

车马碧引水隧洞近场区岩溶塌陷发育特征及成因机制

胡志林, 肖先焯*, 许模, 李兆峰

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 近年来, 兴建调水工程是保障缺水地区人们生产和生活的重要民生工程, 但引水隧洞穿越可溶岩地区时, 可能导致地表地质灾害频发。文章以车马碧水库引水隧洞近场区岩溶塌陷为研究对象, 在充分认识其地质背景的前提下, 总结其分布规律和发育特征, 基于统计与调查分析相结合的方法探讨其成因机制, 进而提出切实可行的防治措施。研究表明: 区内岩溶塌陷多集中分布于岩溶地下水降落漏斗及其影响范围内, 且多发生于地表河流两岸; 受地层展布和岩性控制, 塌陷多分布在以可溶岩为基座的第四系覆盖层中, 呈条带状分布; 塌陷多分布于断裂构造附近; 分析认为, 区内塌陷主要受引水隧洞施工排水以及降雨的影响; 可据研究区塌陷的触发条件划分成两种主要的塌陷成因类型: 即疏干排水前期突涌型塌陷和疏干排水中后期降雨型塌陷, 其中疏干排水前期突涌型塌陷主控因素为潜蚀和真空吸蚀作用; 疏干排水中后期主控因素为降雨引起的渗压效应。

关键词: 岩溶塌陷; 引水隧洞; 疏干排水; 发育特征; 成因机制

中图分类号: P642.25; P642.26; P642; P694 **文献标识码:** A

DEVELOPMENT CHARACTERISTICS AND GENESIS MECHANISM OF KARST COLLAPSE IN THE DRAINAGE AREA OF CHEMABI DIVERSION TUNNEL

HU Zhi-lin, XIAO Xian-xuan, XU Mo, LI Zhao-feng

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: In recent years, the construction of water diversion project is an important livelihood project to ensure the production and life of people in water-deficient areas. But when the diversion tunnel passes through the soluble rock area, it may cause frequent surface geological disasters. This paper takes the karst collapse in the near field area of the diversion tunnel of Chemabi reservoir as the research object, summarizes its distribution law and development characteristics under the premise of fully understanding its geological background, discusses its cause mechanism based on the method of combining statistics and investigation and analysis, and then puts forward feasible prevention and control measures. The results show that the karst collapse is mostly distributed in the subsidence funnel of karst groundwater and its affected area, and occurs on both sides of surface rivers. Under the control of stratigraphic distribution and lithology, the collapse is mostly distributed in the quaternary overburden with solvable rock as the base, and it is banded. The collapse is mostly distributed near the fault structure. Analysis shows that the collapse of the area is

principally affected by drainage of diversion tunnel construction and rainfall. According to the triggering conditions of the subsidence in the study area, the subsidence can be divided into two main types: the inrush type collapse in the early stage of drainage and the rainfall type collapse in the middle and late stage of drainage. The main controlling factors of the inrush type collapse in the early stage of drainage are latent erosion and vacuum erosion. The main controlling factor in the middle and late period of drainage is the seepage effect caused by rainfall.

Key words: Karst collapse; diversion tunnel; sewer drainage; development characteristics; formation mechanism

岩溶塌陷是覆盖于地表的岩土体在自然或人为因素作用下发生塌落、沉陷,并在地面形成塌陷坑(洞)的一种岩溶动力地质现象,是岩溶地区主要地质环境问题之一^[1-4]。我国岩溶分布广泛,可溶岩分布面积达 $365 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的三分之一以上^[5-8]。岩溶塌陷会对建筑物造成严重破坏,威胁人类的生命财产安全^[9-11]。受人类工程活动的影响,岩溶塌陷发生的规模更大,范围更广。据统计,我国有 30 多个大中城市(武汉、重庆、桂林等)、420 多个县市处于地面塌陷高风险区,有 40 余座矿山、25 条铁路线和数百座水库长期遭受岩溶地面塌陷的困扰,严重妨碍了岩溶地区的经济和社会发展^[12-15]。

众多学者对岩溶塌陷的发育特征进行了研究。针对长江流域岩溶塌陷所引发的地质问题,项式均等^[16]详细分析了区内岩溶塌陷的发育特征和影响因素,并进行了岩溶塌陷区划,为进行区域环境质量评价提供了科学依据。有学者认为岩溶坍塌的发生与岩溶发展程度、覆盖层的性质和厚度以及地下水的动态条件有着密切的关系^[17]。之后,有学者从人为诱发塌陷的角度归纳总结了我国铁路、水库、矿区和城市这 4 类人类工程活动区岩溶塌陷的分布特征^[18]。在此基础上,众多学者针对不同地区的岩溶塌陷进行了深入研究。刘宝臣等^[19]对桂林市西城区历年发生的塌陷进行了统计分析,总结了区内塌陷在时间和空间分布上的规律性。根据武广客运专线韶花段内岩溶塌陷的发育条件,唐万春等^[20]将区内岩溶塌陷概化为 4 类地质模式,为评价预测沿线岩溶塌陷提供了依据。罗小杰等^[21]研究了武汉地区浅层岩溶的发育特征,并进行危险性分区,提出了针对各危险区岩溶塌陷灾害的防治原则与措施。Ozdemir 等^[22]采用证据权重法研究了 GIS 环境下土耳其科尼亚附近塌陷的空间分布及控制塌陷形成的因素,认为岩性、地形特征、覆层厚度和地下水位的季节性波动是控制塌陷形成和分布的主要因素。Wei 等^[23]基于断裂构造和覆盖层厚度分析了徐州

市岩溶塌陷的分布规律和引发塌陷的控制因素。

在成因机制方面,著名地质学家 A. П. 巴普洛夫提出了岩溶地面塌陷成因的“潜蚀论”^[24]。徐卫国等^[25]针对岩溶矿区疏干排水等原因而引发地面塌陷,提出了真空吸蚀效应。在此基础上,又有学者提出了“共振论”^[26]、“气爆论”^[27]及“液化论”^[28]等成因观点。康彦仁等^[29,30]从致塌力的角度,总结了 8 种致塌模式和 12 种致塌效应。雷明堂等^[31]将武汉市武昌白沙洲发生的塌陷根据土层结构概化为单一粘性土的一元结构和上粘下砂的二元结构两种模式,并通过大型物理模拟试验研究了大气降雨、岩溶水动力条件、长江水位波动等因素对塌陷的影响,结果表明,无论是何种地质结构的土层,岩溶水位下降是盖层发生破坏的主要原因。陈国亮等^[32]研究了包括垂直渗压、压强差、浮力、土体强度等塌陷效应。基于以上理论基础,研究学者们开展了大量研究。程星等^[33]在总结大量工程实例的基础上,提出了 6 种岩溶塌陷的概化模型,并分析其致塌机制。有学者详细分析了潜蚀型岩溶塌陷发生的全过程,认为覆盖层土颗粒的迁移会导致土体强度降低而造成土洞失稳破坏^[34]。又有学者通过物理模拟试验分析了抗渗透强度对覆盖层土体变形破坏的影响^[35]。基于野外调查数据和室内物理模拟试验,蒋小珍等^[36]论述了单层土体结构的岩溶土洞发育机制。有学者认为松散土体型岩溶塌陷的发生主要受到地下水渗流引发的潜蚀作用和水位下降引起的吸蚀作用以及降雨引起的超载作用的影响^[37]。肖先焯等^[38]分析总结了单层透水性、单层阻水性、双层上透下阻型、双层上阻下透型这几类典型塌陷的盖层地质结构原型,并论述了其在地下水位变动作用下的塌陷机理。大量岩溶塌陷实例证明,地下水位变动是加速塌陷变形或引发塌陷的主要原因,大部分的岩溶地面塌陷形成于水位下降环境^[38-41]。

随着我国工程建设的快速发展和人类工程活动的加剧,更多的大型工程穿越可溶岩山区时,施工过

程中不可避免的会引发一些岩溶灾害,给城市的生产建设和社会经济发展造成巨大损失。车马碧水库引水隧洞工程自2017年底开始施工,隧洞埋深约135~186 m,引水隧洞及施工支洞均位于地下水位以下。自工程开工以来,洞内出现大量涌水,造成周边井点水位下降及泉点逐渐干涸,到2019年底,区内已累计发生31处地面塌陷,不仅对区内农田、水利工程、生产农户生命安全造成威胁,同时严重影响周边群众的正常生活用水。本文旨在以曲靖市马龙区杨官田社区土瓜冲、杨官田村岩溶塌陷为研究对象,分析引水隧洞近场区覆盖型岩溶塌陷的发育特征,并依据引水隧洞疏排水的不同时期,分析其成因机制,最后针对研究区已发生的岩溶地面塌陷,提出相应的防治对策。

1 塌陷区地质概况

马龙区位于牛头山古隆起的北侧,乌蒙山脉南部,属云贵高原的滇东北丘陵区,地处金沙江水系与南盘江水系的分水岭地带,四面环山。中间山谷、丘陵,河流纵横。地势东南高峻,中部隆起向西北倾斜呈阶梯状下降。区内属低纬高原季风型气候,夏秋季多受西南和东南暖湿气流影响,汛期降水丰沛,季

节干湿分明,夏无酷暑,冬无严寒。年平均日照1985 h以上,年平均降雨量1032 mm。雨季开始期一般在5月中旬末,最晚出现在6月下旬,最晚于10月下旬结束。受高原地形等热力对流因素影响,夏季单点大雨、暴雨较多,月降雨量最高可达190 mm。区域内地表水系较发育,主要河流为西河,属马龙河支流,为区内的排泄基准面。塌陷区主要出露寒武系、志留系、泥盆系与第四系地层(图1),其中寒武系中统陡坡寺组(ϵ_2d)岩性主要为粉砂质泥岩、粉砂岩夹泥质灰岩,寒武系中统双龙潭组(ϵ_2s)岩性主要为白云岩、白云质灰岩夹泥质灰岩;志留系上统关底组一段(S_3g^1)岩性主要为泥质页岩、粉砂岩夹泥质灰岩,关底组二段(S_3g^2)岩性主要为泥岩夹泥灰岩,庙高组(S_3m)岩性主要为灰岩、泥岩夹泥灰岩,玉龙寺组(S_3y)岩性主要为页岩、泥岩夹泥灰岩;泥盆系西山村组(D_1x)岩性主要为砂岩夹泥岩。第四系地层主要为冲洪积层(Q^{pal})与残坡积层(Q^{edl}),冲洪积层分布在杨官田社区土瓜冲、杨官田村附近,主要由砂、粘土组成;残坡积层分布在前进水库附近,主要由角砾土、碎石土、粘土等组成。区内塌陷均发生在第四系覆盖层上,塌陷点分布范围与下伏地层、地表河流和引水隧洞之间的关系可见图2和图3。

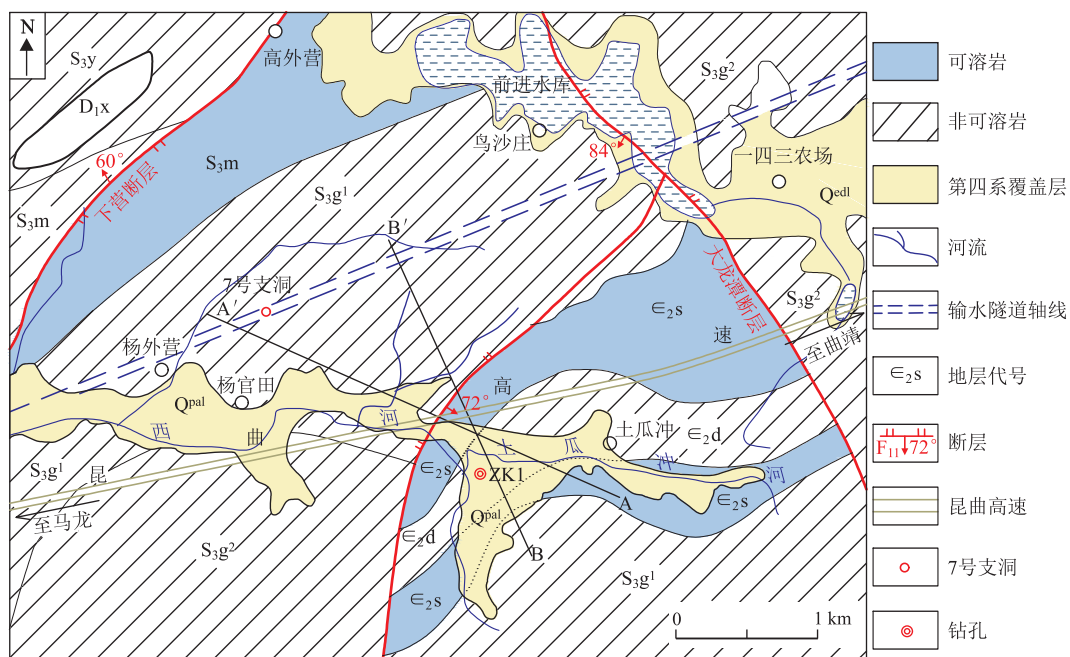


图1 塌陷区水文地质简图

根据区内出露的地层,区内地下水可划分为岩溶水、基岩裂隙水和孔隙水。岩溶水主要为碳酸盐岩与碎屑岩互层型岩溶水,在研究区内分布较广,赋存于寒武系中统双龙潭组、陡坡寺组和志留系上统

庙高组、关底组的灰岩、泥灰岩、白云岩地层。基岩裂隙水主要为风化裂隙水,赋存于泥盆系西山村组和志留系上统玉龙寺组的泥岩、页岩和砂岩地层。孔隙水主要为河流谷地型孔隙水,赋存于第四系松

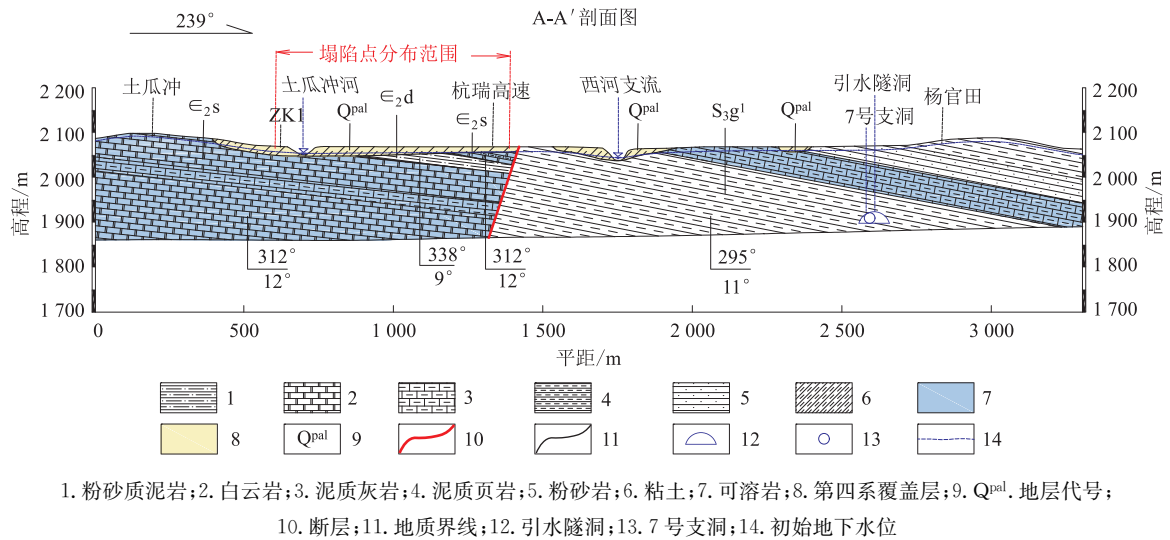


图 2 A-A'水文地质剖面图

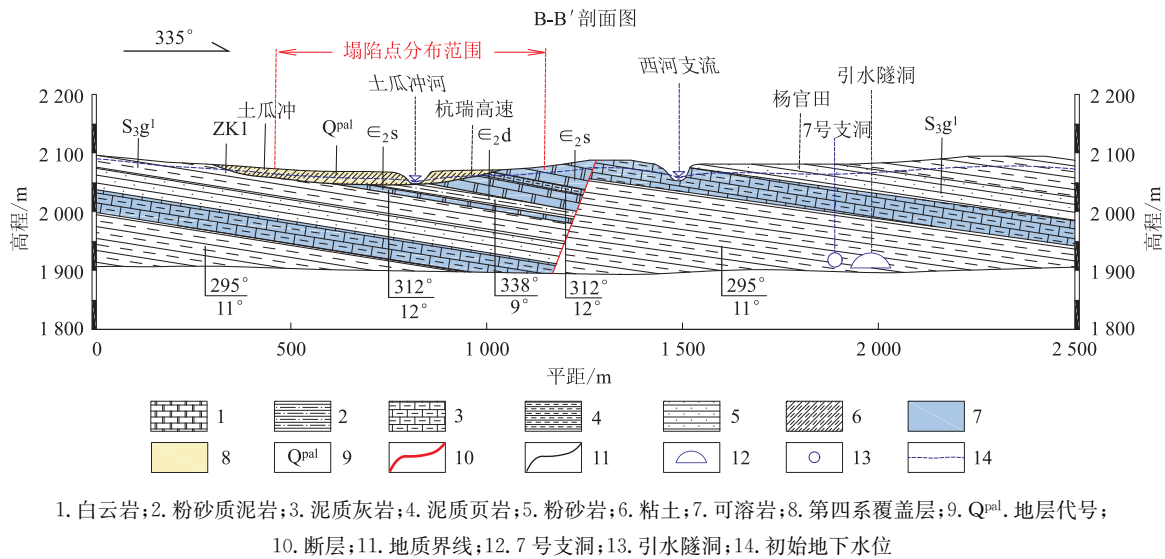


图 3 B-B'水文地质剖面图

散层内,水位 0.7~4 m 不等。区内地下水主要接受大气降水补给,同时接受地表水渗入补给,受岩性及构造的控制,总体上从南东向北西方向径流,在地势低洼地带以季节泉形式向就近的沟谷排泄。

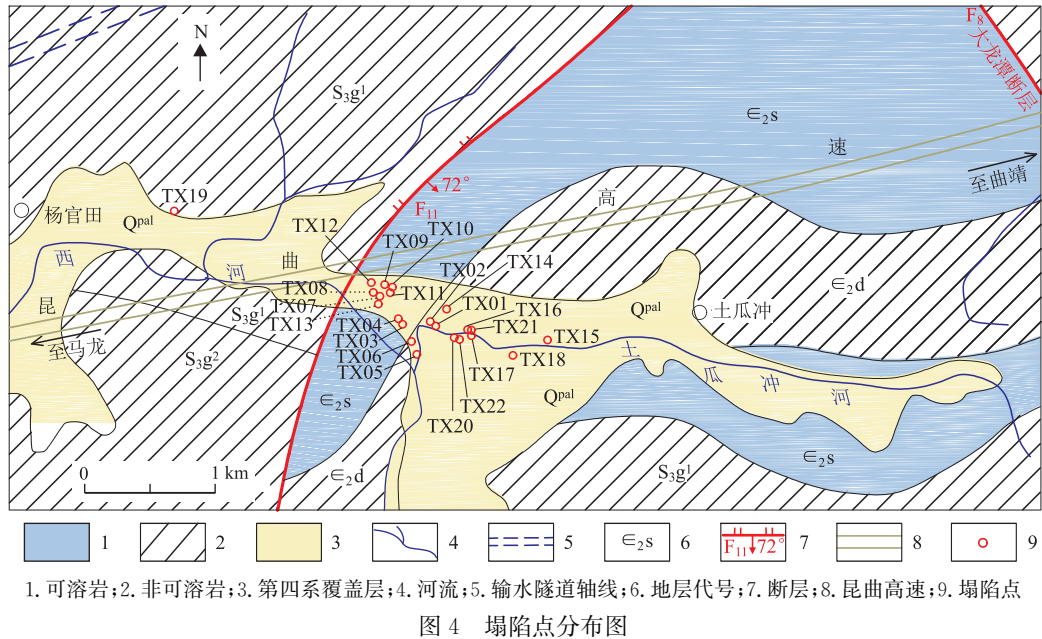
2 岩溶塌陷分布及发育特征

2.1 岩溶塌陷分布特征

区内塌陷集中分布于杨官田社区土瓜冲、杨官田村附近,位于马龙县城以东,引水隧洞以南,昆曲高速的南侧,距马龙城区直线距离约 4.5 km。土瓜冲河为西河支流,自东向西流经塌陷区。野外实际调查共发现 22 处地面塌陷,多分布于土瓜冲河的两岸(图 4)。

现场调查发现,区内岩溶塌陷的分布主要呈现以下几种规律:

(1) 岩溶塌陷多集中分布于岩溶地下水降落漏斗及其影响范围内。分析认为,地下水位变动是加速塌陷变形或引发塌陷的重要原因。马龙区位于引水隧洞工程的 4 号~9 号施工支洞之间,塌陷区距引水隧洞直线距离约 1.3 km,对应最近的 7 号施工支洞从施工开始到 2021 年 5 月共抽排地下水约 $900 \times 10^4 \text{ m}^3$,导致塌陷区地下水位大幅度下降。根据钻孔资料,塌陷区地下水位埋深 25.2 m,和隧道施工前水位相比下降约 20 m,地下水位降幅极大,塌陷点的分布均处于地下水位降落漏斗的影响范围之内。此外,塌陷多分布于土瓜冲河的两岸。距土瓜冲河距离 $0 < L \leq 50 \text{ m}$ 、 $50 < L \leq 100 \text{ m}$ 、 $100 < L \leq 150 \text{ m}$ 的岩溶塌陷分别占总数的 68.2%、27.3% 和 4.5%,超过 95% 的塌陷均分布在距土瓜冲河 100 m 范围内。



(2) 受地层展布和岩性控制, 塌陷多分布在以可溶岩为基座的第四系覆盖层中, 呈条带状分布(图 4)。塌陷区下伏可溶岩地层岩性主要为寒武系中统双龙潭组(ϵ_2s)白云岩、白云质灰岩和泥质灰岩, 以及寒武系中统陡坡寺组(ϵ_2d)和志留系上统关底组一段(S_3g^1)中以夹层形式存在的泥质灰岩。由于下伏可溶岩地层岩溶发育强烈, 溶孔、溶蚀裂隙发育普遍, 因此区内塌陷发生的数量较多。

(3) 受断裂构造的影响, 塌陷多分布在断裂构造附近。调查发现, 距主要断裂构造距离 $0 \leq L < 300$ m、 $300 < L \leq 600$ m、 $600 < L \leq 900$ m 的岩溶塌陷分别占总数的 54.5%、36.4% 和 9.1%。区内岩溶塌陷均分布于断裂周边 900 m 范围内, 其中距断裂 < 300 m 的塌陷点最多, 并且随着断裂距离的增加, 塌陷点数量逐渐减少。可溶岩的发育程度不仅受地层岩性的影响, 还受地质构造的控制。区内

岩溶的发育主要受断裂构造的影响, 使得下伏基岩岩体破碎, 地表水与地下水对基岩溶蚀作用强烈, 有利于裂隙发育形成岩溶伏流管道, 为岩溶塌陷的形成创造了条件。

2.2 岩溶塌陷形态特征

区内岩溶塌陷的形态和大小各异。由表 1 可知, 从规模上看, 总体上区内的岩溶塌陷长轴在 2.0~35.0 m 之间, 短轴在 2.0~31.0 m 之间。除位于土瓜冲河右岸的塌陷点(TX04)规模较大(长轴 35.0 m, 短轴 31.0 m)之外, 其余塌陷长轴主要在 2.0~14.0 m 之间, 短轴在 2.0~8.0 m 之间。

区内塌陷点可见深度主要在 0~5 m 之间。其中可见深度小于 3 m 的塌陷共 17 处, 占总数的 77.3%; 可见深度 3~5 m 的塌陷共 4 处, 占总数的 18.2%; 可见深度超过 5 m 的塌陷仅有 1 处, 占 4.5%。

表 1 塌陷点一览表

编号	形态		尺寸		深度	编号	形态		尺寸		深度
	平面	剖面	长轴	短轴			平面	剖面	长轴	短轴	
TX01	似圆形	坛状	4.7	4.7	1.6	TX12	长条形	漏斗状	14.0	1.8	4.1
TX02	不规则	坛状	4.0	3.3	1.8	TX13	似圆形	圆柱状	2.1	2.1	1.5
TX03	椭圆形	碟状	11.0	6.0	0.5	TX14	不规则	漏斗状	11.5	4.6	2.1
TX04	长条形	漏斗状	35.0	31.0	10	TX15	似圆形	坛状	2.0	2.0	1.5
TX05	不规则	漏斗状	6.0	4.0	3.5	TX16	长条形	漏斗状	6.5	4.6	2.3
TX06	不规则	漏斗状	7.0	6.0	2.5	TX17	不规则	漏斗状	6.0	5.0	3.2
TX07	椭圆形	坛状	5.7	3.2	1.4	TX18	长条形	坛状	4.7	4.5	1.7
TX08	椭圆形	圆柱状	3.8	2.8	1.8	TX19	椭圆形	漏斗状	3.2	2.1	2.1
TX09	长条形	碟状	6.2	4.5	2.2	TX20	椭圆形	碟状	3.8	2.4	1.0
TX10	长条形	坛状	5.5	3.5	2.5	TX21	长条形	漏斗状	41.0	14.0	4.2
TX11	似圆形	圆柱状	3.5	3.5	2.5	TX22	椭圆形	漏斗状	3.0	2.0	1.1

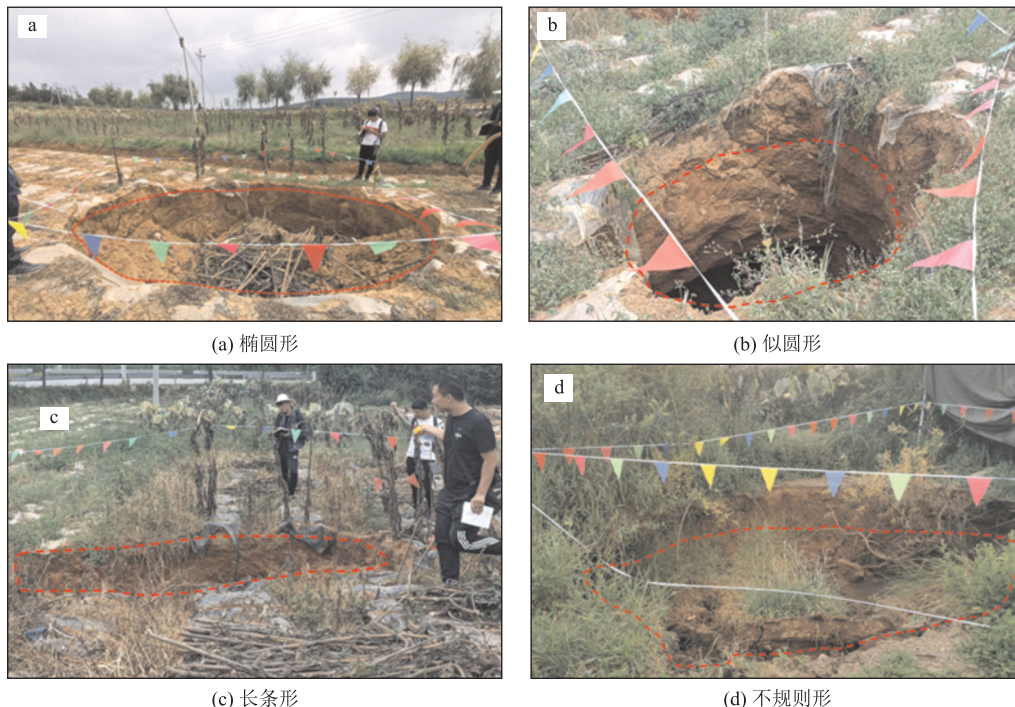


图 5 岩溶塌陷平面形态

据调查,区内塌陷平面形态主要有似圆形、椭圆形、长条形和不规则形(图 5),分别占塌陷总数的 18.2%、27.3%、31.8%和 22.7%。区内塌陷剖面形态主要有坛状、漏斗状、碟状和圆柱状,分别占比为 27.27%、45.45%、13.64%和 13.64%,可见剖面形态主要以漏斗状为主。

根据盖层结构的差异,可将区内塌陷划分为单层、双层和多层结构(图 6)。其中盖层结构为单层的有 3 处,占总数的 13.64%;盖层结构为双层的有 5 处,占总数的 22.72%;盖层结构为多层的有 14 处,占总数的 63.64%。调查发现,区内岩溶塌陷多发生在盖层结构为多层的土体结构上。

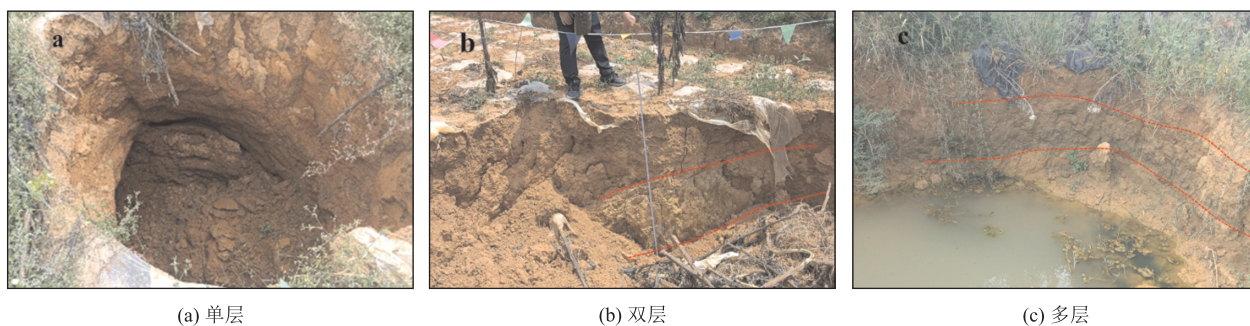


图 6 岩溶塌陷剖面结构

根据区内岩溶塌陷盖层结构与地下水位的组合关系,建立了下面 3 种地质结构模式(图 7)。

(1) 单层结构

单层结构即一元结构,上覆盖层为单层粘性土,根据钻孔资料,单层结构其覆盖层厚度在 4.2 m 左右。土层不含水或弱含水,地下水位在基岩面附近上下波动,地下水类型以岩溶水为主,因此将单层结构概化为“单层阻水”型盖层。单层结构在塌陷区分布较少,主要塌陷点为 TX03、TX09 和 TX11。

(2) 双层结构

双层结构即二元结构,覆盖层厚度在 4.2~10 m,地下水位在基岩面以上活动。上覆盖层由上部粘性土、下部砂性土组成,孔隙水赋存于下部砂性土中,因此将双层结构概化为“上阻下透”型盖层,其中上部为弱透土层,下部为强透土层。双层结构在塌陷区的分布范围较广,主要塌陷点有 TX7、TX10、TX16 等。

(3) 多层结构

多层结构即多元结构,覆盖层厚度在小于 10 m 的范围内,地下水位在基岩面以上活动。在塌陷区

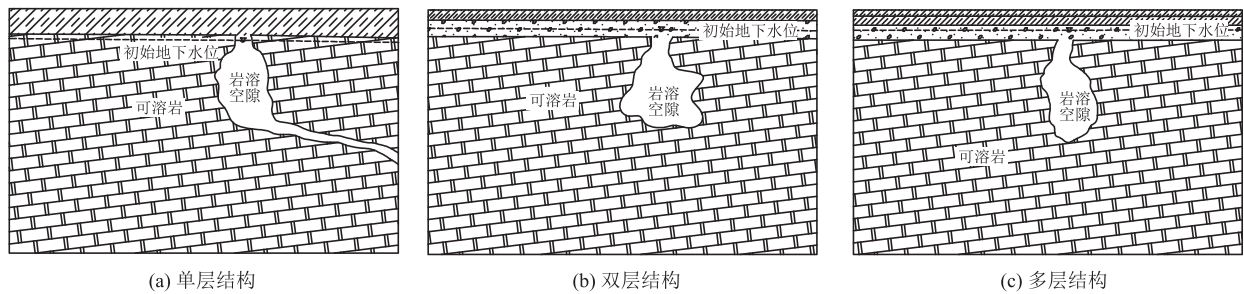


图 7 岩溶塌陷地质模式示意图

内,多层结构主要为 3 层,由上部粘性土、中部粘性土、下部砂性土组成,两层粘性土在颜色上存在明显区别。孔隙水赋存于第 3 层砂性土中,因此将多层结构也概化为“上阻下透”型盖层,中上部为弱水层,下部为强透水层。多层结构在塌陷区分布范围最广,主要塌陷点有 TX01、TX04、TX05 等。

由于引水隧洞施工抽排水,地下水位快速下降,较大的水动力条件可触发地面塌陷。据访问,7 号施工支洞于 2018 年 7 月抽排水以来,期间排水基本未中断,且随施工的进行排水量不断增加,一直持续到 2019 年底,导致区内地下水位逐渐下降。受岩溶地下水降落漏斗的影响,于 2019 年底,区内开始陆续发生塌陷。施工排水前期(至 2019 年底),排水量不断增加,地下水位降幅较大,塌陷发生的数量较多,部分塌陷坑在回填后仍继续发生塌陷,塌陷的规模呈现不断扩大的现象。随着施工进入中后期(2019 年之后),此时塌陷区的地下水位已经下降至基岩面以下一定深度,塌陷发生的频率相对较低,新塌陷的产生多与大气降水密切相关,实际调查了解到,区内部分塌陷均是在降雨尤其是强降雨之后的第二天或第三天发生塌陷,这一阶段塌陷受降雨的影响很大。

由于施工排水的不同时期,引发塌陷的主导因素也会有所变化。因此可根据引水隧洞疏排水的不同时期,将区内岩溶塌陷划分为疏干排水前期突涌型塌陷和疏干排水中后期降雨诱发型塌陷 2 类。

3 研究区塌陷成因机制

天然状态下,岩溶塌陷的发育过程非常缓慢,受人类工程活动的影响,以及在降雨诱发的情况下,加快了岩溶塌陷的形成进程。目前人们普遍认同的塌陷成因主要有潜蚀、真空吸蚀、气爆及压强差等效应,通过理论分析,区内岩溶塌陷的形成机制主要为潜蚀、真空吸蚀以及降雨引起的渗压效应。

3.1 疏干排水前期突涌型塌陷

对于区内引水隧洞疏干排水前期突涌型塌陷,

由于覆盖层的结构、地下水位的埋深不同,起主导作用的塌陷机制也不同,主要包括以下几种情况。

(1) 真空吸蚀致塌。对于盖层为单层结构的塌陷点(单层阻水型),盖层为单一结构的粘土层,可视为相对隔水层,初始地下水位在基岩面附近上下波动。受引水隧洞施工抽排水的影响,以施工排水支洞作为地下水下降漏斗的中心,岩溶地下水位开始下降,使区域地下水流场发生改变,周围的地下水不断向降落漏斗方向补给。随着施工排水的持续进行,地下水降落漏斗的影响范围不断扩大(图 8)。塌陷区处于地下水下降漏斗的影响范围内,由于上覆盖层的粘土层透气性差,不能与外界保持良好的连通性,便会在下降的水面和盖层底板之间形成真空区,导致负压产生。负压的出现会对盖层产生吸蚀力,吸蚀力会不断作用于盖层底部的土层,使土体变得疏松,稳定性降低,盖层底部的土体逐渐剥落而形成土洞。施工支洞排水前期,排水量不断增加,地下水位降速加快,吸蚀力逐渐增大,盖层底部土体不断剥落,土洞规模扩大并向地表扩展。当吸蚀力增加至大于上覆盖层的自重时,塌陷发生(图 9)。

(2) 潜蚀作用致塌。对于区内盖层存在孔隙含水层的塌陷点(上阻下透型),初始地下水位在基岩面之上。受引水隧洞施工排水的影响,导致区域地下水位下降,孔隙水的流速和水力梯度也相应增大,当水力梯度增大到一定值时,动水压力大于土体内聚力和颗粒间摩擦力,基岩面之上存在孔隙水位的那部分土体便会发生渗流潜蚀作用,松散细小的土颗粒被不断溶蚀带走,向基岩中的溶洞孔隙流失,最终在盖层底部土体中发育形成土洞。随着地下水位的持续下降,渗流潜蚀作用加剧,土洞不断发育扩展。尤其是当地下水位下降至基岩面上下波动时,渗流潜蚀作用最强烈,使得土洞规模持续扩大,直至扩展到地表形成塌陷(图 10)。TX01、TX04、TX14 这几个塌陷点为比较典型的潜蚀作用致塌,主要分布于土瓜冲河的边缘,由于岩溶地下水位的下降,地表水不断下渗补给,增强了地表水对覆盖层的渗透

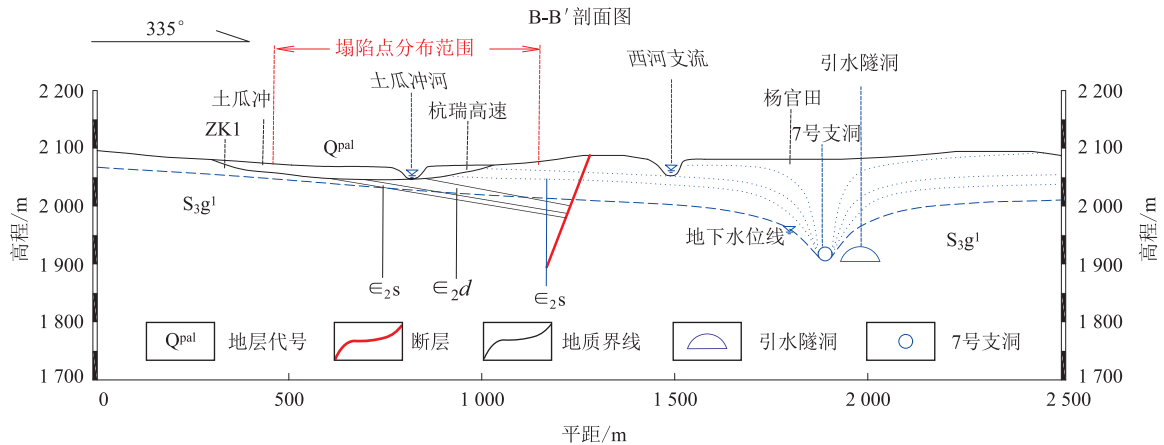


图 8 地下水降落漏斗示意图

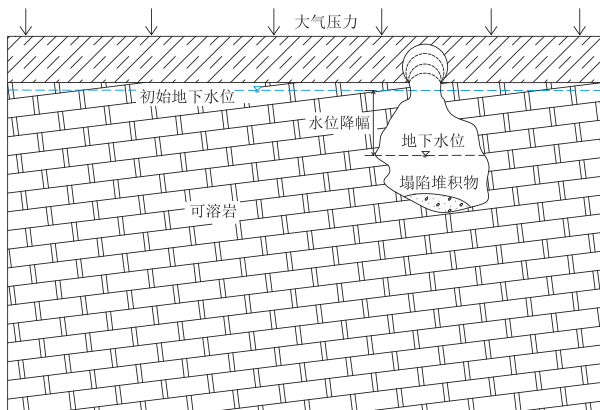


图 9 真空吸蚀作用过程示意图

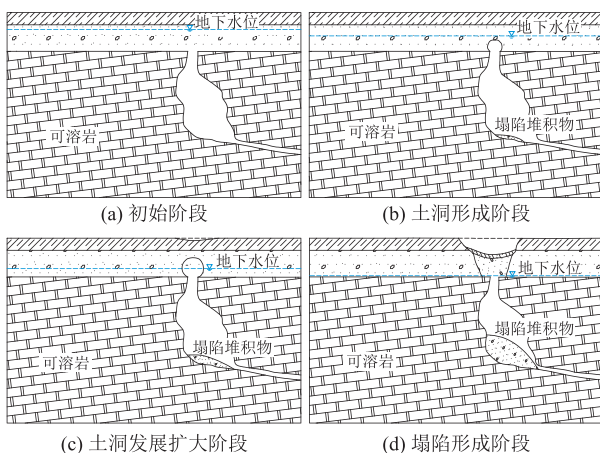


图 10 潜蚀作用过程示意图

渗透潜蚀作用,更有利于塌陷的形成。

(3) 潜蚀-真空吸蚀力联合致塌。对于塌陷区盖层结构为双层或多层结构的塌陷(上阻下透型),初始地下水位在基岩面之上。在地下水位下降至基岩面上下波动时,塌陷并未发生。但受到孔隙水位下降引发的潜蚀作用的影响,此时盖层底部已经发育形成了一定规模的土洞。当地下水位下降至基岩

面以下,由于覆盖层上部存在粘土层,可视为相对隔水层。便会在岩溶地下水位和基岩面之间出现负压,使得覆盖层底部的土体再次遭受破坏,土体不断剥落,土洞规模继续扩大。随着施工的进行,排水量不断增大,岩溶地下水位降速加快,负压吸蚀作用增强,最后在潜蚀和真空吸蚀的联合作用下,盖层发生失稳破坏,塌陷产生。区内塌陷多为潜蚀和真空吸蚀联合作用致塌,如 TX05、TX06、TX07 等盖层为双层或多层结构且存在孔隙含水层的塌陷点。

这一阶段的塌陷主要发生于引水隧洞疏干排水的前期,7号支洞施工前期排水量如图 11 所示。可以看出,2019 年以前,排水量相对较小,从 2019 年 1 月开始不断增加并持续到年底,从塌陷区附近的泉、井、龙潭的枯竭情况了解到,这段时期塌陷区岩溶地下水位降幅较大。杨官田社区土瓜冲大龙潭,引水隧洞施工以前每天的涌水量 600 m^3 ,于 2018 年水量开始减少并于 2019 年完全枯竭。因此,可据引水隧洞疏干排水前期不同阶段排水量的变化,将土洞的形成和发育划分为 3 个阶段。第一阶段为土洞的形成阶段。即引水隧洞施工至 2018 年年底,为稳定排水阶段,受岩溶水位降落漏斗的影响,区域地下水降速相对较慢,此时并未发生塌陷,但受到渗流潜蚀作用的影响,盖层底部逐渐形成土洞。第二阶段为土洞的发育扩展阶段。对应的施工期为 2019 年 1 月至 5 月初,为排水骤增阶段,由于施工支洞排水量的突然增大,地下水降速加快,渗流潜蚀作用增强,土洞规模不断发展扩大。第三阶段为塌陷的发生阶段。即 2019 年 5 月初至 2019 年底,为排水量持续增长阶段,导致岩溶地下水位下降幅度不断加大,由于盖层表面的粘土层密闭性较好,有利于负压的产生,最终覆盖层在渗流潜蚀和真空吸蚀的综合作用下发生破坏,导致塌陷陆续发生。2019 年年底以

后,排水量开始逐渐降低,前期形成的负压开始减弱,塌陷发生的可能性开始降低。

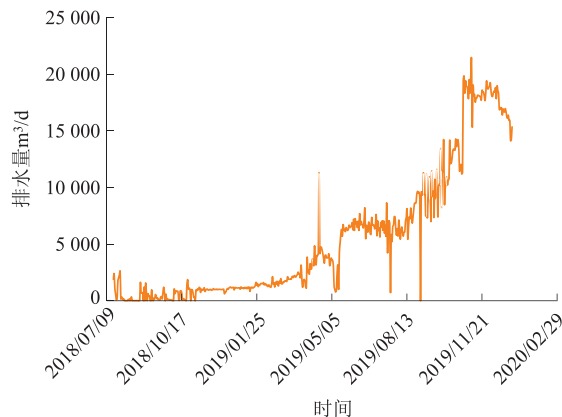


图 11 施工前期排水量变化图

3.2 疏干排水中后期降雨诱发型塌陷

2019 年以后,地下水位已降至基岩面以下一定深度。由于盖层表面的粘土层只是相对隔水层,而不是完全密封状态,随着时间的推移,盖层和地下水位之间形成的负压开始慢慢减弱,最后塌陷区内岩溶地下水位和上覆盖层之间逐渐达到一个相对稳定的动平衡状态,即使水位下降会继续形成负压,但还不足以引发塌陷,此时发生塌陷的情况相对较少。但随着降雨尤其是暴雨情况下,又有新的塌陷产生。此时岩溶塌陷的成因机制从地下水位下降前期引起的潜蚀效应和真空吸蚀效应转变为中后期降雨诱发条件下的渗压效应,主要有以下几种情况。

(1) 降雨引起溶洞空腔压强差发生变化。在降雨尤其是暴雨过后,会使盖层土体处于饱水状态,同时导致土体孔隙中的气水比含量降低,使得土体的透气性降低,封闭性更强,在水位发生波动时更容易在地下水位和基岩面之间形成压强差。强降雨阶段,降雨入渗使得塌陷区内地下水位上升,尤其是每年的雨季,降雨量集中,6~8 月平均降雨量达 150 mm/月,地下水位开始上升,负压逐渐减弱,便会在地下水位及盖层底板之间形成正压,进而会产生高压气爆效应而不断破坏上覆盖层,导致土体受到扰动破坏。在降雨过后,地下水位又开始逐渐下降,进而又形成负压,在压强差的作用下不断破坏盖层土体。由于此时盖层土体已经受到引水隧洞疏干排水前期地下水位变化所带来的影响,稳定性较弱,在正负压强差的作用下很容易导致覆盖层失稳破坏而引发塌陷(图 12)。

(2) 降雨引发潜蚀效应。受大气降水的影响,雨水在地表积聚后沿着土体中的孔隙或裂隙通道不断入渗,再次引发渗流潜蚀效应,土体中细小土颗粒

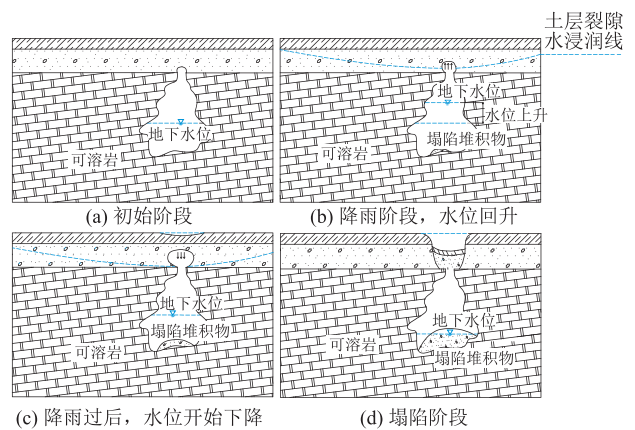


图 12 渗压作用过程示意图

被带走,向下部岩溶裂隙管道迁移,进一步促进了土洞的发育,甚至导致覆盖层失稳而引发塌陷。

(3) 降雨引起土体重度改变。土的重度随含水量的增加而增大,对于一般粘性土,土体在饱水后,重度可增加 1/7~2/7。对于区内塌陷而言,由于引水隧洞施工排水,导致塌陷区地下水位下降至一定基岩面以下一定深度,塌陷区存在孔隙水位的那部分土体由于地下水的流失,土体的含水量不断降低。受大气降水的影响,雨水入渗而引起覆盖层含水量增加,由于受前期地下水位下降引发潜蚀和真空吸蚀效应的影响,覆盖层的稳定性相对较低,含水量的增加会导致粘土层的重度变大,引起塌陷体重量增加,从而导致岩溶塌陷的发生。对于已经发生塌陷的区域,塌陷坑附近的土体受扰动较严重,受降雨的影响,可能导致塌陷坑发生二次塌陷,塌陷规模进一步扩大。

这一阶段的塌陷主要集中于引水隧洞疏排水中后期,此时的地下水位已经下降至基岩面以下一定深度。此时塌陷区的地下水位降幅很大,尽管还会有塌陷发生,但塌陷的数量比疏干排水前期少,说明真空吸蚀效应并不是此时导致塌陷产生的主导因素。此时发生的塌陷更多的是在降雨的诱发下发生塌陷,实际调查了解到,部分新塌陷的产生均是在强降雨之后的第二天或者第三天,塌陷区内 TX04 和 TX23 在降雨之后发生了二次塌陷,塌陷的规模在原有塌陷的基础上再次扩大,此时产生塌陷的主导因素在于大气降水所引起的渗压效应。

4 岩溶塌陷防治对策

结合本区岩溶塌陷的成因类型、发育特征及分

布规律,提出以下防治对策。

4.1 治理措施

(1) 回填法。这种方法简单易行、见效快,区内塌陷坑大多深度较浅,影响较小,因此可直接回填夯实,尤其是区内塌陷大多位于农田附近,回填塌陷坑可以快速恢复耕作。

(2) 地表水疏排法。对于区内部分塌陷坑发生于河流附近,且塌陷坑底充水(TX01、TX04等),这类塌陷往往会成为地表水倒灌的进口。因此,应及时做好沟渠引流工作,以防止地表水进入塌陷区。

(3) 平衡气压法。通过对区内塌陷成因机制的分析可知,地下水位升降会导致岩溶空腔内水气压力发生变化,这是导致塌陷发生的一个重要因素。因此,在查明地下岩溶通道的情况下,可在地下岩溶通道中设置通气的装置,以平衡地下水、气压力。

4.2 预防措施

(1) 群测群防。汛期应对岩溶地面塌陷防治区进行巡防,监测地表裂缝、形变等变化,提高塌陷区居民的防灾意识。

(2) 合理控制地下水位降深。开采地下水时,水位降深要尽量控制在基岩面以上,特别对于第四系覆盖层厚度 $<10\text{ m}$ 的地段,尤其要注意水位降深的降次安排和降深值的选择。

(3) 合理规划地下水的开采方式。建议今后对区内岩溶地下水的开采进行合理规划,可采用“分散、小型、多点”形式的开采方式,而避免大降深、大流量集中式的开采地下水,以避免诱发岩溶塌陷地质灾害。

5 结论

通过对研究区岩溶塌陷的分布和发育特征进行分析,并根据引水隧洞施工排水的不同时期,分析了区内塌陷的成因机制,得到研究结论如下:

(1) 区内岩溶塌陷多集中分布于岩溶地下水降落漏斗及其影响范围内,塌陷的发生很大程度上受地下水位变动的影 响,且塌陷多分布于土瓜冲河的两岸;受地层展布和岩性控制,塌陷多分布在以可溶岩为基座的第四系覆盖层中,呈条带状分布;受断裂构造的影响,塌陷多分布在断裂构造附近。

(2) 区内岩溶塌陷平面形态主要有似圆形、椭圆形、长条形和不规则形。剖面形态主要有坛状、漏斗状、碟状和圆柱状;岩溶塌陷可见深度主要在 $0\sim 5\text{ m}$ 范围内;岩溶塌陷盖层结构主要有单层、双层和多层结构,岩溶塌陷多发生在盖层结构为多层的土体结构上。

(3) 根据引水隧洞疏干排水的不同时期,将研究区岩溶塌陷划分为疏干排水前期突涌型塌陷、疏干排水中后期降雨型塌陷。

(4) 区内岩溶塌陷主要受渗流潜蚀效应、真空吸蚀效应、渗压效应这3种机制作用的影响。其中疏干排水前期突涌型塌陷主要是在渗流潜蚀、真空吸蚀效应作用下发生塌陷;疏干排水前期突涌型塌陷主要是在大气降水所引起的渗压效应下发生塌陷。

(5) 针对区内塌陷,提出了回填法、地表水疏排法、平衡气压法这3种治理措施和群测群防、合理控制地下水位降深、合理规划地下水的开采方式这3种预防措施。

参考文献

- [1] 康彦仁,项式均,陈健.中国南方岩溶塌陷[M].南宁:广西科学技术出版社,1990.
- [2] 雷明堂,蒋小珍.岩溶塌陷研究现状、发展趋势及其支撑技术方法[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(3):1-6.
- [3] 戴建玲,雷明堂,蒋小珍.线性工程岩溶塌陷危险性评价研究[J].中国岩溶,2012,31(3):296-302.
- [4] 戴建玲,罗伟权,吴远斌,等.广西来宾市良江镇吉利村岩溶塌陷成因机制分析[J].中国岩溶,2017,36(6):808-818.
- [5] 雷明堂,李瑜,蒋小珍,等.岩溶塌陷灾害监测预报技术与方法初步研究——以桂林市柘木村岩溶塌陷监测为例[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(S1):148-152.
- [6] 郑智,简文彬.龙岩市岩溶塌陷地质结构及其致塌机理[J].地质灾害与环境保护,2017,28(4):38-43.
- [7] 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.
- [8] 蒙彦,雷明堂.岩溶塌陷研究现状及趋势分析[J].中国岩溶,2019,38(3):411-417.
- [9] I A De Bruyn, F G Bell. The occurrence of sinkholes and subsidence depressions in the far west Rand and Gauteng Province, South Africa, and their engineering implications[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2001, 7(3): 281-295.
- [10] Han X, Jing Y J, Boo H N, et al. Investigation of the impacts of local-scale hydrogeologic conditions on sinkhole occurrence in East-Central Florida, USA[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(18): 31-44.
- [11] 贾龙,蒙彦,戴建玲.广佛肇地区岩溶塌陷易发性分析[J].中国岩溶,2017,36(6):819-829.
- [12] 李瑜,朱平,雷明堂,等.岩溶地面塌陷监测技术与方法[J].中国岩溶,2005,24(2):103-108.
- [13] 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.
- [14] 吴远斌,罗伟权,殷仁朝,等.重庆市龙泉村—庆丰山村岩溶塌陷分布规律与成因机制[J/OL].中国岩溶:1-14[2022-02-24].

- http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20211206.1410.002.html.
- [15] 吴远斌,刘之葵,殷仁朝,等.基于AHP和GIS技术的湖南怀化地区岩溶塌陷易发性评价与应用[J/OL].中国岩溶:1-18 [2022-03-31].http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20211221.1205.002.html.
- [16] 项式均,康彦仁,刘志云,等.长江流域的岩溶塌陷[J].中国岩溶,1986,5(4):23-40.
- [17] Chen J. Karst collapse in cities and mining areas, China[J]. Environ. Geol. Water Sci,1988,12(1):29-35.
- [18] 刘传正.我国岩溶塌陷分布规律的探讨[J].中国地质灾害与防治学报,1997,8(S1):19-25.
- [19] 刘宝臣,宋庆生,陈学军,等.桂林市西城区岩溶塌陷特征分析[J].地质灾害与环境保护,2000,11(3):200-203.
- [20] 唐万春,许模,于贺燕.武广客运专线韶花段岩溶塌陷模式概化研究[J].路基工程,2008,139(4):145-146.
- [21] 罗小杰.武汉地区浅层岩溶发育特征与岩溶塌陷灾害防治[J].中国岩溶,2013,32(4):419-432.
- [22] Ozdemir A. Investigation of sinkholes spatial distribution using the weights of evidence method and GIS in the vicinity of Karapinar (Konya, Turkey) [J]. Geomorphology. 2015, 245 (15):40-50.
- [23] Wei Y, Sun S, Huang J, et al. A study on karst development characteristics and key control factors of collapse in Xuzhou, eastern China [J]. Carbonates Evaporites. 2018, 33 (3): 359-373.
- [24] 王思敬.堤坝下的机械潜蚀及其防止方法[J].水文地质工程地质,1957,12(9):43-46.
- [25] 徐卫国,赵桂荣.试论岩溶矿区地面塌陷的成因及防治设想[J].化工矿山技术,1978,10(4):19-27+18. DOI:10.16283/j.cnki.hgkwyjg.1978.04.004.
- [26] 代群力.岩溶矿区地面塌陷成因新说——共振论[J].中国煤田地质,1991,3(3):66-68.
- [27] 何宇彬,徐超.论喀斯特塌陷的水动力因素[J].水文地质工程地质,1993,11(5):39-42.
- [28] 代群力.论岩溶地面塌陷的形式机制与防治[J].中国煤田地质,1994,(2):59-63.
- [29] 康彦仁.岩溶塌陷的形成机制[J].广西地质,1989,2(2):83-90.
- [30] 康彦仁.论岩溶塌陷形成的致塌模式[J].水文地质工程地质,1992,14(4):32-34+46.
- [31] 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.
- [32] 陈国亮.岩溶地面塌陷的成因与防治[M].北京:中国铁道出版社,1994.
- [33] 程星,黄润秋.岩溶塌陷的地质概化模型[J].水文地质工程地质,2002,8(6):30-34.
- [34] Cooley T. Geological and geotechnical context of cover collapse and subsidence in mid-continent US clay-mantled karst [J]. Environ. Geol., 2002, 42(5):469-475.
- [35] Jiang F W, Dai J L, Lei M T, et al. Experimental study on the critical triggering condition of soil failure in subsidence sinkholes [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(1):693-701.
- [36] 蒋小珍,雷明堂,管振德.单层土体结构岩溶土洞的形成机理[J].中国岩溶,2012,31(4):426-432.
- [37] 侯超群,董满生,逢焕平.松散土体型地面塌陷成因分析及机理研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2013,36(1):63-67.
- [38] 肖先焯.覆盖型岩溶区水气相互驱动盖层变形演化及塌陷机理研究[D].成都理工大学,2018.
- [39] 雷明堂,蒋小珍.岩溶塌陷研究现状、发展趋势及其支撑技术方法[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(3):1-6.
- [40] 徐贵来.武汉市覆盖层-岩溶地面塌陷形成机理与危险性评价[D].中国地质大学,2016.

作者简介: 胡志林(1996—),男,在读硕士,地质资源与地质工程专业。E-mail:huzhilinky@163.com

通讯作者: 肖先焯(1985—),男,副教授,主要从事水文地质与工程地质相关教学与科研工作。E-mail:sassoon1123@126.com