

姚莎莎, 张毅, 王新文, 等. 运用示踪试验分析隧道和岩溶泉的水力联系及介质特征——以关山隧道为例[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 25-32.

DOI: 10.11932/karst20240102

运用示踪试验分析隧道和岩溶泉的水力联系及介质特征 ——以关山隧道为例

姚莎莎^{1,2}, 张毅³, 王新文⁴, 李先恒⁵, 许江坤⁵, 郭发贵⁵, 蒙彦¹

(1. 自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/中国地质调查局岩溶塌陷防治技术创新中心/中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031; 4. 华邦建投集团股份有限公司, 甘肃兰州 730199; 5. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州贵阳 550081)

摘要: 文章以关山隧道入口周围的岩溶泉及落水洞为研究对象, 以钼酸铵为示踪剂进行落水洞与下降泉之间的示踪试验。结果表明: 投放点与两处接收点均存在水力联系, 示踪试验浓度曲线显示1#取样点的通道比较单一且与投放点的水力联系较好, 2#取样点的通道比较复杂, 与投放点之间的渗流途径较长、水力梯度较大, 可能存在小型水池或溶潭; 分别利用经验公式和 Qtracer2 软件计算回收率, 两处接收点的回收率结果均较低, 投放点与接收点之间可能存在更大的支流或者示踪区存在双层岩溶含水系统, 地下水流向了更深层的岩溶含水层; 结合隧道高程, 判断处于低位的隧道存在涌水风险并有可能对岩溶泉产生不良影响。对比两种回收率计算方法, 经验公式简便易算, 但在示踪剂浓度低、地下水流量小的情况下误差较大, 而 Qtracer2 软件通过对浓度和体积进行积分, 克服经验公式缺点, 计算结果更精确可靠。

关键词: 隧道; 示踪试验; 钼酸铵; 回收率; Qtracer2

创新点: 对比分析 Qtracer2 软件与传统经验公式两种不同方法计算示踪剂回收率在效率和准确度方面的各自优势和局限性; 选择无色无味且不会对环境造成影响钼酸铵作为示踪剂, 能有效追踪岩溶管道的分布和连通性, 不会像类似荧光素钠等有色试剂给周围居住者带来不必要的影响, 且在现场使用便携式分光光度计即时获取实验数据, 不仅提高数据准确性, 还保证示踪试验顺利进行。

中图分类号: P641.134; U453.61 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2024)01-0025-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

随着岩溶区公路、铁路隧道建设不断向长、大、

深发展^[1], 隧道涌水突泥及其产生的井泉枯竭问题变得愈发突出^[2-5]。地下水示踪试验是能直观了解地下与地表水力联系、地下岩溶空间展布以及含水介质

基金项目: 国家自然科学基金(41877300); 中国地质调查项目(DD20230441, DD20221637); 成果转化项目(高速公路救援能力评价体系研究, YRS-2021-373/374)

第一作者简介: 姚莎莎(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 岩溶地质灾害与环境敏感性。E-mail: 2120210018@email.cugb.edu.cn。

通信作者: 蒙彦(1978—), 男, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 研究方向: 岩溶地质灾害监测预警与风险防控。E-mail: sinkhole@163.com。

收稿日期: 2022-06-08

结构特征的重要手段^[6-8]。近些年,由于在线高分辨率监测技术^[9]和多元示踪^[10]的运用,使得利用地下水示踪试验研究岩溶含水介质结构特征和反演水文地质参数等方面取得明显进步^[10-11]。在实际应用过程中,荧光素钠、罗丹明等示踪剂虽然可进行在线高分辨率监测,但是会导致水体颜色发生改变,需要向相关管理部门报批,甚至会引发不明真相的人们的恐慌,给示踪试验造成障碍。钼酸铵示踪剂无色无味,但也不宜高浓度投放,且目前缺乏现场在线监测的仪器设备。如何根据不同工程类型和岩溶地质结构特点,选用适宜的示踪剂,严格控制投放量,既满足示踪试验目的、节约成本,又不造成环境、社会影响,实现精准有效示踪是岩溶地下水示踪技术的重要研究方向。本文以云南某高速比选线关山隧道为例,以钼酸铵为示踪剂,采用现场测试和试验室化验相结合的方式进行分析,研究拟建隧道与岩溶泉之间的水力联系,确定二者之间的岩溶含水结构特征和水文地质参数,以期判断隧道涌水突泥风险以及是否会导致泉水断流问题提供地质依据。

1 研究区概况

研究区位于云南省文山州富宁县境内,属于岩溶低中山沟谷地貌,地形起伏变化较大,海拔 1 392~1 650 m。关山隧道为分离式隧道,左幅起讫桩号为 ZK84+915~ZK88+326,总长 3 411 m,右幅起讫桩号为 YK84+930~YK88+355,总长 3 425 m。关山隧道入口距离富宁县木央乡 200°方向约 2.2 km。根据文山州气象局统计,富宁县多年平均降雨量为 1 084.0~1 406.8 mm,多年平均蒸发量为 1 390~1 588 mm。常年降雨量分配不均,5月至9月雨量较多,降水量占全年的 76.4%,月平均降雨量为 164.88 mm,属雨季;10月至次年4月雨量较少,月平均降雨量为 23.32 mm,属旱季。

研究区揭露的地层有中寒武统的龙哈组(C_3t)、上统博菜田组(C_3b)、下泥盆统坡脚组(D_1p)、芭蕉箐组(D_1b)和中泥盆统坡折落组(D_2p)、马平组(C_3m)、栖霞组(P_1q)。 C_3t 为灰色薄至中厚层状泥质粗条带灰岩,夹浅黄色泥质粉砂岩,厚 306~560 m。 C_3b 上部为深灰色中厚层状白云质灰岩,中下部为灰、黄灰色中厚层状夹薄层泥质条带灰岩及黄色泥质粉砂岩,厚 357~1 526 m。 D_1p 为灰黑、灰绿、紫红色页岩及

粉砂质泥岩互层,偶夹薄层状粉砂至细砂。 D_2p 为薄层夹中厚层状灰岩,间夹有薄层硅质岩及锰质条带。局部层可见灰岩透镜体,厚 41~210 m。 C_3m 为浅灰色厚层状含生物碎屑纯灰岩,偶夹白云岩。 P_1q 为深灰色中至厚层、虎斑状生物碎屑灰岩。

研究区地表岩溶形态各异,山上溶沟与石牙裸露共生,分布广泛,清晰可见,山脚溶洞发育、偶见地下暗河出入口和岩溶大泉,山下洼地密集,直径几十米到几百米,内部落水洞和漏斗发育,多数被土体覆盖成为耕地。研究区主要含水层为碳酸盐岩,地下水类型主要为碳酸盐岩裂隙溶洞水和碳酸盐岩夹碎屑岩溶洞裂隙水(图 1)。降雨为研究区地下水的主要补给来源。区内向斜构造发育,核部地层岩性为纯碳酸盐岩,发育多处漏斗、洼地、竖井、落水洞、溶洞、裂隙等,形成了良好的汇流、下渗及贮存条件,地下水径流表现出水力坡度和流量变幅大、径流途径长等特点,地下水以岩溶泉、地下出口等形式排泄,地下河出入口流量 100~800 L·s⁻¹。

2 研究方法

2.1 示踪试验目的

(1)了解关山隧道出口附近马鞍山落水洞和大屋基 1#泉和 2#泉的地下水联通性,掌握落水洞、岩溶泉与隧道之间的水力联系,判断地下水的流速、流向;(2)利用示踪浓度曲线了解示踪区岩溶含水介质结构特征,判断隧道穿越示踪区的涌水风险以及隧道一旦涌水是否会对泉水产生影响甚至造成泉水断流。

2.2 示踪地点和范围

通过前期的水文地质调查和水样分析,确定示踪试验的投放点为关山隧道出口附近马鞍山落水洞,海拔为 1 478 m,接收点为隧道北西侧的大屋基两处泉点,分别命名为大屋基 1#泉点与大屋基 2#泉点,1#泉点高程 1 462 m,距离落水洞直线距离 430 m;2#泉点高程 1 446 m,距离落水洞直线距离 360 m。

2.3 示踪剂选择和投放量

示踪剂选择原则包括:(1)无毒、无臭、无味,不会影响居民正常用水,不会破坏生态环境;(2)自然本底值低,确保检测时实验结果较为准确;(3)不受围岩干扰,不会被吸附,化学性能稳定,不易与其他

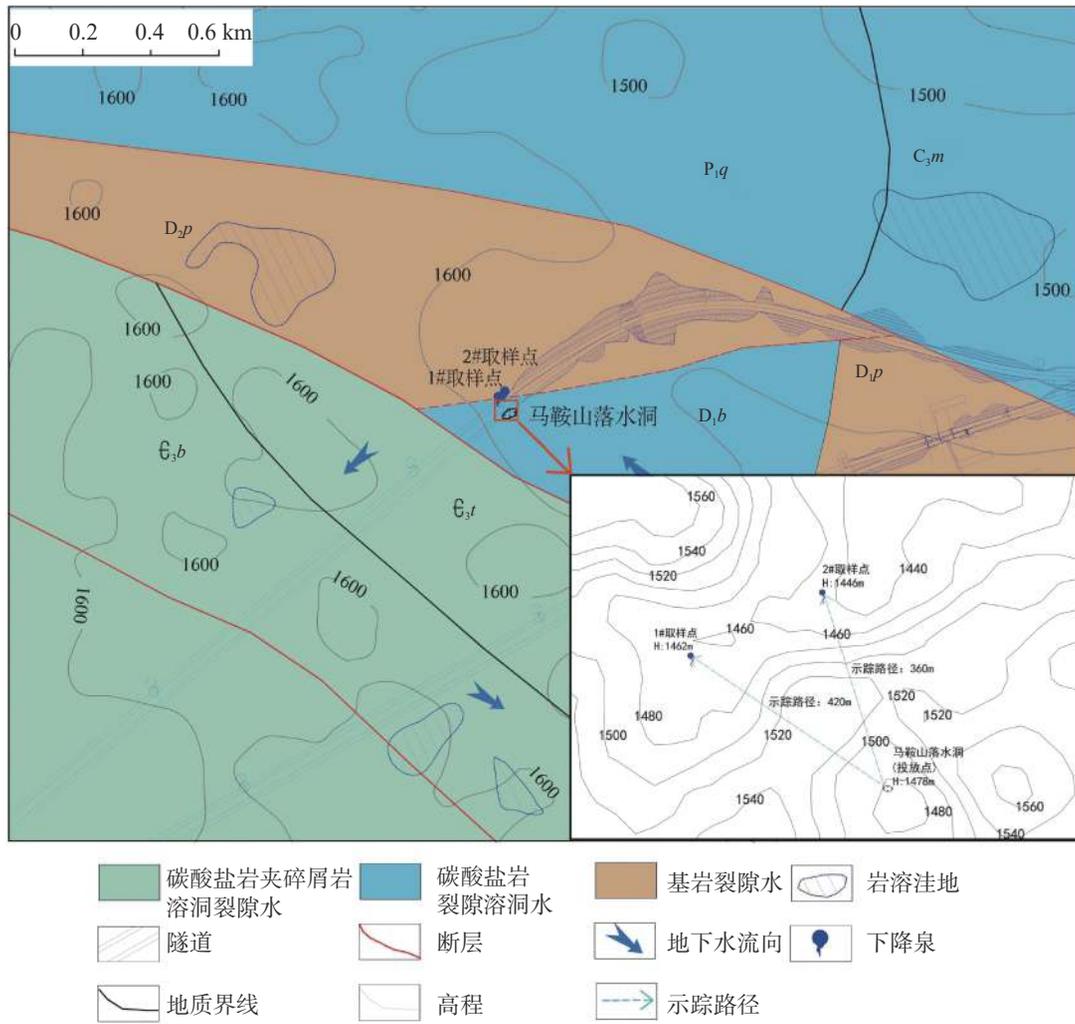


图 1 研究区水文地质简图

Fig. 1 Hydrogeological map of the study area

物质发生反应, 不易挥发; (4) 易检测, 在野外便能得到数据, 灵敏度高且成本相对较低^[10]。

依据上述原则和试验前背景值测试结果, 以及综合考虑社会影响的情况下, 最终决定选用钼酸铵 $[(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O]$ 作为示踪剂, 并运用便携式分光光度计在野外进行现场测试, 并获得试验数据。

2.3.1 示踪剂投放

本次示踪试验于 2021 年 7 月 19 日 13 时开始, 将 6 kg 的钼酸铵 $[(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O]$ 充分搅拌均匀后, 投放进马鞍山落水洞中, 钼酸铵分子式中 Mo^{6+} 占整个分子量的 54.43%, 产品纯度为 98.0%^[12], 计算后实际投放进落水洞的 Mo^{6+} 为 3.20 kg。

2.3.2 取样样品

2021 年 7 月 20 日开始取样监测, 至 2021 年 7 月 23 日结束, 共监测 4 d, 取样 24 次, 开始取样间隔

表 1 Mo^{6+} 背景值分析结果

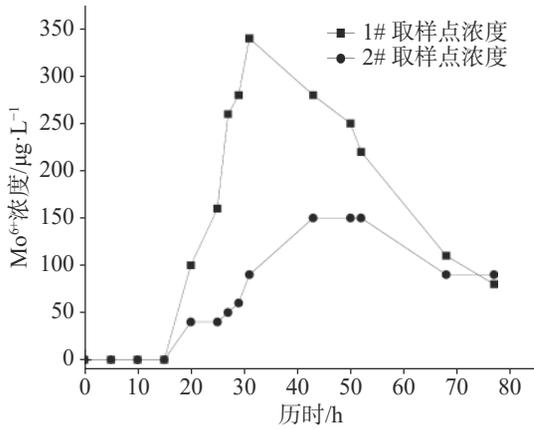
Table 1 Analysis of Mo^{6+} background values

水点编号	名称	流量/ $L \cdot s^{-1}$	$Mo^{6+}/\mu g \cdot L^{-1}$	备注
DWJXSD	马鞍山落水洞	20	0.065	投放点
DWJ-01	大屋基1#泉点	10	0.110	接收点
DWJ-02	大屋基2#泉点	15	0.540	接收点

为每两小时一次, 随着时间推移浓度降低, 取样间隔相继延长。 Mo^{6+} 背景值分析结果如表 1 所示。

2.4 示踪样品检测

利用便携式分光光度计进行现场定时检测, 分光计最低检测浓度为 $20 \mu g \cdot L^{-1}$ 。本次示踪试验钼含量的测试方法为三元配合物法, 钼酸盐和指示剂在敏化剂的作用下反应产生稳定的蓝色配合物, 然后使用 610 nm 波长可见光进行数据读取。 Mo^{6+} 浓度变化测试曲线如图 2 所示。

图2 Mo⁶⁺浓度变化曲线Fig. 2 Variation curve of Mo⁶⁺ concentration

2.5 地下水流速

地下水示踪的峰值流速以及平均流速使用美国环境保护署发布的 Qtracer 2 软件进行计算, 计算公式如下:

峰值流速:

$$v_e = \frac{x_s}{T_e} \quad (1)$$

平均流速:

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{x_s C(t) Q(t)}{t} dt}{\int_0^{\infty} C(t) Q(t) dt} \quad (2)$$

式中: x_s 为投放点与接收点的距离; T_e 为浓度达到可观测水平的时间; C 为质量浓度; Q 为接收点浓度。计算结果如表 2 所示。

2.6 回收率

运用经验公式和 Qtracer 2 软件提供的公式分别计算回收率。

经验公式(3)^[13]用示踪时间内持续获得的实际峰值浓度, 即 Mo⁶⁺浓度峰值与背景值之间的差值, 乘以获取时间和平均流量计算 Mo⁶⁺回收量, 然后通过实际回收量与投放量比值计算回收率[公式(4)], 该计算公式在峰值持续时间较长或流量较大的情况下较适用。

$$M = \Delta C \times t \times Q \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中: M 为示踪剂回收量(kg); ΔC 为 Mo⁶⁺浓度峰值与背景值之间的差值(mg·L⁻¹); t 为 Mo⁶⁺峰值体积质量持续时间(s); Q 为试验期间出口平均流量(L·s⁻¹)。

$$\eta = \frac{M}{M_{理想}} \times 100\% \quad (4)$$

通过公式(3)计算得到 1#泉点的 Mo⁶⁺回收量为 0.01 kg, 2#泉点的 Mo⁶⁺回收量为 0.065 kg, 实际投放示踪剂的 Mo⁶⁺ 为 3.20 kg, 即在理想情况下 Mo⁶⁺ 的回收量为 3.20 kg, 通过公式(4)计算得到 1#泉点 Mo⁶⁺的回收率为 0.31%, 2#泉点 Mo⁶⁺的回收率为 2.03%。

Qtracer 2 软件提供的公式计算回收率的原理与经验公式相同, 但是其引入数学积分概念, 计算结果更加符合实际。

$$M = \int_0^{\infty} C(t) Q(t) dt \quad (5)$$

其计算得到 1#泉点的 Mo⁶⁺回收量为 0.483 kg, 2#泉点的 Mo⁶⁺回收量为 0.66 kg。实际投放示踪剂的 Mo⁶⁺ 为 3.20 kg, 即在理想情况下 Mo⁶⁺ 的回收量为 3.20 kg, 通过公式(4)计算得到 1#泉点 Mo⁶⁺的回收率为 15.09%, 2#泉点 Mo⁶⁺的回收率为 20.63%。

3 结果与分析

投放示踪剂 16.5 h 后, 1#和 2#泉点均接收到了 Mo⁶⁺, 证明示踪试验地下水总体自 SE 向 NW 方向径流(图 1), 结果与通过水文地质调查推断的方向一致。

通过计算得到 1#泉点的地下水平均流速为 13.02 m·h⁻¹, 峰值流速为 32.25 m·h⁻¹; 2#泉点的地下水平均流速为 6.94 m·h⁻¹, 峰值流速为 27.00 m·h⁻¹。相同距离条件下, 地下水平均流速与峰值流速不同, 反映出岩溶含水介质形态结构不同^[13]。示踪剂投放点高程 1 478 m, 1#泉点高程 1 462 m, 距离投放点直线距离 430 m; 2#泉点高程 1 446 m, 距离投放点直线

表 2 研究区地下水流速情况

Table 2 Flow velocity of groundwater in the study area

示踪剂投放点	接收点	距离/m	初现用时/h	峰值到达时间/h	平均流速/m·h ⁻¹	峰值流速/m·h ⁻¹
马鞍山落水洞	1#取样点	430	20	31	13.02	32.25
	2#取样点	360	20	43	6.94	27.00

距离 360 m。从地表看, 1#泉点比 2#泉点距离远 19.4%, 垂直落差小 2 倍, 但是地下水平均流速是 2#泉点的 188%, 峰值流速是 2#泉点的 119%; 2#泉点峰值浓度比 1#泉点明显偏低, 但持续时间长, 说明投放点与 2#泉点之间的渗透途径较长、水力梯度较大, 地下水流动时由于管道的转弯和含水介质粘滞性产生局部水头损失及沿程损失, 由此说明 1#泉点与投放点的水力联系更好。另外, 1#泉点和 2#泉点 Mo^{6+} 浓度变化曲线均为单峰, 但是 2#泉点出现台阶状, 表明在管道途中可能存在有小型的积水洼地或溶潭^[14] (图 2)。

通过经验公式和 Qtracer 2 软件计算的结果相差较大, 经验公式利用的是峰值浓度与持续时间, 受地下水流速、流量、采样时间等因素影响较大, 计算结果一般会偏小, 而 Qtracer 2 软件提供的公式引入了积分算法对试验数据进行定量解译计算, 通过浓度历时变化曲线, 获得最终回收率, 计算结果明显比经验公式更准确, 更接近实际。另外, 两种计算方法回收率均较低, 说明投放点与 1#和 2#泉点间可能存在其他地下水径流通道, 结合现场水文地质调查, 示踪

区附近未发现其他出水口, 由此推断地下水从示踪投放点流入后, 除了在 1#和 2#泉排泄外, 还有向深部径流的通道, 如果该通道位于隧道标高以上, 施工过程中不慎挖开隔水底板, 则可能会引起隧道涌水突泥, 这种情况对于隧道施工不利, 如果该通道位于隧道标高以下一定距离, 施工过程中发生突水突泥的可能性较低, 但在隧道建成使用后, 可能会对地下水的补给产生不良影响, 影响地下水水量, 造成泉水断流从而威胁当地村民的日常生活用水^[15-18] (图 3)。

4 结论与建议

(1) 投放点(马鞍山落水洞)与两处接收点(1#和 2#泉)均存在水力联系, 在关山隧道出口段, 地下水流向为自 SE 向 NW 方向径流, 1#泉地下水流速快, 其与投放点水力联系更密切, 2#泉点 Mo^{6+} 浓度变化曲线出现台阶状, 在管道途中可能存在有小型的积水洼地或溶潭。

(2) 1#和 2#泉点的回收率均较低, 投放点与 1#和 2#泉点之间可能存在向深部径流的通道, 隧道施

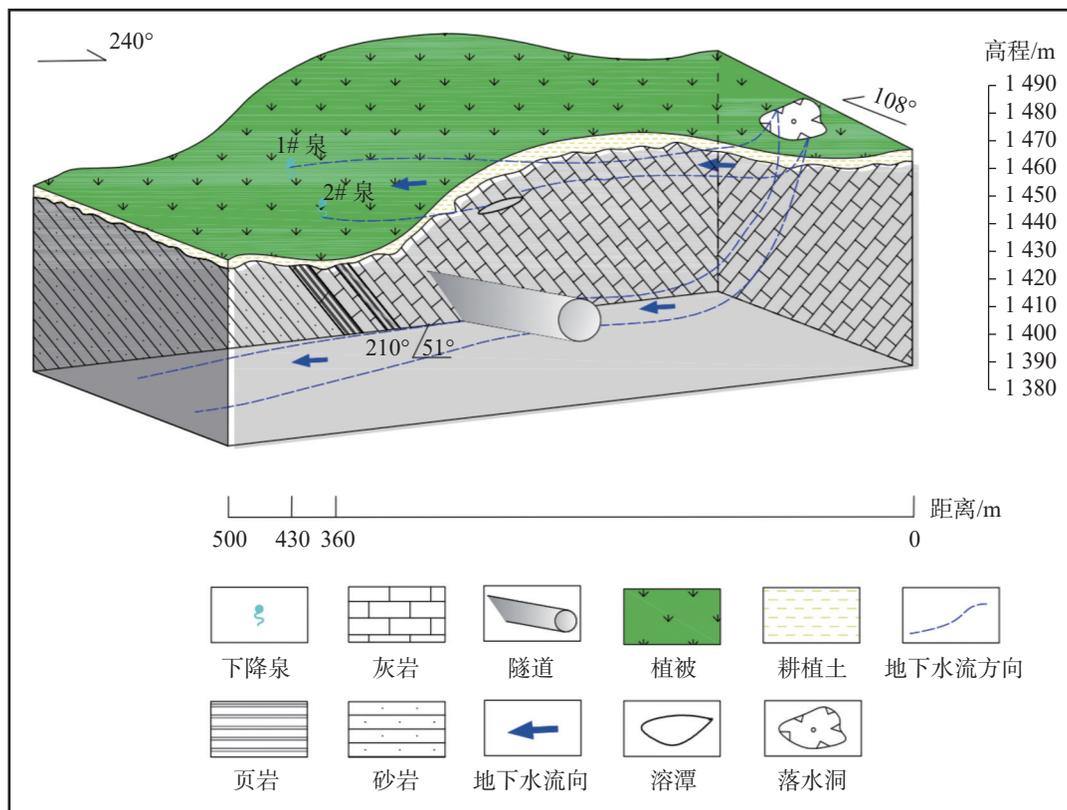


图 3 含水介质概化图

Fig. 3 Generalization diagram of aqueous medium

工过程存在一定的涌水风险,隧道建成后可能会对泉水地下水补给产生不良影响,造成断流或者流量减少等问题。

(3)如果示踪试验数据采用在线采集技术,采集时间间隔密集,浓度数据较为丰富,可利用经验公式计算回收率,计算方法简单明了;如果采样间隔稀疏,浓度数据较少,利用 Qtracer2 软件计算回收率则较为可靠。

(4)建议隧道在施工过程中对投放点和接收点之间推测存在的深部地下水径流通道进行探测识别,采取必要措施避免涌水风险,同时加强对泉水流量的长期监测,避免因泉水断流或者流量减少带来的环境和社会影响。

参考文献

- [1] 蒙彦,雷明堂.岩溶区隧道涌水研究现状及建议[J].中国岩溶,2003,22(4):287-292.
MENG Yan, LEI Mingtang. The advance and suggestion for the study on discharge rate in karst tunnel gushing[J]. *Carsologica Sinica*, 2003, 22(4): 287-292.
- [2] 苏国举.齐岳山隧道岩溶涌水治理关键技术[J].铁道建筑技术,2016,274(8):50-54.
SU Guojun. Key technologies for water gushing treatment of Qiyueshan karst tunnel[J]. *Railway Construction Technology*, 2016, 274(8): 50-54.
- [3] 杨艳娜.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,2009.
YANG Yanna. Research on karst tunnel water bursting hazard risk assessment system in the southwest mountainous area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [4] Ralf Benischke. Review: Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers[J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29(1): 67-88.
- [5] Duran Léa, Fournier Matthieu, Massei Nicolas, Dupont Jean Paul. Assessing the nonlinearity of karst response function under variable boundary conditions[J]. *Groundwater*, 2016, 54(1): 46-54.
- [6] Worthington Stephen R H. Estimating effective porosity in bedrock aquifers[J]. *Groundwater*, 2022, 60(2): 169-174.
- [7] 张祯武,杨胜强.岩溶水示踪探测技术的新进展[J].工程勘察,1999(5):40-43,39.
- [8] 刘治政,朱恒华,杨丽芝,彭俊峰,邢立亭,王孝勤,边农方.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(Suppl.1):71-78.
LIU Zhizheng, ZHU Henghua, YANG Lizhi, PENG Junfeng, XING Liying, WANG Xiaoqin, BIAN Nongfang. On hydrogeological condition of Wanzhai basin based on tracer test[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(Suppl.1): 71-78.
- [9] 张培兴,曹聪慧,吴云.自动化示踪技术在岩体水文地质研究中的应用[J].水力发电,2019,45(7):38-42,71.
ZHANG Peixing, CAO Conghui, WU Yun. Application of automated tracer technology in rock mass hydrogeology research[J]. *Water Power*, 2019, 45(7): 38-42, 71.
- [10] 杨平恒,罗鉴银,彭稳,夏凯生,林玉石.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.
YANG Pingheng, LUO Jianyin, PENG Wen, XIA Kaisheng, LIN Yushi. Application of online technique in tracer test: A case in Qingmuguan subterranean river system, Chongqing, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(3): 215-220.
- [11] 邓振平,周小红,何师意,罗英.西南岩溶石山地区岩溶地下水示踪试验与分析:以湖南湘西大龙洞为例[J].中国岩溶,2007,26(2):163-169.
DENG Zhenping, ZHOU Xiaohong, HE Shiyi, LUO Ying. Analysis and tracing-test to karst groundwater in Southwest China karst rocky mountain area: A case study in Dalongdong, western Hunan[J]. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(2): 163-169.
- [12] 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.
YI Lianxing, XIA Riyuan, TANG Jiansheng, HUANG Junjie. Analysis on the connecting medium structure of groundwater: Taking the tracer tests in the experiment base of Zhaidi ground-river system as an example[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2010, 38(11): 38-41.
- [13] 张浪,李俊,潘晓东,黄晓荣,彭聪.西南某岩溶区地下水系统示踪试验与解析[J].中国岩溶,2020,39(1):42-47.
ZHANG Lang, LI Jun, PAN Xiaodong, HUANG Xiaorong, PENG Cong. Tracer test and analysis of groundwater system in a karst area of Southwest China[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(1): 42-47.
- [14] 王伟,宋婉虹.利用示踪试验研究巨木地下河成库条件[J].地质学刊,2015,39(1):105-110.
WANG Wei, SONG Wanhong. Reservoir-forming conditions of the Jumu underground river by tracer tests[J]. *Journal of Geology*, 2015, 39(1): 105-110.
- [15] 付开隆,周羽,韦正雄.贵南高铁朝阳隧道出口平导6.10突水突泥事件分析[J].中国岩溶,2022,41(6):895-904.
FU Kailong, ZHOU Yu, WEI Zhengxiong. Analysis of 6.10 water and mud inrush incident in the exit of parallel pilot tunnel of Chaoyang tunnel of Guiyang-Nanning high-speed railway[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(6): 895-904.
- [16] 骆伟,吴华英,胡惠华,马德青,张鹏,李振兴.沅古坪隧道选线的岩溶水文地质问题[J].中国岩溶,2021,40(2):253-263.
LUO Wei, WU Huaying, HU Huihua, MA Deqing, ZHANG Peng, LI Zhenxing. Karst hydrogeological problems in the route selection of Yuanguping tunnel[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 253-263.
- [17] 郑克勋,裴熊伟,朱代强,吴述彧,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 Shuyun,

GUO Weixiang. Thoughts on tunnel water inrush in changing zones of groundwater level in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(4): 473-479.

- [18] 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.

Analysis on the hydraulic connection and medium characteristics between tunnels and karst springs by tracer tests: A case study of Guanshan tunnel

YAO Shasha^{1,2}, ZHANG Yi³, WANG Xinwen⁴, LI Xianheng⁵, XU Jiangkun⁵, GUO Fagui⁵, MENG Yan¹

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/Innovation Center of Karst Collapse Prevention, CGS/Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610031, China; 4. Huabang Construction & Investment Group Co., LTD., Lanzhou, Gansu 730199, China; 5. Guizhou Transportation Planning Survey & Design Academe Co., LTD., Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract In engineering construction, preventing geological disasters is crucial for protecting people's property and safety. Water inrush and mud gushing in tunnel construction are common engineering hazards in China, leading to severe consequences like construction suspension and spring disruption. Effectively preventing such incidents necessitates a thorough understanding of the hydraulic relationships and medium characteristics between surface and groundwater around tunnel sites. This study takes a detailed look at the karst springs and sinkholes surrounding the Guanshan tunnel, situated in a mid-low mountainous region in Funing county, Wenshan Prefecture, Yunnan Province. The area is characterized by its karst topography, where rock formations are exposed on mountain surfaces, coexisting with gullies. Beneath these mountains, the landscape features densely packed depressions filled with sinkholes and shafts, indicating a highly intricate karst hydrological system. This study primarily employs tracer tests to identify the dispersion of underground pipelines and the aqueous medium of groundwater. By analyzing concentration curves of tracer tests, the research aims to understand the distribution of pipelines between sinkholes and the paths of karst spring runoff. The tracer recovery rate is crucial for revealing the hydraulic connections around the Guanshan tunnel and offers a geological basis for assessing the potential risks of water inrush and mud gushing during tunnel construction. The final concentration curves indicate a clear hydraulic connection between the injection point and two receiving points. The concentration curve at the 1# sampling point shows a single peak, indicating a relatively straightforward channel with a strong hydraulic connection to the sinkhole. Conversely, the channel at the 2# sampling point demonstrates greater complexity, with concentration curves including plateau shapes. This suggests the presence of longer seepage paths and higher hydraulic gradients, potentially indicating small pools or solution ponds in the area. Calculated with both an empirical formula and the Qtracer2 software based on collected tracer concentrations, recovery rates at these two points are found to be low. The low recovery rates could imply the existence of large tributaries or a complex, dual-layer karst aquifer system, where groundwater flows to deeper levels. Given the tunnel altitude, it is inferred that tunnels at lower positions are at a heightened risk of water inrush, potentially affecting the karst springs in an adverse way. In this study, calculation methods of recovery rates are compared, which reveals that although the empirical formula is simple and easy to use, it may not be accurate under conditions of low tracer concentration and minimal groundwater flow. On the other hand, the Qtracer2 software, integrating concentration and volume, offers a more accurate and reliable method, especially in scenarios with sparse sampling intervals and limited data.

The results of this study are significant in several ways. Firstly, they indicate that despite the low recovery rates at spring points 1# and 2#, there is a likelihood of deeper runoff channels existing between these points and the water point, which could pose risks of water accumulation. Although underground karst pipelines are relatively complex, actual engineering shows that large flows of groundwater will not be encountered during tunnel construction, and the possibility of water and mud inrush during tunnel construction or operation is low. However, the study recommends

that construction processes should be managed carefully to prevent the discharge of wastewater and debris into groundwater, thus avoiding contamination of groundwater. Furthermore, this research provides valuable insights into the geological conditions surrounding the Guanshan tunnel. It highlights the importance of conducting detailed hydrogeological studies before commencement of any major construction project, particularly in karst regions known for their complex subterranean water systems. Such studies are not only crucial for the safety and success of the construction project but also for the protection of the surrounding environment and water resources. In conclusion, the findings of this study offer a comprehensive geological basis for assessing risks in water inrush and mud gushing in the Guanshan tunnel. They also serve as a useful reference for future projects in similar geological settings, particularly for choosing appropriate methods to calculate recovery rates of tracer tests. The study results may provide practical guidelines and methodologies for effective management of the risks associated with tunnel construction in karst terrains.

Key words tunnel, tracer test, ammonium molybdate, recovery rate, Qtracer2

(编辑 黄晨晖)

《中国岩溶》2023 年度优秀编委和优秀审稿人

为了感谢和表彰本刊编委与审稿专家在撰稿、审稿、组织专刊及期刊宣等方面做出的突出贡献,《中国岩溶》编辑部开展了 2023 年度优秀编委和优秀审

稿人的评选活动,经编辑部推荐和主编审定,评选出“优秀编委”和“优秀审稿人”共 15 人,现予公布,谨向各位编委专家表示最诚挚的感谢和崇高的敬意!

序号	姓名	工作单位
优秀编委		
1	王宇	云南省地质调查局
2	苏维词	贵州省山地资源研究所
3	万军伟	中国地质大学(武汉)
4	甘伏平	中国地质调查局岩溶地质研究所
5	蒲俊兵	重庆师范大学
优秀审稿人		
1	高宗军	山东科技大学
2	蒙彦	中国地质调查局岩溶地质研究所
3	李强	中国地质调查局岩溶地质研究所
4	陈余道	桂林理工大学
5	于青春	中国地质大学(北京)
6	许模	成都理工大学
7	邹胜章	中国地质调查局岩溶地质研究所
8	章程	中国地质调查局岩溶地质研究所
9	余洪璋	中铁二院贵阳公司
10	王滨	河北地质大学