

文章编号: 1674—8247(2023)03—0097—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.03.019

# 西南山区某深埋长大隧道水文地质特征及突涌水危险性分析

索朗 徐正宣 宋章 周航

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**西南山区某隧道处于龙门山断裂带西南段内,区域地质构造作用强烈,地形地貌及岩溶水文地质条件复杂,突涌水成为制约隧道勘察设计和安全施工的重大难题。本文采用现场水文地质调查、水化学成分测试、理论分析计算等方法分析了隧道的岩溶发育程度和岩溶发育规律;依据岩溶水补径排条件,划分了工程区水文地质单元;在水文地质分区的基础上,进行了隧道涌水量预测和隧道涌突水危险性评价。研究结果表明:(1)该隧道二叠系栖霞组( $P_1q$ )、奥陶系中统宝塔组( $O_2b$ )为强富水性,泥盆系养马坝组( $D_2y$ )、泥盆系中统观雾山组( $D_2g$ )、志留系下统纱帽组( $S_2s$ )、志留系下统罗惹坪组( $S_2l$ )为中等富水性,晋宁澄江期斜长花岗岩( $\gamma_2$ )、震旦系下统安山岩段( $Za\alpha$ )以及志留系、泥盆系地层中的砂岩和泥岩为弱富水性;(2)该隧道高危险突涌水段 650 m,占比 4.42%;中危险突涌水段 5 879 m,占比 39.98%;较危险突涌水段 7 742 m,占比 52.64%;低危险突涌水段 435 m,占比 2.96%。本文研究成果对西南山区铁路岩溶区高压富水隧道勘察设计和施工具有重要参考价值。

**关键词:**西南山区;深埋长大隧道;水文地质特征;突涌水;危险性分析

中图分类号:U452.1<sup>+</sup>1

文献标识码:A

97

## Analysis of Hydrogeological Characteristics and Water Burst Risk of a Deep and Long Tunnel in Southwest Mountainous Area

SUO Lang XU Zhengxuan SONG Zhang ZHOU Hang

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** A tunnel in the southwest mountainous area is located in the southwest section of the Longmenshan fault zone, its regional geological structure is strong, and the topography and karst hydrogeological conditions are complex. Water burst is thus a major problem restricting the survey, design and safe construction of tunnels. The karst development degree and law of the tunnel were analyzed by means of on-site hydrogeological survey, hydrochemical composition test, theoretical analysis and calculation. The hydrogeological units in the project area were divided according to the karst water recharge, runoff and drainage conditions, and on the basis of hydrogeological division, the tunnel water inflow was predicted and its intrush risk was assessed. The results of the study show that: (1) The Permian Qixia Formation ( $P_1q$ ) and Middle Ordovician Baota Formation ( $O_2b$ ) are strongly water-rich, the Devonian Yangmaba Formation ( $D_2y$ ), Middle Devonian Guanwushan Formation ( $D_2g$ ), Lower Silurian Shamao Formation ( $S_2s$ ), and Lower Silurian Luoreping

收稿日期:2021-11-26

作者简介:索朗(1980-),男,高级工程师。

引文格式:索朗,徐正宣,宋章,等.西南山区某深埋长大隧道水文地质特征及突涌水危险性分析[J].高速铁路技术,2023,14(3):97-101.

SUO Lang, XU Zhengxuan, SONG Zhang, et al. Analysis of Hydrogeological Characteristics and Water Burst Risk of a Deep and Long Tunnel in Southwest Mountainous Area [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3):97-101.

Formation ( $S_2$ ) are moderately water-rich, and the plagiogranite ( $\gamma_2$ ) of Jinning-Chengjiang period, Lower Sinian Andesite section ( $Za\alpha$ ), and the sandstone and mudstone in the Silurian and Devonian strata weakly water-rich. (2) The tunnel section at high risk of water burst is 650 m long, accounting for 4.42% of the total length; the section at medium risk of water burst is 5 879 m long, accounting for 39.98%; the section at risk of water burst is 7 742 m long, accounting for 52.64%; the section at low risk of water burst is 435 m long, accounting for 2.96%. The findings of this paper provide an important reference for the survey, design and construction of railway tunnels in high-pressure and water-rich karst areas in Sichuan's southwestern mountainous regions.

**Key words:** Southwest mountainous area; deep and long tunnel; hydrogeological characteristics; water burst; risk analysis

随着我国交通网络基础建设的迅速发展,越来越多的铁路隧道不可避免穿越岩溶地区,突涌水已成为制约隧道施工建设的重大难题之一<sup>[1-2]</sup>。例如,宜万铁路马鹿箐隧道施工期间发生2次突水事故,造成人员伤亡,导致隧道停工数月<sup>[3]</sup>;圆梁山隧道涌泥后又发生涌水,突水量高达6 900 m<sup>3</sup>/h,严重影响隧道施工建设。因此,本文以西南山区某隧道为工程依托,通过研究分析隧道地形地貌、水文地质、地层岩性、地质构造等条件,分析工程区的岩溶发育程度及发育规律,开展隧道涌水量预测及突涌水危险性综合评估,以为类似工程地质条件下的深埋隧道突涌水防治提供科学依据和技术支持。

## 1 工程地质特征

### 1.1 地形地貌

西南山区某隧道区域山势陡峭,具有较强的地面切割,属剥蚀构造高中山区。隧址区中部地势较高,最高处海拔约3 560 m,相对大渡河高差约2 410 m,相对切割深度大于1 000 m,山体陡峻,悬崖绝壁多见,以尖峭山脊为主,山坡和谷坡坡度较大,一般在40°以上,沟谷多呈“V”状。

### 1.2 气象水文

隧道工程区的气候与其地貌部位,地形特征密切相关。东西坡气候差异较大,东坡潮湿多雨,年降雨量约为1 900 mm,主要集中在8—10月;西坡干燥多风,年降雨仅900~1 000 mm。本文依托隧道工程属于大渡河水系,区内河流纵横密布,呈树枝状水系,其西侧为大渡河一级支流,东侧为天全河支流。

### 1.3 地层岩性

该隧道全长14 706 m,区域地层出露较完整,从元古界震旦系侵入岩、火山岩—古生界奥陶系、志留系、泥盆系、二叠系沉积岩地层及中生界三叠系沉积岩地层均有出露,主要包括灰岩、砂岩、页岩、砾岩等;第四系地层分布在沟谷中,包括砂土、粘土、砂砾石、漂卵石、碎块石、砾卵石层。

### 1.4 地质构造

该隧道在构造部位上处于NW向鲜水河断裂带、NE向龙门山断裂带和SN向安宁河断裂带构成的“Y”字形构造交汇部位的东侧,构造活动强烈,活动断裂发育,如泸定断裂带、三合断裂带等。

## 2 岩溶水系统

### 2.1 地下水类型

根据含水介质特征,隧道工程区地下水主要包括松散堆积层孔隙水、碎屑岩孔隙裂隙水、基岩裂隙水、碳酸盐岩夹碎屑岩岩溶裂隙水、断裂破碎带孔隙裂隙水<sup>[4-5]</sup>。

### 2.2 富水性分层

#### 2.2.1 松散岩类孔隙水含水岩组

该含水层具多层性,且分布不连续,厚、薄不均,富水程度不等,水量动态变化大。赋存于沟谷中的冲洪积层内的孔隙水主要是降水,冬季主要为冰雪融水和两侧山体地下水的补给,顺沟谷向下游排泄,并与溪、河水关系密切,互为补排关系,富水性、透水性好,水量动态变化小。

#### 2.2.2 碎屑岩裂隙孔隙水含水岩组

隧道工程区由于受构造、岩性特征、露头高程、溪沟切割等影响,工程区碎屑岩裂隙孔隙水分布不均,其中泥盆系下统平驿铺组( $D_{1p}$ )、三叠系上统须家河组( $T_3xj$ )岩性以厚层状砂岩为主,分布地势较低,碎屑岩孔隙裂隙水富水性、透水性较好,为此类地下水丰富的含水岩组,其它地层则以泥质岩类为主,多呈薄~中厚层状,富水性、透水性相对较差,地下水相对较贫乏。

#### 2.2.3 基岩裂隙水含水岩组

岩浆岩裂隙水主要赋存于震旦系下统安山岩段( $Za\alpha$ )、流纹岩段( $Za\lambda$ )、元古界花岗岩( $\gamma k_2$ 、 $\gamma M_2$ )、闪长岩( $\delta_2$ 、 $\delta O_2$ )的风化裂隙和节理中。工程区岩体受断层影响节理、完整性不均,基岩裂隙水具分布不均的特点,其节理密集带为其富水带,完整性较好的岩

体中的地下水较贫乏,从总体而看,场地内岩浆岩裂隙水欠丰富。

2.2.4 碳酸盐岩夹碎屑岩岩溶裂隙水含水岩组

受地质构造、岩性特征、露头高程、溪沟切割制约等影响,碳酸盐岩夹碎屑岩岩溶裂隙水含水岩组的含水层水量变化大,其中志留系上统罗惹坪组(S<sub>2</sub>l)、泥盆系中统养马坝组(D<sub>2</sub>y)岩性以中厚~厚层状的灰岩为主,岩层中溶洞、溶隙、溶孔较其它地层发育,富水性、透水性较好,为此类地下水较丰富的含水岩组。其它地层则以碳酸盐、碎屑岩互层为主,多呈薄~中厚层状,富水性、透水性相对较差,地下水相对较贫乏,水量一般。

2.3 岩溶水补径排条件

隧道工程区由于东西坡地形、植被、坡面覆盖、降水、蒸发条件以及含水层埋藏情况等差异,区内地下水的补给,径流、排泄条件也有东西单元之别。从补给条件看,东坡降水丰沛,年均降水量达1 900 mm,对地下水接受降水的补给有利;然而,东坡地面坡度陡,且坡面多为厚度很小的碎石土覆盖,丰沛降水又成为地下水补给的不利因素。西坡降水较少,年均降水量为900~1 000 mm,且主要含水层有隔水顶板(相对隔水层)的存在,不利于降水补给地下水;然而,西坡地面坡度较小(25°左右),坡面多有架空块碎石层覆盖,这对降水入渗补给地下水有利。西坡上部潜水含水层补给较为充分,而下部溶隙-裂隙潜水-承压水含水层补给区仅为近分水岭的约1.8 km<sup>2</sup>的面积。该层出露的沟区,地表水入渗补给及沿垂直裂隙,特别是膝状构造裂隙的垂直越层补给亦起到一定作用。从径流排泄条件上看,东、西坡均因地形切割深,地形坡度总体较大,侵蚀基准面低,形成潜水含水带层,地下水径流交替强烈,地下水接受补给后历经短距离径

流即很快排泄,具有山区地下水的普遍特征。排泄方式以浸润状片流为主,集中或泉水排泄较少。对于西坡下伏溶隙-裂隙含水层,由于有较好的封闭条件,地下水径流条件较差,循环交替缓慢,排泄方式以集中或大泉排泄为主。

2.4 岩溶水文地质单元划分

工程区地下水的分布和埋藏在平面上明显地分为东坡水文地质单元和西坡水文地质单元。东坡水文地质单元内地下水基本赋存于沿斜坡的浅表部风化裂隙带内,在该带内地下水赋存的多少与岩性组合状况相关,泥岩等软质岩石以风化裂隙密集发育为特征,但裂隙多闭合,延伸短促,切层性差,不利于地下水的赋存和运移,而砂岩、灰岩等硬质岩石,虽裂隙发育不密集,但裂隙延伸远,切层性好,且有一定的开启程度,有利于地下水的存储,所以该类岩层富水性一般较好。西坡水文地质单元地下水赋存于层内构造裂隙,溶隙、溶孔、小型溶洞及层间裂隙之中,构成单斜储水构造,地下水由分水岭至山下形成补给区、径流区及排泄区,以及潜水-承压水的特征。

2.5 水化学及同位素特征分析

对工程区区地表水、地下水及钻孔水进行了系统的采样及水化学测试,测试结果如表1所示。西南山区某隧道地表水为HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca型水或HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Mg型水或HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg型水,矿化度值变化较大,在39.67~258.07 mg/L之间。东坡降水丰富,地表水交替较强烈,地表水pH值7.73~8.21,属于中~弱碱性、软至微硬的低矿化淡水。地下水水质以泉水的水质来表征。东坡共采取泉水样3件,泉水化学类型HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca型水或HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Mg型水,泉水pH值在7.65~8.23之间,矿化度值在113.93~226.83 mg/L之间。

表1 西南山区某隧道水化学测试结果表

采样 编号	性质	pH值	矿化度/ (mg/L)	主要阳离子/(mg/L)			主要阴离子/(mg/L)			水化学类型
				K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
BW01	沟水	7.73	39.67	1.02	9.62	0.97	0.61	13.47	23.68	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca
BW02	泉水	7.65	113.93	2.60	30.52	5.05	0.73	29.32	88.78	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca
BW03	泉水	8.03	226.83	1.41	61.47	12.95	0.61	56.67	183.49	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Mg
BW04	沟水	8.21	239.75	1.67	60.97	18.17	0.63	62.23	189.41	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Mg
BW05	泉水	8.23	223.23	0.74	64.20	10.15	0.63	63.47	165.73	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca
BW06	沟水	8.17	258.07	0.80	75.47	12.06	0.64	70.46	195.33	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca
BW07	沟水	8.14	111.55	1.05	37.17	12.48	0.58	25.87	136.14	HCO <sub>3</sub> -Ca·Mg

3 隧道涌突水危险性分析

3.1 隧道涌水量预测

通过分析地下水动态规律的研究,研究隧道施工

期地下水的均衡,建立某一期(均衡期)地下水收、支之间的均衡变化关系,进而获得施工段隧道可能的涌水量。根据隧道水文地质特征的实际条件,采用铁路勘察规程经验公式计算隧道最大和正常涌水量:



$$Q_{\max} = 0.0255 + 1.9224KH \tag{1}$$

$$Q_s = KH(0.676 - 0.06K) \tag{2}$$

式中:  $Q_{\max}$ ——预测隧道通过含水体可能最大涌水量( $\text{m}^3/\text{d}$ );  
 $Q_s$ ——预测隧道通过含水体正常涌水量( $\text{m}^3/\text{d}$ );  
 $K$ ——岩体的渗透系数( $\text{m}/\text{d}$ );  
 $H$ ——含水层中原始静水位至隧道底板的距离( $\text{m}$ )。

为准确获知工程区地层的渗透性,在隧道工程区开展抽水试验,水文地质参数如表2所示。岩体渗透系数  $K$  根据抽水试验和工程经验综合确定。

表2 隧道工程区抽水试验水文地质参数表

岩性	试验次序	渗透系数 $K/(\text{m}/\text{d})$	渗透系数平均值 $K/(\text{m}/\text{d})$
粉砂岩夹炭质页岩	1	0.002973	0.00296
	2	0.002963	
	3	0.002958	
粉砂岩夹页岩、泥灰岩夹页岩、砂岩夹泥灰岩、炭质页岩	1	0.0027	0.00296
	2	0.0029	
	3	0.0033	
粉砂岩夹页岩、砂页岩、砾岩	1	0.0302	0.0493
	2	0.0462	
	3	0.0716	
花岗岩	1	0.00239	0.00247
	2	0.00255	
	3	0.00248	

根据隧道地形地貌条件、岩溶发育特征、含水层地下水的分布及赋存情况,结合地质勘察成果,将隧道全线分为22个区段,采用铁路经验公式分段对隧道涌水量进行评价和预测,如表3所示。

3.2 隧道突涌水危险性评价

本文选择岩石的可溶性( $R_1$ )、地质构造因素( $R_2$ )、地表汇水条件( $R_3$ )、隧洞所处循环带( $R_4$ )、隧洞埋深与地下水位的关系( $R_5$ ),组成了岩溶隧洞涌突水危险性评价的初步评价指标体系,岩溶隧洞涌突水危险性分级标准如表4所示。通过对影响隧道涌突水的因素进行量化处理,并对上述5个指标进行赋值,得到隧道的危险性分区,如表5所示。

3.3 隧道突涌水危险性综合分析

隧道涌突水在空间结构上差异显著,具体表现为同一条隧道在不同的里程上等级存在明显的差异。本文充分考虑隧道工程区的地质构造、地层特征、岩性、水文分区特征,并结合隧道涌水量评价以突涌水危险性分区等级研究,综合确定隧道工程区危险性等级划分长度及占比,如图1所示。隧道全长14706m,

表3 隧道涌水量表

勘测段序号	长度/m	地层、构造	$K/(\text{m}/\text{d})$	$H/(\text{m})$	$Q_{\max}/(\text{m}^3/\text{d})$	$Q_s/(\text{m}^3/\text{d})$
1	1384	$T_3xj$	0.003	155	1272	435
2	100	断层	0.2	193	7423	2563
3	636	$D_2y$	0.003	218	816	281
4	899	$D_2g$	0.003	240	1267	437
5	50	断层	0.2	318	6115	2112
6	437	$O_1q$	0.018	303	4593	1609
7	200	断层	0.2	276	21228	7331
8	546	$\gamma k_2$	0.0025	213	573	197
9	1819	$O_1h$	0.003	275	2931	1014
10	115	断层	0.15	355	11775	4085
11	320	$O_1q$	0.018	362	4017	1407
12	450	$O_2-O_3$	0.018	405	6318	2214
13	187	断层	0.15	423	22814	7914
14	2163	$S_3hx$ 、 $S_{1-2}h$	0.003	597	7502	2618
15	300	断层	0.15	594	51393	17829
16	2455	$Nhsa$ 、 $\gamma k_2$	0.0025	483	5761	2003
17	270	断层	0.2	510	52950	18287
18	1550	$\gamma k_2$	0.0025	349	2639	914
19	50	断层	0.2	80	1539	531
20	190	$myl$	0.0025	62	61	20
21	150	断裂带	0.2	37	2138	737
22	435	$myl$	0.015	12	162	53
总计					215289	74590

表4 岩溶隧洞涌突水危险性分级标准表

危险性等级	极危险区	高危险区	中危险区	较危险区	低危险区
评价分值	>77	62~77	38~62	23~38	<23
说明	风险性极高	风险性高	风险性较高	风险性较低	风险性低
单点最大涌水量/ $\text{m}^3/\text{d}$	>10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup> ~10 <sup>4</sup>	10 <sup>2</sup> ~10 <sup>3</sup>	10~10 <sup>2</sup>	<10

其中高危险突涌水段650m,占比4.42%;中危险突涌水段5879m,占比39.98%;较危险突涌水段7742m,占比52.64%;低危险突涌水段435m,占比2.96%。

结合隧道地质条件以及突涌水危险性分析结果,隧道在穿越断层破碎带时,发生涌突水灾害的可能性和危害性较大。此外,隧道工程区可溶岩段落的岩溶涌突水危险性较高,主要该段地下水的径流条件较好,地表分布有洼地、岩溶漏斗等,岩溶较发育。

3.4 隧道工程施工建议

隧道断层破碎带、层间挤压破碎带、岩体差异风化带、可溶岩地段及物探V类异常带等段落围岩稳定性差,且地下水丰富,隧道施工易发生涌水、突泥和坍塌。

表5 隧道突涌水危险性评价结果表				
勘测段 序号	地质条件			危险性 等级
	长度/km	地层	岩性	
1	1 384	T <sub>3</sub> xj	砂岩	较危险区
2	100	断层	—	高危险区
3	636	D <sub>2</sub> y	砂页岩夹灰岩	中危险区
4	899	D <sub>2</sub> g	砂岩夹灰岩	中危险区
5	50	断层	—	高危险区
6	437	O <sub>1</sub> q	灰岩夹砂页岩	中危险区
7	200	断层	—	高危险区
8	546	γk <sub>2</sub>	花岗岩	中危险区
9	1 819	O <sub>1</sub> h	砂岩夹泥岩	中危险区
10	115	断层	—	中危险区
11	320	O <sub>1</sub> q	灰岩夹砂页岩	中危险区
12	450	O <sub>2</sub> -O <sub>3</sub>	灰岩夹砂页岩	中危险区
13	187	断层	—	中危险区
14	2 163	S <sub>3</sub> hx、S <sub>1-2</sub> h	泥页岩夹灰岩	较危险区
15	300	断层	—	高危险区
16	2455	Nhsa、γk <sub>2</sub>	安山岩、花岗岩	较危险区
17	270	断层	—	中危险区
18	1 550	γk <sub>2</sub>	花岗岩、闪长岩	较危险区
19	50	冲断层	—	中危险区
20	190	myl	糜棱岩	较危险区
21	150	断裂带	—	中危险区
22	435	myl	糜棱岩上覆粘砂土、砂砾石	低危险区

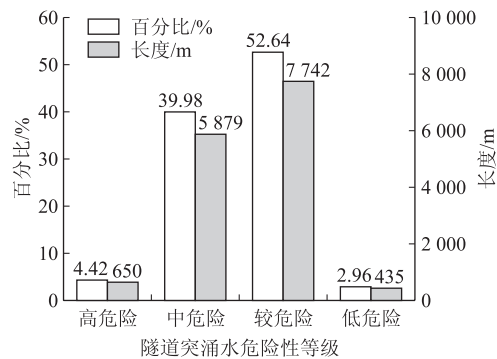


图1 西南山区某隧道危险性等级划分长度及占比图

塌等灾害,应加强超前地质预报预测工作和隧底及隧周的探测与评价,施工过程中建议采用“短进尺,快循环,弱爆破,少扰动,紧封闭”的掘进方法,加强隧道围岩初期支护和监控量测,紧跟衬砌,以防止和减轻因突水、突泥和坍塌所造成的灾害。

4 结论

本文通过分析西南山区某隧道地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质等条件,研究了隧道工程区的

岩溶发育程度及发育规律。根据岩溶水的补径排条件,划分了水文地质单元,并开展涌水量预测及突涌水危险性评价,得出结论如下:

(1)隧道二叠系栖霞组(P<sub>1</sub>q)、奥陶系中统中统宝塔组(O<sub>2</sub>b)为强富水性,泥盆系养马坝组(D<sub>2</sub>y)、泥盆系中统观雾山组(D<sub>2</sub>g)、志留系下统纱帽组(S<sub>2</sub>s)、志留系下统罗惹坪组(S<sub>2</sub>l)为中等富水性,晋宁—澄江期斜长花岗岩(γ<sub>2</sub>)、震旦系下统安山岩段(Zaα)以及志留系,泥盆系地层中的砂岩和泥岩为弱富水性。

(2)根据铁路勘察规程经验公式,计算得到该隧道正常涌水量为74 590 m<sup>3</sup>/d,最大涌水量为215 289 m<sup>3</sup>/d。

(3)隧道全长14 706 m,其中高危险突涌水段650 m,占比4.42%;中危险突涌水段5 879 m,占比39.98%;较危险突涌水段7 742 m,占比52.64%;低危险突涌水段435 m,占比2.96%。

参考文献:

[1] 黄鑫,李术才,许振浩,等. 暗河发育区隧道选线与突涌水灾害预控分析[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 101-117, 140.  
HUANG Xin, LI Shucai, XU Zhenhao, et al. Tunnel Route Selection and Water Inrush Precontrol Analysis for Underground River Development Areas [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 101-117, 140.

[2] 刘招伟,何满潮,王树仁. 圆梁山隧道岩溶突水机理及防治对策研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 228-232, 246  
LIU ZhaoWei, HE Manchao, WANG Shuren. Study on Karst Waterburst Mechanism and Prevention Countermeasures in Yuanliangshan Tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 228-232, 246.

[3] 宋章,王科,蒋良文,等. 岩溶区铁路勘察防治技术研究现状及发展趋势[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(5): 38-43.  
SONG Zhang, WANG Ke, JIANG Liangwen, et al. Research Status and Developing Trends of Reconnaissance and Control Technology of Railway in Karst Area [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(5): 38-43.

[4] 徐正宣,彭芬. 方斗山隧道岩溶水文地质条件及危险性研究[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(4): 28-33.  
XU Zhengxuan, PENG Fen. Karst Hydrogeology and Risk Research on Fangdoushan Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(4): 28-33.

[5] 陈明浩,邓宏科,张广泽,等. 昭通隧道岩溶水文地质特征及突涌水危险性评价[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 34-39.  
CHEN Minghao, DENG Hongke, ZHANG Guangze, et al. Analysis of Karst Hydrogeological Characteristics and Risk Assessment of Water Inrush for the Zhaotong Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 34-39.