

# 穿越复杂岩溶环境的特长隧洞涌突水危险性评价 ——以滇中引水工程小扑隧洞为例

田毅<sup>1</sup>, 凌成鹏<sup>2</sup>, 李桦柳<sup>2</sup>, 赵永川<sup>1</sup>, 李建国<sup>1</sup>

1. 云南省水利水电勘测设计研究院, 昆明 650021;

2. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610059

[摘要] 在复杂岩溶区, 涌突水危险性评价是保障隧洞施工安全的重要工作内容之一。以滇中引水工程玉溪红河段小扑隧洞为例, 在分析隧洞地质与水文地质条件的基础上, 综合考虑岩石的可溶性、地质构造因素、地表汇水条件、地下水化学特征、隧洞埋深与地下水位的关系 5 个控制性因素, 采用岩溶隧洞涌突水危险性评价系统对隧洞的涌突水危险性进行了预测与验证。结果表明: 小扑隧洞北段位于鲁纳寺—牛恋村岩溶子系统的径流区。在丰水期, 隧洞岩溶涌突水中危险区、高危险区、极高危险区的长度占比分别为 15.8%, 55.4%, 28.8%。小扑隧洞南段位于西河和祭天山—黄营岩溶子系统的补给、径流区。在丰水期, 隧洞涌突水中危险区、高危险区、极高危险区的长度占比分别为 7.4%, 52.7%, 39.9%。施工阶段, 小扑隧洞北段主洞揭露暗河管道, 发生涌突水事故, 2#支洞发生突水涌沙事故, 与对应的涌突水高-极高危险性结果吻合。涌突水危险性评价结果有效地支撑了隧洞的涌突水灾害防治与安全施工。

[关键词] 滇中引水工程; 特长隧洞; 岩溶; 涌突水; 危险性评价

[分类号] P641.69

[文献标志码] A

## Risk assessment of water inrush in an extra-long tunnel through a complex Karst area—A case study of Xiaopu Tunnel in the Central Yunnan Water Diversion Project

TIAN Yi<sup>1</sup>, LING Chengpeng<sup>2</sup>, LI Hualiu<sup>2</sup>, ZHAO Yongchuan<sup>1</sup>, LI Jianguo<sup>1</sup>

1. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China;

2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

[收稿日期] 2023-06-16。

[基金项目] 国家自然科学基金青年科学基金项目(41402268)。

[第一作者] 田毅(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向: 水文地质及工程地质勘察, E-mail: 369913145@qq.com。

[通信作者] 凌成鹏(1983—), 男, 副教授, 研究方向: 岩溶水文地质、水文地球物理, E-mail: lingcp2015@163.com。

[引用格式] 田毅, 凌成鹏, 李桦柳, 等, 2024. 穿越复杂岩溶环境的特长隧洞涌突水危险性评价——以滇中引水工程小扑隧洞为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(4): 687-697.

Tian Y, Ling C P, Li H L, et al., 2024. Risk assessment of the water inrush in an extra-long tunnel through a complex Karst area—A case study of Xiaopu Tunnel in the Central Yunnan Water Diversion Project [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(4): 687-697.

**Abstract:** Assessing the risk of water inrush is an important means of ensuring the safe construction of tunnels in complex Karst areas. This study assesses the risk of water inrush in the Xiaopu Tunnel, which is located in the Yuxi-Honghe section of the Central Yunnan Water Diversion Project. We first analyzed the geology and hydrogeological setting of the area. We then considered five key factors—the solubility of rocks, geological tectonic features, characteristics of the catchment of surface water, chemical characteristics of groundwater, and the relationship between the tunnel and groundwater level—to develop a system to assess the risk of water inrush into the Karst tunnels. The results showed that the northern section of the Xiaopu Tunnel was located in the runoff zone of the Lu'nasi-Niuliancun Karst subunit. The ratios of length of medium, high, and extremely high risks of water inrush in this section accounted for 15.8%, 55.4%, and 28.8% in the rainy season, respectively. The southern section of the Xiaopu Tunnel was located in the recharge and runoff zone of the Xihe and Jitianshan-Huangying Karst subunits. The ratios of length of medium, high, and extremely high risks of water inrush in this section accounted for 7.4%, 52.7%, and 39.9% in the rainy season, respectively. Branches of tunnels 1# and 2# in the northern section exposed the subsurface river, and were subjected to inrushing water during construction, where this is consistent with the results of prediction of high to extremely high risk of water inrush in this section. The results of assessment of the risk of water inrush can support measures for the prevention and control of inrushing water to ensure the safe construction of tunnels.

**Key words:** Central Yunnan Water Diversion Project; extra-long tunnel; Karst; water inrush; risk assessment

滇中地区是云南省经济最发达的地区,也是长江流域最干旱缺水地区之一。滇中引水工程是国务院批准的《长江流域综合规划(2012—2030年)》提出的解决滇中地区严重缺水问题的特大型调水工程。滇中引水工程从丽江市玉龙县石鼓镇上游 1.5 km 的金沙江取水,自石鼓镇望城坡开始输水,途经丽江市、大理州、楚雄州、昆明市、玉溪市,终点为红河州新坡背(瞿霜菊等,2013)。

滇中引水工程输水线路总长 661.07 km,穿越岩溶区的长度占总长的 21%。输水建筑物 129 座,其中隧洞 63 座,总长 607.23 km,占比高达 91.86%。输水线路隧洞需要穿越滇西、滇中、滇东南 3 大岩溶区,岩溶条件极为复杂(裴建国等,2008)。隧洞穿越复杂岩溶区时可能遭受突水突泥等地质灾害,造成人员伤亡,减缓施工进度。

一些研究人员从控制隧道涌突水的主控因素出发,建立了涌突水灾害的分级与评级体系。马士伟(2009)在分析岩溶隧道涌突水地质灾害发生机理的基础上,建立了包括地质构造特征、涌水量特征、围岩稳定特征、灾害危害程度等因素的涌突水地质灾害分级;雷军(2011)通过研究宜万铁路 8 条典型岩溶隧道工程的涌突水灾害,建立了包

括地形地貌、地质条件、地表水系统、地下水、岩溶发育深度等因素的岩溶涌突水危险性评价综合分析指标体系。

针对西南山区岩溶隧道,杨艳娜等(杨艳娜,2009;杨艳娜等,2015)从岩溶发育控制因素、隧道施工条件出发,选取岩溶可溶性、地质构造因素、地表汇水条件、地下水循环交替条件、隧道埋深与地下水位关系 5 个主要指标项,建立了岩溶隧道涌突水危险性评价系统。隧道涌突水危险性评价系统被用于四川、重庆等地的多个岩溶隧道,有效地支撑了隧道施工的涌突水灾害防治工作(毛邦燕,2010;赵红梅,2013;许模等,2015;高朋,2021)。

小扑隧洞是滇中引水工程玉溪段的渠首工程。隧道起点位于昆明市晋宁区新庄村,终点位于玉溪市江川区阿豆村。小扑隧洞全长 32.066 km,设计流量 36 m<sup>3</sup>/s,隧洞底宽 3.8 m。小扑隧洞穿越王家湾向斜西翼与龙马山向斜北翼的震旦系、泥盆系、石炭系和二叠系碳酸盐岩地层,含水层富水性中等-强,隧洞涌突水风险大。本文采用隧洞岩溶涌突水灾害危险性评价方法(杨艳娜,2009;许模等,2015)对小扑隧洞岩溶段的涌突水危险性进行了评价,并结合施工调查资料进行了

验证。

## 1 隧址区地质条件

### 1.1 地形地貌

小扑隧洞进出口高程分别为 1 881.7 m 和 1 949.6 m。隧道北段(YX0+000—YX23+105)位于金沙江流域,南段(YX23+105—YX32+066)位于南盘江流域。区域属于滇中区的构造剥蚀低山丘陵区。隧址区位于云贵高原西南部金沙江和南盘江水系的分水岭地带,一般海拔 1 600~2 000 m。低山丘陵呈波状起伏,山顶浑圆,坡度

平缓,沟谷开阔。

### 1.2 地层岩性

区域内地层发育,除奥陶系、志留系、白垩系外,自中元古界至第四系均有出露。隧洞洞身主要通过的碳酸盐岩地层有二叠系阳新组( $P_{1y}$ )、石炭系中下统( $C_{1-2}$ )、泥盆系上统( $D_3$ )、海口组( $D_2h$ )、震旦系灯影组( $Z_bdn$ )、陡山沱组( $Z_b d$ )。其中,阳新组( $P_{1y}$ )地层岩性主要为灰岩,石炭系威宁群( $C_2w$ )与泥盆系上统( $D_3$ )地层岩性主要为灰岩夹白云岩、白云岩夹白云质灰岩,灯影组( $Z_bdn$ )地层岩性主要为白云岩(见表 1)。

表 1 小扑隧洞隧址区岩溶含水岩组及其富水性一览表

Table 1 Karst aquifer groups and their water contents in the area of Xiaopu Tunnel

岩溶地下水亚类	富水性级别	主要地层	主要岩性特征	分布区域和主要水文地质特征
纯碳酸盐岩岩溶水	强富水性	阳新组( $P_{1y}$ )	灰岩	于观音山、对门、干洞一带以南北条带状出露,出露宽度 300~800 m 不等。于玉溪新铺、江川新庄、江城庄科一带以北西-南东条带状出露,出露宽度 400~800 m 不等。暗河强烈发育,地下水径流模数 10~15 L/s·km <sup>2</sup>
	中等富水性	石炭系中下统( $C_{1-2}$ ), 泥盆系上统( $D_3$ ), 灯影组( $Z_bdn$ )	灰岩、白云岩 夹少量 泥岩或页岩	石炭系与泥盆系地层主要分布于竹园、偏头山、菜子塘一带,出露宽度仅有 200~300 m。 $Z_bdn$ 于段七村、王家湾、龙潭村一带以南北条带状出露,出露宽度 600~1 600 m 不等。 $Z_bdn$ 于堰塘、白家营一带出露,出露宽度在 500 m 以上。暗河中等发育,地下水径流模数 5~10 L/s·km <sup>2</sup> 。
碳酸盐岩夹非碳酸盐岩岩溶水	中等富水性	陡山沱组( $Z_b d$ )	灰岩、白云岩 夹砂岩	$Z_b d$ 于段七村、摆衣冲、者赋村一带出露,出露宽度仅有 200~300 m。暗河发育中等,地下水径流模数 10~15 L/s·km <sup>2</sup>
	弱富水性	海口组( $D_2h$ )	泥质白云岩、 砂岩	$D_2h$ 于石山、菜子塘一带出露,出露宽度一般为 100~200 m 不等。暗河(溶洞)不甚发育,地下水径流模数 <10 L/s·km <sup>2</sup>

### 1.3 地质构造

隧址区北段在晋宁段主要受走向南北的构造形迹控制,形成延伸超过 70 km 的王家湾向斜。王家湾向斜轴向为北稍偏西(350°左右),自北向南延展达 20 km。向斜翼部由中、上泥盆统、石炭系、二叠系组成,而轴部被中生代盆地所覆盖。出露的两翼岩层倾角一般为 30°~40°,少数 50°,为一对称向斜,枢纽南端向上挠起。隧址区北段位于王家湾向斜西翼,向斜西翼发育有王家湾正断层及一系列短小的斜交轴向的平移断层。王家湾正断层出露长约 20 km,断层面倾向东,倾角 64°左右,为一走向断层(见图 1)。

隧址区南段穿越龙马山向斜北翼,向斜轴从龙马山沿东西向延伸至前卫镇旧村。组成向斜翼

部的中、上泥盆统、下-中石炭统、二叠系的倾角一般为 25°~30°,少数变缓或变陡。南翼因受北西向石洞河-长岭岗断裂( $F_{33}$ )影响而缺失,轴部已全部被中生代的安化构造盆地占据,加以向斜北翼向北强烈凸出,使向斜在平面上成一个近等腰三角形形态(见图 2)。

## 2 隧址区水文地质条件

### 2.1 地下水类型及岩溶含水岩组划分

区域地下水类型可分为松散堆积层孔隙水、碳酸盐岩岩溶水和基岩裂隙水。隧址区的地下水主要类型为碳酸盐岩岩溶水,细分为纯碳酸盐岩岩溶水和碳酸盐岩夹非碳酸盐岩岩溶水 2 个亚类。岩溶含水岩组及其富水性见表 1。

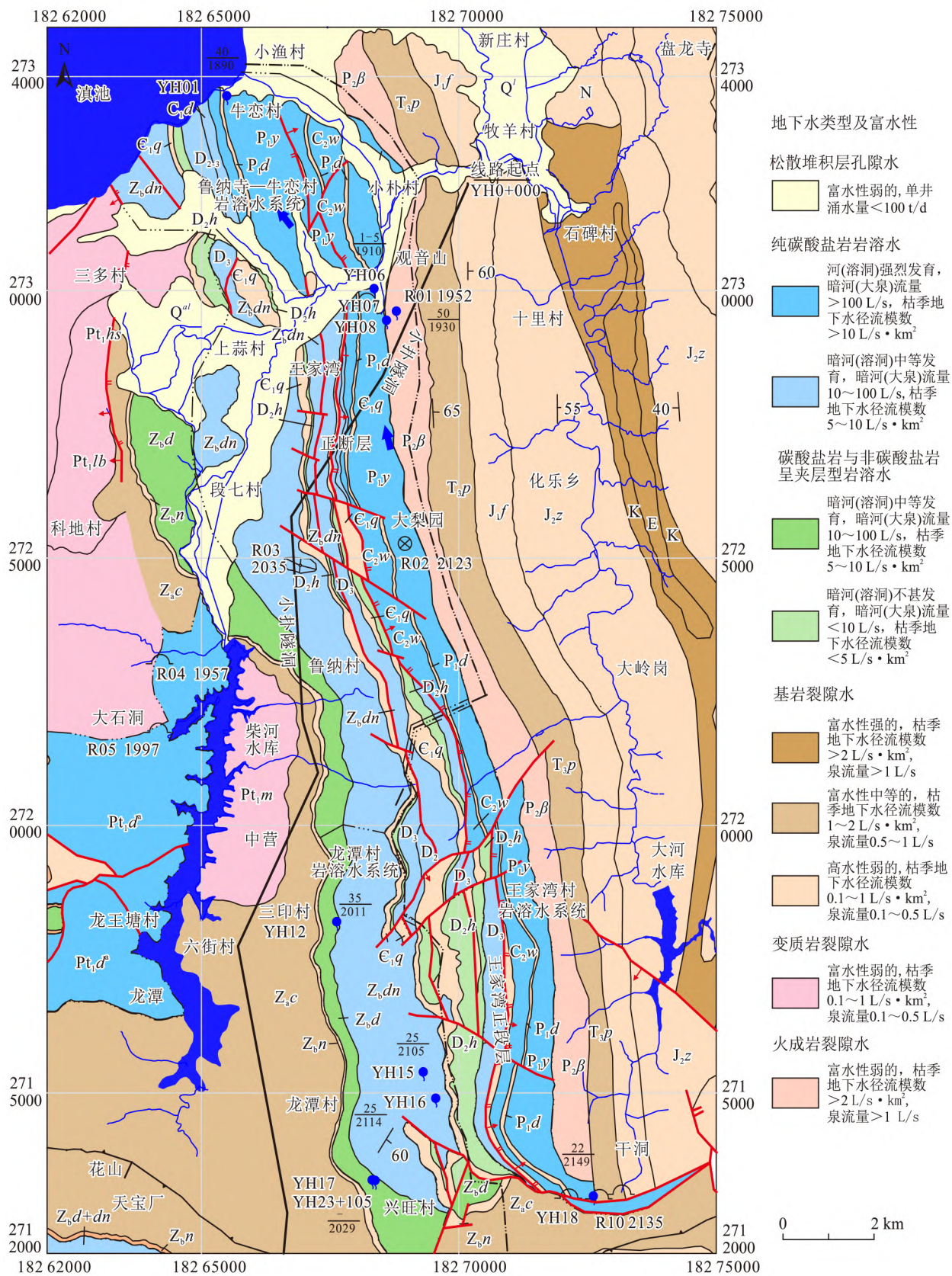


图 1 小扑隧洞(YX0+000—YX23+105)隧址区水文地质平面图

Fig. 1 Hydrogeological map of Xiaopu Tunnel (YX0+000—YX23+105)

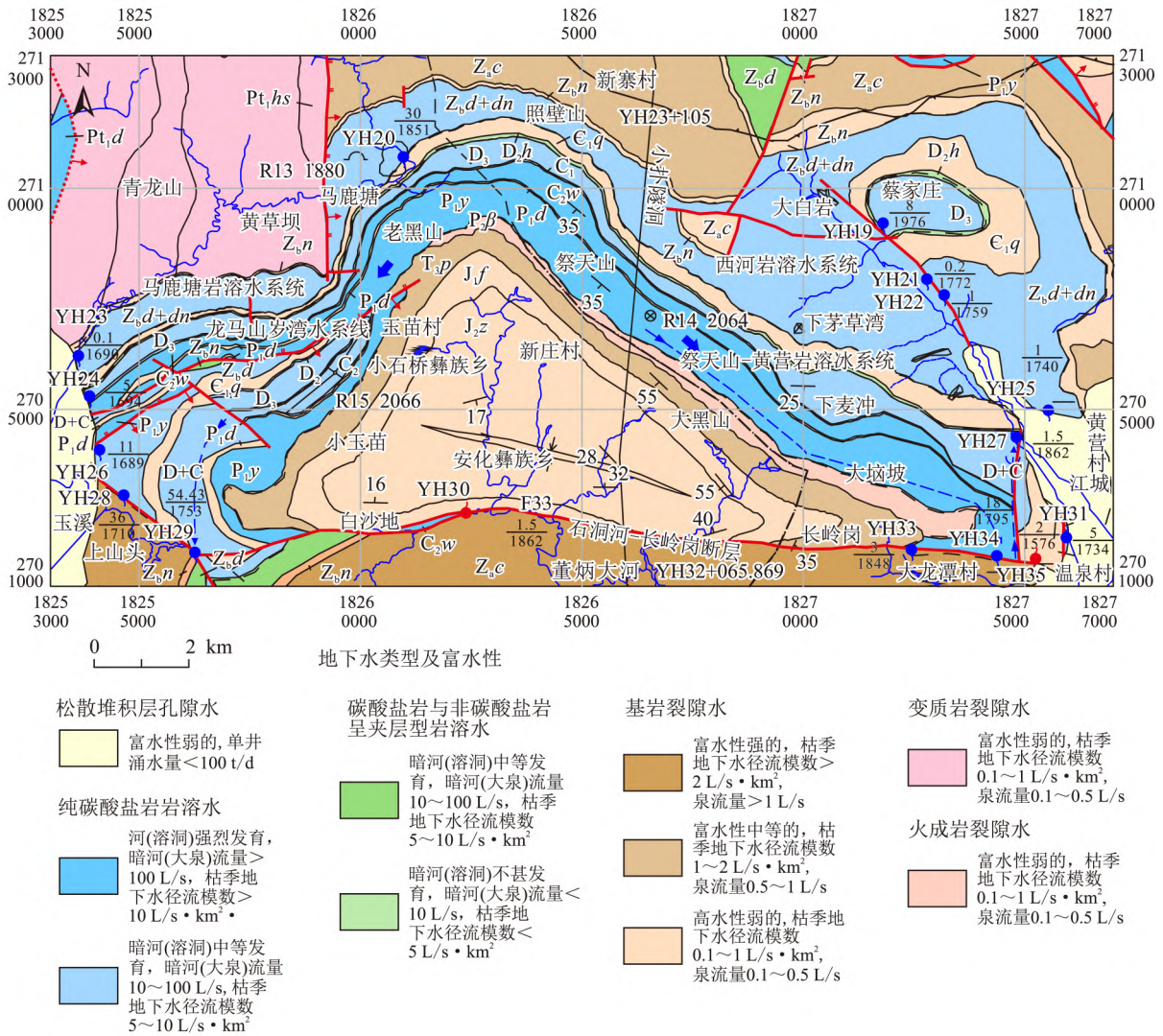


图 2 小扑隧道 (YX23+105—YX32+066) 隧址区水文地质平面图  
Fig. 2 Hydrogeological map of Xiaopu Tunnel (YX23+105—YX32+066)

## 2.2 地下水系统划分

根据区域河流、地形地貌、碳酸盐岩分布、泉点出露等特征, 划分小扑隧洞隧址区岩溶水系统, 具体见表 2。隧址区可以划分为 4 个一级岩溶水系统与 7 个二级岩溶系统。

隧洞北段 (YX0+000—YX23+105) 位于滇池水系统, 区域岩溶水系统为条带状岩溶水系统。东西两侧分别以完整的非可溶岩层位为隔水边界, 以偏头山一带地下水分水岭为界, 北侧为鲁纳寺—牛恋村岩溶子系统, 南侧为龙潭村岩溶子系统和王家湾岩溶子系统。在鲁纳寺—牛恋村岩溶子系统, 地下水向北径流, 在牛恋村、观音村一带排泄。小扑隧洞穿越鲁纳寺—牛恋村岩溶子系统的径流区。在龙潭村岩溶子系统, 地下水由东向

西径流, 在三印村、龙潭村一带以泉点形式排泄。在王家湾岩溶子系统, 地下水总体流向为从北向南, 到中干洞出露成泉, 排入大河水库。

隧洞南段 (YX23+105—YX32+066) 穿越龙马山向斜, 位于玉溪盆地与江城盆地之间。由于石洞河—长岭岗断层的切割, 龙马山向斜南翼可溶岩地层消失, 北翼为一完整向斜, 依次出露有二叠系灰岩和石炭系、泥盆系白云岩。小石桥、新庄、龙马山等地均有洼地、落水洞、溶洞出露, 为区内地下水主要补给区。龙马山向斜北翼东段为江城岩溶水系统, 为系统内的主要蓄水构造。向斜汇集地下水并在江城龙街附近集中排泄, 成为江城镇许多村镇的重要饮用水源, 蔡家庄断层破碎带为系统内重要的富水构造与地下水出露带。龙马

山向斜北翼西段为玉溪岩溶水系统,为主要蓄水构造,向斜汇集地下水并在玉溪北街一带形成富

水区,以玉溪白龙潭、双林寺泉等集中排泄(肖斌, 2014)。

表 2 小扑隧洞隧址区岩溶水系统划分及其特征一览表

Table 2 Division of the Karst groundwater system and its characteristics in Xiaopu Tunnel

地表水系	岩溶水系统名称		地理位置	地层	地下水补给、径流、排泄特征
	一级水系统	二级水系统			
滇池水系统	大河岩溶水系统	王家湾岩溶子系统	王家湾村—青菜村—干洞村	$P_{1y}, C_{1-2}, D_3$	可溶岩呈近南北向条带状分布,发育有溶洞、岩溶槽谷等,地下水接受大气降雨补给。地下水由北向南径流,由对门至中干洞进行径流,在中干洞以泉点排泄,最后向大河地表水系进行排泄
		柴河岩溶水系统	鲁纳寺—牛恋村岩溶子系统	鲁纳寺—金线洞,大梨园—观音村	$P_{1y}, C+D, Z_b dn, Z_b d$
		龙潭村岩溶子系统	三印村—龙潭村	$Z_b dn$	整体地势北高南低,地表岩溶形态主要为溶孔、溶隙。地下水接受大气降雨之后,主要受地形的控制,地下水沿可溶岩条带向龙潭村和三印村汇集,以泉点形式排泄
抚仙湖水系统	江城岩溶水系统	西河岩溶子系统	照壁山—蔡家庄	$Z_b dn, Z_b d$	区内发育有溶孔、溶隙、溶蚀洼地,汇集大气降雨。地下水沿可溶岩条带向蔡家庄断层汇集,至江城龙街一带以泉点形式排泄,最终进入抚仙湖。隧洞穿越该系统的补给、径流区
		祭天山—黄营岩溶子系统	轿顶山—庄科、下麦冲—上麦冲	$P_{1y}, C_{1-2}, D_3$	整体地势由西北至东南高程依次降低,岩溶发育程度高,多有洼地、落水洞发育,常见溶洞,地下水流动通畅。地下水接受大气降雨之后,通过岩体内大型岩溶管道沿龙马山向斜北翼的可溶岩地层向单元东侧江城盆地边缘径流排泄。主要排泄泉点有黄营黑龙潭、庄科小龙潭等。隧洞穿越该系统的补给、径流区
曲江水系统	玉溪岩溶水系统	马鹿塘岩溶子系统	马鹿塘—北城	$Z_b dn, Z_b d$	岩溶石山、石芽、峰丛发育,有利于大气降雨入渗。地下水受照壁山处分水岭影响,自北东向南西方向径流,大型顺层面方向形成单斜径流型地下水循环系统,地下水位埋藏较深。地下水进入玉溪盆地之后,沿北城一带出露成泉,或侧向排泄至第四系
		龙马山岩溶子系统	响水村—小石桥—北城、老黑山—小石桥—小黄塘	$P_{1y}, C_{1-2}, D_3, Z_b dn$	岩溶水系统处于龙马山向斜北翼西部,系统整体从北东至西南降低,系统东边有照壁山处的分水岭,岩溶水系统顺构造线方向和分水岭作用发育有大型的岩溶洼地槽谷,大型顺层面方向形成单斜径流型地下水循环系统,在玉溪白龙潭公园一带以暗河形式排泄

### 3 小扑隧洞涌突水危险性研究

#### 3.1 隧洞岩溶涌突水灾害危险性评价方法

根据许模等(2015)、杨艳娜(2009)关于西南山区岩溶隧洞涌突水灾害危险性评价系统研究成果,由岩石的可溶性( $K_1$ )、地质构造( $K_2$ )、地表汇水条件( $K_3$ )、地下水化学特征( $K_4$ )、隧洞与地下水位的关系( $K_5$ ),组成了岩溶隧洞涌突水危险性评价的初步评价指标体系。参照杨艳娜(2009)

《西南山区岩溶隧道涌突水灾害危险性评价系统研究》一文,各指标因子的评分标准见表 3,取值范围为 0~20。岩溶隧洞涌突水危险性综合评价指标计算公式为:

$$THK = 5 \times (0.25K_1 + 0.13K_2 + 0.16K_3 + 0.1K_4 + 0.36K_5) \quad (1)$$

涌突水危险性综合指标分值满分设置为 100 分,分值越高,灾害发生的危险性越高。根据隧址区的岩溶发育特征与隧道位置,将隧洞涌突水危

表 3 岩溶隧洞涌突水灾害危险性评价指标及评分标准  
Table 3 Indices and standards of scoring for the risk of water inrush in the Karst tunnel

评价指标		评价指标分项		评分标准及分值				
岩石的可溶性 (K <sub>1</sub> )	岩石化学成分	CaCO <sub>3</sub> 质量分数/%	>75	51~75	26~50	6~25	0~5	构造岩带
		岩石的定名	灰岩	白云质灰岩、泥质云灰岩	灰质白云岩、白云岩	泥质灰岩、泥质灰云岩	泥质白云岩	
		K <sub>11</sub> 评分值	17~20	13~16	9~12	5~8	0~4	
	岩石结构	生物碎屑结构	泥晶结构	粒屑结构	亮晶结构	粗晶结构		
	K <sub>12</sub> 评分值	17~20	13~16	9~12	5~8	0~4		
K <sub>1</sub> 评分		0.75K <sub>11</sub> +0.25K <sub>12</sub>					12~20	
地质构造 (K <sub>2</sub> )	断裂构造	导水断层	破碎带宽度/m	>10.00	2.00~10.00	1.00~1.99	0.10~0.99	<0.10
			影响带宽度/m	>50.00	20.00~50.00	10.00~19.99	5.00~9.99	1.00~4.99
			K <sub>2</sub> 评分	18~20	15~17	11~14	7~10	0~6
		阻水断层	破碎带宽度/m	>10.00	5.00~10.00	1.00~4.99	0.20~0.99	<0.20
			影响带宽度/m	>50.00	20.00~50.00	10.00~19.99	5.00~9.99	1.00~4.99
			K <sub>2</sub> 评分	15~17	11~14	7~10	4~6	0~3
	褶皱核部	褶皱形态	宽缓型褶皱		中缓型褶皱		紧闭型褶皱	
		岩层倾角/(°)	<30		30~60		>60	
		K <sub>2</sub> 评分	0~10		11~16		17~20	
	单斜地层	岩层组合类型	厚层状裂隙-岩溶含水岩组	厚层脉状岩溶-裂隙含水岩组	夹层式层岩-裂隙含水岩组	孔隙-裂隙岩溶含水岩组		
		K <sub>21</sub> 评分	17~20	11~16	5~10	0~4		
		岩层厚度d/m	巨厚层	厚层	中厚层	薄层		
d>1.00			0.50~1.00	0.10~0.49	<0.10			
K <sub>22</sub> 评分		10~12	7~9	3~6	0~2			
K <sub>23</sub> 评分		15~20	11~14	7~10	0~6			
K <sub>2</sub> 评分		0.7235K <sub>21</sub> +0.1932K <sub>22</sub> +0.0833K <sub>23</sub>						
地表汇流条件 (K <sub>3</sub> )	地表出露封闭负地形的面积比例/%		71~100	51~70	26~50	11~25	0~10	
	K <sub>3</sub> 评分		17~20	13~16	9~12	5~8	0~4	
	地表岩溶形态	封闭地形		开口沟谷切割			完整斜坡	
		峰丛-落水洞、峰林洼地、溶蚀槽谷	溶蚀平原、缓坡台地	陡坡台地、槽谷、溶沟、溶丘				
	K <sub>3</sub> 评分		17~20		13~16	9~12	0~8	
地面坡度/(°)		<10	11~20	21~30	31~45	>45		
K <sub>3</sub> 评分		17~20	13~16	9~12	5~8	0~4		
地下水循环运移特征 (K <sub>4</sub> )	SIC 值		<0.00	0.00~0.39	0.40~0.79	0.80~1.20	>1.20	
	K <sub>4</sub> 评分值		17~20	13~16	9~12	5~8	0~4	
隧洞与地下水位的关系 (K <sub>5</sub> )	隧洞所处循环带		垂直渗流带	交替带	水平径流带	深部循环带		
	K <sub>5</sub> 评分		0~5	6~10	15~18	11~14		
	隧洞参照地下水位/m		地下水位以上	地下水位以下				
	0~50		51~100	101~200	>200			
K <sub>5</sub> 评分	侵蚀基准面以上	0~2	3~8	9~14	15~18	19~20		
	侵蚀基准面以下	/	17~20	14~16	11~13	8~10		

注:断层破碎带宽度、影响带宽度、岩层厚度、SIC 数值保留两位小数;质量分数、面积比例、地面坡度、各指标评分值取整数。

危险性划分为 5 个等级,其危险程度从高到低分别为极高风险区(V)、高风险区(IV)、中危险区(III)、较危险区(II)、低风险区(I)。5 个等级对应的分值依次为>77、63~77、39~62、23~38、

<23。

### 3.2 小扑隧洞岩溶涌突水危险性评价

根据隧洞岩溶涌突水危险性分级标准,小扑隧洞岩溶段划分为 18 小段,其中包括 5 个断裂

带, 2 段阳新组 ( $P_{1y}$ )、石炭系 ( $C_{1-2}$ )、泥盆系上统 ( $D_3$ ), 3 段陡山沱组 ( $Z_b d$ ), 4 段灯影组 ( $Z_b dn$ )。小扑隧洞岩溶涌突水灾害危险性评价结果见表 4。

表 4 小扑隧洞岩溶涌突水灾害危险性评价结果

Table 4 Results of risk of water inrush in the Karst section of Xiaopu Tunnel

里程	地层/构造	$K_1$			$K_2$				$K_3$	$K_4$	$K_5$		枯水期 K 值		丰水期 K 值	
		$K_{11}$	$K_{12}$	分值	$K_{21}$	$K_{22}$	$K_{23}$	分值			枯季	丰季	等级	分值	分值	等级
YX3+542—YX4+254	$P_{1y}$	18	18	18	16	6	8	13.4	14	18	14	18	76.61	IV	83.81	V
YX4+301—YX4+732	$C_{1-2}$	14	18	15	16	6	8	13.4	10	16	18	20	75.86	IV	79.46	V
YX4+732—YX5+057	$D_3$	12	16	13	15	5	8	12.5	10	15	14	18	65.07	IV	72.27	IV
YX5+174—YX5+194	$F_{VI-1}$	12	16	13	\	\	\	20.0	12	18	14	18	73.05	IV	80.25	V
YX5+194—YX5+778	$Z_b dn$	12	16	13	16	4	14	13.5	12	18	14	18	68.83	IV	76.03	IV
YX5+778—YX6+108	王家湾断裂	13	16	13.8	\	\	\	20.0	16	16	15	16	77.99	V	79.79	V
YX6+423—YX6+453	$F_{32-2}$	12	16	13	\	\	\	20.0	12	18	15	16	74.85	IV	76.65	IV
YX6+453—YX6+850	$Z_b dn$	12	16	13	16	4	14	13.5	12	18	15	16	70.63	IV	72.43	IV
YX6+850—YX7+447	$Z_b d$	6	10	7	7	5	14	7.2	6	18	15	16	54.23	III	56.03	III
YX7+447—YX7+467	$F_{VI-2}$	12	16	13	\	\	\	20.0	12	18	13	16	71.25	IV	76.65	IV
YX7+467—YX8+967	$Z_b dn$	12	16	13	16	4	14	13.5	12	18	13	16	67.03	IV	72.43	IV
YX8+967—YX8+987	断裂 $F_{VI-3}$	12	16	13	\	\	\	20.0	12	18	13	16	71.25	IV	76.65	IV
YX8+987—YX9+207	$Z_b d$	6	10	7	7	5	14	7.2	12	18	13	16	55.43	III	60.83	III
YX23+173—YX23+426	$Z_b d$	6	10	7	7	5	9	6.8	14	18	12	14	54.96	III	58.56	III
YX23+426—YX24+097	$Z_b dn$	12	16	13	16	4	9	13.1	12	18	12	14	64.96	IV	68.56	IV
YX24+286—YX24+884	$D_3$	12	16	13	15	5	9	12.6	13	18	12	14	65.42	IV	69.02	IV
YX25+176—YX25+696	$C_{1-2}$	14	18	15	16	6	14	13.9	14	18	14	16	73.19	IV	76.79	IV
YX25+713—YX27+067	$P_{1y}$	18	18	18	16	6	14	13.9	18	18	16	17	83.74	V	85.54	V

小扑隧洞北段岩溶段长度为 5 186 m, 位于鲁纳寺—牛恋村岩溶子系统的径流区。小扑隧洞北段地层富水性强, 地下水位高于隧洞 30~220 m, 岩溶涌突水风险总体高。在丰水期, 隧洞涌突水中危险区、高危险区、极高危险区的长度占比分别为 15.8%, 55.4%, 28.8%; 在枯水期, 隧

洞涌突水中危险区、高危险区、极高危险区的长度占比分别为 15.8%, 77.8%, 6.4%。隧洞北段岩溶涌突水高风险段主要集中在阳新组 ( $P_{1y}$ )、石炭系中下统 ( $C_{1-2}$ ) 与王家湾断层段。

图 3 为小扑隧洞北段 YX3+542—YX4+254 穿越阳新组 ( $P_{1y}$ ) 灰岩段的地下水径流模式剖面图。

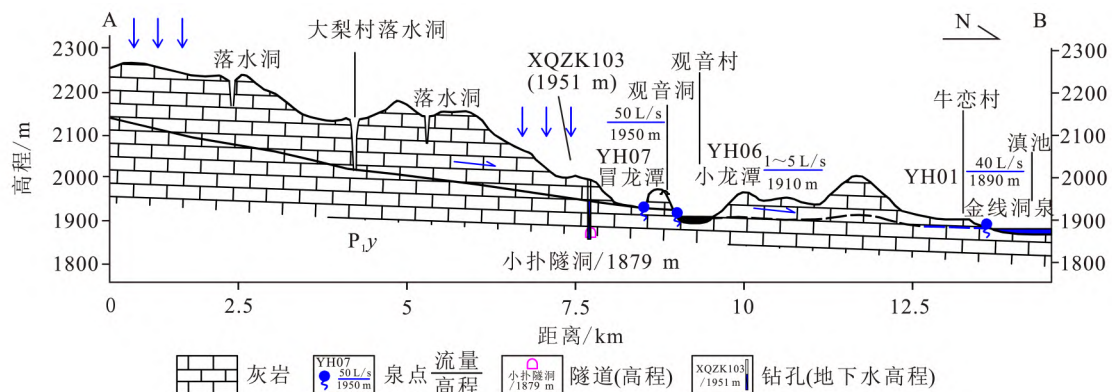


图 3 小扑隧洞北段地下水径流模式剖面图

Fig. 3 Profile of groundwater runoff in the northern section of the Xiaopu Tunnel

在大梨园一带分布有大量的岩溶洼地、落水洞,有利于大气降水入渗补给地下水。地下水沿灰岩条带向北侧径流,在滇池南岸牛恋村以金线洞泉(高程1890 m,流量40 L/s),在观音村以冒龙潭(高程1950 m,流量50 L/s)、深龙潭、小龙潭等形式排泄。根据2012年11月5日钻孔XQZK-103监测结果,地下水水位为1950 m,高于隧洞顶板32~81 m。在此段,小扑隧洞埋深为76~178 m,隧洞位于地下水径流带,围岩岩体透水率为10~100 Lu,隧洞涌突水危险为高-极高风险。

小扑隧洞南段岩溶段长度为3396 m,位于西河岩溶子系统和祭天山—黄营岩溶子系统的补给、径流区。小扑隧洞北段涌突水风险总体较高。丰水期和枯水期隧洞涌突水风险总体不变。在丰水期和枯水期,隧洞涌突水中危险区、高危险区、

极高风险区的长度占比分别为7.4%,52.7%,39.9%。隧洞南端岩溶涌突水高风险段主要集中在阳新组( $P_{1y}$ )。

图4为小扑隧洞南段YX25+521—YX26+857穿越阳新组( $P_{1y}$ )灰岩段的地下水径流模式剖面图。在祭天山、朱家大地、麦冲一带分布有大量的岩溶洼地、槽谷、落水洞,有利于大气降水入渗补给地下水。地下水沿灰岩条带由北西向南东侧以暗河管道形式径流,在庄科村龙潭(高程1765 m,流量105 L/s)、黄营黑龙潭(高程1747 m,流量132.4 L/s)等暗河泉点排泄。根据钻孔XQZK09和XQZK214,地下水水位高于隧洞顶板25~120 m,围岩岩体透水率为12~91 Lu。在此段,隧洞埋深190~330 m,隧洞位于地下水补给、径流区,隧洞涌突水危险为高风险。

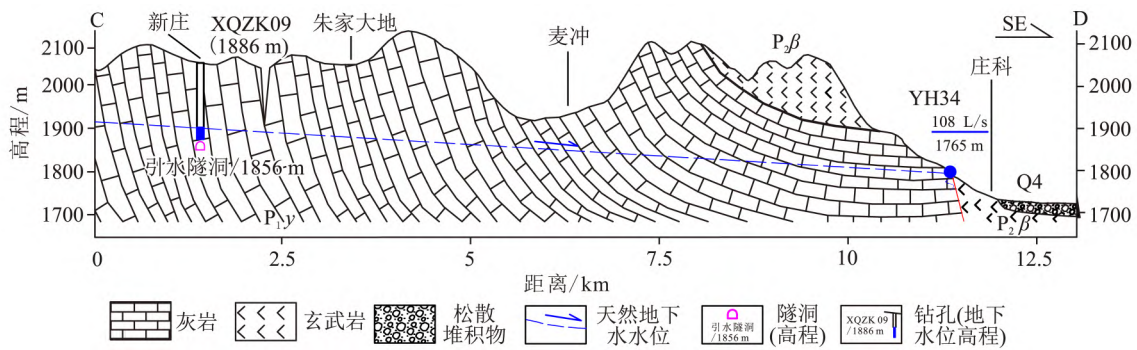


图4 小扑隧洞南段地下水径流模式剖面图  
Fig. 4 Profile of groundwater runoff in the southern section of the Xiaopu Tunnel

### 3.3 小扑隧洞岩溶涌突水现状调查与结果

2018年,滇中引水工程开始开工建设。据施工现场调查,小扑隧洞北段在穿越阳新组( $P_{1y}$ )灰岩段时发生了多次涌突水事故。2021年1月25日,小扑隧洞1#支洞主洞下游工作面YX3+350掌子面发生突水,初始涌水量约2160 m<sup>3</sup>/d,后增加至约10000 m<sup>3</sup>/d,增大趋势明显。2022年5月16日,小扑隧洞1#支洞主洞下游YX3+657.5—668.9玄武岩和白云岩、灰岩交界附近,揭露暗河管道(图5),突水水量在4320 m<sup>3</sup>/d左右。隧洞施工排水引起周边地下水位下降,导致冒龙潭(YH07)与深龙潭(YH08)干涸,并导致地面塌陷(图6)。在此段,预测岩溶涌突水危险性为高-极高风险,与施工阶段发生多次涌突水事故吻合。

小扑隧洞2#支洞在YX6+734.4—YX6+727.2段揭露震旦系灯影组( $Z_bdn$ )青灰色白云岩,剧烈



图5 小扑隧洞1#支洞YX3+657.5—668.9揭露暗河  
Fig. 5 Subsurface stream exposed with the branch of tunnel 1# of the Xiaopu Tunnel at YX3+657.5—668.9

砂化夹强烈砂化,极软岩夹较软岩。白云岩剧烈砂化,岩体完整程度为破碎夹较破碎,岩体结构为



图 6 小扑隧洞在阳新组( $P_1y$ )灰岩段施工引起的地面塌陷

Fig. 6 Surface collapse at the limestone section of the Yangxin group ( $P_1y$ ) caused by the construction of the Xiaopu Tunnel

散体结构夹碎裂结构。隧洞拱顶淋雨状滴水—线状流水,引排后集中在左右两侧腰线位置以股状涌出,水质清澈透明、无异味,流量约  $20\sim 25\text{ L/s}$ ,水压力约  $0.3\text{ MPa}$ 。在  $YX7+007.9\text{—}YX7+092.7$  段,揭露青灰色薄层状白云岩,弱砂化夹强烈~剧烈砂化条带,中硬岩夹较软岩、软岩。岩体完整程度为较破碎夹破碎,岩体结构为薄层状结构、碎裂结构夹散体结构。隧道位于地下水位之下,掌子面、洞壁多线状流水,水压  $0.2\sim 0.3\text{ MPa}$ 。主要出水点集中在  $YX7+023.0$  右侧拱脚、 $YX7+063.9$  左右两侧拱脚及  $YX7+023.0$  后左侧会车道岩壁沿剧烈砂化条带涌水携带泥沙集中涌出。在此段,预测岩溶涌突水危险性为高风险,与施工阶段发生多次涌突水、涌沙事故吻合。

## 4 结论

小扑隧洞是滇中引水工程玉溪段的渠首工程,隧道起点位于昆明市晋宁区新庄村,终点位于玉溪市江川区阿豆村。隧洞全长  $32.066\text{ km}$ ,设计流量  $36\text{ m}^3/\text{s}$ ,底宽  $3.8\text{ m}$ ,穿越王家湾向斜西翼与龙马山向斜北翼的震旦系、泥盆系、石炭系和二叠系碳酸盐岩地层,含水层富水性中等~强,隧洞涌突水风险大。本文采用隧洞岩溶涌突水灾害危险性评价方法对小扑隧洞岩溶段的涌突水危险性进行了评价,并结合施工调查资料进行了验证。研究表明:

a. 隧洞北段( $YX0+000\text{—}YX23+105$ )位于滇池水系统,区域岩溶水系统为条带状岩溶水系

统。东西两侧分别以完整的非可溶岩层位为隔水边界,隧洞北段穿越鲁纳寺—牛恋村岩溶子系统的径流区和排泄区。隧洞南段( $YX23+105\text{—}YX32+066$ )穿越龙马山向斜,位于玉溪盆地与江城盆地之间。龙马山向斜北翼东段为江城岩溶水系统,为系统内的主要蓄水构造。隧洞南段穿越江城岩溶水系统的补给区和径流区。

b. 采用岩石的可溶性、地质构造因素、地表汇水条件、地下水化学特征、隧洞埋深与地下水位的关系 5 个控制性因素组成的岩溶隧洞涌突水危险性评价指标体系,将隧洞涌突水危险性划分为 5 个等级,其危险程度从高到低分别为极高危险区(V)、高危险区(IV)、中危险区(III)、较危险区(II)、低危险区(I)。

c. 小扑隧洞北段岩溶段长度为  $5\ 186\text{ m}$ ,地下水位高于隧洞  $30\sim 220\text{ m}$ ,岩溶涌突水风险总体高。在丰水期,隧洞涌突水中危险区、高危险区、极高危险区的长度占比分别为  $15.8\%$ ,  $55.4\%$ ,  $28.8\%$ ;在枯水期,隧洞涌突水中危险区、高危险区、极高危险区的长度占比分别为  $15.8\%$ ,  $77.8\%$ ,  $6.4\%$ 。小扑隧洞南段岩溶段长度为  $3\ 396\text{ m}$ ,丰水期和枯水期隧洞涌突水风险总体不变。在丰水期和枯水期,隧洞涌突水中危险区、高危险区、极高危险区的长度占比分别为  $7.4\%$ ,  $52.7\%$ ,  $39.9\%$ 。

d. 施工过程中,发生的涌突水、涌沙等事故验证了涌突水风险评价结果。小扑隧洞北段在穿越阳新组( $P_1y$ )灰岩段时,揭露暗河管道,发生涌突水事故,导致冒龙潭(YH07)与深龙潭(YH08)干涸,并导致地面塌陷,与岩溶涌突水高~极高风险预测结果吻合;小扑隧洞 2# 支洞在  $YX6+734.4\text{—}YX6+727.2$  段、 $YX7+007.9\text{—}YX7+092.7$  段揭露震旦系灯影组( $Z_bdn$ )时发生涌水并携带泥沙集中涌出,与岩溶涌突水高风险预测结果吻合。

## [ 参 考 文 献 ]

- 高朋, 2021. 小江断裂带登楼山段岩溶水文地质结构及隧道涌突水危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Gao P, 2021. Karst Hydrogeological Structure and Risk Assessment of Tunnel Water Inrush in Denglou Mountain Section of Xiaojiang Fault Zone [D].

- Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 雷军, 2011. 宜万铁路施工期隧道岩溶突水地质灾害形成规律与危险性评估方法研究[D]. 北京: 北京交通大学档案馆.
- Lei J, 2011. Study on the Forming Regular Pattern and Risk Assessing Method of Karst Water Inrush Disaster during Tunnel Construction in Yi-Wan Railway [D]. Beijing: The Archive of Beijing Jiaotong University. (in Chinese)
- 马士伟, 2009. 岩溶隧道涌突水地质灾害破坏机理与预警技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院档案馆.
- Ma S W, 2009. Study on Mechanism of Inrush Water Geological Hazards and Warning Technology of Karst Tunnel [D]. Beijing: The Archive of China Academy of Railway Sciences. (in Chinese)
- 毛邦燕, 许模, 蒋良文, 2010. 隧道岩溶突水、突泥危险性评价初探[J]. 中国岩溶, 29(2): 183—189.
- Mao B Y, Xu M, Jiang L W, 2010. Preliminary study on risk assessment of water and mud inrush in karst tunnel [J]. Carsologica Sinica, 29(2): 183—189. (in Chinese)
- 裴建国, 梁茂珍, 陈阵, 2008. 西南岩溶石山地区岩溶地下水系统划分及其主要特征值统计[J]. 中国岩溶, 27(1): 6—10.
- Pei J G, Liang M Z, Chen Z, 2008. Classification of karst groundwater system and statistics of the main characteristic values in Southwest China karst mountain [J]. Carsologica Sinica, 27(1): 6—10. (in Chinese)
- 瞿霜菊, 黄辉, 曹正浩, 2013. 云南省滇中引水工程规划研究[J]. 人民长江, 44(10): 80—83.
- Qu S J, Huang H, Cao Z H, 2013. Planning on water diversion project for central area of Yunnan Province [J]. Yangtze River, 44(10): 80—83. (in Chinese)
- 肖斌, 2014. 复杂岩溶山区空间多尺度水文地质模型——以滇中引水工程小扑隧洞为例[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Xiao B, 2014. Multiscale Hydrogeological Model of Complex Karst Mountains—Take Xiaopu Tunnel as Examples [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 许模, 赵红梅, 赵勇, 等, 2015. 季节变动带内岩溶隧道涌突水危险性评价[J]. 地下空间与工程学报, 11(5): 1322—1327.
- Xu M, Zhao H M, Zhao Y, et al., 2015. Gushing water hazard assessment of karst-tunnel in seasonal variation belts[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 11(5): 1322—1327. (in Chinese)
- 杨艳娜, 2009. 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: 成都理工大学档案馆.
- Yang Y N, 2009. Research of Karst Tunnel Water Bursting Hazard Risk Assessment System in the Southwest Mountainous Area [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 杨艳娜, 曹化平, 许模, 2015. 岩溶隧道涌突水灾害危险性评价指标体系及量化取值方法[J]. 现代地质, 29(2): 414—420.
- Yang Y N, Cao H P, Xu M, 2015. Index system of risk assessment on karst tunnel water inrush disasters and value of quantitative method [J]. Geoscience, 29(2): 414—420. (in Chinese)
- 赵红梅, 2013. 滇东高原岩溶隧道涌突水灾害风险评价研究[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Zhao H M, 2013. Study on Risk Evaluation of Karst Tunnel Water Bursting Disaster in the Plateau of Eastern Yunnan [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)

(责任编辑: 魏 巍)