

陈标典, 李喜, 熊启华, 等. 武汉纸坊-庙山老黏土区岩溶地面塌陷形成演化与监测[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 361-369.

DOI: 10.11932/karst20230207

武汉纸坊-庙山老黏土区岩溶地面塌陷形成演化与监测

陈标典^{1,2}, 李喜^{1,2}, 熊启华^{1,2}, 李彧磊^{1,2}, 涂婧^{1,2}, 刘鹏瑞^{1,2}, 叶疆²

(1. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室, 湖北武汉 430034; 2. 湖北省地质环境总站, 湖北武汉 430034)

摘要:为查明武汉纸坊-庙山一带老黏土区岩溶地面塌陷成灾机理,并选取合适方法手段进行监测预警,有效减轻岩溶地面塌陷造成的危害,通过岩溶专项调查,查明了区内可溶岩分布及其地质结构,分析了岩溶地面塌陷形成演化过程及不同塌陷阶段监测方法的选取,调查分析结果表明:该区多为单层结构老黏土分布区,根据盖层黏性土、软弱土、非可溶岩(红层)的上下组合关系,将可溶岩分布区地质结构划分为3类(①、②、③)。不同的地质结构根据土体物理力学特征差异,其发生岩溶地面塌陷的形成演化机理不同:①类结构主要发生土洞型塌陷,②类结构主要发生泥流+土洞复合型塌陷,③类结构由于红层的阻隔,黏性土土洞无法形成,一般不会产生塌陷。结合塌陷的演化过程,土洞的形成演化阶段,重点是采用光纤等技术监测土洞的形成扩展情况,同时也要对地下水位、水气压力等诱发因子进行监测;土洞顶板变形塌陷阶段,因临塌前地表往往会产生少量沉降变形,主要采用精密水准测量或GPS监测等技术监测地表形变。

关键词:武汉纸坊-庙山;地质结构;岩溶地面塌陷;形成演化;监测

中图分类号: P 642.26 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)02-0361-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

武汉市是全国中大城市中岩溶地面塌陷地质灾害最为典型的城市之一。近年来,由于城市建设工程活动加剧,岩溶地面塌陷频发,除了多发于长江一级阶地上黏下砂二元结构外,单层结构老黏土分布区也时有发生,且呈频发趋势。2014年以前仅发生1处(2001年),2014年至今共发生4处,其中江夏区大桥新区鹏湖湾二期工地塌陷致2人死亡,一台钻机被埋,在建住宅楼筏板基础东侧悬空,直接损失近3200万元。

武汉市岩溶地面塌陷多发生于覆盖型岩溶区,由于塌陷多具有隐蔽性和突发性,诱发因素多且复

杂,常产生严重后果,制约城市建设发展的同时,也严重威胁着人民的生命财产安全。

因此,武汉地区岩溶地质灾害防治早已引起许多学者、专家的关注,他们从塌陷的形成机理、诱发因素、监测、防治等方面做出了许多研究和探索。

岩溶地面塌陷的形成演化是综合多类型土体、多种诱发因子共同作用的复杂过程。在塌陷的机理方面,从开始的“潜蚀论”(巴普洛夫)、“真空吸蚀论”(徐卫国)^[1]到康彦仁等^[2]按诱发因素和受力状态总结归纳的“重力致塌、潜蚀致塌、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种致塌模式再到罗小杰以塌陷的主体(上覆土体)为研究对象总结的“三机理论”^[3],逐渐地系统化,全面化。

资助项目:武汉市多要素城市地质调查示范项目(WHHC-2020-ZC001)、武汉市地质灾害一级专业监测点建设项目(WHWZ-ZC-2021-1C020)、湖北地质灾害形成机理、早期识别与监测预警研究(KJ2021-7)

第一作者简介:陈标典(1990—),男,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。

通信作者:李喜(1989—),女,博士,工程师。主要从事滑坡、岩溶地质灾害机理研究。E-mail: lixi525@163.com。

收稿日期:2022-05-24

在塌陷的监测方面,前人作了大量的探索,监测方法主要包括:地下水水位、水气压力、流速流向、地质雷达剖面扫描、光纤土体形变监测等^[4-7],都取得了一定的效果,但由于岩溶地面塌陷的隐蔽性、突发性、复杂性特点,监测研究的进展比较缓慢。

武汉市已发生塌陷均为土体塌陷。地质条件是覆盖型岩溶地面塌陷防治的基础,形成演化机理是塌陷监测、防治的理论依据^[5]。

1 研究区概况

研究区位于江夏区都市发展区纸坊-庙山一带,面积约 150 km²,属于湖北省武汉市纸坊新城中心,交通位置优越。属中亚热带过渡的湿润季风气候,温暖湿润、降水充沛。年平均气温在 17℃ 左右,多年平均降水量 1 241.3 mm;处于江汉平原向鄂南丘陵过渡地段,南部和中部高,西靠长江,东临汤逊湖,中部和北部以红褐色老黏土组成的岗状平原为主,地面高

程 25~40 m。南部以基岩出露的丘陵地貌为主。

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,研究区可溶岩主要位于沌口岩溶条带东部褶曲带马场咀向斜部位;研究区基岩多隐伏于第四系土层之下,第四系厚度多小于 30 m,研究区中部大桥新区一带达 30~40 m。基岩地层由志留系至三叠系及白垩—古近系红砂岩盖层组成(图 1)。其中可溶岩地层包括:位于向斜核部位置的三叠系下统大冶组(T_{1d})灰色灰岩、三叠系中—下统嘉陵江组(T_{1-2j})灰色、肉红色灰岩、白云质灰岩,分布面积广,占可溶岩分布面积约 80%;位于向斜两翼的石炭系上统大埔-黄龙组(C_{2d+h})白云岩和白云质灰岩、二叠系中统栖霞(P_{2q})灰黑色灰岩。研究区平均遇洞率 63.89%,平均线岩溶率 12.68%,岩溶总体强发育。

地下水主要以赋存于可溶岩洞隙中的裂隙岩溶水为主(图 2),岩溶地下水水位多于基岩面附近波动,

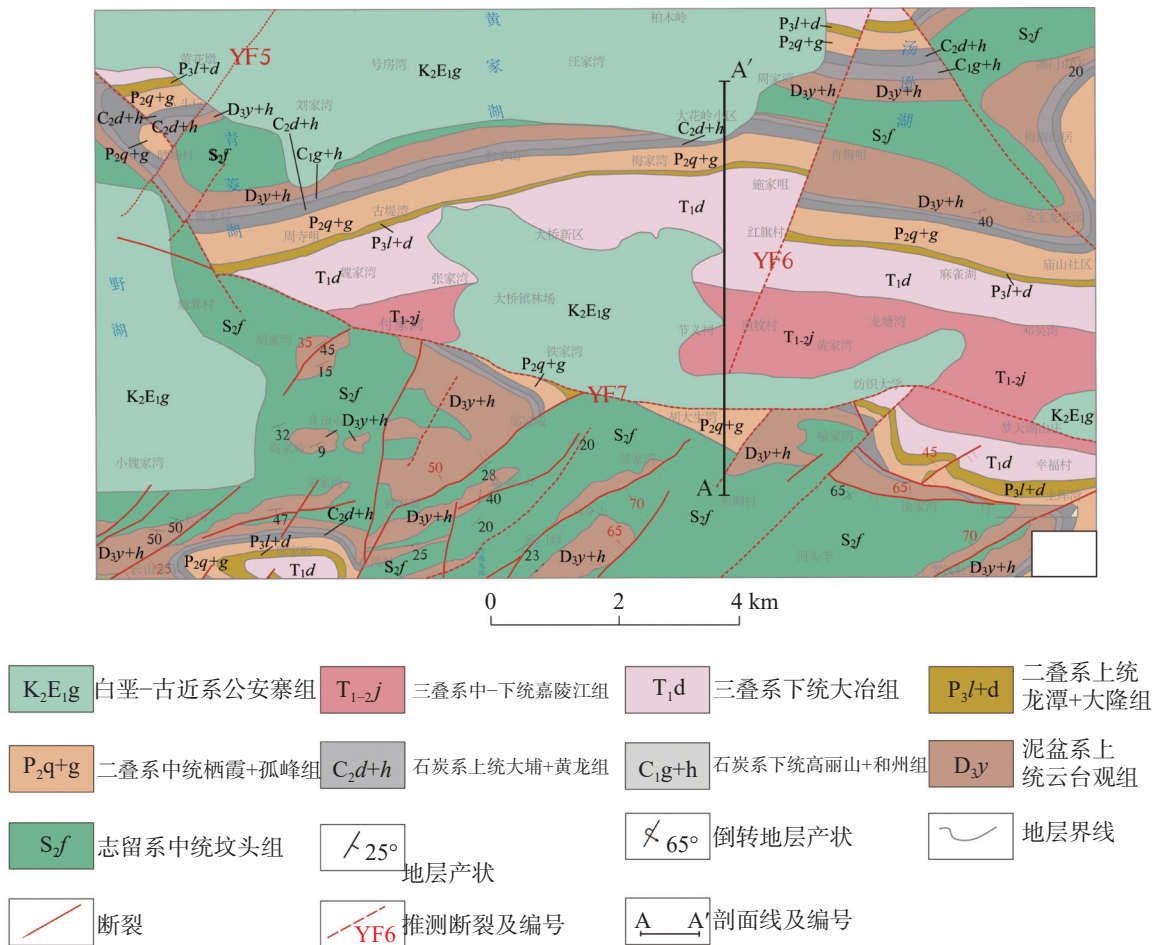


图 1 研究区基岩地质图

Fig. 1 Geological map of bedrock in the study area

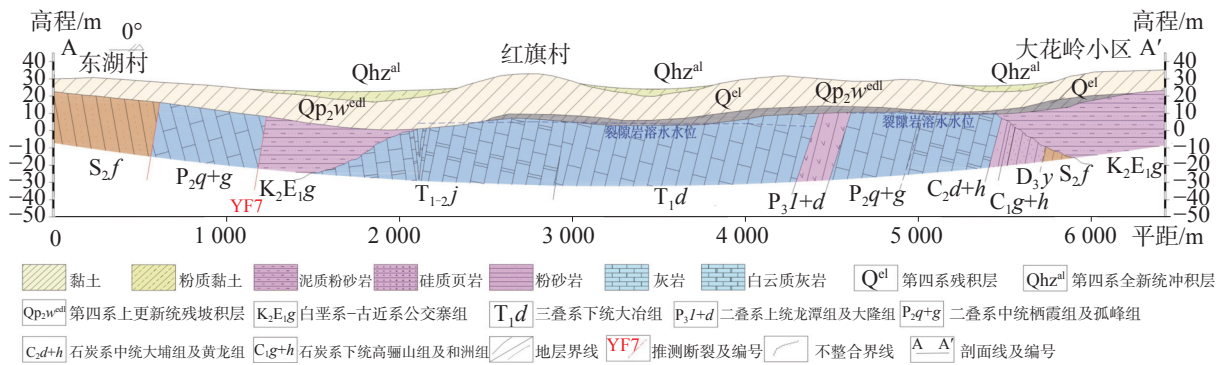


图 2 研究区水文地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeological section of the study area

年波动变幅 3~5 m。

2 可溶岩区地质结构分类

2.1 上覆土体类型划分

研究区主要位于黏性土分布区，黏性土具有较高的黏聚力(C)和相对较小的内摩擦角(φ)，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($I_L \geq 0.75$)。一般黏性土主要包括区内二级

阶地的老黏土，以及西北角少量长江一级阶地后缘的冲积可塑-硬塑黏性土，其抗剪强度相对较高；软弱土主要包括区内灰岩表面遇水呈软塑一流塑状的残积红黏土。因其具有高含水量、低抗剪强度而易流失变形。

2.2 地质结构划分

根据区内可溶岩的上方黏性土、软弱土、红层(K_2E_1g)的组合关系及地面塌陷特征，将地质结构划分为 3 种类型，具体见图 3、表 1 所示。

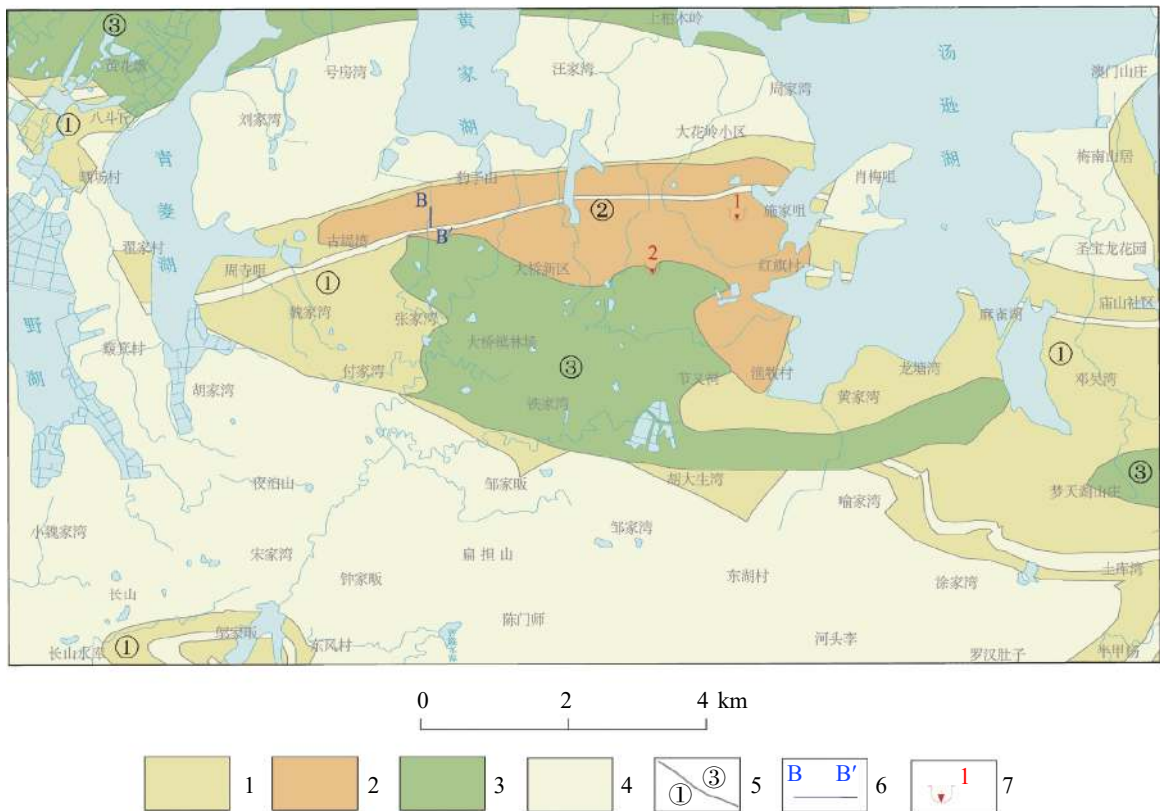
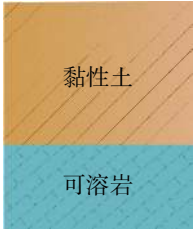
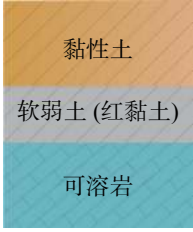
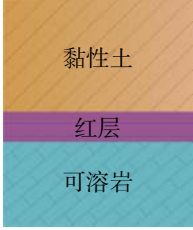


图 3 研究区岩溶地质结构类型分区图

1-①型 2-②型 3-③型 4-非可溶岩区 5-分区界线及分区代号 6-剖面线及编号 7-岩溶地面塌陷及编号

Fig. 3 Zoning map of karst geological structures of the study area

表1 研究区岩溶区地质结构类型划分
Table 1 Classification of karst geological structures of the study area

类型	模型图	结构特点	主要分布
①		黏性土直接覆盖于可溶岩上;可发生土洞型塌陷	工作区西北角洪山区八斗丘,多属一级阶地后缘;中部纸坊翟家村—周寺咀—魏家湾—张家湾、节义祠—黄家湾—龙塘湾、东南角梦天湖山庄—土库湾—半甲杨、西南角,多属长江二级阶地剥蚀垄岗区
②		黏性土和可溶岩之间夹有厚度大于1 m的软弱土(红黏土底部);软塑—流塑红黏土先期流失形成泥流型土洞,逐渐发展破坏,地表反映为土洞型塌陷	工作区中部纸坊古堤湾—豹子山—红旗村—往南至渔牧村;多属于长江二级阶地剥蚀垄岗区
③		黏性土+红层直接覆盖于可溶岩上;一般不会发生岩溶地面塌陷	工作区中部纸坊大桥镇林场—铁家湾—纺织大学;属于长江二级阶地剥蚀垄岗区

2.2.1 ①类地质结构

该类结构上部为黏性土,下部为可溶岩。分布面积最大,约45.65 km²。主要分布于研究区西北角洪山区八斗丘;中部纸坊翟家村—周寺咀—魏家湾—张家湾、节义祠—黄家湾—龙塘湾、东南角梦天湖山庄—土库湾—半甲杨、西南角,多属长江二级阶地剥蚀垄岗区。

该类结构中,黏性土以老黏土为主,黏聚力C值多为42~70 kPa,φ值多为10.3°~19.1°,土颗粒自由活动受到限制,通常在土层底部形成土洞(土拱)^[8-9]。研究区土洞的形成主要与真空吸蚀作用相关,即岩溶地下水在基岩面附近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、潜蚀等作用导致形成。

2.2.2 ②类地质结构

该类地质上部为黏性土,中部为软弱土(软塑—流塑状残积红黏土),下部为可溶岩。分布面积最小,约14.99 km²。主要分布于研究区中部纸坊古堤湾—豹子山—红旗村—往南至渔牧村;多属于长江二级阶地剥蚀垄岗区。

红黏土为灰岩表层的风化残积物,具有遇水易软化呈软—流塑状,厚度不均,多分布于溶蚀沟槽中(图4),通常在重力或吸蚀力作用下流失而形成土洞^[9],随后往往迅速发展至红黏土顶部。

2.2.3 ③类地质结构

该类地质结构上部为黏性土,中部为红层(K₂E₁g红砂岩),下部为可溶岩。分布面积较小,约20.42 km²。主要分布于研究区中部纸坊大桥镇林场—铁家湾—纺织大学;属于长江二级阶地剥蚀垄岗区。

该类结构中,因红层的阻隔,土洞难以形成,自然条件下不会产生岩溶地面塌陷。

3 岩溶地面塌陷形成演化

上覆土体是岩溶地面塌陷的主体,不同性质的土体受外力作用后土颗粒运动方式不同,同样其塌陷的形成演化过程也不同^[8]。根据研究区的地质结构,将其岩溶地面塌陷形成演化过程分为以下2类。

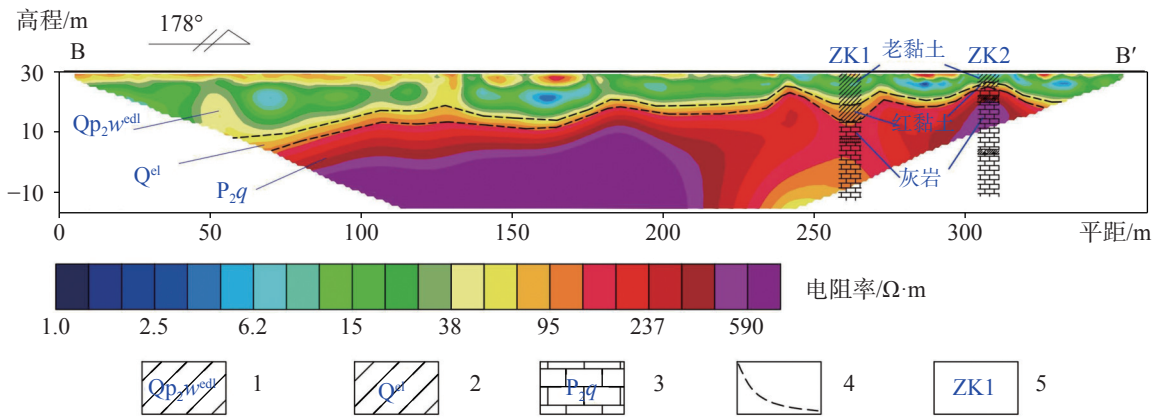


图 4 B-B' 高密度测线综合解译成果示意图

1-第四系中更新统王家店组残坡积层老黏土 2-第四系残积层红黏土 3-二叠系中统栖霞组灰岩 4-推测地层分界 5-钻孔

Fig. 4 Schematic diagram of comprehensive interpretation of B-B' high-density survey lines

3.1 土洞型塌陷 (①类)

在黏性土层中, 尤其老黏土, 其具有弱-微透水性, 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真空吸蚀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。

由于黏土块体塌落在底部形成土洞, 并不断扩展最终洞顶拱效应失效而产生的地面塌陷现象称为土洞型塌陷^[3]。研究区①类地质结构可能发生土洞型塌陷。该类型地面塌陷过程可分为土洞形成与演化、顶板变形塌陷两个阶段。土洞形成与演化阶段时间比较长, 是一个渐变过程。土洞顶板变形塌陷阶段是在自然因素或外部因素诱发后, 地面塌陷突然发生的过程, 时间短暂, 临塌前地表会有少量的沉降变形。

土洞型塌陷成灾演化过程可以概括为: a. 岩溶水位下降幅度小, 吸蚀负压值较小, 其吸蚀力不能产生土体的剥蚀, 土体无明显变化, 处于无扰动阶段(图 5A); b. 在岩溶地下水水位反复波动(或人类工程活动)作用下, 吸蚀力大于土体自身抗塌力时, 土洞沿开口岩溶洞隙表面初步形成, 洞顶土体塌落, 不断向上发展, 土洞规模增大, 土洞顶板逐渐变薄(图 5B); c. 土洞继续向上扩展, 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, 在临塌前期, 地表往往会产生少量沉降变形(图 5C); d. 在自然或人为因素诱发下, 四周摩擦力不能平衡土洞顶板重力, 顶板迅速塌落(图 5D)。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。

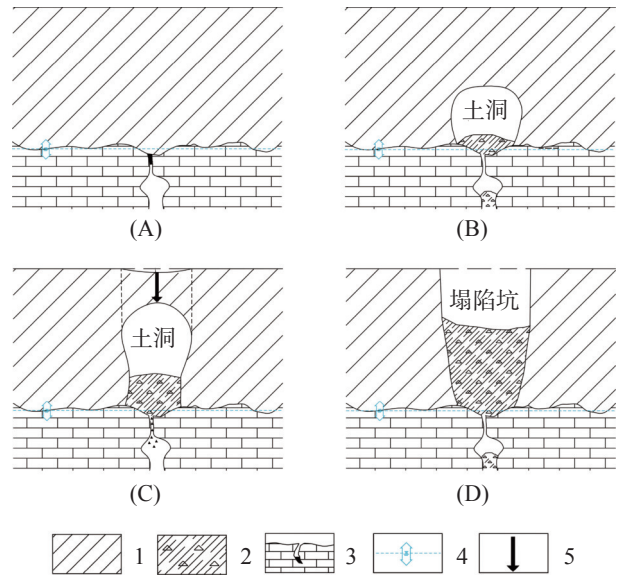


图 5 土洞型塌陷成灾演化过程示意图

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

Fig. 5 Schematic diagram of the evolution of soil-hole-type collapse

3.2 泥流+土洞复合型塌陷 (②类)

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, 极易发生变形而流失。先期因软弱土体流失形成泥流型土洞, 后期黏性土块体塌落土洞继续发展, 最终拱效应失效导致地面塌陷, 称为泥流+土洞复合型塌陷。研究区②类地质结构可能发生, 目前研究区已发生的 2 处塌陷均为此结构。软弱土体流失发展往往比较迅速。

泥流+土洞复合型塌陷成灾演化过程可以概括为: a. 可溶岩上方发育有厚层软弱土体及黏性土层,

岩溶开口处由于黏性土的堵塞,处于稳定阶段(图6A); b.受到岩溶地下水水位波动(或人类工程活动)诱发后,连通了软弱土体和岩溶洞隙,软弱土体向岩溶洞隙流失,产生泥流型土洞,并迅速扩展至软弱土体顶部(图6B); c.土洞继续在黏性土层中向上扩展,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,在临塌前期,地表往往会产生少量沉降变形(图6C); d.在自然或人为因素诱发下,四周摩擦力不能平衡土洞顶板(自重+加载),顶板迅速塌落(图6D)。软塑-流塑状红黏土流失往往比较迅速,这加快了岩溶地面塌陷的产生。

3.3 诱发因素

诱发因素主要起到加速塌陷的发生,可分为自然因素及人为因素^[10-12]。其中研究区自然因素主要

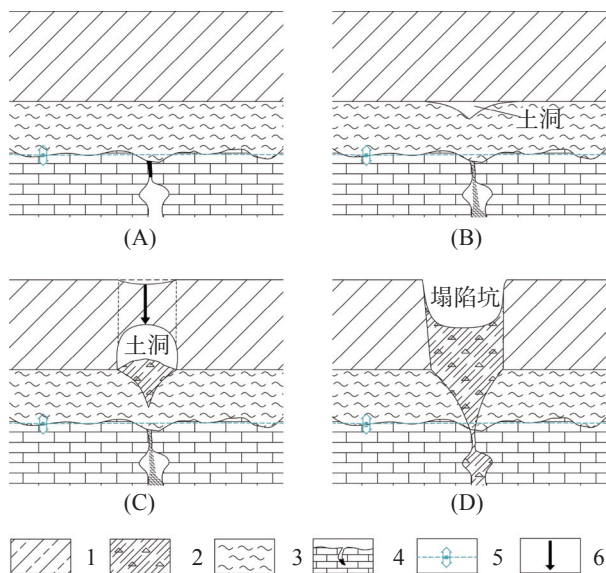


图6 泥流+土洞复合型塌陷成灾演化过程示意图

1-黏性土 2-塌陷堆积物 3-软弱土(软塑-流塑状红黏土) 4-溶洞及填充物
5-地下水水位上下频繁波动 6-土体位移方向

Fig. 6 Schematic diagram of the evolution of the compound collapse of mudflow+soil hole

包括降雨与岩溶地下水水位波动。降雨入渗在增加上覆土体重量的同时,也减弱了土体的强度,在下部有土洞发育处,会加剧塌陷的产生;岩溶地下水水位波动产生的冲刷潜蚀作用(包括频繁波动对土体的软化、崩解、溶解以及沿基岩面渗流时产生的接触冲刷等)及真空吸蚀作用是研究区塌陷过程的主要动力条件^[13-14]。

人为因素主要为工程活动,施工类型主要包括钻探、桩基础施工、土石方开挖、支护、地下工程施工、加载、振动、抽排地下水等。其中:桩基、钻孔施工时,若揭穿黏性土层和下伏岩溶洞隙,软弱土或黏性土向下不断漏失,形成土洞,并不断扩展,最终形成塌陷;工程施工或地下水的开采等引起的地下水(岩溶水)水位波动,产生的潜蚀、吸蚀作用也会使上覆土体不断向下伏岩溶洞隙中漏失形成土洞,并不断发展,最终导致塌陷。其它具体见表2所示。

4 岩溶地面塌陷监测

研究区岩溶地面塌陷均为土体塌陷,土层结构是塌陷的内因,诱发因素是外因。监测的对象主要包括土体的形变监测(直接监测)、诱发因素监测(间接监测)。土体形变监测又分为地表形变、土体内部形变监测,诱发因素包括降雨量、岩溶地下水水位、水气压力、地下水流速流向监测^[4]等。

在充分分析总结塌陷形成机理的基础上,开展相应的监测工作,可为塌陷应急、防治提供基础依据。研究区塌陷可分为土洞的形成演化阶段和顶板变形塌陷阶段。根据不同阶段土体变形破坏特点,分别选取相应的监测内容和方法。

4.1 土洞形成和演化阶段

在土洞形成与演化过程中,土体的变形发生在

表2 研究区岩溶地面塌陷类型分类表

Table 2 Classification of karst ground collapse in and around 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	2014.5.2	江夏区大桥新区鹏湖湾二期工地	中型	二人死亡,一台钻机失踪。后期搜救动用10台挖掘和运输车辆,清土方8 000多方,动用大量人力,包括武警水电部队	②	钻探、载荷	泥流+土洞复合型
2	2016.2.25	江夏区原武汉东方明许混凝土场有限公司厂区	小型	毁坏厂房地面,造成混凝土厂暂停营业	②	载重车辆荷载	泥流+土洞复合型

土体内部,土洞顶板尚处于稳定状态。此阶段监测的重点是土体的内部变形,可选用光纤监测(BOTDR)、电磁波时域反射(TDR)和地质雷达扫描监测技术等进行周期指标采集监测,分析周期内土洞扩展情况。

另外,对于冲刷潜蚀、吸蚀土洞而言,尤其在红黏土分布地区,红黏土底部在遇水后多呈软塑-流塑状,研究区岩溶地下水水位多位于岩土界面附近波动,地下水位的波动以及地下水的流速与流向对土洞的形成很关键。因此岩土界面附近地下水位、水气压力以及地下水流速流向监测尤为重要。

4.2 土洞顶板变形塌陷阶段监测

土洞顶板变形塌陷阶段时间短暂,临塌前期地表往往会产生少量沉降变形,在这个阶段内,重点监测建筑物变形和地面变形;监测方法主要采用精密水准测量监测、GPS监测技术等。

5 结论

覆盖型岩溶区地面塌陷的主体是上覆土体。不同类型的土体,其物理力学性质不同,其塌陷形成演化过程也不同。同时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黏性土、软弱土、红层的上下组合关系及地面塌陷特征,将岩溶区地质结构划分为3类(①、②、③)。①类结构主要发生土洞型塌陷,②类结构主要发生泥流+土洞复合型塌陷,③类结构,因红层的阻隔,黏性土土洞难以形成,一般不会产生岩溶地面塌陷。

从塌陷的形成演化机理出发,根据不同的塌陷阶段特点及监测对象,选用相应的监测方法和内容,形成系统的监测方法体系。通过对土洞的形成和演化、临塌前地表形变的监测研究,对研究区城市建设过程中工程施工的岩溶地面塌陷防治有很好的指导和借鉴意义,同时也可为后期塌陷预警、应急提供基础依据,以更好地保障城市发展和人民安全。

参考文献

- [1] 徐卫国,赵桂荣.论岩溶塌陷形成机理[J].*煤炭学报*,1986(2): 1-11.
XU Weiguo, ZHAO Guirong. On the mechanism of karst collapse formation[J]. *Journal of China Coal Society*, 1986(2): 1-11.
- [2] 康彦仁.论岩溶塌陷形成的致塌模式[J].*水文地质工程地质*,1992(4): 32-34, 46.
KANG Yanren. On the collapse-causing mode of karst collapse formation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1992(4): 32-34, 46.
- [3] 罗小杰,罗程.岩溶地面塌陷三机理理论及其应用[J].*中国岩溶*,2021,40(2): 171-188.
LUO Xiaojie, LUO Cheng. Three-Mechanism Theory (TMT) of karst ground collapse and its application[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 171-188.
- [4] 王金晨,吴迪,娄万鹏,吴远斌.岩溶塌陷监测技术及发展趋势[J].*工程技术研究*,2021,6(8): 55-57.
WANG Jinchun, WU Di, LOU Wanpeng, WU Yuanbin. Karst collapse monitoring technology and development trend[J]. *Engineering and Technological Research*, 2021, 6(8): 55-57.
- [5] 李成香,刘磊,周世昌,王斌战.物探技术在岩溶塌陷灾害监测预警中的应用研究[J].*资源环境与工程*,2021,35(6): 887-894.
LI Chengxiang, LIU Lei, ZHOU Shichang, WANG Binzhan. Application of geophysical prospecting technology in karst collapse disaster monitoring and early warning[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2021, 35(6): 887-894.
- [6] 蒋小珍,雷明堂.岩溶塌陷灾害的岩溶地下水气压力监测技术及应用[J].*中国岩溶*,2018,37(5): 786-791.
JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang. Monitoring technique and its application of karst groundwater-air pressure in karst collapse[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(5): 786-791.
- [7] 王甫强,张占彪,李虎,柯洋.光纤传感技术在岩溶地面塌陷地质灾害监测中的应用[J].*城市勘测*,2021(4): 174-178.
WANG Fuqiang, ZHANG Zhanbiao, LI Hu, KE Yang. Application of optical fiber sensing technology in geological hazard monitoring of karst ground collapse[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2021(4): 174-178.
- [8] 陈标典,李喜,李祖春,等.湖北武汉白沙洲隐伏岩溶区地质结构与岩溶塌陷分类[J].*中国地质灾害与防治学报*.2021,32(2): 43-52.
CHEN Biaodian, LI Xi, LI Zuchun, et al. Types of geological structures and mechanism of karst collapses in Baishazhou, Wuhan City of Hubei Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(2): 43-52.
- [9] 涂婧,李慧娟,彭慧,魏熊,贾龙.武汉市江夏区大桥新区红旗村黏土盖层岩溶塌陷致塌模式分析[J].*中国岩溶*,2018,37(1): 112-119.
TU Jing, LI Huijuan, PENG Hui, WEI Xiong, JIA Long. Analysis on collapse model of the karst area covered by clay in Wuhan City Jiangxia district Hongqi village[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 112-119.
- [10] Li Gang, Tan Jinghe, An Ning. Analysis of the cause of karst land collapse in siding lead-zinc mining area[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 368-370: 1606-1609.
- [11] 郑晓明,陈标典,潘峰,等.武汉市江夏区武嘉高速桩基施工岩

- 溶塌陷形成条件及机理研究[J]. 安全与环境工程. 2019, 26(2): 62-68+75.
- ZHENG Xiaoming, CHEN Biaodian, PAN Feng, et al. Formation conditions and mechanism of karst collapse during pile foundation construction of Wujia Highway in Jiangxia district, Wuhan[J]. Safety and Environmental Engineering. 2019, 26(2): 62-68+75.
- [12] Xu Zhimin, Sun Yajun, Gao Shang, Chen Hongying, Yao Minghao, Li Xin. Comprehensive exploration, safety evaluation and grouting of karst collapse columns in the Yangjian coalmine of the Shanxi Province, China[J]. Carbonates and Evaporites, 2021, 36(1): 1-12.
- [13] 覃剑文, 宋光啸, 潘光明. 城区复杂环境岩溶地面塌陷灾害成因与致灾规律研究: 以贵港市北环新村岩溶地面塌陷灾害为例[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 230-237.
- QIN Jianwen, SONG Guangxiao, PAN Guangming. Cause and law of karst collapse in the urban complex environment: An example of Beihuanxincun, Guigang City[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 230-237.
- [14] 吴远斌, 殷仁朝, 雷明堂, 戴建玲, 贾龙, 潘宗源, 马骁, 周富彪. 重庆中梁山地区隧道工程影响下岩溶塌陷形成演化模式及防治对策[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 246-252.
- WU Yuanbin, YIN Renchao, LEI Mingtang, DAI Jianling, JIA Long, PAN Zongyuan, MA Xiao, ZHOU Fubiao. Triggering factors and prevention-control countermeasures of karst collapses caused by tunnel construction in the Zhongliangshan area, Chongqing[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 246-252.

Evolution and monitoring of karst ground collapse in the Zhifang-Miaoshan paleo-clay area of Wuhan

CHEN Biaodian^{1,2}, LI Xi^{1,2}, XIONG Qihua^{1,2}, LI Yulei^{1,2}, TU Jing^{1,2}, LIU Pengrui^{1,2}, Ye Jiang²

(1. Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-environmental Geology, Wuhan, Hubei 430034, China;

2. Geological Environmental Center of Hubei Province, Wuhan, Hubei 430034, China)

Abstract This study is aimed at finding out the disaster mechanism of karst ground collapse in the Zhifang-Miaoshan paleo-clay area of Wuhan and selecting appropriate methods for the monitoring and early warning, so as to effectively reduce the harm caused by karst ground collapse. Through a special karst survey, we have identified the distribution and geological structure of soluble rocks, analyzed the formation and evolution process of karst ground collapse and selected monitoring methods for different collapse stages in the study area. The survey results show that the study area is mostly distributed by paleo-clay with single-layered structure. According to the upper and lower stacking relationship of overburden cohesive soil, soft soil and non-soluble rock (red layer), the geological structure distribution of soluble rock can be divided into three categories (①, ② and ③). In the structure of class ①, the upper part is composed of cohesive soil; the lower part is soluble rock. The cohesive soil is mostly composed of paleo-clay with the value of cohesion C mainly from 42 kPa to 70 kPa, and the ϕ value mostly from 10.3° to 19.1° . The free movement of the soil particles is limited, and soil holes are usually formed at the bottom of the soil layer in the soil body. In the structure of class ②, the upper part is composed of cohesive soil; the middle part is soft soil (residual red clay in the shape of soft plastic-flow plastic); the lower part is composed of soluble rock, in which the red clay—weathering residues of the limestone surface—is prone to soften in the shape of soft-fluid plastic in water. Mainly distributed in solution grooves with uneven thicknesses, the red clay usually loses with the action of gravity or suction force, and hence is developed into soil holes. In the structure of class ③, the upper part is composed of cohesive soil; the middle part is the red layer (K2E1g red sandstone); the lower part is soluble rock. In this structure, soil holes are difficult to form due to the barrier of red layer; therefore, karst ground collapse is not likely to occur under the natural condition.

According to the different physical and mechanical characteristics of soil bodies, the process mechanism of karst ground collapse is various in different geological structures. Soil-hole collapse mainly occurs in the structure of class ①. The disaster evolution process can be summarized as follows: (A) In the undisturbed stage, the karst water level drops little, and the small value of the suction negative pressure leads to the failure of soil denudation caused by insufficient suction force. Therefore, there is no significant change in the soil body. (B) Affected by the repeated

fluctuations of karst groundwater level or human engineering activities, the soil hole is developed initially along the surface of the open karst cave, when the corrosion absorption force is greater than the collapse resistance force of the soil itself. Then the soil of the cave roof collapsed, and the continuous collapse upward contributes to the expanding of the soil hole and the thinning of its roof. (C) The hole continues to expand upwards, and the roof of the soil hole keeps balanced under the friction force generated by the lateral pressure of soil around it. In the early stage of imminent collapse, the ground surface often presents a small amount of subsidence deformation. (D) Induced by natural or man-made factors, the surrounding friction can not balance the gravity of the roof of soil hole. Consequently, the roof may collapse quickly. In the structure of class ②, there mainly occurs compound collapse of mud flow+soil hole. The process of disaster formation and evolution can be summarized as follows: (A) Thick layers of soft soil and cohesive soil are developed on the upper soluble rock. The karst opening is in the stable stage due to the blockage of the cohesive soil. (B) Affected by fluctuations of karst groundwater level or human engineering activities, the soft soil flows and loses to the cave fissure, which forms the mudflow hole, and the hole quickly expands to the top of the soft soil. (C) The soil hole continues to expand upward in the layer of cohesive soil, and the roof of the soil hole keeps balanced under the friction force generated by the lateral pressure of soil around it. In the early stage of imminent collapse, the ground surface often presents a small amount of subsidence deformation. (D) Induced by natural or man-made factors, the surrounding friction can not balance the roof of soil hole (dead weight+loading); consequently, the roof collapsed quickly. Besides, the quick loss of red clay in shapes of soft plastic-fluid plastic accelerates karst ground collapse. In the structure of class ③, it is unlikely to occur collapse because the barrier of red layer makes it difficult to form the cohesive soil.

Combined with the formation mechanism of collapse, the formation and evolution of soil hole can be monitored by optical fiber, and induced factors such as groundwater levels and water pressures should also be monitored. During the deformation and collapse stage, precise leveling or GPS monitoring can be used to monitor surface deformation because the ground surface often presents a small amount of subsidence deformation before the imminent collapse.

Key words Zhifang-Miaoshan of Wuhan, geological structure, karst ground collapse, formation and evolution, monitoring

(编辑 张玲)