

高精度地下水示踪技术及其应用

——以毛村地下河流域为例

何师意¹⁾, Michele L²⁾, 章 程¹⁾, 汪进良¹⁾, 李 强¹⁾

1) 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;

2) University of Neuchâtel, Avenue du 1er Mars 26, 2000, Neuchâtel, SWITZERLAND

摘 要: 笔者以桂林毛村岩溶地下河流域的示踪试验为例, 探索高精度地下水示踪方法在岩溶水文地质研究中的应用。实践证明, 该方法较传统示踪方法具有较大优势。试验中, 从地下河主出口回收 I 号示踪剂为 34%, 地下水平均流速为 35.3 m/h, 全部回收率约为 60%~70%。示踪结果证实毛村地下河流域具有典型河间地块特征, 存在多个排泄出口, 水文地质边界较复杂; 主出口处示踪剂浓度变化呈宽域多峰, 说明具有多管道、沿途多个较大溶潭特征; II 号示踪剂在所有接收点都没有收到, 其原因较为复杂和不确定。枯季部分地下水有沿西南方向断层排泄迹象, 雨季是否存在较大径流, 还需用示踪试验来证实; 流量不均衡, 排泄区可能存在潜流。

关键词: 高精度; 在线监测技术; 地下水示踪; 桂林毛村

中图分类号: P641.134; P641.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2009)05-673-06

A High Precision Underground Water Tracing Test Technique and Its Applications: A Case Study in Maocun Karst System, Guilin, Guanxi

HE Shi-yi¹⁾, MICHELE L²⁾, ZHANG Cheng¹⁾, WANG Jin-liang¹⁾, LI Qiang¹⁾

1) Institute of Karst Geology, CAGS; Karst Dynamics Key Laboratory, MRL, Guilin, Guangxi 541004;

2) University of Neuchâtel, Avenue du 1er Mars 26, 2000, Neuchâtel, Switzerland

Abstract: A multi-tracing test was performed by the authors in Maocun underground river system near Guilin to understand the hydrogeological conditions and spatial characteristics of the water-holding media and to probe into the application of the high precision online tracing test technique to hydrogeological research. Practice shows that the new method is greatly superior to the traditional ones. The recovery rate of the injected tracer (uranine) at the main outlet is 34%, and the average speed of underground water flow is 35.3 m/h. It is estimated that 60%~70% of the total injected tracer was recovered during the tracing test. The final results indicate that the complicated underground system is located in an interfluvium between the Maocun River and the Ganjiang paleo-river with several draining outlets, some of which remain unknown to us. The variation curve with several tracer concentration peaks recorded at the main outlet also indicates that there exist conduits and pools on the way the tracer migrates to the main outlet. There is a trail showing that the underground water moves to the southwestern part of the catchment through a fault (belt) in the dry season; nevertheless, further tracing test is needed to make sure if the water would overflow in this direction during the raining season. Another tracer, sulforhodamine B, was not detected at any receiving points because of several uncertain reasons. Moreover, the unbalance of discharge implies the possible existence of diving water flow in the drainage area.

Key words: high precision; online monitoring technique; tracing of underground water; Maocun, Guilin

本文由地质调查项目(编码: 1212010634805)和中国地质科学院岩溶地质研究所所控项目(200703)资助。

收稿日期: 2009-03-07; 改回日期: 2009-09-20。

第一作者简介: 何师意, 男, 1966年生。博士, 研究员。主要从事岩溶环境学、岩溶水文地质调查和研究。通讯地址: 541004, 广西壮族自治区桂林市七星路50号。电话: 0773-5837343。E-mail: hpsych@karst.edu.cn。

自 100 多年前示踪技术在美国开始应用以来,已突破传统意义上只用于证实水点之间的连通,已被广泛地应用于地质和水文地质研究领域,如地下河流域面积的确定,了解含水层的性质,土壤中溶质的传输过程,水流流量的精确测定,地下水的流速与流向,水库渗漏途径的监测等(袁道先, 2000, 2008; 张人权等, 2005; Craig, 2005)。用于示踪试验的示踪剂也日益多样化,包括天然与人工的,稳定与非稳定的,物理与化学的,及生物与指标示踪剂。同时,示踪剂监测技术得到了很大发展,特别是在欧美等国家,已广泛采用在线监测技术来精确记录示踪剂的整个变化过程,克服了传统示踪试验方法将大量样品带回实验室测试、取样间隔较大和不能及时掌握示踪剂的变化情况等弊端(裴建国等, 2000; 刘兴云等, 2006; 邓振平等, 2007)。应用在线监测技术,根据示踪剂浓度连续变化的形态特征,来分析含水介质的空间形态特征,已成为当今国际水文地质研究的重要方向和趋势(Meiman et al., 2001; 张人权等, 2005; Craig, 2005; Nico, 2007)。这种新的技术应用岩溶水文地质研究中,可以更准确了解岩溶裂隙和管道的连通性及其空间形态(蒋忠诚等, 1999)。

1 新示踪方法的原理和用途概述

1.1 方法原理

不同类型染色示踪剂对可见光谱范围内不同波长光的吸收具有选择性,利用这一性质,可设计光学滤波装置,产生特定波长的光束,它通过待测溶液后到达接收器,接收到的光强度与染色剂浓度成反比,与标准函数对比计算浓度。

1.2 仪器特点和用途

多路激发、多路吸收特定波长的光。可同时测量多种示踪剂浓度,互相不干扰;所有装置整合内置于探头中,携带方便;检出精度很高,对荧光素等示踪剂检出限达 0.02×10^{-9} ;拥有专门的视窗软件,对监测数据处理方便;仪器省电,内存大,可实现长时间在线监测。该仪器主要用于钻孔和地表水的水文地质在线监测、地下水示踪和相关研究领域。

仪器可检测的示踪剂有: Uranine, Sulforhodamine B, Pyranine, Eosine, Lyssamine, Chlorophyll A, Amidorhodamine G, Rhodamine, Tinopal Amino-g-Acid, Photine, Naphtionate 等。

2 毛村地下河流域概况及示踪试验目的

2.1 毛村地下河流域概况

毛村试验场位于灵川县潮田乡,发育有一条主要地下河及多个支流,汇水面积约 19 km^2 。地下河上游汇入大量的地表水,地下河的长度约 4 km ,具有多段明流,出口位于毛村村边,枯季最小流量 8.66 l/s ,地下、地表水径流模数最小为 1.74 l/s km^2 ,平均为 10.88 l/s km^2 。流域内含水岩组是泥盆系中统东岗岭组(D_2d)灰岩、上统融县组(D_3r)灰岩,以及小部分第四系孔隙水含水层。含水岩组下有泥盆系中统底部的碎屑岩隔水层(如图 1)。水文和水化学自动化监测仪安放在地下河的出口。

毛村研究区气候属于湿热多雨的亚热带季风气候,夏季常出现高温、湿热且暴雨频繁的天气,秋季雨量迅速减少,天气晴朗,常有秋旱。四季分明,雨量充沛,热量丰富,年平均气温 18.6 ,年均降雨量 1980 mm 。降雨量的年内分配,主要受季风活动影响,分布不均。

研究区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。沿断裂带发育有地下河天窗。宏观地貌形态为峰丛洼地。

区内的石灰土为棕色石灰土(Terra Fusca),分层明显,土壤 pH 植为中性偏碱。非岩溶区为地带性硅酸盐红壤,层次明显,土壤 pH 值呈酸性。区内植被保护较好,石灰土上覆盖植被主要以青冈为主的林地和以黄荆、櫟木占优势的灌木林为主;红壤是以栲树、杉树等为主的林地和以黄荆等为主的灌木丛。土地利用类型主要有林地、灌草丛、果园、水稻田和居民用地等。

2.2 示踪试验目的

进一步查清毛村地下河流域水文地质边界条件,分析含水介质特征;进行地下水示踪新技术方法的应用和研究,试图加以推广。该方法使用的仪器具有极高的灵敏度,最低检出限为 0.02×10^{-9} ,示踪剂用量小,在线监测可节省大量人力物力。桂林毛村和重庆金佛山的示踪试验,在国内岩溶水文地质研究领域尚属首次应用该技术,具有很好推广的价值;有利于加强相关方面的国际合作与交流。

3 示踪试验部署及结果

示踪试验部署在流域中下游。试验前期,根据

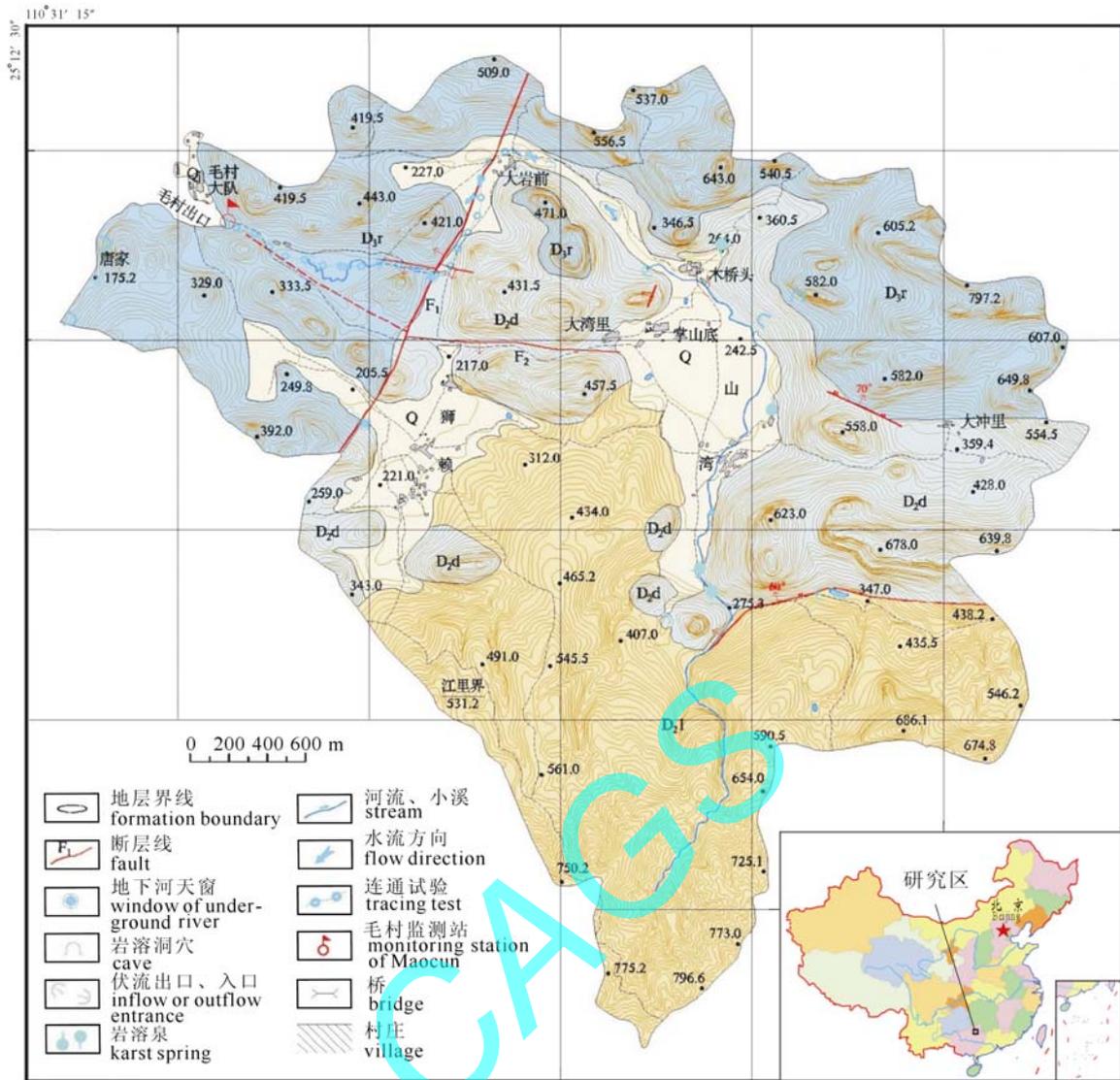


图 1 桂林毛村地下河流域岩溶水文地质图

Fig. 1 Hydrogeological map of the catchment of Maocun underground river in Guilin

1 10000 水文地质调查成果, 确定流域中下游全部七个可能的水点作为示踪剂的接收点, 水点类型为地下河出口(3 号、5 号点和毛村出口)、地下河天窗(1 号和 2 号点)或岩溶泉(4 号和 6 号点)。将在线监测仪器安放在毛村地下河主出口, 设置记录间隔为 4 min。其他 6 个接收点定时采集水样, 采样间隔为 1 h, 加密采集的样品均避光保存, 待整个试验结束后, 用同一台仪器测定示踪剂浓度。根据调查成果确定了两个投放点: 一是大岩前村明流入口处, 投放 I 号示踪剂。该处是上游补给区集中汇水部位, 该处流量易于控制, 且基本能代表上游全部来水; 二是狮赖村附近的地下河天窗, 投放 II 号, 同时也是 I 号示踪剂的接收点之一。该处位于北东向 F₁ 断层带上, 可能与流域西部和西南部各地下水露头相连

通, 将其作为 I 号示踪剂接收点的目的是要证实, 从大岩前进入系统的水在枯季是否沿断层带向西南部排泄。两种示踪剂投放的时间间隔为 200 min。示踪试验布局如图 2。

I 号示踪剂为荧光素(Uranine), 无毒。投放点位于毛村北东东约 1.8 km, 为明流入口处(图 2)。因毛村地下河主出口是居民饮用水源, 需根据流量精确计算示踪剂投放量, 以到达峰值小于肉眼可见浓度 (50×10^{-9}) 为原则, 计算得投放量为 120 g, 投放点处流量约为 25 l/s; II 号示踪剂为酸性红 52 (Sulforhadamine B), 无毒。投放点为一位于毛村东南约 1.5 km 的地下河天窗(图 2), 投放量为 100 g。该点也是 I 号示踪剂的接收点。在线仪器可同时记录两种示踪剂浓度变化和水的浊度(Turbidity)。

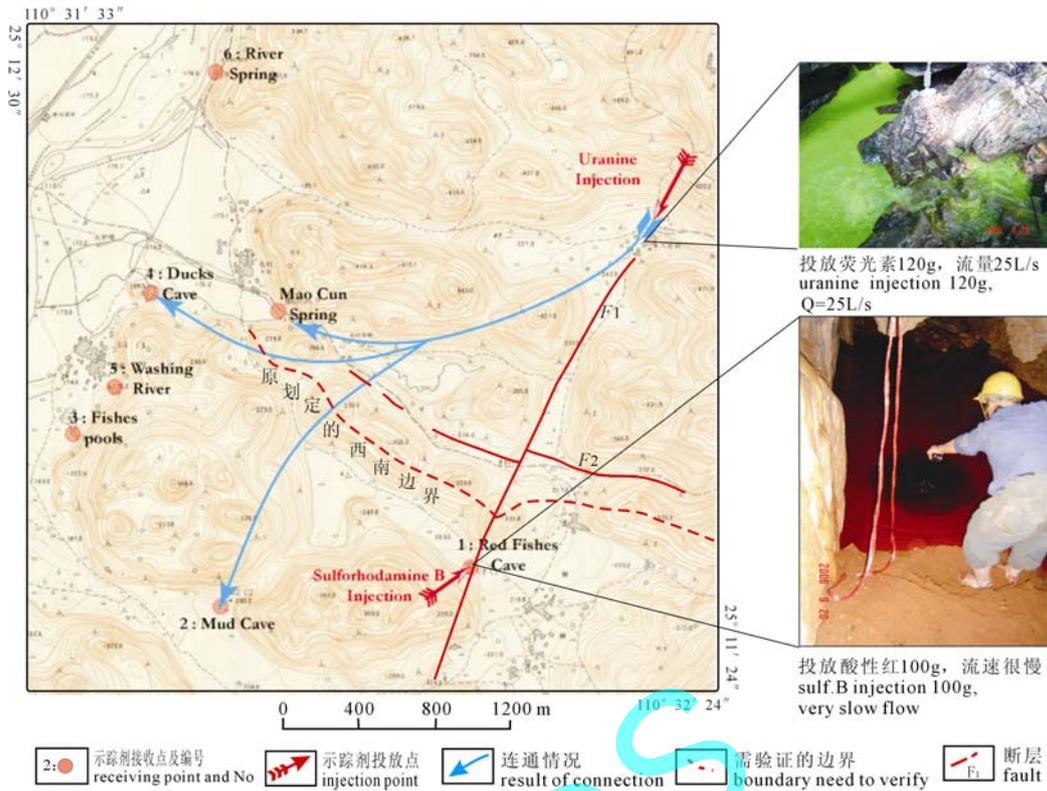


图 2 毛村地下河地下水示踪试验布局和成果解译
 Fig. 2 Layout and explanation of the tracing test results in Maocun, Guilin

两种示踪剂分别于 2006 年 9 月 20 日 13 时和 15 时投放, 同时在线监测仪开始记录, 示踪剂背景值为 0。I 号示踪剂投放后 51 h 到达, 最大峰值出现在 72.7 h, 为 6.07×10^{-9} , 整个试验历经 9 d。开始的 3 d, 采用矩形堰, 每天实测毛村出口处流量两次, 并与自记水位仪对应水位的计算流量对比, 实测流量与记录流量相符, 之后 6 d 流量直接采用自记水位仪水位资料换算。仅在毛村主出口、4 号点(Duck Cave)和 2 号点(Mud Cave) 三处检测到 I 号示踪剂, 其中, 2 号点仅在一个水样中发现信号, 浓度为 0.8×10^{-9} 。计算得到毛村主出口处 I 号示踪剂回收率为 34%。所有接收点均未检测到 II 号示踪剂(图 2)。在线监测仪记录到的毛村地下河主出口示踪剂浓度和浊度变化过程如图 3。

4 结果讨论

(1) 示踪结果说明毛村系统边界条件需进一步修正。2 号接收点发现 I 号示踪剂, 说明枯季部分地下水有沿西南方向断层带排泄迹象, 与下江古河道地下水汇合, 经 2 号接收点由唐家鱼塘(地下河出口)排出。雨季向西南方向越流排泄的可能性很大。因此, 在流域西南边界上存在局部排泄出口。流域属

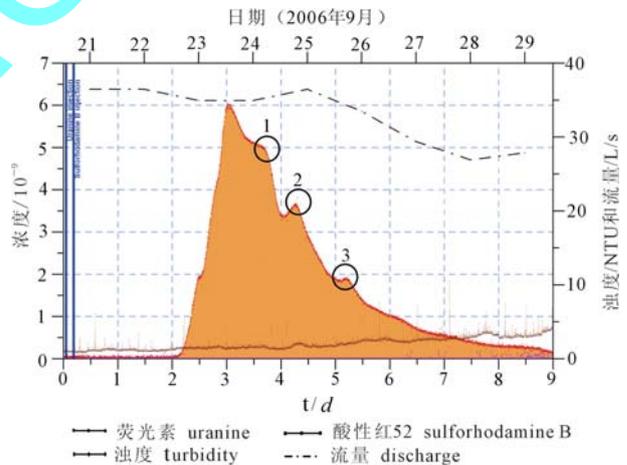


图 3 毛村地下河主出口处 I 号示踪剂浓度变化
 Fig. 3 Continuous concentration variation of Tracer I at the main outlet, Maocun

于潮田河和下江古河道河间地块地带, 毛村出口不是流域唯一出口, 但是主要排泄出口。流域东部、东北部为补给区, 地下水向西部、西南排泄;

(2) 结果表明: 毛村地下河流域示踪距离为 1.8 km, I 号示踪剂最大峰值距投放时刻 51 h 后到达主出口, 计算得水流平均流速为 35.3 m/h, 随后的峰值 1、峰值 2 和峰值 3 到达时间距投放时刻分别为

62.4 h、79.8 h 和 96.5 h。记录到的示踪剂浓度变化呈宽域多峰, 具有明显拖尾现象, 说明地下水流经途径呈多管道汇流或者沿途具有多个较大溶潭的特征。不同的径流途径或者因溶潭的稀释作用, 导致沿途地下水流速不均匀。已有研究成果认为, 若溶潭位于管道主流上, 只要表现为对示踪剂的稀释作用, 就不会造成多个峰值(如图 3 中 1、2 和 3), 而是平滑曲线(杨立铮等, 1979; 张祯武, 1990; 高志友等, 2004; 贾秀梅等, 2005)。因此, 毛村地下河系统溶潭可能发育于主流两侧, 地下水的运动存在旋涡。地下水同源同汇但不同路径和流速, 也会形成多峰(Meiman et al., 2001; Nico, 2007)。水的浊度未对示踪剂浓度变化造成影响, 但水的搅动造成了浊度的微小波动;

(3) 毛村地下河主出口 I 号示踪剂回收率为 34%, 最大峰值为 6.07×10^{-9} 。除主出口外, 另三个监测点也发现 I 号示踪剂, 由于没有流量控制, 无法准确计算其它接收点的示踪剂回收率。但从这三个接收点距投放点距离、估测流量和地下河发育的空间特征推测, 本示踪试验 I 号示踪剂回收率应在在 60%~70%之间。从投放点和接收点流量的变化看, 自投放点到各排泄点沿途, 还有另外的地下岩溶管道或来自碎屑岩补给区的地下水进入, 毛村地下河系统是一个复杂的水文地质单元, 这正是河间地块型岩溶系统的典型特征(Nico, 2007);

(4) II 号示踪剂在所有接收点都没有收到, 可能原因是: 投放天窗流速很慢, 且示踪剂流经沿途水量较大, 投放剂量偏小, 枯季上游来水量小, 示踪剂可能需经很长时间才能出来或被严重稀释;

(5) 地面调查和示踪成果显示, 该流域水文地质条件比原先的认识要复杂得多, 西南段边界条件仍有待进一步查明。雨季在西南方向是否存在较大径流, 还需再用示踪试验来证实。此外, 毛村地下河系统属岩溶峰丛地貌, 地下水排向峰林平原区, 其主出口之下是否存在较大潜流, 目前尚不清楚。

5 结论

本次试验成功运用了新的高精度地下水示踪技术方法, 和传统的地下水示踪方法相比, 显示其具有很大优势, 具有很好的推广应用价值。示踪试验结果较好地反映了: 流域具有多个排泄出口, 具河间地块型岩溶系统的典型特征; 示踪剂出现多个峰值, 说明地下水运移空间较为复杂, 认为地下河毛

村主出口的岩溶主管道与多个侧向发育的溶潭等蓄水空间相连接, 或者 I 号示踪剂在投放点之后, 经多支次级管道径流汇集该主管道, 地下水平均流速为 35.3 m/h。由于估算 I 号示踪剂回收率在 60%~70%之间, 偏低, 以及 II 号示踪剂未被发现, 因此, 本试验并未完全揭示该系统的复杂性, 应考虑排泄区有潜流存在的可能。同时, 多台在线监测仪联合使用才能充分发挥该项新技术方法的优势, 促进水文地质研究的发展。

参考文献:

- 邓振平, 周小红, 何师意, 罗英. 2007. 西南岩溶石山地区岩溶地下水示踪试验与分析[J]. 中国岩溶, 26(2): 163-169.
- 高志友, 尹观, 蒋良文, 侯明. 2004. 毛坝向斜核部岩溶水绕轴径流的同位素示踪分析[J]. 地球学报, 25(02): 64-68.
- 贾秀梅, 刘满杰, 孙继朝, 齐继祥, 臧逸中, 鲁静. 2005. 万家寨水库右岸岩溶渗漏试验研究[J]. 地球学报, 26(02): 82-85.
- 蒋忠诚, 袁道先. 1999. 中国南方表层岩溶带的结构、岩溶动力学特征及其意义[J]. 地球学报, 20(3): 302-308.
- 刘兴云, 曾昭建. 2006. 地下水多元示踪试验在岩溶地区的应用[J]. 岩土工程技术, (2): 101-105.
- 裴建国, 谢运球, 章程. 2000. 湘中溶蚀丘陵区示踪试验——以湖南新化为例[J]. 中国岩溶, 19(4): 366-371.
- 杨立铮, 刘俊业. 1979. 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, (4): 208-216.
- 袁道先. 2000. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见[J]. 中国岩溶, 19(2): 103-108.
- 袁道先, 章程. 2008. 岩溶动力系统的理论与实践[J]. 地球学报, 29(3): 355-365.
- 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 周爱国, 孙蓉琳. 2005. 当代水文地质学发展趋势与对策[J]. 水文地质工程地质, 32(1): 51-55.
- 张祯武. 1990. 岩溶地下水管流场类型与示踪曲线对应关系及在生产中的应用[J]. 中国岩溶, 9(3): 211-219.

References:

- CRAIG E D. 2005. Introduction to theme issue on tracers in hydrogeology[J]. Hydrogeology Journal, 13(1): 255-258.
- DENG Zhen-ping, ZHOU Xiao-hong, HE Shi-yi, LUO Ying. 2007. Analysis and tracing test to karst groundwater in southwest China karst rocky mountain area: a case study in Dalongdong, western Hunan[J]. Carsologica Sinica, 26(2): 163-169(in Chinese with English abstract).
- GAO Zhi-you, YIN Guan, JIANG Liang-wen, HOU Ming. 2004. Isotopic tracing analysis of round-axis flow of karst water in Maoba syncline[J]. Acta Geoscientica Sinica, 25(2): 64-68(in Chinese with English abstract).
- JIA Xiu-mei, LIU Man-jie, SUN Ji-chao, QI Ji-xiang, ZANG Yi-zhong, LU Jing. 2005. A tracing test of karst leakage on the right bank of Wanjiashai reservoir[J]. Acta Geoscientica

- Sinica, 26(02): 82-85(in Chinese with English abstract).
- JIANG Zhong-cheng, YUAN Dao-xian. 1999. Dynamic features of epikarst zone and significance for environment and resources[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 20(3): 302-308(in Chinese with English abstract).
- LIU Xing-yun, ZENG Zhao-jian. 2006. Application of underground water multi-tracer test in karst area [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, (2): 101-105(in Chinese with English abstract).
- MEIMAN J, GROVES C, HERSTEIN S. 2001. In-cave dye tracing and drainage basin divides in the Mammoth Cave karst aquifer, Kentucky[R]. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 01-4011: 179-185.
- NICO G. 2007. *Methods in karst hydrogeology*[M], London: Taylor & Francis Group.
- PEI Jian-guo, XIE Yun-qiu, ZHANG Cheng. 2000. Tracing test in corrosional hill area: a case study of Xinhua county, Hunan province[J]. *Carsologica Sinica*, 19(4): 366-371(in Chinese with English abstract).
- YANG Li-zheng, LIU Jun-ye. 1979. Try to use the curves of tracer's concentration and time to analyze the structural features of karst conduits[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, (4): 208-216(in Chinese with English abstract).
- YUAN Dao-xian. 2000. Aspects on the new round land and resources survey in karst rock desertification areas of south China[J]. *Carsologica Sinica*, 19(2): 103-108(in Chinese with English abstract).
- YUAN Dao-xian, ZHANG Cheng. 2008. Karst dynamics theory in China and its practice[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(3): 355-365(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ren-quan, LIANG Xing, JIN Meng-gui, ZHOU Ai-guo, SUN Rong-lin. 2005. The trends in contemporary hydrogeology[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 32(1): 51-55 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhen-wu. 1990. The corresponding relation between tracing curves and the types of conduit flowing-fields of karst underground water and its practical application[J]. *Carsologica Sinica*, 9(3): 211-219(in Chinese with English abstract).

CAGS