

岩溶地下河浊度来源及对示踪试验影响的定量分析

赵良杰^{1, 2)}, 夏日元¹⁾, 易连兴¹⁾, 杨杨^{1, 2)}, 王喆^{1, 2)}, 卢海平^{1, 2)}

1)中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004;

2)国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004

摘要: 定量示踪技术是分析岩溶含水层水力特征和岩溶水系统结构的重要手段, 地下河浊度是制约定量示踪试验精确性的关键因素。针对西南典型岩溶地下河, 以三次不同水动力条件下示踪试验为研究对象, 通过对比分析浊度、流量及示踪剂浓度变化探讨浊度来源及其对示踪剂和管道参数的影响。试验过程中, 确定存在上、下临界流量使水流从层流过渡为紊流状态, 浊度主要来源从管道内部再悬浮颗粒过渡为外源悬浮物, 计算上、下临界流量分别为 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。通过浊度与示踪剂的相关关系研究浊度对示踪剂的影响, 结果表明当浊度大于 25 时, 浊度与示踪剂浓度呈负相关关系, 且浊度越大, 对示踪剂的影响越大。最后通过对比确定, 第一次示踪试验浊度影响较小, 并估算了岩溶管道参数, 为进一步水资源评价提供基础。

关键词: 定量示踪试验; 地下河浊度; 示踪剂; 岩溶管道

中图分类号: P641.134; P641.74 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2016.02.12

Quantitative Analysis of the Source and the Effect of Turbidity in Karst River on Tracer Test

ZHAO Liang-jie^{1, 2)}, XIA Ri-yuan¹⁾, YI Lian-xing¹⁾, YANG Yang^{1, 2)}, WANG Zhe^{1, 2)}, LU Hai-ping^{1, 2)}

1) Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004;

2) Karst Dynamics Laboratory of Ministry of Land Resources, Guilin, Guangxi 541004

Abstract: The quantitative tracer technique is an important method for analysis of geometrical and hydraulic characteristics of karst aquifer. Turbidity is the key factor for accuracy of tracer test although its source and relationship to tracers remain unclear. Three tracer tests under different hydrodynamic conditions were conducted for typical southwest karst underground rivers. Actual measurement data on turbidity, discharge and tracer concentration were analyzed to discuss the source and the effect of turbidity on tracers. During the test, the upper and lower critical discharge was proved to be existent, which caused the gradual transition from the laminar to turbulence and the transition of the main source of turbidity from resuspended origin to allochthonous origin. The values of upper and lower critical discharge were inferred to be 0.7 and $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$, respectively. The result shows that there is a negative correlation between turbidity and tracer concentration when the value of turbidity is greater than 25. With the increasing turbidity, the impact on the tracer concentration becomes greater. Finally, the karst conduit parameters were estimated by the first test which was relatively insignificantly influenced by the turbidity. The results achieved by the authors provide the basis for further water resource evaluation.

Key words: quantitative tracer test; underground river turbidity; tracer; karst conduit

岩溶含水介质由高渗透性管道和低渗透性基岩裂隙构成, 导致物质能量交换多集中于岩溶管道内

(Morales et al., 2010)。传统的数值模拟技术和地下水水流方程不能精确刻画管道中的非达西流

本文由国土资源部公益性行业专项(编号: 201411100)和中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212011220959)联合资助。

收稿日期: 2015-05-05; 改回日期: 2015-10-21。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 赵良杰, 男, 1986 年生。研究实习员。主要从事岩溶地下水水资源评价研究。通讯地址: 541004, 广西桂林七星路 50 号。

E-mail: zhaoliangjie@karst.ac.cn。

(Ghasemizadeh et al., 2012), 而定量示踪技术能够提供管道内溶质运移和含水层水文地质参数信息, 是进行岩溶区水资源评价的重要途径和方法(Perrin et al., 2008; 陈余道等, 2013; Lauber et al., 2014)。Field(2002)开发 QTRACER2 程序用于分析岩溶含水层示踪试验穿透曲线, Goldscheider(2005)利用多元示踪试验推断非均质地质结构对岩溶排泄和补给过程的影响, Ruffino(2015)通过数值模型拟合示踪剂穿透曲线描述了水流的动力特征。鲁程鹏等人(2009)基于示踪技术估算了岩溶含水层渗透系数和天然径流量。然而, 在应用示踪技术过程中, 地下河浊度的大小制约了对含水层结构特征和岩溶水文地质参数推求的准确性(Nebbache et al., 2001; 汪进良等, 2005; Fournier et al., 2007)。通常在线示踪技术选取荧光素钠和罗丹明 B 为示踪剂(杨平恒等, 2008), 浊度是影响两种示踪剂浓度的关键因素, 尤其在单次降雨过程后, 地下河浊度变化较大, 浊度相对示踪剂浓度影响较大。本次研究选取不同浊度条件下多组示踪试验为研究对象, 通过对比浊度、流量和示踪剂浓度定量分析地下河浊度来源及其对示踪剂浓度的影响, 并结合 QTRACER2 程序计算研究区水文地质参数, 为该区水资源评价和建立数值模型提供科学基础。

寨底地下河流域位于桂林市东部灵川县境内, 坐标为 $110^{\circ}31'25.71''$ — $110^{\circ}37'30''$ E 和 $25^{\circ}13'26.08''$ — $25^{\circ}18'58.04''$ N 之间, 是西南典型岩溶流域之一。流域面积约 31.05 km^2 , 多年平均降水量为 1601.1 mm , 年平均气温为 17.5°C 。地表溪沟和地下

管道非常发育, 大部分区域属于峰丛洼地, 地形高程 $260\sim820\text{ m}$ 。根据含水介质特征, 寨底地下河系统包括孔隙水、裂隙水和岩溶水。系统内岩溶区面积 32.5 km^2 , 其中碎屑岩区面积 3.53 km^2 。汇水区域所包围的东村组(D_{3d})、桂林组(D_{3g})、塘家湾组(D_{2t})等岩溶区岩性为灰岩、白云质灰岩或白云岩, 其间未发现有一定厚度的隔水岩层或相对隔水层, 构成一个岩溶含水系统, 寨底地下河出口 G047 为唯一总排泄口(图 1)(易连兴等, 2012)。

1 试验方法

本次示踪试验点选取流域内南部区域, 投放点位于响水岩(G037)天窗, 接收点位于寨底(G047)地下河出口, 该地下河段为长度约 2 km 的岩溶管道。本次试验选取荧光素钠和罗丹明 B 做为示踪剂, 其中荧光素钠($\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{Na}_2\text{O}_5$)分子量为 376.27 , 水溶液呈绿色, 带极强的黄绿荧光, 20°C 水溶解性 500 g/L , 含量不少于 90% ; 罗丹明 B($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$)分子量为 479.01 , 水溶液呈蓝红色, 稀释后有强烈荧光, 纯度规格为分析纯。试验过程中将示踪剂溶解于 20 L 的塑料桶中, 充分搅拌后一次性投入响水岩天窗内, 示踪剂使用量通过充分考虑出口流量大小、径流距离和估计所需时间等因素, 同时考虑对水体污染和人畜用水安全等最终确定。试验采用 GGUN-FL24 野外荧光计在寨底地下河出口自动监测溶液浓度和浊度变化, 每 15 分钟记录一次数据; 使用 Mini-diver 地下水位自动监测仪监测响水岩和寨底的水位、水温变化情况, 每 1 小时记录一次数据。在寨底地下河出口处设立矩形薄壁型, 通过水位变化计算流量过程曲线。为阐明浊度对示踪剂的影响, 本次研究选取三次示踪试验进行定量分析。表 1 为三次示踪试验基本信息。浊度变化情况和地下河出口浓度回收曲线见图 2。

2 结果分析讨论

2.1 地下河浊度来源分析

探讨岩溶地下河浊度与流量的关系是分析岩溶水动力特征和溶质运移特性的重要手段。通常在一次降雨过程后, 岩溶区地下河浊度主要来源于两种悬浮颗粒物, 即外源和内源。外源是指地表的土壤、大气粉尘等随地表径流进入地下河而直接运移至出口的外源悬浮物(包括微生物), 内源是指沉积于岩溶管道内部, 随本次降雨重新进入地下河而形成的再悬浮颗粒物(Peterson et al., 2003; 杨平恒等, 2012)。当地下河出口流量较小时, 管道内水流呈层流状态, 浊度主要来源于管道内部的再悬浮颗粒物; 反之流量较大时, 管道内水流呈紊流状态, 浊度主

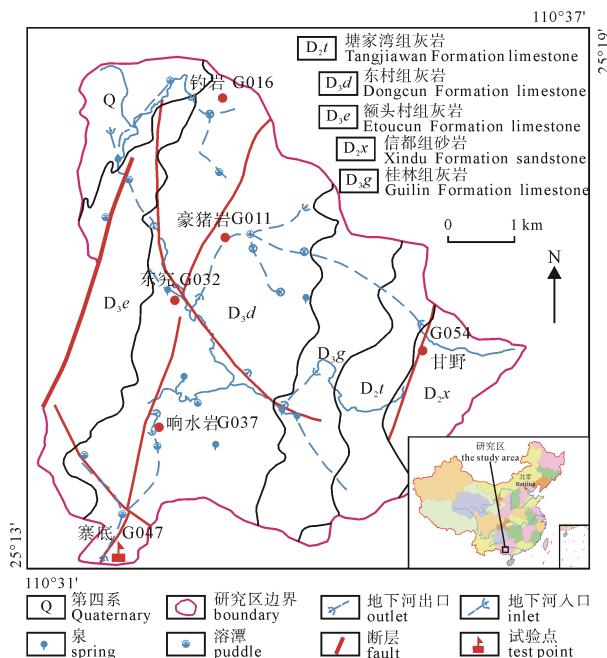


Fig. 1 Schematic diagram of tracer test area
Fig. 1 示踪试验区示意图

表 1 响水岩—寨底示踪试验
Table 1 Tracer tests of Xiangshuiyan-Zhaidi area

示踪试验	投放时间	示踪剂	投放质量/g	初见浓度历时/h	穿透曲线历时/h	监测频率
第一次	2014.08.12 11:00	荧光素钠 (Uranine)	500	89.5	80	
第二次	2015.01.09 10:50	荧光素钠 (Uranine)	500	76.2	10	15 次/min
	2015.01.09 13:00	罗丹明 B (Rhodamine B)	1500	无	无	
第三次	2015.02.03 13:40	荧光素钠 (Uranine)	1000	154.8	207	
	2015.02.03 14:00	罗丹明 B (Rhodamine B)	3000	96.2	261.7	

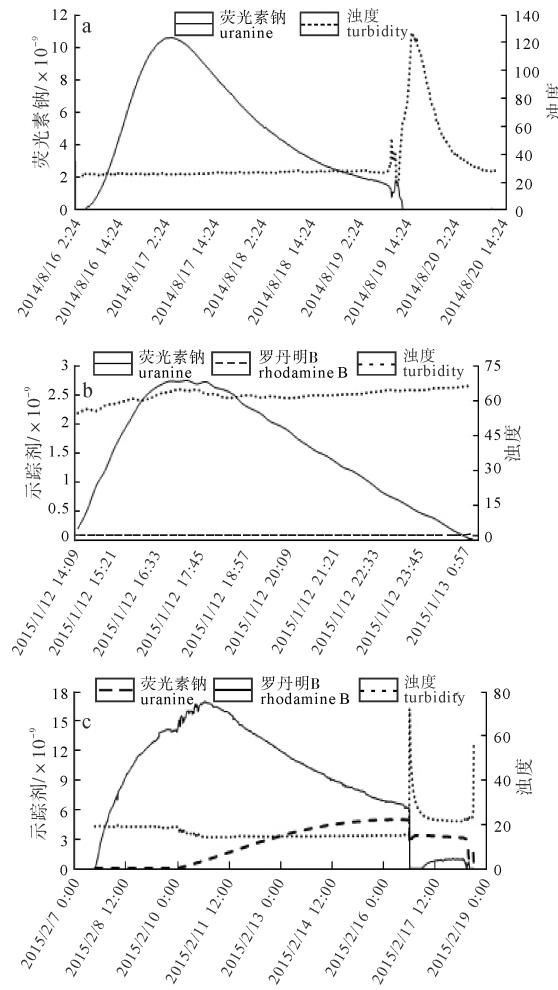


图 2 示踪剂浓度及浊度变化
Fig. 2 The change curve of tracers and turbidity

要来源于外源悬浮物(Valdes et al., 2006)。因此通过分析地下河浊度与流量的相关关系推断临界流量使水流从层流过渡为紊流状态, 可判断浊度的来源。图 3 表示三次完整降雨过程后浊度与流量曲线变化。图 3a 表示一次强降雨过后, 流量较大时浊度变化情况, 图 3b 表示一次弱降雨过后, 流量较小时浊度变化情况, 图 3c 表示多次连续降雨过后, 流量波动较大时浊度变化情况。从图中可以看出, 当流量较大时, 地下河浊度与流量相关度较高, 相反, 流量较小时相关度较差。因此存在上临界流量 Q_{\max} , 满足 $Q > Q_{\max}$ 时水流属于紊流状态, 浊度与流量相关性较高, 主要来源于外源悬浮物; 存在下临界流量 Q_{\min} , 满足 $Q < Q_{\min}$ 时水流属于层流状态, 浊度与流量相关性较低, 主要来源于内部再悬浮物。通

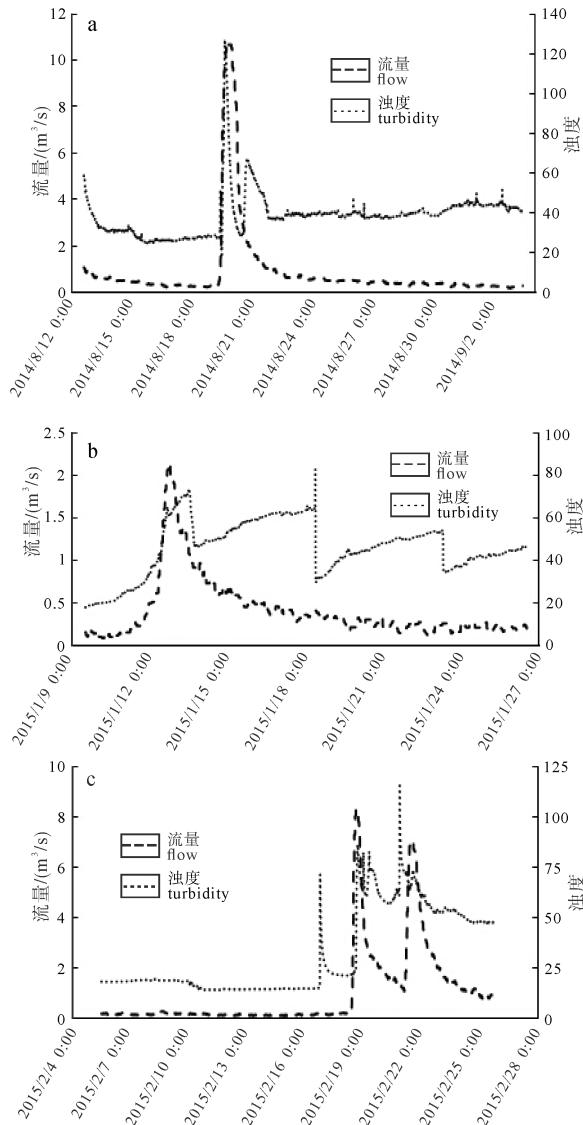


图 3 浊度及流量变化曲线
Fig. 3 The change curve of flow and turbidity

过不断调整 Q_{\max} 、 Q_{\min} , 比较浊度与流量相关度, 确定临界流量状态。图 4 表示不同临界流量状态下浊度与流量相关系数曲线变化。

从图 4a 中可以看出上、下临界流量曲线拐点都出现在 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 处, 因此确定 $Q_{\max}=Q_{\min}=0.4 \text{ m}^3/\text{s}$; 图 4b 中显示上临界流量曲线拐点出现在 $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 处, 下临界流量曲线拐点出现在 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 处, 因此确定 $Q_{\max}=0.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\min}=0.4 \text{ m}^3/\text{s}$; 图 4c 中显示相关系数曲线在 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 处有突变, 中间较为平缓。通过以上分析推测当流量小于 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 水

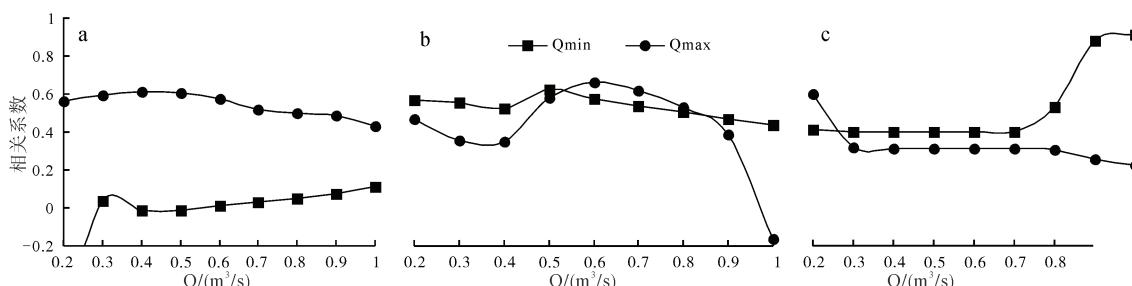


图 4 不同临界流量状态下浊度与流量相关系数曲线变化
Fig. 4 The change curve of correlation coefficients for flow and turbidity under the condition of different critical discharges

表 2 示踪试验浊度突变处示踪剂变化表
Table 2 The change curve of tracer in the mutations of turbidity

第一次示踪试验(图 2a)			第三次示踪试验(图 2c)			
日期	荧光素钠	浊度	日期	荧光素钠	罗丹明 B	浊度
2014/8/19 8:15	1.59	27.75	2015/2/16 17:30	5	6.24	15.46
2014/8/19 8:30	1.57	27.83	2015/2/16 17:45	5	6.22	15.43
2014/8/19 8:45	1.53	28.35	2015/2/16 18:00	5.01	6.23	15.43
2014/8/19 9:00	1.5	28.86	2015/2/16 18:15	4.97	5.16	16.58
2014/8/19 9:15	1.37	31.91	2015/2/16 18:30	2.43	0	71.32
2014/8/19 9:30	1.34	31.25	2015/2/16 18:45	2.52	0	65.19
2014/8/19 9:45	0.78	51.97	2015/2/16 19:00	2.7	0	55.94
2014/8/19 10:00	1.11	38.07	2015/2/16 19:15	2.81	0	50.48
2014/8/19 10:15	1.06	41.39	2015/2/16 19:30	2.97	0	45.78
2014/8/19 10:30	1.2	36.95	2015/2/16 19:45	2.98	0	45.15
2014/8/19 10:45	1.82	40.22	2015/2/16 20:00	3.06	0	42.27
2014/8/19 11:00	1.71	18.29	2015/2/16 20:15	3.13	0	40.41
2014/8/19 11:15	1.73	17.57	2015/2/16 20:30	3.16	0	38.84
2014/8/19 11:30	1.41	20.82	2015/2/16 20:45	3.23	0	37.07
2014/8/19 11:45	0.9	32.54	2015/2/16 21:00	3.26	0	35.55
2014/8/19 12:00	0.68	45.01	2015/2/16 21:15	3.27	0	34.52
2014/8/19 12:15	0.61	53.81	2015/2/16 21:30	3.29	0	33.71
2014/8/19 12:30	0.12	62.82	2015/2/16 21:45	3.31	0	32.93
2014/8/19 12:45	0	64.06	2015/2/16 22:00	3.34	0	32.19

表 3 QTRACER2 程序参数估算表
Table 3 The parameter estimation by QTRACER2 program

管道参数	平均流速/(m/d)	弥散系数/(m²/s)	纵向弥散度/m	管道体积/m³	管道直径/m	回收率	Peclet 数
估算值	574.32	0.1	15.0	177550	8.7	64.6%	200.45

流属于层流运动，浊度主要来源于管道内部再悬浮颗粒；当流量大于 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，水流属于紊流运动，浊度主要来源于外源悬浮物。因此从图 2、图 3 可以看出第一次示踪试验示踪剂回收时间自 2014 年 8 月 16 日至 19 日流量较小，浊度主要来源于内部再悬浮颗粒；第二次 2015 年 1 月 12 日至 13 日及第三次 2015 年 2 月 7 日至 19 日流量较大，浊度主要来源于外源悬浮物。但因不同地下河系统管道大小和结构差异，可能导致临界流量的不同，有待进一步论证。

2.2 浊度对示踪剂影响的定量分析

示踪剂是由含有荧光物质的分子吸收激发光而具有荧光特性，而地下河浊度对激发光具有散射

作用从而降低荧光强度(李晋生等, 1987)。图 2 表示地下河浊度和示踪剂浓度曲线，图 2a、c 中可以看出浊度突变增大处，示踪剂浓度急剧下降，当浊度较平稳时，示踪剂浓度呈现连续变化。图 2b 由于浊度较大，荧光素钠回收浓度较低，且罗丹明 B 接收浓度为 0。为明确浊度对示踪剂的影响，将图 2a、c 中突变处列于表 2。计算相关系数可知，第一次示踪试验浊度和荧光素钠相关系数为 -0.89 ，第三次示踪试验浊度和荧光素钠相关系数为 -0.91 ，当浊度从 16.58 增至 71.32 ，罗丹明 B 从 5.16×10^{-9} 降至 0，可见浊度与示踪剂呈负相关关系，其中详细变化见图 5、6。

第二次示踪试验由于示踪剂浓度回收时浊度

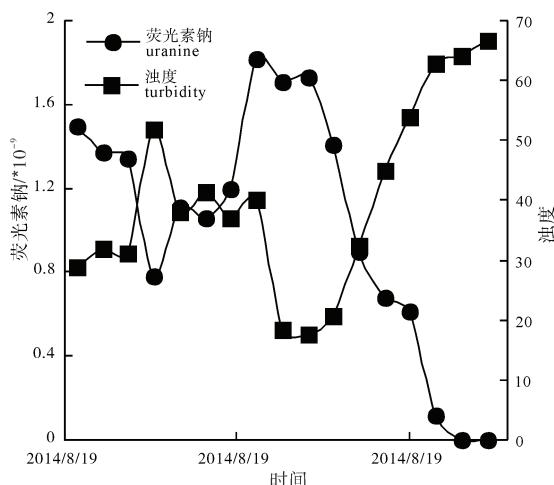


图 5 第一次试验突变处浊度与示踪剂变化
Fig. 5 The change curve of tracer and turbidity in the mutations of turbidity for the first test

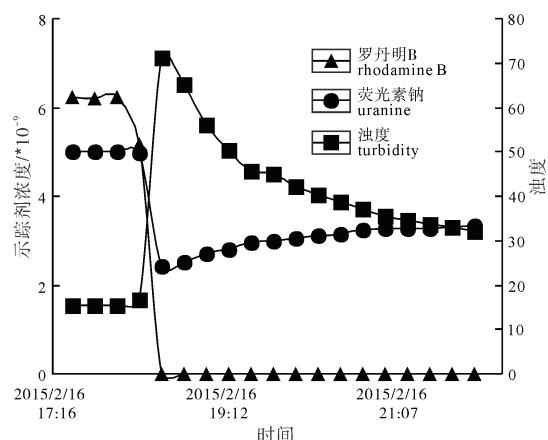


图 6 第三次试验突变处浊度与示踪剂变化
Fig. 6 The change curve of tracer and turbidity in the mutations of turbidity for the third test

都大于 60(图 2b), 因此荧光素钠回收浓度较小, 且罗丹明 B 未接收到。由于第一次示踪试验浊度较小, 对荧光素钠回收浓度影响较小, 对比第一次和第二次荧光素钠回收率(式 1), 从而明确浊度对荧光素钠的影响(何师意等, 2009; Mudarra et al., 2014)。

$$m = \sum_{i=1}^n c_i q_i t \quad (1)$$

其中 m 表示回收量(g); i 表示回收次数; c_i 表示第 i 次回收浓度($\times 10^{-6}$); q_i 表示第 i 次流量(L^3/s); t 表示间隔时间(s)。利用式(1)计算三次荧光素钠回收率分别为 64.6%、20.6%、37.1%, 第二次、第三次罗丹明 B 回收浓度分别为 0、28.5%, 可见第二次试验浊度对示踪剂影响较大, 回收率较低, 第三次次之, 第一次试验影响最小。从第三次荧光素钠和罗丹明 B 回收率对比可知罗丹明 B 对浊度更为敏感。推测可能原因是由于罗丹明 B 分子量(479.01)比荧光素钠高(376.27), 浊度影响更多罗丹明 B 分子吸收激发光而降低了荧光强度。从图 2 及表 2 中分析认为

当浊度小于 25 时, 对示踪剂基本无影响; 当浊度大于 65 时, 由于浊度影响较大, 此时示踪试验结果不能用于分析岩溶管道参数。

利用 QTRACE2 可分析第一次示踪试验结果, 计算管道参数见表 3。

3 结论

本次研究以不同水动力条件下三次示踪试验为研究对象, 通过高精度监测手段定量分析了浊度来源及对示踪试验的影响。通过地下河浊度和流量曲线分析了地下河出口浊度来源, 计算出上、下临界流量分别为 $0.7\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.4\text{ m}^3/\text{s}$; 当流量大于上临界流量时, 水流属于紊流状态, 浊度主要来源于外源悬浮物; 当流量小于下临界流量时, 水流属于层流状态, 浊度主要来源于管道内部再悬浮颗粒。然后对比分析了浊度与示踪剂浓度曲线, 认为当浊度小于 25 时, 浊度对示踪剂基本无影响; 当浊度大于 65 时, 浊度与示踪剂呈负相关关系, 且浊度对罗丹明 B 影响更大。最后估算了岩溶管道体积、弥散系数及平均流速等参数, 为进一步水资源评价提供科学基础。试验结果较好地反映了西南典型岩溶地下河动态特征, 对于分析岩溶管道结构及推求水文地质参数有很好的推广应用价值。

Acknowledgements:

This study was supported by Special Scientific Research Fund of Public Welfare Profession of Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China (No. 201411100), and China Geological Survey (No. 1212011220959).

参考文献:

- 陈余道, 程亚平, 王恒, 蒋亚萍, 黄月群. 2013. 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, 40(5): 11-15.
- 何师意, MICHELE L, 章程, 汪进良, 李强. 2009. 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, 30(5): 673-678.
- 李晋生, 陈怀玉. 1987. 罗丹明 B 示踪试验检测方法初探[J]. 环境科学情报, (6): 5-8.
- 鲁程鹏, 束龙仓, 苑利波, 张蓉蓉, 黄币娟, 王彬彬. 2009. 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), 39(4): 717-721.
- 汪进良, 姜光辉, 侯满福, 陈定宁. 2005. 自动化监测电导率在盐示踪试验中的应用——以云南八宝水库盐示踪试验为例[J]. 地球学报, 26(4): 371-374.
- 杨平恒, 罗鉴银, 彭稳, 夏凯生, 林玉石. 2008. 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, 27(3): 215-220.
- 杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳. 2012. 降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析 [J]. 环境科学, 33(10): 3376-3381.
- 易连兴, 夏日元, 卢东华. 2012. 水化学分析在勘探确认地下河管道中的应用——以寨底地下河系统试验基地为例[J]. 工程勘察, (2): 43-46.

References:

- CHEN Yu-dao, CHENG Ya-ping, WANG Heng, JIANG Ya-ping, HUANG Yue-qun. 2013. Quantitative tracing study of hydraulic and geometric parameters of a karst underground river: exemplified by the Zhaidi underground river in Guilin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 40(5): 11-15(in Chinese with English abstract).
- FIELD M S. 2002. The Qtracer2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems[M/OL]. U. S. Environmental Protection Agency [2002-11-07]. <http://books.google.com/>.
- FOURNIER M, MASSEI N, BAKALOWICZ M, DUSSART-BAPTISTA L, RODET J, DUPONT J P. 2007. Using turbidity dynamics and geochemical variability as a tool for understanding the behavior and vulnerability of a karst aquifer[J]. Hydrogeology Journal, (15): 689-704.
- GHASEMIZADEH R, HELLWEGER F, BUTSCHER C, PADILLA I, VESPER D, FIELD M, ALSHAWABKEH A. 2012. Review: Groundwater flow and transport modeling of karst aquifers, with particular reference to the North Coast Limestone aquifer system of Puerto Rico[J]. Hydrogeology Journal, (20): 1441-1461.
- GOLDSCHEIDER N. 2005. Fold structure and underground drainage pattern in the alpine karst system Hochifen-Gottesacker[J]. Eclogae Geologicae Helvetiae, (98): 1-17.
- HE Shi-yi, MICHELE L, ZHANG Cheng, WANG Jin-liang, LI Qiang. 2009. A high precision underground water tracing test technique and its applications: a case study in Maocun karst system, Guilin, Guangxi[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(5): 673-678(in Chinese with English abstract).
- LAUBER U, GOLDSCHEIDER N. 2014. Use of artificial and natural tracers to assess groundwater transit-time distribution and flow systems in a high-alpine karst system (Wetterstein Mountains, Germany)[J]. Hydrogeology Journal, 22(8): 1807-1824.
- LI Jin-sheng, CHEN Huai-yu. 1987. Study on detection method of tracer test for Rhodamine B[J]. Environmental Science Information, (6): 5-8(in Chinese with English abstract).
- LU Cheng-peng, SHU Long-cang, YUAN Li-bo, ZHANG Rong-rong, HUANG Bi-juan, WANG Bin-bin. 2009. Determination of hydrogeologic parameters of karst aquifer based on tracer test[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 39(4): 717-721(in Chinese with English abstract).
- MORALES T, URIARTE J A, OLAZAR M, ANTIGUEDAD I, ANGULO B. 2010. Solute transport modelling in karst conduits with slow zones during different hydrologic conditions [J]. Journal of Hydrology, (390): 182-189.
- MUDARRA M, ANDREO B, MARIN A I, VADILLO I, BARBERA J A. 2014. Combined use of natural and artificial tracers to determine the hydrogeological functioning of a karst aquifer: the Villanueva del Rosario system (Andalusia, southern Spain)[J]. Hydrogeology Journal, (22): 1027-1039.
- NEBBACHE S, FEENY V, POUDEVIGNE I, ALARD D. 2001. Turbidity and nitrate transfer in karstic aquifers in rural areas: the Brionne Basin case-study[J]. Journal of Environmental Management, (62): 389-398.
- PERRIN J, LUETSCHER M. 2008. Inference of the structure of karst conduits using quantitative tracer tests and geological information: example of the Swiss Jura[J]. Hydrogeology Journal, (16): 951-967.
- PETERSON E W, WICKS C M. 2003. Characterization of the physical and hydraulic properties of the sediment in karst aquifers of the Springfield Plateau, Central Missouri, USA[J]. Hydrogeology Journal, (11): 357-367.
- RUFFINO B. 2015. Fluoride tracer test for the performance analysis of a basin used as a lagooning pre-treatment facility in a WTP[J]. Environmental Science and Pollution Research, 22(13): 9786-9795.
- VALDES D, DUPONT J P, MASSEI N, LAIGNEL B, RODET J. 2006. Investigation of karst hydrodynamics and organization using autocorrelations and T-△C curves[J]. Journal of Hydrology, (329): 432-443.
- WANG Jin-liang, JIANG Guang-hui, HOU Man-fu, CHEN Ding-ning. 2005. Application of electric conductivity to the tracing test: a case study of Babao reservoir[J]. Acta Geoscientica Sinica, 26(4): 371-374(in Chinese with English abstract).
- YANG Ping-heng, LUO Jian-yin, PENG Wen, XIA Kai-sheng, LIN Yu-shi. 2008. Application of online technique in tracer test—a case in Qingmuguan subterranean river system, Chongqing, China[J]. Carsologica Sinica, 27(3): 215-220(in Chinese with English abstract).
- YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang. 2012. Transportation and sources of the suspended particle in a karst spring during a storm event[J]. Environmental Science, 33(10): 3376-3381 (in Chinese with English abstract).
- YI Lian-xing, XIA Ri-yuan, LU Dong-hua. 2012. Application of hydro-chemical analysis for surveying and confirming the groundwater river conduit: A case in the experiment base of Zhaidi ground-river system[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, (2): 43-46(in Chinese with English abstract).