

重庆市典型岩溶区隧道建设环境及工程负效应影响研究^{*}

魏兴萍^{1,2}, 代登维¹, 李良鑫³, 陈 艇^{1,2}

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院; 2. 重庆师范大学 山区生态系统碳循环与碳调控重庆市重点实验室, 重庆 401331;

3. 鲁甸县第一中学, 云南 鲁甸 657000)

摘要:受地形限制,重庆市境内隧道建成数量众多且分布密集,在岩溶区因隧道修建产生了一系列环境和工程负效应问题。结合重庆市岩溶区的地质背景和地下水化学特征,系统梳理了该区域内隧道建设环境和工程负效应,包括诱发岩溶塌陷、导致水体疏干漏失、影响植被生长与分布、降低土壤质量和引起土壤污染、改变地下水热格局、诱发隧道涌水涌泥、引发围岩坍塌与结构毁损等。在此基础上,指出了未来研究的总体趋势和方向:1) 加强对隧道影响岩溶地基稳定性的机制的研究及评估;2) 加强水体转换过程与疏干影响范围认定与保护研究;3) 加强土壤、植被对隧道建设的响应过程与机制的研究;4) 化“单一”为整体,衔接岩溶隧道区“双评价”。

关键词:重庆市;岩溶;负效应;隧道建设

中图分类号:X141

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2025)05-0070-14

重庆市出露碳酸盐岩分布广泛、岩溶发育强烈,为典型的生态脆弱区^[1-2]。广泛发育的岩溶地质背景给重庆市隧道工程建设带来了极大的挑战和风险。岩溶发育强烈且地址条件复杂、存在深大断裂带和地下水丰富的区域,在隧道修建过程中极易发生地面沉降、地下水位下降、土壤污染、生态系统破坏等环境和工程负效应。研究表明,岩溶隧址区因特殊岩性所致的突水灾害发生率接近 80%^[3]。鉴于重庆市隧道工程诱发次生灾害问题凸显,研究者们已在岩溶区隧道建设的地表地下水环境、地质条件与隧道的耦合关系等方面开展了大量研究;但诸如隧道建设对当地土壤和植被影响的这类环境问题的研究目前仍然缺乏系统性总结;为此本文系统梳理了重庆市岩溶区隧道建设中的环境问题特征、规律和机制机理,进一步明确当前研究中亟待深化研究的问题与未来探索方向,以期加深对重庆岩溶隧道工程引起的环境和工程负效应影响的认识、提升重庆岩溶区隧道设计施工水平以及科学应对隧道建设产生的不利影响提供参考。

1 研究区概况

重庆市境内岩溶区(含碎屑岩夹碳酸盐岩)总面积约 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占重庆市幅员面积的 36.49%,主要分布在渝东北地区、渝东南地区和重庆市中心城区所在的川东平行岭谷区(图 1)。重庆市气候湿润温和,干湿季分明,当年 4 月至 10 月为雨季、11 月至次年 3 月为旱季。重庆市境内水系以过境河流长江为骨干,水系呈网状发育。在地势构造上,重庆市地跨扬子准地台和秦岭地槽褶皱系这 2 个大构造单元,市内区域分属川东褶皱带、川东南陷褶带、川中台拱和大巴山弧形断褶带^[4]。重庆市地层出露涵盖从前震旦系至第四系的各地质时期,灰岩、泥岩、粉砂岩、白云岩及岩溶角砾岩分布广泛,具有溶蚀性发育的碳酸盐岩类最厚可超过 1 500 m;区域内发育有渝中槽谷型、渝东南峡谷型、渝东北层状构造等 3 个大的岩溶区。受构造和岩性控制,重庆市地貌景观与构造线大致吻合;大面积的隔档式构造山地使得当地在城市发展中需要进行大量隧道工程建设。据不完全统计,重庆市仅建成的公路隧道就达到 757 座,其中特长隧道 67 座、长隧道 181 座^[5]。同时,这些隧道的建设密度与市内各区域的经济发展水平和地形紧密相关,隧道密集区域主要集中在重庆市中心城区、渝东南和渝东北地区的构造带区域(图 1)。

重庆市中心城区及渝东地区水化学类型较为复杂,出现了 $\text{Ca} \cdot \text{Na-HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型、 $\text{Ca} \cdot \text{SO}_4\text{-HCO}_3$ 型、

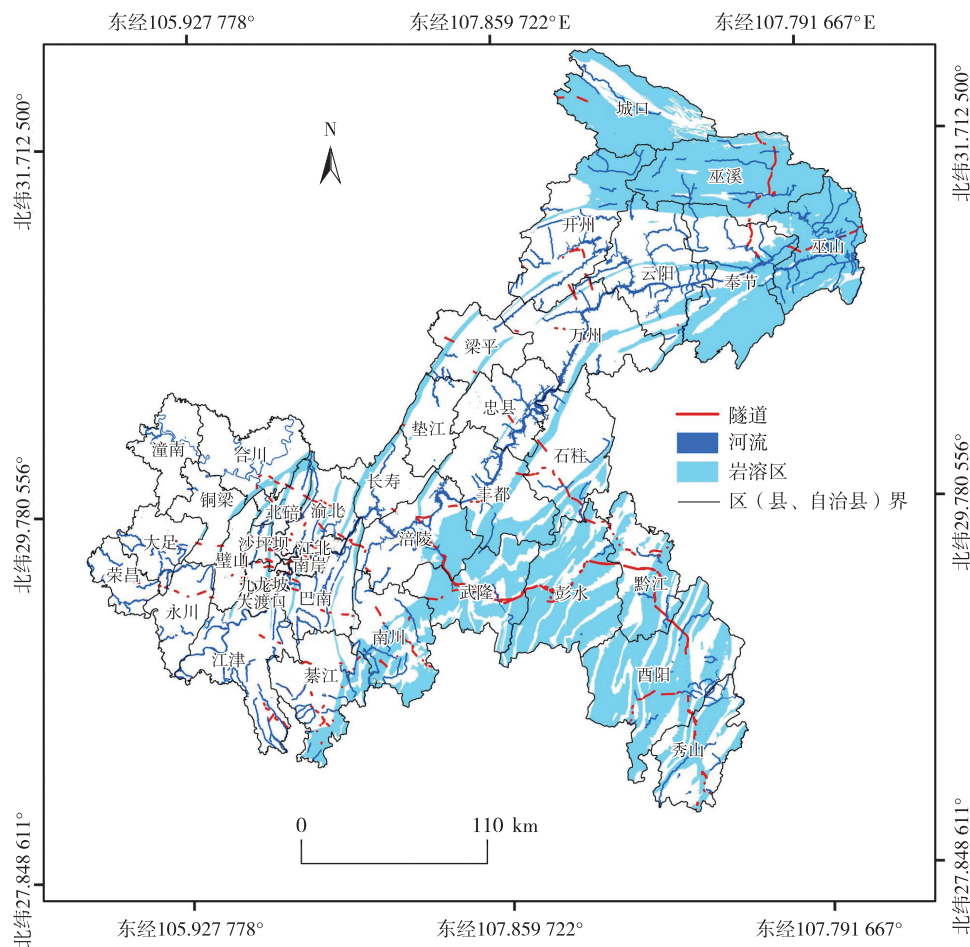
^{*} 收稿日期:2025-01-09 修回日期:2025-09-01 网络出版时间:2025-11-05T10:57

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 42377081);重庆市自然科学基金项目(No. CSTB2025NSCO-GPX1023)

第一作者简介:魏兴萍,女,教授,博士,研究方向为土壤侵蚀与水土保持,E-mail: xingpingwei@126.com

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20251105.1000.002>

$\text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ 等多种类型^[6]。通过对成渝中线观音峡背斜(图 2)东西两翼及翼缘砂岩、页岩及泥岩等碎屑岩地层、背斜核部及东西槽谷灰岩地层布设钻孔以及水样提取监测,结合新建成渝中线铁路岩溶隧道水文地质实际物探结果^[7],冯瑞胜等人^[8]的研究和重庆岩溶区不同区域 13 条下穿隧道 8 种主要离子浓度特征(图 3)进行分析,发现重庆岩溶区地表水和地下水均富含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- ,水化学类型以钙镁型为主。



注:底图来源于重庆市标准地图服务网站(<https://yuditu.com/bzdt/>),审图号:渝 S(2024) 058 号,下同。

图 1 重庆市碳酸盐岩及隧道分布

Fig. 1 Distribution of carbonate rock and tunnel in Chongqing Municipality

地下水的径流方式分为岩溶管道径流和岩溶裂隙径流。重庆市内的山体因顶部砂岩受背斜张力及风化剥蚀作用影响,逐渐剥露下伏碳酸盐岩;在化学溶蚀作用下,形成典型的岩溶槽谷地貌。此类地貌在接受大气降水补给后,水体可沿槽谷区内裂隙、溶洞、落水洞、竖井等通道下渗并补给地下水系统,使得岩溶槽谷区拥有丰富的地下水资源。然而,当道路工程建设穿越此类山体时,上述地貌特征往往给隧道施工及运营安全带来不利影响。

在整个研究区内,位于川东平行岭谷区的重庆市中心城区境内 4 个大的核心山脉自西向东分别为缙云山、中梁山、铜锣山和明月山,因此这一区域也被称为“四山”地区,区域地貌则属于典型的岩溶槽谷地貌。重庆市中心城区的经济开发活动强度明显高于研究区内其他区域,而此区域内隧道建设活动在研究区内也最为频繁(图 4)。

2 隧道建设引起的环境负效应

2.1 诱发岩溶塌陷

重庆市内特别是渝东南、渝东北地区层峦的地貌类型提升了岩溶塌陷发生的概率。因隧道工程建设的开展,华蓥山及支系、铜锣山、明月山、南山等隧址区均发生过岩溶塌陷^[9];而“四山”地区隧道建设引起的塌陷就超过 400 处^[7](表 1),塌陷类型以中小型塌陷为主,多数为近圆形或椭圆形。

重庆市发育背斜、向斜构造超过 109 个,隧道修建密度高。隧道工程施工掏空内部岩层,导致大量地下水沿

着隧道破裂面涌出,引起水位下降,打破原有的地下水环境平衡,触发岩溶塌陷(表 2)。按照致塌作用可将这些塌陷分为潜蚀、真空吸蚀、岩溶管道水气压力突变等^[10]。吴远斌等人^[11]依据塌陷发生的条件和机理将隧道工程影响下岩溶塌陷形成演化模式分为疏干初期突涌型岩溶塌陷、疏干后期降雨型岩溶塌陷及其他不同种类塌陷模式,然后基于隧道岩溶塌陷问题提出了针对性防治对策。

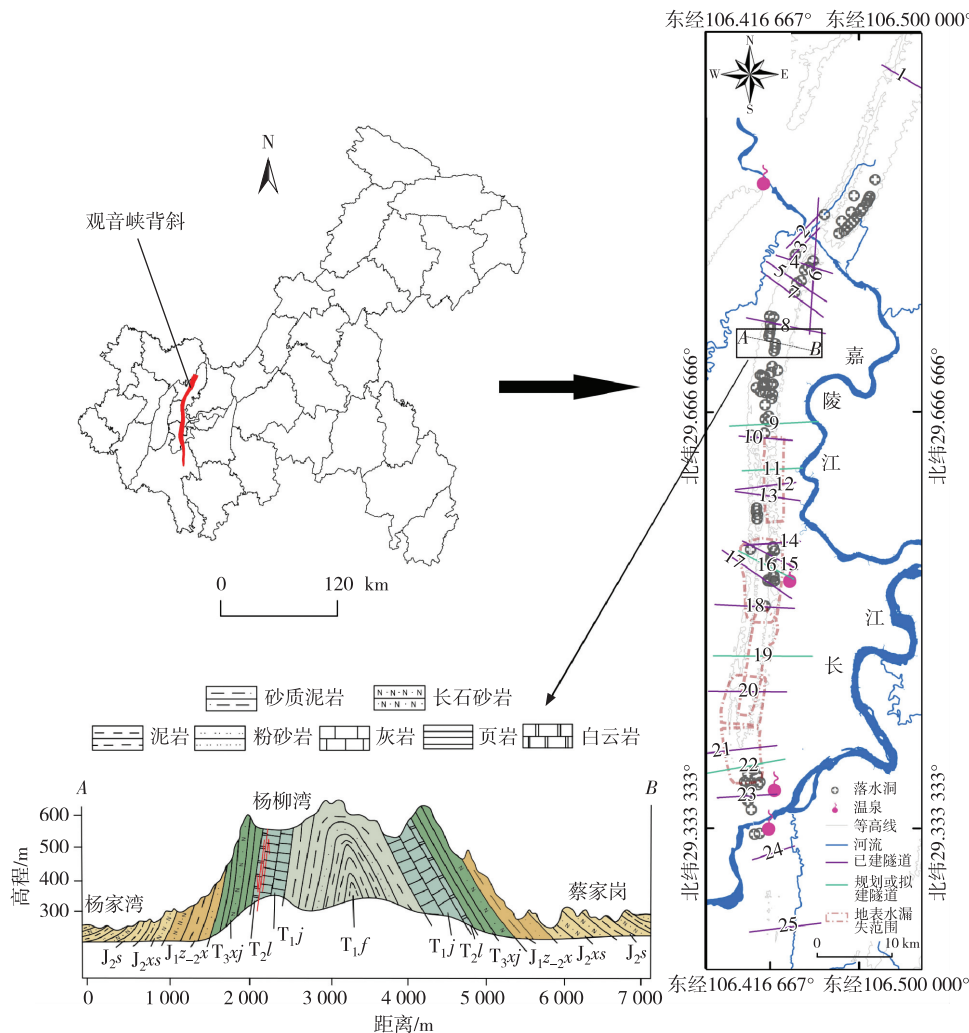


图 2 观音峡背斜位置、剖面图及隧道分布示意图

Fig. 2 The sketch map of the location, profile and tunnel distribution of Guanyinxia anticline

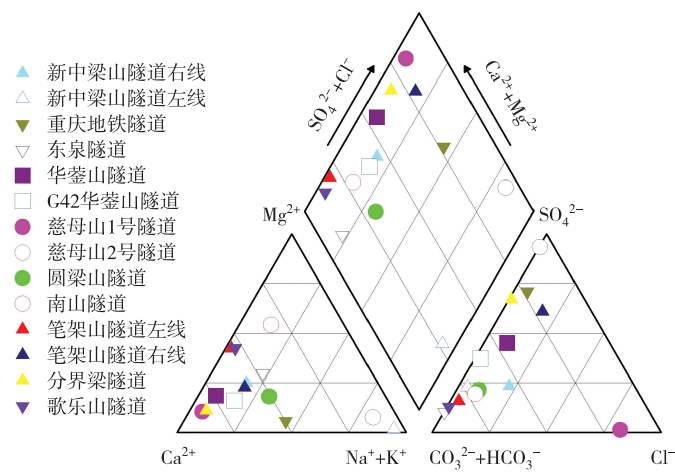


图 3 重庆市岩溶隧道区地下水化学类型 Piper 图

Fig. 3 Piper diagram of groundwater chemical type in karst tunnels of Chongqing Municipality

2.2 导致水体疏干漏失

在重庆市岩溶隧址区,隧道工程对于地下水的疏干作用尤为明显;中等、大量和特大涌水量岩溶隧道在全市隧道中则占据了较高的比例,如秀山隧道、歇马隧道、武隆隧道、中梁山隧道等隧道在进行开挖作业时均无一例外的出现涌水现象。部分隧址区泉、井点消失严重,甚至引发地表水体漏失,耕地开裂。早期隧道建设采取以排为主或以堵为主或限量排放的措施,致使地表与地下水沿岩石裂隙、地下暗河、导水性通道和隧道面大量流失,隧道建设影响范围(多集中在6 km以内)的水域、泉点大量疏干,含水岩层水分流失甚至干涸,地下水位降低。

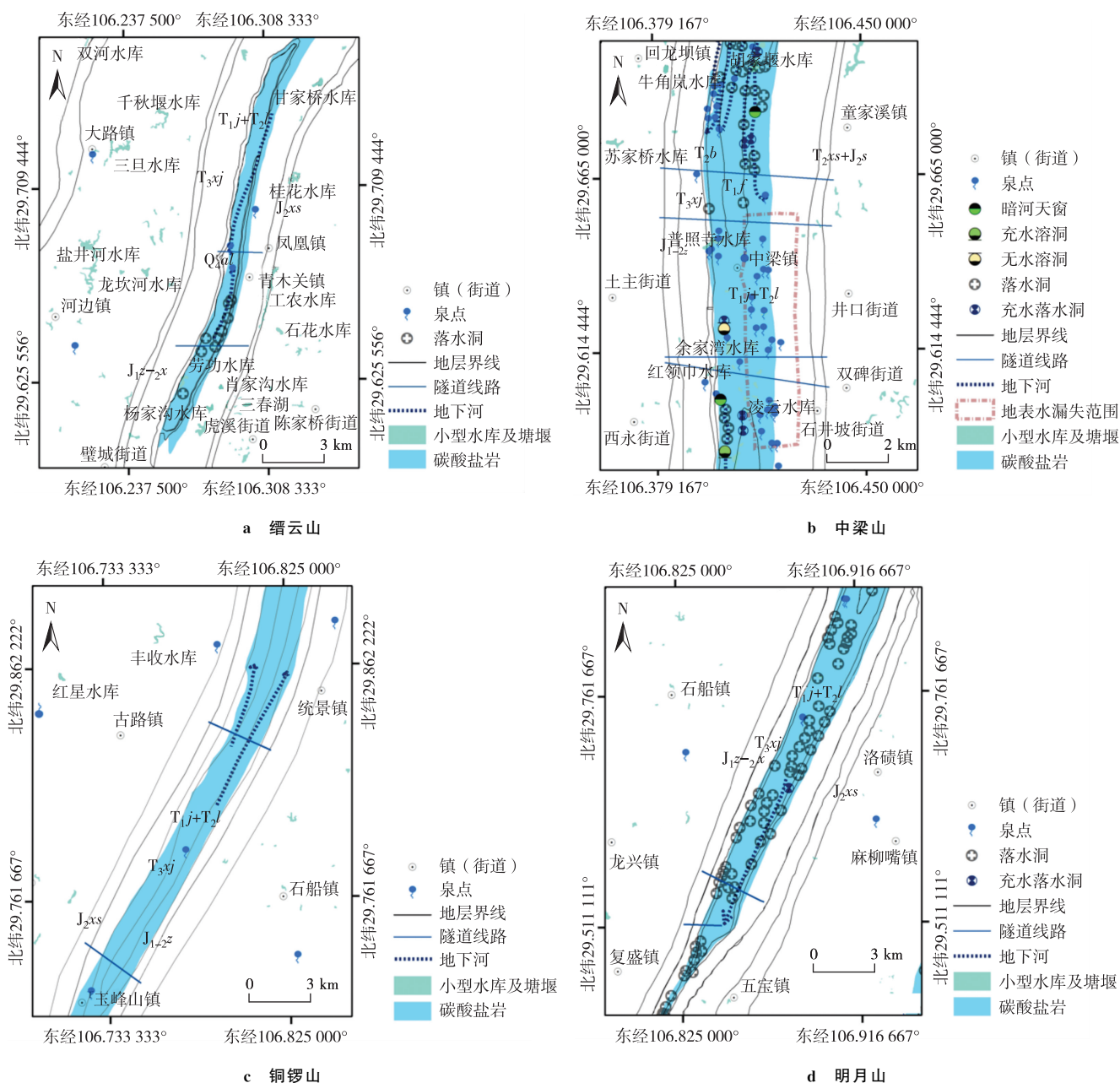


图4 重庆市“四山”隧址区碳酸盐岩地层分布及岩溶发育现象

Fig. 4 The distribution of carbonate rock strata and the phenomenon of karst development in the ‘Sishan’ tunnel site area of Chongqing Municipality

当隧道工程位于地下水位以下并穿过含水层时,易形成漏斗状水位降落中心,进而引发水体疏干,使得地下空腔扩大,诱发地表塌陷,从而形成塌陷漏斗(图5)。地下储水空间因缺乏水体的支撑作用而萎缩,周围岩体在重力作用下将部分地表碎屑及疏干通道充填物质卷携带走形成地下空腔,漏斗发育陷落区域四周向漏失中心呈梯度下降,加剧隧址影响岩溶发育区域内塌陷的状况。

表 1 重庆市“四山”地区地面塌陷主要分布情况

Tab. 1 The main distribution of ‘Sishan’ area ground collapse in Chongqing Municipality

区域名称	“四山”地区岩溶主要分布地层	塌陷数量/处	已建隧道/条	在建和规划隧道/条	影响面积/km ²
中梁山地区	$J_2s、J_2x、J_{1-2}z、T_1j、T_1f、P_2c、P_2l、P_1m$	59	19	16	795
缙云山地区		308	9	4	320
明月山地区			8	6	798
铜锣山地区		57	16	11	463

注:表中数据来源于文献[7]。

表 2 隧道水位骤降与塌陷情况

Tab. 2 Water level drop and collapse of tunnel

隧道修建情况	隧道大规模突水导致水位骤降时间	塌陷情况
襄渝铁路中梁山隧道	1971 年 10 月	地面塌陷 29 处,塌陷面积共计 2 139 m ² ;塌陷坑中深度最大的可达 13 m,面积最大的可达 400 m ² ;塌陷影响面积为 3~3.5 km ² ,塌陷坑分布区域的总面积约 14 km ² [12]。
双碑隧道	2012 年 3 月	顶部轴线两侧各 1.5 km 范围内分布 4 个塌陷区,其中龙塘坎、凌云水库塌陷区施工后,相继出现多处塌陷[13]。
南山隧道	2013 年 3 月	上部涂山湖底地面局部塌陷,并伴随新的塌陷坑出现[14]。
歇马隧道	2015 年 11 月	水位骤降,塌陷 20 余处[15]。
土主隧道	2017 年 9 月	塌陷坑均匀分布渝隧道轴线 500 m 范围内,44.9%的塌陷坑位于轴线 100 m 范围内[16]。

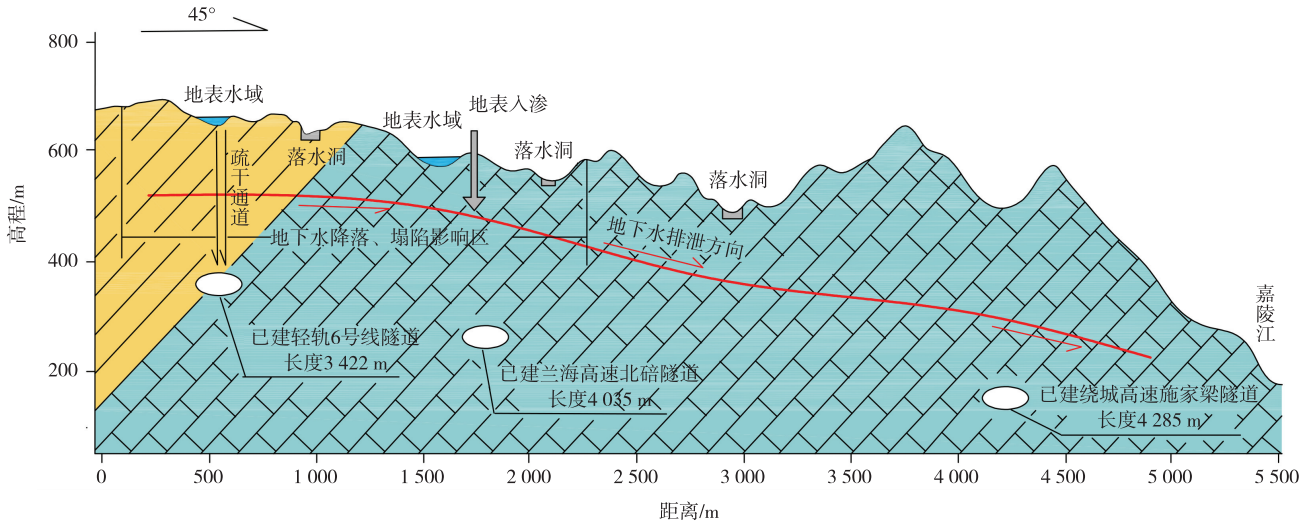


图 5 观音峡背斜嘉陵江段水文地质断面隧道疏干示意图

Fig. 5 Drainage diagram of hydrogeological section tunnel in Jialing River section of Guanyinxia anticline

在地下水位降幅较大的区域,地表水沿岩石裂隙向下漏失,使得地面水域面积进一步减少,在漏失较为严重的区域形成干涸水库。大量的隧道排水致使地下水位下降深度增加,使得疏干面积进一步增加,诱发地质灾害,导致地表水流量减少甚至干枯,严重影响周围居民生产、生活。

2.3 影响植被生长与分布

目前,针对隧道建设对植被影响的研究相对匮乏,已有研究主要聚焦在隧道建设区域内植被生长差异、植物水分利用变化等方面。以重庆市岩溶隧址区为例,该类区域易发育地表、地下双层水系统[17]且土壤保水性差,在

进行隧道建设后易出现地下水严重漏失等问题,进而对土壤理化特征和微生态环境造成不良影响。在同一时间节点下,隧道影响区域的土壤含水率^[18]、物种丰度与无隧道影响区域均存在明显差异。有研究指出,相较于隧道影响区域,无隧道影响区域的物种丰度 Sobs 指数、多样性 Shannon 指数分别下降了 22.92% 和 9.6%^[19]。

岩溶隧址区内隧道施工带来的水体漏失问题致使地表存水面积减少,地表土壤层含水量下降、pH 升高且营养成分减少,从而改变了当地植物对水分的利用策略,即植物通过关闭叶片气孔、延长根系至深层土壤来吸收、利用地下水。吴超等人^[20]通过对植物瞬时水分利用效率和土壤含水量的相关性研究发现,相比无隧道影响区域,隧道影响区域的植物瞬时水分利用效率对土壤含水量的变化更加敏感,受季节变化影响更加明显。

同时,有研究发现,某隧道内植物种子约有 32.3% 的种类原本并不生活在隧道入口附近,隧道入口处 100 m 范围内种子的来源对隧道内种子的丰富度及种类组成没有重要影响^[21]。隧道建成通车为植物种子迁移提供了载体,植物随之迁移,物种入侵形成了植被分布差异,并改变了生物多样性^[22]。

综上所述,隧道影响区域因地下水位降低和水分流失形成了土壤含水率差异化格局,改变了土壤特性,进而影响到植物的水分利用策略、生长速率和生长分布空间,区域内的植被覆盖度也因此发生变化。同时,隧道内通行车辆为植物种子迁移提供了载体,改变了隧道影响区域的生物多样性,并带来物种入侵问题。

2.4 降低土壤质量和引起土壤污染

隧道修建过程中未及时处理的弃渣和废水是造成土壤质量下降和污染的根源。大量废渣占用土地资源、破坏地表植被;同时废水废渣中的有害物质随雨水向下运移,造成土壤大范围污染。隧道工程建设亦导致土壤流失,土壤成分、CO₂ 浓度、理化特征等发生改变。此外,物种丰度差异也证实了隧道工程建设影响了土壤生物及生物活性,降低了土壤质量^[21-24]。

对重庆市歌乐山隧址区土壤进行取样调查,结果发现其中主要污染物包括 Pb、Cr、Zn、Cd、TNT、石油类、NO₃⁻、NO₂⁻ 等,且存在复合污染的可能;污染物主要积累在土壤表层,随着土壤深度的增加,土壤中污染物含量逐渐降低^[3]。此外,隧道施工废水中也易含油类、悬浮物等污染物质^[23-24]。与此同时,现有的表土掩埋处理方式也使得隧道工程建设中产生的有害物质易在雨水的冲刷和搬运下大量从土壤中流出,从而进一步扩大了污染范围。

总之,在隧道修建过程中,对工程废渣与废水的不规范处置,会扰动岩溶隧址区地下水循环,改变土壤的机械组成与养分状况,这是引起土壤质量退化和污染的主要原因。

2.5 改变地下水热格局

溶隙及岩溶管道发育,岩溶含水介质常表现为地表、地下的二元结构,从而加强了地表与地下水的联系,促进雨水、地表水和地下水的迅速转化^[25-27]。地下水通常由相对较高的补给区流向相对较低排泄区,并在一定区域范围内产生富集^[28]。但隧道工程破坏了原有的地下储存点和运移通道,使地下水重新分配,造成原本的地下水循环系统以及与之联系的外界水循环系统失衡,改变了岩溶隧址区地表、地下水的水循环过程和水资源分布格局。

当隧道揭穿含水层时,会改变岩溶隧址区的水动力条件、地下径流模式并形成以隧道为中心的地下水降落区,加速地下水向降落区汇集的过程,致使地下水位迅速下降^[29]。岩溶地貌的岩石透水性和管道裂隙为地下水的流动提供有利条件,而隧道工程施工中的地下水排放又进一步加速了碳酸盐岩的溶蚀和损伤,隧址区岩石透水性因此变得更强。此外,岩溶隧址区的岩层走向、地势起伏、落水洞、洼地漏斗、地下暗河、溶泉等方面的因素也能加快地表水的汇集和下渗,提高了隧址区内的水循环速度。

渝中地区背斜槽谷区可溶岩多顺轴向呈带状展布^[30],渝东北、渝东南地区山脉相间分布,形成良好集水区间。双碑隧道^[31]、成渝客专铁路歌乐山隧道^[32-33]、中梁山隧道^[34]、华福隧道^[35]、武隆隧道^[36]、华莹山隧道^[37]等隧道在修建时均出现不同程度的井泉点消失、地表水体流量减小或断流、水位下降等现象^[38-39],水体原来的分布格局发生了改变。

在重庆市境内,已查明 26 处天然温泉、16 处坑道温泉和 64 处钻井温泉,它们多分布于高隆起背斜轴部、两翼及倾末端^[40-42]。在隧道密集分布的重庆市中心城区,地热水资源储量达 $3.4275 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[43]。由图 6 可见,大量隧址区紧临地热资源分布区,隧道修建时穿越热储层,扰动地下河流系统,引起水土流失,并不可避免地对地热资源的储藏及分布造成影响。根据已有的中梁山隧道监测资料可知,因部分隧道修建造成的地热水疏干约 $25\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,疏干地热水水温为 36~40℃,致使梨树湾地热井的水量由 $6\,400 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 锐减至 $3\,800 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,水头由 2.2 MPa 下降到 0.88 MPa,地热资源遭到破坏^[44]。

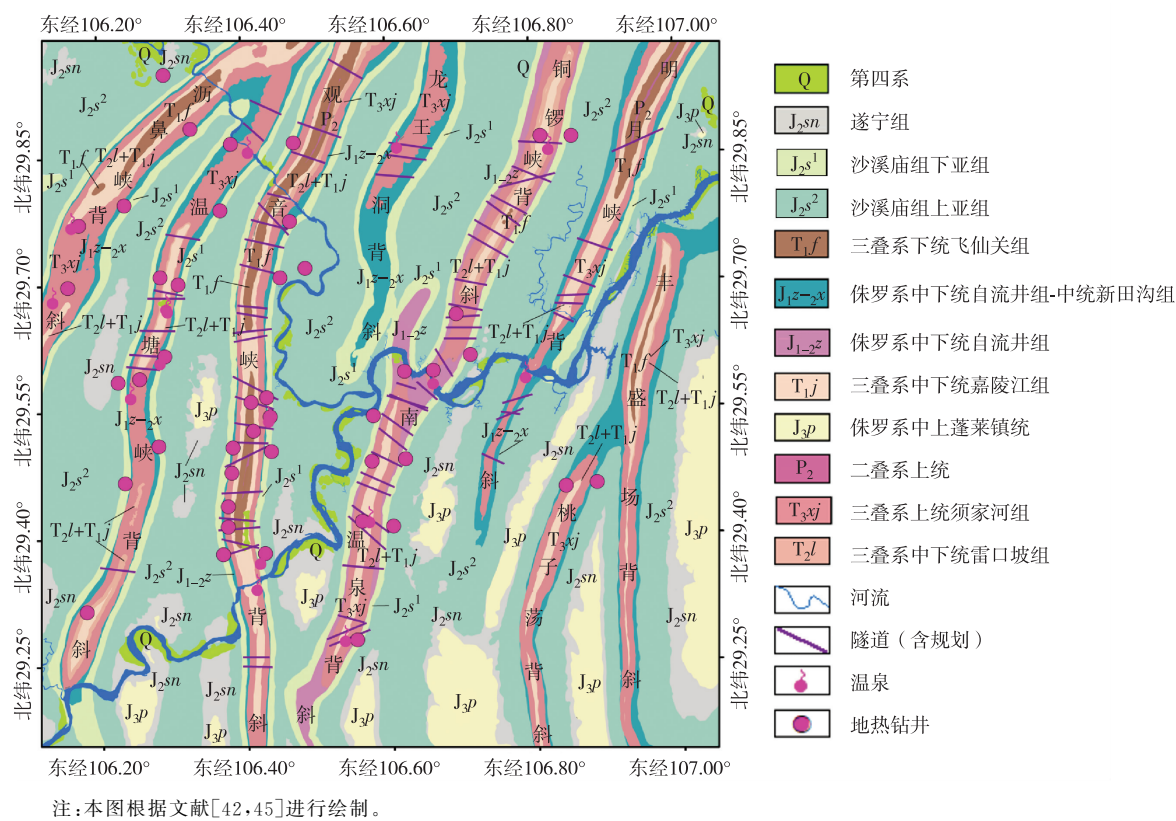


图 6 重庆市地热与隧道分布图

Fig. 6 Distribution map of geothermal resources and tunnel in Chongqing Municipality

3 隧道建设引起的工程负效应

3.1 诱发隧道涌水涌泥

涌突灾害是隧道修建过程中常见的地质灾害。在施工作业揭穿含水构造体、裂隙和导水通道时,易诱发涌突灾害^[46]。据不完全统计,全球范围内隧道日涌水量超过 $1\times 10^4\text{ m}^3$ 的大型涌突水事件有70%都发生在岩溶隧道中^[47]。在重庆市,充沛的降水为当地提供水源的同时,也提升了围岩含水层饱和指数。从地质构造上来看,重庆市中心城区的复式岩溶槽谷体系以及渝东南、渝东北地区岭谷交错的岩溶地貌有利于地下水的汇集和补给。水源和地质构造双重叠加为涌突灾害的发生提供了充足的补给水源。

重庆已建高速公路与铁路工程区域中,岩溶隧道数量庞大且占比较高。据统计,这些隧道埋深大多为200~500 m,少部分超过1 000 m^[48]。区域内隧道具有长度大,埋藏浅、分布密集的特点^[49],加上相邻隧道的排水效应,导致岩溶隧道涌突灾害发生频率居高不下。以观音峡背斜长江至嘉陵江段隧道群为例,隧道的最小间距仅60 m,平均间距仅为3.7 km^[10];另据不完全统计,在重庆市境内长度大于1 000 m的隧道中,长度超过3 000 m的特长隧道占比超过82.5%。密集的隧道布局与大规模的隧道建设共同作用于此区域复杂的岩溶地质条件之上,使得水文地质灾害特别是涌水成为了隧道工程中备受关注的核心风险。为进一步量化这一风险,表3统计了重庆市“四山”地区主要岩溶隧道的涌水量情况,从中可以看出岩溶隧道涌水具有“量级差异”与“工程普遍性”的特征。因此,在岩溶隧道施工时不仅须注意施工工程安全,同时也要注意隧道涌水将打破隧道周边地下水位平衡,由此易诱发地表沉降、塌陷等地质灾害,并造成周边水体污染。

从岩性来看,涌突水多集中于灰岩、白云岩、白云质和泥质灰岩、砂岩等地层。在隧道施工作业穿越松散堆积层孔隙水含水岩组、碎屑岩孔隙裂隙层间水含水岩组、基岩裂隙水含水岩组和碳酸盐类岩溶水等含水岩组时,易引发以下3类致灾机制:1) 岩溶管道系统贯通;2) 断层带导水结构激活;3) 原生地下水通道揭露。上述机制将引起地下水在重力梯度驱动下携泥砂向隧洞排泄,最终诱发涌水涌泥灾害^[1]。

表 3 岩溶隧道涌水量统计
Tab. 3 Statistics of karst tunnel water inflow

隧道名称	长度/m	显著涌水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	数据来源
襄渝铁路中梁山隧道	3 985	54 104	文献[31]
渝怀铁路歌乐山隧道	4 050	52 999	文献[31]
渝遂高速公路大学城隧道	3 880	9 000	文献[31]
双碑隧道	4 375	27 186	文献[31]
绕城高速施家梁隧道	4 285	8 700	文献[31]
轻轨一号线歌乐山隧道	4 330	27 669	文献[31,50]
兰海高速北碚隧道	4 035	1 452	文献[51]
轻轨 6 号线北碚隧道	4 322	1 761	文献[51]
真武山隧道	5 860	7 128	文献[51]
南山隧道	2 820	12 722	文献[52]
慈母山隧道	8 280	9 040	文献[52]
铜锣山隧道	5 630	7 263	文献[52]
成渝客专歌乐山隧道	4 124	56 860	文献[52]
渝遂高速公路中梁山隧道	3 841	32 500	文献[33]
歇马隧道	4 200	7 509	文献[12]
成渝高速公路中梁山隧道	3 160	8 668	文献[52]
华蓥山隧道	4 700	345 600	文献[53]
华岩隧道	4 510	26 391	文献[54]
明月山隧道	6 557	180 000	文献[55]
通渝隧道	4 279	120 000	文献[56]
圆梁山隧道	11 068	4 800 000	文献[56]
彭水隧道	9 028	360 000	文献[56]
长函子隧道	3 851	48 000	文献[56]
桐子林隧道	2 511	3 280 000	文献[56]
走马岭隧道	2 469	15 000	文献[56]
天池隧道	2 900	61 689	文献[56]
赚宝隧道	1 255	4 320	文献[57]
羊鹿山隧道	6 015	27 564	文献[57]
春天门隧道	6 476	13 100	文献[57]
渝怀铁路武隆隧道	9 426	7 180 000	文献[57]
秀山隧道	3 431	400 000	文献[37]
中兴隧道	6 095	200 000	文献[58]
云雾山隧道	6 682	20 300	文献[58]
别岩槽隧道	3 721	3 150	文献[59]
新屋基隧道	6 002	30 000	文献[60]

注:为统一对比,将所有文献中涌水量计量单位均换算为 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

3.2 引发围岩坍塌和结构损毁

围岩坍塌和结构损毁在影响隧道稳定性的同时也直接影响隧道安全。隧道开挖前,岩体处于一定的应力平衡状态,而开挖作业会使洞室周围的岩体发生卸荷回弹和应力重新分布;若隧道周围岩体应力状态的变化大或岩体强度低,则可能导致围岩在回弹应力和重分布应力的作用下丧失稳定性,发生围岩大变形,甚至坍塌,进而损毁支护结构,直接影响隧道的施工进度并危及施工人员的安全^[61]。岩石的物理力学特性、岩体结构和围岩应力集中程度是影响围岩稳定性的主要因素。当隧道穿越软弱岩体、断层及破裂带、软硬岩交界处等不良地质构造时,围岩更易失稳^[61]。此外,隧址区的溶洞也会导致围岩的力学性质发生变化,易造成应力过度集中,由此造成隧道周围岩体变形量增加,乃至发生坍塌、掉块^[62]。

从岩性方面来看,在软弱岩分布区,断层和裂隙为岩溶区地下水的渗透提供了良好的通道,隧址区的渗透水压力因此增加,围岩强度降低;在富水的情况下,这些断层破碎带中极度软弱破碎的围岩甚至会软化、泥化,增加了隧道修建过程中发生塌方、突水的概率^[63-64]。在硬岩分布区,高地应力下硬岩的力学行为和岩体自身复杂的地质结构同样会使得在开挖隧道的过程中出现围岩坍塌的状况^[65]。王思敬等人^[66]从破坏机制和地质结构的角度出发,将地下工程脆性围岩的破坏分为脆性破裂、块体滑动和塌落、层体弯折和拱曲、松动解脱等类型。而在深埋隧道中,高地应力下的高强度硬脆性岩体聚集了大量的应变能,岩爆也因此成为了深埋硬岩隧道开挖过程中最需要被关注的问题^[65]。重庆市地跨扬子准地台和秦岭褶皱系,构造运动较为活跃,地应力条件复杂,岩爆现象较为常见^[4,64-66]。以通渝隧道为例,自 2002 年 5 月 28 日开工建设至 2003 年 11 月 24 日隧道贯通期间,通渝隧道施工中先后共发生了近 100 次烈度不等的岩爆现象;集中发生岩爆的围岩洞段共有 8 段,岩爆区岩性主要为中-厚层灰岩、鲕状灰岩和燧石灰岩,等级以轻微岩爆为主^[67]。

4 结论与展望

加强岩溶隧道建设环境和工程负效应研究对重庆市经济建设和生态环境保护具有积极作用。隧道工程自身隐患、工程扰动、施工者环保意识缺位,加之岩溶隧址区本身的脆弱性,给重庆市岩溶区隧道水文生态环境带来巨大影响,尤其是重庆市中心城区等隧道建设密集区,所面临的挑战更为巨大。岩溶环境的复杂性、不稳定性 and 隧道建设造成的地下水环境失衡,影响或改变了地下水分布空间格局,这是诱发塌陷、疏干、破坏地热等次生问题的首要原因。因此,需要重点关注岩溶隧址区的水环境生态平衡与保护。此外,考虑到重庆市岩溶隧址区独特的地表、地下二元结构以及区域内隧道建设引起的环境问题通常产生连锁效应,故而对岩溶隧址区的环境问题与保护进行研究时需更多考虑将地表和地下视为一个整体。为了分析隧道建设产生的影响,众多学者开展了一系列研究并取得了一定成果;然而已有研究主要停留在隧道建设与生态环境的耦合、影响形式、地表生境的变化上,在有关隧道建设中土壤理化性质演变、植被演替及变化过程、岩溶地基破坏、影响范围认定与保护等方面的研究还比较薄弱。因此,未来可以考虑从以下几个方面加强相关研究:

1) 隧道影响岩溶地基稳定性机制的研究及评估。隧道修建通过含水岩层时极易影响地下水流场、水动力过程,易对溶蚀、渗流产生影响。隧道建设对岩溶地基的扰动关注较少,今后的研究需要在强化前期物探与模拟的基础上,继续探索隧道建设对地基破坏的程度以及对地基稳定性的影响。

2) 水体转换过程与疏干影响范围认定与保护。隧道建设对水环境影响是不可逆的。重庆市岩溶隧址区水环境对隧道建设工程响应十分敏感,尤其是在背斜槽谷区域。建议基于长期水文地质现场监测,结合资料分析,通过数值模拟与试验,分析隧道对区域地下水环境影响的范围,提前做好保护工作;在今后的研究中结合工程技术在隧道规划实施中提前探明地下环境,界定隧道疏干影响范围。

3) 土壤、植被对隧道建设的响应过程与机制。目前的研究认为隧道排水、土壤水体流失变干和隧道建设产生的弃渣废水是导致区域土壤质量降低的原因^[21-24],然而这一结论还有待进一步确认。同位素、树木年轮生长变化是目前研究重庆岩溶隧址区植被响应机制常用的方法,有研究指出地下水环境变化影响了植物生长时吸收水份的策略与效率,从而影响区域内植被生长^[20];但隧道建设对地表植被和土壤的影响机理与程度仍需要进一步探索。

4) 化“单一”为整体,衔接岩溶隧址区“双评价”。岩溶区隧道建设产生的环境以及工程负效应是一个连锁反应的过程。地下水的变化在隧道建设影响土壤、植被的过程中扮演了“中间者”的角色。隧道排水引起地表地下水体疏干、地下水位降低,改变地下水热格局,影响地热资源,并造成空腔陷落进而诱发塌陷,因此,在今后的研

究中应充分考虑环境的整体性。应采用高精度的水文生态现场监测设备,修正和优化预测模型,建立完善的评价体系、方法和指标,做好隧道建设环境承载力、建设适宜性等评价,从而为后续隧道穿山工程提供科学支撑。

参考文献:

- [1] LI S C, QI Y H, LI Z F, et al. A novel treatment method and construction technology of the pipeline gushing water geohazards in karst region[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113: 103939.
- [2] LIU Y M, XIA Y P, LU H, et al. Risk control technology for water inrush during the construction of deep, long tunnels[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 3070576.
- [3] 吕玉香, 蒋勇军, 王正雄, 等. 西南岩溶槽谷区隧道建设的水文生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 1851-1864.
LÜ Y X, JIANG Y J, WANG Z X, et al. Review on the hydrology and the ecological and environmental effects of tunnel construction in the karst valley of Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 1851-1864.
- [4] 赵志军. 重庆市自然灾害综合区划研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
ZHAO Z J. Study of comprehensive regionalization of natural disasters in Chongqing Municipality[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [5] 徐湃, 朱代强, 蒋树屏, 等. 重庆长大公路隧道结构安全保障技术及策略研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4): 18-28.
XU P, ZHU D Q, JIANG S P, et al. Study on the structural safety assurance technology and strategy for long and large highway tunnels in Chongqing[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(4): 18-28.
- [6] 蒲俊兵. 重庆市地下河发育、分布的控制机制及水文地球化学区域特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
PU J B. Research on the controlling factors of formation and distribution of subterranean karst streams and its hydrogeochemistry regional, Chongqing, China[D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [7] 重庆市地质矿产勘查开发局南山水文地质工程地质队, 重庆市地下水资源利用与环境保护实验室. 山地城市碳酸盐岩隧道工程环境地质问题及对策[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2022.
Nanjiang Hydrogeological & Engineering Geology Brigade, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Key Laboratory of Chongqing Groundwater Resources Utilization and Environmental Protection. The envi-geological problems and countermeasures on the carbonate tunneling in mountainous city[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2022.
- [8] 冯瑞胜, 周杰, 肖东杰, 等. 高地温区隧道排水管结晶生长室内试验研究[J]. 公路, 2021, 66(9): 398-402.
FENG R S, ZHOU J, XIAO D J, et al. Laboratory experimental study on crystal growth in drainage pipes of tunnels in high ground temperature zones[J]. Highway, 2021, 66(9): 398-402.
- [9] WANG X W, XU Y S. Investigation on the phenomena and influence factors of urban ground collapse in China[J]. Natural Hazards, 2022, 113(1): 1-33.
- [10] 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 X J, LUO C. Three-mechanism theory (TMT) of karst ground collapse and its application[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 171-188.
- [11] 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 Y B, YIN R C, LEI M T, 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.
- [12] 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 K L. An analysis of the karst ground collapse and water yield of the Zhongliangshan tunnel in the Yusui expressway[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(2): 107-110.
- [13] 南力辉. 双碑隧道涌水量预测及运营预警措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
NAN L H. Study on prediction of water inflow into Shuangbei tunnel and operation early warning measures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [14] 杨培丰. 重庆涂山湖片区岩溶塌陷形成机制及危险性评估[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
YANG P F. Formation mechanism and risk assessment of karst collapse in Tushan lake area, Chongqing[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [15] 滕浩文. 重庆歇马隧道施工期地下水动态特征及含水层参数估计[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
TENG H W. Dynamic characteristics of groundwater and parameter estimation of aquifer during construction of Xiema tunnel, Chongqing[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.

- [16] 任幼蓉,韩文权.重庆地下空间开发与环境保护协调发展研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(5):965-969.
REN Y R, HAN W Q. Study on coordinated development between underground space utilization and environment protection [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 965-969.
- [17] 蒋勇军,袁道先,谢世友,等.典型岩溶农业区地下水水质与土地利用变化分析:以云南小江流域为例[J].地理学报,2006,61(5):471-481.
JIANG Y J, YUAN D X, XIE S Y, et al. The groundwater quality and land use change in a typical karst agricultural region: a case study of Xiaojiang watershed, Yunnan [J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(5): 471-481.
- [18] CAO M, WU C, LIU J C, et al. Increasing leaf $\delta^{13}\text{C}$ values of woody plants in response to water stress induced by tunnel excavation in a karst trough valley: implication for improving water-use efficiency[J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124895.
- [19] 吴韦,贾亚男,蒋勇军,等.典型岩溶槽谷区土壤 CO_2 浓度变化对隧道建设的响应:以重庆市中梁山岩溶槽谷为例[J].生态学报,2019,39(16):6146-6157.
WU W, JIA Y N, JIANG Y J, et al. Change in soil CO_2 concentration due to tunnel construction in a typical karst valley: a case study of Zhongliang Mountain, Chongqing City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 6146-6157.
- [20] 吴超,蒋勇军,沈立成,等.喀斯特槽谷典型植物水分利用效率对隧道建设的响应[J].生态学报,2020,40(12):4032-4040.
WU C, JIANG Y J, SHEN L C, et al. Response of water use efficiency of typical plants to tunnel construction in karst trough valley [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 4032-4040.
- [21] VON DER LIPPE M, KOWARIK I. Do cities export biodiversity? traffic as dispersal vector across urban-rural gradients [J]. Diversity and Distributions, 2008, 14(1): 18-25.
- [22] DARK S J. The biogeography of invasive alien plants in California: an application of GIS and spatial regression analysis [J]. Diversity and Distributions, 2004, 10(1): 1-9.
- [23] HUANG F, ZHANG M, JIANG Z. Collapse mode of rock mass induced by a concealed karst cave above a deep cavity [J]. Journal of Central South University, 2019, 26(7): 1747-1754.
- [24] 郑新定,丁远见.隧道施工废水对水环境的影响分析及应对措施[J].现代隧道技术,2007,44(6):82-84.
ZHENG X D, DING Y J. Analysis of the influence of tunnel construction waste water on water environment and countermeasures [J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44(6): 82-84.
- [25] LIU J, LIU D, SONG K. Evaluation of the influence caused by tunnel construction on groundwater environment: a case study of Tongluoshan tunnel, China [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 2015(1): 149265.
- [26] 袁道先.我国西南岩溶石山的环境地质问题[J].世界科技研究与发展,1997,19(5):41-43.
YUAN D X. On the environmental and geologic problems of karst mountains and rocks in the South-West China [J]. World Sci-Tech R&D, 1997, 19(5): 41-43.
- [27] 杨平恒,罗鉴银,袁道先,等.降雨条件下岩溶槽谷泉水的水文地球化学特征[J].水利学报,2009,40(1):67-74.
YANG P H, LUO J Y, YUAN D X, et al. Response of spring water hydrochemical behaviors to rainfall in karst subterranean river system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(1): 67-74.
- [28] 杨艳娜.西南山区岩溶隧道涌突水灾害危险性评价系统研究[D].成都:成都理工大学,2009.
YANG Y N. Research of karst tunnel water bursting hazard risk assessment system in the Southwest Mountainous Area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [29] 罗声.越岭隧道典型水文地质结构类型及外水压力研究[D].成都:成都理工大学,2015.
LUO S. Study on typical hydrogeological structure types and external hydraulic pressure in crossing-mountain tunnel [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [30] 钟玲敏.川东高陡背斜区岩溶空间分异特征及评价系统构建研究[D].成都:成都理工大学,2018.
ZHONG L M. Research on the karst development characteristics of high-steep anticline in Eastern Sichuan and evaluation system construction [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [31] 陈杰.复建隧道对中梁山区域地下水环境的二次影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.
CHEN J. Study on the secondary influence of the groundwater environment for the rebuilt tunnel in Zhongliangshan area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [32] 王芳其,郑炜,徐华,等.岩溶山区隧道地下水漏失对植物生长的影响分析及对策[J].隧道建设(中英文),2018,38(6):915-923.
WANG F Q, ZHENG W, XU H, et al. Influence of groundwater loss induced by karst tunnel construction on growth of surrounding vegetation and its countermeasures [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(6): 915-923.

- [33] 刘建,刘丹,宋凯.渝怀铁路歌乐山隧道排水的地下水环境负效应评价[J].现代隧道技术,2012,49(4):178-183.
LIU J,LIU D,SONG K. Evaluation of the negative effects on groundwater environment resulted by Geleshan tunnel drainage [J]. Modern Tunnelling Technology,2012,49(4):178-183.
- [34] 樊新庆.重庆市观音峡背斜北段东翼地热地质环境特征与地热资源开发研究[D].成都:成都理工大学,2011.
FAN X Q. Research on the geothermal geology environmental characteristics and development of geothermal water resources in the east wing of the north Guanyin Gorge anticline in Chongqing[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology,2011.
- [35] 郭维君,吴萌,覃世福.重庆中梁山背斜南倾伏端水资源减少成因及对策研究[J].中国水运(下半月),2015(14):150-151.
GUO W J, WU M, QIN S F. Research on the causes and countermeasures of water resources reduction at the southward inclined end of the Zhongliangshan anticline in Chongqing [J]. China Water Transport,2015(14):150-151.
- [36] 张小华,刘清文.武隆隧道暗河突水特点与整治技术分析[J].现代隧道技术,2005,42(3):59-64.
ZHANG X H, LIU Q W. Analysis of the features of water outbursts from underground rivers and the countermeasures in Wulong tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology,2005,42(3):59-64.
- [37] 刘丹,杨立中,于苏俊.华蓥山隧道排水的生态环境问题及效应[J].西南交通大学学报,2001,36(3):308-313.
LIU D, YANG L Z, YU S J. On ecological environment problems and effects caused by discharge from Huayingshan tunnel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2001,36(3):308-313.
- [38] 郑一迪.天然及隧道工况下大田坝向斜地下水均衡分析[D].成都:成都理工大学,2018.
ZHENG Y D. Equilibrium analysis of Datianba synclinal groundwater under natural and tunnel conditions [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2018.
- [39] 刘建,刘丹.某高速公路隧道出口端涌水对地表饮用水源的影响分析[J].工程勘察,2012,40(7):41-43.
LIU J, LIU D. Analysis of the impact of water inflow from a highway tunnel on the source of drinking water[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2012,40(7):41-43.
- [40] 拓明明,周训,郭娟,等.重庆温泉及地下热水的分布及成因[J].水文地质工程地质,2018,45(1):165-172.
TA M M, ZHOU X, GUO J, et al. Occurrence and formation of the hot springs and thermal groundwater in Chongqing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2018,45(1):165-172.
- [41] 张宇,杨平恒,王建力,等.重庆温泉研究进展[J].中国岩溶,2015(5):468-478.
ZHANG Y, YANG P H, WANG J L, et al. Reviewed research on the hot springs in Chongqing[J]. Carsologica Sinica,2015 (5):468-478.
- [42] 曾敏.重庆温泉分布与成因研究[D].成都:成都理工大学,2012.
ZENG M. Distribution and genesis of Chongqing hot spring[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology,2012.
- [43] 程群,杨华林,曾敏.重庆市主城区岩溶地热水资源的形成与保护[J].中国岩溶,2015,34(3):217-227.
CHENG Q, YANG H L, ZENG M. The formation and protection of karst geothermal water resources in the main urban area of Chongqing[J]. Carsologica Sinica,2015,34(3):217-227.
- [44] 杨华林,李明伦,周神波,等.重庆市主城岩溶区地热资源可再生性评价[J].中国岩溶,2014,33(2):167-175.
YANG H L, LI M L, ZHOU S B, et al. Renewable assessment for geothermal resources in the karst area of Chongqing City[J]. Carsologica Sinica,2014,33(2):167-175.
- [45] 四川省地质局南江水文地质大队.中华人民共和国区域水文地质普查报告:重庆幅(1:200 000)[R].合川:四川省地质局南江水文地质大队,1977.
Nanjiang Hydrogeological Team, Sichuan Bureau of Geology. Regional hydrogeological reconnaissance report of the People's Republic of China: Chongqing area sheet (1:200 000) [R]. Hechuan: Nanjiang Hydrogeological Team, Sichuan Bureau of Geology,1977.
- [46] MA Y N, YANG J S, LI L Y, et al. Analysis on ultimate water pressure and treatment measures of tunnels operating in water rich areas based on water hazard investigation[J]. Alexandria Engineering Journal,2022,61(8):6581-6589.
- [47] 罗文艺.黔张常铁路骆驼店隧道突涌水系统辨识[J].铁道标准设计,2020,64(6):133-138.
LUO W Y. Identification characteristics of water inrush system of Tuomadian tunnel on Qianjiang-Zhangjiajie-Changde railway [J]. Railway Standard Design,2020,64(6):133-138.
- [48] 付威.公路隧道渗漏水机理分析及治理对策研究[D].成都:西南交通大学,2013.
FU W. Research on seepage mechanism of highway tunnels and countermeasures of seepage disease[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2013.
- [49] ZHAO Y J, WANG F G, LI C S, et al. Study of the corrosion characteristics of tunnel fissures in a karst area in southwest

- China[J]. *Geofluids*, 2018, 2018(1): 6234932.
- [50] 范明东, 夏强, 曹聪, 等. 重庆观音峡背斜岩溶隧道涌突水影响因素定量评价方法研究[J]. *甘肃水利水电技术*, 2020, 56(9): 32-35.
FAN M D, XIA Q, CAO C, et al. Quantitative evaluation method research on influencing factors of water intrush in karst tunnels of Chongqing Guanyinxia anticline[J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2020, 56(9): 32-35.
- [51] 何瑞亮. 隧道建设影响下岩溶关键带 C-S 耦合循环与碳酸盐岩风化[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
HE R L. The C-S coupling cycle processes of karst critical zone and its weathering effect to carbonate rocks under the influence of tunnels construction[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [52] 张瑞. 岩溶槽谷区既有隧道条件下新建隧道渗流特征及涌水量预测[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
ZHANG R. Seepage characteristics and water inflow prediction of new tunnels under existing tunnel conditions in karst trough area[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [53] 龙奎. 重庆中梁山歇马隧道非稳定涌水量解析计算[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(S2): 815-820.
LONG K. Analytical calculation of unstable water inflow in Xiema tunnel of Zhongliang mountain, Chongqing[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(S2): 815-820.
- [54] 廖云平. 重庆岩溶山区隧道工程地下水环境负效应演化规律研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
LIAO Y P. Study on evolution law of negative effects of groundwater environment on tunnel engineering around karst mountain area of Chongqing[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [55] 秦仁佩, 肖均, 蒋锋. 明月山特长隧道涌水突泥综合处理措施[J]. *现代隧道技术*, 2007, 44(6): 66-69.
QIN R P, XIAO J, JIANG F. Comprehensive treatment of the water gushing and mud outburst in Mingyueshan super long tunnel[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2007, 44(6): 66-69.
- [56] 李栋. 基于岩石蠕变试验的时滞型岩爆孕育机理研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2019.
LI D. The study of inoculation mechanism of delayed rock burst based on rock creep test[D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2019.
- [57] 贺苏和巴特尔, 蒋良文, 张贵铜. 重庆东温泉山既有隧道疏排对岩溶水的影响[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(4): 496-501.
HE S, JIANG L W, ZHANG G T. Influence of drainage on karst groundwater at an existing tunnel in the east-spring mountains, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(4): 496-501.
- [58] 张政. 岩溶地区公路隧道渗漏水处理原则研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
ZHANG Z. Research on treatment for the seepage disease of highway tunnels in karst area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [59] 王璐. 基于遗传算法和支持向量机的西南岩溶越岭隧道涌水量预测[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
WANG L. Prediction of water inflow in southwest karst crossing-mountain tunnel based on genetic algorithm and support vector machine[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [60] 梁峰. 地下水对山岭隧道施工的影响及防治措施研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
LIANG F. Study on the influence of ground water on tunnel construction in mountain ridge and its prevention countermeasures [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [61] 刘中华. 雅泸高速大相岭泥巴山隧道围岩大变形研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
LIU Z H. Study on the large deformation of wall rock on the tunnel through Daxiangling Niba mountains[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [62] 宋战平. 隐伏溶洞对隧道围岩-支护结构稳定性的影响研究[J]. 西安: 西安理工大学, 2006.
SONG Z P. Research on the influence of concealed karst caves upon the stability of tunnels and its support structure[J]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [63] 左清军, 吴立, 林存友, 等. 富水软岩隧道跨越断层段塌方机制分析及处治措施[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(2): 369-377.
ZUO Q J, WU L, LIN C Y, et al. Collapse mechanism and treatment measures for tunnel in water-rich soft rock crossing fault [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(2): 369-377.
- [64] 吴文平, 冯夏庭, 张传庆, 等. 深埋硬岩隧道围岩的破坏模式分类与调控策略[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(9): 1782-1802.
WU W P, FENG X T, ZHANG C Q, et al. Classification of failure modes and controlling measures for surrounding rock of deep tunnel in hard rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(9): 1782-1802.
- [65] 康勇. 深埋隧道围岩破坏机理相关问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.

- KANG Y. Research on relevant problems about failure mechnism of surrounding rock in deep buried tunnel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [66] 王思敬, 杨志法, 刘竹华. 地下工程岩体稳定分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- WANG S J, YANG Z F, LIU Z H. Stability analysis of rock mnass in underground engineering[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [67] 张鹏勇. 通渝深埋特长隧道高地应力与围岩稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通学院, 2004.
- ZHANG P Y. Study on High-geostress and rockmass stability for deep-lying Tongyu tunnel with a great length[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2004.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Study on the Influence of Tunnel Construction Environment and Engineering Negative Effect in Typical Karst Area of Chongqing Municipality

WEI Xingping^{1,2}, DAI Dengwei¹, LI Liangxin³, CHEN Ting^{1,2}

(1. School of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 2. Chongqing Key Laboratory of Carbon Cycle and Carbon Regulation of Mountain Ecosystem, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 3. Ludian No. 1 Middle School, Ludian Yunnan 657000, China)

Abstract: Restricted by terrain, a large number of tunnels have been built and are densely distributed in Chongqing. In karst areas, the construction of tunnels has given rise to a series of environmental and engineering negative effects. By integrating the geological background and groundwater chemical characteristics of the karst areas in Chongqing, the tunnel construction environment and engineering negative effects in this region are systematically sorted out, including inducing karst collapse, causing water body drainage and loss, affecting vegetation growth and distribution, reducing soil quality and causing soil pollution, altering the groundwater thermal pattern, inducing water and mud inrush in tunnels, and triggering surrounding rock collapse and structural damage. On this basis, the overall trends and directions for future research are identified: 1) Strengthen research and evaluation on the mechanism of tunnels' impact on the stability of karst foundations. 2) Strengthen research on the identification of water conversion processes and drainage impact scopes as well as related protection measures. 3) Strengthen research on the response processes and mechanisms of soil and vegetation to tunnel construction. 4) Shift from "single-subject" to holistic research, and connect the "dual assessments" in karst tunnel sites.

Keywords: Chongqing Municipality; karst; negative effect; tunnel construction

(责任编辑 方 兴)