

常威,谭家华,黄琨,等.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.

DOI:10.11932/karst2020y27

# 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

常威<sup>1</sup>,谭家华<sup>2</sup>,黄琨<sup>1</sup>,程焱<sup>1</sup>,黄镇<sup>1</sup>,万军伟<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

**摘要:**以张家界—吉首—怀化高速铁路兰花隧道为例,在岩溶水文地质调查基础上结合地下水多元示踪技术,查明了兰花隧道隧址区各岩溶地下水系统以及地下暗河管道的空间展布。结果表明:(1)兰花隧道及其附近区域全部为寒武系碳酸盐岩裸露区,以峰丛洼地为主,地表和地下岩溶极为发育;(2)兰花隧道隧址及其附近区域共发育有呆业洞和兰花洞两个独立的地下暗河系统,其中I号、II号、III号三个岩溶水系统属于兰花洞地下暗河系统的子系统;IV号岩溶水系统属于呆业洞地下暗河系统;(3)IV号岩溶地下水系统在平面和剖面上都没有与兰花隧道相交,不会对隧道突涌水构成威胁;(4)兰花洞地下暗河系统以中部兰花洞暗河天窗为界分为上游和下游两段,上游段I号和II号岩溶水系统在平面和剖面上都没有与兰花隧道相交,不会对兰花隧道突涌水构成威胁;下游段III号岩溶水系统在平面上与兰花隧道相交(交点里程为DK60+100),可能存在隧道突涌水风险;(5)依据高分辨率降雨—水文动态监测数据,采用降雨入渗系数法预测在极端暴雨情况下兰花隧道揭露III号岩溶管道的最大涌水量为 $7.08 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

**关键词:**兰花隧道;多元示踪试验;水文动态监测;涌水量预测

中图分类号:U453.61 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2020)03-0400-09 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

中国西南地区碳酸盐岩出露面积大、降雨充沛、暴雨集中,地表岩溶洼地、岩溶槽谷、落水洞广布,地下岩溶管道、暗河常呈树枝状展布,岩溶地下水在时间、空间分布上极不均匀,暗河流量呈陡涨陡落的特征<sup>[1-2]</sup>,该地区的隧道工程建设易发生岩溶突涌水灾害,这对工程建设和施工人员的生命安全构成重大威胁<sup>[3-8]</sup>。随着中国西南地区交通、水利工程建设的发展,大量岩溶隧道工程在建或规划建设中,岩溶隧道的选线以及施工过程中的水害预测与防治成为了

规避和降低隧道突涌水风险研究的重大工程实际问题。

岩溶管道、地下暗河发育受地层岩性、地质构造、地貌演化、水系变迁等诸多因素的影响控制,发育规律十分复杂,查明隧道与岩溶地下水系统,尤其是与暗河管道的空间关系是岩溶隧道水害防治的关键。目前岩溶隧道水文地质勘察一般是在岩溶区水文地质调查的基础上,通过岩溶发育控制因素的综合分析,辅以水文地球化学<sup>[4,9-10]</sup>和环境同位素<sup>[4,10]</sup>分析测试等技术方法,推测岩溶水系统、地下岩溶管道或暗河的分布特征,部分研究采用地下水示踪试

资助项目:张吉怀铁路芙蓉镇地区岩溶水文地质监测专项(CT900905K);宜昌市资源环境承载能力调查评价(DD20190315)

第一作者简介:常威(1991—),男,博士研究生,主要从事水文地质方面的研究。E-mail:1195079793@qq.com。

通信作者:万军伟(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事水文地质科研与教学工作。E-mail:wanjw@cug.edu.cn。

收稿日期:2019-09-29

验<sup>[11-18]</sup>方法来进一步查明和验证地下水的来龙去脉。随着地下水示踪技术的不断完善,尤其是野外便携式自动监测仪器和监测技术的改进,地下水示踪试验的分辨率大大提高,运用多元示踪技术可以同时开展多个补给来源的地下水示踪,大大缩减了试验时间和成本,还可提升岩溶发育规律的认识,准确判断岩溶管道和地下暗河的分布,进而为隧道工程选线、隧道工程设计和施工过程中的水害防治提供了重要的新方法。

张家界—吉首—怀化高速铁路(下文简称“张吉怀高铁”)位于湖南省西北部,连接了张家界—吉首—怀化3个市7个县,正线长246.6 km。兰花隧道位于湘西自治州永顺县芙蓉镇境内,隧道全长4.39 km(里程桩号:DK68+600~DK72+990),进口位于芙蓉镇保坪村,高程为593.2 m;出口位于芙蓉镇孔坪村,高程为461.5 m,为坡度3%的单斜坡隧道。兰花隧道隧址及附近区域碳酸盐岩裸露,岩溶洼地、槽谷广布,岩溶极为发育,地表水和地下水转换频繁。本研究在岩溶水文地质调查、降雨—泉流量动态监测的基础上,对区内地下水的集中补给来源开展多元地下水示踪试验,以查明岩溶水系统及暗河管道的空间展布及其与兰花隧道的空间关系,并确定隧道水害的位置和预测隧道最大涌水量,以期为隧道防排水设计提供水文地质依据。

## 1 岩溶水文地质条件

### 1.1 岩溶发育特征

兰花隧道位于大青山西侧,整体地势东高西低,从大青山至保坪河整体为岩溶斜坡,海拔从1 000 m降至480 m。其中600~700 m处,为岩溶缓坡台地,分布有一些封闭的岩溶洼地(如下寨岩溶洼地)和一些被后期地表沟谷切割改造一侧开口的半封闭岩溶洼地(如泽豪、孔家湾、涨潮湾等岩溶洼地)。研究区位于松柏向斜东南翼,地层整体呈单斜状产出,倾向西南,倾角为25°~35°,区内主要出露寒武系中—上统地层(图1),其中寒武系中统敖溪组( $e_2a$ )以灰黑色薄层硅质页岩、泥质灰岩夹钙质页岩为主,厚度为194.02 m,岩溶发育程度总体较弱;花桥组( $e_2h$ )为灰色薄—中层条带状泥质灰岩夹炭质、钙质页岩,厚度为86.38 m,岩溶发育程度中等;寒武系上统车夫组( $e_3c$ )为灰黑色中薄层泥质条带灰岩、泥质条带灰岩夹竹叶状灰岩或钙质页岩,厚度为143.25 m,岩溶发

育程度中等;比条组( $e_3b$ )为灰色薄—中厚层泥质条带灰岩,厚度为509.51 m,岩溶发育程度较强;追屯组( $e_3z$ )为灰色中厚—厚层细晶白云质灰岩、白云岩,厚度为425.38 m,岩溶发育程度极强。兰花隧道整体位于追屯组极强岩溶发育地层中,隧道走向与地层走向基本一致。

研究区内多年平均降雨量为1 328 mm,降雨在时空分布上极不均匀,主要集中在4~8月,约占全年降雨量的60%,雨季地下暗河、地表溪沟流量呈现出暴涨暴露的特征。受大青山和保坪河控制,区内发育多条近东—西向的水系,保坪河为区域地下水排泄基准,地表及地下水均向保坪河排泄(图2),该河流为常年性河流,枯季平均流量为 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,暴雨期流量可达 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。研究区发育有1 000 m、800 m、600 m三级岩溶台地,600 m高程的岩溶台地岩溶发育最强烈,岩溶洼地、岩溶槽谷、落水洞分布广泛,地下暗河发育,兰花隧道主要在该级岩溶台面高程以下穿越。

保坪河东岸发育有涨潮湾、孔家湾、彭家坪和下寨4条支流,这些支流的水源主要来自大青山西侧的大气降水或岩溶泉水的补给,700 m高程以上大气降雨和泉水以分散面流或沟流的形式汇集于600~700 m高程岩溶台面上发育的岩溶洼地中,这些岩溶洼地的底部一般都发育有落水洞,地表径流或全部、或部分渗入地下。例如,下寨岩溶洼地汇水全部经④号落水洞潜入地下;而涨潮湾、孔家湾、泽豪岩溶洼地为半封闭岩溶洼地,一般情况下地表径流主要经①号、②号、③号落水洞潜入地下,但是在强降雨情况下地表径流超出落水洞下渗能力时,则地表直接向下游径流汇入保坪河或兰花洞暗河。

经调查,兰花隧道附近区域主要有4个地下水集中出露点( $Q_1$ ~ $Q_4$ ),各地下水集中出露点的高程、流量特征如表1所示。兰花隧道与保坪河之间,发育着一条近东西走向的兰花洞地下暗河,其中 $Q_1$ 出水点处为兰花洞暗河天窗,流量为 $150 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ,高程为545 m,自天窗向上游200 m后即转为全充水管道,人无法通行;自天窗向下游( $Q_1$ ~ $Q_3$ )为无压管道,人可通行,全长1 600 m,在天窗下游约500 m暗河左岸有一支管道( $Q_2$ )汇入,流量为 $30 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ,高程为543 m;兰花洞暗河在 $Q_3$ 处出露地表汇入保坪河,出口流量为 $250 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ,高程为500 m。此外,在兰花隧道东侧发育有呆业洞暗河出口( $Q_4$ ),流量为 $150 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ,高程为660 m,地下水自呆业洞流出后经撤组河最终汇入保坪河。

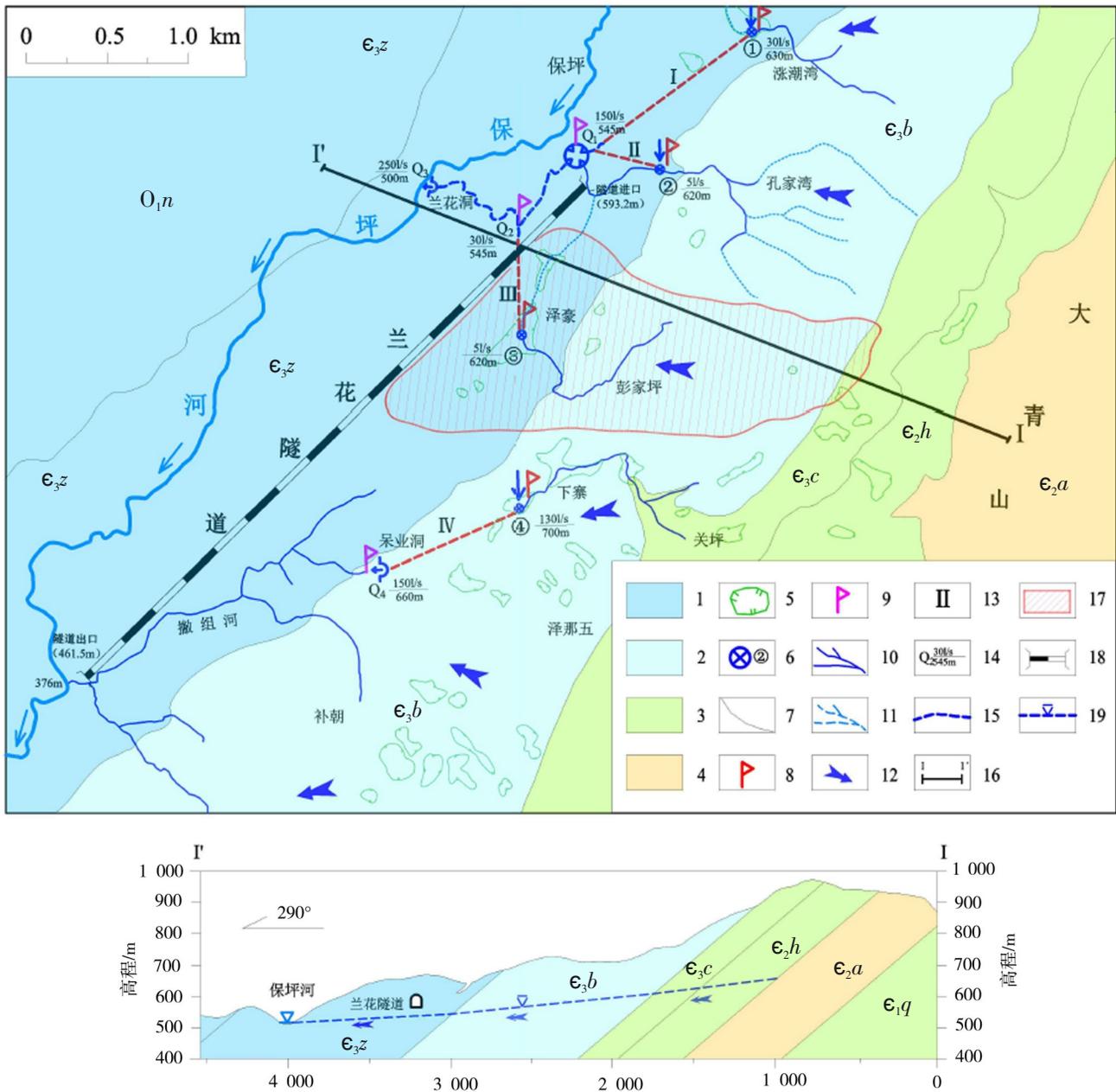


图1 隧址区水文地质平面及剖面图

Fig. 1 Hydrogeological map of the tunnel site

1—极强岩溶含水层 2—强岩溶含水层 3—中等岩溶含水层 4—弱岩溶含水层 5—岩溶洼地 6—落水洞 7—地质界线 8—示踪剂投放点  
 9—示踪剂接收点 10—常年性河流 11—季节性河流 12—地下水流向 13—岩溶水系统编号 14—出水点 15—地下暗河 16—剖面线  
 17—汇水范围 18—兰花隧道 19—地下水位线

表1 兰花隧道相关水点高程、流量一览表

Table 1 List of elevation and discharge of hydrogeological points in the Lanhua tunnel

类别	落水洞				暗河或管道出口				兰花隧道	
	涨潮湾 ①号落水洞	孔家湾 ②号落水洞	泽豪 ③号落水洞	下寨 ④号落水洞	兰花洞 暗河天窗(Q <sub>1</sub> )	兰花洞下 游段左侧 管道(Q <sub>2</sub> )	兰花洞 暗河出口(Q <sub>3</sub> )	呆业洞 暗河出口(Q <sub>4</sub> )	进口	出口
高程/m	630	620	620	700	545	543	500	660	593.2	461.5
流量/L·s <sup>-1</sup>	30	5	5	130	150	30	250	150	—	—

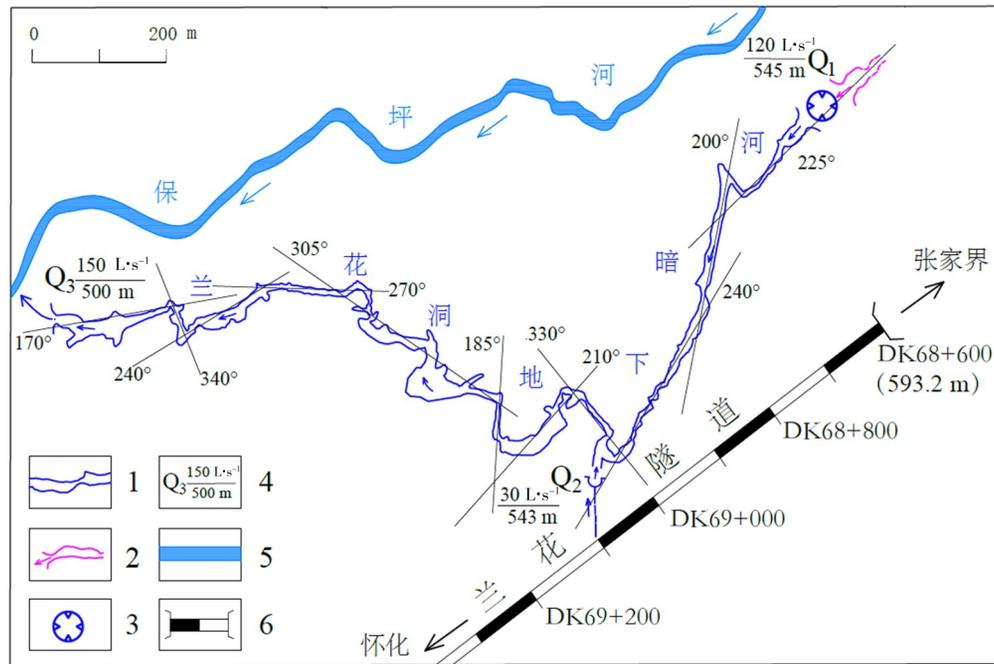


图 2 兰花洞地下暗河实测图

Fig. 2 Measured map of the underground river in the Lanhua cave

1—下游段 2—上游段 3—暗河天窗 4—出水点编号(流量/高程) 5—保坪河 6—兰花隧道

兰花隧道附近上述 4 条支流都存在地表水集中渗漏的现象,且渗漏点的高程均高于兰花隧道,这 4 个集中渗漏点与 4 个集中出水点之间的关系以及各地下岩溶管道的空间分布及其与兰花隧道的关系是分析确定兰花隧道是否存在岩溶突涌水灾害、突涌水灾害发生的部位以及突涌水量预测的关键。

### 1.2 暗河结构特征

研究区主要发育有呆业洞和兰花洞 2 条地下暗河系统。

呆业洞暗河出口( $Q_4$ )高程为 660 m,而①号、②号、③号 3 个落水洞的高程,均低于 $Q_4$ ,故①号、②号、③号落水洞汇集的地下水应与呆业洞暗河无关。根据实际调查,呆业洞暗河出口方向为 $260^\circ$ ,下寨④号落水洞洞口延伸方向为 $240^\circ$ ,根据研究区各岩溶泉点和落水洞发育的高程,进出口流量以及暗河管道实际测量数据可大致判断:下寨岩溶洼地的④号集中渗漏点极有可能是呆业洞 $Q_4$ 出水点的最主要来源。

兰花洞暗河从天窗( $Q_1$ )至暗河出口( $Q_3$ )是一段可以全程贯通的暗河管道,以天窗( $Q_1$ )为界,可将兰花洞地下暗河分为上游段和下游段,天窗( $Q_1$ )以上为上游段,自暗河天窗往上游方向可探测洞段长约 200 m,再向上游为全充水岩溶管道;天窗( $Q_1$ )至暗河

出口( $Q_3$ )为下游段,下游段暗河管道发育规模较大,可全程探测。本次调查对下游段进行了实际测量(图 2),实测长度约 1 600 m,呈“V”字型发育,暗河延伸方向近似为 $240^\circ$ 和 $280^\circ$ 两个方向, $240^\circ$ 及 $280^\circ$ 方向裂隙为研究区岩溶发育的主控裂隙。根据洞穴探测 $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 均属兰花洞地下暗河系统,初步分析①号渗漏点地下水极有可能在 $Q_1$ 出水点排泄;②号渗漏点地下水可能与 $Q_1$ 或 $Q_2$ 存在联系;③号渗漏点地下水极有可能与 $Q_2$ 出水点有关。为验证上述分析判断,进一步开展地下水多元示踪试验。

## 2 多元地下水示踪试验

### 2.1 试验部署

为查明及验证 4 个集中渗漏点与排泄点间的水力联系及其与兰花隧道的空间关系,本研究选用多种荧光示踪剂进行地下水多元示踪试验,监测仪器为瑞士生产的 GGUN-FL Fluorometer 野外荧光分光光度计,该仪器能监测荧光素钠、罗丹明 B 和荧光增白剂 3 种荧光素,其分辨率为 $0.01 \times 10^{-9}$ ,频率为 $10 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$ 。由于区内有 4 个地下水集中渗漏点,因此有一种示踪剂需要投放 2 次,根据程焱等<sup>[19]</sup>荧光示踪剂的干扰试验研究发现荧光素钠的示踪效果最好,故本次试验中选择荧光素钠示踪剂在 2 个落水洞

进行投放,为避免误判,荧光素钠投放点分别布置在①号和④号两个距离最远的集中渗漏点投放;兰花洞地下暗河排泄点 $Q_3$ 是由 $Q_1$ 、 $Q_2$ 汇合而成,示踪剂接

收地点分别设置在 $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_4$ 3个出水点,地下水多元示踪试验部署情况如表2所示。

表2 地下水多元示踪试验情况一览表

Table 2 List of groundwater multi-element tracing tests

试验编号	投放地点	示踪剂类型	投放量	试验时间	接收地点
1	①号落水洞(涨潮湾)	荧光素钠	500 g	2016/10/29—2016/11/10	$Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_4$
2	②号落水洞(孔家湾)	荧光增白剂	200 g	2016/11/07—2016/11/09	$Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_4$
3	③号落水洞(泽豪)	罗丹明	290 g	2016/11/13—2018/11/18	$Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_4$
4	④号落水洞(下寨)	荧光素钠	200 g	2016/10/29—2016/10/31	$Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_4$

2.2 试验结果

本次试验在3个示踪剂接收地点均监测到的示踪剂及浓度变化情况如图3和表3所示:(1)①号落水洞和②号落水洞投放的示踪剂均在 $Q_1$ 出水点(兰

花洞暗河天窗)流出;(2)③号落水洞投放的罗丹明示踪剂从兰花洞内的 $Q_2$ 出水点流出,汇入兰花洞地下暗河下游段,最终从 $Q_3$ 出露地表;(3)④号落水洞投放的荧光素钠从 $Q_4$ 出水点(呆业洞暗河出口)流出。

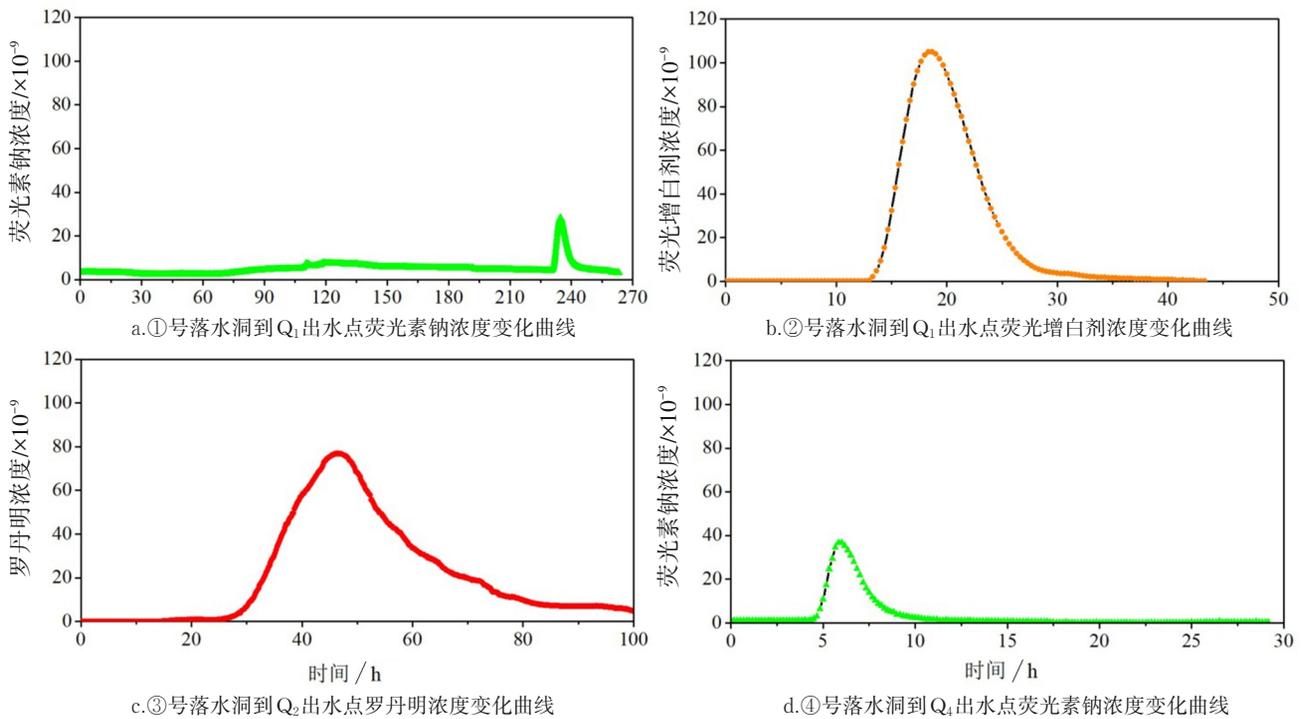


图3 各监测点示踪剂浓度曲线(小时)

Fig. 3 Tracer concentration curves at each monitoring site

4组示踪试验浓度曲线均呈单峰对称型曲线,反映出区域岩溶化程度极高,岩溶含水介质管道发育且地下水径流通畅,各组试验示踪剂回收率如表3所示,其中第一组示踪试验的回收率最低,为68%,第二组示踪试验回收率最高,为86%;第三组和第四组示踪剂回收率分别为77%和72%。总体来说,示踪

剂投放点与接收点之间的距离越长、相对高差越大,示踪剂在管道中迁移时间越久,示踪剂滞留或被吸附、分解的越多,示踪剂回收率会越低。根据地下水示踪试验结果分析区内共有4条地下岩溶管道系统: I—涨潮湾①号渗漏点—兰花洞暗河天窗 $Q_1$ 出水点; II—孔家湾②号渗漏点—兰花洞暗河天窗 $Q_1$ 出

水点;Ⅲ—泽豪③号渗漏点—兰花洞暗河下游段 $Q_3$ 出水点;Ⅳ—下寨④号渗漏点到呆业洞 $Q_4$ 出水点。Ⅳ号暗河系统为一条独立管道系统;Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号暗

河系统均属于兰花洞地下暗河的支管道系统,Ⅰ、Ⅱ属于兰花洞地下暗河系统上游段,Ⅲ号暗河系统为兰花洞地下暗河系统下游段左侧的支管道。

表 3 示踪试验主要参数一览表

Table 3 Main parameters of groundwater multi-element tracing tests

岩溶地下水系统编号	入口/出口 高程/m	直线距离 (L)/m	平均水力 坡度/%	起始接 收时间 ( $t_0$ )/h	到达峰 值时间 ( $t_1$ )/h	恢复背景 浓度时间 ( $t_2$ )/h	示踪剂 延迟时 间( $t_3$ )/h	最快流速 ( $v_0$ )/ $m \cdot h^{-1}$	平均流速 ( $v_1$ )/ $m \cdot h^{-1}$	示踪剂 回收 率/%
I	638/545	1 730	5.37	230.0	235.0	248.0	18.0	7.5	7.0	68
II	640/545	650	14.60	13.0	19.0	32.0	19.0	50.0	35.2	86
III	620/543	430	17.91	26.0	46.7	90.0	64.0	387.0	216.0	77
IV	700/660	1 180	3.39	4.5	6.0	11.5	5.5	311.1	233.3	72

### 2.3 结果分析

根据地下水示踪试验结果,各地下暗河及其控制的岩溶水系统特征及与兰花隧道空间关系如下:

(1) Ⅳ号岩溶地下水系统:暗河入口高程为 700 m,出口高程为 660 m,长 1 180 m,平均水力梯度为 3.39%,地下水最快流速为  $311.1 m \cdot h^{-1}$ ,平均流速为  $233.3 m \cdot h^{-1}$ 。该岩溶地下水系统发育于寒武系上统比条组薄—中厚层泥质条带灰岩地层中,主要受层面裂隙控制,汇集来源于关坪、下寨、泽那五一带的大气降雨以及岩溶裂隙泉水的补给,集水面积为  $3.74 km^2$ 。该岩溶水子系统在平面上位于隧道东南约 1.1 km,岩溶管道与兰花隧道平面上不相交,不会对隧道突涌水造成影响。

(2) Ⅰ号岩溶地下水系统:暗河入口高程为 638 m,出口高程为 545 m,长 1 730 m,平均水力梯度为 5.37%,地下水最快流速为  $7.5 m \cdot h^{-1}$ ,平均流速为  $7.0 m \cdot h^{-1}$ 。该岩溶地下水系统发育于寒武系上统追屯组中厚—厚层细晶白云质灰岩、白云岩地层中,主要受层面裂隙控制,汇集来源于涨潮湾一带的大气降雨以及岩溶裂隙泉水的补给,集水面积为  $2.28 km^2$ 。该岩溶水系统的岩溶管道与兰花隧道平面上不相交,不会对隧道突涌水造成影响。

(3) Ⅱ号岩溶地下水系统:暗河入口高程为 640 m,出口高程为 545 m,长 650 m,平均水力梯度为 14.60%,地下水最快流速为  $50.0 m \cdot h^{-1}$ ,平均流速为  $35.2 m \cdot h^{-1}$ 。该岩溶地下水系统发育于寒武系上统追屯组中厚—厚层细晶白云质灰岩、白云岩地层中,受层面裂隙控制,主要汇集来源于孔家湾一带的大气降雨以及岩溶裂隙泉水的补给,集水面积为  $3.15$

$km^2$ ,该岩溶水子系统在平面上位于兰花隧道东北侧,岩溶管道与隧道平面上不相交,不会对隧道突涌水造成影响。

(4) Ⅲ号岩溶地下水系统:暗河入口高程为 620 m,出口高程为 543 m,长 430 m,平均水力梯度为 17.91%,地下水最快流速为  $387.0 m \cdot h^{-1}$ ,平均流速为  $216.0 m \cdot h^{-1}$ 。该岩溶地下水系统发育于寒武系上统比条组中厚—厚层细晶白云质灰岩、白云岩地层中,受层面裂隙和横张裂隙控制,主要汇集来源于泽豪一带的大气降雨以及岩溶裂隙泉水的补给,集水面积为  $3.0 km^2$ 。该岩溶管道系统在平面上与兰花隧道在 DK69+100 里程附近相交,有可能构成兰花隧道突涌水的来源。

### 3 兰花隧道突涌水条件及涌水量预测

根据前述区域水文地质条件和岩溶水系统的发育特征,区内 4 条主要的岩溶管道系统仅有Ⅲ管道系统在平面上与兰花隧道相交,其他岩溶管道及其控制的岩溶水系统与兰花隧道无关。根据Ⅲ管道的平均水力梯度推算该岩溶管道在与兰花隧道相交处的高程应位于隧道高程以下 20 m(图 1 剖面图),故通常情况下Ⅲ管道汇集的地表及岩溶地下水不会对隧道工程造成影响,但是考虑到岩溶管道垂向发育往往呈阶梯状,若Ⅲ管道的上游比较平缓,兰花隧道有可能直接遭遇Ⅲ管道发生突涌水情况,另外隧道区属湘西暴雨多发地区,③落水洞上游具有较好的降雨汇集条件,在强降雨条件下Ⅲ管道的地下水水位可能快速、大幅度上升,超过兰花隧道高程导致隧道突

涌水灾害,因此需要对这种强降雨条件下隧道的短时涌水量进行分析和预测。

兰花隧道围岩为上寒武统追屯组极强岩溶发育地层,追屯组岩溶含水层是否对兰花隧道造成突涌水威胁的充水来源是隧道水害防治的关键。调查分析表明:区内地下水总体由东或东南向兰花洞暗河及保坪河排泄,地下水排泄基准高程从兰花洞天窗的545 m—兰花洞暗河出口的500 m—保坪河与撇组河交汇点的376 m,对应的兰花隧道进出口高程为461.5~593.2 m,即兰花隧道比当地地下水排泄基准要高48.2~85.5 m。兰花隧道与保坪河近似平行,两者之间水平距离最远不足1 km,一般都在500 m以内,根据极强岩溶地区水力梯度一般小于5%来推算,兰花隧道总体应位于追屯组岩溶地下水潜水面之上的垂直渗透带,即追屯组岩溶含水层中的地下水对兰花隧道的影响不大。故本次隧道涌水量计算仅考虑Ⅲ管道可能与兰花隧道相交时的突涌水量。

目前隧道涌水量的计算方法主要有水均衡法、水文地质比拟法、地下水径流模数法、水动力学法和数值模拟法等<sup>[12,20-21]</sup>。每种涌水量评价方法都有其适用条件,基于兰花隧道目前的勘测精度,本研究采用大气降雨入渗系数法计算兰花隧道在穿越Ⅲ号暗河管道的涌水量,计算公式为:

$$Q=1000 \times \alpha \times P \times A \div \eta \quad (1)$$

式中: $Q$ 为隧道涌水量( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ); $\alpha$ 为降雨入渗系数; $P$ 为降雨量(mm); $A$ 为岩溶管道控制的汇水面积( $\text{km}^2$ ); $\eta$ 洪峰持续时间(d)。

为确定公式(1)中的相关参数,本研究在区内开展了高分辨率降雨量—流量监测工作,在 $Q_2$ 出水点建立流量监测站,在孔家湾建立雨量监测站,监测时间为2016年6月—2017年5月,监测期间最大次降雨量为137.6 mm,洪峰持续时间为50 h。

选取7次不同类型典型次降雨,提取次降雨过程相关水文参数如表4所示,降雨入渗系数与降雨总量及降雨强度关系如图4所示,由于泽豪岩溶洼地为不封闭的岩溶洼地,下游已被地表沟谷切开,在一般降雨条件下,上游汇水经③号落水洞直接灌入地下,全部进入Ⅲ号暗河管道;但在强降雨条件下,上游来水量会超出③号落水洞的下渗能力,超出的水流则继续以地表明流的方式沿河沟流至兰花洞暗河天窗进入兰花洞暗河,因此,该岩溶水系统的降雨入渗系数与次降雨总量的关系不大,但与降雨强度的关系十分密切,当雨强 $<2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,入渗系数变化较大,且随降雨总量的增大而增大,当雨强 $>2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,入渗系数与次降雨总量关系不大,入渗系数一般在0.2~0.3范围内变化。

表4 不同次降雨条件下水文参数表

Table 4 Hydrological parameters under different rainfall conditions

次降雨 编号	降雨类型	降雨时段	P降雨量 /mm	持续降雨 时间/h	洪峰持续 时间/h	I平均降雨 强度/ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	降雨入渗 系数
1	暴雨	2016/6/27 6:00—2016/6/28 20:00	137.6	39	50	3.53	0.202
2	大雨	2017/2/20 13:00—2017/2/22 1:00	55.0	82	158	0.67	0.756
3	大雨	2017/4/6 4:00—2017/4/6 10:00	40.2	7	53	5.74	0.148
4	大雨	2016/7/19 15:00—2016/7/20 8:00	40.6	18	86	2.26	0.246
5	中雨	2016/11/6 23:00—2016/11/9 11:00	29.8	61	96	0.49	0.514
6	中雨	2017/4/24 16:00—2017/4/26 10:00	32.2	49	74	0.66	0.358
7	中雨	2017/5/11 11:00—2017/5/11 13:00	20.6	3	51	6.87	0.268

据此分别预测研究区两种比较极端的降雨类型(极端暴雨、持续大雨)的隧道涌水量:

#### (1) 极端暴雨

根据永顺县多年降雨量监测资料,研究区最大日降雨量为236 mm,平均降雨强度为 $9.83 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,降雨入渗系数取0.2,洪峰持续时间取2 d,则计算得

到兰花隧道最大涌水量为 $7.08 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

#### (2) 持续大雨

根据本次调查期间实测资料,取降雨量为55 mm,平均降雨强度为 $0.67 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,降雨入渗系数取0.756,洪峰持续时间取6.5 d,则计算得到兰花隧道最大涌水量为 $1.9 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

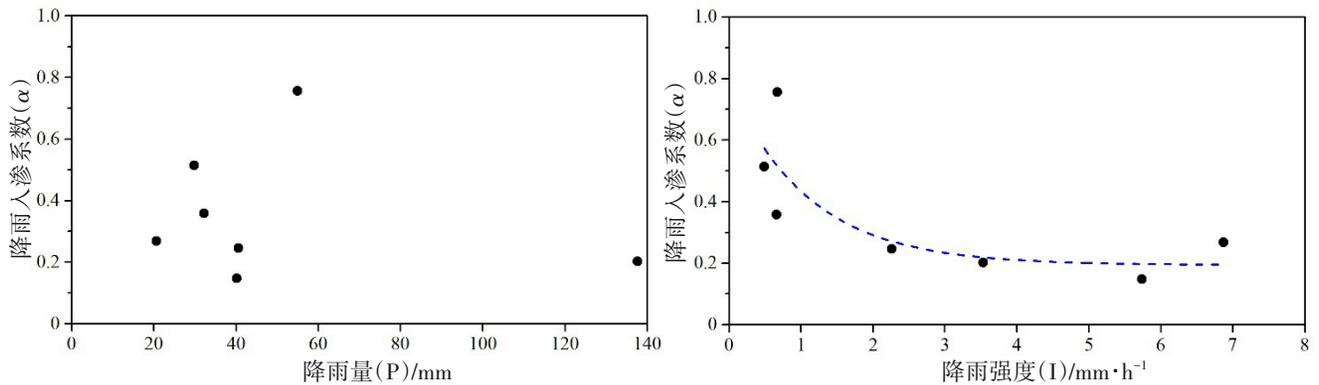


图 4 降雨入渗系数与降雨量、降雨强度关系图

Fig. 4 Relationship between rainfall infiltration coefficient, rainfall and rainfall intensity

由此可见,虽然持续降雨的入渗系数较大,但隧道涌水量仍然低于极端暴雨的情况,故建议隧道防排水措施按极端暴雨条件下的最大涌水量设计。

## 4 结 论

(1) 兰花隧道隧址区全部为寒武系碳酸盐岩裸露区,以峰丛洼地地貌为主,地表和地下岩溶极为发育;

(2) 兰花隧道隧址区共发育有呆业洞和兰花洞两个独立的地下暗河系统,其中 I 号、II 号、III 号 3 个岩溶管道系统属于兰花洞地下暗河系统,IV 号岩溶管道属于呆业洞地下暗河系统。各岩溶管道示踪试验曲线均为单峰对称型曲线,地下水最快流速达到  $387 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ ,该区地下管道系统的径流较通畅;

(3) 兰花洞地下暗河系统上游段的 I 号、II 号两个岩溶地下水子系统以及呆业洞地下暗河系统在平面和剖面上都没有和兰花隧道相交,不会对隧道突涌水构成威胁;兰花洞地下暗河系统下游段的 III 号岩溶水子系统在平面上与兰花隧道正交(交点里程为 DK69+100),垂向上与隧道高程相差不大,有可能构成兰花隧道突涌水的主要来源;

(4) III 号岩溶地下水子系统控制汇水面积为  $3.0 \text{ km}^2$ ,结合高分辨率降雨一流量监测,运用大气降雨入渗系数法预测兰花隧道穿越 III 号岩溶管道的最大涌水量为  $7.08 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

## 参考文献

[1] 曹建文,夏日元.西南岩溶石山地区不同类型地下河开发利用模式探讨[J].中国岩溶,2017,36(5):609-617.

- [2] 陈宏峰,夏日元,梁彬.鄂西齐岳山地区岩溶发育特征及其对隧道涌水的影响[J].中国岩溶,2003,22(4):282-286.
- [3] 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):58-62.
- [4] 金新锋,夏日元,梁彬.宜万铁路马鹿箐隧道岩溶突水来源分析[J].水文地质工程地质,2007,34(2):71-74.
- [5] 邬立,万军伟,陈刚,等.宜万铁路野三关隧道“8.5”突水事故成因分析[J].中国岩溶,2009,28(2):212-218.
- [6] 徐红星,邓谊明.野三关隧道 DK 124+602 突水相关水文地质分析[J].铁道工程学报,2010,27(4):29-34.
- [7] 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.
- [8] 关义涛,徐宗苏,张海军,等.毛坝 1 号隧道涌水成因机制分析[J].工程地球物理学报,2010,7(4):514-518.
- [9] 范威,王川,金晓文,等.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.
- [10] 罗明明,黄荷,尹德超,等.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.
- [11] 邓谊明,汪继锋.八字岭隧道牛鼻子暗河示踪试验成果分析[J].铁道勘察,2007,33(3):11-14.
- [12] 田清朝,万军伟,黄琨,等.高家坪隧道岩溶水系统识别及涌水量预测[J].安全与环境工程,2016,23(5):13-19.
- [13] 於开炳,徐蔓,严竞雄,等.地下水示踪试验在岩溶隧道勘察中的应用:以利万高速齐岳山隧道为例[J].工程勘察,2017,45(10):46-51.
- [14] 陈峰,杨平恒,詹兆君,等.高分辨率示踪技术和定量计算在岩溶含水介质研究中的应用[J].珠江水运,2018(10):38-39.
- [15] 徐尚全,王鹏,焦杰松,等.高精度在线示踪技术在岩溶地下水文调查中的应用[J].工程勘察,2013(2):40-44.
- [16] 袁伟,王川.贵州盘县乐民河流域三股水岩溶泉水文地质条件分析[J].地质学刊,2017,41(4):655-662.
- [17] 王开然,姜光辉,郭芳,等.桂林东区峰林平原岩溶地下水示踪试验与分析[J].现代地质,2013,27(2):454-459.
- [18] 曾莘茹,姜光辉,郭芳,等.桂林甑皮岩洞穴遗址地下水示踪及污染源分析[J].中国岩溶,2016,35(3):245-253.

- [19] 程焱,万军伟,黄琨,等.荧光示踪剂的干扰实验研究[J].中国岩溶,2019,38(5): 795-803.
- [20] 智刚.黔张常铁路某隧道工程水文地质勘察分析及涌水量预测[J].路基工程,2016(5): 202-206.
- [21] 贺玉龙,张光明,杨立中.铁路岩溶隧道涌水量预测常用方法的比较[J].铁道建筑,2012(4): 68-71.

## 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

CHANG Wei<sup>1</sup>, TAN Jiahua<sup>2</sup>, HUANG Kun<sup>1</sup>, CHENG Xi<sup>1</sup>, HUANG Zhen<sup>1</sup>, WAN Junwei<sup>1</sup>

(1.School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2.China Railway Siyuan Survey and Design Group Co.,Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China)

**Abstract** Tunnel water inrush is a common geological hazard during the tunnel construction in karst areas. Thus, it is of great significance to clarify the spatial relationship between the tunnel and karst groundwater system, especially the spatial relationship with the underground river course, which is the key to prevention and control of water hazard in the karst tunnel. This paper presents an example on this issue, the Lanhua tunnel on the Zhangjiajie–Jishou–Huaihua high-speed railway. On the basis of karst hydrogeological investigation and rainfall-spring discharge dynamic monitoring, groundwater multi-element tracing tests were conducted at the concentrated recharge points of groundwater in the area. The spatial distribution of underground river courses and its relationship with the Lanhua tunnel were clarified, the location of water damage in the tunnel was determined and the maximum water inflow was predicted, which provides a hydrogeological basis for the prevention and control of the tunnel water hazard. The results show that, (1) The Lanhua tunnel and adjacent areas host exposed Cambrian carbonate rocks, which are characterized by peak clusters and depression landforms, with highly developed surface and underground karst. (2) The concentration curves of four groups of groundwater multi-element tracing tests are all single-peak symmetrical forms, the tracer recovery rate is more than 68%, and the largest groundwater flow rate is  $387 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ , indicating that the pipeline development in the tunnel site area is unobstructed. (3) There are two independent underground river systems, namely the Lanhua cave system and the Daiye cave system. The three karst water sub-underground river systems of No.1, 2 and 3 belong to the Lanhua cave system, while the No.4 karst water sub-underground river system belongs to the Daiye cave system. (4) The No.4 karst groundwater system will not pose a threat of tunnel inrush water, because it does not intersect with the Lanhua tunnel in plane and section. (5) The Lanhua cave underground water system can be divided into two sections, the upstream section and downstream section, with the karst window in the middle of the Lanhua underground river as the boundary. The No.1 and 2 karst water systems belong to the upstream section, and the No.3 karst water system belongs to the downstream section. The upstream section of the Lanhua cave system does not intersect with the Lanhua tunnel in plane and section, and it will not pose a threat to the inrush water of the Lanhua tunnel. The No.3 karst water system intersects with the tunnel in plane (the intersection mileage is DK60 + 100), which may create a risk of water inrush in the tunnel. (6) Based on the high resolution rainfall-hydrological dynamic monitoring data, the rainfall infiltration coefficient method is used to predict that the maximum water inflow of No.3 karst water system pipeline of the tunnel is  $70,800 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  under extremely heavy rainstorm conditions.

**Key words** Lanhua tunnel, groundwater multi-element tracing tests, high resolution hydrological dynamic monitoring, prediction of karst tunnel inrush water

(编辑 黄晨晖)