

基于示踪试验的王寨盆地水文地质条件研究

刘治政¹⁾, 朱恒华¹⁾, 杨丽芝¹⁾, 彭俊峰²⁾, 邢立亭³⁾, 王孝勤²⁾, 边农方²⁾

1) 山东省地质调查院, 济南, 250014; 2) 淄博市大武水源管理处, 山东淄博, 255400;

3) 济南大学, 济南, 250022

内容提要:王寨盆地是大武富水地段的一个特殊补给区,地质条件较为复杂,水文地质条件的研究相对较少,利用示踪试验对该区进行水文地质条件研究,是一种简单有效的方法。本次示踪试验采用钼酸铵作为示踪剂,历时75天,钼离子浓度历时曲线分为单峰型、双峰型和多峰型,地下水视流速平均值为233.73m/d。通过试验揭示了王寨盆地岩溶发育特征为溶孔、溶隙、裂隙、管道、溶洞并存,地下水径流通道有单一管道型、单管道有水池型、多管道型和多管有水池型,具有多向性和复杂性;主要的地下水径流通道有3个,均汇入淄河断裂带;地下水流向以西南、东南、正东(东北)为主,整体流动较为缓慢,溶质的运移以正东(东北)方向最快;王寨断层和边河断层具有良好的导水性。因试验在枯水期进行,降雨量较小,地下水开采的日周期性影响也相对稳定,故试验时段地下水流场较稳定,试验结果所揭示的水文地质问题也较准确。

关键词:王寨盆地;示踪试验;地下水;水文地质条件;钼离子

示踪试验是利用人工投放的示踪剂证明地下水流动方向和判断地下水来源的方法,可以分为定性和达到时间、半定量和定量三类(Jiang Guanghui et al., 2016)。在岩溶地区水文地质研究中,示踪试验是一个非常有效的方法,是研究地下水运动特征、划分地下分水岭、了解断裂构造水理特性及分析溶质运移特征的一种重要手段(Pei Jianguo et al., 2000; Yang Pingheng et al., 2008; Lu Chengpeng et al., 2009; Jiang Shoujun, 2012),具有所需资料少、数据获取容易、操作简单方便、评价精度较高等特点(Cheng Yaping et al., 2016; Wang Yuwei et al., 2019)。

王寨盆地位于淄博市大武富水地段中南部,属于溶蚀洼地,是相对封闭的山区高盆地,内部发育多条断裂构造,周边出露奥陶系马家沟群灰岩地层,岩溶发育不均一,地下水补给条件好,但开采条件较差,水位相对较高。在以往有关王寨盆地的工作成果中,大都侧重于地下水补给和排泄条件的研究,对地下水径流特征以及断裂构造导水性等的研究相对较少(荆甫荣等, 1989^①; 陈焕良等, 2013^②; 徐士民

等, 2014),加之该地区地质条件较为复杂,传统的方法难以查清水文地质条件(Guo Shoujun, 2012)。为此,在王寨盆地内布设了一组以钼酸铵为示踪剂的半定量示踪试验,基于试验成果的分析,对水文地质条件进行详细的论述。

1 示踪试验国内外研究现状

早期的岩溶水示踪试验,以目测为主,为定性研究,如1974年西安煤炭研究所进行的示踪试验等(Zhang Zhenwu et al., 1999)。70年代末至80年代初,示踪剂监测技术在我国得到一定的普及与应用,杨立铮、梅正星、鄢龙喜等作了大量的工作,初步实现了半定量示踪试验的研究,为提高我国的示踪试验水平起到了促进作用。90年代以后,逐步实现了定量研究,并开始解决实际问题,如1996年朱学愚等进行了示踪试验在岩溶水污染治理中的应用研究(Zhu Xueyu et al., 1997),2009年鲁程鹏等基于示踪试验求解了岩溶含水层水文地质参数(Lu Chengpeng et al., 2009)。近些年,随着技术的发展,示踪剂的选择呈现多样性,监测技术也得到了极

注:本文为淄博市财政重点项目(编号淄水资项目[2017]1号)资助成果。

收稿日期:2019-07-28;改回日期:2019-09-19;责任编辑:黄敏。

作者简介:刘治政,男,1985年生。山东省地质调查院工程师,主要从事水工环地质研究。Email:liuzhizheng1985@126.com。

引用本文:刘治政,朱恒华,杨丽芝,彭俊峰,邢立亭,王孝勤,边农方. 2019. 基于示踪试验的王寨盆地水文地质条件研究. 地质学报, 93(s1): 71~78. doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019212.

Liu Zhizheng, Zhu Henghua, Yang Lizhi, Peng Junfeng, Xing Liting, Wang Xiaojin, Bian Nongfang. 2019. On hydrogeological condition of Wangzhai basin based on tracer test. Acta Geologica Sinica, 93(s1): 71~78.

大提高,并实现了利用软件进行结果的定量分析,解决的实际问题也更加具体,准确度也更高,如2015年张亮等进行的典型岩溶泉水文地质条件的调查与分析(Zhang Liang et al., 2015),2017年罗明明等进行的南方岩溶水循环的物理机制及数学模型研究(Luo Mingming, 2017),2019年穆鹏飞利用示踪试验探查了煤层顶底板充水含水层水力联系(Mu Pengfei, 2019)。

国外示踪试验的研究起步较早,仪器较为先进,也经历了由定性研究一半定量研究一定量研究的过程,最早为1958年南斯拉夫的帕斯米卡进行落水洞的示踪试验,使用仪器监测了示踪剂浓度变化规律,经过多年的研究与发展,目前美国等在示踪剂监测方面已实现自动化。

2 研究区概况

2.1 地形地貌

王寨盆地位于淄博市临淄区中西部,大武富水地段的中南部,四周环山,中部低洼,是一个近东西向的山间盆地。盆地内部地势较低,高程156m左右,南北东地势相对较高,南部有大金山、卧虎山等系列山峰,高程250~420m,北部有土家山、汞山、大

山等系列山峰,高程220~300m,东部有花果山等系列山峰,高程在220~290m,西侧地势略低于盆地,在金山镇冯家村一带形成弱勢分水岭。盆地东部的花果山和南部的卧虎山之间有一条较宽沟谷,将盆地与大武富水地段地相连。

2.2 地层与构造

王寨盆地浅表被第四系覆盖,西部厚度3~5m,东部20~30m,下伏基岩为奥陶系马家沟群和九龙群碳酸盐岩,地层倾向北或北偏西,倾角10°左右(图1),自下而上为炒米店组($\epsilon_4 O_1 c$)、三山子组($\epsilon_4 O_1 s$)、东黄山组($O_2 d$)、北庵庄组($O_2 b$)、土峪组($O_2 t$)、五阳山组($O_2 w$)、阁庄组($O_2 g$)、八陡段($O_{2-3} b$)。

盆地周边构造比较复杂,对地层分布起控制作用的主要构造有淄河断裂带、炒米店地堑、金岭断层、文登-冯家断层、王寨断层、边河断层等,其中淄河断裂带由2~4条断层组成,是区域性大规模北北东向隐伏断裂带,为张扭性断层,次一级断层很发育。

盆地及周边尚未发现岩浆侵入岩出露,以北的金岭一带有岩浆岩侵入,南部山区也通过钻探发现侵入岩。

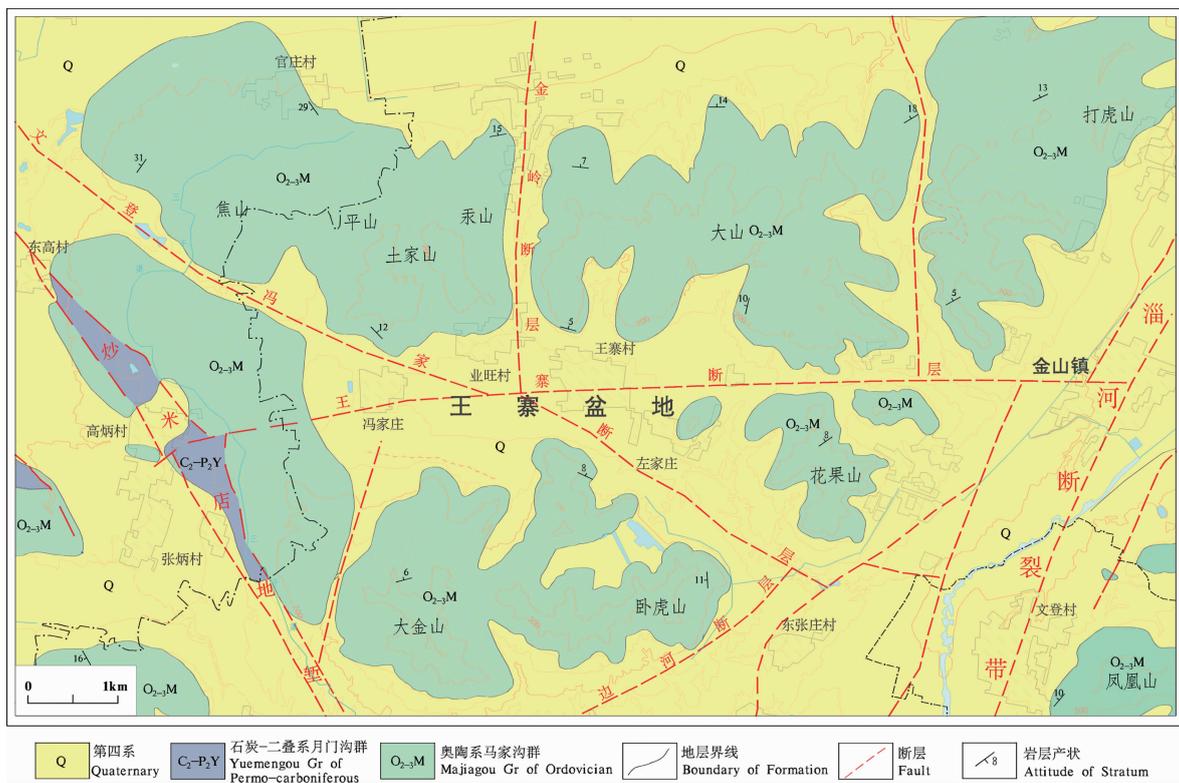


图1 王寨盆地地质略图
Fig.1 Geological sketch map of Wangzhai basin

2.3 水文地质条件

盆地上覆第四系孔隙水赋存条件差,不能形成稳定含水层,是大气降水补给岩溶水的转换层。地下水类型主要为裂隙岩溶水,岩溶在不同段均有发育,类型以溶孔和垂向裂隙为主,含水层集中在五阳山组和北庵庄组。盆地内部及周边富水性较差,单井涌水量一般 $10\text{m}^3/\text{h}$,断裂带附近可达 $40\text{m}^3/\text{h}$,盆地东部的淄河断裂带附近,岩溶极为发育,北庵庄组和五阳山组发现有溶洞,富水性强,单井涌水量 $200\text{m}^3/\text{h}$ 左右。

区内数条断层共同控制着区域岩溶地下水的运移、富集,其中淄河断裂带在本区域文登村以南因闪长岩体的多期侵入呈现阻水特性,以北为透水,炒米店地堑为阻水构造(杨丽芝等,2019^⑥)。

盆地汇水面积约为 15km^2 ,基本没有河流,地表入渗快,地下水补给条件较好,但开采条件较差,以径流排泄为主,是大武富水地段的一个特殊补给区(陈焕良等,2013^⑥; Xu Shimin et al., 2014)。

王寨盆地岩溶地下水水位埋深特别大,多数在 $110\sim 150\text{m}$ 之间,最深可达 240m ,最高水位位于韩家庄西南,并以此为中心形成高水位带,向四周径流(图 2)。年内水位变化较大,水位差可达 $50\sim 60\text{m}$,主要受降水影响,丰水期来临之前,水位降至年内最低,雨季来临,水位随之上涨,至 9 月底 10 月初,上

升至年内最高水位。年际变化存在着陡升缓降的特点,在丰水年,接受大气降水补给后,水位迅速回升到高位,之后在平水年或连续枯水年,水位持续缓慢下降。

3 示踪试验及结果分析

王寨盆地示踪试验的目的在于探索岩溶的发育及地下水的运动特征,分析断裂构造的导水性等。试验步骤包括示踪剂选取、水位统测、取样点布置、示踪剂离子背景值分析、投放量计算、示踪剂投放、取样、检测分析等几个过程。

3.1 试验方案

国内相关研究表明,岩溶地下水中钼离子含量很低,物化性质稳定、毒性小、灵敏度高,实际操作简单可行(Jiang Shoujun, 2012; Yuan Gangkun, 1986),而钼酸铵在水中的溶解度较大,且经济较为合理,因此,本次试验选钼酸铵作示踪剂,钼离子为示踪离子。

为便于布置取样点,需掌握王寨盆地岩溶地下水的流场特征,通过对王寨盆地内 37 个水位监测点进行统测,确定高水位带仍位于韩家庄西南一带,初步确定地下水的主体流向为东、东南。

根据已知的地质和水文地质条件,将试验的投源点布设在地表弱势分水岭西侧的 WK01 井,并以

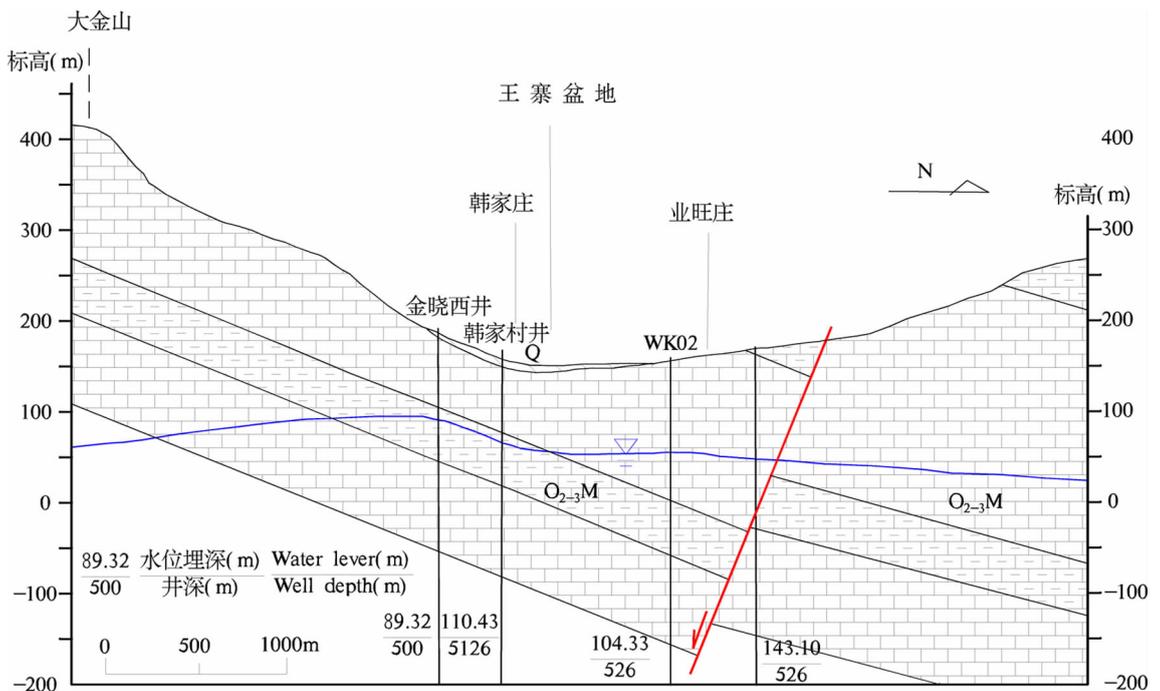


图 2 王寨盆地南北向水文地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeological profile from south to north of Wangzhai basin

峰值衰减后一段时间稳定值大于背景值就认为有检出,否则没有检出;若抽水取样为非连续性(隔天或隔几天取样),钼离子浓度不低于背景值 3~4 倍,且连续出现 2~3 次,则认为检出。

27 眼监测井中,钼离子浓度出现峰值的取样点有 8 个,分别是石海机井、老黄矿井、徐旺矿井、金晓西井、王寨机井、齐华托盘、西张水 1 井和边河北井,其余取样点未出现峰值,或仅一两次超出背景值,视为未检出。示踪剂的扩散方向为投放点的西南、东南、正东及东北方向,西、西北及正北方向未明显扩散(图 3),初步判断王寨盆地西部岩溶地下水向西南、东南、东和东北方向运动。

截至最后一期样品采集,对王寨试验区示踪剂进行回收量估算,27 个检出取样点消耗 12.765kg,地下水滞留量消耗 170.6kg,投源点残留量 15.246 kg,共计 198.611kg,占投放量的 94.58%,说明检测点的布置合理,示踪剂没有通过其它途径流出(Cheng Yaping et al., 2016)。

根据检测结果绘制检出取样点的示踪试验浓度历时曲线,可以将其分为单峰型、双峰型和三峰型三类(Liu Shulin et al., 2015; Yang Lizheng et al., 1979; Xing Liting et al., 2017)(表 2),并可以此分析投源点至取样点岩溶含水介质的展布和组合特征。

表 2 检出取样点浓度历时曲线类型

Table 2 Type of concentration duration curve of detection points

取样点	浓度历时曲线	曲线类型	曲线亚型	曲线解释(兰晓荷等, 2018)	定性描述
老黄矿井		单峰型	长尾单峰亚型		岩发育单一通道,下游通道变窄,或岩溶通道有储存空间
边河北井			钝单峰亚型		岩溶发育较大的单一通道,且上下游通道基本一致,岩溶发育较均一
王寨机井		双峰型	前高-后低双峰亚型		岩溶发育两个通道,一是主通道,地下水流速快,二是次通道,地下水流速慢
徐旺矿井					
齐华托盘		三峰型	高-低-低三峰亚型		岩溶发育三通道,三个通道地下水流速相差不大
西张水 1 井			低-高-低亚型		岩溶发育三通道,一通道有储存空间,三通道变窄,且受另两通道稀释
石海机井					
金晓西井					

通过示踪试验还可以求取地下水流的视速度,视流速是指从投源点至取样点直线距离除以示踪剂初见峰值时间所得的值。虽然用直线距离代替实际运移距离有一定的误差,但却能提供不同含水层、不同地段、不同方向地下水运动的统计学特征。王寨盆地示踪试验地下水视流速平均值为 233.73m/d,最大值为 420.00m/d,说明地下水径流整体缓慢,局部较快,东南方向(106°)和东北方向(73°)的视流速较其他方向要快,以东南方向最快(表 3)。

4 示踪试验揭示的水文地质问题

示踪试验结果是取样点所在区域综合水文地质条件的反映,反过来,示踪试验的各类结果都能一定程度上独立的或相互印证的揭示某些水文地质问题。王寨盆地示踪试验在枯水期进行,降雨量较小,另外,盆地内开采条件较差,其开采的日周期性影响相对稳定,故试验时段地下水流场较稳定,试验结果所揭示的水文地质问题也较准确。

表3 王寨盆地示踪试验地下水视流速计算表

Table 3 Groundwater apparent velocity of tracer test in Wangzhai basin

检出点	峰值浓度 ($\mu\text{g/L}$)	初峰到达 历时(d)	距离(m)	视流速 (m/d)	超过背景 值倍数
金晓西井	12.6	6	1500	250.00	5.97
齐华托盘	16.45	18	5137	285.39	10.97
王寨机井	22.6	13	2959	227.62	15.07
石海机井	47.72	5	2100	420.00	15.39
边河北井	18.76	19	2097	110.37	13.40
徐旺矿井	8.71	12	1433	119.42	3.52
老黄矿井	30.65	4	894	223.50	8.40
西张水1井	19.38	22	5137	233.50	12.92

4.1 岩溶地下水运动特征

从试验区钼离子扩散分布图,可以看出地下水的径流以向西南、东南、正东和东北为主,结合试验期间绘制的多期地下水水流场,确定王寨盆地地下水的主径流通道有3个,一是沿老黄矿井—徐旺矿井一带小型断裂构造向西南径流,遇炒米店地堑阻水影响转向东南径流,后沿着边河断裂向淄河断裂带径流;二是沿金晓西井—边河北井与文登—冯家断裂大致平行的方向向东南径流,后沿着边河断裂向淄河断裂带径流;三是往东北径流至王寨断裂后,向东径流至淄河断裂带。每个主径流通道的地下水最终都汇入淄河断裂带,印证了前人关于王寨盆地是大武富水地段一个特殊补给区的论断。

为研究3个主径流通道内溶质的运移特征,需对试验期间的水力坡度和视流速进行对比分析。水力坡度是指投源点到取样点的水位差与两者之间直线距离的比值,主要影响示踪剂的运移速度,对于某一固定路径,水力坡度越大,示踪剂的运移速度越快。因试验期间地下水水流场较稳定,水力坡度也具有短期的稳定性,根据图3地下水等水位线,计算各检出点与投源点间的水力坡度,并与视流速进行对比(表4)。

表4 王寨盆地示踪试验检出点水力坡度与视流速关系表
Table 4 Relationship between hydraulic slope and apparent velocity of tracer test in Wangzhai basin

检出点	水位(m)	水位差 (m)	距离 (m)	水力坡度 (%)	视流速 (m/d)
金晓西井	38.321	6.350	1500	0.423	250.00
齐华托盘	-2.368	47.039	5137	0.916	285.39
王寨机井	18.731	25.940	2959	0.877	227.62
边河北井	15.235	29.436	2097	1.404	110.37
徐旺矿井	40.397	4.274	1433	0.298	119.42
老黄矿井	32.785	11.886	894	1.330	223.5
西张水1井	-2.793	47.464	5137	0.924	233.5

从表中可以看出,边河北机井的水力坡度在所有检出孔中是最大的,但是对应的视流速最小,表明了向东南方向上溶质运移具有明显的滞缓性;老黄矿井的水力坡度比齐华托盘的大,而视流速小,说明从溶质的运移往东(东北)方向上较西南方向上更为通畅。

4.2 岩溶与岩溶通道发育特征

岩溶的发育受到断层岩性、地质构造和岩溶地下水循环交替的控制,程度随着深度的增加而逐渐减弱,不同组段的岩溶发育也不一样。根据表2示踪试验浓度历时曲线的分类及解译,结合已有钻孔资料的分析,王寨盆地岩溶发育特征为溶孔、溶隙、裂隙、管道、溶洞并存,岩溶地下水径流通道有单一管道型、单管道有水池型、多管道型和多管有水池型。

老黄矿井和边河北井浓度历时曲线为长尾单峰亚型,说明投源点与老黄矿井和边河北井之间都是单一通道,老黄矿井的视流速为大于边河北井的2倍,说明边河北井下游岩溶通道变窄,出现浓度拖尾现象,而老黄矿井则是上游通道发育有相对较大的储存空间,通过间断性抽水,使溶洞中的示踪剂,缓慢地释放;王寨机井和徐旺矿井均为钝单峰亚型,表明在采样点的上下游之间为单一通道,且上下游通道的大小基本没变,岩溶发育相对均一,结合盆地的地层与构造特征,认为均是沿着断裂带运移的;其它的均为多峰型,证明了岩溶与岩溶通道发育的多向性和复杂性。

4.3 断层构造的导水性

断层构造的导水性,直接影响着地下水的存赋状态和运动特征,根据示踪试验结果,结合已知的水文地质条件,可分析判断盆地内王寨断层、边河断层等的导水性能。

西张水1井钼离子峰值浓度为 $19.38\mu\text{g/L}$,高于背景值浓度近13倍,分析认为该井中的一部分示踪剂首先在水力梯度驱动作用下,从投源井沿东南方向运移至边河北井,然后在边河断层影响下沿着破碎带往西张水1井运移,因此边河断层导水性能良好(图4);同理,认为王寨断层也是导水性能良好;因文登—冯家断层两侧取样点较少,无法根据现有的试验结果推测其导水性能。

5 结论

(1)王寨盆地地质条件相对复杂,研究程度不高,示踪试验是研究区域水文地质条件的一个有效

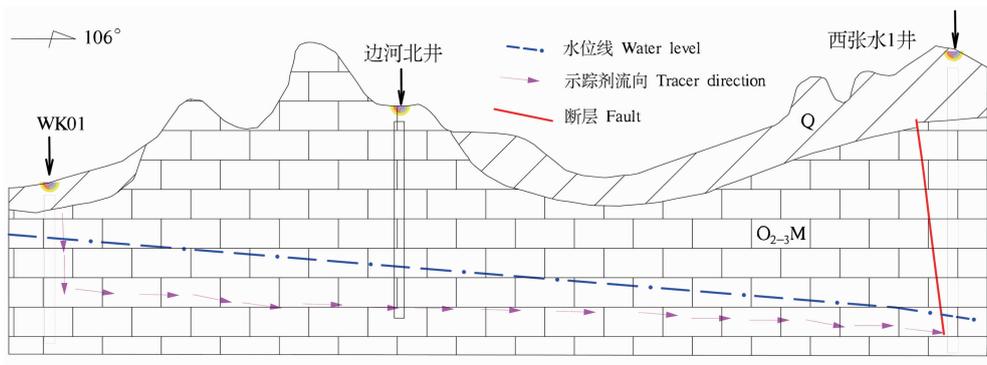


图4 WK01井—西张水1井方向示踪剂扩散剖面示意图

Fig. 4 Profile of molybdenum ion diffusion from WK01 to Xizhangshui 1 well

方法,可通过试验结果的分析,可了解地下水的运动特征、断裂构造的水理特性及溶质运移特征等,在类似地区效果如何,需要进一步验证。

(2)王寨盆地是大武富水地段一个特殊补给区,其岩溶地下水流动具有多向性,以西南、东南、正东和东北为主,主要的径流通道有3个,最终均都汇入淄河断裂带。

(3)王寨盆地岩溶与岩溶通道发育具有多向性和复杂性,岩溶发育特征为溶孔、溶隙、裂隙、管道、溶洞并存,岩溶通道有单一管道型、单管道有水池型、多管道型和多管有水池型。

(4)王寨断层与边河断层导水性能良好,断层破碎带是王寨盆地主要的径流通道类型之一。

注 释

- ① 荆甫荣,徐绍辉,张胜亮,魏鲁峰,李万香,赵玉仁. 1989. 淄博市大武水源地地下水资源核算报告.
- ② 陈焕良,徐士民,汪新芹,程秀明,秦耀军,王庚,马超,范国城,王彬,郭道冉,马丁,孙静,李娅,张若曦. 2013. 淄博市刘征地区供水水文地质勘查报告.
- ③ 杨丽芝,刘治政,朱恒华,周洋,纪汶龙,刘柏含,刘春华,李双,包锡麟,尚浩. 2019. 淄博市大武水源地三维可视化信息系统建设成果报告.
- ④ 兰晓荀,曹倩倩,迟光耀,侯新宇,董亚楠,张欣慧,李江柏,武东强,孟庆哈. 2018. 淄博市大武水源地示踪试验研究报告.

References

Cheng Yaping, Chen Yudao. 2016. Review of quantitative tracing studies on karst underground river. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(2): 242~246 (in Chinese with English abstract).

Jiang Guanghui, Guo Fang, Tang Qingjia, Li Xin, Zeng Xinru. 2016. Application of tracer test techniques in hydrogeological survey in karst area. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 52(3): 503~511 (in Chinese with English abstract).

Guo Shoujun. 2012. Application of tracer test in analysis of hydrogeological conditions of karst water in Eastern Liupanshan piedmont. *Ground Water*, 34(1): 27~29 (in Chinese with English abstract).

Lu Chengpeng, Shu Longcang, Yuan Libo, Zhang Rongrong, Huang Bijuan, Wang Binbin. 2009. Determination of hydrogeologic

parameters of karst aquifer based on tracer test. *Journal of Jilin University (Natural Science Edition)*, 39(4): 717~721 (in Chinese with English abstract).

Luo Mingming. 2017. The physical mechanism and mathematical model of karst water circulation: a case study of the Xiangxi River karst basin, South China. PhD thesis of China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).

Liu Shulin, Fan Zeyang, Yang Pingheng, Lu Bingqing, Huang Shansong, Zhang Yu, Chen Xuebin. 2015. Determination of the conduit structure in a karst subterranean river based on the technique of online and high-resolution tracing test—A case study in Pengshui County, Chongqing. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 37(10): 125~130 (in Chinese with English abstract).

Mu Pengfei. 2019. Application of tracer test in hydraulic connection exploration of water-filled aquifer at the top and bottom of coal seam. *China Coal*, 45(5): 55~58 (in Chinese with English abstract).

Pei Jianguo, Xie Yunqiu, Zhang Cheng, Weng Jintao. 2000. Tracing Test incorrosionalhill area—A case study of Xinhua County, Hunan Province. *Carsologica Sinica*, 19(4): 366~371 (in Chinese with English abstract).

Wang Yuwei, Wang Feng, Xu Zhenghe, Pan Weiyan, Wang Tong. 2019. Research on the characteristics of groundwater recharge in Weishan irrigation district based on artificial tracer method. *China Rural Water and Hydropower*, 5: 142~148 (in Chinese with English abstract).

Xing Liting, Li Changsuo, Zhou Juan, Song Guangzeng, Xing Xuerui. 2017. The characteristics of karst channel in the Spring of Jinan region. *Science Technology and Engineering*, 17(17): 57~65 (in Chinese with English abstract).

Yuan Gangkun. 1986. A new groundwater tracer—ammonium molybdate. *Rock and Mineral Analysis*, 5(2): 111~113 (in Chinese with English abstract).

Yang Lizheng, Liu Junye. 1979. Analysis of structural characteristics of karst pipeline by using tracer's Concentration-Time Curve. *Journal of Chengdu College of Geology*, 4: 44~49 (in Chinese with English abstract).

Yang Pingheng, Luo Jianyin, Peng Wen, Xia Kaisheng, Lin Yushi. 2008. Application of online technique in tracer test—A case in Qingmuguan Subterranean River System, Chongqing, China. *Carsologica Sinica*, 27(3): 215~220 (in Chinese with English abstract).

Zhang Liang, Chen Zhihua, Zhou Hong, Luo Chaohui. 2015. Investigation and analysis of the hydrogeological characteristics of the typical karst spring in the Xiangxi River Basin: exemplified by the Bailong Spring in Xingshan County of Hubei. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 42(2): 31~37 (in Chinese with English abstract).

Zhu Xueyu, Xu Shaohu, Si Jinfeng. 1997. Application of tracer test

to the remediation of contaminated fracture-karst water in Zibo City. *Carsologica Sinica*, 16(2): 131~137 (in Chinese with English abstract).

Zhang Zhenwu, Yang Shengqiang. 1999. New development of tracer detection technology of karst water. *Engineering Investigation*, 5: 40~43 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

程亚平, 陈余道. 2016. 岩溶地下河定量示踪研究方法综述. *桂林理工大学学报*, 36(2): 242~246.

姜光辉, 郭芳, 汤庆佳, 李鑫, 曾莘茹. 2016. 人工示踪技术在岩溶地区水文地质勘察中的应用. *南京大学学报(自然科学)*, 52(3): 503~511.

姜守君. 2012. 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. *地下水*, 34(1): 27~29.

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. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(4): 717~721.

罗明明. 2017. 南方岩溶水循环的物理机制及数学模型研究——以香溪河岩溶流域为例. 中国地质大学博士学位论文.

刘树林, 范泽英, 杨平恒, 卢丙清, 黄山松, 张宇, 陈雪彬. 2015. 基于在线高分辨率示踪试验的岩溶地下河管道特征分析——以重庆市彭水县岩窝坨至纸厂泉段地下河为例. *西南大学学报(自然科学版)*, 37(10): 125~130.

穆鹏飞. 2019. 示踪试验在煤层顶底板充水含水层水力联系探查中的应用. *中国煤炭*, 45(5): 55~58.

裴建国, 谢运球, 章程, 翁金桃. 2000. 湘中溶蚀丘陵区示踪试验. *中国岩溶*, 19(4): 366~371.

王玉伟, 王凤, 徐征和, 潘维艳, 王通. 2019. 基于人工示踪法的位山灌区地下水补给特征研究. *中国农村水利水电*, 5: 142~148.

邢立亭, 李常锁, 周娟, 宋广增, 邢学睿. 2017. 济南泉域岩溶径流通道特征. *科学技术与工程*, 17(17): 57~65.

徐士民, 姜玉敏, 范国城. 2014. 王寨盆地水文地质条件新认识. *科技视界*, 70.

袁纲坤. 1986. 一种新的地下水示踪剂——钼酸铵一催化示波极谱法测定示踪水中微量相. *岩矿测试*, 5(2): 111~113.

杨立峥, 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. *成都地质学院学报*, 4: 44~49.

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. *中国岩溶*, 27(3): 215~220.

张亮, 陈植华, 周宏, 罗朝晖. 2015. 典型岩溶泉水文地质条件的调查与分析——以香溪河流域白龙泉为例. *水文地质工程地质*, 42(2): 31~37.

朱学愚, 徐绍辉, 司进峰. 1997. 示踪试验在淄博裂隙岩溶水污染治理中的应用. *中国岩溶*, 16(2): 131~137.

张祯武, 杨胜强. 1999. 岩溶水示踪探测技术的新进展. *工程勘察*, 5: 40~43.

On hydrogeological condition of Wangzhai basin based on tracer test

LIU Zhizheng^{* 1)}, ZHU Henghua¹⁾, YANG Lizhi¹⁾, PENG Junfeng²⁾,
XING Liting³⁾, WANG Xiaoqin²⁾, BIAN Nongfang²⁾

1) Shandong Institute of Geological Survey, Jinan, 250013;

2) Dawu Water Resources Management Office of Zibo, Zibo, Shandong, 255400;

3) University of Jinan, Jinan, 250022

* Corresponding author: liuzhizheng1985@126.com

Abstract

The Wangzhai basin is a special recharge area for the Dawu water-rich district. It is characterized by complex geological conditions and study on its hydrogeological conditions is relatively poor. It is a simple and effective method to study hydrogeological conditions in this area by tracer test. The tracer test used Ammonium Molybdate as tracer lasted for 75 days. The duration curve of molybdenum ion concentration can be divided into single peak type, double peak type and multi-peak type. The average apparent velocity of groundwater is 233.73m/d. The experiment reveals that karst development of the Wangzhai basin is characterized by the coexistence of dissolution pore, dissolution gap, fissure, pipeline and karst cave, and channels for underground water contain single channel with or without tank and multiple channels with or without tank. All the channels are of multiple directions and complexity. There are three main groundwater runoff channels, all of which lead to Zihe fault zone. The groundwater flows mainly to southwest, southeast and east (northeast) at a slower speed. Solutes migrate most rapidly to the east (northeast) direction. The Wangzhai fault and Bianhe fault have good water conductivity. Because the test was carried out in the dry season with less precipitation, and the daily periodic influence of groundwater exploitation was relatively stable, the groundwater flow field was relatively stable during the test period, and the test results reveal hydrogeological problems in a relatively accurate way.

Key words: Wangzhai basin; tracer test; groundwater; hydrogeological conditions; molybdenum ion