

张浪,李俊,潘晓东,等.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.

DOI:10.11932/karst2019y36

西南某岩溶区地下水系统示踪试验与解析

张浪¹,李俊¹,潘晓东²,黄晓荣¹,彭聪²

(1. 四川大学水利水电学院, 成都 610065; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:以西南某典型岩溶区为例,解析示踪试验在岩溶管道连通性以及获取水文地质参数中的应用。选择落水洞为投放点,分别从落水洞西侧和东侧寻找地下水出露点作为接收点,判别落水洞地下径流的实际去向以及落水洞与接收点之间的水力联系。结合 Qtracer2 软件对示踪试验成果进行定量解析,确定示踪剂回收率、地下水平均流速、最快流速,估算出岩溶管道结构特征和水文地质参数。结果表明:落水洞与接收点 JS01、JS03 之间不存在直接水力联系;落水洞与接收点 JS02 存在水力联系且岩溶管道极为发育,含水介质不均匀,地下水运移路径较为通畅,为典型的紊流流态;落水洞地下径流的主要方向是由西向东,但在丰水期雨量较大期间,接收点 JS04 能够接收到荧光素钠,说明丰水期水位上涨后两者间会有水力联系,导致部分水量向落水洞西侧排泄。

关键词:岩溶区;示踪试验;连通性;地下径流;管道特征;水文地质参数

中图分类号:P641 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2020)01-0042-06 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶地下河系是中国南方碳酸盐岩地区最重要的岩溶现象之一,其主要特征是由相互连通的岩溶孔隙、岩溶裂隙、岩溶洞穴和岩溶管道多重介质组构而成,具有极强的汇水、蓄水和排水功能的岩溶水地下通道^[1]。岩溶多重介质环境决定了自身结构、功能和性质的复杂性,导致岩溶地下含水层与一般孔隙、裂隙含水介质的水文地质特征存在较大差异,主要表现有较高的渗透性和非均质性,渗透系数变化极大等特点^[2]。岩溶含水层特殊的地质结构导致岩溶区水文地质调查非常困难,目前采用的方法有水文学法^[3]、抽水试验^[4]、同位素法^[5]、水化学法^[6]、地球物理方法^[7]以及示踪技术^[8-10]等。其中,示踪技术是岩溶水文地质调查常用的方法,通常也是确定岩溶地下水系统连通性的最有效方法^[11]。在地下水流场和流域范围不明确的岩溶地区,需要展开示踪试验查

明地下水的补给、运移和排泄,以确定地下水连通情况及岩溶管道的分布、形态和水力特征^[12],其中应用示踪技术(根据示踪剂浓度连续变化的形态特征分析含水介质的空间形态特征,以获取水文地质参数),已成为当今国际水文地质研究的重要方向和趋势^[12-14]。

岩溶地下水存储于岩溶含水层中,在很多情况下往往以点状形式(岩溶泉)排泄,岩溶泉泉口流量通常可以代表岩溶水系统的总水流,包含了岩溶含水层补给的时空分布以及地表、地下水流通道的总体信息,其是重要的岩溶水监测点^[2,15]。本文以西南某典型岩溶区为例,应用示踪技术对岩溶地下水系统进行调查研究,查明落水洞的地下径流方向和接收点(岩溶泉)之间的水力联系,分析岩溶地下水径流规律,推测岩溶地下含水层结构特征及水文地质参数。这有利于快速准确判断地下水补给范围,分析导致泉水断流和污染的原因,以为泉水保护提供科学依据。

第一作者简介:张浪(1994—),男,硕士研究生,研究方向为水资源开发利用与保护。E-mail:1215423829@qq.com。

通信作者:李俊,女,讲师,主要从事地下水溶质运移方面的研究。E-mail:47072685@qq.com。

收稿日期:2019-03-01

1 研究区概况

研究区位于中国西南岩溶区四川省境内,地势总体呈西高东低,主要呈现出构造剥蚀、侵蚀、溶蚀地貌形态。岩溶地貌主要表现为漏斗、岩溶洼地、落水洞、岩溶洞穴、岩溶地下河出口、岩溶泉等。区域岩溶发育强烈,水文地质条件复杂,地下岩溶形态多由岩溶洞穴、岩溶裂隙、岩溶管道相互组合而成。研究区属亚热带湿润季风型气候区,全年气候温和,雨量充沛,年平均降雨量为1 231.46 mm,降水主要集中在5-10月份,占全年降水的80.9%。区内地下水补给主要来源于降雨和地表水,大气降水及地表水沿岩溶裂隙、落水洞、竖井等进入二叠系茅口组灰岩岩溶含水层,地下水在运移过程中由于页岩、砂质泥

岩、粉砂质泥岩等碎屑岩构成二叠系栖霞茅口组(P_2q-m)隔水底板和玄武岩、泥质粉砂岩等碎屑岩构成的隔水盖层作用,沿二叠系茅口组灰岩岩溶含水层径流,在遇阻水逆断层后沿断层破碎带(岩溶发育裂隙带)上升,在河谷旁地势低洼处排泄(即当地最低侵蚀基准面),主要以岩溶泉的形式排泄,小部分由溶洞、天窗等流出地表。研究区主要出露地层由老至新依次有:志留系、二叠系、三叠系、第四系,出露的碳酸盐岩地层有 P_2m 和 T_1f 等,其主要岩性为灰岩、玄武岩、粉砂岩和泥质灰岩等(图1)。其中接收点(JS02)为研究区天然排泄岩溶大泉,曾经是当地居民的重要饮用水源,泉水丰水期流量在 $0.20\sim 0.45\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,平均流量为 $0.35\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 枯水期流量为 $0.05\sim 0.10\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,平均流量为 $0.06\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

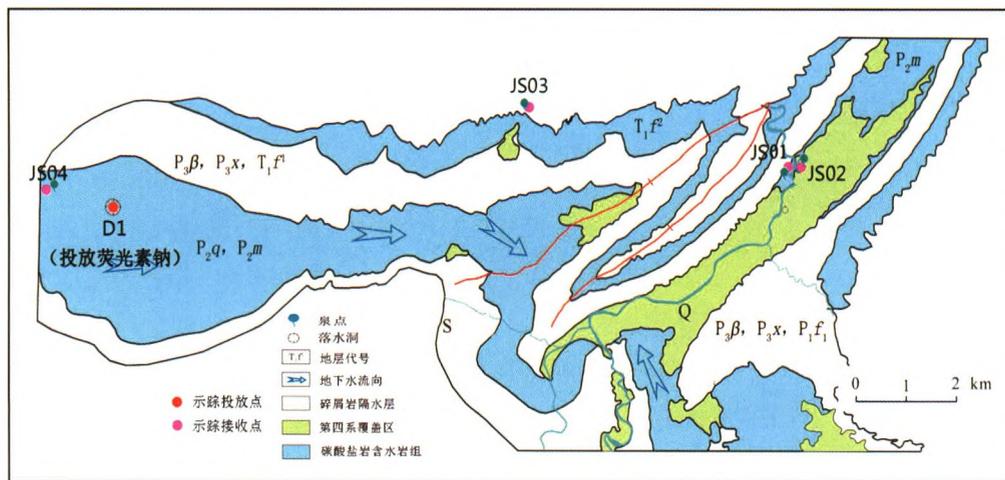


图1 研究区水文地质示意图

Fig. 1 Hydrogeological sketch of the study area

2 示踪试验

2.1 试验目的

利用示踪技术,查明研究区落水洞(D1)与各个接收点之间是否存在水力联系,判别落水洞地下径流实际去向;分析计算落水洞与接收点之间地下水流速和示踪剂的回收率,并通过解析示踪剂质量浓度历时变化曲线推断落水洞-接收点段含水层介质结构特征及水文地质参数。

2.2 试验方法

试验投放示踪剂采用荧光素钠($C_{20}H_{10}Na_2O_5$),其优势在于易溶于水,无毒,不易被地下水中其他物质干扰,检出限极低,易被仪器检测,灵敏度高,且成本相对较低、易于操作^[11,16]。示踪剂的投放量应在充分

考虑到有效示踪剂物质,满足采样点仪器能够清楚地检测,不增加额外费用、不增加环境负荷等为前提,设计有效示踪剂的用量。考虑到岩溶泉的流量、示踪距离和分析方法的检出限,此次试验示踪剂的投放量为40 kg,经过分批次充分搅拌,使之完全溶解后一次性投放,投放时间为2018年8月14日。

选择落水洞(D1)作为投放点,其常年有地表水汇入,受降雨控制明显,附近农田退水、乡镇生活废水经过落水洞注入地下河。通过前期水文地质调查发现,落水洞恰好位于两个地下水系统的分水岭位置,为了确定落水洞地下径流的实际去向,分别从落水洞西侧和东侧寻找地下水出露点,作为接收点,共布设4个接收点(图1),其中接收点JS01、JS02为上升泉,两泉相距50 m,投放点至两接收点的直线距离约14 km,接收点JS01、JS02为在线监测,示踪剂的接收

检测装置为GGUN-FL30型野外自动化荧光仪,仪器对荧光素钠检测下限为 $0.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。仪器通过校正及环境背景值测试后,示踪剂背景值浓度为0,于2018年8月13号安装在监测点,监测时间间隔设为15 min。同时,从接收点JS03、JS04进行人工取样,取

样频率为每天2次,当接收点JS02监测到示踪剂时,加密取样,时间间隔为2 h。在示踪仪安装和示踪剂投放工作完成后,每天定期检查仪器运行状况,并获取监测数据,直到2018年9月16号试验结束。接收点情况见表1。

表1 示踪试验接收点情况

Table 1 Receiving points of tracer tests

序号	编号	与投放点相对位置	距投放点直线距离/km	流量/ $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	监测方法	监测频率
1	JS01	东侧上升泉	13.9	60~100	在线监测	$15 \text{ min}\cdot\text{次}^{-1}$
2	JS02	东侧上升泉	14.0	280~530	在线监测	$15 \text{ min}\cdot\text{次}^{-1}$
3	JS03	东侧岩溶泉	9.3	45~65	人工取样	$2 \text{ 次}\cdot\text{天}^{-1}$
4	JS04	西侧溶潭	2.0	—	人工取样	$2 \text{ 次}\cdot\text{天}^{-1}$

注:接收点JS04流量未监测。

2.3 分析方法

利用Qtracer2软件^[17]对示踪剂监测数据进行定量分析计算,以获取示踪剂的流速、回收率和相应岩溶管道的几何形态特征、水力参数等指标。根据前人研究成果^[17-19]可知,Qtracer2软件可对岩溶地下水系统的水动力学特性和溶质运移特性进行合理评价,被广泛应用于分析野外示踪实验数据。其中试验示踪剂回收量、回收率及地下水流速分别以下列公式计算:

$$M_0 = 10^{-3} \cdot \int_0^{\infty} C(t)Q(t)dt \quad (1)$$

$$R = \frac{M_0}{m} \times 100\% \quad (2)$$

$$v_e = \frac{x_s}{T_e} \quad (3)$$

$$\bar{v} = \frac{x_s}{t_0} \quad (4)$$

式中: M_0 为回收质量(g); C 为示踪剂质量浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); t 为监测时间间隔(min); Q 为接收点泉流量($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$); R 为回收率; m 为投入示踪剂质量(g); v_e 为最快流速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); x_s 为修正距离(修正系数为1.3); T_e 为初现时间(h); t_0 为峰值时间(h); \bar{v} 为平均流速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

3 结果与讨论

3.1 试验结果

本次示踪试验共历时829.75 h,分析4个接收点监测数据,并绘制出示踪剂浓度历时变化曲线。

示踪剂投放后,接收点(JS01)只显示背景浓度曲线,这表明落水洞与其没有水力联系。分析接收点JS03、JS04的样品,接收点JS03各个水样中未检测到荧光素钠,这表明落水洞与接收点JS03不存在水力联系,而接收点JS04样品中有部分在降雨期间检测到荧光素钠(图2)。通过接收点JS04监测结果随时间的变化曲线可看出,示踪剂的检测结果呈现出间断变化,并没有呈现出连续单峰拖尾变化,结合区内降水资料对比分析发现,示踪剂在降雨期间有检出,其他时间没有检出。

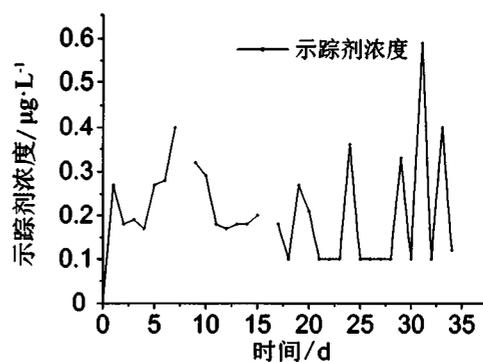


图2 JS04示踪剂浓度的历时曲线

Fig. 2 During curve of JS04 tracer concentration

接收点(JS02)经过64.75 h后初次收到示踪剂(图3),154.25 h后到达最大值,其值为 $16.94 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,829 h后示踪剂浓度降回本底值,在后期的监测中并未发现示踪剂再次出现。示踪剂在地下水中的出现时间为764.25 h,因此可得出落水洞与其存在水力联系。由于地下岩溶含水介质形态特征的不同,地下

水在运移过程中,流态也存在巨大差异。一般认为,示踪剂初现时流速为地下水最快流速,峰值出现时流速为平均流速^[17,19-20]。根据接收点(JS02)试验结果(表 2)可得出,地下水水流的最快流速为 287.75 m·h⁻¹,平均流速为 117.99 m·h⁻¹,平均流速较快,说明地下水运移通畅。结合岩溶泉流量数据及示踪剂监测数据对回收率进行计算,结果表明:接收点(JS02)荧光素钠回收量为 4.31 kg,回收率为 10.77%。

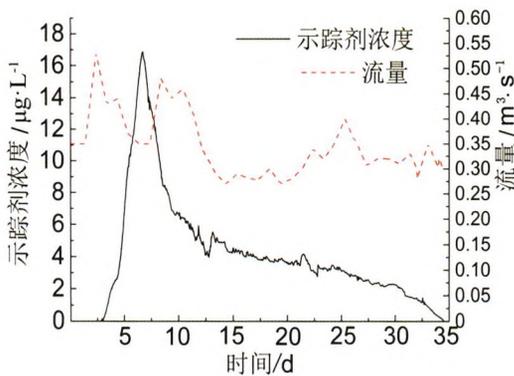


图 3 JS02 示踪剂浓度与流量历时曲线

Fig. 3 Duration curve of JS02 tracer concentration and flow quantity

3.2 通道结构参数及水力参数估算

通过在线持续观测或者人工取样建立的浓度—时间的穿透曲线不仅能够证明地下水系统的连通性,了解溶质的运移规律,还能分析其特点对含水层介质特征进行判断,进而估算含水层系统的水文地质参数^[12,21]。通过利用 Qtracer2 模型对接收点(JS02)试验结果进行定量分析,以获取相应的参数,其中落水洞到接收点(JS02)段管道储水量为 467 950 m³,落水洞—管道湿表面横截面积为 25.14 m²,平均直径为 5.66 m。

研究区的含水介质空间特征和流场决定了水文地质参数(包括弥散系数、纵向弥散度、摩擦系数、雷诺兹数、弗劳德数、舍伍德数、施密特数和分子扩散边界层厚度),而含水层水文地质参数是确定地下水运移规律,建立地下水水文模型以及岩溶水动力模拟必不可少的参数^[18]。定量解析穿透曲线,可获取相关的含水层介质水文地质参数。本次试验计算得到的落水洞到接收点(JS02)段含水层介质的水文地质参数见表 3。

表 2 JS02 示踪试验信息表

Table 2 Data of JS02 tracer test

示踪剂	投放量/kg	初现时间/h	峰现时间/h	峰值浓度/μg·L ⁻¹	平均流速/m·h ⁻¹	最快流速/m·h ⁻¹	回收率/%
荧光素钠	40	64.75	154.25	16.94	117.99	287.75	10.77

表 3 示踪试验估算的水文地质参数

Table 3 Hydrogeological parameters estimated by the tracer test

参数	弥散系数/ m ² ·s ⁻¹	纵向弥散度/ m	摩擦系数 (<i>f_f</i>)	雷诺兹数 (<i>N_R</i>)	弗劳德数 (<i>N_F</i>)	舍伍德数 (<i>N_{sh}</i>)	施密特数 (<i>N_{sc}</i>)	分子扩散边界层 厚度(<i>δ_m</i>)/mm
数值	0.854	1 937.9	0.144	79 367	0.002 4	2 801.6	1 140	2.02

3.3 结果分析

(1) 示踪剂浓度历时变化曲线的主要影响因素是含水层的结构特征^[21-22],从图 3 可看出,接收点(JS02)示踪剂质量浓度历时变化曲线为单峰型,并有锯齿状的波动,峰值陡升陡降,说明落水洞与接收点(JS02)之间存在水力联系且岩溶介质极为发育,含水介质不均匀,地下径流通道相对单一。根据前期水文地质调查(图 4),研究区二叠系栖霞茅口组灰岩岩溶裂隙发育,地下水在运移过程中由于隔水底板和

隔水盖层作用,仅能沿二叠系栖霞茅口组灰岩岩溶含水层运移,途中不断接受降水通过落水洞、裂隙等通道补给,最终沿断层破碎带、岩溶裂隙带上升,在地势低洼处排泄,补给区与排泄区存在较大的高程差,水动力条件良好,地下水沿岩溶裂隙管道由高水头向低水头运移,补给通畅、径流速度快。

(2) 本次投放示踪剂在接收点 JS02 回收率为 10.77%,分析原因可能受到投放点和接收点距离较长的影响,示踪剂可能会滞留在基岩裂隙、岩溶裂隙以及含水层介质对其吸附作用导致回收率较低。此

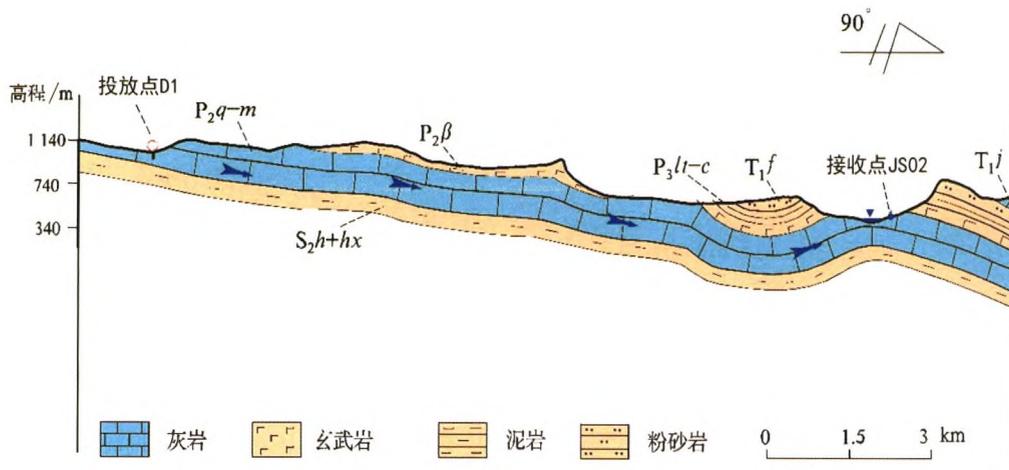


图4 D1-JS02水文地质剖面

Fig. 4 Hydrogeological profile D1-JS02

外,岩溶管道还可能存在其他的裂隙出口或者岩溶通道分走水流,结合前期对研究区域水文地质调查发现,落水洞东侧方向,在低洼地区,地形从陡变缓处,出露泉众多,泉点分散,这说明岩溶管道可能存在其他的裂隙出口或者岩溶通道。

(3)通过接收点(JS02)示踪试验结果分析,从地下水运移特征来说,地下水流速较大,最快流速与平均流速之比为2.44,平均流速远大于 $1\ 000\ \text{m}\cdot\text{d}^{-1}$,这表明排水渠落水洞至接收点(JS02)段地下岩溶介质相当发育,地下水运移路径极为通畅,为典型的紊流流态,其中估算雷诺数为79 367,远大于4 000,同样表明水流处于紊流流态。因此,当落水洞上游来水受到污染,将很快影响接收点(JS02)水质。

(4)接收点JS04在降雨期间接收到示踪剂,推测落水洞(D1)与接收点(JS04)之间存在水力联系,从地形地貌上分析,落水洞与接收点(JS04)相距约2 km,处于同一个小盆地中,但在降雨期雨量较大时,地下水位上升,落水洞可能向西侧方向排泄,但联系较差,这说明落水洞(D1)与接收点(JS04)存在溢流通道,地下水分水岭具有时空的复杂性,雨季或暴雨时,地下水水位上升,地下水流将跨越原地下分水岭向相邻流域排泄。

4 结论与建议

(1)研究区落水洞(D1)与接收点JS01、JS03不存在水力联系,与接收点JS02存在水力联系,而接收点JS04在降雨期间接收到示踪剂,说明落水洞地下径流主要方向是由西向东,但在丰水期雨量较大期间,落水洞西侧存在排泄出口,建议加强对落水洞与接

收点JS04水力联系的研究,以确定岩溶管道等特征。

(2)利用Qtracer2模型对接收点(JS02)试验结果进行定量解析,估算出水文地质参数:弥散系数为 $0.854\ \text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$,纵向弥散度为1 937.9 m,摩擦系数为0.144,雷诺数为79 367,弗劳德数为0.002 4,舍伍德数为2 801.6,施密特数为1 140,分子扩散边界层厚度为2.02 mm。

(3)落水洞与接收点(JS02)之间岩溶介质极为发育,地下水流速较快,岩溶多重介质复杂多变,地下水环境相当脆弱,落水洞上游一旦受到污染,将影响下游泉水水质,建议加强落水洞上游及周围环境保护,严禁污水等污染物排入落水洞。

参考文献

- [1] 郭纯青.中国岩溶生态水文学[M].北京:地质出版社,2007:100-101.
- [2] Goldscheider N, Drew D. 编;陈宏峰等译.岩溶水文地质学方法[M].北京:科学出版社,2015:1-4.
- [3] 赵良杰,夏日元,易连兴,等.基于流量衰减曲线的岩溶含水层水文地质参数推求方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2015,45(6):1817-1821.
- [4] 郑健,陈喜,张志才.抽水试验法推求南方岩溶地区双重介质水文地质参数[J].工程勘察,2014,42(1):42-46,58.
- [5] 张江华,梁永平,王维泰,等.硫同位素技术在北方岩溶水资源调查中的应用实例[J].中国岩溶,2009,28(3):235-241.
- [6] 姜光辉,郭芳,于爽.岩溶水系统的水化学曲线及其在水文地质研究中的应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2015,45(3):899-907.
- [7] 武毅,孙银行,李凤哲.西南岩溶地区不同含水介质地球物理勘查技术[J].中国岩溶,2011,30(3):278-284.
- [8] 赵一,李衍青,覃星铭,等.南洞地下河岩溶管道展布及结构特征的示踪试验解析[J].中国岩溶,2017,36(2):226-233.
- [9] 张勤军,张亚年,贝为昶.广西布泉地下河发育特征及连通性

- 分析[J].中国地质调查,2019,6(2):100-105.
- [10] 袁伟,王川.贵州盘县乐民河流域三股水岩溶水文地质条件分析[J].地质学刊,2017,41(4):655-662.
- [11] 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.
- [12] 谢国文,杨平恒,卢丙清,等.基于高分辨率示踪技术的岩溶隧道涌水来源识别及含水介质研究[J].中国岩溶,2018,37(6):892-899.
- [13] 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.
- [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,2013,41(2):40-44.
- [15] 常勇,吴吉春,刘玲,等.岩溶泉流量衰减曲线分析[J].水文,2016,36(1):15-21.
- [16] 易连兴,赵良杰,卢海平,等.两种常用染色剂管道及淤泥条件下示踪及对比:以丁旗地下河连通试验为例[J].中国岩溶,2017,36(5):721-726.
- [17] Field MS. The QTRACER2 Program for Tracer Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifer and Other Hydrologic Systems[R]. US:EPA,2002.
- [18] 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.
- [19] Gold Scheider N, Meiman J, Pronk M, et al. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology [J]. International Journal of Speleology,2008,37(1):27-40.
- [20] 鲁程鹏,束龙仓,苑利波,等.基于示踪试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.
- [21] 杨立铮,刘俊业.试用示踪剂浓度-时间曲线分析岩溶管道的结构特征[J].成都地质学院学报,1979(4):44-49.
- [22] Smart C. Artificial tracer techniques for the determination of the structure of conduit aquifers [J].Ground Water, 1988, 26(4):445-453.

Tracer test and analysis of groundwater system in a karst area of southwest China

ZHANG Lang¹, LI Jun¹, PAN Xiaodong², HUANG Xiaorong¹, PENG Chong²

(1.College of Water Resources and Hydrology, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2.Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The study area is located in a karst area of Sichuan Province in southwest China. It hosts intense karst development and complex hydrogeological conditions, where underground karst forms include caves, fissures and conduits. Taking this typical karst area as an example, this paper analyzes the application of tracer tests in karst conduit connectivity and acquisition of hydrogeological parameters, analyzes the karst groundwater runoff regular pattern, and estimates the structural characteristics and hydrogeological parameters of karst underground aquifers. These data will facilitate rapid and accurate determination of the scope of groundwater recharge, analyzing the causes of spring discharge cutoff and pollution, and providing a basis for spring protection. First, a sinkhole is selected as the release point, and the groundwater dew point is taken as the receiving point to judge the actual direction of the underground runoff and the hydraulic relation from the west side and the east side of sinkhole respectively. A quantitative analysis of breakthrough curves of the tracers is carried out by Qtracer2, and the tracer recovery rate, average groundwater velocity, maximum velocity, structural characteristics and hydrogeological parameters of the karst conduit are determined. The results show that there is no direct hydraulic relation between the sinkhole and the receiving points JS01 and JS03. While there is a hydraulic link between the sinkhole and the receiving point JS02, where the karst conduit extremely developed, the aquifer medium is uneven, and the groundwater movement path is relatively smooth, which is a typical turbulent flow state. The main direction of the underground runoff of the sinkhole is from west to east. In the period of heavy rainfall during the wet season, the point JS04 can receive sodium fluorescein, indicating that the underground water level increases during the wet season, which will lead to discharge of partial water volume to the west side of the sinkhole.

Key words karst area, tracer test, connectivity, underground runoff, conduit characteristics, hydrogeological parameters

(编辑 黄晨曦)