

尹尚先,徐斌,徐慧,等.化学示踪连通试验在矿井充水条件探查中的应用[J].煤炭学报,2014,39(1):129-134. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.0492

Yin Shangxian,Xu Bin,Xu Hui,et al.The application of chemical tracer experiments on exploring the mine water filling conditions [J].Journal of China Coal Society,2014,39(1):129-134. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.0492

# 化学示踪连通试验在矿井充水条件探查中的应用

尹尚先<sup>1,2</sup>,徐斌<sup>1,2</sup>,徐慧<sup>1,2</sup>,夏向学<sup>1,2</sup>

(1. 华北科技学院 河北省矿井灾害防治重点实验室,北京 101601;2. 华北科技学院 安全工程学院,北京 101601)

**摘要:**为获取地下水水流速和渗透系数等水文地质参数、查清含水层水力联系、查明矿井充水条件,在内蒙古某矿设计实施了化学示踪试验。通过对国内外化学示踪试验资料整理、统计分析,总结出化学示踪剂用量与投放距离、含水层性质的经验关系式,并对本次示踪剂用量做出了评价。同时,对试验中监测点水中均未出现Cl<sup>-</sup>浓度增高现象进行了科学解释,提出类似含Cl<sup>-</sup>示踪剂中的某些离子可能被地下岩层特定矿物质吸附时,只要化学试剂中的一种离子能达到试验效果,且具有成本低、易获取等特点,即可选择其作为示踪剂的观点。

**关键词:**示踪试验;矿井充水;示踪剂用量;水文地质参数;Cl<sup>-</sup>吸附

**中图分类号:**P641      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-9993(2014)01-0129-06

## The application of chemical tracer experiments on exploring the mine water filling conditions

YIN Shang-xian<sup>1,2</sup>, XU Bin<sup>1,2</sup>, XU Hui<sup>1,2</sup>, XIA Xiang-xue<sup>1,2</sup>

(1. Hebei State Key Laboratory of Mine Disaster Prevention, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;2. College of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China)

**Abstract:**In order to obtain hydrogeological parameters, such as, groundwater flow velocity and permeability coefficient, identify the aquifer hydraulic connection and verify mine hydrogeological conditions, a chemical tracer experiment was designed in a coal mine in Inner Mongolia. Based on the analysis of chemical tracer experiment data collected, the empirical formulas of the tracer dosage were summed up, taking account of the influence of the delivery distance and aquifer properties, and tracer dosage in this time were evaluated. At the same time, the phenomenon that the concentration of Cl<sup>-</sup> were not increased in the monitored water were explained with scientific theories, and the theories were put forward that those chemical agents which are similar to chlorine ion tracers, easy to obtain, cheap and able to achieve test results with one ion can be selected as a tracer, even some ions may be adsorbed by rock layers.

**Key words:**chemical tracer experiments;mine water connected;chemical tracer dosage;hydrogeological parameters;chloride ion adsorption

有记载的地下水连通示踪试验发生在大约2 000 a以前,罗马人(Philip)采用谷糠示踪泉水通道。1869年,人类首次使用化学示踪剂来找出岩

溶区落水洞和泉之间的水力联系(Knop 1875, 1878,据 Käss, 1964),之后,类似的试验用来确定漏水的起源(Schlichter, 1902)和检测被污染了的水的来源

(Dole, 1906), 所使用的示踪剂是染色剂和食盐。A. Thiem 在 Leipzig 的研究中, 用普通食盐作示踪剂, 通过实验室定量测定所取水样的  $\text{Cl}^-$  浓度, 确定地下水水流速, 开辟了定量连通示踪试验的先河<sup>[1-3]</sup>。中国古代也有类似的试验记录。而最早的定量连通示踪试验发生在 1960 年<sup>[4]</sup>, 由四川省地质局涪南地质队设计, 用食盐作为示踪剂、高灵敏度电阻仪作为检测仪器进行了四川南桐煤田地下河试验。在过去的几十年, 以张祯武、梅正星、孙恭顺和邹成杰等人<sup>[5-6]</sup>为代表, 开展了大量研究及野外试验, 取得了显著进展。但由于地质条件千差万别、影响因素众多, 理论仍不完善, 实际应用中还存在不少问题, 比如, 试验设计、示踪剂选择、用量, 离子吸附等。笔者通过内蒙古某矿的工程实例, 分析研究在人工放水试验激发流场条件下, 利用化学示踪试验探查矿井充水条件, 取得了满意效果。

## 1 矿井水示踪试验

### 1.1 试验目的

本次试验是为了查明浅层地下水(15~16 煤层组砾岩、砂砾岩含水岩组)和深层地下水(16 煤层间砾岩、砂砾岩含水岩组)与矿井巷道出水点之间的水力联系和含水层水力性质, 从而查清矿井充水条件。

### 1.2 试验原理

采用与地下水水化学成分背景值差异较大、稳定的易溶性盐类离子作为示踪剂, 通过地面钻孔将溶解后的示踪剂投放至目标含水层, 且随地下水水流运移和扩散, 在井下不同位置出水点监测或取样, 依据示踪剂离子浓度值计算地下水水流速和渗透系数等参数, 确定地下水与矿井水的连通情况。

依据示踪剂浓度沿着地下水水流运动方向逐渐降低, 并扩散求得浓度峰值与距离的关系, 可以得到<sup>[7-8]</sup>: 含水层平均流速  $u=x/t$ ; 渗流速度  $v=un$ ; 渗透系数  $K=v/J$ 。其中,  $u$  为平均流速;  $x$  为投放点与井下放水点距离;  $t$  为示踪剂浓度峰值出现时间;  $v$  为渗流速度;  $n$  为有效孔隙率;  $K$  为渗透系数;  $J$  为水力梯度。

### 1.3 投源孔及监测点布置

依据本次试验设计, 投 2 号孔、投 1 号孔分别为该矿浅层含水层、深层含水层的投源孔, 巷道(标高 340 m)中监测 2 号孔及监测 1 号孔为监测孔, 示踪剂投源孔及巷道出水点位置如图 1(a)所示, 层位关系如图 1(b)所示。投 2 号孔至监测 2 号孔、监测 1 号孔的直线距离分别为 200 m 和 378 m, 投 1 号孔至监测 2 号孔、监测 1 号孔的直线距离分别为 1 101 m 和 896 m。地面标高为 715~725 m, 投 1 钻孔深度为

359 m、水位标高为 650.25 m, 投 2 钻孔深度为 302 m、水位标高为 653.09 m。

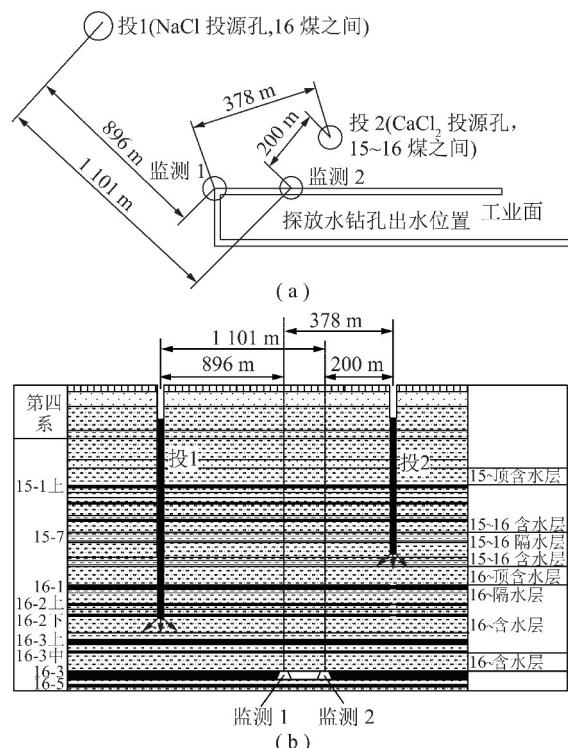


图 1 示踪剂投源孔及巷道出水点位置及其剖面示意

Fig. 1 Tracer source throwing hole and tunnel water point location and cross-sectional diagram

### 1.4 示踪剂的选择及使用量

#### 1.4.1 示踪剂的选择

基本原则: ① 性质稳定, 在地下水环境中不易与其他溶质和岩土介质发生化学反应, 不分解变质; ② 易溶于水, 且能与地下水一起同步运动, 在较小浓度时不显著改变地下水体的密度; ③ 示踪剂无毒, 对人体、动植物无直接的损害, 无长期的隐性不良作用, 不明显改变自然界外观; ④ 能在试验现场检测, 检测方法简单方便, 灵敏度高; ⑤ 岩土介质对示踪剂的吸附能力小; ⑥ 地下水中该示踪剂背景值低, 波动小; ⑦ 示踪剂成本低, 易获取。

根据该矿地下水化学成分以及示踪剂的溶解度、水中的迁移性及价格等因素, 选择  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  作为本次试验 1 号、2 号投源孔示踪剂, 选择两种示踪剂便于区分不同含水层与矿井的水力联系。

#### 1.4.2 示踪剂使用量

影响示踪剂用量的因素较多, 既有示踪剂本身的物理化学特性, 也有投放环境影响<sup>[6,9]</sup>。针对距离、含水层性质影响因子, 分别提出了不同的计算方法。

(1) 方法 1: 影响因子为距离, 收集了国内部分示踪试验食盐用量的参考数据(表 1)。

表1 示踪剂(食盐)使用量随影响因素的变化  
Table 1 Tracer (salt) dosage changes with factors

试验地点	质量/kg	距离/m	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	流速/(cm·s <sup>-1</sup> )	投放方式
云南蒙自	13 130	26 000	0.560	9.70	穴投
云南个旧	10 000	27 250		6.30	穴投
广西右江	2 000	1 100		1.55	明河投
广西柳州	3 000	900	0.220	1.47	穴投
广西罗城煤硫矿	60	550	0.040	3.54	其他
广西宜山	1 050	250		0.02	穴投
云南花仙水库	20	93		0.43	钻孔投放
贵州长颠	50	250		0.02	其他
贵州转拐龙潭	2 000	3 000	0.639		其他
贵州德江麻湾洞	2 000	3 000	0.100		其他
贵州德江小龙歼	3 000	4 000	0.100		其他
云南蒙自杨柳河	13 130	20 000			明河
贵州长顺炸药库	2 000	2 500	0.053		其他
广西罗成龙潭脊	250	50	0.010		其他
云南宾川盒子口	3 200	6 700	1.200		穴投

经统计整理,示踪剂使用量与距离的关系如图2所示。

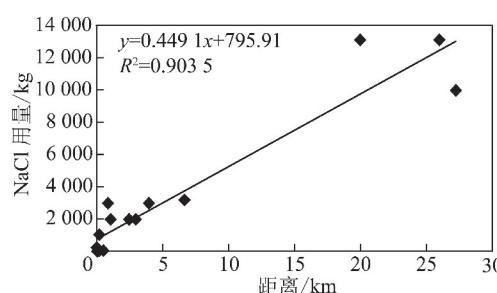


图2 食盐用量随距离的变化规律

Fig. 2 The variations of salt dosage with distance

食盐用量与距离的关系式:

$$y = 0.449 1x + 795.91 \quad (1)$$

其中  $R^2 = 0.903 5$ 。依据相关系数判别标准,  $R = 0.950 5 > 0.8$ , 食盐用量与距离关系属于高度相关。按相对分子量, 1 mol CaCl<sub>2</sub> 等于 1.9 mol NaCl, 则 CaCl<sub>2</sub> 用量经验公式为

$$y = 1.9(0.449 1x + 795.91) \quad (2)$$

(2)方法2: 影响因子为含水层性质, 含水层空隙性质与结构类型决定含水层的富水特征, 富水特征决定示踪剂稀释程度。该计算方法的水流状态为渗流, 目前水驱五点井网有效示踪物质用量计算方法<sup>[10-12]</sup>在油井间示踪测试中应用广泛, 由 Brigham-Smith 利用示踪剂总稀释模型提出。相对于五点井网, 常规示踪实验为单一方向的示踪实验, 二者虽有不同, 但总体原理相同, 其详细对比见表2。

由表2可知, 单一方向示踪试验监测点较五点井网少。根据溶质扩散原理, 可以得出, 单一方向示踪

实验中示踪剂的扩散面积为五点井网测井扩散面积的  $1/4 \sim 1/2$ 。如果监测点距离比较近, 在投放井的同一方位, 且监测同一含水层, 这几个监测点可以视为一个监测点。

表2 单一方向示踪实验与五点井网示踪实验的对比

Table 2 The comparison of single direction of tracing experiment with five wells net tracer experiment

项目	相同点	区别
五点井网示踪实验	稀释、扩散、 运移原理相同	1 口注水井投放, 4 口采油井监测
单一方向示踪实验		1 个投放点, 1 ~ 2 个 监测点

根据以上分析, 单一方向示踪试验中, 示踪剂用量可以借鉴 Brigham-Smith 经验公式, 只需要在其基础上做适当修正, 修正后的公式为

$$W_s = 1.44 \times 10^{-6} \frac{M_s}{nYM_a} \beta h \Psi S_w C_{p, \max} \alpha^{0.265} L^{1.735} \quad (3)$$

式中,  $W_s$  为化学示踪剂的商品用量,  $t$ ;  $M_s$  为化学示踪剂的摩尔质量, g/mol;  $M_a$  为有效示踪物质的摩尔质量, g/mol;  $n$  为每摩尔示踪剂中有效示踪物质的摩尔数;  $Y$  为化学示踪剂的商品纯度;  $\beta$  为修正系数, 根据监测范围确定;  $h$  为含水层的平均有效厚度, m;  $\Psi$  为孔隙度;  $S_w$  为含水饱和度;  $C_{p, \max}$  为均质含水层中有效化学示踪物质高出背景值的质量浓度, mg/L;  $\alpha$  为分散系数, 一般取值 0.015;  $L$  为平均投、监距离, m。

本经验公式适用于所有渗流场的化学示踪试验, 其中有效示踪物质最大浓度  $C_{p, \max}$  要根据背景值确定, 一般情况下要比背景值高出最低检测极限的 15

倍以上。

上述两个方法得出的两组经验公式在工程应用中,应配合使用,选出经济合理的化学示踪剂用量。为保障实验效果,取计算用量的较大值。

### 1.4.3 本次实验示踪剂用量评价

(1)方法1:投1号、投2号投源孔到巷道出水点的距离分别为896~1 101,200~378 m,考虑到试验区含水层为砾岩、砂砾岩含水岩组,溶解液进入下部的含水层后,示踪剂会发生稀释作用,均按最大距离值计算,确定投1号投源孔投入NaCl示踪剂为1 290.4 kg,投2号投源孔投入CaCl<sub>2</sub>示踪剂用量为1 931.3 kg。

(2)方法2:监测点1、监测点2均在投1、投2的同一方向,则监测点1,2可视为一个监测点,β取0.25。根据16-3煤及顶板50 m和底板30 m范围内岩层取样分析可知,孔隙度 $\Psi=0.35$ , $S_w=0.84$ 。 $C_{p,\max}$ 取15 mg/L, $L_1$ 取1 101 m, $L_2$ 取378 m, $h_1$ 取12 m, $h_2$ 取45 m,分别代入式(1),得NaCl示踪剂用量为3 050 kg,CaCl<sub>2</sub>示踪剂用量为1 950 kg。

通过两种方法计算,按照取大值原则,本次实验投1孔NaCl示踪剂计算用量3 050 kg,操作时实际投放10 000 kg,用量偏大;投2孔CaCl<sub>2</sub>示踪剂计算用量1 950 kg,实际投放4 000 kg,用量也偏大。

### 1.5 示踪剂的配制与投放

示踪剂溶液的配制原则:在溶解度控制范围内,尽可能配制较高浓度的示踪剂溶液。示踪剂的投放原则:使示踪剂在尽量短的时间内一次投注到预定含水层位,使示踪剂在投放点范围内形成一个“高浓度团”随地下水一起运移,以保证示踪剂到达监测点时仍保持较高浓度,便于检测。

根据以上原则,先将部分NaCl放入容量为4 m<sup>3</sup>的水罐中,共配制5罐溶液(约20 m<sup>3</sup>)。溶液配制后,边投放固体盐边用配制液冲洗,历时2 h将10 000 kg NaCl投入到投1号孔含水层中,较好地满足了在最短时间内将所有NaCl投入到含水层中的要求。而在投2孔,将CaCl<sub>2</sub>固体投入孔中,立即用水泵将水直接注入孔中溶解CaCl<sub>2</sub>固体,历时40 min将4 000 kg CaCl<sub>2</sub>投入到投2投源孔含水层中,满足示踪剂投放要求。

### 1.6 示踪试验过程

为了对比背景和试验过程中特征离子的变化,整个试验分为两个阶段进行。

(1)背景值观测阶段:试验前在监测点(探放水孔、地面排水管口)取样分析,并将结果(表3)作为地下水化学成分的背景值。

表3 监测1号、2号探放水孔Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>背景值

Table 3 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup> background values of the drainage hole in monitoring of No. 1, No. 2

样品 编号	采样 日期	背景值/(mg·L <sup>-1</sup> )			电导率/ (μs·cm <sup>-1</sup> )	备注
		Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>		
1-0	10月11日	133.29	12.51	18.44	585	监测1号
2-0	10月12日	230.98	13.84	79.77	1 050	监测2号

(2)示踪试验阶段:在监测点处按照一定时间间隔进行采样,监测1,2号Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>浓度及电阻率结果动态曲线如图3所示(实线为背景值,虚线为变化值)。

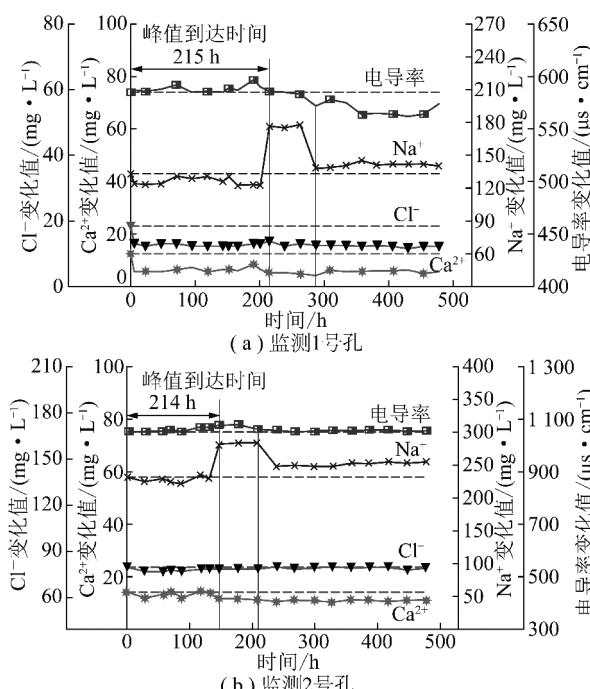


图3 监测1号和监测2号探放水孔地下水Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>浓度及电导率随时间的变化特征

Fig. 3 The variations of concentration and conductivity of Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> in the 1<sup>st</sup> drainage monitoring hole and the 2<sup>nd</sup> with time

### 1.7 结果分析

#### 1.7.1 水力联系、水文地质参数分析

图3(a)显示,投放孔1投放NaCl后,监测点于215 h时Na<sup>+</sup>浓度显著上升,由122.26 mg/L上升为176.56 mg/L,并于263 h时达到峰值178.05 mg/L,表明示踪剂到达巷道监测点,随后地下水中的Na<sup>+</sup>浓度便逐步下降,据此计算水文地质参数见表4。地下水中的Cl<sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>浓度未发生明显变化,介于11.53~13.86 mg/L,4.21~8.5 mg/L,表明监测1号孔未接收到投2号投源孔示踪剂,Na<sup>+</sup>增高对电导率影响较小,介于562~597 μs/cm。说明只有深层地下水(16煤之间)与矿井有水力联系。

表4 示踪试验过程水文地质参数

Table 4 The hydrogeological parameters of tracing experiment

项目	投1-监测1	投1-监测2
水平距离 $L/m$	891	1 101
垂直距离 $H/m$	24	24
示踪剂到达时间 $t/h$	263	238
地下水水平平均流速 $u_x/(m \cdot h^{-1})$	3.41	4.63
垂直平均流速 $u_y/(m \cdot h^{-1})$	0.057	0.063
平均速度 $\bar{u}_a/(m \cdot h^{-1})$	3.41	4.63
砾岩、砂砾含水岩孔隙度 $n$	0.35	0.35
渗透速度 $v/(m \cdot h^{-1})$	1.19	1.62
水位高差 $\Delta h/m$	310.25	310.25
水力梯度 $J/\%$	34.9	28.2
渗透系数 $K/(m \cdot d^{-1})$	82	138

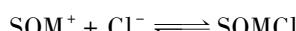
图3(b)数据表明,该监测点214 h的 $\text{Na}^+$ 浓度显著上升,由227.9 mg/L上升为281.16 mg/L,263 h达到峰值283.39 mg/L;随后地下水中的 $\text{Na}^+$ 浓度便逐步下降,至430 h下降至254.01 mg/L,据此计算水文地质参数见表4。地下水中的 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度未发生明显变化,介于76.99~79.97,10.12~14.17 mg/L。同样,监测2号探放水孔未接收到投2号孔示踪剂, $\text{Na}^+$ 增高对电导率的影响较小,介于1 050~1 075  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ,同样说明只有深层地下水(16煤之间)与矿井有水力联系。

抽水试验得出的投1渗透系数为1.19 m/d。对比示踪试验和抽水试验结果,抽水试验测得 $K$ 值较小,说明渗透性不均匀,深层地下水(16煤之间)与巷道之间可能存在畅通的直接水力联系通道。

### 1.7.2 关于均未出现 $\text{Cl}^-$ 浓度增高现象的科学解释

本次矿井水示踪连通试验示踪剂是 $\text{NaCl}$ (投1)和 $\text{CaCl}_2$ (投2),但在设置的监测点水中均未出现 $\text{Cl}^-$ 浓度增高,这似乎违反常理。

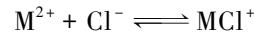
当在投1号孔投放示踪剂 $\text{NaCl}$ 后215 h,两个监测点水中的 $\text{Na}^+$ 浓度几乎同时达到峰值,表明示踪剂 $\text{NaCl}$ 已经到达监测点,但水中的 $\text{Cl}^-$ 浓度并没有明显上升,说明含水层中(或在含水层的某些地段)存在对 $\text{Cl}^-$ 迁移有选择性吸附作用的物质,一般认为, $\text{Cl}^-$ 离子具有很强的可被金属离子吸附的能力,且主要为专性吸附和电性吸附,吸附机理<sup>[13]</sup>为



在岩石颗粒胶体表面,当水合氧化物型 $\text{SOH}$ 表面吸附金属阳离子时,尤其是二价以上金属阳离子时,发生专性吸附,形成吸附复合体 $\text{SOM}^+$ ,其上出现过剩正电荷,从而使岩石颗粒表面正电荷增加,

在 $\text{SOM}^+$ 周围产生负离子聚集,使 $\text{Cl}^-$ 离子吸附量增加。

在可变电荷岩石颗粒胶体上,金属阳离子对 $\text{Cl}^-$ 吸附的诱导效除了上述两种途径外,多价金属离子与 $\text{Cl}^-$ 生成离子对也是一个重要的原因。对二价金属阳离子而言,与 $\text{Cl}^-$ 可形成离子 $\text{MCl}^+$ , $\text{MCl}^+$ 可作为一价阳离子吸附在水合氧化物型 $\text{SOH}$ 表面上,从而促使 $\text{Cl}^-$ 吸附量的增加,吸附方程<sup>[14]</sup>为



该煤矿16煤层间含水层水化学类型为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型,其中砾岩、砂砾岩含水岩组矿物中含有大量的金属阳离子 $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Al}^{3+}$ ,充当了有效的 $\text{Cl}^-$ 吸附剂。这种吸附剂类似铝镁水滑石类材料,又称层状双氢氧化物,理想分子式为 $[\text{M}_{1-x}^{2+} \text{M}_x^{3+} (\text{OH})_2]^{x+} (\text{A}^{n-})_{x/n} \cdot m\text{H}_2\text{O}$ ,其中, $\text{M}^{2+}$ 是二价金属阳离子, $\text{M}^{3+}$ 是三价金属阳离子, $\text{A}^{n-}$ 是层间阴离子<sup>[15]</sup>。

地下水pH值对 $\text{Cl}^-$ 的吸附也有很大影响,16煤层间地下水为弱碱性环境,pH值在8左右,根据国内相关试验的一般规律<sup>[15~16]</sup>:当pH值在0~4时,吸附量明显上升,pH值在4~11时,吸附量和脱除率基本不发生变化,pH>11时,明显下降;16煤层间含水层pH值正好在4~11,是 $\text{Cl}^-$ 吸附的良好酸碱环境。 $\text{Na}^+$ 的性质比较活泼,一般不会被吸附和置换。综上所述,在示踪试验中 $\text{Cl}^-$ 由于被含水层的岩石颗粒吸附,导致 $\text{Cl}^-$ 监测浓度变化很小,而钠离子基本不受环境的影响,可以被检测。

## 2 结 论

(1) 化学示踪剂食盐用量与距离关系的经验公式为 $y = 0.449 1x + 795.91$ ,氯化钙用量经验公式为 $y = 1.9(0.449 1x + 795.91)$ 。根据含水层空隙性质与结构类型不同,示踪剂用量也可选用式(3)。两种方法计算所得示踪剂用量,取较大值。

(2) 在矿井排水条件下,监测1号、2号孔未接收到投2孔 $\text{CaCl}_2$ ,说明浅层地下水(15~16煤之间)与矿井之间直接水力联系微弱,15~16煤之间隔水层较完整;监测1号、2号孔接收到投1的示踪剂元素 $\text{Na}^+$ ,说明深层地下水(16煤之间)与矿井之间有水力联系,从而推断出深层含水层是直接威胁矿区16煤层安全开采的直接充水含水层。

(3) 示踪试验中示踪元素 $\text{Cl}^-$ 可能被地下岩层的某些类似铝镁水滑石类材料 $[\text{M}_{1-x}^{2+} \text{M}_x^{3+} (\text{OH})_2]^{x+} (\text{A}^{n-})_{x/n} \cdot m\text{H}_2\text{O}$ 吸附,从而无法在监测点检测到浓度变化。

(4) 本次示踪剂中的 $\text{Cl}^-$ 被地下岩层中的某些矿物质吸附,而未影响试验效果,实验整体达到了预期目的。由此可以得出:含 $\text{Cl}^-$ 的示踪剂只要其阳离子不被吸附,易被检测,示踪剂本身具有性质稳定、易溶于水、无毒、无损环境、背景值低、成本低、易获取等优势就可以用来选做示踪试验。同理,类推出化学试剂中只要某一离子性质稳定,而又符合示踪剂选择的其他必备条件就可选作示踪剂。

## 参考文献:

- [1] Terri L Woods, Paul D Fullagar, Reehard K Spruill. Strontium isotopes and major elements as tracers of groundwater evolution: Example from the upper castle hayne aquifer of North Carolina [J]. *Ground Water*, 2000, 38(5): 762–771.
- [2] Brian G Katz, Tyler B Coplen, Thomas D Bullen. Use of chemical and isotopic tracers to characterize the interactions between groundwater and surface water in mantled karst [J]. *Ground Water*, 1997, 35(6): 1014–1028.
- [3] 刘光尧,陈建生. 同位素示踪测井[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1999.
- [4] 四川省地质局涪南地质队. 介绍一种长距离暗河连通试验的新方法[J]. 水文地质工程地质,1960(4):8.  
Sichuan Provincial Bureau of Geology the Funan geological team. Introduce a new method of long-distance underground river connectivity test [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1960(4):8.
- [5] 张祯武,邹成杰. 岩溶地下水分散流场示踪探测原理及其在水库渗漏研究中的应用[J]. 中国岩溶,1995(14):251–260.  
Zhang Zhenwu, Zou Chengjie. The karst groundwater dispersive flow field tracer detecting principle and its application in the study of reservoir leakage [J]. *China Karst*, 1995(14):251–260.
- [6] 孙恭顺,梅正星. 实用地下水连通试验方法[M]. 贵州:贵州人民出版社,1988.
- [7] 陈崇希. 地下水动力学第二版[M]. 北京:中国地质大学出版社,2009.
- [8] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第4版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [9] 张俊英. 应用岩溶学及洞穴学[M]. 贵州:贵州人民出版社,1985.
- [10] ZEMEL B. Tracers in the oil field [M]. New York: Elsevier Science, 1995.
- [11] 戚静. 化学示踪剂监测在黄沙沱火山岩油藏的应用[J]. 西部探矿工程,2009,21(12):55–56.  
Zhan Jing, Application of chemical tracer monitoring in Huangshatuo volcanic reservoir [J]. *China Exploration Engineering*, 2009, 21(12):55–56.
- [12] 张善杰,冯向东. 井间示踪测试中示踪剂用量计算方法[J]. 大庆石油地质与开发,2006,25(4):48–50.  
Zhang Shanjie, Feng Xiangdong. Interwell tracer test tracer dosage calculation method [J]. *Petroleum Geology and exploitation in Daqing*, 2006, 25(4):48–50.
- [13] 邵宗臣,赵美芝,李清曼. 土壤中金属阳离子对 $\text{Cl}^-$ 离子吸附的诱导效应[J]. 环境化学,2003,22(1):1–8.  
Shao Zongchen, Zhao Meizhi, Li Qingman. Metal cation-induced  $\text{Cl}^-$  adsorption by soils [J]. *Environmental Chemistry*, 2003, 22(1):1–8.
- [14] 徐明岗,季国亮. 恒电荷土壤及可变电荷土壤与离子间相互作用的研究Ⅱ. 共存体系中 $\text{Cl}^-$ 的吸附特性[J]. 土壤学报,2002,39(2):61–69.  
Xu Minggang, Ji Guoliang. Studies on the interaction of ions with constant charge soils and variable charge soils II. characteristics of  $\text{Cl}^-$  adsorption in system co existing cations and anions [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2):61–69.
- [15] 于艳伟. 层状氢氧化镁铝的改性成型及其对卤素阴离子的吸附性能[D]. 青岛:中国海洋大学,2010.
- [16] 王军锋,李子荣,郭雨. Mg/A1型水滑石及其焙烧产物对水溶液中 $\text{Cl}^-$ 的吸附[J]. 西安工程大学学报,2008,22(2):71–74.  
Wang Junfeng, Li Zirong, Guo Yu. Adsorption of chloride anion by Mg/A1 hydrotalcite and its calcined product [J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2008, 22(2):71–74.