

地下水多元示踪试验在岩溶地区的应用

刘兴云 曾昭建

(中国有色金属工业长沙勘察设计研究院, 湖南长沙 410011)

【摘要】 通过广西某排泥库区进行地下水多元示踪试验的工程实例, 介绍了多元示踪试验在岩溶地区的成功应用及有效判析方法, 对有效查明岩溶地区地下水水力联系, 正确评价场区水文地质条件具有一定的借鉴和参考价值。

【关键词】 多元示踪试验; 时浓曲线; 岩溶管道流

【中图分类号】 TU 46; P 64

Application of Groundwater Multi-tracer Test in Karst Area

Liu Xingyun Zeng zhaojian

(China Nonferrous Metal Industry Changsha Investigation and Design Research Institute, Changsha Hunan 410011 china)

【Abstract】 Based on a multi-tracer test, the application of the test and the analysis method is introduced. And it is useful for the study of the correlation of the flows of groundwater and the evaluation of hydrogeological condition in Karst region.

【Key Words】 multi-tracer test; concentration-time curve; Karst conduit flow

1 工程概况

广西某排泥库位于右江复向斜东南部那豆背斜北东翼的岩溶峰丛洼地中, 北西侧紧邻已建一号排泥库, 距板下村 1.5 km, 距布见水库 4.0 km。库区自南向北由两个洼地组成, 面积 0.6 km²。地势南高北低, 岩溶及构造发育, 水文地质条件复杂。为有效查明库区内外地下水的水力联系特征, 特在该库区进行了地下水的示踪试验^[1]。

2 地下水多元示踪试验

2.1 试验目的

地下水示踪试验的主要目的是为查明库区内外地下水的水力联系, 尤其库内与库区西北部布见水库附近各水点的水力联系, 确定地下水的主导流向, 计算地下水流速^[2], 为评价该排泥库对周围水点(泉点)水源的污染情况提供可靠依据。

2.2 示踪剂选择与确定

示踪剂的选择原则为无毒、自然本底值低, 不受围岩干扰, 化学性能稳定, 不改变地下水的运移方向, 易检测, 灵敏度高且成本相对低。根据场区区域地质调查情况和以往经验, 本次试验选择钼酸铵、荧光素钠和氯化锌三种试剂。试验前, 对三种试剂在测区内接收点的本底值进行了调查, 证明采用三种试剂的有效合理性。

2.3 示踪剂投放量

示踪剂投放量的确定应考虑如下因素: 示踪剂投放后, 经扩散、运移到达饮用水源, 其浓度不能超出我国饮用水标准的有关规定, 且易于被所选用的检测方法检测而不低于仪器的检测灵敏度。

结合测区的地下水量、水力坡度、示踪距离及场区岩溶发育程度, 并参照库区勘察资料, 本次试验采用下式计算示踪剂的投放量

$$M = Kw / j \quad (1)$$

式中: M 为示踪剂投放量; K 为岩溶率系数; w 为示踪区段总水量, L/s; j 为检测方法灵敏度, $\mu\text{g/L}$ 。

经计算, 三种示踪剂投放量分别为: 1) 荧光素钠 20 kg; 2) 钼酸铵 110 kg; 3) 氯化锌 80 kg。

2.4 投放及接收点选择及分布

2.4.1 投放点的选择及分布

选择库区两个洼地的 S_1 、 S_4 水点作为投放点, 另选择库区西北侧 S_{37} 作为投放点, 以确认区域资料中库区西北侧为测区地下水上游的真实性。各投放点具体位置见图 1。本次示踪试验于 2001 年 8 月 1 日大雨期间一次性投放。

投放点 S_1 位于龙力洼地中心, 为该洼地内雨后地表水流最主要的消水洞之一, 椭圆形, 4.0 m × 2.0 m, 水深 12.1 m (相当于标高 305.42 m)。围岩

为下石炭岩关组灰岩。该点作为钼酸铵的投放点,并作库外投放点 S_{37} 的接收点。

投放点 S_4 位于布弄洼地西北侧,为该洼地内的主要消水洞之一,岩溶较发育,条带形, $4.5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$, 向下渐窄,水位深度 12.5 m (标高 303.03 m) 围岩为下石炭岩关组灰岩。该点为氯化锌的投放点。

投放点 S_{37} 位于布弄洼地西北侧的农作洼地内,为该洼地内的主要消水洞之一。 S_{36} 泉水流经 1.2 km 后由此汇入地下,水点平面呈葫芦形, $20.0\text{ m} \times (3.0 \sim 5.0)\text{ m}$, 地下水位深度 15.0 m (相当于标高 320.60 m)。围岩为下石炭岩关组灰岩。该点为荧光素钠的投放点。

2.4.2 接收点的选择及分布

正确选择接收点是示踪试验取得良好地质效果的关键环节。本次试验接收点选择遵循如下原则:1)侧重于库区北东方向对水库有影响的水文地质点,该区域内取样点适当加密,库区东南下游取样点适当变稀;2)侧重于与库区构造有关的水文地质点;3)饮用水源点及一号排泥库建成后曾产生泄漏冒浆的水文地质点;4)测区内有代表特征的暗河、溶蚀裂隙及溶洞水文点。根据选点原则,在 48 km^2 测区范围内共布置投放点 3 个,接收取样点 19 个,其具体位置及分布见图 1。

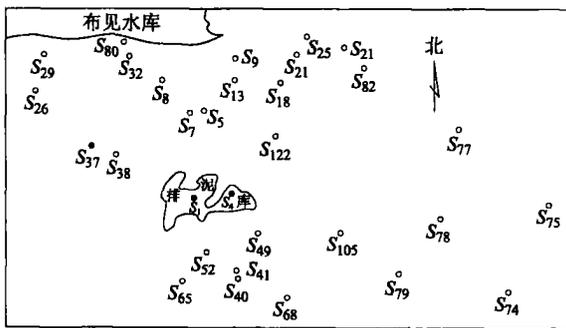


图 1 示踪试验投放、接收点示意图

2.5 试验技术要求

2.5.1 示踪剂的投放

钼酸铵试剂先在室内加工成粉末状,运至投放点,经现场人工搅拌溶解后,将溶液直接导入投放点的地下水中;氯化锌和荧光素钠试剂现场溶解成溶液后,经导管导入或直接倒入投放点地下水中。

2.5.2 示踪取样

取样是示踪试验进行成败的关键环节,取样时间间隔主要根据测区水文地质特征而定,每个取样

点均派专人负责。根据取样时间要求,按样瓶清洗、取样、贴标签、装入黑色包装袋避光保存的流程程序取样,再用专车及时运至工地实验室进行分析检测。

2.6 示踪样品检测技术

对钼酸铵试剂采用苯芴酮-CTAB 分析比色法,测定钼的含量,最低检出浓度为 $20\text{ }\mu\text{g/L}$;对氯化锌试剂采用原子吸收法测定锌的含量,最低检出浓度为 $10\text{ }\mu\text{g/L}$ 。对荧光素钠试剂采用目视/比色法测定,最低检出浓度为 $0.048\text{ }\mu\text{g/L}$ 。为保证试验效果,各样品待静置澄清后再进行检测,对部分样品进行复检,确保分析数据的可靠性。

2.7 资料整理

根据示踪试验取样点的本底调查及样品分析结果,确定样品出现异常浓度,绘制时间与浓度曲线,计算区内地下水平均流速,确定地下水(各主次通道)的流向。示踪试验结果见表 1。

3 多元示踪试验结果判别

3.1 钼酸铵示踪剂

示踪剂投放后,经 7 天连续取样分析,示踪区域内 18 个取样点全部接收到,据时浓曲线及流速分析,推断该区存在三种不同地下水岩溶管道流^[3]:

第一种为快速岩溶管道流,对应于取样水点 S_{24} 、 S_{25} 、 S_{75} 、 S_{77} 、 S_{78} 、 S_{105} 。

投放示踪剂 8.5 小时后,8 月 2 日 1 时首先在 S_{105} 出现,最大浓度达 $3\ 000\text{ }\mu\text{g/L}$,接收点 S_{75} 、 S_{77} 分别在 2 日 19 时和 16 时有钼离子反应,最大浓度大于 $100\text{ }\mu\text{g/L}$,曲线特征呈单峰,异常两翼变幅较大,4~5 日降至低值,说明该区构造导水较快。在 S_{105} 的时浓曲线中,8 月 2 日 1 时至 19 时间异常浓度为 $400 \sim 3\ 000\text{ }\mu\text{g/L}$,且较大浓度维持时间达 18 h,说明地下水补给稳定,岩溶管道单一,该点导水最快。对照该类型水点,其异常曲线呈多尖峰值出现,不稳定,原因主要为该区羽毛状构造较发育,投放点处于岩溶裂隙发育区,当示踪剂顺羽毛状构造流至某一部位时,遇到岩溶主通道直达水点。由于投放示踪剂后断续下雨,地表水很快转入地下,地下水位抬高,加快了地下水中示踪剂的运移速度,导致示踪剂浓度稀释加快,发生不规则变化。该类型水点除断层构造导水外,其间可能存在一更为发育的地下岩溶快速流管道。计算结果表明,流速最快者 271.8 m/h ,一般流速 $137.7 \sim 244.5\text{ m/h}$ 。

表 1 投放、接收点主要参数及接收情况

水点编号	标高/m	与投放点距离/m			取样次数	铝 酸 铵			氯 化 锌			荧 光 素 钠		
		S ₁ (铝酸铵)	S ₄ (氯化锌)	S ₃₇ (荧光素钠)		异常时间	最大浓度 /($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均流速 $v/(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$	异常时间	最大浓度 /($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均流速 $v/(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$	异常时间	最大浓度 /($10^{-3}\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均流速 $v/(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$
S ₁	317.52		560	1 600	48				8月1日 22:00	130	101.8			
S ₅	342.5	214.0	2 040	1 860	87	8月3日 10:00	140	51.6	8月2日 7:00	40	140.7			
S ₈	271.34	292.0	2 920	2 140	92	8月3日 10:00	200	70.4	8月2日 19:00	80	110.2			
S ₉	251.9	307.5	2 900	2 800	129	8月3日 19:00	80	60.9	8月1日 22:00	60	527.3	8月5日 10:00	48	38.3
S ₁₈	281.7	271.0	2 380	2 860	90	8月3日 19:00	70	53.7	8月2日 16:00	40	101.3			
S ₂₄	226.0	375.0	3 330	3 990	129	8月2日 19:00	140	141.5	8月2日 1:00	50	391.8	8月4日 10:00	80	81.4
S ₂₅	225.0	365.0	3 340	3 680	91	8月2日 19:00	120	137.7	8月2日 1:00	100	393.0			
S ₂₆	301.5	314.0	3 430	1 590	90	8月4日 13:00	20	45.8	8月3日 4:00	100	96.6			
S ₂₉	258.5	399.0	4 210	2 610	87	8月3日 13:00	60	89.7	8月1日 22:00	90	765.0			
S ₄₉	352.6	890	590	2 490	119	8月3日 22:00	60	16.6	8月2日 1:00	70	69.4	8月4日 10:00	64	50.6
S ₆₅	382.1	1 130	1 380	2 460	130	8月3日 19:00	80	22.4	8月3日 4:00	70	38.9	8月5日 10:00	48	33.7
S ₇₅	143.0	6 480	5 950	7 880	84	8月2日 19:00	340	244.5	8月2日 4:00	120	517.4			
S ₇₇	226.2	5 090	4 530	6 200	122	8月2日 16:00	120	216.6	8月2日 7:00	240	312.4	8月4日 7:00	48	134.8
S ₇₈	224.7	4 680	4 180	6 130	81	8月3日 1:00	160	144.0	8月2日 16:00	90	177.9			
S ₇₉	262.8	3 560	3 130	5 100	114	8月3日 22:00	20	66.5	8月3日 22:00	60	58.5	8月4日 13:00	64	98.1
S ₈₀	243.0	3 850	3 900	2 790	90	8月3日 10:00	100	92.8	8月3日 10:00	70	94.0			
S ₁₀₅	304.0	2 310	1 850	3 850	128	8月2日 1:00	3 000	271.8	8月2日 10:00	80	105.7	8月3日 1:00	96	240.6
S ₁₂₂	351.0	1 750	1 360	2 410	128	8月3日 10:00	80	42.2	8月2日 10:00	50	77.7	8月5日 4:00	48	36.0
S ₄₀	373.6	1 200	1 230	2 730	130	8月3日 10:00	40	28.9	8月2日 1:00	80	144.7	8月5日 16:00	80	34.6

第二种为中等流速岩溶管道流,对应于取水点 S₅、S₈、S₉、S₁₈、S₂₉、S₇₉、S₈₀。

投放示踪剂 17.5 小时后,于 8 月 3 日 10~13 时,在 S₅、S₈、S₉、S₈₀ 出现,最大浓度值 200 $\mu\text{g}/\text{L}$,曲线特征呈双峰,说明其间存在两条以上地下水岩溶管道,水力联系较好。计算结果表明,该类水点流速最快者 92.8 m/h,一般流速 51.6~89.7 m/h。

第三种为慢速(渗流)岩溶管道流,对应于取水点 S₂₆、S₄₉、S₆₅、S₁₂₂、S₄₀。

从该类水点的时浓曲线,异常曲线形态亦呈单峰和双峰值出现,一般浓度 20~60 $\mu\text{g}/\text{L}$,最大浓度 80 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。其浓度值较低,说明它们之间的水力联系较差,从而推测它们的渗漏路径主要来源于裂隙渗漏通道^[4-5](见图 2)。

3.2 荧光素钠示踪剂

荧光素钠示踪剂投放后,试验场区内仅 9 个取水点接收到,分别为 S₉、S₂₄、S₄₀、S₄₉、S₆₅、S₇₇、S₇₉、S₁₀₅和 S₁₂₂。

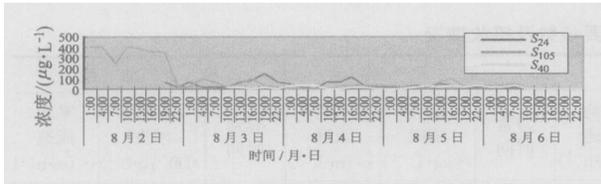


图2 钼酸铵时浓曲线

示踪剂投放后 16 h, 在水点 S_{105} 接收到, 最大浓度为 $90 \times 10^{-3} \mu\text{g/L}$, 计算最大流速达 240.6 m/h, 表明该水点与投放点间存在明显的快速流岩溶管道。投放后 42~52 h 快速到达 S_{24} 、 S_{49} 、 S_{77} 、 S_{79} , 流速为 50.6~134.8 m/h, 最大浓度 $80 \times 10^{-3} \mu\text{g/L}$, 说明该类水点与投放点间亦存在快速流岩溶管道, 推测可能为构造导水通道; 投放后 67~79 h, 在取水点 S_{122} 、 S_{65} 、 S_{49} 、 S_9 接收到, 最大浓度达 $48 \sim 80 \times 10^{-3} \mu\text{g/L}$, 平均流速 33.7~38.3 m/h。由此表明区内上述 9 个取样水点与投放点 S_{37} 的水力联系相对较好, 其余水点与投放点间水力联系较差(见图 3)。

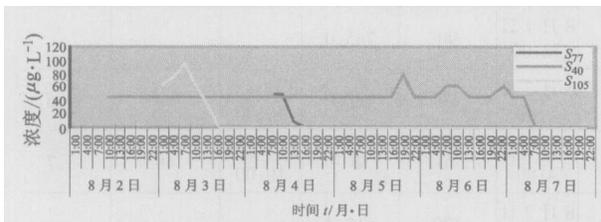


图3 荧光素钠时浓曲线

3.3 氯化锌示踪剂

氯化锌示踪剂投放后, 区内 19 个取样水点均有不同程度反应。投放后 5.5 h, 即于 8 月 1 日 22 时在水点 S_1 、 S_9 、 S_{29} 三处接收到, 8 月 2 日 1~7 时, 水点 S_5 、 S_{24} 、 S_{25} 、 S_{40} 、 S_{49} 、 S_{75} 、 S_{77} 亦陆续接收到, 最大浓度 $40 \sim 240 \mu\text{g/L}$, 平均流速 69.4~765.0 m/h, 说明它们与投放点间水力联系好; 8 月 2 日 10~16 时, 水点 S_8 、 S_{18} 、 S_{78} 、 S_{105} 、 S_{122} 接收到, 最大浓度 $40 \sim 90 \mu\text{g/L}$, 平均流速 77.7~177.9 m/h, 表明它们与投放点间水力联系较好; 其余水点 S_{26} 、 S_{65} 、 S_{79} 及 S_{80} 于不同时间接收到, 最大浓度 $60 \sim 100 \mu\text{g/L}$, 平均流速 38.9~96.6 m/h, 该类水点与投放点间具明显的水力联系, 主要表现为裂隙渗漏通道(见图 4)。

4 结论

1) 示踪试验场内岩溶及构造发育, 岩溶形态各异, 落水洞、溶沟、溶槽尤为明显, 渗漏及出水点较多, 水力坡度变化大, 各水点流速具明显差异, 形成错综复杂的水文地质体系。本次地下水多元示踪试验的成功, 给该排泥库的安全使用提供了必要的水文地质依据。

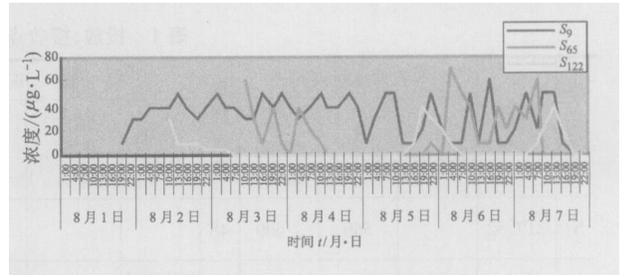


图4 氯化锌时浓曲线

2) 示踪试验时试剂在地下水中顺库内断层等, 以快速流方式流向水点 S_{24} 、 S_{105} 、 S_{77} 、 S_{79} , 接收速度快、浓度高、时间较长。试验结果证实了该排泥库中两洼地与各接收水点间的地下水水力联系程度, 表明该区主要以岩溶构造导水为主, 地下水的主体流向为南东方向, 且该方向除构造导水外, 其间还存在一条快速流的地下岩溶通道。

3) 该排泥库北东方向水点 S_8 、 S_9 、 S_{25} 、 S_{29} 与投放点 S_1 、 S_4 的水力联系均较好, 接收示踪剂最大浓度 $60 \mu\text{g/L}$, 平均流速 60 m/h, 表明库区北东方向各水点与库区的连通性较好, 其连通形式可能以岩溶构造导水为主, 场区地下水流向以北东方向为次。

4) 示踪结果表明, 该区地下岩溶较为发育, 且试验时有低水位向高水位流动现象(如钼酸铵投放点 S_1 水点标高 317.52 m, 接收点 S_5 、 S_{49} 等水点标高分别为 342.5 m 及 352.6 m), 其示踪浓度值大于分析灵敏度的 3~5 倍, 试验时对该类异常样品作了重复检测。对此, 须做进一步的试验研究。

5) 试验结果表明, 在岩溶发育地区采用示踪试验的方法, 对于研究其地下水系的水力联系, 探讨岩溶地区地下通道的模式, 求取地下水的各向流速是行之有效的。

参考文献

- [1] 中国土木工程学会. 注册岩土工程专业考试复习教程(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. 80-81.
- [2] 工程地质手册编写委员会. 工程地质手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992. 920-923
- [3] 熊道辑, 傅荣华. 岩溶发育强度垂直分带方法[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(3): 113-117.
- [4] 任天培, 彭定邦, 周秉嘉. 水文地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1986. 15-17.
- [5] 薛禹群. 地下水动力学原理[M]. 北京: 地质出版社, 1986, 271-275.