蚀作用或产生真空负压吸蚀作用带走土体;工程活动如钻探、桩基施工等打穿岩溶顶板使上覆土体与下部岩溶洞隙连通,土体丧失而产生塌陷。

诱发因素可分为自然因素及人为因素<sup>[16-20]</sup>。其中自然因素主要包括降雨及长江水位变化。长江水位的波动引起第四系孔隙水水位的波动,导致地下水水头差增大。在水头压力作用下,第四系孔隙承压水向岩溶裂隙通道渗流,在渗流潜蚀作用下,土层中形成空洞,随着时间推移,土洞不断扩展,直至洞体支撑力小于上覆荷载时,上部土层在自重作用下不断失稳垮落,产生地面变形直至塌陷。降雨可使上覆土体饱水,自重力增大,从而加大致塌力,土质软化,物理力学强度降低,当洞体支撑力(抗塌力)小于上覆荷载(土体压力及外荷载)时,产生地面变形直至地面塌陷。

人为因素主要为工程活动,其可以概括为道路工程、工业与民用建筑工程、地下工程和地下水开发 4 种类型,施工类型主要包括钻探、桩基础施工、土石方开挖、支护、地下工程明挖法、暗挖法及盾构施工、加载、振动、抽排地下水等。其中:桩基、钻孔施工时,在成孔过程中揭穿厚薄不均的下部黏性土层、粉细砂层和溶

洞或者岩溶裂隙带,在水位差和潜蚀作用下,使施工的循环水和第四系松散岩类孔隙水向岩溶水运移,携带粉细砂等细小颗粒向灰岩溶洞或岩溶裂隙中不断搬运,掏空覆盖层,形成土洞,而在冲击振动的作用下,土体结构遭到一定程度的破坏,降低了土体的稳定性,当土洞不能承受上覆土层的重量时,上部土体下沉,最终形成塌陷,例如洪山区青菱乡光霞村五组岩溶塌陷。其它具体见表 2 所示。

## 5 结论

覆盖型岩溶区岩溶地面塌陷的主体是上覆土体。不同类型的土体,其物理学性质不同,变形破坏方式及其过程也不同。同时非可溶岩(红层)的有无也直接影响岩溶地面塌陷的易发程度。根据研究区内可溶岩的上方盖层的性质不同即砂性土、黏性土、软弱土、非可溶岩(红层)的上下叠置关系及地面塌陷特征,将岩溶地质结构划分为 3 大类(I、II、III)、5 小型(①②③④⑤)。

在岩溶地质结构研究的基础上,根据土体受力后塌陷过程中土颗粒的运移方式,即黏土块体塌落、砂颗粒漏失、软弱土流失,系统将研究区岩溶塌陷机理分为土洞型(I类)、沙漏型(II类)、泥石流型(III类)3 大类,同时也存在多种类型复合型岩溶塌陷。区内已发的 22 处岩溶塌陷均属于沙漏型塌陷。

从岩溶地面塌陷的主体上覆土层的不同性质及其不同的运动响应特点来系统认识覆盖型岩溶塌陷机理,并将诱发因素与外部条件区分开,可以系统的针对不同的塌陷机理模式提出相应的防治对策及处置措施。

## 参考文献 (References) :

- [1] 罗小杰. 武汉地区天兴洲碳酸盐岩条带岩溶发育的异常性及其成因探讨 [J]. *中国岩溶*, 2015(1): 35-42. [ LUO Xiaojie. Karst abnormal development and origin of the Tianxingzhou carbonate rock belt in the Wuhan area [J]. *Carsologica Sinica*, 2015(1): 35-42. (in Chinese with English abstract) ]
- [2] 史俊德,连冬香,杨士臣. 论岩溶塌陷问题 [J]. *华北地质矿产杂志*, 1998(3): 264-267. [ SHI Junde, LIAN Dongxiang, YANG Shichen. Discussions on the engineering geologic problems relevant to Karst collapse [J]. *North China Journal of Geology and Mineral Resources*, 1998(3): 264-267. (in Chinese with English abstract) ]
- [3] 罗小杰,沈建. 我国岩溶地面塌陷研究进展与展望 [J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 101-111. [ LUO Xiaojie, SHEN Jian. Research progress and prospect of Karst ground collapse in China [J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 101-111. (in Chinese with English abstract) ]
- [4] 李前银. 再论岩溶塌陷的形成机制 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2009, 20(3): 52-55. [ LI Qianyin. Further study on formation mechanism of Karst collapses [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2009, 20(3): 52-55. (in Chinese with English abstract) ]
- [5] 罗小杰. 也论覆盖型岩溶地面塌陷机理 [J]. *工程地质学报*, 2015(5): 886-895. [ LUO Xiaojie. Further discussion on mechanism of covered Karst ground collapse [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015(5): 886-895. (in Chinese with English abstract) ]
- [6] 王建秀,杨立中,刘丹,等. 阻水盖层分布区岩溶塌陷的物质基础及成因研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2000, 27(4): 25-29. [ WANG Jianxiu, YANG Lizhong, LIU Dan, et al. Collapse mechanism of Karst area covered by impermeable cappings [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2000, 27(4): 25-29. (in Chinese with English abstract) ]
- [7] 王滨,贺可强. 岩溶塌陷临界土洞的极限平衡高度公式 [J]. *岩土力学*, 2006, 27(3): 458-462. [ WANG Bin, HE Keqiang. Study on limit equilibrium height expression of critical soil cave of Karst collapse [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(3): 458-462. (in Chinese with English abstract) ]
- [8] 苏添金,洪儒宝,简文彬. 覆盖型岩溶土洞致灾过程的数值模拟与预测 [J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(5): 179-187. [ SU Tianjin, HONG Rubao, JIAN Wenbin. Numerical simulation and prediction of covered Karst collapse [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27(5): 179-187. (in Chinese with English abstract) ]
- [9] 罗小杰,罗程. 泥石流型岩溶地面塌陷物理模型[C]. 中国地质学会工程地质专业委员会. 2016年全国工程地质学术年会论文集. 中国地质学会工程地质专业委员会:《工程地质学报》编辑部, 2016: 1071-1076. [ LUO Xiaojie, LUO Cheng. Physical model of mudflow karst ground collapse[C]. Engineering Geology Professional Committee of Chinese Geological Society. Proceedings of 2016 National Engineering Geology Academic Annual Meeting. Engineering geology Professional Committee of Chinese Geological Society: Editorial Department of Journal of Engineering Geology, 2016:1071-1076. (in Chinese) ]
- [10] 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) ]
- [11] 任新红,郭永春,王清海,等. 覆盖型岩溶潜蚀塌陷临界裂隙开度模型试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(5): 84-87. [ REN Xinhong, GUO Yongchun, WANG Qinghai, et al. Experiment research of the critical fissure width of collapse of covered Karst during underground erosion [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(5): 84-87. (in Chinese with English abstract) ]

- [ 12 ] 罗小杰, 罗程. 沙漏型岩溶地面塌陷物理模型 [ J ] . 中国岩溶, 2017, 36(1): 88-93. [ LUO Xiaojie, LUO Cheng. Physical model of ground collapse of hourglass type in Karst region [ J ] . *Carsologica Sinica*, 2017, 36(1): 88-93. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 王滨, 贺可强, 姜先桥, 等. 岩溶塌陷渗压效应致塌机理研究——以山东省枣庄市岩溶塌陷为例 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(1): 18-22. [ WANG Bin, HE Keqiang, JIANG Xianqiao, et al. Study on formation mechanism of Karst collapse by seepage pressure——Karst collapse in Zaozhuang City, Shandong Province as an example [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2005, 16(1): 18-22. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 雷明堂, 蒋小珍, 李瑜. 岩溶塌陷模型试验——以武昌为例 [ J ] . 地质灾害与环境保护, 1993, 4(2): 39-44. [ LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen, LI Yu. Model test of karst collapse——Taking Wuchang as an example [ J ] . *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 1993, 4(2): 39-44. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 罗小杰, 罗程. 土洞型岩溶地面塌陷物理模型 [ C ] . 中国地质学会工程地质专业委员会. 2016年全国工程地质学术年会论文集. 中国地质学会工程地质专业委员会:《工程地质学报》编辑部, 2016: 1246-1254. [ LUO Xiaojie, LUO Cheng. Physical model of karst ground collapse of earth cave type [ C ] . Engineering Geology Committee of Chinese Geological Society. Proceedings of 2016 National Engineering Geology Academic Annual Meeting. Engineering Geology Committee of Chinese Geological Society: Editorial Department Of Journal of Engineering Geology, 2016: 1246-1254. (in Chinese) ]
- [ 16 ] 武鑫, 王艺霖, 黄敬军, 等. 江苏徐州地区岩溶塌陷致塌力学模型及水位控制红线 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 67-77. [ WU Xin, WANG Yilin, HUANG Jingjun, et al. Mechanical model of Karst collapse and red line of groundwater level of Xuzhou Region in Jiangsu Province [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(2): 67-77. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 郭宇, 周心经, 郑小战, 等. 广州夏茅村岩溶地面塌陷成因机理与塌陷过程分 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(5): 54-59. [ GUO Yu, ZHOU Xinjing, ZHENG Xiaozhan, et al. Analysis on formation mechanism and process of Karst collapse in Xiamao Village, Guangzhou City of Guangdong Province [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(5): 54-59. (in Chinese with English 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 ] 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) ]
- [ 20 ] 高宇梁, 李殿辉. 湖北大冶鸡冠嘴金矿岩溶塌陷成因分析 [ J ] . 湖北地矿, 2003, 17(4): 19-22. [ GAO Yuliang, LI Dianhui. Analysis on the cause of Karst collapse in Daye jiguanzui gold mine [ J ] . *Hubei Geology & Mineral Resources*, 2003, 17(4): 19-22. (in Chinese with English abstract) ]