

歌乐山地区隧道工程诱发的岩溶塌陷发育规律与形成条件

姜 巽, 曹 聪, 刘 智, 龚思宇, 魏 来, 孙 帆

Development and formation conditions of karst collapse induced by tunnel engineering in the Gele Mountain area

JIANG Xun, CAO Cong, LIU Zhi, GONG Siyu, WEI Lai, and SUN Fan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208079>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广昆铁路复线秀宁隧道大皮坡—中村段岩溶塌陷成因

An analysis of the cause of karst collapses near the Dapipo–Zhongcun section of the Xiuning tunnel of the Guangzhou–Kunming railway
周长松, 邹胜章, 朱丹尼, 谢浩, 申豪勇, 王佳 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 146–146

川藏铁路格聂山和察雅段构造岩溶发育规律及岩溶地下水循环模式研究

Evolution regularity of the plateau tectonic karst and the relevant karst groundwater circulation mode in Mount Genie and Zaya sections along the Sichuan–Xizang Railway

李向全, 马剑飞, 张春潮, 王振兴, 付昌昌, 白占学 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 34–45

不同勘探方法在丰水期和枯水期岩溶塌陷探测效果分析研究

Studies on effect analysis of different exploration methods for karst collapse detection in the periods of rainy and dry seasons
金爱芳, 刘磊, 殷秀兰 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 171–178

渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响

Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering
张晓宇, 毕焕军, 曹峰, 夏万云 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 41–47

薄层灰岩浅部岩溶发育特征及分布模型

Development characteristics and distribution model of shallow karst in thin-bed limestones
张宽, 唐朝晖, 柴波, 孙巧, 张洁飞 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 167–174

浅埋洞口段黄土公路隧道施工变形性状现场测试研究

Field test on the construction deformation characteristics for a loess highway tunnel at the shallow portal section
邱明明, 杨果林, 张沛然, 段君义 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 135–143



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208079

姜巽, 曹聪, 刘智, 等. 歌乐山地区隧道工程诱发的岩溶塌陷发育规律与形成条件 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 181-191.
JIANG Xun, CAO Cong, LIU Zhi, *et al.* Development and formation conditions of karst collapse induced by tunnel engineering in the Gele Mountain area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 181-191.

歌乐山地区隧道工程诱发的岩溶塌陷 发育规律与形成条件

姜 巽, 曹 聪, 刘 智, 龚思宇, 魏 来, 孙 帆

(重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队, 重庆 401147)

摘要: 歌乐山地区近年来因密集修建隧道工程诱发大量岩溶塌陷, 然而对岩溶塌陷的分布、规模、成因和演化等尚缺乏系统性总结。通过资料整理、钻井资料分析、监测资料解译等手段, 对歌乐山地区岩溶塌陷发育规律和形成条件进行了系统性分析, 对致塌成因机理和演化过程进行了深入探讨, 得出以下结论: 岩溶塌陷多组群式发育在隧址区内第四系粉质黏土覆盖的宽阔岩溶洼地、沟槽或构造裂隙密集区; 多级岩溶洞缝系统为岩溶塌陷的形成提供了良好的空间发育条件, 致塌力主要来自隧道工程建设引发的地下水动力条件变化; 岩溶塌陷主要成因机理是隧道工程建设改变局部地下水环境, 在重建过程中产生的多效应致塌作用诱发易塌地质结构塌陷; 岩溶塌陷发育演化包括孕育、形成、稳定 3 个时期。孕育期, 隧道工程建设初步揭露富水岩溶缝洞系统, 表层缝洞带内形成土体运移、坍塌的空间, 覆盖层局部发生变形、脱落。形成期, 隧道工程建设与运营通常采取引水排放措施, 在引发的多效应致塌作用下岩溶塌陷最终形成。稳定期, 隧道工程运营至一定阶段后, 地下水环境逐渐趋于新的动态平衡, 既有岩溶塌陷逐渐稳定, 塌陷群不再向外扩展。研究结果可作为岩溶塌陷监测预警、生态修复和隧道规划等工作的参考依据。

关键词: 歌乐山地区; 隧道工程; 岩溶塌陷; 地下水; 监测预警

中图分类号: P642.25

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0181-11

Development and formation conditions of karst collapse induced by tunnel engineering in the Gele Mountain area

JIANG Xun, CAO Cong, LIU Zhi, GONG Siyu, WEI Lai, SUN Fan

(*Nanjiang Hydrogeological Engineering Geological Team, Chongqing Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Chongqing 401147, China*)

Abstract: In recent years, intensive tunnel construction has induced a large number of karst collapses in the Gele Mountain area. However, the distribution, scale, cause and evolution of karst collapses have not been systematically summarized. By means of data collation, drilling data analysis, monitoring data interpretation and other working methods, this study systematically analyzes the development law and formation conditions of karst collapse in the Gelle Mountain region, conducts in-depth discussion of the cave-causing mechanism and evolution process, and comes to the following conclusions. Multiple groups of karst collapse are developed in the wide karst

收稿日期: 2022-08-30; 修订日期: 2023-03-28

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目 (cstc2019jsex-dxwtBX0022)

第一作者: 姜巽(1992-), 男, 硕士, 工程师, 从事构造地质和水工环地质方面研究工作。E-mail: 805314946@qq.com

通讯作者: 曹聪(1985-), 男, 学士, 高级工程师, 从事水工环地质和生态环境保护方面研究工作。E-mail: 281381478@qq.com

depression, trough or dense area of tectonic fissure covered by Quaternary silty clay in the tunnel site. The multi-stage rock cave and fracture system provide a good spatial development condition for the formation of karst collapse, and the cave-inducing force mainly comes from the change of groundwater dynamic condition caused by tunnel construction. The main mechanism of karst collapse is that tunnel construction changes the local groundwater environment, and the collapse of collapsible geological structures is induced by multi-effect caving in the reconstruction process. The development and evolution of karst collapse includes three stages: incubation, formation and stability. In the incubation period the water-rich karst fissure and cave system are initially exposed during tunnel construction. Space for soil migration and collapse is formed in the surface fissure and cave zone, and the local deformation and fall of overburden occur. In the formation period water diversion and discharge measures are usually adopted in tunnel construction and operation, and karst collapse is eventually formed under the action of multi-effect collapse. In the stable period, after tunnel operation to a certain stage, groundwater environment gradually tends to a new dynamic equilibrium, the existing karst collapse gradually becomes stable, collapse group no longer expands outward. The results can be used as reference for karst collapse monitoring and warning, ecological restoration and tunnel planning.

Keywords: Gele mountain; tunnel project; karst collapses; groundwater; monitoring and forewarning

岩溶地面塌陷(以下简称“岩溶塌陷”)是指开口岩溶洞隙与上覆土层(少数为松软岩层)中的水、气对盖层发生的力学效应,导致的地面塌陷。岩溶塌陷形成需具备 3 大要素,即:溶蚀空间、一定厚度的覆盖层和诱发因素^[1]。溶蚀空间与覆盖层组合的易塌地质结构,在自然条件下处于相对稳定状态。岩溶塌陷的形成常是真空吸蚀、潜蚀、重力、荷载、振动、失托、加荷、渗压效应等多种诱发机制复杂综合效应的结果^[2-5],按其主导因素可分为多种类型形成机理和致塌模式。程星等^[6]分析了不同地质条件下岩溶致塌过程,将地质概化模型分为:单一阻水盖层型、单一透水盖层型、阻-透盖层型、透-阻盖层型、阻-透-阻盖层型、透-阻-透盖层型。郑晓明等^[7]根据武汉市岩溶塌陷成果资料统计分析,构建了 9 种致塌模式,即:潜蚀-重力(自重)、垂直渗压-重力(自重)、吸蚀、振动-重力(自重和加载)、岩层顶板破坏-垂直渗压、岩层顶板破坏-渗流液化、崩解-土洞顶部破坏-加载(重力)、潜蚀-振动-加载、水击-渗流液化。罗小杰等^[8]认为覆盖层土体工程地质性质决定了塌陷方式,提出了土洞型、沙漏型和泥流型的塌陷理论模式。

隧道工程建设导致的城市管线渗漏和不良地质体失稳已成为现今诱发岩溶塌陷的主要因素之一^[9-12]。近年来,随着重庆市中心城区“四山”隧道工程规划建设的推进,歌乐山岩溶山区地面塌陷频发,造成了严重的经济损失和社会影响,成为岩溶山区主要生态环境问题。前人对歌乐山地区岩溶塌陷的发育特

征、形成机理、成因机制等方面开展过相关研究和阐述。付开隆^[13]预测在新建隧道叠加影响下,既有岩溶塌陷区域将随地下水降落漏斗扩大而向漏斗边缘延伸。胡婷^[14]将岩溶塌陷形成机制分为两种类型:直接垮塌型与土洞扩展型;张海坦等^[15]分析了岩溶塌陷发展趋势和空间分布特征,认为岩溶塌陷形成主要通过地下水潜蚀作用,而陈洪凯等^[16]通过建立土质盖层型地面塌陷演化模式,认为岩溶塌陷形成主要通过真空吸蚀作用。吴远斌等^[17]将岩溶塌陷发生过程分为两个阶段、两种类型:疏干初期突涌型岩溶塌陷和疏干后期降雨型岩溶塌陷。局限于资料有限或只针对单个塌陷进行了研究,以往并未系统总结岩溶塌陷发育规律和形成条件,对隧道工程建设致塌成因机制和演化过程未进行深入分析和讨论。时空分布、灾损程度、影响深度和广度也出现了新变化,隐蔽性、突发性、反复性和难以预见性日渐突出。歌乐山地区岩溶塌陷主控因素有哪些?岩溶塌陷的结构、分布、规模等发育特征与隧道工程和地质环境背景有何内幕关系?隧道工程是怎样诱发岩溶塌陷的?形成机理和时空演化过程如何?怎样缓解隧道工程对岩溶区地质环境的持续影响?无论对于隧道工程诱发岩溶塌陷形成演化的全面认识或是防灾减灾整体把握都具有重要的意义。本文旨在前人研究成果的基础上,从系统性资料整理、钻井资料分析、监测资料解译等方面入手,系统性总结歌乐山地区岩溶塌陷发育规律和形成条件,分析隧道工程建设导致岩溶塌陷成因机

理、致灾过程,更好地为当地生态环境保护和防灾减灾提供决策依据。

1 歌乐山地质环境背景

歌乐山岩溶塌陷区位于重庆中心城区中梁山中段,构造位置为观音峡背斜,构造行迹整体呈近NNE向。研究区范围南北止于长江、嘉陵江,东西两侧以三叠系中统与上统地层界线为界,从背斜核部至两翼依次出露上二叠统长兴组(P_3c)、下三叠统飞仙关组(T_3f)和嘉陵江组(T_3j)、中三叠统雷口坡组(T_2l)、上三叠统须家河组(T_3xj),第四系残坡积层(Qh^{el+dl} 、 Qh^{ml})主要分布于岩溶区。研究区内 T_3j 、 T_2l 是优势含水层组,富水层集中在 T_3j 中岩溶角砾岩段,背斜两侧 T_3xj

砂泥岩组合和轴部 T_3f 钙质泥页岩起着纵向导水和横向阻水作用,从而限制了岩溶发育方向,使区内岩溶发育方向多与构造线一致,如图1(a)所示。研究区地表在地质历史时期水力作用下形成了特殊的“一山二槽三岭”和“一山一槽二岭”岩溶槽谷地貌特征,如图1(b)所示。岩溶槽谷区内溶蚀沟槽、漏斗、洼地、残丘等岩溶地貌十分发育,地势低洼区域多发育落水洞、漏斗、天窗等竖向岩溶管道,普遍充填覆盖数米至十余米的第四纪松散土层。岩溶区地质环境整体较为脆弱,在人类工程活动和极端自然条件影响下,极易导致岩溶洞缝系统中充填岩土体失衡,诱发岩溶塌陷。

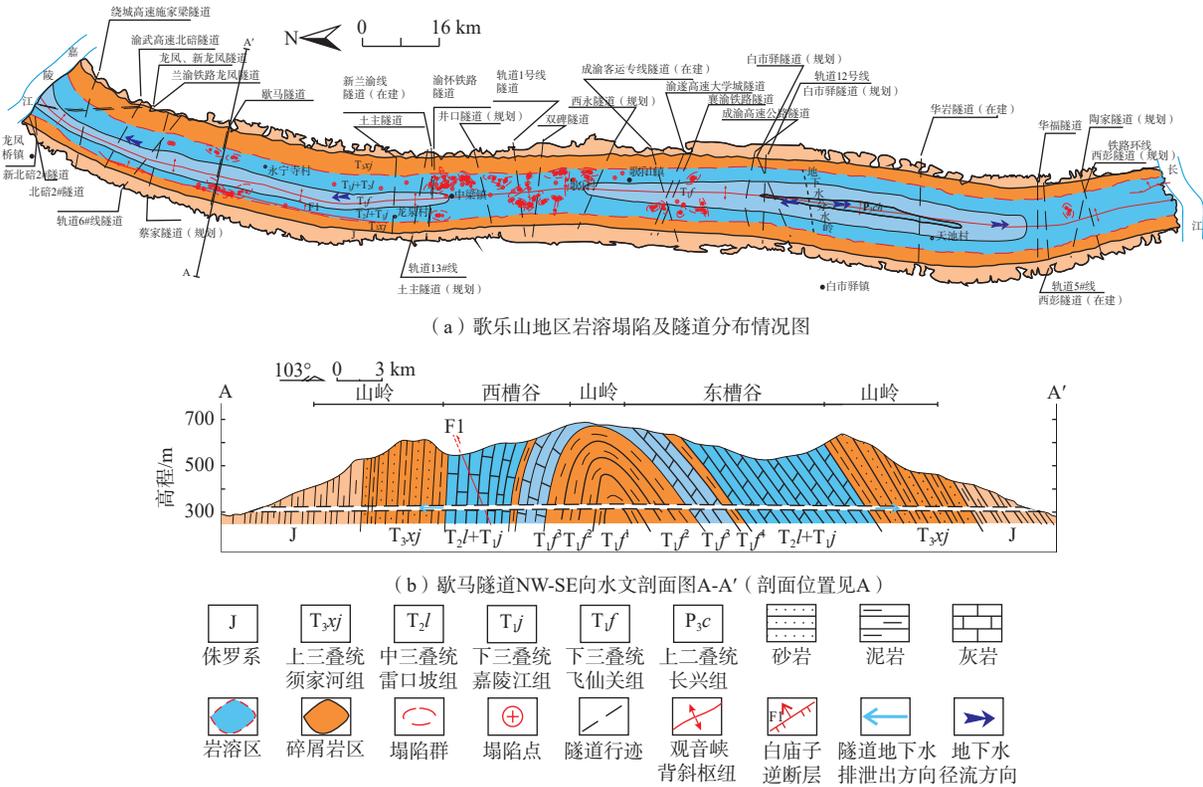


图1 歌乐山地区岩溶塌陷与隧道工程关系图

Fig. 1 Relationship between karst collapse and tunnel engineering in the Gele Mountain area

2 隧道工程诱发岩溶塌陷的发育规律

近年来,在隧道工程活动和极端气候双重背景胁迫下,岩溶塌陷地质灾害呈高发频发态势。自1971年1月襄渝铁路隧道工程建设开始,拉开了歌乐山地区交通廊道的大规模建设序幕。地下交通廊道建设多数贯穿含水层,造成水动力条件整体大幅变化,岩溶塌陷也由此时突增。1971—2019年间,相继建设了

渝怀铁路隧道、双碑隧道、华福隧道等18条穿山廊道,如图1(a)所示,密度达0.358条/km,建设密度和强度世界罕见,地下水日均漏失总量约为 $11.60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,对隧址区地质环境的破坏十分强烈,截至2019年12月,岩溶槽谷地区内岩溶塌陷数量达到327处,现已突破500处。

2.1 与隧址区耦合

歌乐山地区岩溶塌陷均分布在隧址区内,通过随

机抽样分析研究区内隧道工程与岩溶塌陷分布耦合关系(表 1)可知,隧道轴线向两侧延伸 500 m 范围内为岩溶塌陷密集发生区域,向外侧延伸逐渐减少,直至 1 000 m 以外。隧道工程密集建设区域岩溶塌陷发育也最为密集,其中交通廊道规划建设集中区歌乐山镇-中梁山镇区域最为突出,如图 1(a)所示。在隧址区,岩溶塌陷主要沿层间裂隙、构造裂隙以及岩溶洼地、沟槽展布,尤其在构造裂隙密集发育区域、岩溶沟谷交汇部位密集发育,与地质环境背景和致塌因素密切相关。

表 1 歌乐山地区典型隧道工程与岩溶塌陷分布耦合关系表
Table 1 Characteristics of karst collapse caused by typical tunnels in the Gele Mountain area and its influence

序号	隧道名称	塌陷数量/处	与隧道轴线的距离/m		
			<500	500~1 000	>1 000
1	襄渝铁路隧道	29	18	8	3
2	双碑隧道	78	62	12	4
3	轨道1号线	47	36	9	2
4	新兰渝铁路隧道	51	42	6	3
5	歇马隧道	36	21	11	4
	合计	241	176	46	16

注:数据统计与核查截止时间为2019年12月。

2.2 与岩溶区耦合

歌乐山地区所在观音峡背斜核部出露的 T_j 、 T_2 为连续沉积的碳酸盐岩,是岩溶地貌极易发育层段。岩溶发育史经历了盆地期、盐井沟期、嘉陵江期等历史时期,形成了复杂岩溶洞缝系统,为岩溶塌陷的发生提供了有利的时空条件。据统计,研究区内塌陷主要分布在碳酸盐岩层段(表 2),其中嘉陵江组一段(T_{j^1})和三段(T_{j^3})灰岩段相对最多,嘉陵江组一段(T_{j^1})灰岩区最为发育,而嘉陵江组二段(T_{j^2})和四段(T_{j^4})岩溶角砾岩、白云岩,以及厚度较薄的 T_2 白云岩、泥质白云岩夹岩溶角砾岩,不支持发育大型溶蚀孔洞,岩溶塌陷数量相对较少,飞仙关组三段(T_{j^3})受控于岩性组合和构造条件,地表露头多呈斜坡地形,极少发育大规模的洼地和槽谷,土体覆盖较薄,岩溶洞缝较少发育,岩溶塌陷发育数量最少。在岩溶区内岩溶塌陷多分布于槽谷内地势低洼的沟槽、洼地等充

表 2 歌乐山地区岩溶塌陷与地层分布情况一览表

Table 2 Karst collapses and stratigraphic distribution in the Gele Mountain area

分布地层	T_{j^1}	T_{j^2}	T_{j^3}	T_{j^4}	T_2	T_{j^5}	合计
塌陷数量/处	160	47	69	27	16	8	327

注:数据统计截止时间为2019年12月。

填松散土体的负地形区域,极少分布于残丘、斜坡等地势相对较高的位置。

2.3 与构造迹线耦合

歌乐山地区岩溶塌陷的分布与构造地质条件关系如图 1(a)所示,整体展布与观音峡背斜轴向一致,且主要发育在褶皱构造的核部、扬起端、倾伏端及其两翼收敛转折端和断裂构造叠加复合部位。是因燕山期以来多期次、多方向的挤压、剪切、抬升等构造作用,致使歌乐山所在的观音峡背斜中能干性强的中~下三叠统碳酸盐岩暴露地表、岩体破裂,张性、剪性、压扭性构造裂隙十分发育,是天然的区域性地下水补给、径流、排泄的主要导水通道,为岩溶作用发育提供了理想环境,为岩溶塌陷的形成提供了空间条件,又以大倾角张性裂隙是最为理想的发育环境。如:歇马隧道诱发的中梁镇新发村塌陷群,发育在白庙子断裂带内,形成沿断裂带呈串珠状发育的新发村蓝莓谷、大烂池、蓝莓园 3 个塌陷群(图 2),塌陷群整体展布长度达 1.2 km,而相邻东槽谷永宁寺陈家坡地区无大构造裂隙发育,岩溶塌陷发育规模相对较小。

2.4 塌陷群式发育

截至 2019 年 12 月,歌乐山地区发育 26 个塌陷群,涵盖了歌乐山地区约 92% 地面塌陷,以中梁镇—歌乐山镇一带最为密集,如图 1(a)所示。在南北 7 km 范围内 4 条隧道诱发了 12 个塌陷群,塌陷群面积约 2.2 km²,严重胁迫场镇安全。塌陷群多发育在隧址区内宽阔岩溶洼地、沟槽或构造裂隙密集区(表 3),该地段水动力和交互作用活跃,密集发育落水洞、漏斗、天窗等竖向岩溶通道,而在残丘、峰丛等地段地下水动力较弱,岩溶塌陷不发育或单一出现。塌陷群发育形态特征与构造裂隙产状、岩溶洼地形态、横切沟相适应,空间形态多呈条带状、树杈状、串珠状、藕荷状。塌陷群分布密集程度、范围大小、形态特征、塌陷数量受到隧道工程建设密度和地质环境背景联合控制。

3 隧道工程诱发岩溶塌陷的形成条件

3.1 易塌地质结构

歌乐山地区易塌地质结构主要发育在有第四系地层覆盖的三叠系下统碳酸盐岩岩溶槽谷内,结构中底部为槽谷底部的落水洞、溶蚀漏斗、溶缝等管道空间,上覆厚 3~8 m,第四系松散土层,覆盖层为多层次土体结构,底部发育卵石层及砂层,向上逐渐过渡为



图 2 中梁镇新发村岩溶塌陷展布图

Fig. 2 Distribution of karst collapses in the Xinfa Village of Zhongliang Township

表 3 中梁镇-歌乐山镇塌陷群情况一览表

Table 3 Collapse groups from Zhongliang Town to Geleshan Town

序号	主要隧道工程	主要塌陷群	塌陷数量/处	塌陷群面积/km ²	发育特征
1		龙泉村欧家院塌陷群	6	1.20	塌陷群长轴方向与主岩溶沟槽拟合, 整体呈串珠状
2	土主隧道新兰渝铁路 隧道渝怀铁路隧道	石院村仙米山塌陷群	4	0.05	塌陷群受控于低洼沟槽、洼地, 与1组“X”型构造裂隙(节理)联系紧密, 主控裂隙产状为S ₁ 202°∠72°, S ₂ 325°∠68°, 整体呈条带状
3		茅山峡村大龙井塌陷群	29	0.15	塌陷群长轴方向受岩溶沟槽控制, 整体呈条带状
4		茅山峡村黑天池塌陷群	5	0.05	塌陷群明显沿构造线方向发育, 主控裂隙产状为S ₁ 220°∠65°, 整体呈条带状
5	轨道1号线隧道	茅山峡村双水井塌陷群	6	0.08	塌陷群与岩溶洼地形态拟合, 整体呈藕荷状
6		余家湾村水库塌陷群	28	0.08	塌陷群明显沿构造线方向发育, 向横切沟明显适应, 主控裂隙产状为S ₁ 223°∠68°, 整体呈条带状
7		余家湾村上下堰塌陷群	8	0.07	
8		金刚村新庙塌陷群	7	0.01	
9		金刚村龙塘坎塌陷群	21	0.16	金刚村新庙塌陷群、龙塘坎塌陷群、方堰塘塌陷群, 均向横切沟适应, 受控于1组层间裂隙, 产状为S ₁ 84°∠55°, 整体呈串珠状
10	双碑隧道	金刚村方堰塘塌陷群	6	0.02	
11		廖家店塌陷群	10	0.10	塌陷群与1组“X”型节理裂隙联系紧密, 塌陷沿该裂隙发育方向分布, 整体呈树杈状
12		凌云水库塌陷群	16	0.23	凌云水库塌陷群、枫香园塌陷群和立信学校塌陷群长轴方向与主岩溶沟槽适应, 整体呈条带状
	合计		146	2.2	

黏土层。如双碑隧道建设引发的凌云水库塌陷群内 T1 塌陷, 联井剖面 B—B' 和覆盖层结构简图揭示下伏可溶岩石中发育向东南延伸岩溶管道, 管道内充填大量松散土体和灰岩砾石(图 3a), 覆盖层厚 2~4 m, 层内发育厚约 1.5 m 成层性的卵石层和砂砾层(图 3b、图 3c), 其上过渡为黏土层。

3.2 溶蚀空间条件

歌乐山地区岩溶区内 32 个溶蚀空间点位, 发育了

多级近水平岩溶空间(表 4), 由下至上依次发育大泉或暗河、有水溶洞或暗河、干溶洞或季节性充水溶洞、干溶洞或伏流、干溶洞或地下大厅, 每级水平岩溶空间之间多以竖向管道连通, 形成横向-垂向多级岩溶洞缝系统, 为岩溶塌陷的形成提供了良好的空间发育条件, 表层缝洞带内溶蚀空间多被松散土体充填。

3.3 覆盖层条件

歌乐山地区岩溶塌陷多发生在第四系覆盖层范

表 4 歌乐山地区典型岩溶管道高程统计表

Table 4 Elevation data of typical karst pipelines in the Gele Mountain area

序号	溶蚀空间类型	标高/m	数量/处
1	大泉或暗河	295 ~ 305	1
2	有水溶洞或暗河	370 ~ 380	2
3	干溶洞或季节性充水溶洞	420 ~ 440	6
4	干溶洞或伏流	455 ~ 475	4
5	干溶洞或地下大厅	500 ~ 520	4
6	竖向岩溶管道	—	15

注: 共统计32个溶蚀空间点, 其中竖向岩溶管道在295 m以上的多个高程均有分布, 数量约占50%。

围内, 易发程度受覆盖层岩性和塌陷坑洞跨比控制。通过塌陷区与非塌陷区土体性质对比发现(表5), 塌陷区充填、覆盖土体主要粉质黏性土, 为异地搬运沉积物, 易饱和和软化, 易被潜蚀、掏空。粉质黏土的分布区域可作为歌乐山地区判别岩溶塌陷区域的主要指标之一。

洞跨比指岩溶管道洞口直径与土层厚度之比, 通过中梁镇矿山坡-石院村 133 个岩溶塌陷洞跨比可知(表6), 塌陷区洞跨比<1 的塌陷共 17 个, 所占比例为 12.8%; 洞跨比 1~2 的塌陷共 41 个, 所占比例较大,

表 5 塌陷区与非塌陷区土体性质对比表(据文献[18]修改)

Table 5 Comparison of soil properties in the collapse area and non-collapse area(modified after Ref.[18])

序号	地段	取样组数/组	液限范围	土体性质	塌陷数量/处
1	茅山峡村大龙井塌陷群	16	25.3 ~ 30.3	粉质黏土	29
2	石院村仙米山塌陷群	6	23.8 ~ 31.1	粉质黏土	4
3	新发村塌陷群	16	27.8 ~ 29.6	粉质黏土	28
4	庆丰山村塌陷群	11	28.9 ~ 35.1	粉质黏土	5
5	龙泉村塌陷群	15	25.4 ~ 29.6	粉质黏土	30
6	余家湾村水库塌陷群	8	22.9 ~ 32.1	粉质黏土	28
7	新开寺村陈家堡塌陷群	8	25.8 ~ 30.2	粉质黏土	10
8	中梁镇新华村五香庙	11	47.5 ~ 51.8	次生红黏土、红黏土	无塌陷
9	九龙坡区油麻天池	5	32.6 ~ 46.4	粉质黏土、次生红黏土	无塌陷

为 30.8%; 洞跨比>2 的塌陷共 75 个, 所占比例最大, 为 56.4%。表明研究区内洞跨比 1~2 时较易产生塌陷, >2 的地段最易产生塌陷, 当洞跨比<1, 发生塌陷的可能性减小。

表 6 中梁镇矿山坡-石院村地面塌陷洞跨比统计表

Table 6 Tunnel span ratio of ground collapses from Kuangpo to Shiyuan Village of Zhongliang Township

塌陷区洞跨比	<1	1~2	>2
塌陷数量/个	17	41	75
所占比例/%	12.8	30.8	56.4

注: 若洞口为椭圆和多边形, 按长轴进行计算统计。

3.4 致塌力条件

3.4.1 隧道工程导致地下水动力条件变化

研究区地下水影响岩溶塌陷主要表现在埋藏条件的动态变化上, 通常地下水埋深较大的地段(如南北两侧近长江、嘉陵江排泄地段)不易发生塌陷, 而在地下水埋深较浅地段易于塌陷的发生, 原因在于浅表水动力条件大幅动态变化更容易破坏盖层原有平衡。建设期隧道工程揭露三叠系中-下统岩溶含水层段引发涌突水, 导致地下水水位、水力坡度发生大幅变化, 叠加季节性的丰水-枯水期变动影响, 致使浅表水动力条件更为活跃, 对覆盖层与竖向岩溶管道充填

土体的潜蚀、冲蚀作用加剧, 致使岩溶塌陷发生。

在区域地下水动力条件达到新动态平衡之前, 隧道工程建设诱发的地下水动力条件变化是诱发岩溶塌陷主要因素。如: 中梁山北段歇马隧道(图1b), 位于地下水水平径流循环带内, 在隧道建设前地下水位埋深较浅, 2015年11月隧道工程揭露断层破碎带, 引发大规模持续涌水, 东、西槽谷地下水位突降约 50 m, 叠加季节性枯水期-丰水期变动, 地下水位频繁波动, 诱发大规模塌陷, 在 2015 年 11 月—2016 年 8 月塌陷密集发生, 共计 33 处(图4)。

3.4.2 大气降水

大气降水是不可忽视的重要致塌因素, 降雨补给变化导致地下水丰水-枯水期的波动, 改变水动力条件, 雨水的浸润使覆盖层饱和、软化, 弱化其土力学性质。降雨量达到极值状态对岩溶塌陷发生有着密切影响, 控制着研究区塌陷发生时间节点。对研究区岩溶塌陷高发期(2011—2013年多条隧道共同建设时期)与降雨量进行统计(图5), 发现岩溶塌陷数量变化明显与降雨量折线耦合, 当月降雨量达到 100 mm 时, 塌陷开始发生(2011年4月), 月降雨量超过 200 mm 时, 塌陷数量陡增(2011年10月、2012年5月和9月)。

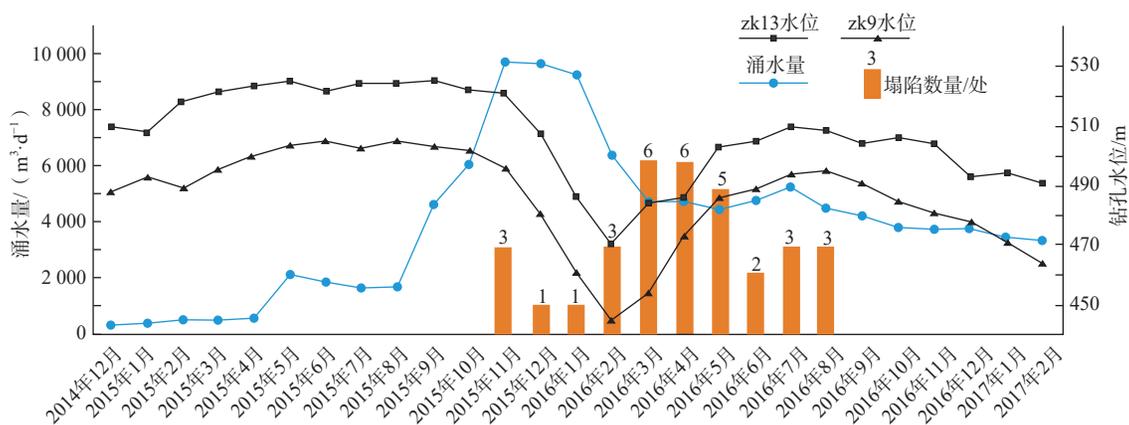


图 4 2014 年 12 月—2017 年 2 月歌马隧道涌水量-地下水水位-岩溶塌陷监测数据折线图 (井位见图 2)

Fig. 4 Line chart of water inflow - groundwater level - karst collapse monitoring data in the Xiema Tunnel from December 2014 to February 2017 (see Fig. 2 for drilling location)

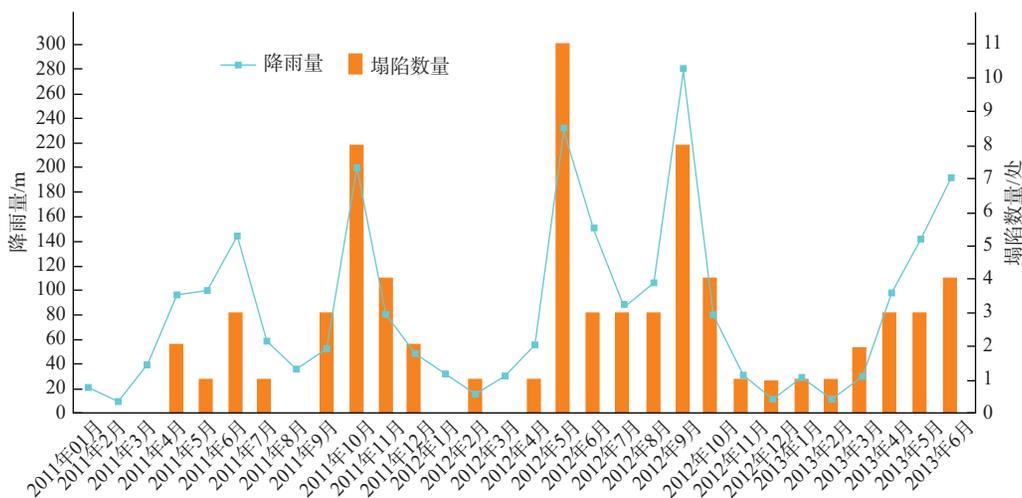


图 5 2011 年 1 月—2013 年 6 月歌乐山地区降雨量及地面塌陷统计图

Fig. 5 Rainfall and ground subsidence in the Gele Mountain area from January 2011 to June 2013

4 隧道工程诱发岩溶塌陷成因机理及演化过程

4.1 隧道工程诱发岩溶塌陷成因机理分析

歌乐山地区岩溶塌陷的形成,主要是隧道工程建设改变了地区局部水文地质环境,在其重建地下水环境过程中产生多类型的致塌作用诱发隧址区易塌地质结构塌陷。当隧道工程掘进破坏碳酸盐岩含水层段中-深部循环带时,往往引发岩溶含水层地下水大量漏失,导致隧址区地下水位迅速降低,造成地下水动态平衡被破坏,水力坡度增大、流速加快,地下水低势区逐渐向隧道拟合(图 6a-d)。地下水环境大幅变化导致岩溶洞缝系统中充填岩土体失去原有地下水的浮托力,叠加丰水期-枯水期地下水位波动对充填岩土体的潜蚀、冲蚀、软化以及真空吸蚀(负压)、气爆(正压)等多效应致塌作用下,原有浅表竖向管道中充

填土体逐渐失去土力学平衡,在地下水裹挟下充填土体和松散碎屑堆积物沿多级序的岩溶洞缝系统运移,后缘势必会形成临空塌陷空间(图 6b),黏土的性质覆盖层中通常会形成空腔型土洞(图 6c)。土洞内在拱顶拉张破坏和拱趾剪切破坏共同作用下,覆盖层内形成多条张性裂缝(图 6c),覆盖层稳定性进一步降低,土洞底部向下塌落而逐渐扩大。最终土洞顶板及以上土体整体向下塌落或整体发生运移,形成塌陷坑或已有塌陷的二次破坏(图 6d)。

4.2 隧道工程诱发岩溶塌陷演化过程讨论

歌乐山地区岩溶塌陷发育过程大致可分为 3 个发育阶段(图 7):孕育期、形成期、稳定期。

孕育期:研究区三叠系中-下统碳酸盐岩出露区在经历多期次岩溶发育史后,在槽谷地区发育了复杂的地下岩溶洞缝系统,多级次管道沿单/双侧岩溶槽谷或

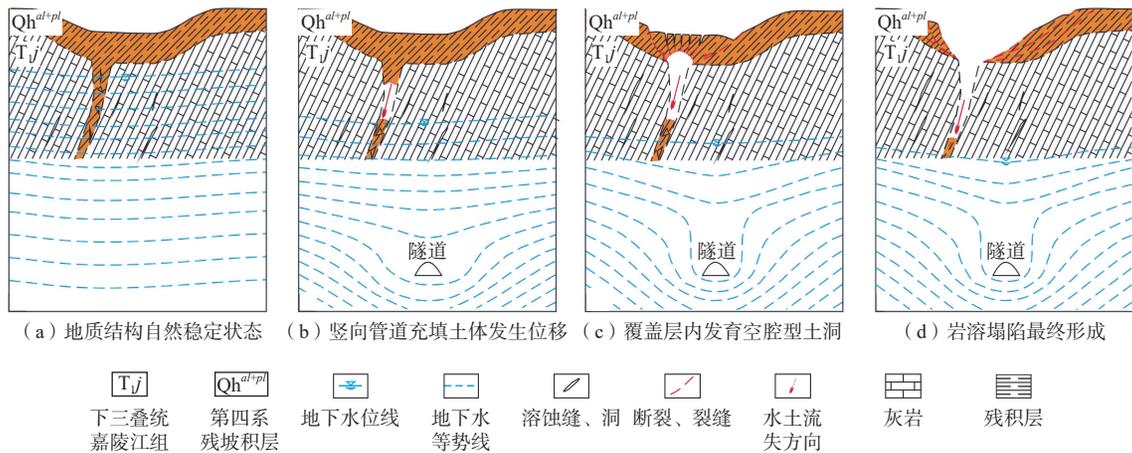


图 6 歌乐山地区岩溶塌坑陷形成过程示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of the formation process of karst collapses in the Gele Mountain area

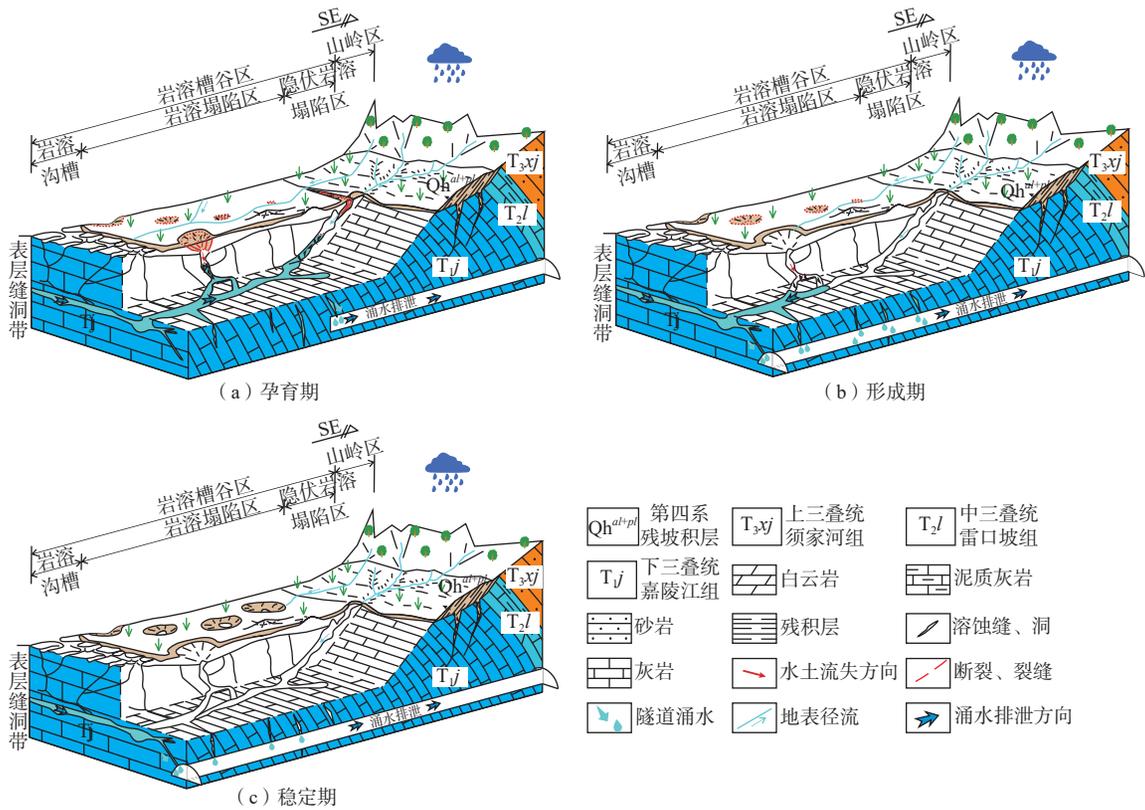


图 7 歌乐山地区隧道工程诱发岩溶塌陷概化模式图

Fig. 7 Conceptual models of karst collapses induced by tunnel engineering in the Gele Mountain area

横切沟谷发育, 提供了良好的空间发育条件。表层缝洞带中充填了大量随地表或地下径流运移来的第四系松散土体及少量砂砾, 形成了相对稳定的易塌地质结构。隧道工程建设势必会穿越碳酸盐岩含水层段, 当隧道工程沟通了断裂带裂隙、溶隙、管道缝洞系统时, 可造成突发性涌水、突泥, 地下水位突发性骤降, 充填土体受裹挟沿多级次岩溶管道发生位移或流失, 在表层缝洞带中形成土体运移、坍塌的空间。易塌地

质结构中覆盖层内向下渗流和重力对土体的拖拽力与颗粒之间的联合抗塌应力相抗衡, 在此期间拖拽力小于或等于抗塌应力, 覆盖层内发育多组张性环形裂隙, 中心向下坳陷, 底板局部发生脱落。

形成期: 为了保证隧道工程安全建设, 通常采取的引水排放措施, 导致隧址区地下水位持续下降, 形成以隧道为轴线向南北两侧扩展的地下水降落漏斗。在此期间地下水动力条件的大幅变化引发一系

列多效应致塌作用,覆盖层内拖拽力大于临界抗塌应力,导致底板持续向下脱落形成土洞;或是受软化作用软塑性、流塑性覆盖层与充填土体联合沿岩溶管道发生流动变形,顶部整体向下滑移形成直筒状坍塌。隧道工程开挖直至贯通,更多岩溶洞缝系统被揭露,地下水降落漏斗向两侧持续扩展,水力坡度进一步变陡、增大,漏斗中心局部地下水疏干,加剧了致塌作用强度与范围,造成土洞顶板大块剥落、崩塌,或是软塑性、流塑性盖层与充填土体联合远距离滑移,岩溶塌陷最终形成。隧道工程建成交付使用后至地下水环境达到新的动态平衡之前,地下水漏失、疏干仍在继续,新的岩溶塌陷向次级岩溶管道发散,同一岩溶洞缝系统中逐渐发展成塌陷群。

稳定期:在隧道工程运营到一定阶段之后,地下水排泄量随水势头减小而减小,地下水位只受季节性丰水期-枯水期波动影响,地下水降落漏斗不再扩大,地下水环境逐渐趋于新的动态平衡,塌陷群不再向外扩展,既有岩溶塌陷坑逐渐稳定不再扩大。该稳定期指既有隧道工程建设对地下水的疏排影响与区内地下水补、径、排条件所形成的水均衡状态,与未进行隧道工程建设之前比较,其稳定性相对较差。若研究区进行新的隧道工程建设,且不采取有效堵水措施,受多条隧道工程建设的叠加影响,区域内地下水环境的动态平衡将被再次破坏,其疏干程度和水位波动幅度将更为剧烈,更多的易塌地质结构将被激活,塌陷群逐渐向山岭斜坡、岩溶残丘区扩展,直至达到新的地下水环境动态平衡。

5 结论

通过对歌乐山地区隧道工程诱发岩溶塌陷进行系统性分析和成因机理研究,得到以下结论:

(1)研究区岩溶塌陷发育规律具有与隧道工程建设密度区域、岩溶发育区域及构造迹线耦合的规律。塌陷群受到隧道工程建设密度和地质环境背景联合控制,多发育在隧址区内宽阔岩溶洼地、沟槽或构造裂隙密集区。

(2)研究区易塌地质结构由岩溶槽谷区下伏多级岩溶洞缝系统和上覆第四纪松散土层组成,塌陷主要发育在粉质黏土分布区内,洞跨比大于 2 时塌陷发生可能性最大。致塌力主要来自隧道工程建设引发的水动力条件变化,大气降水是不同忽视的重要致塌因素。

(3)岩溶塌陷发育演化包括孕育-形成-稳定 3 个时期。孕育期:隧道工程建设初步揭露富水岩溶缝洞

系统,表层缝洞带内形成土体运移、坍塌的空间,覆盖层局部发生变形、脱落;形成期:隧道工程建设与运营通常采取引水排放措施,在引发的多效应致塌作用下岩溶塌陷最终形成;稳定期:隧道工程运营至一定阶段后,地下水环境逐渐趋于新的动态平衡,既有岩溶塌陷逐渐稳定,塌陷群不再向外扩展。

参考文献 (References) :

- [1] 张丽芬,曾夏生,姚运生,等.我国岩溶塌陷研究综述[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(3):126-130. [ZHANG Lifen, ZENG Xiasheng, YAO Yunsheng, et al. Review on Karst collapse in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(3): 126 - 130. (in Chinese with English abstract)]
- [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,1992,19(4):32-34. [KANG Yanren. Collapse—causing models in karstic collapse process[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1992, 19(4): 32 - 34. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王滨,贺可强,高宗军.岩溶塌陷发育的时空阶段性分析[J].水文地质工程地质,2001,28(5):24-27. [WANG Bin, HE Keqiang, GAO Zongjun. Temporal and spatial analysis of karst collapse development [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2001, 28(5): 24 - 27. (in Chinese with English abstract)]
- [4] BRUNO E, CALCATERRA D, PARISE M. Development and morphometry of sinkholes in coastal Plains of Apulia, southern Italy. Preliminary sinkhole susceptibility assessment[J]. Engineering Geology, 2008, 99(3/4): 198 - 209.
- [5] 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)]
- [6] 程星,黄润秋.岩溶塌陷的地质概念模型[J].水文地质工程地质,2002,29(6):30-34. [CHENG Xing, HUANG Runqiu. Geological conceptive modles of Karst collapse[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, 29(6): 30 - 34. (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] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张成平, 张顶立, 王梦恕, 等. 城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机制及其控制 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(增刊 1): 303 – 309. [ZHANG Chengping, ZHANG Dingli, WANG Mengshu, et al. Catastrophe mechanism and control technology of ground collapse induced by urban tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31 (Sup 1): 303 – 309. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 周长松, 邹胜章, 朱丹尼, 等. 广昆铁路复线秀宁隧道大皮坡一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)]
- [11] SONG K I, CHO G C, CHANG S B. Identification, remediation, and analysis of Karst sinkholes in the longest railroad tunnel in South Korea[J]. *Engineering Geology*, 2012, 135/136: 92 – 105.
- [12] 李喜, 殷坤龙, 陈标典, 等. 武汉白沙洲长江两岸岩溶塌陷易发性评价与地铁建设过程中的防治对策 [J]. *地质科技通报*, 2020, 39(6): 121 – 130. [LI Xi, YIN Kunlong, CHEN Biaodian, et al. Evaluation of susceptibility to Karst collapse on both sides of the Yangtze River in Baishazhou, Wuhan and preventive measures in the process of metro construction[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(6): 121 – 130. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 付开隆. 渝遂高速公路中梁山隧道岩溶塌陷及涌水量分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2005, 32(2): 107 – 110. [FU Kailong. An analysis of the Karst ground collapse and water yield of the Zhongliangshan Tunnel in the Yusui Expressway[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2005, 32(2): 107 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 胡婷. 重庆地区地下工程建设诱发岩溶塌陷的机制研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014. [HU Ting. Study on the mechanism of Karst collapse induced by underground engineering construction in Chongqing[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张海坦, 李庆华, 邓书金. 歌乐山岩溶地面塌陷发育特征 [J]. *中国岩溶*, 2015, 34(1): 58 – 63. [ZHANG Haitan, LI Qinghua, DENG Shujin. Development characters of Karst collapse in the Gele Mountain area[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(1): 58 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈洪凯, 王圣娟, 粟俊江, 等. 地下水降落诱发岩溶洞穴土质盖层塌陷的机制研究——以重庆歌乐山余家湾水库地面塌陷为例 [J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(4): 54 – 58. [CHEN Hongkai, WANG Shengjuan, SU Junjiang, et al. Study on mechanism of ground collapse in soil cover over Karst caves triggered by drop-down of underground water: Taking ground collapse at yujiawan reservoir in Mt. Gele of Chongqing city as an example[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2018, 35(4): 54 – 58. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 吴远斌, 殷仁朝, 雷明堂, 等. 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, et al. 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. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张银松, 曹聪, 康世海, 等. 重庆市中梁山地区隐伏塌陷特征及物探勘测的思路 [J]. *中国岩溶*, 2020, 39(6): 918 – 927. [ZHANG Yinsong, CAO Cong, KANG Shihai, et al. Characteristics of hidden Karst collapse in the Zhongliangshan area of Chongqing and an approach of geophysical surveys[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(6): 918 – 927. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农