

黄芬,尹伟璐,胡晓农,等. 桂林毛村地下河流域雨季与旱季定量示踪分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(5): 648-658.
DOI:10.11932/karst2017y32

桂林毛村地下河流域雨季与旱季定量示踪分析

黄芬^{1,3}, 尹伟璐^{1,2,3}, 胡晓农^{1,2,3}, 曹建华^{1,3}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004)

摘要:以典型岩溶地区广西桂林市毛村地下河流域为例, 基于在线高分辨率监测进行雨季与旱季定量示踪试验, 精细刻画流域内含水介质特征。根据示踪试验研究及毛村地下河系统内地下水的径流和分布特征, 可将毛村地下河系统划分为社更岩、扁岩地下河系统, 大冲里一背地坪系统和大岩前落水洞—毛村出口系统。这三个子系统分布于毛村流域的上游和下游, 其示踪剂浓度历时曲线为陡升陡降的尖峰, 地下管道相对单一, 无较大岔道和溶潭发育。各段地下河水动力作用以对流作用为主, 且水流一般呈现为紊流流态。雨季流速快、流量较大, 平均运移时间短, 示踪剂回收率比旱季高。流域中游含水介质相对均匀, 无管道发育, 地下水主要赋存于溶蚀裂隙。

关键词:岩溶地下河; 示踪试验; 管道结构; 水力参数; 桂林毛村

中图分类号: P641.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2017)05-0648-11

0 引言

地下河是碳酸盐岩在水、热、CO₂、生物等共同控制下岩溶作用的产物, 它包含了岩石的化学溶蚀、机械侵蚀、重力崩塌, 以及过饱和溶液的再沉积过程^[1-3]。岩溶地下河系统是岩溶地下水资源主要的赋存场所之一, 为岩溶水文地质和环境领域重要的研究对象^[4-5]。示踪试验分析法是探测岩溶地下径流的有效方法^[6-8]。野外示踪试验可分为定性和定量两种类型, 定性示踪只能用来判断投放点与接收点是否联通; 定量示踪通过监测接收点的流量与示踪剂浓度, 以邹成杰的汇流理论^[9]为基础, 运用精确的数学模型, 根据接收点的穿透曲线(BTC曲线)特征, 来推测地下水流的各运移参数和地下岩溶结构特征^[10-13]。示踪试验分析法在探寻地下水补给源、刻画地下水空间分布、堤坝渗漏和环境污染等方面有着

重要意义^[14-15], 尤其在岩溶地区, 该方法普遍应用。

杨立铮和刘俊业(1979)^[16]利用示踪曲线的形态对岩溶地下河的管道发育特征做出了初步的判断与解释; 张祯武(1991)^[17]通过概化模型与示踪实例对比分析, 建立了岩溶地下水管流场类型与示踪曲线的对应关系。随着科技发展, 应用在线监测技术, 根据高精度示踪剂浓度连续变化的形态特征, 对地下水含水介质、地下水运移特征进行分析, 已成为当今国际水文地质调查研究的重要方向和发展趋势。杨平恒等(2013)^[18]以重庆青木关岩溶地下河为例, 选用天来宝为示踪剂, 利用QTRACER2模型将获取的高分辨率示踪剂质量浓度变化数据进行定量解释; 陈余道等(2013)^[10]以桂林寨底地下河为例, 分析得出荧光素钠和罗丹明B在应用中吸附性的差异, 提出荧光素钠是更为理想的示踪剂; 易连兴等(2015)^[19]以鱼泉地下河雨季示踪试验为例, 利用回收强度动态曲

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41530316); 广西自然科学基金(2016GXNSFAA380034); 中国地质调查局地质调查项目(12120113005300)

第一作者简介: 黄芬(1984—), 女, 副研究员, 主要从事岩溶生物地球化学研究。E-mail: hfen@karst.ac.cn。

通信作者: 胡晓农(1962—), 男, 教授, 主要从事水文地质研究。E-mail: bill.x.hu@gmail.com。

收稿日期: 2016-08-23

线分析得出鱼泉地下河系统的分支管道数量及分流系数。由于示踪试验实际操作简单方便、生产成本较低且具有较高的评价精度,在岩溶含水介质特征刻画中已得到广泛的推广应用。

虽然前人对示踪技术已有不少研究,但研究对象大多为某一段单一的地下管道,而且示踪时间多为雨季或者旱季,对于复杂的岩溶地下河流域的研究不足,对同一地下河系统不同水力条件下的联通情况研究更为少见。何师意等(2009)^[12]以桂林毛村岩溶地下河流域的示踪试验为例,说明研究区水文地质边界较复杂,仍需雨季与旱季示踪结合分析。本文以桂林毛村地下河流域为例,基于在线监测分别开展了枯水期与丰水期多组定量示踪研究,精细刻画地下水含水介质特征和水动力条件。研究结果对毛村地下河流域内水循环数值模型的研究具有一定的参考意义。

1 研究区概况

毛村地下河流域位于桂林市灵川县潮田乡,距离桂林约35 km,地下河出口在毛村,经纬坐标为N25°11′38″,E110°31′35″,高程为178 m,流域面积约11.2 km²。研究区地属中亚热带季风区,年平均气温18.6℃,年均降雨量1 915.2 mm。每年的3月份开始到8月份一般为雨季,9月份到次年2月份一般为枯季,受季风影响,降雨量年内分配不均。

研究区处于南圩—沙子断裂的北段,构造上位于潮田向斜的东侧,主要发育有北北东向的潮田、大岩前区域断裂及伴生的NEE向和NW向断裂。流域内出露地层有上古生界中泥盆统下部(D₂¹)杂色的石英砂岩、粉砂岩夹页岩,东岗岭组(D₂d)灰、深灰色层孔石泥晶灰岩与白云岩互层、灰黑色角砾状白云岩,上泥盆统融县组(D₃r)浅灰、灰白色厚层块状泥亮晶鲕粒砂屑灰岩,夹泥晶灰岩及白云质灰岩,以及第四系沉积物(Q)等。

流域内含水岩组主要为融县组(D₃r)灰岩和东岗岭组(D₂d)白云质灰岩。岩性较纯,在构造和流水侵蚀作用下,流域内岩溶十分发育,宏观上其地貌形态为峰丛洼地^[20]。岩溶水赋存于碳酸盐岩类含水岩组的溶洞、溶蚀裂隙中。

毛村地下河系统的补给来源包括内源补给与外源补给,内源补给主要是来自岩溶区的降水,外源补给有两个:①小龙背地表河水经过一段距离的地表明流进入岩溶区地下管道由扁岩汇入;②磨刀江地表河

水经岩溶区地下管道在社更岩汇入。这两股水与来源于白云岩地区的背地坪岩溶水在掌山底汇合后进入地下管道,流经穿岩,明流与暗河相间,流经大岩前,最终在毛村地下河出口排出(图1)。地下河长约5.1 km,流域面积约11.2 km²,其中碳酸盐面积与非碳酸盐岩面积分别为7.6 km²和3.6 km²。

2 示踪试验

2.1 试验目的

流域内岩溶微地貌发育,峰丛山体上有洞穴和封闭谷地发育,封闭谷地底部低洼处一般都有消水洞和岩溶塌陷发育,地下河沿途分布有岩溶泉、落水洞、天窗等。其中主要的岩溶泉包括社更岩、扁岩、背地坪、穿岩、大岩前,主要的落水洞包括磨刀江地表水进入岩溶区的落水洞、大冲里洼地进入背地坪的季节性落水洞、木桥头季节性沟渠的落水洞和大岩前明流段的落水洞,下游发育有较大的打谷坪天窗。流域上游和中游地下管道或裂隙分布不明,至大岩前落水洞有明显的地下河管道发育。北部边界是否有大岩前至灯明方向,西北部边界是否有打谷坪向唐家方向沿断层导水的现象不明。

本次试验主要利用高精度在线技术,对雨季与旱季示踪结果对比分析,进一步查清毛村流域的边界及地下河流域内各落水洞、天窗、岩溶泉等监测点之间的水力联系,计算各投放点和接收点之间地下水运移速度和示踪剂回收量,分析其含水介质结构特征,厘定水力参数。

2.2 投放点与接收点的布设

示踪剂投放点和接收点选择有泉水流入和出露的地方,根据研究区各泉水流量的具体情况,旱季和雨季示踪试验部署情况见表1、表2、图1、图2。

2.3 示踪剂的选择与投放

考虑到环境、试验精度、在线监测仪器的使用范围及示踪成本等影响因素,为最大限度的保证试验成功,选取了罗丹明B和荧光素钠作为示踪剂。根据地下河出口流量,称取一定量的示踪剂,用黑色袋子封装以避免示踪剂见光分解损失,然后将示踪剂放入10 L塑料水桶,加水充分搅拌至完全溶解后,采取一次性瞬时投放的方法倒入投放点(图3)。

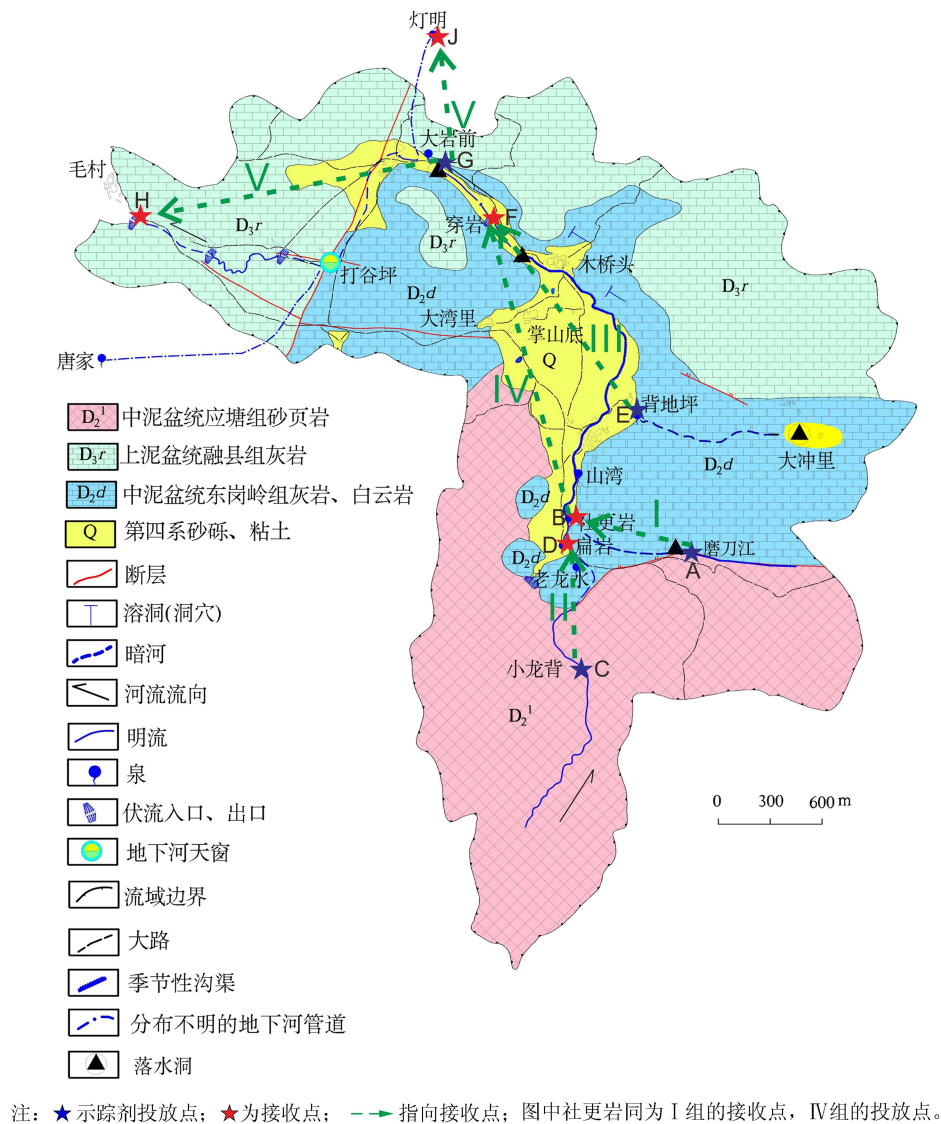


图 1 毛村地下河流域地质背景和旱季示踪分布示意图

Fig. 1 Sketch showing geological background and tracing test distribution in dry seasons at Maocun subterranean river basin

表 1 旱季示踪试验部署情况

Table 1 Tracing test deployment in dry seasons

序号	日期	示踪剂 种类	投放量/ g	投放点	接收点	接收点流量/ $L \cdot s^{-1}$	示踪 结果	备注
I	2015. 1. 30—2. 9	荧光素钠	40	A 磨刀江	B 社更岩	3. 2~7. 6	连通	定量分析
II	2015. 2. 11—2. 18	荧光素钠	35	C 小龙背	D 扁岩	1~7. 5	连通	定量分析
III	2015. 1. 8—1. 15	荧光素钠	50	E 背地坪	F 穿岩	22~54	不连通	定性
IV	2015. 1. 8—1. 15	罗丹明 B	60	G 社更岩	F 穿岩	22~54	连通	定性分析
V	2014. 12. 22—2015. 1. 7	荧光素钠	140	H 大岩前 落水洞	J①毛村出口 K②灯明	72~93 —	连通 不连通	定量分析 定性

表 2 雨季示踪试验部署情况

Table 2 Tracing test deployment in rainy seasons

编号	日期	示踪剂	投放量/ g	投放点	接收点	接收点流量/ $L \cdot s^{-1}$	示踪 结果	备注
I	2014. 8. 22—8. 27	荧光素钠	100	A 磨刀江	B 社更岩	40~86	连通	定量分析
II	2015. 7. 31—8. 2	荧光素钠	80	C 小龙背	D 扁岩	29~35	连通	定量分析
III	2015. 5. 16—5. 17	荧光素钠	500	K 大冲里	E 背地坪	25~300	连通	定量分析
IV	2015. 5. 28—5. 30	罗丹明 B	600	E 背地坪	F 穿岩	237~249	连通	定量分析
V	2015. 5. 29—5. 30	荧光素钠	500	G 社更岩	F 穿岩	237~249	连通	定量分析
VI	2015. 6. 3—6. 4	荧光素钠	700	L 打谷坪	①毛村出口 M②唐家	500~1 300 ——	连通 不连通	定量分析 无
VII	2015. 6. 18—6. 19	荧光素钠	1 500	H 大岩前落水洞	J ①毛村出口 K ②灯明	900~1 050 ——	连通 不连通	定量分析 无

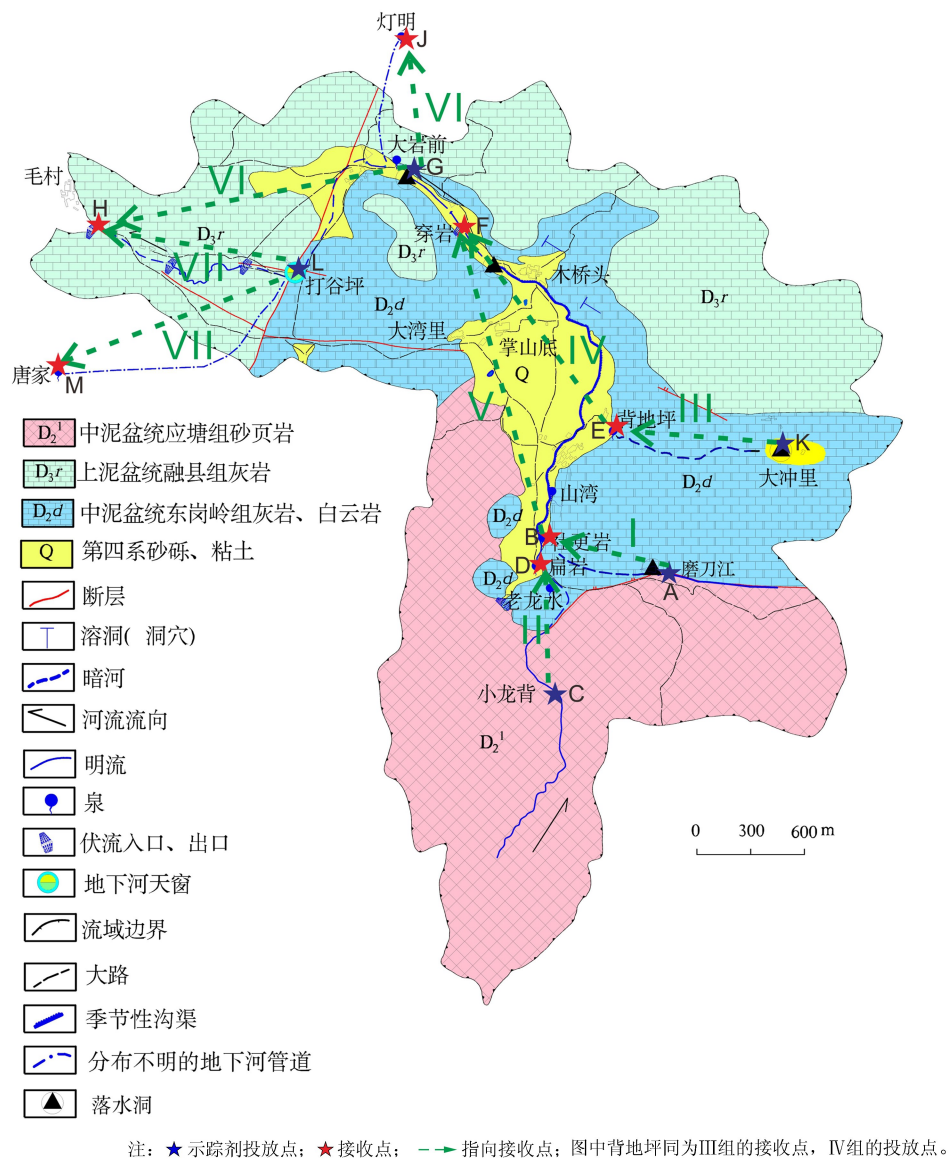


图 2 毛村地下河流域地质背景和雨季示踪分布示意图

Fig. 2 Sketch showing geological background and tracing test distribution in rainy seasons at Maocun subterranean river basin



图 3 野外示踪剂的投放(左)与接收(右)

Fig. 3 Injection (left) and receiving (right) of tracers in the field

2.4 野外自动荧光仪工作原理及特性

在线监测采用 GGUN—FL30 型野外自动荧光仪(瑞士, Albilis 公司), 具有精度高且不易受污染, 自动化程度高, 在线连续监测和试验成本较低等优点(表 3)。由于探头吸收光强与荧光素的浓度成反比, 所以可根据标准函数计算出荧光素的浓度^[21]。

表 3 野外自动荧光仪特性

Table 3 Specifications of automatic fluorometer

项目	参数及说明
可检测示踪剂种类	荧光素钠、罗丹明 B、荧光增白剂
检测下限	$2 \times 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$;
浊度测量	0.02~400 NTU
温度测量	2℃ 以上, 0.01℃ 分辨率
测试间隔	2 秒以上 (1 lamp), 最多 15 min
数据读取	USB 连接电脑在线读取或者存储卡读取
连接方法	探头与数据记录器通过 4 芯的电缆连接, 两头各有一防水的连接头
浸没深度	不锈钢探头为 50 m
仪器重量	不锈钢探头重量为 7.3 kg; 数据记录器重量为 7.2 kg (含两个电池)

2.5 流量监测

在小龙背地表径流、扁岩、社更岩、背地坪和毛村出口等泉点安装 CTD300(澳大利亚, Greenspan 公司)多参数自动记录仪测定水位, 每 15 min 记录一组数据, 利用水位与流量的数学关系计算流量; 其他泉点采用矿用本安型流速测量仪(测量误差: $\pm 5\% \text{ F.S}$)根据流速面积法测流; 每次示踪均只观测接收点的流量, 回收率根据接收点的流量计算。

2.6 估参方法

QTRACER2 以时间矩原理为理论基础, 专门用于对示踪试验所得示踪穿透曲线 BTC 进行计算分析, 可得出示踪剂回收率(P)、平均滞留时间($\bar{T}$)、平均运移速度($\bar{v}$)、地下管道的储水量(V)、地下管道横截面积(A)、地下储水管道平均直径(D_c)、纵向弥散系数(D_L)、佩克莱数(P 或 Pe)和雷诺数(N_R)等水力参数和各种图件^[22]。

3 结果与讨论

3.1 流域上游

3.1.1 磨刀江—社更岩

本次示踪河段地下河管道为单管道型, 不存在地下湖, BTC 曲线存在拖尾现象, 可能是示踪河段地下空间较大, 蕴含的地下水量较多, 将示踪剂浓度稀释, 导致地下河中示踪剂本底值的恢复时间长(图 4)。根据雨季和旱季示踪试验结果, 计算获得磨刀江至社更岩段各水力参数如表 4。

2015 年 1 月 30 日磨刀江流量为 $9.98 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$, 社更岩流量为 $4.2 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$, 投放点的流量远远大于接收点, 推断此段地下管道可能存在其他排泄口。岩溶管道的水力参数主要受雨季和旱季降雨量不同影响, 磨刀江至社更岩段以对流作用为主, 流态是紊流。

3.1.2 大冲里—背地坪

大冲里至背地坪段仅适宜在暴雨过后的退水阶段进行示踪试验。因为只有在降雨后, 通过汇流等作用才有雨水汇集于大冲里洼地, 然后通过大冲里落水洞向下游排泄, 流经岩溶管道, 在背地坪处出露。雨季荧光素钠 BTC 曲线为快升快降趋势, 为典型岩溶管道介质(图 5)。大冲里至背地坪段水力参数厘定结果如表 4 所示。

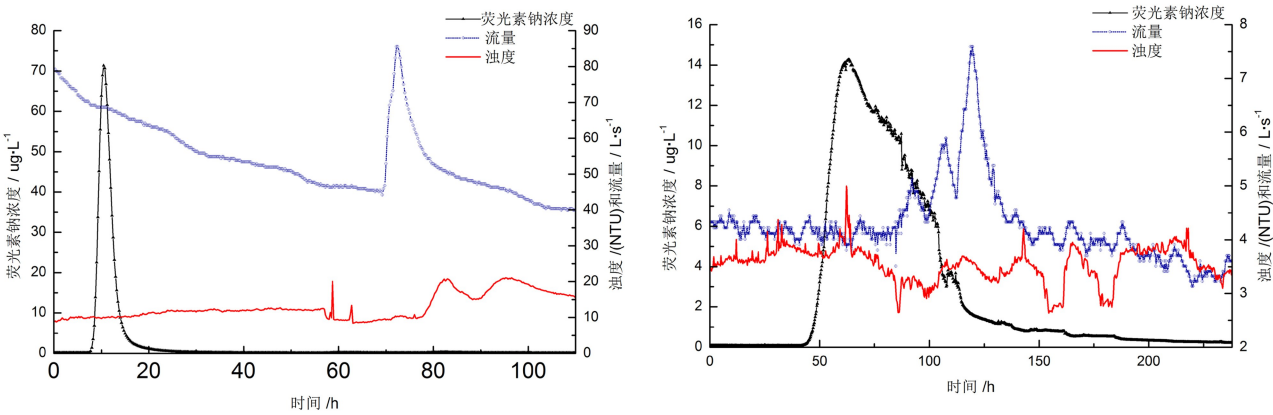


图 4 流域上游:磨刀江—社更岩雨季(左)和旱季(右)示踪穿透曲线

Fig. 4 Upper reach: testing breakthrough curves (BTC) from MDJ to SGY in rainy (left) and dry seasons (right)

表 4 流域各示踪段雨季与旱季相关水力参数

Table 4 Hydraulic parameters of each tracing section in rainy and dry seasons

	示踪河段	季节	$P / \%$	$\overline{T} / \text{h}$	$\overline{V} / \text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	V / m^3	A / m^2	D_C / m	$D_L / \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Pe 数	N_R
上游	磨刀江—社更岩	雨季	58.8	11.6	142.2	3021	1.83	1.53	0.34	193.0	52889
		旱季	26.0	86.1	19.2	1294	0.78	1.00	0.19	46.1	4665
	大冲里—背地坪	雨季	43.5	14.5	95.9	12281	8.80	3.35	0.70	53.0	78229
	小龙背—扁岩	雨季	21.3	23.4	48.0	2710	2.41	1.75	2.15	6.9	20447
		旱季	2.6	76.8	14.6	434	0.39	0.70	0.70	6.6	2501
中游	社更岩—穿岩	雨季	14.3	6.7	395.7	5816	2.17	1.66	1.97	149.0	160270
		旱季	地表河道断流,但接收到示踪剂。主要为溶蚀裂隙流。浓度曲线不规则,存在拖尾								
	背地坪—穿岩	雨季	22.8	5.9	403.0	4989	2.22	1.68	2.44	103.0	165010
		旱季	地表河道断流,未接收到示踪剂								
下游	大岩前落水洞—毛村出口	雨季	68.3	13.7	229	52338	16.6	4.60	1.56	128	256790
		旱季	33.0	198	18.2	17218	4.78	2.47	0.29	63.1	10950
	打谷坪天窗—毛村出口	雨季	84.3	7.70	114	15991	18.22	4.82	1.21	22.9	133790

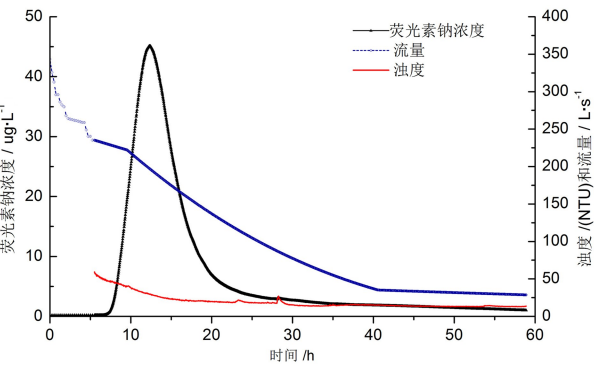


图 5 流域上游:大冲里—背地坪雨季 BTC

Fig. 5 Upper reach: testing BTC from DCL to BDP in rainy seasons

3.1.3 小龙背—扁岩

小龙背为非岩溶水,为毛村地下河系统的一个外源补给,小龙背水流经岩溶管道和地表明流交替汇入扁岩。总体从雨季和旱季 BTC 曲线上来分析,与磨刀江—社更岩曲线特点相似,为单一管道流(图 6),其水力参数厘定结果如表 4。

3.2 流域中游

3.2.1 社更岩—穿岩

在雨季社更岩至穿岩段以地表河流为主,在木桥头附近存在落水洞,明暗流相间。雨季荧光素纳 BTC 曲线呈标准的单峰曲线,快升快降,说明示踪剂的回收主要是通过地表明流补给。在旱季社更岩流量很小,经过几百米后地表河断流。从旱季罗丹明 B

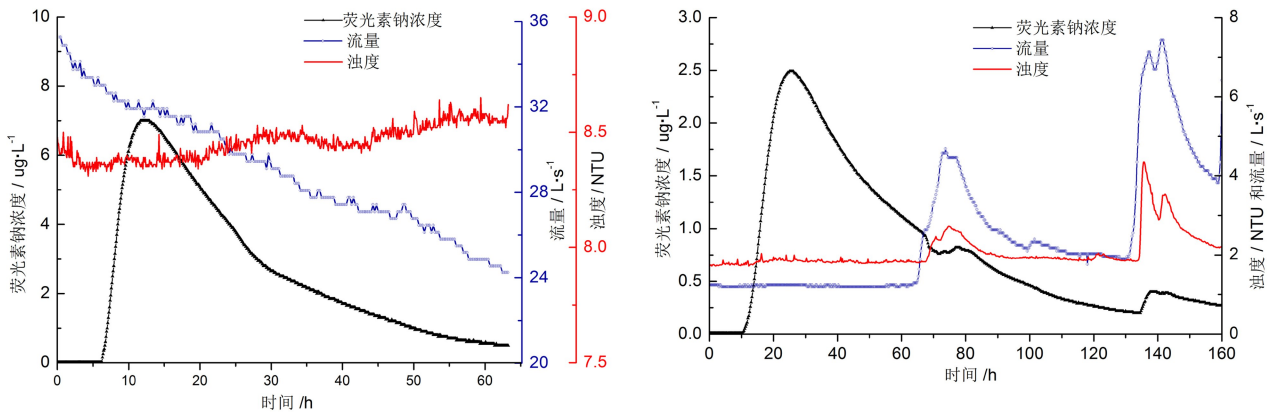


图6 流域上游:小龙背—扁岩雨季(左)和旱季(右)BTC

Fig. 6 Upper reach: testing breakthrough curves (BTC) from XLB to BY in rainy (left) and dry seasons (right)

的BTC曲线上来分析,罗丹明B浓度上下波动,为不规则多峰值曲线(图7)。说明旱季此段为溶蚀裂隙流,存在裂隙分岔水流,流速缓慢,严重拖尾,无明显的优先流。土壤吸附和截留损失大,估计回收率低于百分之十,回收效果差。

根据2015年1月8日流量对比研究,社更岩流量为 $6.29 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$,穿岩流量为 $22.15 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$,投放点流量小于接收点,表示接收点地下水补给来源范围更广,除社更岩作为部分补给来源外,还有周围山上的地下水通过溶蚀裂隙补给。

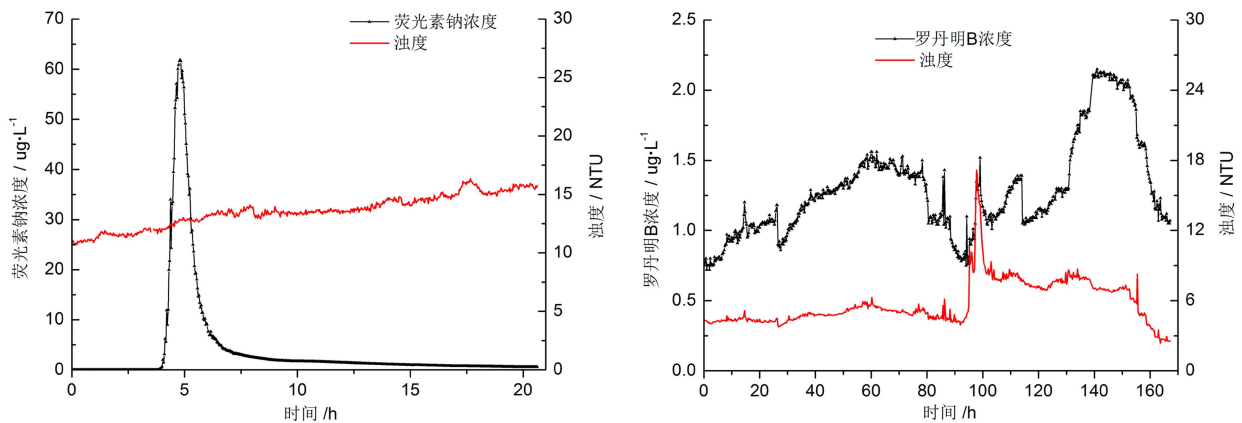


图7 流域中游:社更岩—穿岩雨季(左)和旱季(右)BTC

Fig. 7 Middle reach: testing breakthrough curves (BTC) from SGY to CY in rainy (left) and dry seasons (right)

3.2.2 背地坪—穿岩

在雨季,背地坪至穿岩段主要以地表河流为主,与社更岩至穿岩段特征相似(图8)。在旱季背地坪流量小,地表河道断流。接收点穿岩未接收到荧光素钠,因此判定不存在明显的管道流,地下水主要赋存于溶蚀裂隙。

3.3 流域下游

3.3.1 大岩前落水洞—毛村出口

分析雨季BTC曲线可知(图9),荧光素钠浓度为单峰、尖峰,说明大岩前落水洞至毛村出口段管道相对单一,无较大分叉口。分析旱季BTC曲线可知,荧光素钠浓度陡升陡降,在下降过程中存在多个小峰波动,原因可能有:(1)受降雨影响,浊度的变化影响

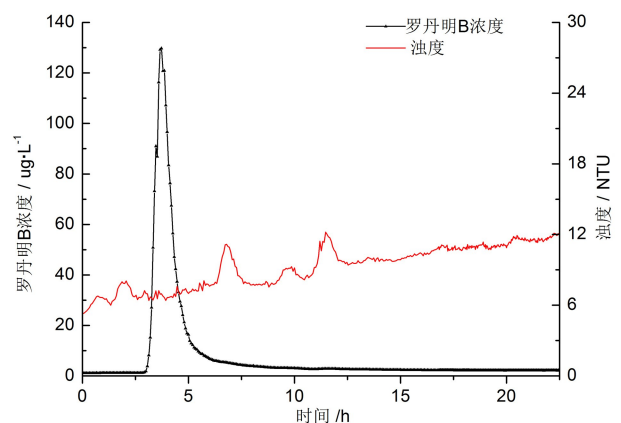


图8 流域中游:背地坪—穿岩雨季BTC

Fig. 8 Middle reach: testing breakthrough curve(BTC) from BDP to CY in rainy seasons

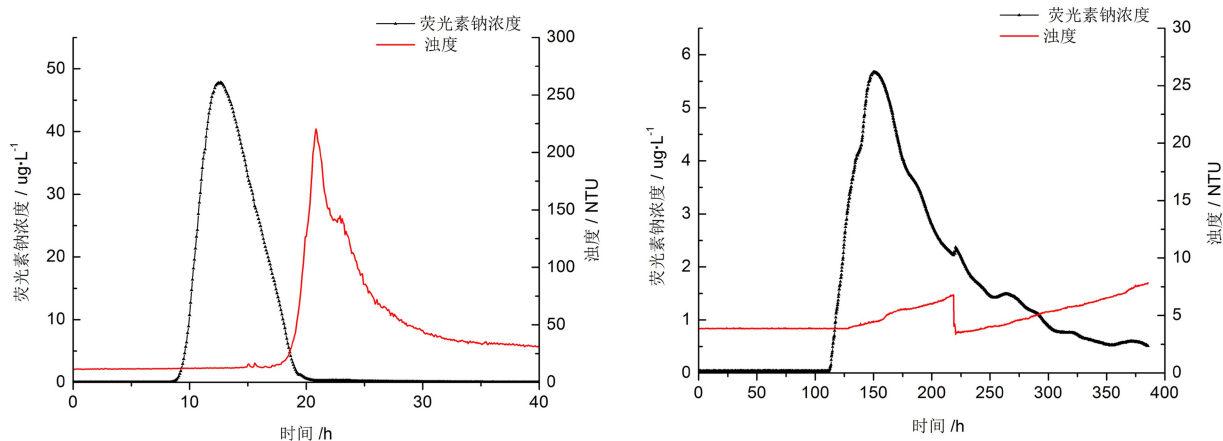


图 9 流域下游:大岩前一毛村雨季(左)和旱季(右)BTC

Fig. 9 Lower reach: testing breakthrough curves (BTC) from DYQ to MC in rainy (left) and dry seasons (right)

水中荧光素钠的测定,使得测值偏大,影响波峰形状。(2)旱季由于投放量较小,示踪剂浓度偏小,因此其曲线升降变化更加灵敏。(3)在雨季水位较高,流量大,为单一通道。旱季峰形仍显示为较单一管道,但水位低于一定程度,管道内可能存在较小的多个分叉。

3.3.2 打谷坪天窗—毛村出口

分析雨季 BTC 曲线可知,荧光素钠浓度呈快升快降态势(图 10)。在降低阶段,BTC 曲线出现小的波动,但总趋势为单峰。说明此段管道相对单一,存在较小水流分叉,水力联系密切。

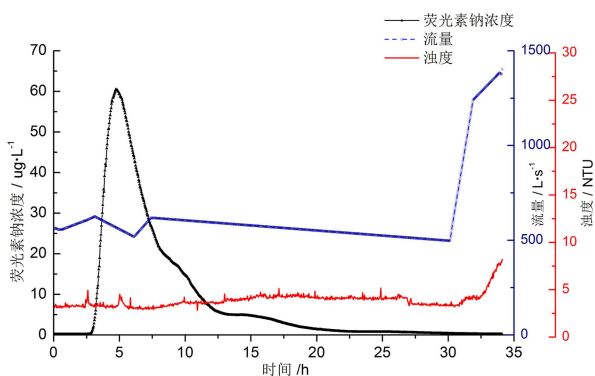


图 10 流域下游:打谷坪天窗—毛村出口雨季 BTC

Fig. 10 Lower reach: testing breakthrough curve (BTC) from DGP to MC in rainy season

3.4 讨 论

研究区地下河网在空间呈枝状分布,明暗流交替共存。系统内大部分的地下水主要赋存于灰岩的岩

溶管道和溶蚀裂隙中,并于流域下游表现出向大岩前落水洞至毛村出口岩溶管道集中汇流的现象。根据示踪结果,可将毛村地下河系统划分为 3 个子系统。

I 社更岩、扁岩地下河系统:该子系统水主要来自中泥盆统应塘组砂页岩的非岩溶区,位于毛村地下河流域上游。该地下水排出地下河出口后在地表形成沿南北方向流向山湾泉的地表径流,沿途汇集了部分地下水的补给。

II 大冲里—背地坪系统:该段地下河为东西走向,位于地下河上游,地下水主要通过大冲里的岩溶洼地汇集降雨,进入落水洞后流至背地坪。

III 大岩前落水洞—毛村出口系统:该系统位于地下河下游,主要汇集了中上游地表河中的水,由大岩前落水洞流入,进入地下河系统,明流暗流交替存在,最后由毛村地下河出口流出地表。

三个地下河子系统中,其 BTC 曲线大体为陡升陡降的尖峰,且管道相对单一,无较大岔道和溶潭发育。通过雨季和旱季水力参数对比,可知各段地下河流态一般是以对流作用为主的紊流;雨季流速、流量较大,平均运移时间短,示踪剂回收率高于旱季,地下管道的储水量、横截面积和管道平均直径等均是旱季的 2~10 倍。由于雨季降雨量大,一部分雨水通过季节性地表河排泄,旱季断流。因此在建立水量模型时可以把雨季管道认为是全充水型,旱季是半充水或不充水型,体现了精细刻画流域含水介质特征及建立水量模型时雨季和旱季示踪实验的必要性。

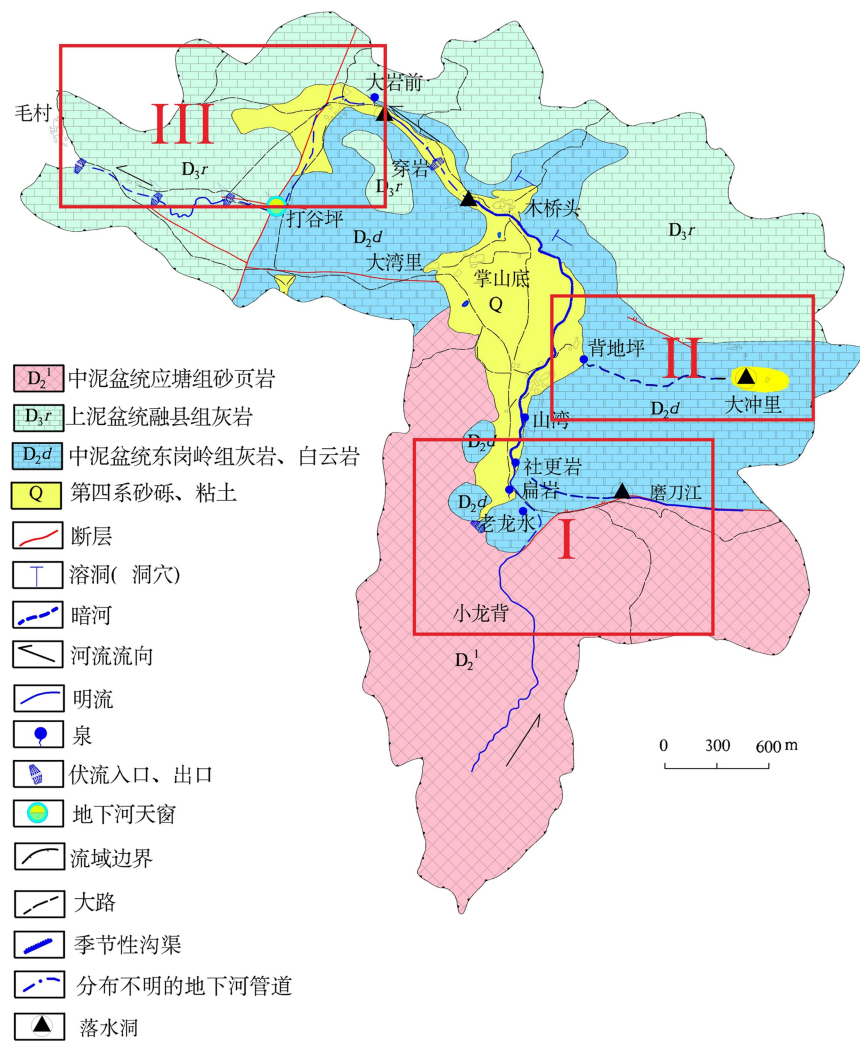


图 11 毛村流域三大子地下河系统划分

注：I—社更岩、扁岩系统 II—大冲里—背地坪系统 III—大岩前落水洞—毛村出口系统

Fig. 11 Division of three subsystems of Maocun subterranean river

下游岩溶管道发育程度大于上游,管道储水量和直径等比上游管道大。通过对社更岩至穿岩和背地坪至穿岩的示踪研究表明,毛村地下河流域中游地下水主要赋存于溶蚀裂隙,无管道发育。北部及西北部的灯明及唐家雨季和旱季均未收到示踪剂信号,表明并无地下水沿断层排泄现象,边界划分正确。

本研究示踪实验示踪剂的回收率变化较大,为 2.6%~84.3%,其中 7 次低于 50%,3 次高于 50%。有以下三个因素导致示踪剂的回收率低:①示踪剂见光分解。示踪剂荧光素钠性质相对稳定,但见光容易分解。小龙背—扁岩为单一管道流,需经过一段明流后渗入地下进入岩溶区,雨季的回收率仅为 21.3%。

社更岩—穿岩、背地坪—穿岩段雨季主要以地表河流为主,示踪剂沿途分解,雨季回收率分别仅为 14.3%, 22.8%。②土壤吸附和截留损失大。大冲里—背地坪段为典型岩溶管道介质,仅在暴雨过后的退水阶段有雨水汇集于大冲里洼地,暴雨过程将携带较多土壤和泥沙沉积于岩溶管道内,回收率 43.5%。社更岩—穿岩段旱季为溶蚀裂隙流,地表断流,示踪剂沿溶蚀裂隙流动,溶蚀裂隙中富存土壤,回收率低于百分之十。③存在其他排泄口。磨刀江—社更岩段地下河管道为单管道型,投放点的流量远远大于接收点,地下管道存在其他排泄口,雨季和旱季的回收率分别为 58.8%和 26%。因此为达到最佳效果,应尽量选择

地下河入口、天窗等见光少的位置投放示踪剂,同时为减少土壤吸附与截留,应近距离分段进行示踪实验。

4 结 论

(1)研究区地下河网在空间呈树状分布,明流暗流交替共存。系统内大部分的地下水主要赋存于灰岩的岩溶管道和溶蚀裂隙中,并于流域下游表现出向大岩前落水洞至毛村出口岩溶管道集中汇流的趋势。

(2)毛村地下河系统主要发育于流域上游和下游,可划分社更岩、扁岩地下河系统,大冲里一背地坪系统和大岩前落水洞—毛村出口系统。各子地下河系统内地下河水动力作用以对流作用为主,一般为紊流流态;雨季流速快、流量大,平均运移时间短,示踪剂回收率高。流域中游背地坪—穿岩和社更岩—穿岩含水介质相对均匀,无明显管道发育,地下水主要赋存于溶蚀裂隙。

(3)基于在线监测的雨季与旱季示踪试验对比分析,对于刻画整个流域内不同水动力条件下的岩溶地下含水介质特征具有重要意义,在西南岩溶地区具有推广和应用价值。

参考文献

- [1] Tóth J. Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations[J]. *Hydrogeology journal*, 1999, 7(1): 1-14.
- [2] 郭纯青,刘景兰,王洪涛,等. 中国南方岩溶地下河系形成演变的链式规律[J]. *地球科学进展*, 2004, (S1): 161-164.
- [3] 郭平战. 韩城矿区岩溶形成机理及其水文地质特征[J]. *地下水*, 2015(5): 54-57.
- [4] 杨勇. 后寨河流域岩溶含水介质结构与地下径流研究[J]. *中国岩溶*, 2001, 20(1): 17-20.
- [5] 袁道先. 岩溶地区的地质环境和水文生态问题[J]. *南方国土资源*, 2003, (1): 22-25.
- [6] Goldscheider N, Meiman J, Pronk M, et al. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology[J]. *International Journal of Speleology*, 2008, 37(1): 27-40.
- [7] Gouzie D, Berglund J, Mickus K L. The application of quantitative fluorescent dye tracing to evaluate karst hydrogeologic response to varying recharge conditions in an urban area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(4): 3099-3111.
- [8] 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.
- [9] 邹成杰. 岩溶管道水汇流理论研究[J]. *中国岩溶*, 1992, 11(2): 119-130.
- [10] 陈余道,程亚平,王恒,等. 岩溶地下河管道流和管道结构及参数的定量示踪:以桂林寨底地下河为例[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(5): 11-15.
- [11] 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.
- [12] 何师意,章程,汪进良,等. 高精度地下水示踪技术及其应用:以毛村地下河流域为例[J]. *地球学报*, 2009, 30(5): 673-678.
- [13] 王恒,陈余道. 广西桂林寨底地下河示踪研究[J]. *广东地质*, 2013, (1): 183-187.
- [14] 孙继朝,贾秀梅,刘满杰,等. 地下水示踪技术在水库渗漏勘察中的应用[J]. *现代地质*, 2009, 23(1): 144-149.
- [15] 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源及含水介质特征分析:以重庆黔江区鱼泉坎为例[J]. *中国岩溶*, 2014, 33(4): 498-503.
- [16] 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]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 1979, (4): 46-51.
- [17] 张祯武. 岩溶地下水管流场类型与示踪曲线对应关系的研究[J]. *工程勘察*, 1991, (1): 32-37.
- [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] 易连兴,卢海平,赵良杰,等. 鱼泉地下河示踪试验及回收强度法管道结构分析[J]. *工程勘察*, 2015, 43(2): 46-51.
- [20] 李亮. 潮田河流域(岩溶)地质碳汇过程及通量估算研究[D]. 中国地质科学院, 2013.
- [21] Lemke D, Schnegg P A, Schwientek M, et al. On-line fluorometry of multiple reactive and conservative tracers in streams[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69(2): 349-358.
- [22] Field M S. The QTRACER2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems[M]. National Center for Environmental Assessment: Washington Office, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2002.

A quantitative analysis of tracing tests for the Maocun subterranean river basin of Guilin during rainy and dry seasons

HUANG Fen^{1,3}, YIN Weilu^{1,2,3}, Xiaonong HU^{1,2,3}, CAO Jianhua^{1,3}

(1. *Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China*

2. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;*

3. *International Research Centre on Karst, UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China*)

Abstract This paper selected the typical underground river basin in Maocun village of Guilin, Guangxi for quantitative tracer tests in rainy and dry seasons based on online high-resolution monitoring to depict fine characteristics of groundwater aqueous media. According to the tracer test results and groundwater runoff and distribution characteristics, the Maocun underground river system is divided into Shengengyan and Bianyan underground river, Dachongli-Beidiping sub-system and Dayanqian sinkholes-Maocun outlet sub-system, which are distributed in upstream and downstream of the Maocun basin, respectively. The experimental tracer study shows that the breakthrough curves (BTC) are featured by steep upward and steep drop pinnales, which suggest that the conduits are relatively simple, and have no large turnouts and karst tams developed. Each section of the underground river is generally turbulence which is dominated by convection; the flow velocity and flux in rainy seasons are larger, the average travel time is shorter, and the tracer recovery rates are higher than in dry seasons. The aqueous medium in the middle region is relatively uniform, and has no conduit developed. Groundwater is mainly stored in karst cracks.

Key words karst subterranean river, tracing test, conduit texture, hydraulic parameter, Guilin Maocun

(编辑 吴华英)