

单井同位素稀释技术测定西台吉乃尔 盐湖水文地质参数

孙亚联^{1,2}, 马海州¹, 高东林¹, 李继成³, 张西营¹, 张明刚¹

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 我国含水层的水文地质参数测定, 主要依靠传统的抽水试验方法, 然而此方法却需要花费大量的试验和钻井费用。同位素示踪方法比传统的抽水试验方法获得含水层参数的周期短、费用低, 有效地提高了水文地质参数的测试精度、缩短了工期、节省了投资。为了测定柴达木盆地西台吉乃尔盐湖地下水流速、流向、渗透系数等水文地质参数, 采用单井同位素稀释法测试水文地质参数, 正确确定其水文地质参数, 无论对科学研究还是对生产开采, 均有着重要的理论和现实意义。

关键词: 单井同位素稀释; 地下水流速; 地下水流向; 渗透系数; 西台吉乃尔盐湖

中图分类号: P641. 464 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008- 858X(2007) 04- 0001- 05

西台吉乃尔盐湖位于青海省柴达木盆地中部, 该矿床是以卤水锂为主, 并伴生钾、硼、镁等多种组份的大型矿产地^[1]。1998 ~ 2002 年期间, 为配合西台吉乃尔盐湖资源开发, 青海省金星矿业有限公司对该湖东北部进行了盐湖地质勘探, 并对该湖湖水、东部干盐滩晶间卤水的水化学组成、盐湖沉积物地质年代和矿物组成进行了初步研究, 但对矿床的富水性、渗透性的研究工作尚不充分。由于受盐湖生产大规模抽卤的影响, 盐湖矿床水文地质条件和卤水物理化学性质将会不断改变, 从而使矿床富水性、渗透性向多变方向发展^[2]。因此在建立卤水水动力学方程和水质水量模型阐明该地区水文循环的特点与规律时, 要充分考虑卤水及其介质的水文地质参数变化。同时, 测定和分析不同地区不同地段地下水及晶间卤水层的流速、流向等水动力参数、物理化学参数和含水层水文地质参数显的尤其重要, 这比均质条件下的模型复杂。传统的抽水试验法求取水文地质参数不

仅费时, 而且花费大。利用放射性同位素测定水文地质参数的方法是近年来国际上发展较快的一种快速、经济、准确、高效的水文地质测井新方法^[3]。用于测定地下水运动的放射性同位素测速方法很多, 其中单井人工放射性同位素水文地质参数测定在水文地质、水利工程勘测和桥涵勘测中都有广泛的应用前景。笔者以西台吉乃尔盐湖为例, 采用单井同位素示踪稀释法来测试地下水的流速及流向等水文地质参数。

1 单井同位素示踪稀释法的基本原理

同位素示踪法(isotopic tracer method) 是利用放射性核素作为示踪剂对研究对象进行标记的微量分析方法。目前, 同位素示踪法应用非常广泛, 这里主要讨论同位素示踪在水文地质上的应用——同位素示踪测井。利用放射性同

位素测定水文地质参数的方法属放射性同位素测速法。它是利用人工放射性同位素如¹³¹I、⁸²Br等标记天然流场或人工流场中钻孔内的地下水流,使其在含水层中运动,从而用示踪或稀释原理来测定含水层某些水文地质参数的方法⁴。

1.1 地下水流速测定原理

单孔稀释法确定地下水流速的基本原理是,投到井中水体的放射性示踪剂的浓度随地下水渗流稀释而降低,井中放射性示踪剂浓度随地下水的渗流稀释速率与地下水渗透流速密切相关,由此可推求得到地下水渗透流速的计算公式^{4-7]}

$$V_f=\frac{\pi r_1}{2at}\ln\frac{N_0-N_b}{N-N_b},$$

式中, V_f 为含水层的渗透速度, m/d; r_1 为滤水管内半径, m; N 为 t 时刻示踪剂放射性计数率; N_b 为投放示踪剂前放射性本底计数率; N_0 为投放示踪剂后测量初始时刻示踪剂在孔中的放射性计数率; a 为流场畸变校正系数, 该校正系数可通过测井调查得到有关信息, 本次取为 2。

1.2 地下水流向测定原理

把放射性示踪剂注入到待测的深度后, 随着地下水的自然流动, 示踪剂浓度在水流的上下游会产生差异, 表现为不同方向的放射性强度发生变化, 用流向探测器可测得各方向放射性的强度, 放射性强度最大的方向即为地下水的流向^{8]}。

1.3 测定方法及测试仪器

利用投源器将约 $3.7\times10^7\sim7.4\times10^7$ Bq 的放射源¹³¹I 溶液投入试验钻孔中预定深度段内, 上下搅拌均匀, 一般每投源一次可测定 2 mL 的孔段, 测定间距为 0.5 m。

本次实验采用冶金部勘察研究总院工程检测研究所研制生产的 FDC-250A 型地下水流向流速测定仪对各测点依次测定, 并记录各测点放射性强度衰减脉冲计数率 N 和测试时间。

2 同位素测井试验概况

2.1 研究区域概况

西台吉乃尔盐湖属于柴达木盆地构造分区

茫崖坳陷中的一里坪凹陷区, 位于柴达木盆地东部 3 湖(台吉乃尔湖、涩聂湖和达布逊湖)(如图 1)沉降区的西端, 接受来自昆仑山北坡的那陵格勒河补给。此盐湖是以卤水锂为主, 并伴生钾、硼、镁等多种组分的大型矿产地, 水化学类型属于硫酸盐型硫酸镁亚型。地下卤水划分为晶间潜卤水(W I)、孔隙潜卤水(W II-1)和晶间承压卤水(W II-2)三层。

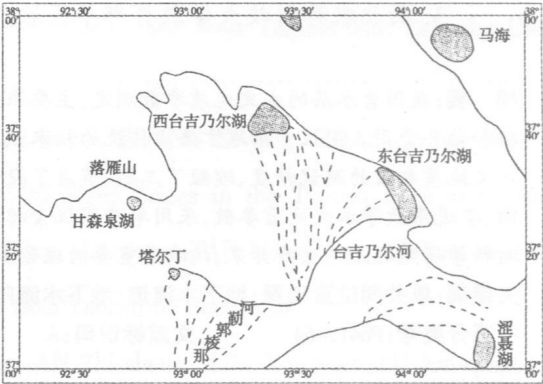


图 1 柴达木盆地西台盐湖分布示意图
Fig.1 Sketch map of the West Taijinar Salt Lake in Qaidam Basin

2.2 测井试验概况

此次野外现场测试井孔共计 20 口(见图 2)。单孔每一井段测试厚度为 0.5 m, 测试深度最大的井段埋深为 24~29.5 m(观 29~13 孔), 最小的井段埋深 0.6~2.0 m(观 7 孔); 投放放射源的强度一般 $0.74\times10^7\sim5.92\times10^7$ Bq, 最大为 7.4×10^{10} Bq; ¹³¹I 稀释溶液体积一般为 1~5 mL。

2.3 水文地质概况

根据地质报告资料, 该区地下水以卤水形式赋存。根据该区地下水的埋藏条件, 可分为潜水含水层和承压含水层两种类型。潜水含水层岩性主要为中粗砂、含石盐粉细砂等, 并含有石盐透镜体, 含水层厚度在矿区中部, 最大厚度 25.56 m, 向边缘逐渐变薄乃至歼灭, 含水层一般厚度 10~15 m。地下水位埋深最大可达 3.13 m, 一般为 1~2 m, 总趋势由东向西增大。含水层底板多数地段为灰绿色砂质黏土, 少数地段为早期沉积的石盐、石膏等化学沉积盐层;

承压含水层岩性为含粉砂石盐、石岩等, 含水层厚度一般在 10~15 m, 承压含水层顶板埋深由南部的 7.1 m 向矿区中部和北部逐渐变薄以至于与潜水含水层直接接触。含水层的隔水顶板为棕红色砂质黏土, 隔水层底板同潜水含水层底板相同, 也为砂质黏土, 不过埋深稍大。承压含水层水头均低于地表, 水头高度也小于 5 m, 为浅藏承压水。

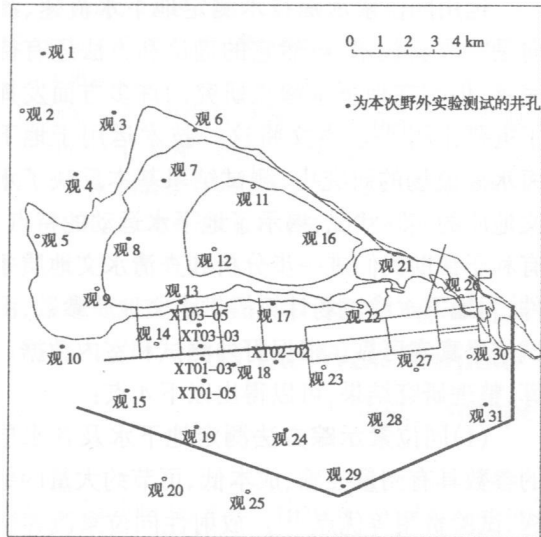


图 2 西台吉乃尔盐湖长观网布置图
Fig. 2 Layout plan for long term observation of the West Taijinar Salt Lake

3 参数测试与计算

本次同位素单井稀释法所用的示踪剂是以 NaI 为载体的 ¹³¹I 放射性同位素, 其半衰期为 8.07 d, 能够释放 γ 和 β 射线。

3.1 流速测试及结果计算

结合西台吉乃尔盐湖湖水动态长期观测工作, 进行了为期近一个月(2006 年 9 月)的野外现场测试试验, 测定不同地段观测孔 20 个(图 2), 测孔段共约 300 m, 测点 200 个, 测深范围自井口下 0.6~24 m 不等, 获得相应试验数据约 1 600 组。

利用投源器将约 $3.7 \times 10^7 \sim 7.4 \times 10^7$ Bq ¹³¹I 碘化钠溶液稀释近 80 mL 投放到预定井段, 上下搅匀使示踪水柱达 2 米以上, 把测井仪器探头放入井中示踪水柱段, 每 50 cm 一个测点,

统测一次井中示踪剂强度, 列出数据并计算(如表 1), 求出时间间隔(t_i)和 $\ln(N_0/N_{ti})$ 的平均稀释率直线及其回归方程, 对其总体平均值按 95% 置信度区间校正不符合理论公式的测试强度, 求出相关斜率的值。选取因流场畸变影响的值及已知的井内半径 r , 代入地下水渗透流速的计算公式, 求出各测试孔(段)的晶间卤水层的渗透流速 V_f (见表 3)。结果表明, 被测定含水层各观测孔(段)的平均渗透流速范围为 0.080~0.763 m/d。

表 1 观 6 孔测试强度数据表
Table 1 Testing strength data of the observation hole 6

时 刻	井 段/m			
	0.6	1.0	1.6	2.0
9: 50	1 025	830	660	315
10: 20	985	755	625	255
10: 50	840	735	460	155
11: 20	705	685	450	140
11: 50	675	700	430	130
12: 20	605	615	415	120

3.2 流向的测定

在示踪剂(Na^{131}I)内加入 AgNO_3 溶液, 其化学反应式为



形成 AgI 沉淀, 用投源器投入到所需测定流向的井段, 则 AgI 有一部分随晶卤流向吸附在卤水流出口的井壁上及离井壁不远的岩盐层中。根据地下水流向的测试原理, 为了提高测试的可信度, 将装有定向器的探头放至测定位置, 缓缓地绕井测定一周, 每隔 30 度读一次计数。在测试一次井中放射性示踪剂浓度的基础上, 再逆时针方向反转, 每隔 30 度, 测试一次放射性同位素的浓度, 共测得 12 个方位角的示踪剂强度数据, 每个点至少测定 3 次, 计算各个方向上放射性示踪剂浓度的平均值, 以 3 号孔为例(见表 2), 取其平均值, 用矢量求和的方法或将各个方向的计数率平均值按同一比例做成玫瑰花图(见图 3) 求出卤水流向, 计数率最大的方向就是可能的地下水流向^[9]。按照同样的方法求出每个孔的渗透流向, 计算结果见(表 3)。

表 2 流向测定结果表

Table 2 Measurement results of the flow direction

角度/(°)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	合成强度	合成角度
平均强度	130	137	148	152	157	158	160	160	152	142	134	131	91	289

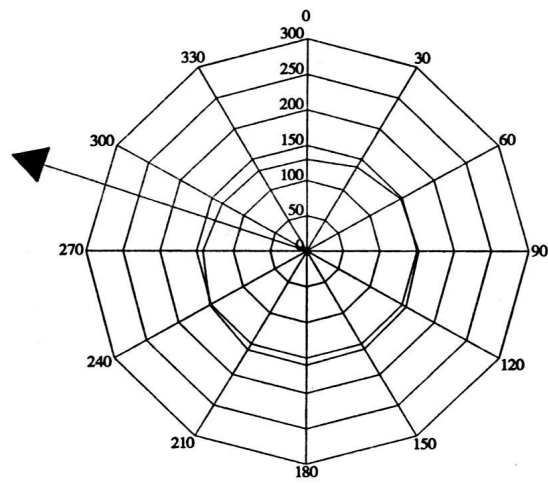


图 3 同位素测井地下水流向玫瑰花图(箭头方向为地下水流方向)

Fig. 3 Rose diagram of the underground brine flow direction determined by the isotope logging (arrowhead is the flow direction)

表 3 各孔渗透流速、流向计算结果表

Table 3 Calculation results of the permeation velocity and direction of each hole

孔号	渗透流速/(m/d)	渗透流向/(°)
观 1	0.102	268
观 3	0.087	170
观 4	0.158	280
观 6	0.315	7
观 07	0.763	242
观 8	0.139	167
观 10	0.748	229
观 13	0.109	85
观 15	0.246	23
观 17	0.488	229
观 18	0.172	167
观 19	0.549	338
观 24	0.195	347
观 29	0.08	200
观 31	0.081	—
观 01—03	0.623	249
观 01—05	0.583	357
观 02—02	0.077	198
观 03—03	0.521	289
观 03—05	0.452	168

4 结论与建议

运用同位素示踪技术测定地下水流速、流向是一项新技术,虽然它的理论和方法还有待完善,但它在地下水渗流研究的许多方面发挥了重要作用^[10]。本文将这一技术运用于地下卤水渗流场的研究中,测试结果基本反映了水文地质的实际状况,揭示了地下水运动的特点,有利于帮助我们进一步分析和查清水文地质条件,为地下水渗流场计算提供水文地质参数,测试结果真实可靠。根据野外测试和室内数据计算、整理研究结果,可以得出以下 4 点:

(1) 同位素示踪方法测定地下水及含水层的参数具有测量准确、成本低、可节约大量的钻探、试验费用等优点^[11]。放射性同位素测速法对含有高矿化度卤水的岩盐渗透性研究具有一定的适用性,不仅可以节省大量人力物力,而且能随着开采规模的变化及时获得有关水文地质参数并提高其质量^[12];

(2) 在目前条件下,研究区域岩盐渗透性变化不大,各观测孔(段)的平均渗透流速范围 0.080~0.763 m/d。实验表明,随着卤水开采强度的增大,NaCl 的晶析作用可能占主要地位,从而改变岩盐孔隙度,渗透系数等参数;

(3) 为了获得含水层渗透系数,必须得到与测试同时期的含水层的水力坡度或等水位线图。因此最好能选择一些典型地段布置观测孔,测量地下水水力坡度,由此更大程度地发挥测试资料的效能;

(4) 要注意对比研究,同位素测试方法有它固有的优点,但不能不加判断盲目使用测试数据。归根到底,同位素方法仅仅是若干种水文地质测试方法中的一种方法而已,要注意将同位素方法的测试成果与其它常规方法的测试成果进行比较,最终成果要反映一般的水文地质规律^[13]。

参考文献:

[1] 张炳文, 李正焕, 杨智琛, 等. 青海省大柴旦镇西台吉乃尔湖锂矿矿区勘探报告[M]. 格尔木: 青海省柴达木综合地质勘查大队, 2002.

[2] 张明刚, 黄麒. 放射性同位素测速法在察尔汗盐湖岩盐渗透性研究中的应用[J]. 盐湖研究, 1990, (1): 2—8.

[3] 张彬, 王钊, 李大毛, 等. 单井同位素示踪法测定水文地质参数在武汉长江隧道工程中的应用[J]. 勘察科学技术, 2003, (2): 39—42.

[4] 陈建生, 刘光尧. 同位素示踪测井[M]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1999.

[5] 刘光尧. 用放射性同位素测定含水层水文地质参数的方法(上) [J]. 勘察科学技术, 1997, (1): 21—27.

[6] 刘光尧. 用放射性同位素测定含水层水文地质参数的方法(下) [J]. 勘察科学技术, 1997, (2): 3—8.

[7] 李樟苏, 程和森, 郭吉堂. 同位素技术在水利工程中的应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

[8] 彭涛, 汪丙国, 王文峰, 等. 单井同位素稀释技术在过江隧道水文地质参数测定中的应用[J]. 湖南科技大学学报, 2006, (3): 13—36.

[9] 于升松. 察尔汗盐湖首采区钾卤水动态及其预测[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[10] 高正夏, 徐军海, 王建军, 等. 同位素技术测试地下水流速流向的原理及应用[J]. 河海大学学报, 2003, 29(6): 655—658.

[11] 陈建生, 杜国平, 方杰. 同位素示踪方法测定地下水及含水层参数[J]. 水文地质工程地质, 1991, (6): 57—61.

[12] 王恒纯. 同位素水文地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 1991.

[13] 韩庆之, 陈辉, 万凯军, 等. 武汉长江底钻孔同位素单井法地下水流速、流向测试[J]. 水文地质工程地质, 2003, (2): 74—77.

Determination of Hydrogeological Parameters of Underground Brine in the West Taijinar Salt Lake by Using Single Well Isotope Dilution Method

SUN Ya-lian^{1,2}, MA Hai-zhou¹, GAO Dong-lin¹, LI Ji-cheng³, ZHANG Xi-ying¹, ZHANG Ming-gang¹
(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China;
3. Key Lab of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Northwest A & F University, Yangling, 712100, China)

Abstract: Determination of hydrogeological of aquifer is mainly based on traditional pumping test in China, however, this method needs high costs for tests and well drilling. The isotope tracing method can obtain the aquifer parameters with shorter periods and lower costs compared with the traditional ways. It can efficiently improve the determination accuracy of the hydrogeological parameters, shorten the construction periods and save the investment as well. The single well isotope dilution method was applied in order to determine the hydrogeological parameters of the West Taijinar Salt Lake, such as the underground brine flow rate and flow direction, permeability coefficient and so on. To determine the hydrogeological parameters correctly is of great theoretical and practical significance for both scientific research and mine exploitation.

Key words: Single well isotope dilution; Underground brine flow rate; Underground brine flow direction; Permeability coefficient; West Taijinar Salt Lake