

邵长杰, 王磊, 刘惠东, 等. 虎溪台隧道岩溶地下水涌水成因分析及涌水量预测[J]. 中国岩溶, 2025, 44(3): 477-487, 518.

DOI: 10.11932/karst20250303

虎溪台隧道岩溶地下水涌水成因分析及涌水量预测

邵长杰¹, 王磊², 刘惠东¹, 崔永兴¹, 刘伟²

(1. 浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310030; 2. 中国地质大学(武汉)

地质调查研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 文章通过对虎溪台隧道详细的野外调查和原位试验, 分析其涌水段的水文地质条件, 确定地下水流系统, 利用地下水的水文地球化学特征, 解析岩溶地下水流路径及涌水成因, 并预测隧道涌水量。结果表明: (1) 隧址区可划分为漕源溪地下水流系统、分水江岩溶地下水流系统和大坑溪—柴坪里地下水流系统; 隧道的岩溶涌水段(K65+100—K65+360)位于分水江岩溶地下水流系统中, 涌水量大, 风险高; (2) 隧址区的岩溶地下水主要由大气降水补给, 降水通过落水洞和岩溶管道集中补给地下水; 隧道涌水的水化学特征与暗河排泄水相似, 主要受到碳酸盐岩溶解的影响, 表现为岩溶水和砂岩水的混合; 隧道的涌水来源于石炭系中统黄龙组和石炭系上统船山组灰岩岩溶水的垂直入渗补给, 以及砂岩水的侧向补给; (3) 地下水径流过程中, 48.29%的地下水通过隧道进行排泄; 在没有极端降雨事件的情况下, 虎溪台隧道的预测涌水量为 $10684.89 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 极端降雨事件发生时, 预测的最大涌水量可达 $79364.13 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

关键词: 虎溪台隧道; 地下水水化学; 氢氧同位素; 岩溶地下水系统; 涌水来源

创新点: 针对华东亚热带湿润区充沛的水热条件下岩溶隧道涌水问题, 基于地下水流系统理论, 综合利用地下水水化学特征和氢氧同位素方法等多种手段, 确定隧道涌水来源, 并预测极端降雨事件下的隧道最大涌水量。

中图分类号: U453.6; P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2025)03-0477-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

隧道涌水是影响施工安全的主要威胁之一, 不仅影响施工期间的安全, 也对工程建成后的安全运行产生重要影响, 尤其在岩溶发育区, 隧道涌水问题尤为突出^[1-2]。因此, 分析隧道涌水成因和预测涌水量是解决岩溶地区隧道涌水问题的关键^[3-4]。然而, 隧道涌水的发生机理和过程较为复杂, 不同地区、地质条件和工程部位的岩溶涌水机理各不相同, 使得识别隧道涌水成因有一定难度^[5-7]。目前国内外多使

用水文地球化学法、示踪试验法和物理方法分析岩溶隧道涌水问题^[8-9]。例如, 罗明明等^[10]综合利用水文地质调查和水文地球化学方法对峡口隧道的涌水来源和过程进行了识别与分析; 李志源等^[2]以萍乐坳陷带的一座典型岩溶涌水隧道为研究对象, 通过区域水文地质调查和物探查明了隧道涌水的主要来源, 并通过示踪试验和动态监测研究了涌水对周边地下水环境的影响; 邵长杰等^[11]基于地下水流系统理论, 结合水文地质调查、岩溶地下水流系统划分及水文地球化学方法, 分析了金华山隧道的涌水来源

资助项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(平安百年品质工程科研专题)“基于勘察大数据的隧道围岩精细化分级评价技术研究”(2025014)

第一作者简介: 邵长杰(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质研究工作。E-mail: shaocj@zjic.com。

通信作者: 刘伟(1985—), 男, 副研究员, 主要从事水文地质环境地质研究。E-mail: wliu@cug.edu.cn。

收稿日期: 2024-08-13

及路径。然而,单一的水化学和物理方法难以量化隧道涌水来源。氢氧同位素作为稳定同位素,可指示不同的补给来源^[12]。因此,通过水文地球化学法和氢氧同位素相结合的方法,可有效识别隧道涌水的来源^[13]。另外,根据隧道的涌水来源,涌水量的预测方法主要有大气降雨入渗法、地下水径流模数法和地下水动力学法^[14-15]。岩溶地区由于岩溶裂隙和管道的存在,隧道涌水接受大气降水补给极快,极端降雨事件对隧道的施工和运行存在极大威胁^[16]。在涌水量的预测研究中,极端降雨事件的影响有待进一步探究。

虎溪台隧道隧址区属华东亚热带湿润区,降雨丰富,地质情况复杂,涌水问题突出,施工难度大,安全风险高。自隧道施工以来,隧道灰岩段出现了不同程度的涌水情况。因此,识别涌水来源、查明涌水成因和预测隧道涌水量成为隧道安全的首要任务。

本研究通过分析隧道区水文地质条件,结合水化学和氢氧同位素方法,综合分析隧道的涌水来源及成因,预测极端降雨条件下的隧道涌水量,以期为隧道的安全施工和正常运行提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 隧址区概况

虎溪台隧道是临建高速的重要工程,进口位于杭州市桐庐县瑶琳镇蒋家村东侧山脚,出口位于杭州市桐庐县横村镇白云村西侧山脚(图1)。隧道为分离式,洞口类型为半明洞式,单洞限界宽 11 m。左线起讫桩号为 ZK63+268—ZK66+390,走向 310°,全长 3 122 m;右线起讫桩号为 K63+285—K66+410,走向 310°,全长 3 125 m。

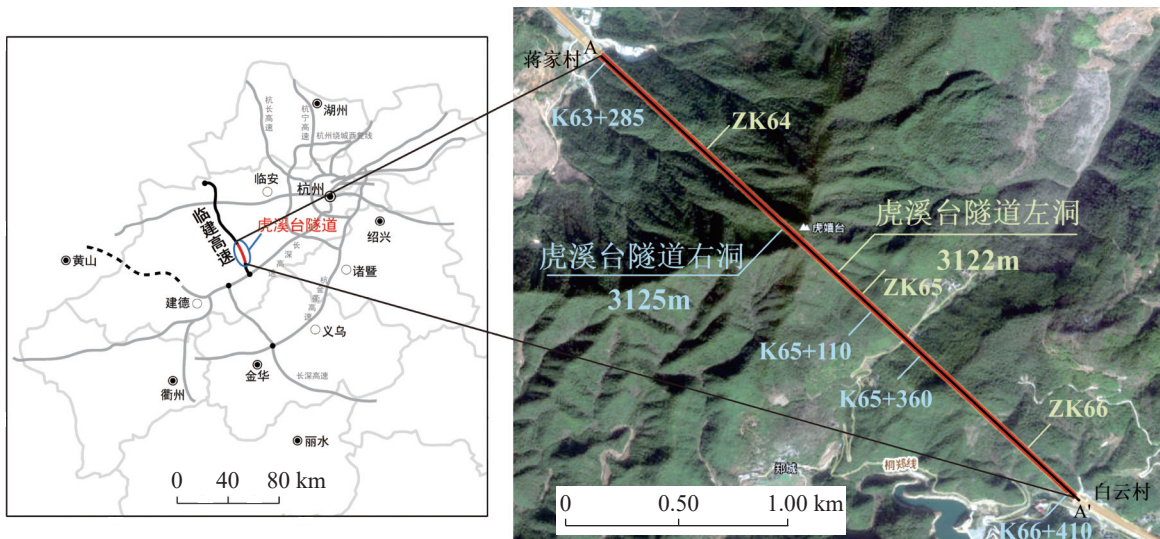


图1 虎溪台隧道地理位置及线路分布

Fig. 1 Geographical location and route distribution of the Huxitai Tunnel

虎溪台隧道所在区属低山地貌,隧道沿线最高处在 K64+700 附近,高程约 646 m,山脊总体北偏东向延伸,山体两侧发育沟谷。进洞口山坡倾向 285°,坡度约 32°,见中风化灰岩零星出露;出洞口山坡倾向 127°,坡度约 48°,强—中风化砂岩大面积出露。隧道进洞口外侧发育一与路线大角度相交的沟谷,沟谷中分布大量卵漂石,最大直径可达 2~3 m;具山区水流特征,陡涨陡落,降雨时水量增加迅速,流速较急,旱季断流。隧道出洞口附近 K65+700—K66+200 段右侧 350~500 m 处为大坑水库,水库坝顶高

程 187 m,隧道设计标高约为 127 m;水库水体对隧道影响微弱。

1.2 地质条件及岩溶发育情况

隧址区揭露的地层主要包括泥盆系上统的西湖组(D_3x)、石炭系下统的珠藏坞组(C_1z)泥质粉砂岩夹石英砂岩、石炭系中统的黄龙组(C_2h)灰岩和石炭系上统的船山组(C_3c)灰岩(图2)。 D_3x 为灰白色中细粒厚层石英砂岩夹泥质粉砂岩,节理裂隙发育良好,富水性较好,为含水层; C_1z 为紫红色层状泥质粉

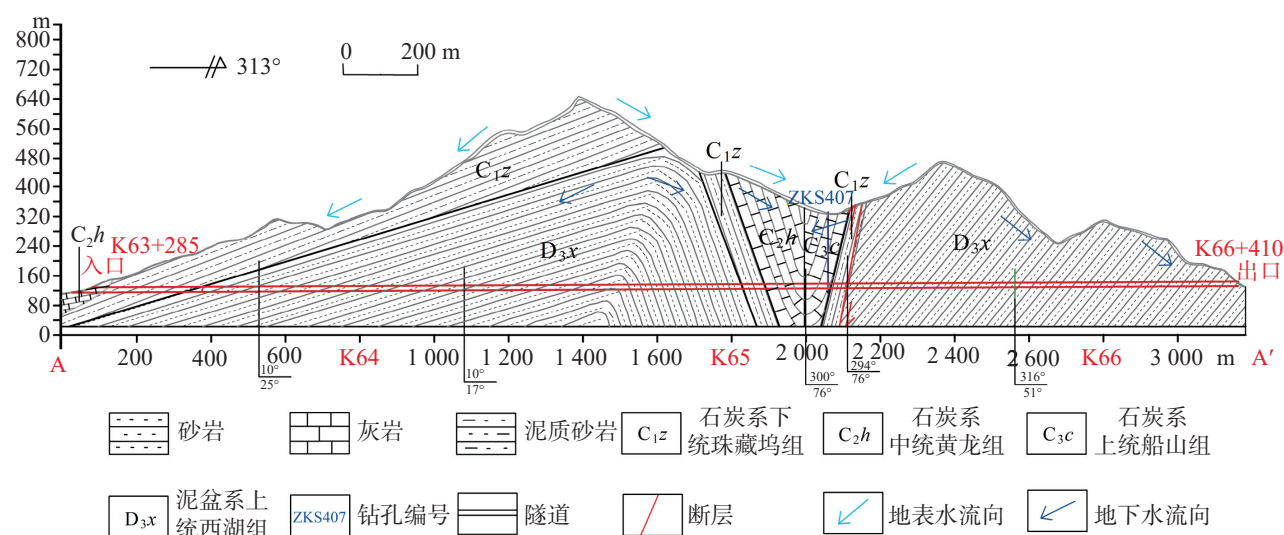


图2 研究区地质剖面图

Fig. 2 Geological cross-section of the study area

砂岩夹石英砂岩,质软,受构造挤压作用,局部呈断层泥状,强度低,承载力差,富水性极差,为隔水层; C_2h 和 C_3c 为深灰色隐晶质厚层—块状灰岩,整体较完整,岩溶管道发育良好,富水性和透水性极佳。第四系地层主要为残坡碎石,山坡上的厚度为2~4 m,进洞口侧的缓坡处厚度较大。

研究区整体处于复向斜构造,向斜核部的走向几乎与隧道正交,倾斜方向为SW-NE。核部为 C_2h 和 C_3c 灰岩,两翼分别为 C_1z 泥质粉砂岩夹石英砂岩和 D_3x 石英砂岩(图2)。受区域地质构造影响,研究区的次级构造发育,主要表现为断层和节理,断层位于K65+334—K65+345处,为压扭性断层,产状为 $294^\circ \angle 76^\circ$,宽约11 m;断层的上盘为紫红色泥质粉砂岩与灰岩,下盘为厚层状石英砂岩。受断层影响,断裂带周边的岩石挤压破碎,节理裂隙发育良好。

研究区发育有三层水平溶洞,以及若干由垂直渗流形成的落水洞和倾斜溶洞。第一层水平溶洞分布在海拔20~30 m,主要为较短的水平洞,存在潜水带和地下水水面水流作用形成的盲管、天锅、石刺等微地貌形态;第二层水平溶洞大部分为干洞,洞穴长度可达100 m以上,宽度一般大于5 m;第三层水平溶洞为中等规模,洞内碳酸盐沉积物和碎屑沉积物发育良好,洞底有竖井状落水洞与下层水平洞相通。

根据初步调查及目前隧道开挖情况分析,研究区140 m标高以上分布着大量落水洞和倾斜溶洞,其最终入渗至140 m标高后,通过水平径流形成地下暗河,最终在沟底以岩溶泉的形式排泄。

2 虎溪台隧道涌水分析

2.1 隧道水文地质条件

隧道所在区域总体为山区,主要补给来源为大气降水。区域内的地下水类型主要为裂隙水和岩溶水。裂隙水主要赋存于 D_3x 石英砂岩的裂隙含水层中,节理裂隙发育良好,储水性较强,常见泉流量为 $0.05 \sim 1.00 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$,水量丰富,受大气降水和第四系孔隙潜水的补给,并在地形切割较强烈的区域及山坡坡脚处排泄。区域内的岩溶水主要赋存于 C_2h 和 C_3c 的灰岩含水层中。隧道揭露的岩溶段位于向斜核部,受构造作用控制,岩溶发育良好,主要形态包括水平岩溶管道、溶洞、垂向落水洞和溶蚀沟槽,同时还发育有岩溶泉和地下暗河,流量在 $10 \sim 100 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。岩溶水主要为大气降雨入渗后通过岩溶裂隙—管道网络进入含水层,再通过地下暗河向下游排泄。由此可知,虎溪台隧道揭露了岩溶含水层。

根据研究区的水文地质条件(图3),以 C_1z 泥质粉砂岩作为系统边界,将隧道穿过的区域划分为三个地下水流系统:漕源溪地下水流系统(I)、分水江岩溶地下水流系统(II)和大坑溪—柴坪里地下水流系统(III)。漕源溪地下水流系统(I)主要由 D_3x 石英砂岩组成,两侧为 C_1z 泥质粉砂岩,西南侧以前山岗分水岭为界;含水介质以裂隙为主,地下水接受大气降水的补给,流向大致为自东南向西北,在隧道入口西方约700 m处通过地下暗河排泄至漕源溪,其

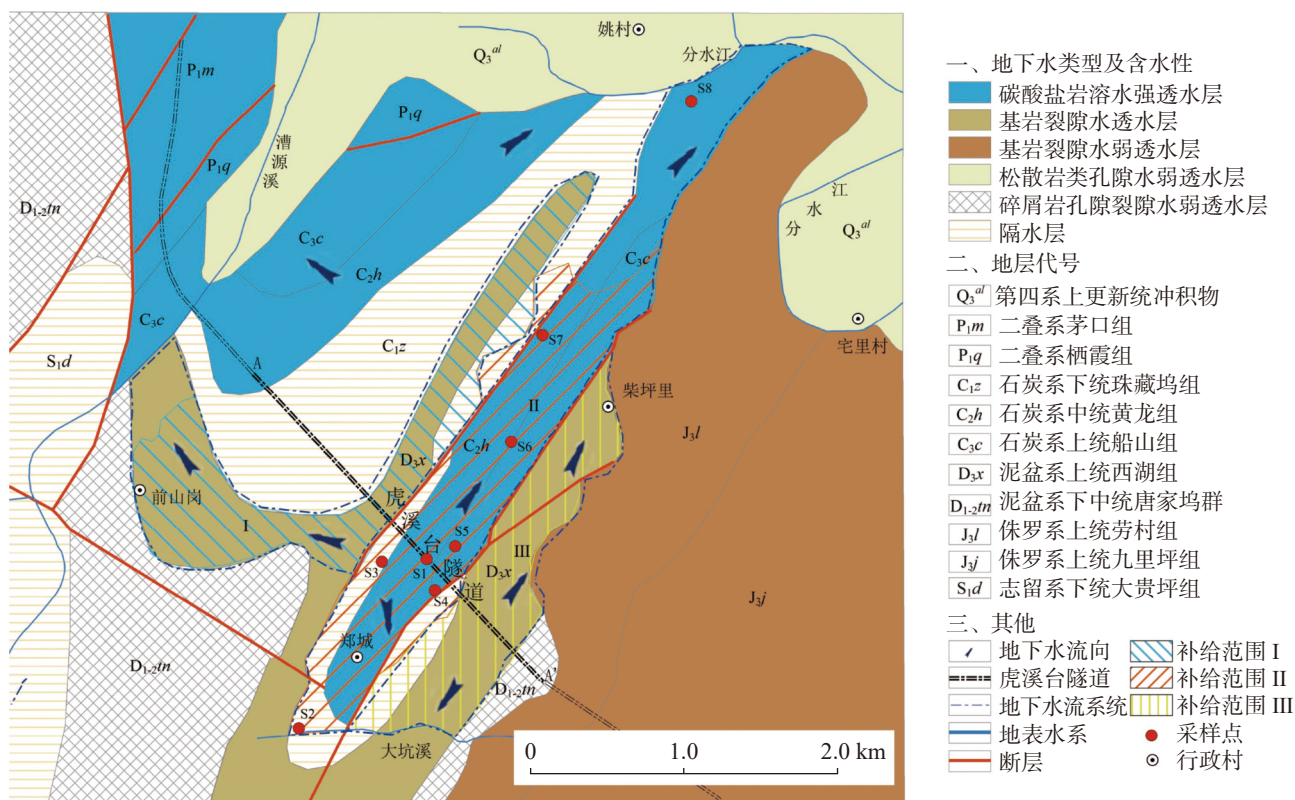


图 3 研究区水文地质平面图

Fig. 3 Hydrogeological plan of the study area

补给范围为 1.98 km^2 。分水江岩溶地下水流系统(II)主要由 C_{2h} 和 C_{3c} 的灰岩组成,岩溶发育良好,含水介质主要为岩溶管道和溶洞,同时发育有岩溶泉和地下暗河;东南和西北两侧以 C_{1z} 作为系统边界,西南侧以郑城西南面的分水岭为界;系统内隧道北侧由于 C_{1z} 地层消失,与相邻的 D_{3x} 基岩裂隙水产生水力联系;地下水接受大气降水以及相邻含水层的补给,流向自西南向东北,汇聚至系统内最低点的沟谷,通过地下暗河排泄,最远可排泄至分水江,其补给范围为 2.15 km^2 。大坑溪—柴坪里地下水流系统(III)主要岩性为 D_{3x} 石英砂岩,含水介质以基岩裂隙为主,富水性较强。以隧道为界,地下水接受大气降水的补给,南侧排泄至大坑溪,北侧部分向东北排泄至柴坪里,以泉和暗河的形式排泄,另一部分侧向补给 C_{3c} 灰岩,其补给范围为 1.13 km^2 。另外,由于 C_{1z} 泥质粉砂岩厚度很小,且隧道高程较低,在水头差作用下,两侧砂岩水可通过越流补给岩溶水。

由此可知,三个系统均可对隧道涌水造成一定的影响,其中分水江岩溶地下水流系统中的灰岩段为主要隧道涌水段,其涌水的潜在来源为 C_{2h} 和 C_{3c} 灰岩岩溶水以及两侧砂岩水的补给。

2.2 涌水来源

为查明晰隧道涌水的来源,对隧道中不同水源的水化学指标及氢氧同位素进行测试(表1)。本次针对不同水源共采集 8 组水样,其中隧道涌水 1 组(位于 ZK65+240 隧道掌子面的 S1 水样),砂岩溪沟水 3 组(S2-S4 水样),岩溶泉水 1 组(S5 水样),暗河排泄水 3 组(S6-S8 水样)。

2.2.1 基于地下水水化学特征的涌水来源

不同地下水的水化学特征存在较大区别, Ca^{2+} 、 HCO_3^- 是区别砂岩溪沟水与岩溶水的特征组分(表1)。砂岩溪沟水(S2-S4)的 Ca^{2+} 浓度在 $1.64\sim 1.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, HCO_3^- 浓度在 $1.02\sim 6.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间;岩溶泉水(S5)的 Ca^{2+} 浓度为 $101.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HCO_3^- 浓度为 $305.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;暗河排泄水(S6-S8)的 Ca^{2+} 浓度介于 $56.80\sim 67.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, HCO_3^- 浓度范围为 $177.90\sim 226.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;隧道涌水(S1)的 Ca^{2+} 浓度为 $49.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HCO_3^- 浓度为 $160.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。可见, S1 的 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 浓度低于 S5, 略低于 S6-S8, 但高于 S2-S4, 可推测隧道涌水来源有灰岩水及砂岩水的汇入。从地下水化学类型来看,岩溶泉(S5)和暗河排泄水(S6-S8)的

表 1 研究区水化学及氢氧同位素测试结果

Table 1 Results of hydrochemistry and hydrogen-oxygen isotope tests in the study area

点位	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
水样类型	隧道岩溶管道涌水	砂岩溪沟水	砂岩溪沟水	砂岩溪沟水	岩溶泉	暗河排泄水	暗河排泄水	暗河排泄水
备注	ZK65+240掌子面	—	灰岩交界	灰岩交界	—	—	茅仙洞下洞	—
同位素	$\delta D/\text{‰}$	-46.91	-47.17	-45.39	-46.57	-42.68	-47.04	-45.86
	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	-7.67	-7.90	-7.70	-7.56	-7.25	-7.54	-7.57
	Mg^{2+}	2.65	0.65	0.66	1.06	1.41	1.21	2.94
阳离子/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Ca^{2+}	49.80	1.83	1.64	1.81	101.00	64.30	56.80
	K^{+}	0.42	0.11	0.11	0.26	0.15	0.26	0.23
	Na^{+}	0.92	0.49	0.76	0.60	1.03	0.83	0.89
	Sr^{2+}	0.041	0.007	0.009	0.014	0.066	0.049	0.041
	NO_3^{-}	3.66	7.46	5.05	1.39	2.50	5.80	6.05
阴离子/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SO_4^{2-}	2.24	0.51	4.12	3.16	6.39	2.57	4.12
	HCO_3^{-}	160.83	1.02	1.35	6.51	305.90	194.08	177.90
	Cl^{-}	0.77	0.82	1.02	0.67	1.05	1.12	1.12

水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, HCO_3^{-} 和 Ca^{2+} 是最主要的阴阳离子, 表现出典型的岩溶水化学特征(图 4); 砂岩溪沟水(S2-S4)的水化学类型分别为 $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型, 水体中 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^{-} 的占比较大, 与岩溶水的水化学类型存在明显区别; 隧道涌水(S1)水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 与 S5-S8 水样的水化学特征相似, 同样表现出岩溶水的水化学特点, 表明 S1 处地下水与 S5-S8 处可能有着相似的补给来源。

根据水体中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 、 $\text{HCO}_3^{-}/\text{Na}^{+}$ 的摩尔浓度比值可大致判断主要的岩石风化作用, 进而分析其来源。研究区隧道涌水、暗河排泄水和岩

溶泉均落在碳酸盐岩溶解端元, 砂岩溪沟水则靠近硅酸盐岩溶解端元(图 5a, 图 5b)。同时, 研究区隧道涌水、暗河排泄水的($\text{HCO}_3^{-}/\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}$)比值显著 > 1 , 但略低于岩溶泉, 水化学组分主要来源于碳酸盐岩的溶解; 砂岩溪沟水的 $\text{HCO}_3^{-}/\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}$ 比值 ≤ 1 , 主要以非碳酸盐矿物的溶解为主(图 5c)。通过对 Ca^{2+} 和 HCO_3^{-} 的浓度比值发现, 岩溶泉水点落在 1 : 2 比值线上, 说明水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^{-} 来源于灰岩中方解石的溶解; 砂岩溪沟水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^{-} 浓度均很小, 与岩溶水存在明显区别; 隧道涌水和暗河排泄水 S7 和 S8 位于 1 : 2 比值线下方且靠近比值线, 表明其主要受到碳酸盐岩溶解的影响, 同时存在砂岩溪沟水的混合(图 5d)。以上结果表明隧道涌水与暗河排泄水的水化学特征相似, 水化学组分主要受到碳酸盐岩溶解及砂岩溪沟水的影响, 进一步佐证了隧道涌水与暗河排泄水存在相似来源。

此外, Sr^{2+} 在不同岩性地层中的含量存在明显差异, 砂岩区水中 Sr^{2+} 含量较低, 而碳酸盐岩区水中 Sr^{2+} 含量较高, 且随着碳酸盐岩的溶解, 水体中的 Sr^{2+} 、 Ca^{2+} 和 HCO_3^{-} 不断升高^[17]。研究区砂岩溪沟水中 Sr^{2+} 浓度在 $0.007\sim 0.014\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 而暗河排泄水 Sr^{2+} 浓度在 $0.041\sim 0.051\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 岩溶泉的 Sr^{2+} 浓度为 $0.066\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 隧道涌水的 Sr^{2+} 浓度为 $0.041\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。隧道涌水的 Sr^{2+} 浓度低于岩溶泉, 与暗河排泄水相似, 高于砂岩溪沟水, 存在与 Ca^{2+} 、 HCO_3^{-} 相同的特征。隧道涌水、暗河排泄水和岩溶泉水中 Sr^{2+} 与 Ca^{2+} 、

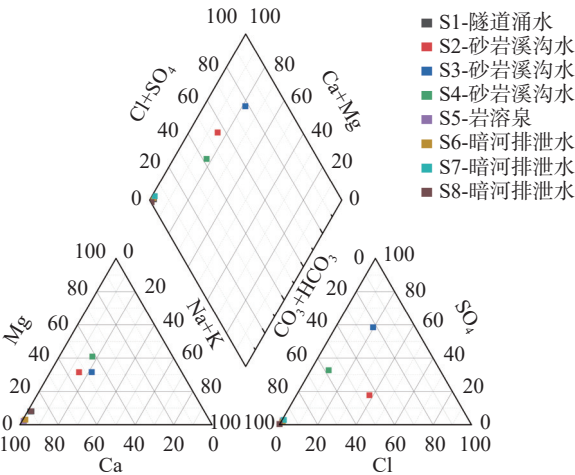


图 4 研究区不同水体 Piper 三线图

Fig. 4 Piper trilinear diagram of different water bodies in the study area

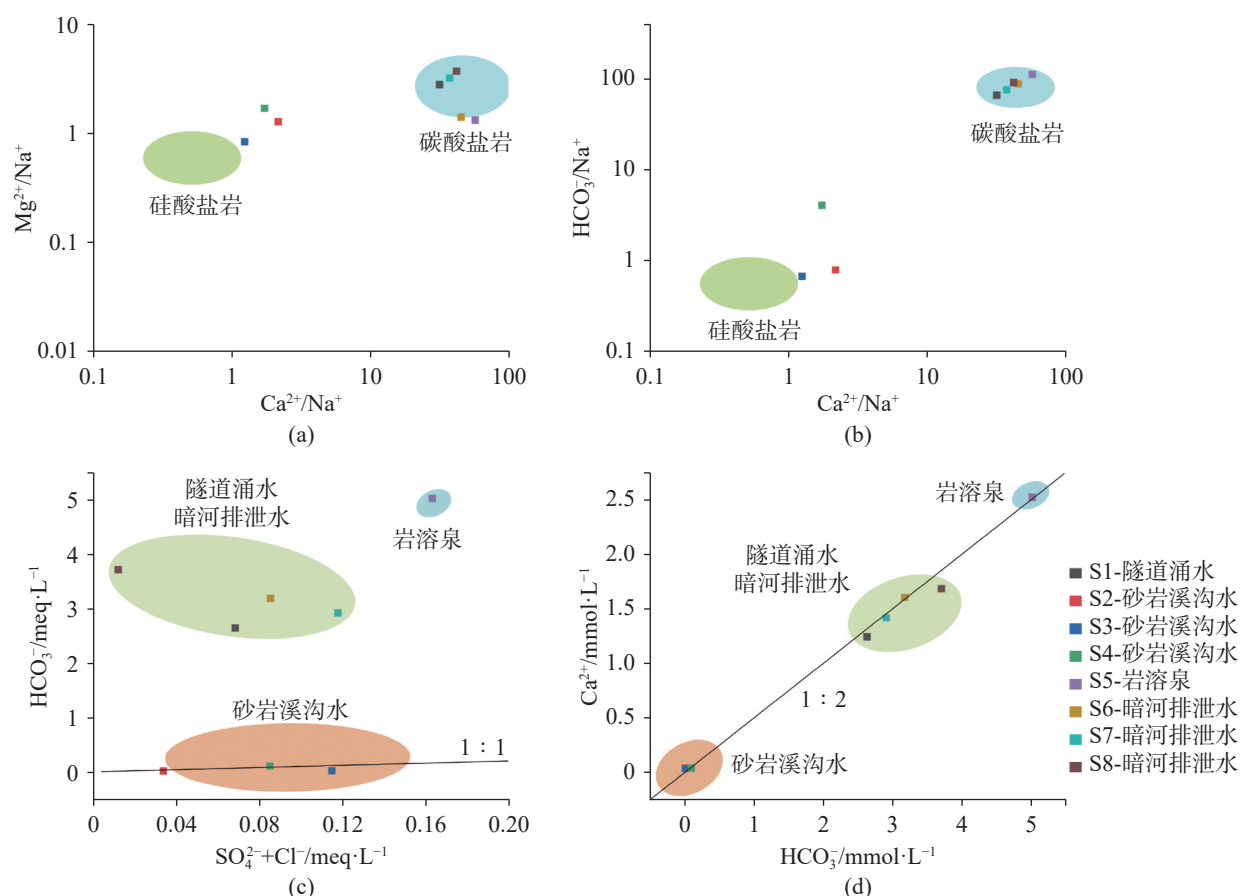


图5 研究区不同水体主要离子比值关系

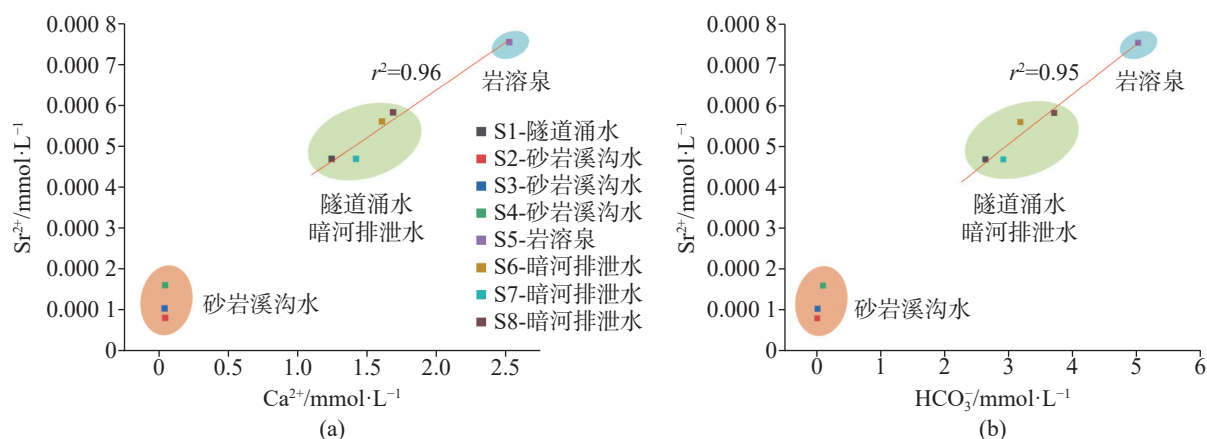
Fig. 5 Ratio relationship between the main ions of different water bodies in the study area

HCO_3^- 之间存在显著的相关性($r^2=0.96$ 、 0.95), 砂岩溪沟水中的 Sr^{2+} 与 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 无明显的相关性(图6), 表明碳酸盐岩的溶解是隧道涌水和暗河排泄水的主要离子来源。水体中 Sr^{2+} 、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的浓度变化及相关性再次验证了隧道涌水主要来源于 C_2h 和 C_3c 的碳酸盐岩溶水, 而砂岩溪沟水的混合也对隧道

涌水有一定影响。

2.2.2 基于地下水氢氧同位素特征的涌水来源

研究区各水样的氢氧同位素值比较接近, 且具有较好的线性关系, 表明不同类型的水之间存在相似的补给来源^[18](图7)。同时本次水样的氢氧同位

图6 研究区不同水体 Ca^{2+} 和 Sr^{2+} 比值关系Fig. 6 Ratio relationship between Ca^{2+} and Sr^{2+} of different water bodies in the study area

素特征拟合曲线($\delta D=8.30\delta^{18}O+17.00$)的斜率与杭州地区大气降水线^[19]($\delta D=8.32\delta^{18}O+20.49$)基本一致,且各水样的氢氧同位素组成落在杭州大气降水线的右下方(图6),表明各水样在受到大气降水补给的同时,还受到了蒸发作用的影响。其中,砂岩溪沟水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 分别介于 -47.17‰ ~ -45.39‰ 和 -7.90‰ ~ -7.56‰ 之间,隧道涌水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 分别为 -46.91‰ 和 -7.67‰ ,暗河排泄水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 分别介于 -47.04‰ ~ -45.86‰ 和 -7.57‰ ~ -7.49‰ 之间,岩溶泉的 δD 和 $\delta^{18}O$ 分别为 -42.68‰ 和 -7.25‰ 。砂岩溪沟水更靠近杭州大气降水线,说明其接受大气降水的补给更直接,更新速度快。岩溶泉表现出重同位素较富集的特征,这是由于其补给路径更长,受到蒸发作用影响较强,同时水岩作用更充分,且与深层地下水充分混合也更充分。隧道涌水的氢氧同位素组成略低于暗河排泄水,介于砂岩溪沟水和岩溶泉之间,这是由于隧道涌水及地下暗河均处于地下水流系统的径流路径中途,受到地表降水及砂岩溪沟水的补给后,流经地下岩溶裂隙—管道网络,经隧道和地下暗河,由岩溶泉口排出,因此,进一步验证了上述水化学分析结果。

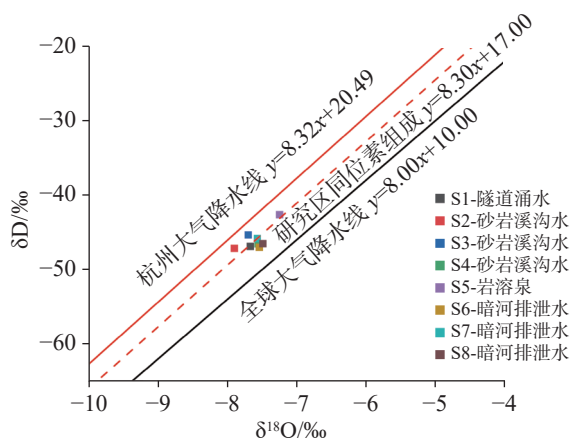


图7 研究区不同水体氢氧同位素组成

Fig. 7 Hydrogen and oxygen-isotope composition of different water bodies in the study area

由上文可知,研究区岩溶水和砂岩溪沟水主要接受大气降水的补给,在不断的径流过程中形成了不同的水化学和氢氧同位素组成特征,可用水化学和氢氧同位素对隧道涌水来源进行量化。隧道涌水与暗河排泄水具有同源性,主要来源于岩溶水,同时存在砂岩溪沟水的混合。采用两端元混合模型可计算隧道涌水来源的比例。计算公式为:

$$\delta_{\text{隧道涌水}} = x\delta_{\text{灰岩岩溶水}} + (1-x)\delta_{\text{砂岩水}} \quad (1)$$

式中: x 为灰岩水所占比例; $\delta_{\text{隧道涌水}}$ 、 $\delta_{\text{灰岩岩溶水}}$ 和 $\delta_{\text{砂岩水}}$ 为隧道涌水、灰岩岩溶水、砂岩水的 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 δD 和 $\delta^{18}O$ 值。灰岩岩溶水取暗河排泄水的值进行计算;砂岩水中S3和S4靠近砂岩灰岩交界处,因此选取远离灰岩地层S2的值进行计算。

经计算,研究区隧道涌水中70%~79%来源于灰岩岩溶水,21%~30%来源于砂岩水。其中灰岩岩溶水在岩溶沟谷处通过落水洞—裂隙管道网络获得大气降水补给,在径流过程中由于隧道的开挖成为隧道涌水的主要来源;砂岩水可通过地表径流、下渗后的侧向径流及越流补给灰岩岩溶水,但由于分水岭以及隔水层的限制,其对隧道涌水的影响较小。

3 虎溪台隧道涌水量预测

在岩溶地区,隧道涌水量的预测是隧道安全施工及运行的必要前提^[20]。目前用来预测隧道涌水量的方法较多,但往往忽视了极端降雨事件对隧道涌水量的影响^[21]。本文根据研究区的水文地质条件,将隧道划分为3段进行计算,其中K65+100—K65+360段长230 m,在分水江岩溶地下水流系统范围内,含水岩组为灰岩,岩溶极为发育,涌水量极大;而K63+285—K65+100段和K65+360—K66+410段,揭露的地层为西湖组石英砂岩,含水介质以基岩裂隙为主,涌水量较少。本文主要针对涌水风险高的K65+100—K65+360岩溶涌水段重点计算,分别利用大气降水入渗法和地下水动力学法2种方法^[22-24],分析隧道正常涌水量及其所占地下水补给量的比例,并预测极端降雨条件下隧道灰岩段的最大涌水量。

3.1 大气降水入渗法

在灰岩出露区,大气降水可通过表层裂隙—管道—落水洞网络迅速入渗并进入含水层,因此可用大气降水入渗法来计算地下水补给量^[25-26]。根据研究区的年均降水量和理论年最大降水量,结合地质条件和地下水流系统划分结果,获取涌水段的降水入渗系数和集水面积,最后计算出极端气候条件下的最大补给量(表2)。

具体计算公式如下:

$$Q_{\text{极端}} = 1\,000 \cdot \alpha \cdot W_{\text{max}} \cdot A \quad (2)$$

表 2 大气降水入渗法各参数及补给量计算结果

Table 2 Calculation results of parameters and recharge of atmospheric precipitation infiltration method

涌水段	α	$W_{\max}/\text{mm}$	A/km^2	$Q_{\text{极端}}/\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$
K65+100—K65+360	0.3	246.40	2.15	158 928.00

式中: $Q_{\text{极端}}$ 为极端降雨条件下地下水最大补给量 ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$); α 为降水入渗系数, 根据《铁路工程水文地质勘察规范》(TB10049-2014), 结合研究区各含水层的水文地质条件确定, 灰岩区取 0.3; $W_{\max}$ 为历史最大日降雨量 (mm), 根据历年《杭州市水资源公报》, 研究区历史最大日降雨量为 246.40 mm; A 为集水面积 (km^2), 根据地下水流系统划分的补给范围确定; 1000 为单位换算系数。

3.2 地下水动力学法

地下水动力学法预测隧道涌水量的方法较多, 主要包括裘布依公式、古德曼公式、佐藤邦明理公式、大岛洋志公式等, 其中古德曼公式预测效果较好^[27-28]。因此, 本研究选取古德曼公式预测隧道正常涌水量 (表 3), 考虑到存在砂岩水的侧向补给, 计算公式如下:

$$Q_{\text{灰岩岩溶水}} = \frac{2\pi LKH}{\ln \frac{4H}{d}} \quad (3)$$

$$Q = Q_{\text{灰岩岩溶水}} + Q_{\text{砂岩水}} \quad (4)$$

式中: Q 为隧道正常涌水量 ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$); $Q_{\text{灰岩岩溶水}}$ 为岩溶水来源的隧道正常涌水量 ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$); $Q_{\text{砂岩水}}$ 为砂岩水来源的隧道正常涌水量 ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$), 可根据前文计算得到的隧道涌水中灰岩岩溶水和砂岩水的平均比例计算; L 为隧道通过含水体的长度 (km); K 为渗透系数 ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$), 取经验值 $0.0864 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[29]; H 为静止水位至洞

身断面等价圆心的距离 (m); d 为洞身断面等价圆直径 (m)。

3.3 极端降雨条件下隧道最大涌水量

在岩溶区隧道开挖时, 极端降雨事件会对隧道施工安全造成严重威胁。因此, 需预测极端降雨条件下的隧道最大涌水量, 并采取相应防御措施。

依据水化学及同位素分析结果, 研究区地下水主要受到大气降水的补给, 大气降水在下渗过程中, 部分地下水因隧道开挖而涌入隧道, 其余则继续水平径流通过地下暗河排泄。前文计算得到隧道正常涌水量为 $10684.89 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 极端降雨条件下地下水最大补给量为 $158928.00 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 因此, 可结合暗河排泄水量计算地下水涌入系数 (η) 和极端降雨条件下的隧道最大涌水量。考虑到砂岩水侧向补给的水头压力固定, 其补给量以定值 $2617.80 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 计算, 具体计算公式如下:

$$Q_{\text{补给}} = Q + Q_{\text{暗河}} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{Q - Q_{\text{砂岩水}}}{Q_{\text{补给}} - Q_{\text{砂岩水}}} \quad (6)$$

$$Q_{\max} = \eta Q_{\text{极端}} + Q_{\text{砂岩水}} \quad (7)$$

式中: $Q_{\text{补给}}$ 为地下水正常补给量 ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$); $Q_{\text{暗河}}$ 为分水江岩溶地下水流系统内与隧道标高相近的地下暗河 (S8) 流量, 流量为 $8640 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$; η 为地下水涌入系数, 即涌入岩溶隧道的地下水量与地下水正常补给量的比值; $Q_{\max}$ 为极端降雨条件下隧道最大涌水量 ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)。

计算结果显示地下水涌入系数 (η) 为 0.4829, 表明大气降水下渗补给地下水后, 由于隧道的开挖, 有 48.29% 的地下水通过隧道进行排泄, 其余则继续以地下暗河的形式排泄; 在极端降雨事件发生时, 隧道最大涌水量可达 $79364.13 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ (表 4)。

表 3 地下水动力学法各参数及涌水量计算结果

Table 3 Calculation results of parameters and water influx of groundwater dynamics method

涌水段	K65+100—K65+360
L/m	260.00
$K/\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	0.0864
H/m	260.00
h/m	254.00
d/m	11.00
$Q_{\text{灰岩岩溶水}}/\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	8067.09
$Q_{\text{砂岩水}}/\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	2617.80
$Q/\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	10684.89

表 4 极端降雨条件下隧道最大涌水量计算结果

Table 4 Calculation results of maximum water influx in the tunnel under extreme rainfall conditions

涌水段	$Q_{\text{补给}}/\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	η	$Q_{\max}/\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$
K65+100—K65+360	19324.89	0.4829	79364.13

4 结 论

(1)虎溪台隧道隧址区地下水系统可划分为漕源溪地下水流系统(Ⅰ)、分水江岩溶地下水流系统(Ⅱ)和大坑溪—柴坪里地下水流系统(Ⅲ)。隧道K65+100-K65+360段位于分水江岩溶地下水流系统(Ⅱ)中,为岩溶涌水段,由石炭系中统的黄龙组(C_2h)和石炭系上统的船山组(C_3c)灰岩组成,涌水量极大,涌水风险高。

(2)隧址区岩溶地下水主要接受大气降水的补给,大气降水在岩溶沟谷处通过落水洞—裂隙管道网络补给地下水;隧道涌水及暗河排泄水主要以碳酸盐岩的溶解为主,水化学特征表现为岩溶水和砂岩水的混合;隧道的直接涌水成因为 C_2h 和 C_3c 灰岩岩溶水沿着裂隙管道网络的垂直入渗补给,占隧道涌水的70%~79%,同时存在21%~30%的砂岩水侧向补给。

(3)大气降水补给地下水后,48.29%的地下水通过隧道进行排泄;隧道灰岩段在无极端降雨事件情况下,隧道涌水量为 $10684.89\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$;在极端降雨事件发生时,隧道最大涌水量可达 $79364.13\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。

参考文献

- [1] 张鹏,潘晓东,任坤,骆伟,马德青,彭聪,杨杨.岩溶台地深埋特长隧道岩溶水流特征及涌水评估[J].公路,2022,67(2): 337-345.
ZHANG Peng, PAN Xiaodong, REN Kun, LUO Wei, MA Deqing, PENG Cong, YANG Yang. Characteristics of karst water flow in deeply buried long tunnel on karst plateau and assessment of water inrush[J]. Highway, 2022, 67(2): 337-345.
- [2] 李志源,王维富,徐学存.岩溶隧道涌水来源及对地下水环境的影响[J].铁道建筑,2020,60(9): 78-82.
LI Zhiyuan, WANG Weifu, XU Xuecun. The source of karst tunnel water inflow and its impact on groundwater environment[J]. Railway Engineering, 2020, 60(9): 78-82.
- [3] 罗一鸣,成建梅,徐文杰,巴净慧,黄盛财,段天宇.西南岩溶区深埋隧洞涌水条件分析及涌水量预测:以滇中引水工程大坡子隧洞为例[J].中国岩溶,2023,42(6): 1224-1236.
LUO Yiming, CHENG Jianmei, XU Wenjie, BA Jinghui, HUANG Shengcai, DUAN Tianyu. Analysis of water inflow conditions and prediction for water inflow of deep-buried tunnels in the karst area of Southwest China: Taking Dapozi tunnel of central Yunnan Water Diversion Project as an example[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(6): 1224-1236.
- [4] 武亚遵,万军伟,林云,蔡二贝.基于岩溶演化模型的隧道突水危险性评价[J].地质科技通报,2015,34(5): 166-171,179.
WU Yazun, WAN Junwei, LIN Yun, CAI Erbei. Risk evaluation of water inrush in karst tunnel based on karst evolution model[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2015, 34(5): 166-171,179.
- [5] 郑克勋,裴熊伟,朱代强,吴述或,郭维祥.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.
ZHENG Kexun, PEI Xiongwei, ZHU Daiqiang, WU Shuyu, GUO Weixiang. Thoughts on tunnel water inrush in changing zones of groundwater level in karst areas[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(4): 473-479.
- [6] 林永生,邹胜章,朱丹尼.岩溶隧道涌水原因揭秘[J].中国矿业,2020,29(S1): 582-583,586.
LIN Yongsheng, ZOU Shengzhang, ZHU Danni. The causes of water bursting in karst tunnel[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(S1): 582-583,586.
- [7] 冯雪冬,周小龙,胡亚晴.岩溶地区隧道突涌水机理的研究进展[J].武汉工程大学学报,2022,44(3): 250-259,354.
FENG Xuedong, ZHOU Xiaolong, HU Yaqing. Research progress in water inrush mechanisms of tunnels in karst area[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2022, 44(3): 250-259,354.
- [8] 李潇,漆继红,许模.西南典型狭窄褶皱小尺度浅层岩溶水系统特征及隧道涌水分析[J].中国岩溶,2020,39(3): 375-383.
LI Xiao, QI Jihong, XU Mo. Analysis on the characteristics of small-scale shallow karst water systems in typical tight-narrow folds and tunnel water inrush in southwestern China[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(3): 375-383.
- [9] 徐啸川,徐光黎,魏文豪,李溢渊,薛媛.示踪实验在湾潭隧道涌水突泥判别中的应用[J].地质科技通报,2023,42(2): 297-304.
XU Xiaochuan, XU Guangli, WEI Wenhao, LI Yiyuan, XUE Yuan. Application of a tracing experiment in the prediction of water and mud inrush in the Wantan Tunnel[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 297-304.
- [10] 罗明明,周宏,郭绪磊,陈乾龙,齐凌轩,况野.峡口隧道间歇性岩溶涌突水过程及来源解析[J].地质科技通报,2021,40(6): 246-254.
LUO Mingming, ZHOU Hong, GUO Xulei, CHEN Qianlong, QI Lingxuan, KUANG Ye. Processes and sources identification of intermittent karst water inrush in Xiakou Tunnel[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(6): 246-254.
- [11] 邵长杰,曾斌,徐国锋.金华山隧道涌水对双龙洞景区岩溶泉影响分析[J].中外公路,2020,40(S2): 199-203.
SHAO Changjie, ZENG Bin, XU Guofeng. Analysis of the impact of water inflow from Jinhuashan tunnel on karst springs in Shuanglong cave scenic spot[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(S2): 199-203.
- [12] 彭红明,袁有靖,李铜邦,董高峰,刘毅,巴瑞寿.青海天峻新关角隧道涌排水水源识别与量化分析[J].地质科技通报,2022,41(1): 60-70.

- PENG Hongming, YUAN Youjing, LI Tongbang, DONG Gaofeng, LIU Yi, BA Ruishou. Identification and quantitative analysis of groundwater discharged from Xinguanjiao tunnel in Tianjun, Qinghai[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 60-70.
- [13] 罗明明, 黄荷, 尹德超, 周宏, 陈植华. 基于水化学和氢氧同位素的峡口隧道涌水来源识别[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 7-13.
- LUO Mingming, HUANG He, YIN Dechao, ZHOU Hong, CHEN Zhihua. Source identification of water inrush in the Xiakou tunnel based on hydrochemistry and hydrogen-oxygen isotopes[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(1): 7-13.
- [14] 刘常昊, 郑万波, 吴燕清, 杨志全, 丁力生, 杨黎明, 史耀轩. 玉磨铁路景寨隧道富水段涌水量预测方法[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(4): 66-73.
- LIU Changhao, ZHENG Wanbo, WU Yanqing, YANG Zhiqian, DING Lisheng, YANG Liming, SHI Yaoyuan. Prediction method of water inflow in the Fushui section of Jingzhai tunnel of Yumo railway[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(4): 66-73.
- [15] 常威, 谭家华, 黄琨, 程焱, 黄镇, 万军伟. 地下水多元示踪试验在岩溶隧道水害预测中的应用: 以张吉怀高铁兰花隧道为例[J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 400-408.
- CHANG Wei, TAN Jiahua, HUANG Kun, CHENG Xi, HUANG Zhen, WAN Junwei. Application of groundwater multi-element tracing tests to water hazard prediction of karst tunnels: An example of the Lanhua tunnel on the Zhangjiajie-Jishou-Huaihua high-speed railway[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(3): 400-408.
- [16] 沈东东. 乐广高速岩溶隧道稳定性及突涌水研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2011.
- SHEN Dongdong. Study and evaluate of stability and water gushing of surrounding rockmass in karst area tunnel in Leguang freeway[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2011.
- [17] 吴春勇. 鄂尔多斯白垩系盆地地下水水化学演化的同位素示踪研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- WU Chunyong. Isotopic constraints on hydrochemical evolution of groundwater in the Ordos Cretaceous Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [18] 张俊锋, 李强, 史永跃, 吴磊. 西南某隧道岩溶水发育规律及涌水量预测[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(2): 14-21.
- ZHANG Junfeng, LI Qiang, SHI Yongyue, WU Lei. On development law of karst water and prediction of water inflow in a tunnel in Southwest China[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(2): 14-21.
- [19] Jin Z, Wang Y, Li F, Qian L, Hu Y, Shi Y. Stable isotopes and chemical characteristics of precipitation in Hangzhou and Huzhou, East China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(7): 23717-23729.
- [20] 范威, 王川, 金晓文, 胡德勇, 陈植华. 吉莲高速公路钟家山隧道涌突水条件分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 38-43,51.
- FAN Wei, WANG Chuan, JIN Xiaowen, HU Deyong, CHEN Zhihua. Water inrush condition analysis of the Zhongjiashan tunnel in the Jilian highway[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(2): 38-43,51.
- [21] 郑齐. 王家山隧道水文地质条件分析及涌水量的预测[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(11): 111-113.
- ZHENG Qi. Analysis of hydrogeological conditions and prediction of water inflow in Wangjiashan tunnel[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2022, 45(11): 111-113.
- [22] 陈瑜林. 西南地区岩溶隧道涌水量统计分析计算[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- CHEN Yulin. Statistical analysis and calculation of water flow in southwestern karst tunnel[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [23] 常威. 复杂岩溶水系统识别及其在隧道涌水量预测的应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2021.
- CHANG Wei. Study on the identification of complex karst water system and its application in tunnel water disaster prediction[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2021.
- [24] 陈明浩, 邓宏科, 张广泽, 付开隆. 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, FU Kai-long. 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.
- [25] 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.
- TIAN Zutao, ZHANG Jun. Karst hydrogeological conditions and hazard assessment of Hualu Tunnel[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(4): 552-558.
- [26] 齐国庆. 红崖山岩溶隧道突水危险性分析与涌水量预测研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- QI Guoqing. Study on the hazard analysis of water inrush and the prediction of water inflow in Hongyashan karst tunnel[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.
- [27] 傅鹤林, 安鹏涛, 伍毅敏, 李鲇, 陈龙. 富水裂隙围岩隧道涌水量计算方法与规律分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(3): 110-116.
- FU Helin, AN Pengtao, WU Yimin, LI Jie, CHEN Long. Calculation method and law analysis of water inflow in tunnel under water-rich fissure surrounding rock[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(3): 110-116.
- [28] 黄启艳. 富水破碎砂岩隧道涌水预测及施工治理措施研究[J]. 铁道建筑技术, 2024(7): 166-168,185.
- HUANG Qiyang. Study on prediction and construction measures for water gushing in fractured sandstone tunnel with abundant water[J]. Railway Construction Technology, 2024(7): 166-168,185.
- [29] 李清波, 闫长斌. 岩体渗透结构类型的划分及其渗透特性研究

[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 503-507.

LI Qingbo, YAN Changbin. Classification of permeability struc-

ture types of rock mass and its permeability characteristics [J].

Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 503-507.

Genesis analysis of karst groundwater inrush and prediction of its water inflow in the Huxitai Tunnel

SHAO Changjie¹, WANG Lei², LIU Huidong¹, CUI Yongxing¹, LIU Wei²

(1. Zhejiang Institute of Communications CO., LTD., Hangzhou, Zhejiang 310030, China; 2. Institute of Geological Survey of China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Tunnel water inrush is one of the primary threats to tunnel construction safety, not only posing risks during the construction but also creating long-term hidden dangers for the post-construction operation and maintenance. This issue is particularly severe in karst tunnels, where dense karst fractures and conduit networks will lead to rapid water inrush responses to precipitation. Extreme rainfall events can trigger the instantaneous and massive water influxes, making tunnel water inrush in karst regions especially serious. Therefore, it is critical to elucidate the formation mechanisms of tunnel water inrush and to predict water influxes during extreme rainfall conditions in order to address water inrush challenges and ensure safety of tunnel construction in karst regions.

The Huxitai Tunnel is examined here as a case study. This tunnel is a critical component of Linjian Expressway, located in the subtropical humid zone of Eastern China, characterized by abundant precipitation and complex geological conditions. The tunnel tranverses through the Carboniferous Huanglong Formation (C_2h) and the Chuanshan Formation (C_2c) limestones, which features well-developed karst conduits, abundant water, and high permeability. These features result in significant water inrush problems, increased construction challenges, and heightened safety risks. Since the beginning of tunnel construction, water inrush events in varying degrees have occurred in the limestone sections of the tunnel.

To investigate the causes of water inrush in the Huxitai Tunnel under karst geological conditions and to estimate its influxes, this study conducted detailed field investigations and in-situ tests to analyze the hydrogeological conditions of the water inrush sections and to determine the groundwater flow systems. Based on the hydrogeochemical characteristics and hydrogen-oxygen isotopes of groundwater, the study analyzed the pathways of karst groundwater flow and the mechanisms of water inrush. It also estimated the contributions of different water sources to the tunnel water inrush by employing the isotopic end-member mixing model. Using precipitation infiltration methods and groundwater dynamics principles, the study calculated groundwater recharge rates and the proportion of tunnel water inrush relative to total recharge, while predicting the maximum water influx in the tunnel during extreme rainfall events. The findings include as follows.

(1) According to the pathways of groundwater flow, the tunnel region is divided into three groundwater flow systems: the Caoyuanxi groundwater flow system, the Fenshuijiang karst groundwater flow system, and the Dakengxi–Chaipingli groundwater flow system. The karst water inrush section (K65+100-K65+360) lies within the Fenshuijiang karst groundwater flow system, which consists of the Huanglong Formation and the Chuanshan Formation limestone characterized by intensive karst development, abundant water influx, and high risks.

(2) Karst groundwater in the tunnel area is primarily recharged by precipitation, which infiltrates through sinkholes and karst conduits. The hydrochemical characteristics of tunnel water inrush are similar to those of

(下转第 518 页)

currently underway. The results show as follows.

(1) The quality of karst groundwater in Slovenia is excellent, with groundwater remaining in its natural state. Parameters such as water temperature, pH, conductivity, and concentrations of anion and cation remain stable within fixed ranges throughout the year. Fluctuations, when they occur, are mostly affected by natural environment variations rather than human activities.

(2) Comparative analysis with hydrochemical data from the Lijiang Basin in the karst areas of southwest China reveals that the hydrochemical types in karst areas are predominately controlled by water-rock interactions, with negligible influence from other factors.

(3) Analysis of hydrogen and oxygen isotopic characteristics of groundwater shows that atmospheric precipitation serves as the primary recharge source for karst groundwater in the study area. Influenced by weathering and leaching processes in carbonate aquifers and other types of rock, groundwater exhibits typical HCO_3^- - Ca^{2+} type.

(4) The concentrations of common pollutants, such as nitrate, are far below the safety limit for drinking water quality set by the World Health Organization. The primary sources of these contaminants are soil nitrogen derived from natural processes. During the dry season, groundwater at some sampling sites exhibits contamination from domestic sewage and livestock manure.

Key words Slovenia, karst, groundwater, hydrochemistry, isotope

(编辑 张玲)

(上接第 487 页)

underground river discharge, dominated by carbonate rock dissolution, reflecting a mixture of karst water and sandstone water. Karst water vertically infiltrating from the Huanglong Formation and the Chuanshan Formation limestone accounts for 70% to 79% of tunnel water inrush, with 21% to 30% contributed by lateral sandstone water.

(3) During the runoff process, the recharge of groundwater from atmospheric precipitation amounts to $19,324.89 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, of which 48.29% is discharged through the tunnel. Under non-extreme rainfall conditions, the predicted water influx into the Huxitai Tunnel is $10,684.89 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; however, during extreme rainfall events, the maximum predicted water influx can reach up to $79,364.13 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$.

To sum up, these results provide a quantitative decision-making basis for the prevention and control of water inrush in the Huxitai Tunnel, and also serve as valuable references for similar studies on water inrush of karst tunnel.

Key words the Huxitai Tunnel, groundwater hydrochemistry, hydrogen and oxygen isotopes, karst groundwater system, source of water gushing

(编辑 黄晨晖)