

鱼泉地下河示踪试验及回收强度法管道结构分析

易连兴, 卢海平, 赵良杰, 王 喆

(中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 鱼泉为乌江流域的一个复杂岩溶地下河系统。2014 年 6 月示踪试验结果表明, 投放点 w2 地下水向东南鱼泉地下河径流排泄 w1, 与西侧天生三桥峡谷 w3 泉没有水力联系; 并说明重庆地区普遍存在的嘉陵江组地层底部泥岩、泥质灰岩在鱼泉地下河区域不具隔水性。本文进一步给出了回收强度定义、生成了回收强度动态曲线, 利用回收强度动态曲线分析得出鱼泉地下河系统有 3 条分支管道, 比采用浓度曲线分析方法多 1 条支道; 最后计算得出投放点流量到 3 条支道的分流系数分别为 42.15%、32.40%、25.45%, 3 条通道峰值的流速分别为 94.90m/h、123.46m/h 和 157.17m/h。

关键词: 岩溶地下河; 隔水层; 示踪试验; 回收强度; 管道结构
中图分类号: P629; 641.73 文献标识码: A

Trace tests and conduit structure analysis with recovery intensity in Yuquan underground river

Yi Lianxing, Lu Haiping, Zhao Liangjie, Wang Zhe

(Institute of Karst Geology, CAGS, Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources, Guilin 541004, China)

Abstract: Yuquan is a complex karst underground river system in Wujiang basin. The trace testing results show that, the w2's groundwater run into the southeast Yuquan w1 and there is no hydraulic connection between sink-hole w2 and western spring w3 in Tian-sheng-san-qiao canyon; and there is no water resisting in Yuquan underground river area for Jialingjiang Group bottom part which commonly exists in Chongqing area with the lithology of mudstone and argillaceous limestone. The definition of recovery intensity is given and the dynamic curves of recovery intensity are created. Through the analysis on recovery intensity dynamic curves, it is concluded that there are 3 branch conduits, and it has 1 more conduit than by using concentration curve analysis. Finally, the flow of 3 conduits from the point w2 is calculated and they are separately accounted for 42.15%, 32.40% and 25.45%, and their corresponding peak flow rate are 94.90m/h, 123.46m/h and 157.17m/h.

Key words: karst underground river; aquitard; trace test; recovery intensity; conduit structure

0 引言

我国西南岩溶区面积 $78 \times 10^4 \text{km}^2$, 地下发育了 3000 多条地下河, 枯季径流量达 $470 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 相当于黄河的径流量^[1]。但是, 地下河水资源开发利用程度低和当地缺水问题一直未能解决; 其主要技术难题是由缝、管、洞等空隙组成的地下河含水介质结构极其复杂^[2]。因此, 查明地下河管道结构是水文地质工作者以及工程技术人员千方百计期望解决的首要问题。

地下水示踪试验是一种非常有效的方法之一, 已被广泛应用于确定地下水流域面积、含水层性

质、获取水文地质参数^[3~10]、分析地下河管道结构^[11~13]和水库渗漏途径^[14~15]等相关水文地质工作和研究领域。目前, 这些示踪试验成果的应用基本上利用示踪试验得到的示踪剂浓度历时变化曲线来进行水文地质条件分析, 除在计算总回收量外, 很

收稿日期: 2014-07-22; 修订日期: 2014-10-10

基金项目: 西南典型岩溶地下河调查与动态评价 (No: 1212011220959)。

作者简介: 易连兴 (1963-), 男 (汉族), 广西临桂人, 学士, 研究员。

少结合监测点流量动态进行综合分析。另外，传统的野外示踪试验大部分采用试验成本高、劳动强度大的人工取样和室内测试的方法。

本文采用 GGUN-FL30 荧光仪、Mini-diver 水位计等全自动监测仪对重庆鱼泉岩溶地下河进行野外在线高分辨率监测示踪试验，同时监控示踪剂浓度和地下水流量，并把浓度与流量两条历时动态变化曲线有机结合在一起，生成并利用回收强度动态曲线开展地下河管道结构分析。回收强度曲线分析法比常用的浓度曲线分析法能更有效反应地下含水空间结构，为充分利用示踪试验数据开展水文地质条件分析提出一个新途径。

1 鱼泉地下河系统

鱼泉地下河为乌江干流岩溶流域的一个子系统，位于重庆武隆县中北部仙女山镇及火炉镇范围内，距武隆县县城 21km；为 4A 级仙女山国家森林公园、世界喀斯特自然遗产天生三桥、龙水峡地缝著名景观以及印象武隆等旅游景点所在地。海拔高度 260 ~ 1930m，年平均降雨量 1214mm。

鱼泉地下河系统汇水面积约 53km²，主要含水岩组为二叠系中统栖霞组 (P₂q)、茅口组 (P₂m)、长兴组 (P₂c) 和三叠系下统飞仙关组 (T₁f)、嘉陵江组 (T₁j) 等灰岩、白云岩。岩溶发育，地下河上游和两侧地表切割强烈，切割深度达 200 ~ 300m。大气降水通过岩溶漏斗、岩溶洼地等补给地下水，并汇集径流到地下河管道中，最终在南部出口 (高程 589m) 排出地表向鱼泉河排泄 (图 1)。

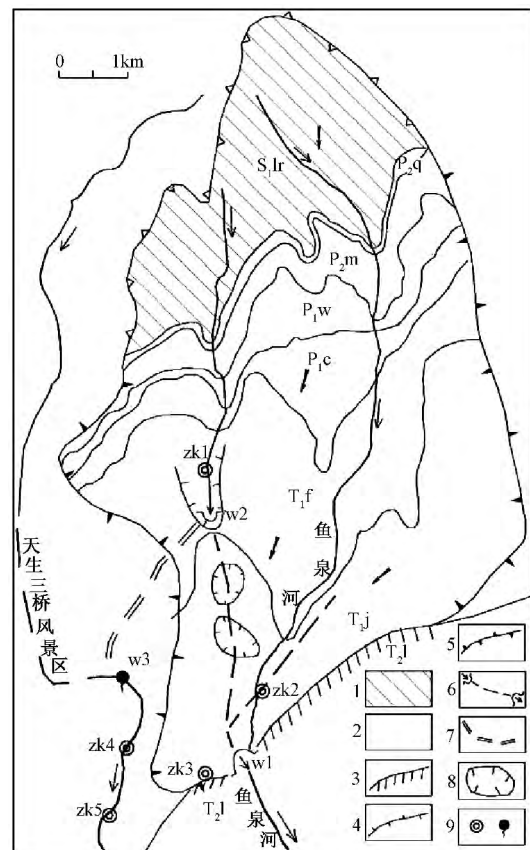
鱼泉地下河东侧边界以青杠向斜轴部所形成的地表和地下分水岭为界。北部以志留系罗惹坪组 (S₁lr) 页岩、砂质页岩隔水岩层地表分水岭为界。南部除地下河出口外，以三叠系中统雷口坡组 (T₂l) 页岩以及泥灰岩等构成隔水边界。

2 示踪试验

2.1 试验目的

地下河系统南、东、北等三个方向可以确定边界性质，西侧边界位置及分布则不能明确圈定，主要存在下列三个方面问题：

(1) 西侧发育有天生三桥深切峡谷，地表与河谷形成的峡谷深约 300m，与东侧鱼泉河谷形成的切深相当，天生三桥河谷明流和伏流互现，在峡谷底部左岸飞仙关组地层发育岩溶泉 w₃ (高程 706m)，该泉 2013 年 2 月枯季流量大于 12L/s。而在旅游景点“印象武隆”所处半封闭型洼地中飞仙



1—基岩裂隙水分布区；2—岩溶水分布区；3—隔水边界；
4—地下分水岭；5—地表分水岭；6—地下河及出入口；
7—已查明洞穴；8—岩溶洼地；9—钻孔及泉

图 1 水文地质质图

Fig. 1 The hydrogeological sketch

关组地层发育大型消水洞 w₂ (高程 1094m)，洼地以北的岩溶区以及志留系罗惹坪组分布区形成的地表水通过该消水洞消于地下。消水洞 w₂ 距离岩溶泉 w₃ 为 3120m、距离鱼泉地下河出口 w₁ 为 4000m，因此，简单从顺层发育以及直线距离两个条件上看，消水洞 w₂ 与岩溶泉 w₃ 有水力联系的可能性大于与鱼泉地下河出口 w₁。

(2) 根据区域地质资料，嘉陵江组 (T₁j) 底部为一层厚度 15 ~ 30m 厚的泥页岩，该层泥页岩也是与下伏飞仙关组 (T₁f) 地层划分的标志。该段泥页岩沉积厚度稳定，一般有很好的隔水性能，在研究区域有多处出露，有观点普遍认为嘉陵江组 (T₁j) 和下伏飞仙关组 (T₁f) 岩溶地下水分别属于两个不同地下水系统。依此推测，飞仙关组地层岩溶地下水向西南岩溶泉 w₃ 径流排泄，半封闭型洼地中消水洞 w₂ 与鱼泉地下河出口 w₁ 不存在水力联系。

(3) 在申报“世界喀斯特自然遗产”期间，该

区域开展了地面调查及洞穴探测等工作，在飞仙关组 (T₁f) 地层“印象武隆”所处洼地至天生三桥深切峡谷之间查明了一条南西方向发育的洞穴，显然，所发现的洞穴为早期的地下水径流排泄通道，在峡谷深切之前，消水洞 w2 区域的地下水向岩溶泉 w3 方向径流；根据洞穴探测结果容易推测，河谷深切之后，w2 区域的地下水也是朝 w3 泉径流排泄。

通过连通试验，确认或排除上述三种推论，为划分西侧边界提供依据。

2.2 试验及监测仪器

示踪试验时间为 2014 年 6 月 5 日~6 月 20 日；

表 1 监测仪器参数

Table 1 The monitoring instrument parameters

仪器	产地	测试内容	内存容量	时间间隔	数据读取	量程	精度	电源
GGUN-FL30 荧光仪	瑞士	荧光素钠	4GB	15min	存储卡读取	无上限	0.02ug/L	蓄电池
Mini-Diver 水位计	荷兰	水位	4GB	15min	在线读取	0~10m	0.2cm	内置电池
LDS-30 雨量计	中国	雨量	1GB	1min	在线读取	无上限	0.1mm	太阳能

2.3 试验结果

试验期，地下河出口 w1 水体中荧光素钠浓度历时动态曲线呈现两个完整的波峰形态 (如图 2)，

消水洞 w2 为投放点，6 月 5 日 10 时在消水洞 w2 投放荧光素钠 2000g；岩溶泉 w3 和鱼泉地下河出口 w1 为接收点。

示踪试验采用自动化监测方法。在接收点 w1、w3 安装 GGUN-FL30 型野外自动荧光仪和 Mini-Diver 水位计分别测定水体中荧光素钠浓度和水位，其中在接收点 w1 修建有流量堰并安装有 LDS-30 雨量计，接收点 w3 则采用天然河流断面法计算流量。

GGUN-FL30 荧光仪和 Mini-Diver 水位计监测时间间隔设置为 15min，LDS-30 雨量计采用仪器自身固有的每 1min 记录一组雨量数据方式 (表 1)。

最大浓度为 1.78ug/L；岩溶泉 w3 的荧光素钠浓度值一直在背景值范围 0.00~0.05ug/L。

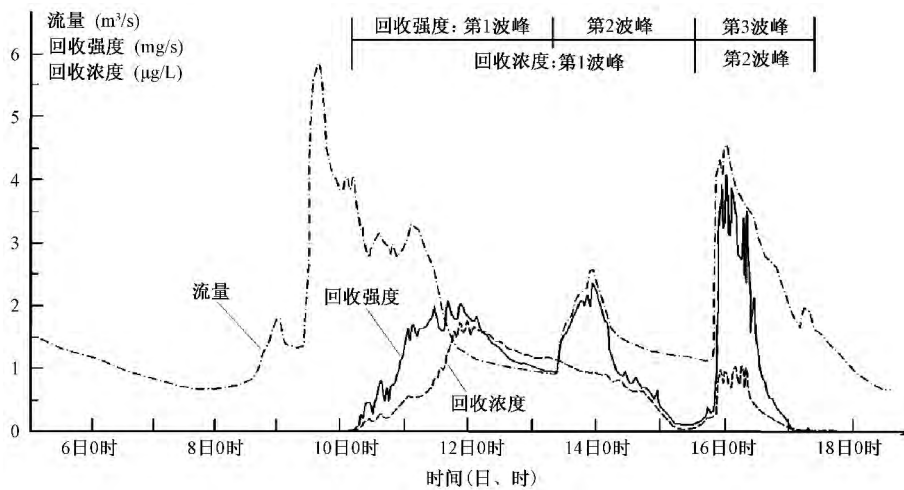


图 2 连通试验动态曲线

Fig. 2 The dynamic curves for the connective test

试验结果表明，地下河出口 w1 接收到了人工投放的荧光素钠，投放点消水洞 w2 与鱼泉地下河出口 w1 连通；西侧岩溶泉 w3 则没有收到人工投放的荧光素钠，消水洞 w2 与西侧 w3 泉没有水力联系；因此，鱼泉地下河系统西侧地下分水岭位于天生三桥峡谷与 w2 所处洼地之间。

(1) 早期，下伏飞仙关组 (T₁f) 地层岩溶地下水向西南方向径流，所发现的上层旱洞为地下水主径流通道，嘉陵江 (T₁j) 地层岩溶地下水则向

东南径流排泄，上下两层岩溶水分属两个不同的地下水子系统。

(2) 随着东西两侧河谷继续下切，同时嘉陵江 (T₁j) 底部泥页岩隔水层在研究区或被断层错断或存在局部薄弱段，破坏了它的隔水性，并伴随两侧河谷差异性下切加剧，东侧鱼泉地下河河谷下切快，对地下水形成强烈袭夺，改变了 w2 区域的地下水径流方向，使 w2 以北区域岩溶水、基岩裂隙水向鱼泉地下河径流排泄。

3 地下河管道结构分析

(1) 浓度曲线分析方法

浓度动态曲线为双峰特征: 6月10日12:30开始接收到投放的荧光素钠, 浓度为0.15ug/L, 6月12日8:00达到峰值1.78ug/L, 6月16日3:00浓度衰减到0.03ug/L; 6月16日5:00以后, 浓度再次增大, 6月16日21:00出现第2个峰值1.00ug/L, 6月17日16:15再次衰减到背景浓度, 小于0.03ug/L。根据以往的浓度曲线分析方法, 从投放点w2到地下河出口w1为双通道结构; 其中第1个浓度波峰历时时间和峰值浓度均大于第2个波峰, 第1个波峰对应较大一条地下水通道(图3上, A), 而第2个波峰对应的管道则相对小(图3上, B)。

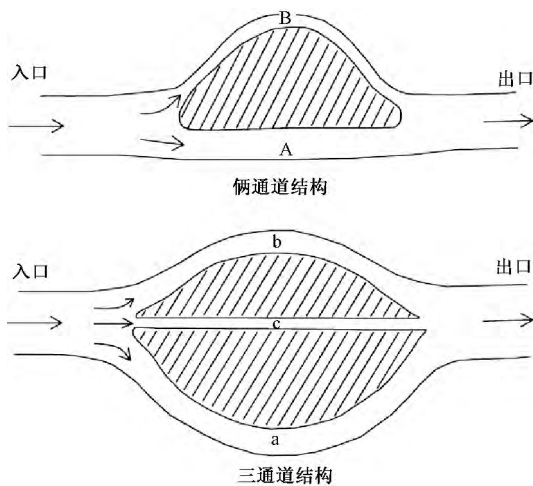


图3 地下河结构图

Fig. 3 The structure of the underground river

(2) 回收强度分析方法

在结合实测流量进行分时间段计算回收量工作中, 发现投放点w2到地下河出口w1连通结构与简单采用浓度曲线分析结果有一定差异, 为说明问题, 建立回收强度概念。

回收强度: 单位时间内回收到的示踪试验材料荧光素钠的质量。计算公式:

$$\alpha(t) = 10^{-6} \times (C(t) - C(t_0)) \times Q(t) \quad (1)$$

式中: $\alpha(t)$ 为 t 时刻回收强度 (g/s); $C(t)$ 、 $C(t_0)$ 为对应 t 时刻实测浓度、背景浓度 (ug/L); $Q(t)$ 为实测流量 (L/s)。地下河出口w1流量、降水量监测动态; 在示踪试验期间6月9日22:00~11日16:00、13日18:00~14日3:00、15日23:00~16日18:00发生3次强降水过程, 降水量分别为64mm、26mm、43mm, 对应3次降水过

程的瞬间最大洪峰流量为5.86m³/s、2.25m³/s、4.54m³/s。根据地下河流量、荧光素钠浓度动态以及公式(1)计算得出的回收强度动态(图2)。

回收强度动态曲线表现为3波峰形态, 其中浓度曲线第1波峰段内变为2个波峰, 因此可以推测出从投放点到鱼泉出口有3个通道。除波峰数量变化外, 峰体极值也明显变化, 在浓度曲线中第2波峰的峰值小, 而在回收强度曲线3个波峰中峰值最大。

(3) 地下水分流特征

投放点的水流在3个通道中的分配, 这个参数也反映出地下河管道的结构特征。这里采用回收量进行定量描述, 计算公式如下:

$$m = 10^{-6} \int_{t_0}^t (C(t) - C(t_0)) Q(t) dt \quad (2)$$

$$R = \frac{m}{M} \times 100 \quad (3)$$

$$r_i = \frac{m_i}{m} \times 100 \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

式中: M 、 m 、 m_i 为投放量、总回收量、第 i 通道的回收量 (g); t_0 、 t_1 分别为示踪试验开始和结束时间; $C(t)$ 、 $C(t_0)$ 为实测浓度、背景浓度 (ug/L), 其中 $C(t_0)$ 取值0.05ug/L; $Q(t)$ 为示踪试验期间实测流量 (L/s); R 为总回收率 (%); r_i 为分流系数, 第 i 通道的回收量占总回收量的百分比 (%)。

通过计算, 总回收量为1070.27 (g), 总回收率为53.51%。回收强度曲线波峰对应的3个通道的回收量分别为451.11、346.76、272.40 (g), 对应占总回收量的42.15%、32.40%、25.45%; 其中, 计算每个波峰时间段内的回收量时对两个波峰之间的交叉部分不进行详细划分, 如图2中第1波峰没有衰减到背景值则出现第2波峰, 第1波峰的最后衰减段的回收量归在第2个波峰中, 第2波峰的开始段回收量则归到第1个波峰中。

不考虑各通道长度不等、性质差异等特点, 荧光素钠在径流过程中被吸附、沉淀等总损耗也按 r_i 的大小进行分配, 则可近似认为, 每个波峰对应的 r_i 值表示投放点流量在不同通道中分配比例, 即投放点流量在地下径流过程中分为3股分别进入3个不同管道, 其中进入对应波峰1的管道的流量占投放点流量的42.15%、进入第2波峰的管道的流量占32.40%、其余25.45%的流量通过第3波峰的管道, 用通道大小表示流量分配的大小则如图3中a、b、c所示。

投放点 w2 与鱼泉地下河出口 w1 距离 4000m, 3 个波峰的峰值分别用时 158、216、270 (h), 对平均流速为 94.90、123.46、157.17 (m/h); 3 个波峰有关计算结果如表 2。

表 2 分时段计算结果

Table 2 The computing results of different times

波峰 序号	回收量 (g)	分流系数 r_i	峰值		
			出现时间 (年-月-日-时)	用时 (h)	平均流速 (m/h)
第 1 波峰	451.11	42.15	2014-6-12 0:00	158.0	94.90
第 2 波峰	346.76	32.40	2014-6-14 10:00	216.0	123.46
第 3 波峰	272.4	25.45	2014-6-16 16:00	270.0	157.17

4 结语

(1) 重庆地区, 普遍存在的嘉陵江组地层底部泥岩、泥质灰岩在本文研究区不具隔水性能, 投放点地下水向东南鱼泉径流排泄。

(2) 岩溶区水文地质条件极其复杂, 类似本文研究区域存在早期的顺层发育岩溶通道以及区域稳定隔水岩层、同时投放点与西侧排泄点距离短等已知多因素条件下, 也需要开展相关研究工作后才能给出更准确的结论。

(3) 回收强度动态曲线融合了地下河排泄量动态特征, 采用回收强度动态分析岩溶管道结构比采用浓度动态曲线更能反映地下岩溶发育特征, 同时能使分支管道的分流定量化。

(4) 在岩溶地下河系统区域开展示踪试验, 特别是丰水季节地下水排泄动态变化大, 必须同时重视接收点的浓度和流量监测, 这样才能充分发挥示踪试验的作用。

参 考 文 献

- [1] 蒋忠诚, 夏日元, 时坚等. 西南岩溶地下水资源开发利用效应与潜力分析 [J]. 地球学报, 2006, 27 (5): 495~502.
Jiang Zhongcheng, Xia Riyuan, Shi Jian et al. The application effects and exploitation capacity of karst underground water resources in southwest China [J]. Geoscientia Sinica, 2006, 27 (5): 495~502. (in Chinese)
- [2] 郭纯青, 方荣杰, 于映华. 中国南方岩溶区岩溶地下河系统复杂水流运动特征 [J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30 (4): 507~512.
Guo Chunqing, Fang Rongjie, Yu Yinghua. Complex water movement in underground river system in south China karst area [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2010, 30 (4): 507~512. (in Chinese)
- [3] 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, 20 (2): 67~70.
Liu Xingyun, Zeng Zhaojian. Application of groundwater multi-tracer test in karst area [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2006, 20 (2): 67~70. (in Chinese)
- [4] 杨靖, 叶淑君, 吴吉春. 地下水环境示踪剂的解译研究 [J]. 工程勘察, 2009, 37 (1): 42~47.
Yang Jing, Ye Shujun, Wu Jichun. Interpretation of environmental tracer in groundwater [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37 (1): 42~47. (in Chinese)
- [5] 吴建荣. 多孔地下水连通试验确定主径流带 [J]. 煤矿安全, 1994, (6): 11~13.
Wu Jianrong. Porous groundwater tracer to determine the main runoff zone [J]. Safety in Coal Mines, 1994, (6): 11~13. (in Chinese)
- [6] 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.
Wang Kairan, Jiang Guanghui, Guo Fang et al. Karst groundwater tracer test and analysis of peak forest plain area in eastern Guilin [J]. Geoscience, 2013, 27 (2): 454~459. (in Chinese)
- [7] 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.
Xu Shangquan, Wang Peng, Jiao Jiesong et al. Application of high-precision on line tracer technique in the hydrogeological investigation of karst groundwater [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41 (2): 40~44. (in Chinese)
- [8] 郑双林. 利用示踪试验确定河流监测断面的研究 [J]. 环境保护科学, 1988, 15 (2): 40~47.
Zhen Shuanglin. Study on the determination of river monitoring section using tracer test [J]. Environmental Protection Science, 1988, 15 (2): 40~47. (in Chinese)
- [9] 杨前, 翟加文, 张智旺. 示踪连通试验在确定岩溶水径流通道中的应用 [J]. 中州煤炭, 2013, (7): 74~75.
Yang Qian, Zhai Jiawen, Zhang Zhiwang. Tracer Application in the determination of karst water runoff channel [J]. 2013, (7): 74~75. (in Chinese)
- [10] 姜守君. 示踪试验在六盘山东麓地区岩溶水文地质条件分析中的应用 [J]. 地下水, 2012, 34 (1): 27~29.
Jiang Shoujun. Tracer application in analysis of karst hydrogeological condition [J]. Groundwater, 2012, 34 (1): 27~29. (in Chinese)
- [11] 邓谊明, 汪继锋. 八字岭隧道牛鼻子暗河示踪试验成果分析 [J]. 铁道勘察, 2007, (3): 11~14.
Deng Yiming, Wang Jifen. Analysis on achievements of Tracer Test in Niubizi Underground River of Baziling Tunnel [J]. Railway Investigation and Surveying, 2007, (3): 11~14. (in Chinese)
- [12] 易连兴, 夏日元, 唐建生等. 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 et al. 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,

