

基于在线高分辨率示踪试验的岩溶水系统特征分析

——以德江隧道区闹水岩地下河系统为例

左杰^{1*}, 杜毓超^{2#}, 靳俊奇¹, 王国丰¹

¹贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳

²山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南

收稿日期: 2021年10月29日; 录用日期: 2021年11月22日; 发布日期: 2021年11月30日

摘要

贵州德江隧道工区内岩溶水文地质条件复杂、岩溶强烈发育, 在不到4 km的范围内发育了两条大中型地下河(闹水岩地下河和池坝地下河), 隧道岩溶问题突出, 亟需开展德江隧道区地下河研究, 以确保隧道施工安全及全线顺利贯通。本文为了摸清闹水岩地下河系统北侧汪家坝、黄泥溪一带与闹水岩地下河的水力联系, 同时确定系统北部边界及地下水系统结构特征, 进行了示踪实验。研究确定了地下河系统的边界和部分水流流速, 并结合水文地质调查资料, 进一步分析了地下水系统特征。对示踪试验在研究地下水系统问题中的应用问题进行有益探索, 指导了工程实践。

关键词

岩溶水系统, 示踪实验, 特征

Characteristics Analysis of Karst Water System Based on On-Line High-Resolution Tracer Test

—A Case Study on Naoshuiyan Underground River System in Dejiang Tunnel Area

Jie Zuo^{1*}, Yuchao Du^{2#}, Junqi Jin¹, Guofeng Wang¹

¹Guizhou Road & Bridge Group Co., Ltd., Guiyang Guizhou

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 左杰, 杜毓超, 靳俊奇, 王国丰. 基于在线高分辨率示踪试验的岩溶水系统特征分析[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(11): 1561-1571. DOI: [10.12677/ag.2021.1111150](https://doi.org/10.12677/ag.2021.1111150)

Abstract

The karst hydrogeological conditions in Dejiang tunnel area in Guizhou are complex and karst is strongly developed. Two large and medium-sized underground rivers (Naoshuiyan underground river and Chiba underground river) are developed within less than 4 km. The tunnel karst problem is prominent. It is urgent to carry out the research on the underground river in Dejiang tunnel area, so as to ensure the safety of tunnel construction and the smooth connection of the whole line. In order to find out the hydraulic connection between Wangjiaba and Huangnixi in the north of Naoshuiyan underground river system and the Naoshuiyan underground river, and determine the northern boundary of the system and the structural characteristics of groundwater system, a series of tracer experiments were carried out. In this study, the boundary and partial flow velocity of groundwater system are determined, and the characteristics of groundwater system are further analyzed combined with hydrogeological survey data. This paper makes a beneficial exploration on the application of tracer test in the study of groundwater system, which guides the engineering practice.

Keywords

Karst Water System, Tracer Experiment, Characteristics

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

示踪实验是调查水文地质条件常用的方法，常常被用于调查地下水系统的水力联系、系统边界、系统结构和地下水流速等，也是岩溶区获取岩溶管道连通性及特征和相关水文地质参数的重要途径[1]-[6]。在水文地质调查基础上应用在线高分辨示踪技术，进一步分析岩溶水系统特征，对预防隧道涌水突水灾害、保障隧道施工安全具有重要意义。

随着示踪技术的发展，应用在线高分辨示踪技术，根据示踪剂历时曲线的形态特征分析岩溶地下水系统的空间形态，已经逐渐应用于岩溶水文地质研究中，成为国际岩溶水文地质研究的重要方向和趋势[7] [8]。在我国研究中，在线高分辨率示踪技术自国外引进以来，以其精度高，操作便捷和成本低等优势，在地下水污染调查、岩溶水文地质调查，获取岩溶含水介质的管道特征和水文地质参数估算等方面得到了广泛应用[9]-[14]。刘兴云和曾昭建[15]运用示踪实验有效查明了岩溶地区地下水水力联系，用以正确评价场区水文地质条件。易连兴等[16]运用示踪实验确认了北部区域的地下水分水岭边界、地下水连通介质结构。示踪实验对于确认地下水系统的结构特征、测明地下水流速有成功的应用[17]。刘治政等[18]用示踪实验对王寨盆地水文地质条件进行了研究。示踪试验在岩溶地下水通道研究中也得到了成功的应用[19]。刘人太等[20]将示踪试验方法引入到地下工程涌水治理中。示踪实验也被运用到水污染治理中，用于调查污染源源头。付宏学和冯念念[21]将示踪实验用于污染源治理，查明了当地

岩溶地下水对龙洞泉的补给关系和集中径流通道。示踪实验还可用于调查地下水的污染物运移路径和追溯污染源, 污染源区与遗址周围地下水存在水力联系[22]。因此, 应用在线高分辨示踪技术, 进一步分析岩溶水系统特征的研究, 不论是获取水文地质参数、地下水污染, 还是隧道岩溶涌水预测, 都具有重要意义。

德江隧道位于贵州省德江至务川段, 为德务高速段内一特长隧道, 隧道全长 5500.00 m, 最大埋深 557.11 m。隧道区内岩溶水文地质条件复杂、岩溶强烈发育, 特别是隧道出口段处于富水向斜构造区, 发育闹水岩地下河, 为典型的地下河及管道型岩溶水系统。该地下河系统与隧道洞身立交, 严重影响隧道施工。

示踪试验是研究地下水径流特征的有效方法, 尤其是应用在岩溶地区的地下河系统, 可相对直观地了解地下河管道延伸“轨迹”、含水介质空间结构、发育规模及其类型, 确定地下水流向和流速, 掌握地下管道间及管道与地表间的水力联系程度[23] [24] [25]。因此, 本文利用在线高分辨率示踪试验技术并结合水文地质条件分析的方法, 依据 2017 年 11 月所做的示踪试验, 对闹水岩地下河系统特征进一步分析, 更直观地了解岩溶水系统结构特征及与隧道的空间位置关系。

2. 地质背景

可溶岩分布受地层岩性、地形地貌和构造控制[25]。德江隧道区内出露地层[17]以奥陶系、志留系及二叠系分布最广, 三叠系仅涉及下统夜郎组灰岩。第四系仅洼地、谷地底部见有些分布。其中, 桐梓-红花园组(O₁t-h)上部为中厚层灰岩夹白云质灰岩和白云岩, 中下部页岩、介壳结晶灰岩, 底部含燧石石灰岩; 栖霞-茅口组(P₂q-m)中上部为厚层灰岩, 局部夹燧石灰岩, 下部为厚层灰岩为主, 夹瘤状泥质灰岩; 吴家坪-长兴组(P₃w-c)中至厚层灰岩, 夹炭质页岩及煤层。其中, 隧道出口段主要穿越志留系及二叠系地层。

德江隧道依次近似以正交横穿文新断层、长丰背斜和石朝向斜。其中, 石朝向斜核部位于隧道出口段, 桩号 ZK10+195 附近。该向斜平缓开阔, 地貌上呈向斜谷地, 形成盆状蓄水构造。向斜轴部走向北东 20°~30°, 核部由三叠系夜郎组、二叠系灰岩组成, 南端翘起封闭; 两翼不对称, 北西翼较平缓, 倾角 15°~30°, 南东翼较陡, 倾角 20°~50°, 两翼主要发育二叠系和志留系地层。该向斜区的横张裂隙及纵张裂隙分布广泛, 沿横张裂隙发育串珠状洼地, 沿轴部纵张裂隙发育的落水洞、洼地密集分布, 地下河管道即沿向斜核部延展。如: 闹水岩地下河系统, 该系统东北部地表水系发育, 主要接受明溪地表水汇流补给。地下河管道经煤厂 DJ04 洼地 - DJ03 (消水洞) - DJ05 (消水洞) - 沙溪岩溶洼 - DJ21 (地下河天窗) 径流补给于闹水村出露。汇水面积 29.1 km²。地下河总体由北向南方向径流, 在向斜南西翘起端, 受灰岩与页岩的接触面上形成的水平溶洞出露, 层控型地下河系统, 也是典型的向斜型岩溶蓄水构造[26], 详见图 1。

3. 示踪试验

3.1. 示踪实验的目的

由于闹水岩地下河系统上游(补给区)落水洞、地下河入口较多, 地下河进口与地下河出口之间地下结构、形态尚不清楚, 特别是四堡水库消水洞、汪家坝消水洞以及黄泥溪洼地的水流进入地下后, 是否是向南径流, 最后汇入闹水岩地下河系统, 关系到地下水系统边界的划分问题。

为此, 针对这些问题开展了本次示踪试验, 力求: 1) 查明系统内地下河、岩溶管道的连通展布; 2) 求算地下水流速、流向; 3) 确定地下河系统边界; 4) 了解溶质在岩溶含水层中的运移、弥散特征。

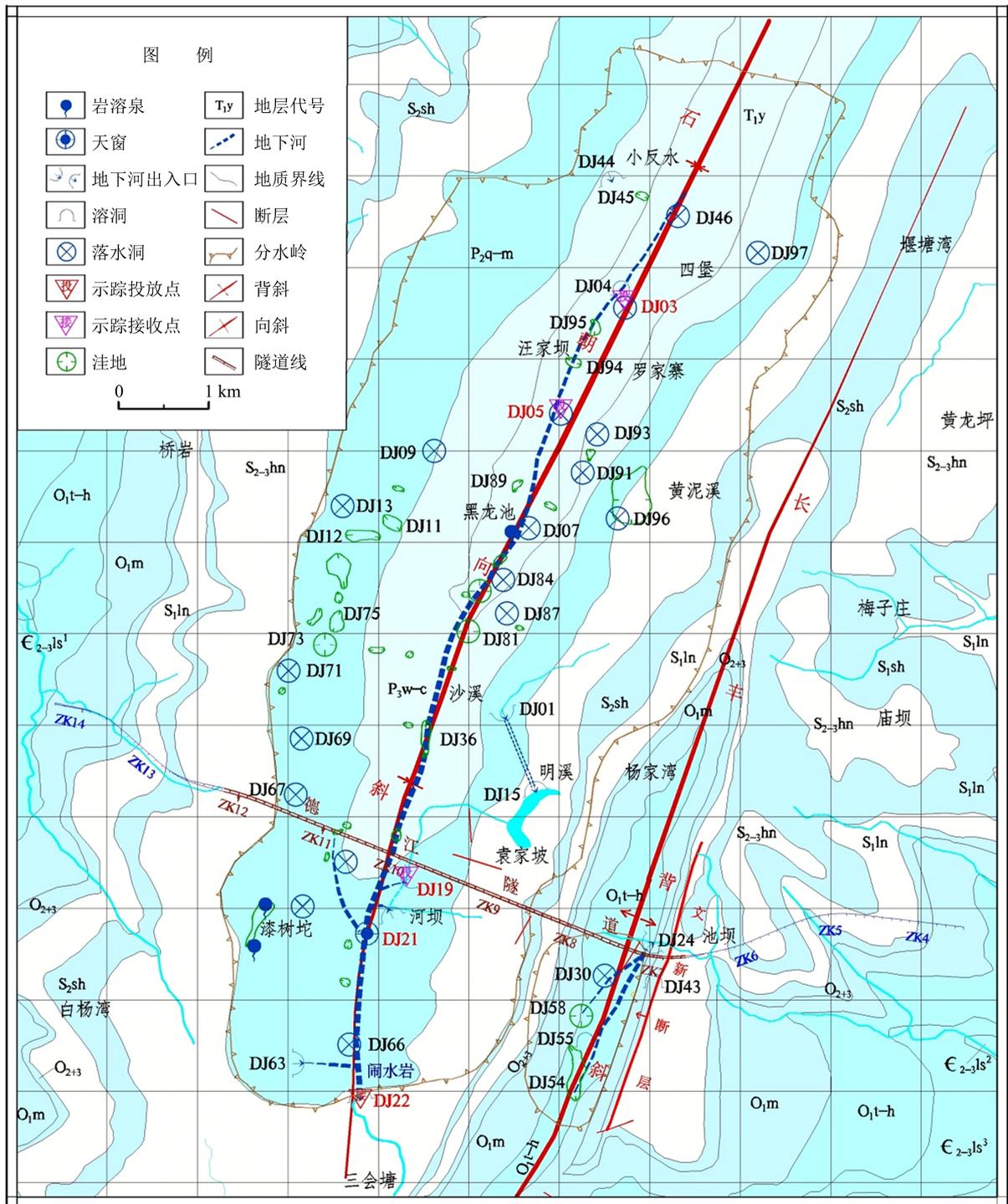


Figure 1. Hydrogeological sketch of the study area
图 1. 研究区水文地质略图

3.2. 试验地点及范围

本次闹水岩地下河系统示踪试验地点位于沙溪土家族自治乡北侧的汪家坝、四堡村一带和南部的袁家坡及狮岭岗一带。共涉及沙溪土家族自治乡四堡村、榨子塘村、桃耳沟、汪家坝、黄泥溪村、舒家寨、

黑龙池、苏家村、孙家土、细沙溪村、万坝村、明溪、袁家坡、狮岭岗、乌泡坨、赵家、闹水村等十七个村，南北长约 9 km，东西宽约 3~4 km。

投放点与接收点选择，根据岩溶水文地质调查根据岩溶水文地质调查，闹水岩溶地下河系统具有示踪试验投放点条件分析如下(表 1):

1) 闹水岩地下河系统北侧汪家坝、黄泥溪一带，发育多个消水洞，为了摸清该区与闹水岩地下河的水力联系，同时确定系统北部边界，分别选取 DJ03、DJ05、DJ96 消水洞作为示踪投放点。

Table 1. Basic information of tracer delivery points and receiving points

表 1. 示踪投放点与接收点基本情况一览表

类别	点号	地理位置	岩溶类型	出露高程(m)	流量(l/s)	观测日期(年/月/日)
投放点	DJ05	汪家坝	落水洞	1116	0.5~1	2017.11.07
	DJ19	孙家土	地下河入口	967	100~300	2017.11.08
	DJ03	四堡水库	消水洞	1130	20~30	2017.11.07
接收点	DJ22	闹水岩	地下河出口	920	400~600	2017.11.11

2) 隧道中段孙家土一带的南侧 1 km 范围内发育多处地下河入口(DJ19、DJ20)及天窗(DJ21)，为了掌握闹水岩地下河系统主管道发育特征，摸清该区域与闹水岩地下河出口之间的水力联系，选取 DJ19 地下河入口以及 DJ21 天窗作为示踪试验的投放点。

3) 根据调查，闹水岩岩溶水系统及周边主要排泄点为闹水岩地下河出口；为了掌握系统北部汪家坝、四堡水库一带岩溶地下水与地下河出口(DJ22)之间的水力联系及系统边界，选取闹水岩地下河出口(DJ22)为示踪试验接收点。此外，为掌握孙家土一带地下河系统径流区的管道发育情况，同时选取地下河天窗(DJ21)为示踪试验的另一接收点。

示踪试验投放点、接收点分布情况，详见图 1。

3.3. 示踪剂选择和投放量

示踪剂的选择，以无毒、易溶于水，化学性质稳定，在地下水运移过程中不易被土壤及围岩所吸收，不受离子交换影响、检测方便及价廉等原则[15]。并根据区域水文地质调查情况，结合以往的示踪试验经验，并考虑当地的饮用水安全及经济、技术条件等因素。本次选用钼酸铵、罗丹明 B 和荧光素钠，开展三元示踪试验。

示踪剂投放量(表 2)按经验公式[27]计算：

$$W = K \times Q \times 10C_{\text{本}} \times 10^{-9} \quad (1)$$

W : 示踪剂元素投放量(kg);

K : 岩溶率系数(与岩溶发育、孔隙度有关的系数一般为 1.5~2.5);

Q : 示踪区段地下水估算总水量(L) ($Q =$ 接收点当天总排泄量(L/d) \times 预计示踪到达时间(d));

C : 本示踪段地下水示踪剂本底值(ppb/L)。

3.4. 示踪剂的监测

本次示踪离子的检测，主要采用野外在线高分辨率自动监测仪，FL30-662 型和 FL24-970 型高灵敏度荧光光度计；人工采样室内测试主要采用 ICP-MS 型极谱仪。本次试验所使用的分析仪器及示踪离子的最低检测浓度见表 3。

Table 2. List of tracer dosing at each tracer delivery point**表 2.** 各投放点示踪剂投放一览表

投放点	至接收点(DJ22) 水平距离(km)	示踪剂	投放量(kg)	投放起止时间	投放日期
DJ05	7.60	荧光素钠	2	10:00~10:10	2017.11.11
DJ19	2.19	罗丹明 B	1	14:00~14:10	2017.11.21
DJ03	8.92	罗丹明 B	9.5	11:30~11:40	2017.11.26

Table 3. List of minimum detection concentrations of tracer ions**表 3.** 示踪离子的最低检测浓度一览表

序号	示踪剂	示踪元素	最低检测浓度(mg/l)	监测仪器	仪器型号
1	钼酸铵	Mo ⁶⁺	0.001	极谱仪	ICP-MS 型
2	荧光素钠	荧光素	0.0002	高灵敏度荧光光度计	FL30-662 型
3	罗丹明 B	罗丹明	0.0001	高灵敏度荧光光度计	FL24-970 型

4. 试验结果与分析

4.1. 示踪剂历时曲线分析

示踪剂浓度随时间的变化与弥散系数和地下水的流速有关。理论上,在地下水中,示踪剂弥散范围的中心浓度最高,前后逐渐降低,观测点所测得的浓度变化曲线应为两翼略具对称的单峰曲线[28] [29]。因此,示踪剂历时曲线是由一个或多个单峰曲线组成,主要分为单峰曲线、多峰曲线及平台曲线[30] [31]。具体分类如下表 4。

Table 4. List of tracer duration curve classification**表 4.** 示踪剂历时曲线分类一览表

分类	曲线特征	地下水通道结构特征
单峰曲线	尖峰曲线	对称尖峰 投放点发育单一地下水通道,无分支管道,地下水流较为通畅,示踪剂浓度在到达峰值后随着浓度的稀释逐渐变小。
	钝峰曲线	先略高的钝峰 投放点发育单一地下水通道,无分支管道,地下水流较为通畅,但在管道中间发育有溶潭,且积水量大,对示踪剂有稀释作用,导致浓度曲线呈现“拖尾”现象。
多峰曲线	尖峰曲线	高峰在前 常见的是高峰在前,低峰在后,主流的峰值浓度在前,为高峰,支流的峰值浓度滞后,遭主流稀释,为低峰,其间无地下湖。
	先钝后尖	先低后高 投放点发育多个地下水通道,主流上有地下湖,虽峰值在前,因受地下湖稀释而为一先钝峰,支流通道流量小但浓度高,随后主、流汇合形成高峰。
	先尖后钝	先高后低 投放点发育多个地下水通道,支流上有地下湖,高峰值是主通道的峰值,低峰值为支流通道的峰值,其曲线为一滞后的钝峰。
平台型曲线	多峰值,峰值不明显,修整后呈平台型	投放点发育多个地下水通道,管道与裂隙并联存在,但以宽大的溶蚀裂隙为主,示踪剂在裂隙流中形成有多个峰值组成的峰值平台。

图2为DJ03至DJ22段罗丹明B穿透曲线,在DJ03处投放罗丹明B约174小时后有明显接收值,按径流距离8.9 km计,自DJ03至地下河总出口(DJ22),地下水流动速度约51.1 m/h;穿透曲线总体上为“先高后低”钝峰曲线,略有“拖尾”现象。

图3为DJ05至DJ22段荧光素钠质量浓度穿透曲线。该次试验荧光素钠初现时间为168 h,按径流距离7.6 km计,自DJ05至地下河总出口(DJ22),地下水流动速度约45.2 m/h;从中可以看出荧光素钠的穿透曲线出现密集的多峰,其原因是消水洞DJ05(照片1)为地下水季节性入口,洞口狭小且有粘土,示踪剂部分附着在粘土上,在试验期间出现不同强度的多频次降雨,示踪剂不同程度的带入水中。因此,穿透曲线出现密集的多峰,但总体上为“先高后低”钝峰曲线,有明显的拖尾现象。

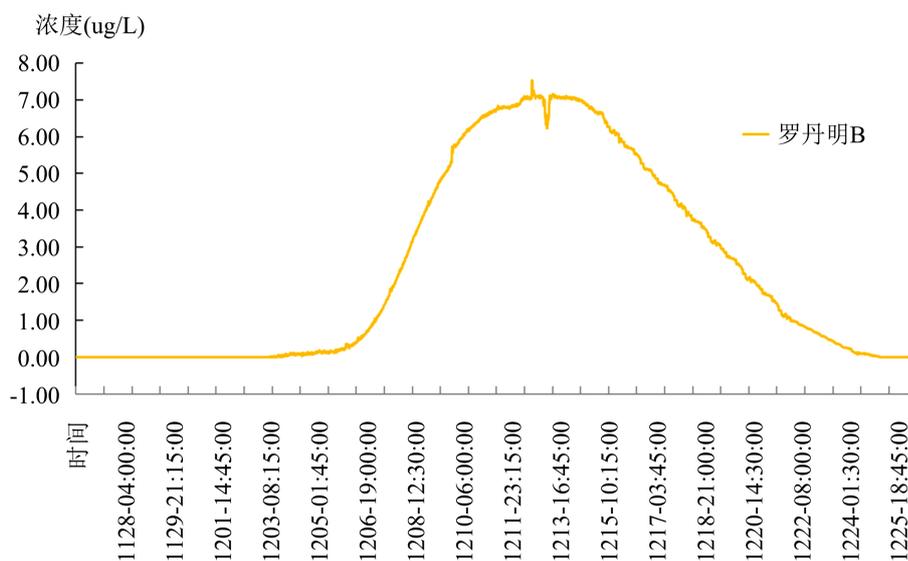


Figure 2. Penetration curve of Rhodamine B from DJ03 to DJ22 (FL30-662)

图2. DJ03至DJ22段罗丹明B穿透曲线(FL30-662)

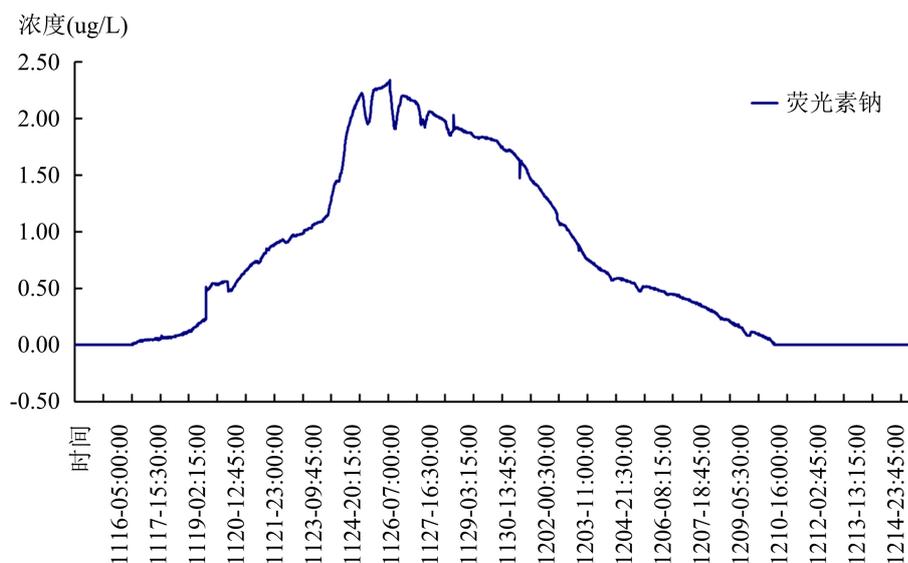


Figure 3. Penetration curve of Fluorescein sodium from DJ05 to DJ22 (FL30-662)

图3. DJ05至DJ22段荧光素钠穿透曲线(FL30-662)



Photo 1. Tracer delivery point of Wangjiaba sinkholes (DJ05)
照片 1. 汪家坝落水洞(DJ05)示踪剂投放点

DJ03 和 DJ05 是分别处于地下河系统不同位置的两个消水洞，两点相距 1.3 km，两者之间的地下水通道结构单一，不影响地下水系统下游段示踪剂穿透曲线的大幅变化。因此，图 2 和图 3，穿透曲线总体上为“先高后低”钝峰曲线，有明显的拖尾现象。地下河系统北部四堡水库(DJ03)至汪家坝消水洞(DJ05)段，地下水流动速度相对较快，地下水流较通畅。其原因是 DJ03 (照片 2)为四堡水库边一近垂直向下发育的消水洞，地下过水通道相对较大，消水畅通。



Photo 2. Tracer delivery point of Sibao reservoir water dissipation holes (DJ03)
照片 2. 四堡水库消水洞(DJ03)示踪剂投放点

图 4 为 DJ19 至 DJ22 段罗丹明 B 穿透曲线，DJ19 处投放罗丹明 B 约 31h 后，总出口 DJ22 就有明显的接收值，按照投放点至接收点间距离 2.2 km 为计，地下水在该段地下河管道中径流速度 71 m/h，地下水流较为通畅，示踪剂浓度在到达峰值后随着浓度的稀释逐渐变小，穿透曲线总体呈现“对称尖峰”，但略有“拖尾”现象。

4.2. 地下水系统特征分析

由图 2 和图 3 历时曲线特征及水文地质调查资料：地下河系统北部四堡水库(DJ03)投放的罗丹明 B 和在汪家坝落水洞(DJ05)投放的荧光素钠，在地下河总出口(DJ22)均有着良好的曲线且总体上曲线特征基本一致。从曲线特征可说明投放点发育相对单一地下水通道，地下水流较为通畅，但在管道中间发育有溶潭(如 DJ21 天窗处)，且积水量大，对示踪剂有稀释作用，导致浓度曲线呈现“拖尾”现象。

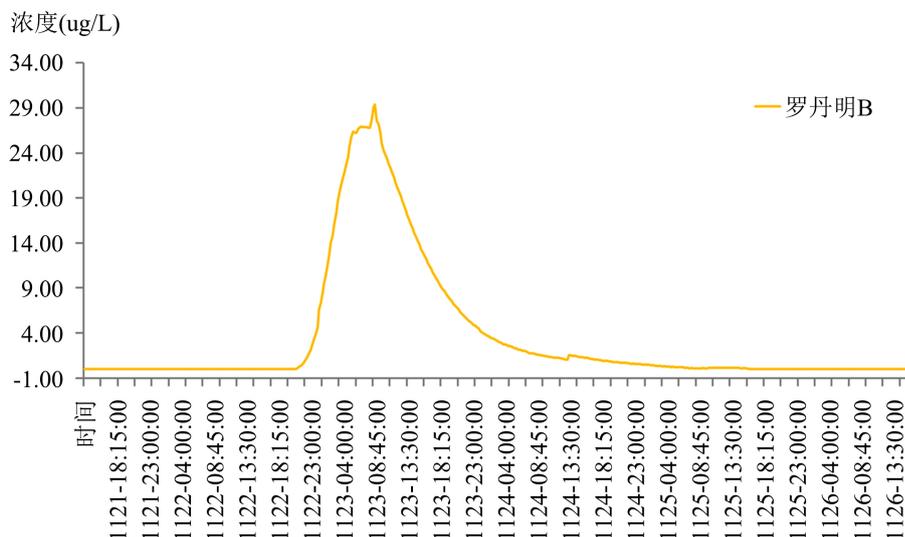


Figure 4. Penetration curve of Rhodamine B from DJ19 to DJ22 (FL30-662)

图 4. DJ19 至 DJ22 段罗丹明 B 穿透曲线(FL30-662)

调查发现, 闹水岩地下河系统总体由北向南方向径流, 在向斜南西翘起端, 受灰岩与页岩的接触面上形成的水平溶洞出露, 是一层控型地下河系统, 也是典型的向斜型岩溶蓄水构造。其平面上总体呈枝状展布(如图 1), 但未发现较大支流, 支流多为地下河与消水洞的连通部分或为脉状岩溶裂隙, 且多为季节性过水通道。垂向上地下河系统具有双层结构特征, 特别是地下河系统中下游段, 如地下河出口段(DJ22)附近, 如图 5。

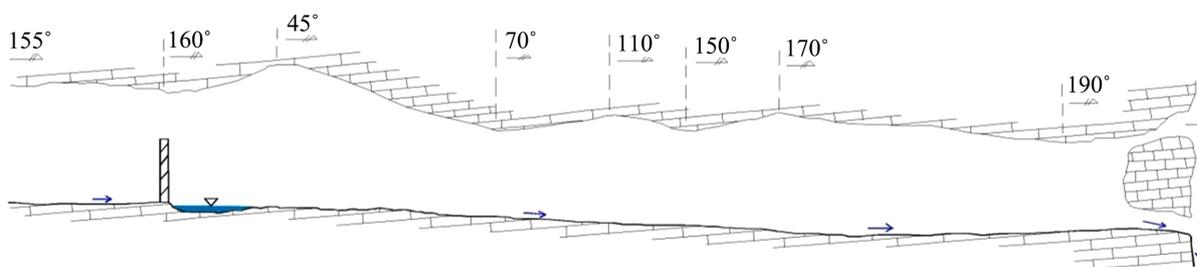


Figure 5. Section of underground river outlet (DJ21)

图 5. 地下河出口(DJ21)段剖面图

由图 5 历时曲线特征及水文地质调查资料: 地下河系统一支流主要为季节性入水口(DJ19)于天窗(DJ21)附近汇入地下河主通道, 最后至地下河总出口(DJ22)。该段主要部分为地下河总出口段, 结构简单且地下水流畅通, 地下水在该段地下河管道中径流速度 71m/h。

5. 结论与讨论

德江隧道为典型的特长强岩溶隧道, 隧道洞身大部分穿越岩溶蓄水构造。地层上以 O_{1t-h} 和 P_{2q-m} 、 P_{3w-c} 的灰岩为主, 构造上横穿文新断层、长丰背斜和石朝向斜, 且地表、地下岩溶发育, 发育大型地下河系统——闹水岩地下河。本文在水文地质调查基础上, 开展了示踪实验。示踪剂历时曲线总体上呈“先高后低”的钝峰曲线, 且有拖尾现象。表明闹水岩地下河系统北侧汪家坝、黄泥溪一带是闹水岩地下河的重要补给区, 具有密切的水力联系, 平水期的地下河水流速处于 40 m/h~50 m/h 之间。结合水文地质调

查和本次示踪实验数据分析, 该地下河系统结构简单, 地下水通道单一, 局部以育溶潭。从平面上, 闹水岩地下河呈树枝状展布, 但未发现较大支流, 支流多为地下河与消水洞的连通部分或为脉状岩溶裂隙, 且多为季节性过水通道。垂向上地下河系统具有双层结构特征, 特别是地下河系统中下游段。本文着力对示踪试验在研究地下水系统问题中的应用问题进行有益探索, 指导了工程实践, 也是确保隧道施工安全及全线顺利贯通的有力保障。

基金项目

贵州省科技厅科技项目(2020-123-004)。

参考文献

- [1] 李敬兰, 李益民. 广西龙布排泥库地下水多远示踪试验研究[J]. 安全与环境工程, 2004, 11(1): 59-62.
- [2] 米德才, 张新兴. 浩坤水电站水库岩溶渗漏研究[J]. 地球与环境, 2005, 33(Z1): 242-246.
- [3] 邹国富, 范柱国, 朱春蓉, 等. 云南普朗铜矿尾矿库喀斯特渗漏示踪试验研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(3): 292-297.
- [4] Gold, S.N., Meiman, J., Pronk, M., et al. (2008) Tracer Tests in Karst Hydrogeology and Speology. *International Journal of Speleology*, 37, 27-40. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.3>
- [5] Pronk, M., Goldscheider, N. and Zopfi, J. (2006) Dynamics and Interaction of Organic Carbon, Turbidity and Bacteria in a Karst Aquifer System. *Hydrogeol Journal*, 14, 473-484. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0454-5>
- [6] 于正良, 杨平恒, 谷海华, 等. 基于在线高分辨率示踪技术的岩溶泉污染来源及含水介质特征分析: 以重庆黔江区鱼泉坎泉为例[J]. 中国岩溶, 2014, 33(4): 498-503.
- [7] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 当代水文地质学发展趋势与对策[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(1): 51-55.
- [8] Craig, E.D. (2005) Introduction to Theme Issue on Tracers in Hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 13, 255-258. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0416-3>
- [9] 鲁程鹏, 束龙仓, 苑利波, 等. 基于示踪实验求解岩溶含水层水文地质参数[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(4): 717-721.
- [10] 何师意, Michele, L., 章程, 等. 高精度地下水示踪及其应用: 以毛村地下河为例[J]. 地球学报, 2009, 30(5): 673-678.
- [11] 杨平恒, 罗鉴银, 彭稳, 等. 在线技术在岩溶地下水示踪试验中的应用: 以青木关地下河系统岩口落水洞至姜家泉段为例[J]. 中国岩溶, 2008, 27(3): 215-220.
- [12] 杨平恒, 袁道先, 蓝家程, 等. 基于在线高分辨率监测和定量计算的岩溶地下水示踪试验[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 103-108.
- [13] 陈雪彬, 周军, 蓝家程, 等. 基于在线示踪技术的岩溶地下河流场反演与水文地质参数估算[J]. 中国岩溶, 2013, 32(2): 148-152.
- [14] 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.
- [15] 刘兴云, 曾昭建. 地下水多元示踪试验在岩溶地区的应用[J]. 岩土工程技术, 2006(2): 67-70.
- [16] 易连兴, 夏日元, 唐建生, 黄俊杰. 地下水连通介质结构分析——以寨底地下河系统实验基地示踪试验为例[J]. 工程勘察, 2010, 38(11): 38-41.
- [17] 王开然, 姜光辉, 郭芳, 周文亮, 陈国富, 梁毅. 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] 刘治政, 朱恒华, 杨丽芝, 等. 基于示踪试验的王寨盆地水文地质条件研究[J]. 地质学报, 2019, 93(S1): 71-78.
- [19] 张志强, 张强, 班兆玉, 胡元进. 基于示踪试验的岩溶管道及水力参数定量解析[J]. 人民长江, 2015, 46(11): 80-83.
- [20] 刘人太, 李术才, 张庆松, 等. 示踪试验分析方法在地下工程水害治理中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 814-821.
- [21] 付宏学, 冯念念. 示踪试验在南方岩溶地区污染调查中的应用[J]. 煤炭与化工, 2019, 42(12): 6-9.
- [22] 曾莘茹, 姜光辉, 郭芳, 汤庆佳, 刘凡. 桂林甑皮岩洞穴遗址地下水示踪及污染来源分析[J]. 中国岩溶, 2016,

- 35(3): 245-253.
- [23] 林永生, 杜毓超, 邹胜章, 等. 重庆市金佛山台原岩溶地下水系统结构特征分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(5): 658-664.
- [24] 高奋飞, 刘宏, 邓杰文. 贵州省岩溶洼地地质成因分析[J]. 路基工程, 2012(6): 23-26.
- [25] 林永生, 杜毓超, 朱丹尼, 等. 贵州省德江隧道岩溶水文地质特征及涌水量预测[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12): 63-70.
- [26] 靳俊奇, 杜毓超, 左杰, 王国丰. 贵州德江隧道区岩溶蓄水构造特征及涌水量预测[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(4): 497-504. <https://doi.org/10.12677/AG.2021.114045>
- [27] 韦超明, 梁喜忠, 刘谢伶. 拔贡水电站改扩建工程库坝岩溶水地球化学试验研究[J]. 红水河, 2013, 32(6): 54-58.
- [28] 梅正星. 我国喀斯特地下水示踪概况[J]. 中国岩溶, 1988(4): 97-103.
- [29] 梅正星. 用示踪曲线分析岩溶通道的展布[J]. 工程勘察, 1988(1): 36-38.
- [30] 李腾芳, 覃小群, 黄奇波, 等. 岩溶区地下水示踪试验及曲线特征[J]. 中国矿业, 2019, 28(S2): 497-498+501.
- [31] 杨立铮, 刘俊业. 试用示踪剂浓度曲线分析岩溶管道的结构特征[J]. 成都地质学院学报, 1979, 16(4): 211-219.