

骆伟,吴华英,胡惠华,等.沅古坪隧道选线的岩溶水文地质问题[J].中国岩溶,2021,40(2):253-263.
DOI:10.11932/karst20210205

沅古坪隧道选线的岩溶水文地质问题

骆伟¹,吴华英²,胡惠华¹,马德青¹,张鹏¹,李振兴¹

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司/中南公路建设及养护技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410200; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004)

摘要:避开突水突泥的高风险区是岩溶隧道选线的基本出发点。沅古坪隧道穿过岩溶强发育区,为典型的岩溶深长隧道。岩溶地下河、向斜蓄水构造、两侧水库以及地下水位与顶板的高差大等是影响其隧道安全建设的重要因素,也是选线要考虑的关键水文地质问题。为更好地进行隧道东、中、西三条设计线的比选,在隧道研究区开展了1:1万的岩溶水文地质专题调查,查清研究区岩溶发育和水文地质特征,划分出岩溶地下水系统,从而比较了3条隧道线所处的岩溶水动力水平分带和垂直分带,分析隧道与地下河、岩溶泉的空间关系,并结合物探资料分析了向斜蓄水构造的影响。结果表明:东线隧道穿过地表分水岭地带,处于岩溶水动力系统的补给区和垂向分布带的季节变动带、浅饱水带,基本不与地下河管道立交,远离了流量较大的岩溶泉,降雨补给面积最小,因此,总体涌水风险最小,为最佳隧道线路。西线纵穿赤溪河上游地下水系统的中部,穿过径流和排泄区,处于岩溶水动力垂向分带的浅饱水带,并与多条岩溶管道立交,且临近西侧高家溪水库,涌水风险最大。东线隧道临近黄鱼溪水库的北段、穿过郭家界向斜储水构造核部的南段是涌水高风险区,需扩大岩溶水文地质补充调查,并在施工中加强超前地质预报研究,最大程度避免岩溶地质灾害。

关键词:岩溶隧道;选线;水动力分带;高水压;向斜储水构造

中图分类号:P64 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2021)02-0253-11 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

中国是世界上隧道建设规模和难度最大的国家,也是在岩溶区修建隧道最多的国家^[1-3]。近年来,隧道建设规划重点已向地质条件复杂的西部山区和岩溶地区转移,深长岩溶隧道不断涌现。岩溶隧道在施工中常常遇到涌水、涌泥(砂)、顶板洞穴充填物陷落冒顶、洞穴垮塌、路基沉降等地质灾害问题。尤其是隧道大规模的涌水、突泥,不仅危及隧道建设安全、大量增加工程投资,还会造成地表水漏失、水源枯竭、地面塌陷等不可逆的生态环境问题。为了确保岩溶隧道工程的顺利建设,防范突水突泥等地质灾害,避免重大事故,中国学者在岩溶隧道选线^[4-7]、

涌水突泥评估^[8-10]、隧道施工超前地质预报^[11-14]、施工处置等方面开展了大量的研究工作^[15-17],并取得了一系列重要进展。韩行瑞^[18]建立了“隧道岩溶涌水专家评判系统”,指导了沪蓉西高速公路11个大长岩溶隧道的勘设和施工;李利平^[19]开展了岩溶隧道裂隙水突出的力学机制研究;李术才等^[20]提出了四阶段全过程的隧道综合超前地质预报体系,初步形成基于约束联合反演理论的综合预报方法,在钻爆法施工隧道定量化超前预报方面进行了较好探索;曹化平等^[21]提出了铁路岩溶隧道选线的5个原则,可有效降低隧道突水突泥风险,控制施工堵水工程投资。岩溶隧道选线和施工前的详细岩溶水文地质勘察仍然是隧道建设首要和最根本的工作。在此基础上,

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41702281)

第一作者简介:骆伟(1985—),男,硕士,主要从事水文地质与工程地质勘察研究。

通信作者:吴华英(1983—),女,博士研究生,主要从事岩溶水文地质研究工作。E-mail:whykarst@126.com。

收稿日期:2020-11-20

在施工中采取多种探测方法开展的超前预测预报工作才能符合客观实际。

张官高速公路路线呈南北走向,起于张家界市,终于沅陵县官庄镇,为G59呼北高速公路的一段,也是湖南省“七纵七横”高速公路网中第6纵的重要组成部分。沅古坪隧道为张官高速公路穿过张家界永定区东南部岩溶山区拟建的隧道。该隧道设计了东、中、西3条线路供比选。东线隧道总体呈北西—南东向,全长5 170 m,近乎呈直线;中线隧道位于东线隧道西侧,总体呈北西—南东向,全长4 860 m,线路近直线;西线隧道呈弧形,全长5 700 m。3条隧道线路设计高程在490~530 m之间,最大埋深约360 m,为典型的岩溶深埋长隧道。

隧道选线需要考虑以下问题:第一,隧道将穿越岩溶发育区,地质条件复杂,地下水分布不均匀,选线要考虑分析地下岩溶强径流带对3条隧道线路的影响,避开突水突泥高风险区是隧道选线考虑的首要问题;第二,隧址区地表河、湖发育,隧址西侧有高家溪水库,北侧有黄鱼溪水库,使隧道施工面临水库渗漏的威胁,选线要考虑水库对各线路的影响;第三,隧道埋深大,穿过向斜蓄水构造存在涌水风险,也是选线要考虑的重要因素。本文在1:1万岩溶水

文地质专题调查的基础上,针对上述3个主要岩溶水文地质问题进行了研究,目的是查清隧道岩溶发育和水文地质特征,划分岩溶地下水系统,比较隧道所处的岩溶水动力水平分带和垂直分带,分析隧道与地下河、岩溶泉的空间关系,并结合物探资料评价水库、向斜蓄水构造对隧道建设的影响,以期沅古坪隧道线路优选提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 自然地理条件

研究区位于长江流域洞庭湖支流——沅江和澧水间的分水岭地区(图1)。沅江和澧水基本呈南西—北东流向,两岸支流受地质构造影响呈北西—南东向深切峡谷。隧址区大多处沅江流域,主要支流有沂溪、赤溪河和麻潭河,为碳酸盐岩分布区,属构造溶蚀峰丛洼地—峡谷地貌,海拔标高为380~940 m,高差约560 m,沅江支流河床高程为380~400 m。沅古坪隧道出口段处于沅江北岸,峡谷深切,地形陡峻,交通不便。该区地势总体西北高、东南低,由于碳酸盐岩广布,地表溪流和地下河相互转换,呈现明、伏流相间分布的特点。

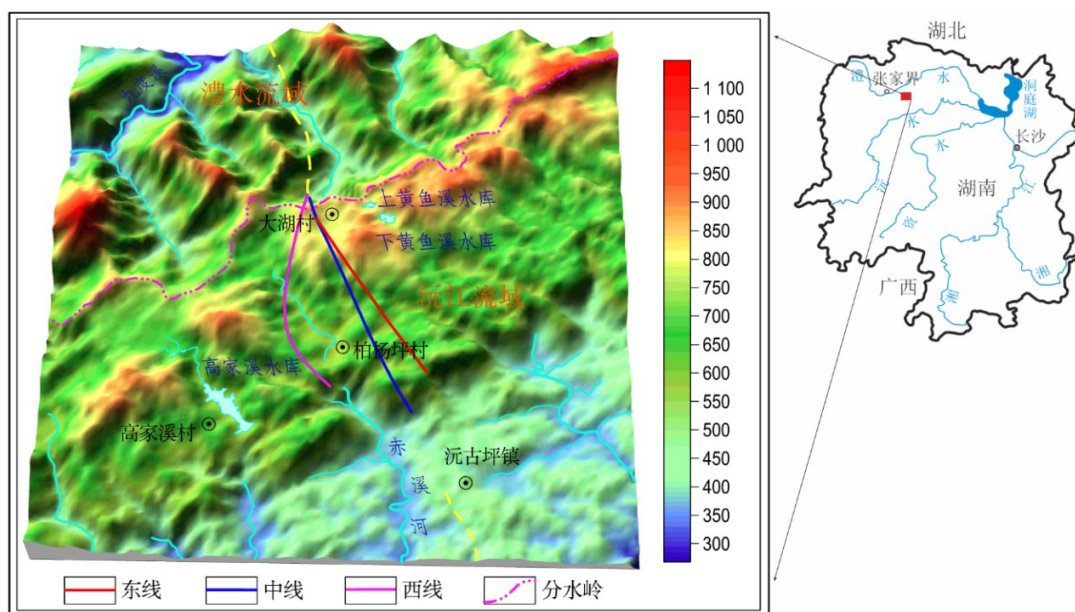


图1 沅古坪隧道区的区域位置与高程分布图

Fig. 1 Regional location and elevation distribution map of Yuanguping tunnel area

研究区属中亚热带山原型季风湿润气候,雨量丰沛,多年平均降水量为1 400 mm,多年平均气温为16℃;夏季最热月气温为27℃,冬季最冷月平均气温

为4.3℃;降雨分布不均,4月下旬至10月为集中降水期,降水量占全年降水总量的80%,11月至次年3月为枯水期(图2)。

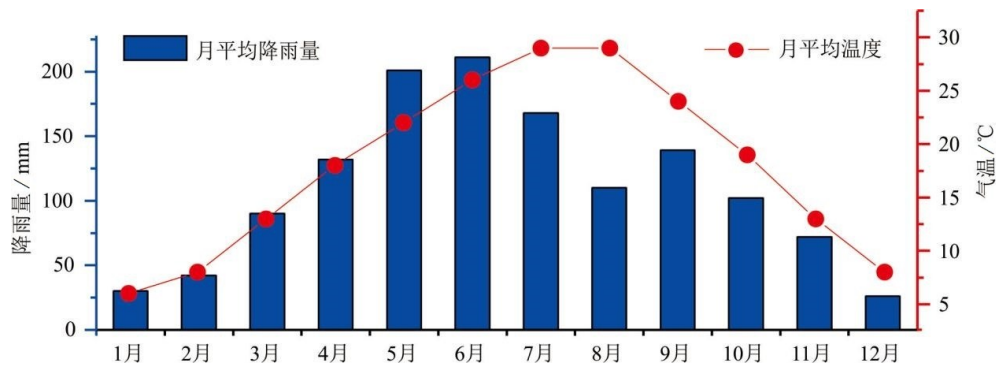


图2 张家界市 2009–2018 年多年平均降雨量和气温分布

Fig. 2 Distribution of annual average rainfall and temperature in Zhangjiajie City from 2009 to 2018

1.2 区域地质背景

1.2.1 地质构造

研究区位于扬子陆块(二级构造单元)内,处于湘北断褶带(三级构造单元)的石门—桑植复向斜

(四级构造单元)和雪峰构造带(三级构造单元)的武陵断弯褶皱带(四级构造单元)结合部位。影响隧道建设的主要褶皱是郭家界向斜(图3),该向斜在区内延伸长度为 12.8 km,为平缓型线型向斜,轴面直立,枢纽水平;核部出露奥陶系桥亭子组($O_{1-2}q$),两翼出

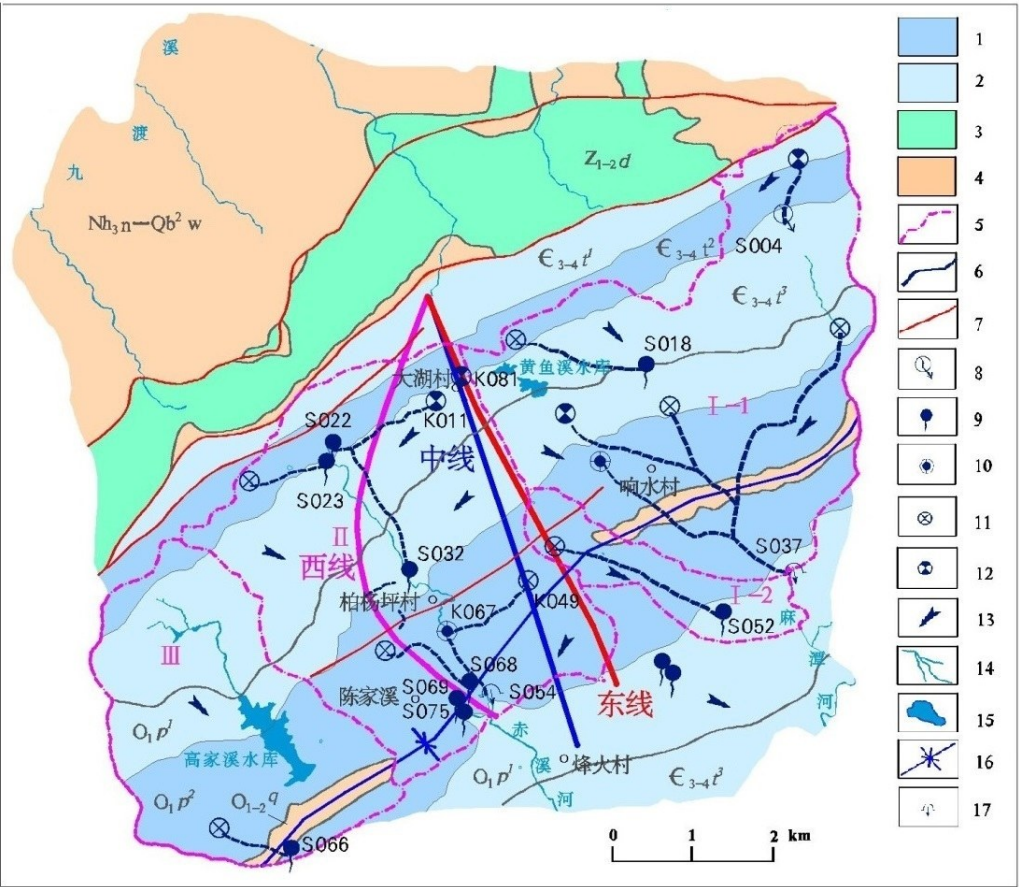


图3 隧道区岩溶水文地质简图

Fig. 3 Karst hydrogeology sketch of tunnel area

1. 灰岩裂隙溶洞水(较强富水区) 2. 灰岩溶洞裂隙水(中等富水区) 3. 白云岩孔洞裂隙水 4. 碎屑岩裂隙水 5. 地下水系统边界 6. 地下河管道 7. 断层 8. 伏流出口 9. 下降泉 10. 地下河天窗 11. 干落水洞 12. 有水落水洞 13. 地下水流向 14. 地表河 15. 水库 16. 郭家界向斜 17. 地下河出口 $O_{1-2}q$:奥陶系下统桥亭子组泥质灰岩夹钙质页岩 O_1p :奥陶系下统盘盘组泥质灰岩夹泥晶灰岩 $\epsilon_{3-4}l$:寒武系探溪组弱白云石化含石英微晶亮晶灰岩夹泥晶灰岩团块 I—麻潭河上游地下水系统 II—赤溪河上游地下水系统 III—沅溪上游地下水系统

露奥陶系盘家咀组(O_{lp})、寒武系探溪组($C_{3-4}t$),两翼产状稳定,倾角在 $5^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 。受褶皱构造影响,区内断裂也十分发育,主要形成于加里东期、印支期和燕山期。根据其走向,主要分为两类:NE-NEE向、NNW-NW向断裂。

1.2.2 碳酸盐岩地层岩性

隧道区出露的碳酸盐岩地层岩性主要为奥陶系桥亭子组泥岩与泥质灰岩,盘家咀组条带状泥质灰岩夹泥晶灰岩和寒武系探溪组含石英灰岩夹泥质灰岩(图4)。

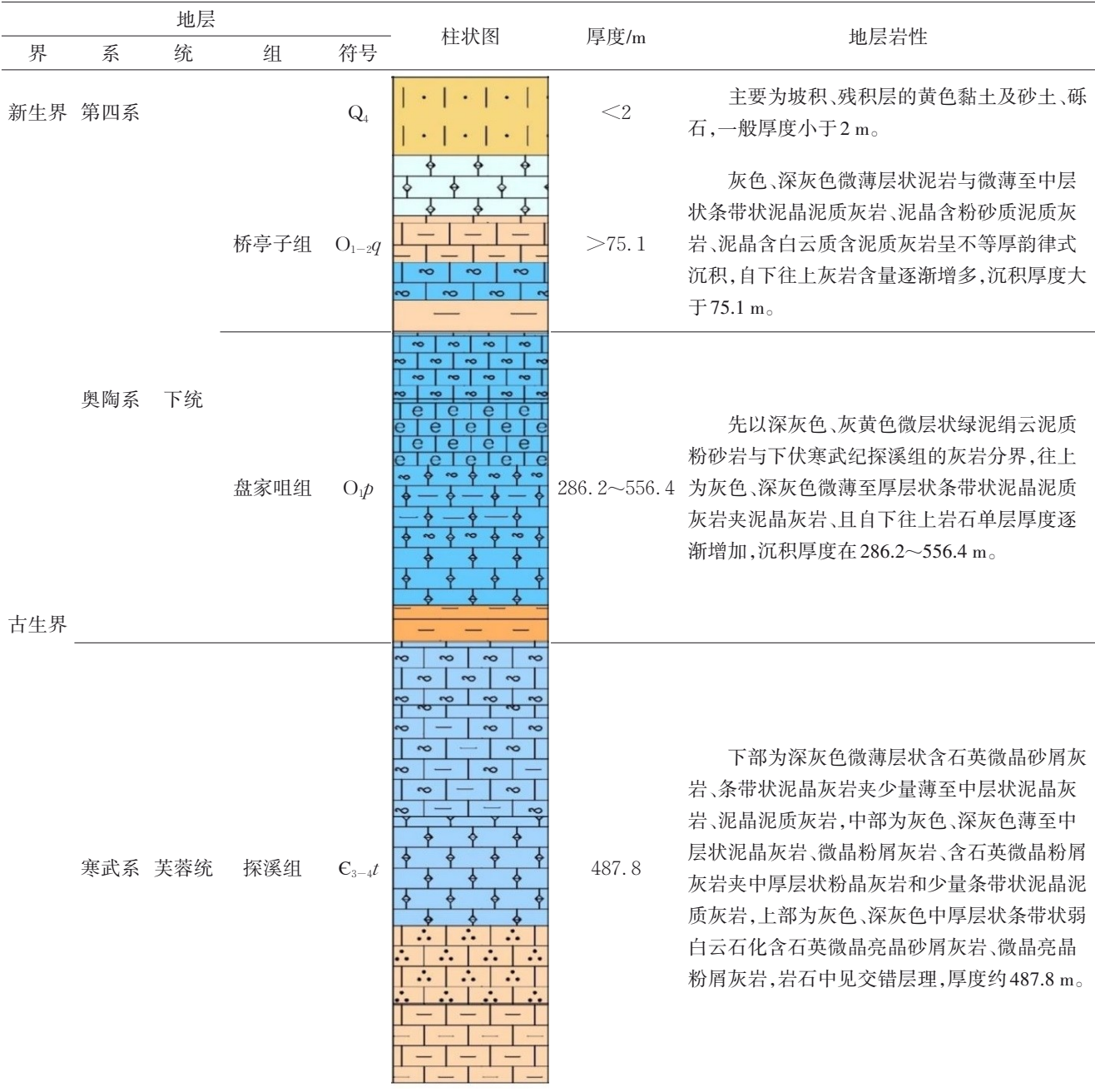


图4 研究区地层柱状图

Fig. 4 Stratigraphic histogram of the study area

1.3 岩溶水文地质条件

O_{lp} 、 $C_{3-4}t$ 条带状泥质灰岩、泥晶灰岩岩溶发育,为研究区主要含水层(图4,表1)。 O_{lp}^2 、 $C_{3-4}t^2$ 沉积厚

度较大,灰岩含量比例高,岩溶发育最强烈,是研究区岩溶水分布的最主要层位,管道流最为发育的是 O_{lp}^2 ; O_{lp}^1 、 $C_{3-4}t^1$ 、 $C_{3-4}t^3$ 层厚较薄,泥质成分高,岩溶发

育较弱,为岩溶管道裂隙水分布的主要层位,岩溶管道较少,仅在构造裂隙极为发育的部位形成岩溶管道。受条带状泥质灰岩中泥质成分局部隔水的影

响,研究区发育多层岩溶含水层,各含水层间水力联系不强,尤其在补给和径流区,受地形切割发育众多表层岩溶泉,特别在 O_1p^1 分布最多。

表 1 岩溶含水层划分
Table 1 Karst aquifer division

系	统	组	段	地层代号	厚度/m	类型代号	水文地质特征
第四系	全新统			Q	1~10	(1)	(1)松散岩类孔隙水 赋存于第四系冲洪积砂卵石及残坡积黏土,接受大气降水补给和基岩水测向补给,以渗流形式排泄;分布零星,水量贫乏,动态变化大,对本工程无影响。
		桥亭子组		$O_{1-2}q$	>75	(2)	
奥陶系	下统	盘家咀组	二段	O_1p^2	110~220	(3-1)	(2)碎屑岩裂隙水 赋存于 $O_{1-2}q$ 、 ϵ_{1n} 、Z 等碎屑岩中,补给源为大气降水,以裂隙水下降泉形式出露,动态变化较大,水量贫乏, HCO_3-Ca 和 HCO_3-SO_4-Ca 型水,其中,盘家咀组底部的泥质粉砂岩起着相对隔水层作用。
			一段	O_1p^1	170~340	(3-2)	(3)碳酸盐岩岩溶水 (3-1)碳酸盐岩裂隙-溶洞水 赋存于 O_1p^2 、 $\epsilon_{3-4}t^2$ 强岩溶化灰岩中,由大气降水补给,含水量丰富, HCO_3-Ca 型水,岩溶管道流发育,是研究区的主要含水层。
			三段	$\epsilon_{3-4}t^2$	150~240	(3-2)	(3-2)碳酸盐岩溶洞-裂隙水 赋存于 O_1p^1 、 $\epsilon_{3-4}t^1$ 、 $\epsilon_{3-4}t^2$ 中一强岩溶化灰岩中,由大气降水补给,含水量较丰富, HCO_3-Ca 型水,岩溶管道流中等发育。
寒武系		探溪组	二段	$\epsilon_{3-4}t^2$	100~120	(3-1)	
			一段	$\epsilon_{3-4}t^1$	60~125	(3-2)	
	下统	牛蹄塘组		ϵ_{1n}	—	(2)	
震旦系				Z	—	(2)	

受郭家界向斜北西翼的控制,研究区地下水总体沿地层倾向,自北西向南东方向流,往向斜核部汇聚,中途部分地下水受泥质条带阻隔出露地表至盘家咀组二段强岩溶发育区潜入地下,最后在向斜核部偏东南 1~2 km 一带以岩溶大泉或地下河的形式排泄到地表河中(图 3),形成 S066、S075、S068、S054、S052 等大泉或地下河出口密集分布的排泄带。受局部排泄基准——沂溪、赤溪和麻潭河的切割,以及泥质灰岩夹层溶蚀强度减弱的影响,郭家界向斜没有形成一个大的统一含水系统,而是被分割为多个含水系统:麻潭河上游地下水系统(Ⅰ)、赤溪河上游地下水系统(Ⅱ)和沂溪上游地下水系统(Ⅲ)(表 2)。

1.4 岩溶发育特征

研究区位于云贵高原东北边缘向洞庭湖平原过渡的斜坡地带,属于湘西北岩溶台地三级夷平面深切峡谷区;剥夷面上峰丛洼地、溶丘、谷地、漏斗、落水洞广布,较大的洼地分布在柏杨坪、大湖村、陈家溪、高家溪(已开发成水库),呈长条形和不规则状,NNW-NW 展布。研究区西北部及河谷间补给区分布

许多小型洼地、落水洞、溶丘、竖井、漏斗等;岩溶主要发育在奥陶系盘家咀组条带状泥质灰岩夹泥晶灰岩、探溪组泥晶灰岩。受河谷深切和灰岩中泥质条带削弱岩溶作用的影响,研究区溶洞以垂向发育的落水洞、竖井为主,水平溶洞不多,规模不大,主要形成于盘家咀组二段(O_1p^2)厚层泥晶泥质灰岩夹泥晶灰岩。岩溶发育深度大于 600 m,但由于含水层中泥质夹层具有隔水性且会阻塞岩溶空间,岩溶总体连通性一般;连通性较强的区域为水平岩溶发育地带,根据水平溶洞和地下河出口的发育高程,推测在 380~500 m,即 O_1p^2 中下部的水平岩溶最为发育,连通性较好,而此高程段与隧道建设高程(440~520 m)重叠,对隧道建设影响最大。500 m 以上高程范围内以垂向岩溶发育为主,连通性较差,对隧道建设的影响较 O_1p^2 要小。

研究区岩溶发育明显受地层岩性、断裂、向斜轴部、裂隙密集带与结构面、可溶与非可溶界面所控制:(1)区内断裂、裂隙以 NE 向为主,其次为 NW、NNW 向,地下河管道、洼地展布方向基本受这些断裂、裂隙发育方向的控制;(2)郭家界向斜核部,即

表2 研究区岩溶地下水系统的特征

Table 2 Characteristics of karst groundwater system in research area

系统	子系统	排泄口	管道长度/km	汇水面 积/km ²	流量/L·s ⁻¹		描述
					暴雨前	暴雨后	
麻潭河上游地下水系统(I)	大洞地下河子系统(I-1)	S037	4.0	20.0	300.0	—	该系统管道呈树枝状,推测有4支管道。
	菜地湾岩溶泉群子系统(I-2)	S052	—	4.0	—	—	泉域中部发育南东向岩溶槽谷,地下水在菜地湾一带受地形切割出露成多个岩溶泉。
赤溪河上游地下水系统(II)	烽火洞地下河子系统(II-1)	S054	5.0	11.6	120.0	3 054.0	K067至S054的岩溶管道为子系统地下水的唯一出口,暴雨期排泄不及时,会导致柏杨坪村农田被淹。
	陈家湾泉群子系统(II-2)	S068、S069、S075	1.5	3.9	3.5	2 409.0	位于II-1子系统的西南侧,由多个泉组成。
沂溪上游地下水系统(III)	S066泉子系统(III-1)	S066	1.0	6.7	—	1 225.0	S066泉水补给来源于高家溪及其水库西侧岩溶峰丛洼地的降雨入渗
	S067泉子系统(III-2)	S067		3.4	—	—	S067泉水主要来源于高家溪水库南侧排水和和部分库水渗漏。

注:“—”表示未测得;暴雨前流量指2020年3月17日所测,暴雨后流指2020年3月22日所测。

O_p^2 灰岩分布区的串珠状洼地、管道的分布最密集,岩溶发育最强,是由于该段岩性较纯、泥质含量降低,沉积厚度增大,同时还受向斜轴部横张、纵张裂隙和层间滑脱发育的影响;(3)大湖村—李家村的岩溶管道发育于 O_p 泥质灰岩、泥晶灰岩下部,其底部为不可溶的泥质粉砂岩;(4)盘家咀组一段(O_p^1)为条带状泥质灰岩夹泥晶灰岩,沉积厚度较薄,且含泥质较高,导致岩溶发育受限,洼地、管道等分布较 O_p^2 密度低,由于泥质条带的隔水性,形成许多小型岩溶泉、小潭等,如黄鱼溪水库、大长埡水塘、绿水坑水塘、叶家湾水塘等。

2 隧道岩溶水动力分带

2.1 水动力水平分带

从图3可看出隧道所处的水动力水平分带。东线自北向南穿过地下水系统II东北部边界、地下水系统I-2西部边界、地下水系统II东部边界。中线自北向南穿过地下水系统II东北部边界和东部补给区。东线基本位于分水岭地带,中线临近分水岭地带。西线自北向南穿过地下水系统II的东北部补给区、中部径流和南部排泄区,基本纵穿该地下水系统。因此,从隧道所处的水动力水平分带看,东线优于中线,中线优于西线。

2.2 水动力垂向分带

研究区岩溶垂向水动力分带可划分为表层岩溶带、垂直下渗带、季节交替带、浅饱水带和压力饱水带。浅饱水带为枯季地下水位以下,地下河排水口以上地带;压力饱水带为地下河排水口以下,当地主要河流排水基准面影响带以上的含水层。地下河(I-1)出口S037的高程为387 m,地下河(II-1)出口S054高程为420 m,每年暴雨期地下水位都会上涨,致使天窗K067(高程560 m)一带农田被淹。380~560 m为研究区的浅饱水带和季节交替带,而隧道设计高程范围为440~520 m,因此,3条隧道线位于浅饱水带和季节交替带,涌水风险大,且560 m以上高程普遍存在局部隔水层和上层滞水,也会对隧道建设造成一定威胁。总体上,西线的埋深大,并且纵穿地下河系统III,同时受上部岩溶含水层和南部强径流带威胁,涌水风险最大(图5)。

对隧道沿线1.5 km内的岩溶调查点高程进行统计(图6)显示,落水洞、竖井、塌陷点等主要分布在560~680 m的高程范围内,因此该高程范围为岩溶包气带,与前文分析一致。隧道沿线1.5 km内岩溶大泉、溶井、地下河出口等水点高程分布如图7所示,以水点集中出露的高程为界线将水点出露大致划分为3个高程段:380~570 m、570~700 m、760~810 m。380~560 m为浅饱水带和季节交替带,与前文分析的范围基本一致,而浅饱水带的顶界需要进一步开

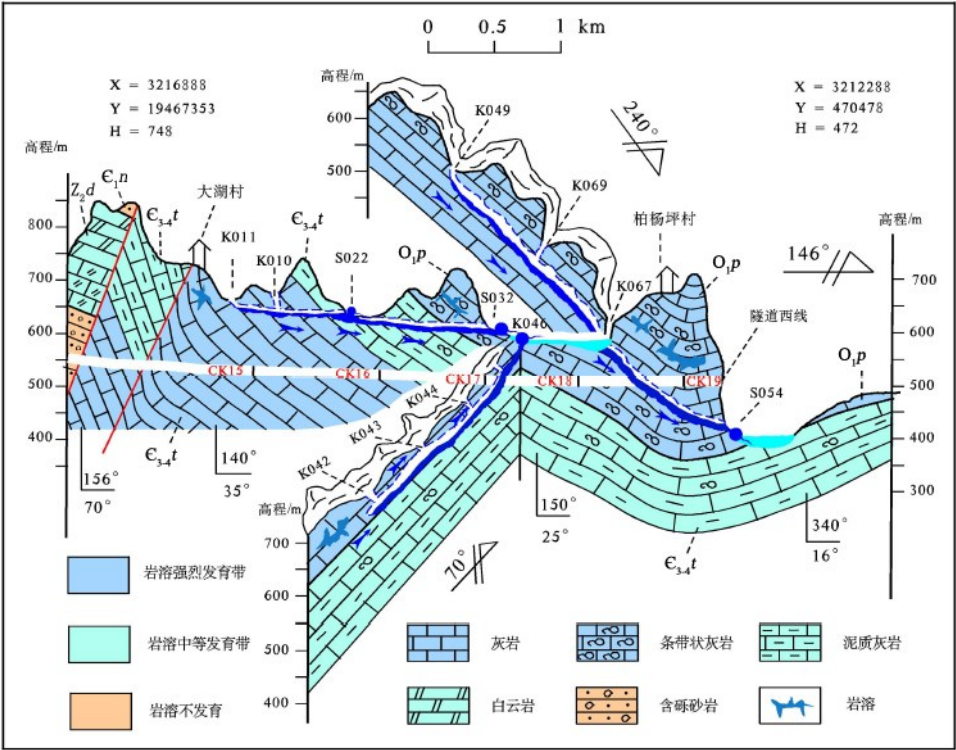


图 5 隧道区岩溶地下水动力垂向分带示意图

Fig. 5 Schematic diagram of vertical zoning of karst groundwater dynamics in tunnel area

展钻探和水位监测才能确定;570~700 m 为上层含水层,地下水受泥质条带阻隔出露地表后又再次潜入地下补给下层含水层,该高程段含水层在局部地区汇水面积大,发育小型岩溶管道,与隧道间形成较大水压,威胁隧道建设安全;760~810 m 的泉点水量小,多为上层滞水,但此高程地下水与隧道间的高差大,可能会在局部构造薄弱地区形成高压水,威胁隧道顶板稳定性,因而需在选线完成后开展详勘和在施工期加强超前涌水预测。

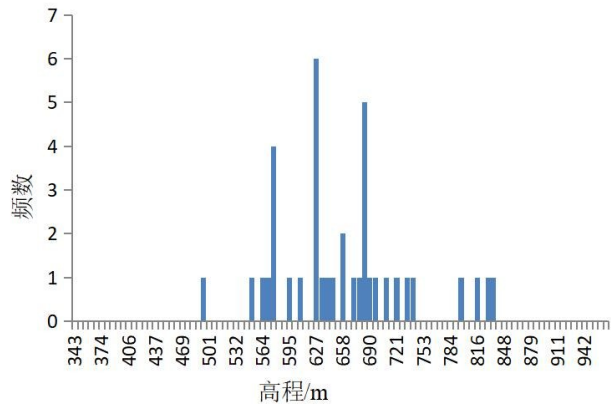


图 6 隧道沿线落水洞、竖井高程分布频次

Fig. 6 Frequency of elevation distribution of sinkholes and shafts along the tunnel

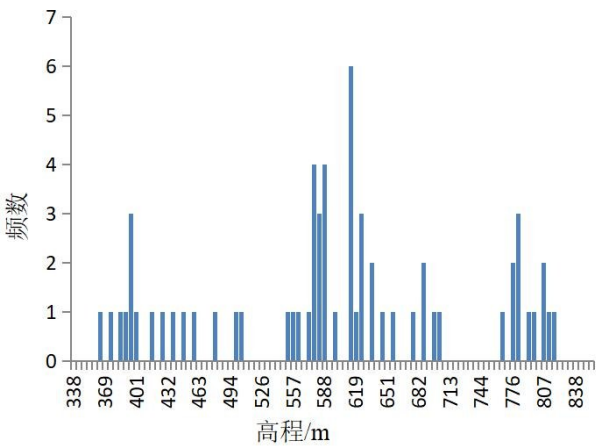


图 7 隧道沿线岩溶泉高程分布频次

Fig. 7 Frequency of karst spring elevation distribution along the tunnel

3 地下河和岩溶泉的影响

地下河管道与隧道线的空间关系是影响隧道涌水的重要因素,也是隧道线路比选勘察的重点。表 3 统计了地下河大型管道和岩溶泉小型管道的特征及其与隧道的关系。西线除了与地下河(Ⅱ-1)近距离平行外,还与其他 3 条小型岩溶管道立交或近距离平行(图 3),施工必将产生高压突水突泥(图 5)。

中线和东线由于位于分水岭地带,均未与岩溶管道形成立交,而与地下河上游小型管道存在 200 ~ 500 m 的距离。因此,从与地下水强径流带、岩溶管道的空间关系上看,中线和东线均明显优于西线。东线和地下河管道的距离最远,且基本平行于分水岭,汇水面积较中线小,因此涌水风险最小。

表3 地下河管道、岩溶泉与隧道的空间关系
Table 3 Spatial relationship between underground river pipeline, karst spring and tunnel

隧道	地下河/泉	与隧道的关系	流量/ $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$		汇水面积/ km^2	水系统
			暴雨前	暴雨后		
西线	S022小型管道状岩溶泉	与西线立交	35.5	60.4	—	Ⅱ
	S032小型管道状岩溶泉	与西线立交	6.9	155.5	—	Ⅱ
	S068小型管道状岩溶泉	与西线立交,南段与西线近距离平行	—	1 699.6	—	Ⅱ
	S054烽火洞地下河	与西线平行,相距200~400 m	120.2	3 053.7	15	Ⅱ
中线	S022小型管道状岩溶泉	上游段与中线相距270 m	35.5	60.4	—	Ⅱ
	S054烽火洞地下河	上游段与中线相距60 m	120.2	3 053.7	15	Ⅱ
	S037大洞地下河	上游支管道与中线相距960 m	299.9	—	20	I
东线	S022小型管道状岩溶泉	上游段与东线相距350 m	35.5	60.4	—	I
	S054烽火洞地下河	上游段与东线相距510 m	120.2	3 053.7	15	I
	S037大洞地下河	上游支管道与东线相距1 180 m	299.9	—	20	I

注:暴雨前指2020年3月17日,暴雨后指2020年3月22日所测流量。

与岩溶泉、地下河出口的距离也能反映隧道建设线水文地质条件的优劣。隧道沿线 1.5 km 以内,且流量大于 $2\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 的泉口、地下河出口共有 14 个。将这些泉点的流量与隧道的距离绘成图(图 8),可看出岩溶泉等与西线的距离最近,平均为 785 m;其次为东线,平均值 1 305 m;最远为东线,平均值为 1 571 m。这表明东线最优,西线最劣,如在曲线中增加流量因素的影响,优劣差异会更明显。

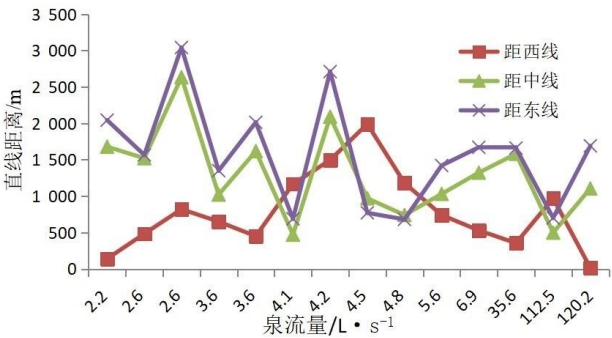


图8 隧道沿线岩溶泉与隧道线的水平距离
Fig. 8 Horizontal distance between karst spring and tunnel line along the tunnel

4 郭家界向斜蓄水构造的影响

向斜为典型的蓄水构造,是隧道建设要重点防范的水害威胁区。2002年渝怀铁路的圆梁山隧道施

工至毛坝向斜核部 P_2w+c 石灰岩含水体系时,揭露出较大规模的充填型溶洞,发生突水,并伴随涌泥涌砂,最大涌水量达 $69\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,造成重大人员伤亡和财产损失。郭家界向斜控制了研究区地下水的总体赋存和运移。向斜可溶岩沉积厚度大,北西翼可溶岩为补给区,降雨经广泛发育的洼地、落水洞、溶蚀漏斗等渗入地下,顺层间裂隙、构造裂隙、溶隙等,总体趋向斜核部径流,受沅水河侵蚀切割,在向斜核部东南侧形成地下河出口、大泉等排泄出地表。蓄水构造含水岩组为 O_p 灰色、深灰色厚层至块状条带灰岩夹微一薄层条带灰岩、泥质灰岩,上部 $O_{1-2}q$ 泥岩、条带状泥晶泥质灰岩被剥蚀殆尽,因此向斜核部无隔水层阻挡,补给条件优越。底部隔水层为盘家咀组底部与寒武系探溪组分界的深灰色、灰黄色微层泥质粉砂岩。向斜受水平顺层挤压弯曲,发育系列横张、纵张节理及层间滑脱,特别是向斜核部岩层走向转折较大,张裂隙发育,岩溶也强烈发育,形成地下水活动和富集的有利场所。在向斜轴部两侧各 1 km 的范围内为富水区,是隧道建设要重点考虑的水害隐患区。

东线隧道涉及郭家界向斜储水构造的里程段为 K17 至隧道出口(K19+320)(图 9)。该段穿梭于分水岭两侧,处于补给边界附近;从隧道纵剖面图看,该里程段高程在 450~480 m,正好横穿向斜核部富水

区,遇富水裂隙、溶洞的概率较高,在隧道施工当中要引起重视。中线隧道涉及向斜储水构造的里程为K17—K18+980,该段虽为补给区,但埋深大,钻遇富水裂隙、溶洞风险大。

而西线隧道涉及郭家界向斜储水构造的里程为K18—K19+600,该里程段位于地下河系统Ⅱ的径流—排泄区,该区发育大量竖井、串珠状落水洞、消

水洞、岩溶泉、地下河等,且地下河管道多与赤溪河相连通。西线隧道纵剖面显示该段高程低于赤溪河及其上部的多个岩溶泉。因此,西线隧道施工至此里程段的突水风险极高。突水不仅来自赤溪河、地下河Ⅱ、岩溶泉,还来自向斜核部富水区,该线施工很可能疏干赤溪河上游,引发次生地质灾害,破坏生态环境,对两岸居民生产和生活造成较大影响。

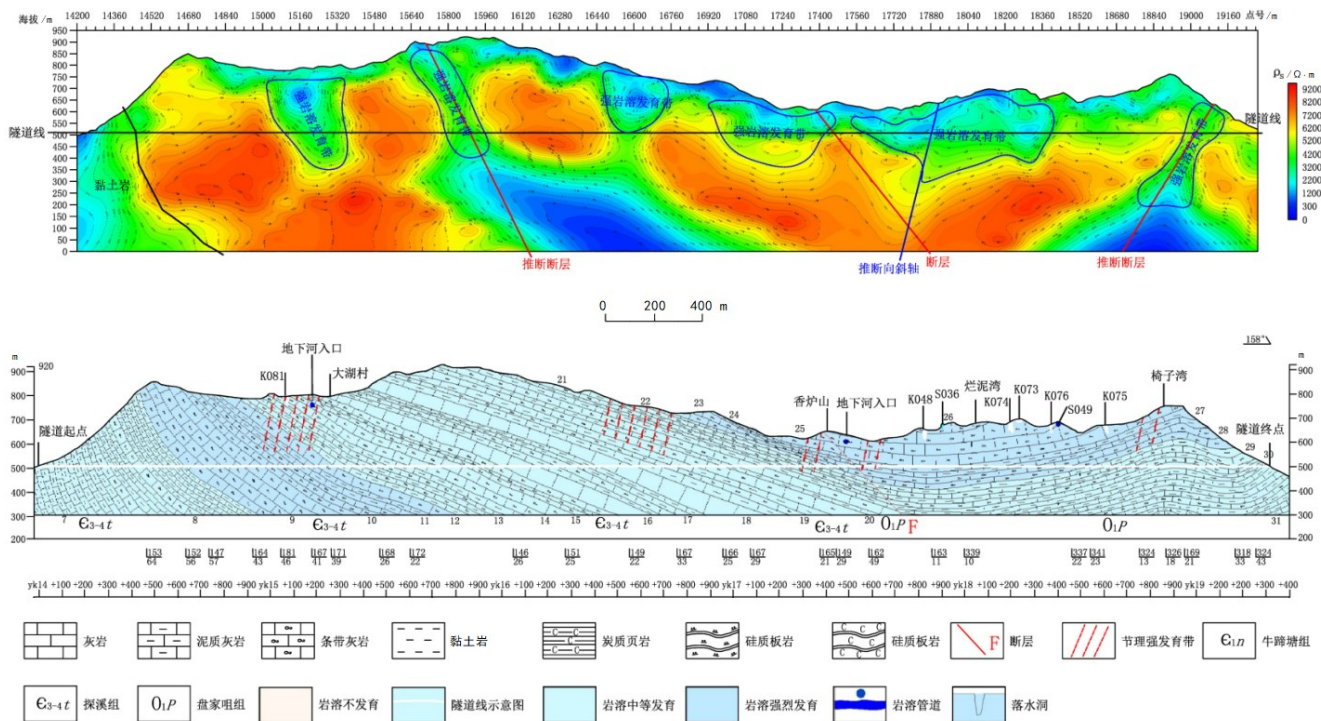


图9 隧道东线物探解译的剖面图

Fig. 9 Geophysical interpretation section of the east route of the tunnel

5 两侧水库及高水压问题

研究区主要有两个水库,分别为高家溪水库和黄鱼溪水库(图3)。高家溪水库靠近隧道西线,位于西线西侧900~1500 m,集雨面积为5.8 km²,总库容为654万 m³,属于张家界市永定区乡镇千吨万人集中式饮用水水源地保护区。为了解隧道建设对水库的影响,对水库周边开展详细勘察,水库南部存在2处渗漏,但渗漏水流均经落水洞向南流出,最终汇入沂溪。水库和西线间有赤溪河与沂溪的分水岭间隔,在自然条件下,库水不会向隧道方向渗漏。然而,进一步勘察发现响水村李家界一带发育一条北东向断层,穿过隧道东、中、西线,歼灭于高家溪水库北东侧约600 m处,并且在岩板丘一带断层南侧发育一条与断层走向一致的岩溶管道,由此推测该断层为导水

断层,且两侧构造裂隙、岩溶裂隙较为发育,修建隧道而开展的爆破活动可能会使断层及影响带的裂隙进一步扩大延长,沟通水库与隧道的水力联系,造成隧道持续特大涌水,威胁工程安全及水库正常运营(图10)。

黄鱼溪水库临近隧道东中线,位于两线东北侧约0.6 km,集雨面积为0.45 km²,总库容为54.7万 m³。水库与中线、东线间也存在地下分水岭,自然条件下库水不会向隧道方向渗流,但隧道施工爆破活动会导致岩体破碎,形成裂隙沟通水库与隧道间的水力联系,造成库水向隧道渗漏,且黄鱼溪水库水位高程为790~800 m,与隧道高程相差近300 m,尽管含水层为多层性,泥质条带形成局部隔水层,但在构造薄弱地带可能形成较大的水压,从而危及隧道顶板稳定性。因此在水库影响段,要加强施工预报和防治

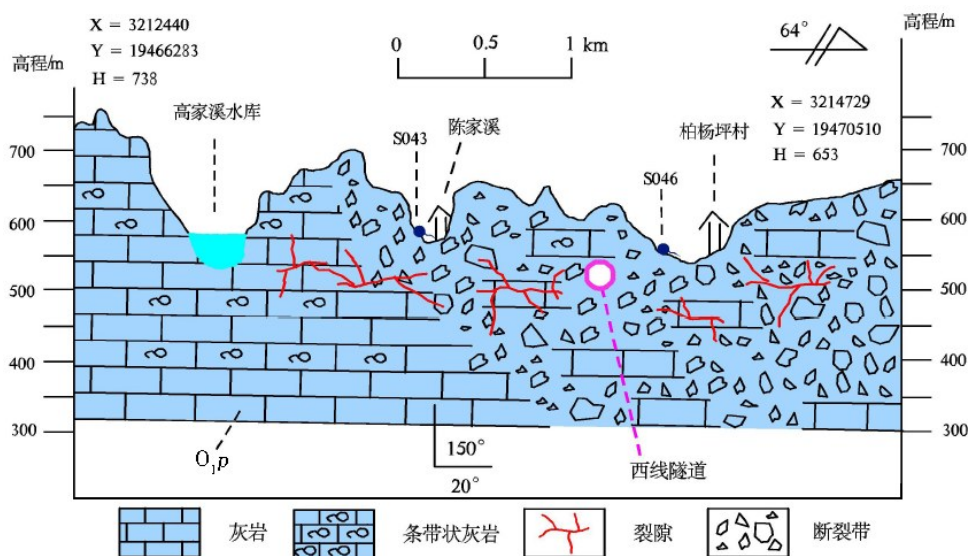


图 10 高家溪水库—隧道西线水文地质剖面示意图

Fig. 10 Hydrogeological profile of Gaojiaxi reservoir-tunnel west line

措施。隧道中、东线在临近黄鱼溪水库一带线路几乎重合,水库对这两条线路的影响相当。总之,高家溪水库总库容为黄鱼溪水库的近 12 倍,临近高家溪水库的西线受水库影响最大。

6 结论和建议

(1)东线沅古坪隧道穿过地表分水岭地带,处于岩溶水动力系统的补给区和垂向分布带的浅饱水带、季节变动带,基本不与岩溶管道立交,远离流量较大的岩溶泉,降雨补给面积最小,因此,总体涌水风险最小,为最佳隧道线路。西线纵穿赤溪河上游地下水系统的中部,穿过径流和排泄区,处于岩溶水动力垂向分带的浅饱水带,并与多条岩溶管道立交,且临近西侧高家溪水库,涌水风险最大;

(2)沅古坪隧道埋深大,处于岩溶水动力垂直分带的浅饱水带,即枯水期地下水位以下、地下河排水口以上的饱水含水带,其往往是岩溶强烈发育地带,对隧道涌水的威胁很大。但含水层碳酸盐岩以泥质条带灰岩和泥质灰岩为主,泥质含量极高,岩溶溶蚀强度有限,含水层具有多层性。溶洞、落水洞和地下河等岩溶现象可能主要沿断层、裂隙等地质构造线发育。另外,东线隧道临近的黄鱼溪水库北段、穿过的郭家界向斜储水构造南段都是涌水高风险区,因此要准确把握各段涌水风险,还需要进一步开展详细的岩溶水文地质调查,并在施工中加强超前地质预报研究,最大程度避免岩溶地质灾害。

致谢:任坤、彭聪、李腾芳、廖红等为参加了项目的野外调查和总结分析工作,兰干江为本文绘制图件,潘晓东为本文提供的指导,审稿专家和编辑为文章的修改完善提出了很多重要的意见。在此深表感谢。

参考文献

- [1] 蒙彦,雷明堂.岩溶区隧道涌水研究现状及建议[J].中国岩溶,2003,22(4):287-292.
- [2] 洪开荣.我国隧道及地下工程发展现状与展望[J].隧道建设,2015,35(2):95-107.
- [3] 郑克勋,裴熊伟,朱代强,等.岩溶地区地下水位变动带隧道涌水问题的思考[J].中国岩溶,2019,38(4):473-479.
- [4] 苏贵芬.新建云桂铁路广南段线路比选及地质控制因素研究[D].成都:成都理工大学,2010.
- [5] 李光伟.论岩溶区工程地质勘察问题与地质选线[J].铁道勘察,2016,42(2):12-15,32.
- [6] 乐重.铁路综合选线原则思考[J].高速铁路技术,2015,6(3):54-58.
- [7] 陈明奎,申玉生,侯瑞彬.大跨度岩溶隧道施工工法比选[J].公路工程,2014,39(2):31-36.
- [8] 许振浩,李术才,李利平,等.基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估[J].岩土力学,2011,32(6):1757-1766.
- [9] 田祖涛,张俊.花梨隧道岩溶水文地质条件及危险性评估[J].中国岩溶,2019,38(4):552-558.
- [10] 赵明阶,敖建华,刘绪华,等.岩溶尺寸对隧道围岩稳定性影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(2):213-217.
- [11] 李天斌,孟陆波,朱劲,等.隧道超前地质预报综合分析方法[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2429-2436.
- [12] 王泽峰,钟世航.陆地声纳法在探测岩溶区高铁隧道基底隐患中的应用[J].中国岩溶,2019,38(4):573-577.

- [13] 王梦恕.对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J].铁道勘察,2004,30(1):7-9,18.
- [14] 刘远鹏,邓荣斌,王子茂,等.岩溶区特大断面小净距隧道群综合探测成果分析[J].武汉工程大学学报,2020,42(5):546-551.
- [15] 唐科行,万川,谭钢,等.广邻路华莹山特长隧道岩溶地质问题与对策[J].中国岩溶,2019,38(4):480-487.
- [16] 何桥,朱代强,郑克勋,等.深埋特长隧道岩溶高压涌水灌浆封堵技术研究与实践[J].中国岩溶,2019,38(4):488-495.
- [17] 彭华中.武汉河流高阶地深隧工程岩溶地质问题及处理分析[J].西部探矿工程,2020,32(11):15-18.
- [18] 韩行瑞.隧道岩溶涌水预报与处治:专家评判系统在沪蓉西高速公路的应用[M].桂林:广西师范大学出版社,2010.
- [19] 李利平.高风险岩溶隧道突水灾变演化机理及其应用研究[D].济南:山东大学,2009.
- [20] 李术才,刘斌,孙怀凤,等.隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1090-1113.
- [21] 曹化平,王科.铁路岩溶隧道工程地质选线研究[J].高速铁路技术,2011,2(1):31-36.

Karst hydrogeological problems in the route selection of Yuanguping tunnel

LUO Wei¹, WU Huaying², HU Huihua¹, MA Deqing¹, ZHANG Peng¹, LI Zhenxing¹

(1.Hunan Provincial Communication Planning Survey&Design Institute Co. Ltd./Hunan Provincial Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology of Southern China, Changsha, Hunan 410200, China; 2.Institute of Karst Geology/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Avoiding high-risk areas of gushing water and mud is the basic principal for karst tunnel selection. The Yuanguping tunnel is a typical long and deep karst tunnel, which passes through the area with strong karst development. There are some important factors affecting the safety of tunnel construction, such as karst underground river, syncline water storage structure, reservoirs on both sides, and the large height difference between the groundwater level and the roof, which are also key hydrological issues to be considered in route selection. To better compare and select the three design lines of the east, middle and west of the tunnel, a 1 : 10,000 special survey of karst hydrogeology was carried out in the tunnel working area. The karst development and hydrogeological characteristics of the working area were found out, and the karst groundwater system was divided, so as to compare the horizontal and vertical zoning of the three tunnel routes. The spatial relationship between tunnel and underground rivers and karst springs was analyzed, and the influence of syncline water storage structure was analyzed combined with geophysical data. The results show that: the east route tunnel passes through the surface watershed zone and is located in recharge area of the karst hydrodynamic system and the seasonal variation zone and shallow saturated zone of the vertical distribution zone. It basically does not intersect with underground river pipelines and is far away from karst springs with large flows, the rainfall replenishment area is the smallest, therefore, the overall risk of water gushing is the smallest, which is the best tunnel route. The west route runs through the middle of the groundwater system. In the upper reaches of Chixi river passes through the runoff and drainage area, and is located in a shallow saturated zone with karst hydrodynamic vertical zoning. It intersects with multiple karst pipelines, and is close to the west side of Gaojiayi reservoir, with the greatest risk of water gushing. The northern section of the east route tunnel near Huangyuxi reservoir and the southern section passing through the Guojiajie syncline water storage structure are all high-risk areas for water gushing. Therefore, it is necessary to expand the supplementary survey of karst hydrogeology, and strengthen the research of advanced geological forecast during construction so as to avoid karst geological disasters to the most extent.

Key words karst tunnel, route selection, hydrodynamic zoning, high water pressure, syncline water storage structure

(编辑 黄晨晖)