

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0147

卢放, 刘伟朋, 胡文广, 等. 抽水试验影响半径的 $\alpha$ 读数和自然电位特征[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 163-169. LU F, LIU W P, HU W G, et al. Characteristics of  $\alpha$  readings and spontaneous potential and their relationships with influence radius of pumping test[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 163-169. (in Chinese)

## 抽水试验影响半径的 $\alpha$ 读数和自然电位特征

卢放, 刘伟朋, 胡文广, 罗旋

(中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

**摘要:** 确定潜水完整井单井抽水试验的渗透系数和影响半径, 对潜水资源调查工作具有重要意义。依据水文地质资料, 使用库萨金公式粗略计算了顺平县某单井的影响半径, 分析了该井的 $\alpha$ 读数和自然电位特征, 并利用抽水试验的观测井资料验证了 $\alpha$ 读数和自然电位与影响半径之间的对应关系。结果表明:  $\alpha$ 读数和自然电位与抽水试验影响半径之间存在一定的对应关系, 两者在抽水井处出现最大值, 而从抽水井向影响半径边缘处其值逐步下降, 最后接近自然背景值; 潜水完整井稳定抽水试验中常用的库萨金公式准确度较低, 使用 $\alpha$ 读数和自然电位来获取影响半径, 其结果可靠, 在条件类似的中、细砂潜水含水层分布区具有可推广性。

**关键词:** 抽水试验; 影响半径; 渗透系数;  $\alpha$ 读数; 自然电位

中图分类号: P641 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Characteristics of $\alpha$ readings and spontaneous potential and their relationships with influence radius of pumping test

LU Fang, LIU Weipeng, HU Wenguang, LUO Xuan

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, Baoding 071051, China)

**Abstract:** It is of great significance to determine permeability and influence radius of pumping test from a single complete submersible well in arid area, which was roughly calculated from Kuzagin formula with Hydrogeologic data at the Shunping County in this study. Characteristics of  $\alpha$  readings and spontaneous potential of the well were investigated, and then well observations were used to verify the relationship among  $\alpha$  readings, spontaneous potential and the influence radius. The results showed that there was a close relationship among  $\alpha$  readings, spontaneous potential and influence radius. The maximum value of  $\alpha$  readings and spontaneous potential appeared at the spot of pumping well. These two parameters decreased gradually from the spot of pumping well to the edge of influence radius, and at last these two values approached background level of original water table. The accuracy of Kuzagin formula, which is commonly used in steady pumping test of complete submersible well was poor. The  $\alpha$  readings and spontaneous potential were then used to obtain the influence radius, and the result was reliable. It was a representative example in middle and fine sand aquifers with similar conditions.

**Key words:** pumping test; influence radius; permeability;  $\alpha$  readings; spontaneous potential

在干旱区水资源开发利用过程中, 地下水资源的地位举足轻重。抽水试验是地下水资源评价不可

或缺的重要环节<sup>[1-2]</sup>。抽水试验的主要任务之一, 就是确定含水层的水文地质参数-渗透系数和影响半

收稿日期: 2019-01-31 修回日期: 2019-03-30 网络出版时间: 2019-07-18  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190717.1403.008.html>  
基金项目: 国土资源部地质调查项目(DD20160240)  
作者简介: 卢放(1977—), 男, 湖北随州人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文地质研究。E-mail: lufang1977@126.com

径<sup>[3-4]</sup>。20 世纪 50 年代,我国抽水试验水文地质参数(如渗透系数、影响半径、导水系数、给水度等)的研究工作开始起步,近 70 年来积累了各类丰富的资料<sup>[5-8]</sup>。考虑到工作精度和成本,在地下水资源评价的普查阶段,常使用单井抽水试验来获取含水层的渗透系数<sup>[9-10]</sup>。该方法操作简便,效率较高,但要获取未知量渗透系数,需要前期确定另一个未知量-影响半径<sup>[11-12]</sup>。影响半径本身就是未知量,计算获得的渗透系数准确度差<sup>[13-14]</sup>,对地下水渗流特征的特征甚为粗略,难以满足实际需要。因此,结合其它方法来确定单井的影响半径,再进一步较为精确地计算渗透系数,是一项亟待研究的重要工作。

前人已有大量  $\alpha$  读数和自然电位的应用研究,但多集中于铀矿勘查领域<sup>[15-16]</sup>,针对抽水试验影响半径的研究甚为少见。在充分利用研究区水文地质资料和单井抽水试验数据的基础上,本文尝试探讨  $\alpha$  读数和自然电位特征与影响半径的对应关系,为该研究区地下水资源的开发和保护提供决策依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于河北省保定市顺平县刘家庄。该村位于七节河北侧 500 m 附近。七节河近东西向穿过研究区,古河道分布范围大。研究区地层岩性较为简单:埋深 0~2 m 为全新统冲积黄褐色亚砂土,分布于河谷、河漫滩以及 I 级阶地;2~22 m 为较均匀的中、细砂;22 m 以深为致密白云岩。地下水

位埋深约 3 m。

研究区地下水类型为潜水,含水层厚度为 19 m,岩性为中、细砂。抽水井深 24 m,致密白云岩顶板约在埋深 22 m 处,为潜水完整井。

### 1.2 $\alpha$ 读数和自然电位的获取

$\alpha$  读数是基于  $\alpha$  射线测量的累积法测氡技术。比如铀镭系的<sup>222</sup>Rn 是惰性气体(氡气),易溶于水,半衰期为 3.8 d。释放出  $\alpha$  射线后,<sup>222</sup>Rn 衰变为<sup>218</sup>Po。在有利的情况下,水中氡气的浓度可以很高,约为  $n \times 10^2 \sim n \times 10^5$  Bq/L。例如在导水壁附近沉积的碳酸岩盐里,由于吸附、沉淀导致镭的富集,则地下水中氡气浓度就会升高。测量氡气释放出的  $\alpha$  射线强度,就能得到  $\alpha$  读数。这就为  $\alpha$  读数描述地下水的变化提供了物理依据<sup>[17-18]</sup>。

地球内部存在天然稳定的电流场(自然电场),该电场与金属导体的氧化-还原作用、地下水溶液中电离子的过滤作用或扩散作用之间存在着复杂的关系。地下水溶液与岩石颗粒之间形成双电层,岩石颗粒一侧吸附负离子,而地下水溶液一侧吸附正离子。当地下水流动或渗透时,地下水流的的上游视同聚集负离子,而地下水流的下游聚集正离子,该过程好似岩石颗粒过滤保留下相当部分的负离子,从而形成了电位差。进行抽水试验时,随着地下水向抽水井渗透,大量正离子聚集在抽水井孔及其周边较小范围,而远离井孔处的负离子则不断增加,这就为自然电位描述抽水试验地下水流的动态变化提供了理论基础<sup>[19-20]</sup>。

$\alpha$  读数和自然电位的获取按照图 1 进行。

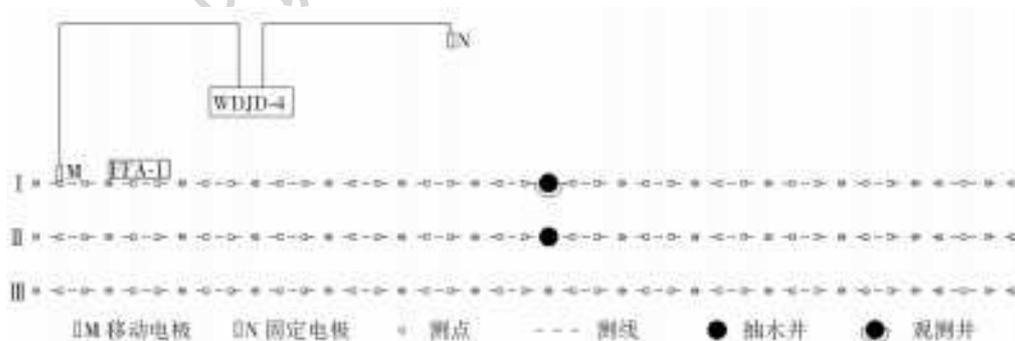


图 1  $\alpha$  读数和自然电位获取示意图

Fig. 1 Sketch of spontaneous potential and  $\alpha$  readings

图 1 中,共 I、II 和 III 3 条测线,每条测线 10 个测点,不极化电极 N 作为固定电极,放置于距离研究区“无穷远”处(实际操作中,位于研究区边缘、距离研究区较远距离且地下电流场较为稳定的位置)。不极化电极 M 为移动电极,按照一定顺序沿各测线中的各测点逐点移动。本次研究使用 WDJD-4 多

功能数字直流激电仪逐个测点获取 M 相对于 N 的电位差。不极化电极 M 所在的位置即为测点位置,记为 X(单位为 m),该测点位置的自然电位,记为 U(单位为 mV)。图中正在获取的是 I 号测线左起第 2 个测点的自然电位值。在上述各测线各测点,按照获取自然电位值的既有顺序,使用 FFA-1 快速  $\alpha$

数字闪烁辐射仪逐个测量各个测点的 $\alpha$ 读数,记为 $N$ (单位为 counts/3 min)。图中正在获取的是 I 号测线左起第 5 个测点的 $\alpha$ 读数值。

以研究区某抽水井为平面中心,沿东西方向平行布设 I、II 和 III 测线。I 号测线位于研究区北侧,II 号测线居中,III 号测线位于研究区南侧。相邻测线之间距离为 10 m。每条测线布置 41 个测点,测点序号由西向东逐渐增大,相邻测点之间的距离为 10 m,每条测线长 400 m。抽水井位于 II 号测线第 21 号测点处(见图 1)。

抽水试验前,进行第 1 次 $\alpha$ 读数和自然电位数据的获取工作。抽水稳定延续时间达到 16 h 后,进行第 2 次 $\alpha$ 读数和自然电位数据的获取工作。抽水试验前进行 $\alpha$ 读数和自然电位获取工作时,抽水井处的水位是自然的原始水位。抽水稳定延续时间 16 h 后进行 $\alpha$ 读数和自然电位获取工作时,抽水井处的水位应该是下降后的水位。

### 1.3 抽水试验渗透系数和影响半径的获取

单井抽水试验在普查阶段进行,一般要求做三次水位下降,以期对水文地质条件起控制作用。在单井抽水试验中获得抽水井的出水量、抽水井内的水位下降值、抽水井半径和含水层厚度等参数,即可计算获取抽水试验的渗透系数和影响半径<sup>[21]</sup>。

渗透系数表征含水层的渗透性能。潜水完整井稳定抽水试验计算渗透系数的公式为

$$K=0.733 \frac{Q(\lg R-\lg r_w)}{(2H-s_w)s_w} \quad (1)$$

式中: $K$  为渗透系数(m/d); $Q$  为抽水井的出水量( $\text{m}^3/\text{d}$ ); $R$  为影响半径(m); $r_w$  为抽水井的半径(m); $H$  为潜水含水层厚度(m); $s_w$  为抽水井内的水位下降值(m)。

影响半径表征含水层的规模和补给能力。潜水完整井稳定抽水试验计算影响半径的库萨金公式为

$$R=2s_w \sqrt{KH} \quad (2)$$

式中各变量及其符号说明同式(1)。

$R$  在式(1)中以较不敏感的对数形式出现。因此,采用试算法对  $K$  和  $R$  进行计算。先根据潜水含水层岩性粗略假设一个  $R$  的估计值<sup>[22]</sup>,代入式(1)求取  $K$  值,再将求取的  $K$  值代入式(2)计算  $R$  值。如果此时  $R$  的计算值与先前粗略假设的  $R$  的估计值相差很大,说明粗略假设的  $R$  的估计值需要完善。将  $R$  的计算值代入式(1)重新计算  $K$  值,再将第二次求取的  $K$  值代入式(2)求取  $R$  值依次循环,直至式(2)求取的  $R$  值与打算代入式(1)的  $R$  值相差最小。此时  $R$  的估计值即为试算法所求取的抽

水试验影响半径值。

存在观测井时,计算影响半径的公式为

$$\lg R = \frac{s_w(2H-s_w)\lg r_1 - s_1(2H-s_1)\lg r_w}{(s_w-s_1)(2H-s_w-s_1)} \quad (3)$$

式中: $R$ 、 $H$ 、 $s_w$  和  $r_w$  同公式(1)。 $r_1$  为抽水井和观测井之间的距离(m); $s_1$  为观测井内水位下降值(m)。

有观测井的抽水试验计算得到的  $R$  较为准确<sup>[23]</sup>。在地下水资源评价的普查阶段,由于工作精度和成本的限制,很少布置较多的观测井进行抽水试验。本次研究有观测井抽水试验的结果,仅用于单井抽水试验、 $\alpha$ 读数和自然电位对  $K$  和  $R$  之间关系的探讨。

## 2 结果分析

对潜水完整井进行了抽水试验,所得结果见表 1。

表 1 单井抽水试验结果

Tab. 1 Results of pumping test in a single well

水位下降	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	$S_w/\text{m}$	$R_w/\text{m}$	$H/\text{m}$
1	415	1.02	0.117 5	19
2	767	1.93	0.117 5	19
3	1160	3.00	0.117 5	19

### 2.1 潜水完整井单井抽水试验结果与分析

根据影响半径经验值统计表<sup>[24]</sup>,针对中、细砂,先粗略假设抽水试验  $R$  的估计值为 100 m。然后按照式(1)和(2),分别取抽水井出水量  $Q$  为 1 160  $\text{m}^3/\text{d}$ 、抽水井半径  $r_w$  为 0.117 5 m、潜水含水层厚度  $H$  为 19 m 和抽水井内的水位下降值  $s_w$  为 3.00 m 进行试算

$$K=0.733 \frac{Q(\lg R-\lg r_w)}{(2H-s_w)s_w}$$

$$0.733 \frac{1\ 160 \times (\lg 100 - \lg 0.1\ 175)}{(2 \times 19 - 3.00)} \approx 23.73 \text{ m/d}$$

$$R=2s_w \sqrt{KH} = 2 \times 3.00 \times \sqrt{23.73 \times 19} \approx 127.39 \text{ m}$$

试算得到的  $K$  和  $R$  的结果见表 2。

由表 2 可知,当影响半径  $R$  的估计值取 130 m 时, $R$  的计算值为 129.85 m。相比其它  $R$  的估计值(比如 129 m 和 131 m),此时  $R$  的估计值和  $R$  的计算值相差最小为 0.15 m(比如 0.77 m 和 1.08 m),最为符合要求。 $R$  为 130 m 时,对应的渗透系数  $K$  为 24.65 m/d,此时的  $K$  值与渗透系数经验值大致符合<sup>[25]</sup>。

按照式(1)和(2),取抽水井出水量  $Q$  为 767  $\text{m}^3/\text{d}$ (或 415  $\text{m}^3/\text{d}$ )和抽水井内的水位的下降值  $s_w$  为 1.93 m(或 1.02 m)分别进行试算,得到的结果

均显示  $R$  变化不大。

表 2 试算法得到的  $K$  和  $R$   
Tab. 2  $K$  and  $R$  values from trial method

$R$ 的估计值	$K$	$R$ 的计算值
100	23.73	127.39
110	24.06	128.29
120	24.37	129.10
126	24.54	129.56
128	24.59	129.70
129	24.62	129.77
130	24.65	129.85
131	24.68	129.92
132	24.70	129.99
134	24.76	130.13
140	24.91	130.53
150	25.15	131.17
160	25.38	131.76

## 2.2 $\alpha$ 读数和自然电位结果与分析

获取各测点  $\alpha$  读数和自然电位后,绘制自然电位剖面图和  $\alpha$  读数剖面图。图 2 是经过抽水井的第 II 条测线自然电位剖面图(横轴为距离  $X(\text{m})$ ;纵轴为自然电位  $U(\text{mV})$ );虚线为抽水试验前的自然电位曲线;实线为第 3 次水位下降为 3.00 m 时的自然电位曲线)。

图 2 显示,抽水试验前,测量的自然电位基本呈水平状态,曲线较少跳动,其自然电位值变化范围较小,基本位于  $-17 \sim 2 \text{ mV}$ 。抽水稳定延续时间达到 16 h 后,测线前段( $0 \sim 90 \text{ m}$ )以及测线后段( $310 \sim 400 \text{ m}$ ),自然电位变化范围较小( $-16 \sim 1 \text{ mV}$ )。与抽水试验前自然电位的变化范围相比,这两段范围内的自然电位差异不大。而测线中段(测线  $100 \sim 300 \text{ m}$ )的自然电位明显表现为高值反映( $8 \sim 122 \text{ mV}$ ),且以测线  $X=200 \text{ m}$  为对称轴,两侧大致呈镜像形态。此时根据自然电位的分布特征,推断影响半径  $R$  约为  $100 \text{ m}$ 。

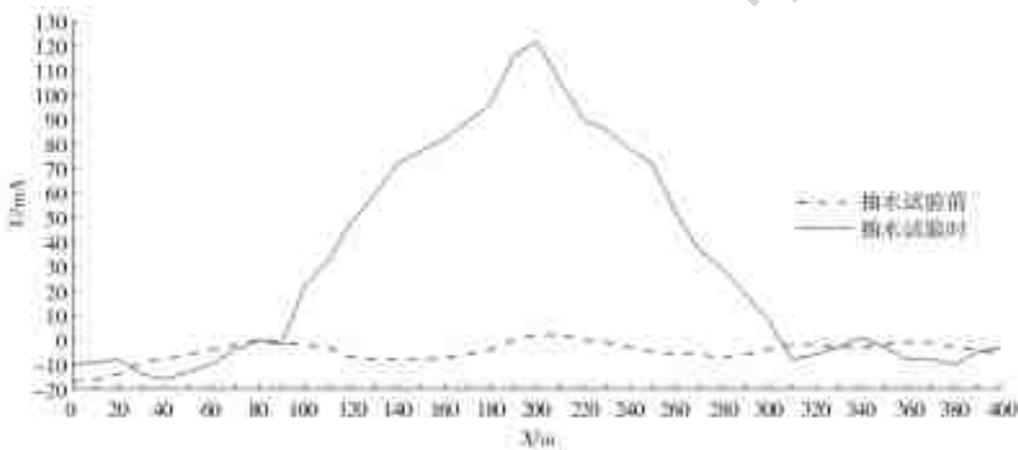


图 2 第 II 条测线自然电位剖面

Fig. 2 Profile of No. II spontaneous potential

图 3 是第 II 条测线  $\alpha$  读数剖面图(横轴为距离  $X(\text{m})$ ;纵轴为  $\alpha$  读数  $N(\text{counts}/3 \text{ min})$ );虚线为抽

水试验前的  $\alpha$  读数曲线;实线为第 3 次水位下降为 3.00 m 时的  $\alpha$  读数曲线)。

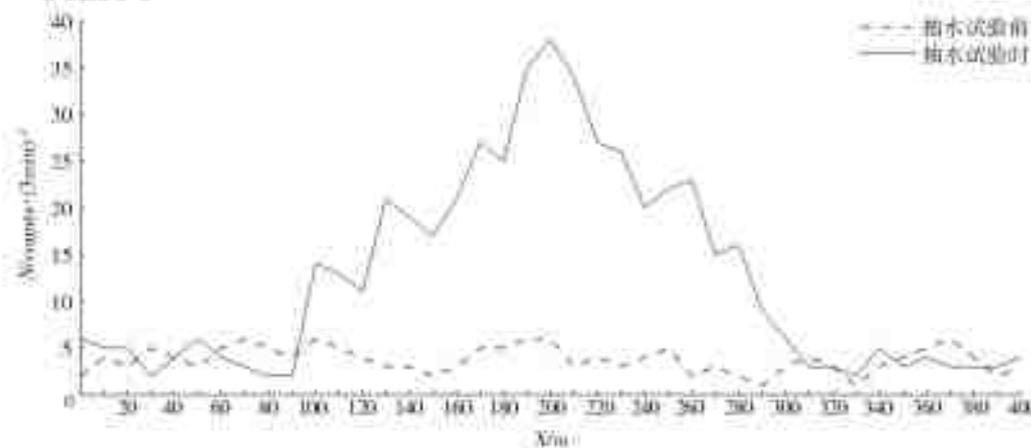


图 3 第 II 条测线  $\alpha$  读数剖面

Fig. 3 Profile of No. II  $\alpha$  readings

图3显示,抽水试验前,测量的 $\alpha$ 读数曲线纵向起伏较小,变化范围在1~6 counts/3 min。抽水稳定延续时间达到16 h后,测线前段(0~90 m)以及测线后段(310~400 m), $\alpha$ 读数变化范围较小(2~6 counts/3 min)。与抽水试验前 $\alpha$ 读数的变化范围相比,这两段范围内的 $\alpha$ 读数差异不大。测线中段(测线100~300 m)的 $\alpha$ 读数明显表现为高值反映(6~38 counts/3 min),以测线 $X=200$  m为对称轴,两侧大致呈镜像形态。此时根据 $\alpha$ 读数的分布特征,推断影响半径 $R$ 约为100 m。

### 2.3 有观测井抽水试验结果

观测井位于抽水井正北方向10 m,即I号测线第21号测点处。抽水井进行抽水试验时,也实时进行了观测井内水位下降值的测量。抽水井第3次水位下降为3.00 m时,对应观测井内水位下降为0.97 m。根据公式(3),取抽水井的水位下降值 $s_w$ 为3.00 m、潜水含水层厚度 $H$ 为19 m、观测井和抽水井之间的距离 $r_1$ 为10 m、观测井内水位下降值 $s_1$ 为0.97 m和抽水井的半径 $r_w$ 为0.117 5 m进行计算

$$\lg R = \frac{s_w(2H-s_w)\lg r_1 - s_1(2H-s_1)\lg r_w}{(s_w-s_1)(2H-s_w-s_1)} \approx 2.003 5$$

因此,推测有观测井抽水试验时的影响半径 $R$ 约为101 m。该数值与 $\alpha$ 读数和自然电位的试验结果相当接近。

## 3 讨论

### 3.1 研究区 $\alpha$ 读数和自然电位与影响半径的对应关系以及两种曲线的形态特征

抽水前 $\alpha$ 读数曲线和自然电位曲线均呈现为大致的水平状态,说明地下水位未受人为扰动之前,地下水携带的正离子含量和氦气质量浓度变化很小,其平衡状态尚未打破。抽水井影响半径范围以外(0~90 m和310~400 m),对 $\alpha$ 读数曲线和自然电位曲线分别进行抽水前、后对比分析,发现两种曲线有细微抖动,但变化范围依旧不大(比如抽水前自然电位值在-17~0 mV,抽水后自然电位值在-16~1 mV;抽水前 $\alpha$ 读数在1~6 counts/3 min,抽水后 $\alpha$ 读数在2~6 counts/3 min)。抽水井影响半径范围以内(100~300 m),两种曲线出现了剧烈的先上升再下降现象(比如自然电位值从 $X=100$  m处的22 mV快速爬升至 $X=200$  m处的122 mV,再迅速降落至 $X=300$  m处的8 mV; $\alpha$ 读数从 $X=100$  m处的14 counts/3 min升至 $X=200$  m处的38 counts/3 min,再降至 $X=300$  m处的6 counts/3 min),且曲

线以抽水井所在的位置 $X=200$  m呈现轴对称状态,说明影响半径也基本呈现对称形态。

相比自然电位曲线, $\alpha$ 读数曲线显得较为粗糙,全程呈现轻微的“锯齿”,但在大趋势上不影响使用 $\alpha$ 读数曲线的整体形态对抽水试验影响半径的推断结果。初步推测原因是 $\alpha$ 读数在获取过程中容易收到干扰。

地下水的流动方向,造成了水中正离子含量和氦气质量浓度向井孔处富集,形成了抽水井所在的位置 $X=200$  m处 $\alpha$ 读数和自然电位的全曲线最大值。

潜水完整井单井抽水试验粗略试算得到 $R$ 约为130 m, $\alpha$ 读数和自然电位推断得到的 $R$ 约为100 m,根据有观测井抽水试验计算得到的 $R$ 约为101 m。由此可见, $\alpha$ 读数和自然电位得到的 $R$ 与有观测井抽水试验得到的 $R$ 很是接近,而单井抽水试验粗略试算得到的 $R$ 误差较大。

### 3.2 $\alpha$ 读数和自然电位确定影响半径的优势及其适用条件

#### 3.2.1 利用 $\alpha$ 读数和自然电位确定抽水试验影响半径的优势

$\alpha$ 读数和自然电位数据获取时间短,工作效率高。在一个测点上采集 $\alpha$ 读数需时约3 min,而在一个测点上采集自然电位值仅需要数秒。再加上搬运仪器、挪动不极化电极的时间,一个测点的 $\alpha$ 读数和自然电位的数据获取,仅需要大约10 min,工作效率高,能较大程度的节约费用。

在充分分析研究区水文地质资料的基础上,对 $\alpha$ 读数和自然电位数据进行合理的解释,即可获得可靠的抽水试验影响半径。这样为观测井数量的削减提供了可能,以便节省更多的经费。

松散层抽水井的影响范围大致呈圆形或椭圆形。基岩山区广泛存在着大量断裂、裂隙和溶蚀,地下水多以带状分布,抽水井的影响范围很不均匀。以抽水井为圆心,可在不同方位分别布置多条 $\alpha$ 读数和自然电位测线。根据各个方位各条曲线形态的变化特征,形象刻画抽水井不同方位水位下降的差异(即降水漏斗的立体形态),借此可了解含水层的各向异性。单井抽水试验难以描述含水层水文地质参数在空间上的变化特征。

#### 3.2.2 利用 $\alpha$ 读数和自然电位确定抽水试验影响半径的适用条件

尽量规避各类人文干扰。强烈的干扰使 $\alpha$ 读数和自然电位的曲线形态发生歪曲,严重影响抽水试验影响半径的判别。比如电线、动力机械的接地设

备,在地层中产生人为的附加电场,影响地下水溶液中电离子的过滤或扩散,导致获取的数据对地下水运移的实际情况产生曲解。与地方政府协商在合理的时间段(如夜间 0 至 4 时)关停电线、动力机械,然后快速获取  $\alpha$  读数和自然电位,最大限度的保证数据的真实程度。

不极化电极的接地条件要求良好。接地条件差(如土壤太少,卵砾石太多),获取的自然电位数据将产生严重的“锯齿”,导致曲线出现畸变,难以准确描述抽水试验的影响半径。接地条件不佳时,可在其它地方挖取土壤,使其浸透饱和的硫酸铜溶液,然后将土壤覆盖在研究区地表。将不极化电极布置在浸透饱和硫酸铜溶液的土壤中,能较大程度地改善接地条件。

浮土覆盖层厚度不能太大,一般为地表以下 30 m 以浅。浮土覆盖层过厚,获取的数据值很小,曲线峰值太低,难以有效确定抽水试验的影响半径。

## 4 结 论

(1)  $\alpha$  读数和自然电位与抽水试验影响半径之间存在一定的对应关系,两者在抽水井处出现最大值,而从抽水井向影响半径边缘处其值逐步下降,最后接近自然背景值。

(2) 潜水完整井稳定抽水试验中常用的库萨金公式准确度较低。受制于工作精度和成本要求,可以使用  $\alpha$  读数和自然电位来获取影响半径,其结果是可靠的,在类似地区具有较高的可推广意义。

### 参考文献(References):

[1] 吴爱民,李长青,徐彦泽,等. 华北平原地下水可持续利用的主要问题及对策建议[J]. 南水北调与水利科技, 2010,8(6):110-128. (WU A M, LI C Q, XU Y Z, et al. Key Issues influencing sustainable groundwater utilization and its countermeasures in North China Plain [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010,8(6):110-128. (in Chinese)) DOI:10.3724/sp.j.1201.2010.06110.

[2] 张光辉,严明疆,刘春华,等. 太行山前丘陵区基岩裂隙水赋存的非均一性和易疏干性特征[J]. 南水北调与水利科技, 2013,11(1):104-109. (ZHANG G H, YAN M J, LIU C H, et al. Characteristics of non-uniformity and vulnerability of aquifers to dewatering of bedrock fissure water in the hilly area of the Taihang Mountains piedmont [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013,11(1):104-109. (in Chinese)) DOI:10.3724/sp.j.1201.2013.01104.

[3] 张连杰,刘礼领,李伟强. 巴基斯坦塔尔地区煤层下部

含水层回灌试验研究[J]. 人民长江, 2018,49(23):92-101. (ZHANG L J, LIU L L, LI W Q. Study on recharge for aquifer beneath coal seams of Thar area, Pakistan[J]. Yangtze River, 2018,49(23):92-101. (in Chinese)) DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.23.016.

[4] 桂春雷,石建省,刘继朝,等. 云神经网络确定含水层参数研究[J]. 南水北调与水利科技, 2014,12(2):87-91. (GUI C L, SHI J S, LIU J C, et al. Determination of aquifer parameters using cloud neural network [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014,12(2):87-91. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.02.021.

[5] 薛宏智,周维博. 辐射井的抽水降落曲面模型[J]. 水利学报, 2012,43(11):1381-1386. (XUE H Z, ZHOU W B. Curved surface model of the pumping descent for radiation well[J]. Shuili Xuebao, 2012,43(11):1381-1386. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2012.11.016.

[6] 李星宇,南天,王新娟,等. 基于微水试验的北京大兴隐伏岩溶裂隙渗透系数求取方法[J]. 南水北调与水利科技, 2014,12(4):156-160. (LI X Y, NAN T, WANG X J, et al. Determination of permeability coefficient of concealed karst fractures using slug test in Daxing of Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014,12(4):156-160. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.04.034.

[7] 刘心彪,张永军. 陇东盆地白垩系含水层水文地质参数求解[J]. 煤田地质与勘探, 2014,42(1):35-39. (LIU X B, ZHANG Y J. Solution of hydrogeological parameters of the Cretaceous aquifers in Longdong basin[J]. Coal Geology and Exploration, 2014,42(1):35-39. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-1986.2014.01.008.

[8] 尚银生,杨浪峰,梁进. 也论“单位涌水量就是导水系数”[J]. 水文地质工程地质, 2018,45(4):165-168. (SHANG Y S, YANG L F, LIANG J. Also revisit ‘The specific well yield is the transmissivity’[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2018,45(4):165-168. (in Chinese)) DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.04.24.

[9] 周子侯,秦志泉. 单孔稳定流抽水试验计算渗透系数对比研究[J]. 矿产勘查, 2018,9(4):706-713. (ZHOU Z Y, QIN Z Q. Comparison of the permeability coefficients for single hole steady water pumping test[J]. Mineral Exploration, 2018,9(4):706-713. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1674-7801.2018.04.030.

[10] 曹祖宝,李建文,王新锋. 基于矿井突水反演计算水文地质参数方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2015,43(5):111-114. (CAO Z B, LI J W, WANG X F. Study on method of mine water inrush for inverse calculation of hydrogeological parameters [J]. Coal Science and Technology, 2015,43(5):111-114. (in Chinese)) DOI:10.13199/j.cnki.cst.2015.05.027.

- [11] 洪迪思,王亮.淮安市区某深基坑水地质参数的确定与降水方案设计[J].地下水,2016,38(4):31-33. (HONG D S, WANG L. Determination of hydrogeologic parameters and dewatering scheme design of a deep foundation pit in Huaian City [J]. Ground Water, 2016, 38(4): 31-33. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-1184. 2016. 04. 012.
- [12] 庄保辉,王亚伟.单位涌水量换算方法的讨论与应用[J].煤炭技术,2016,35(8):211-213. (ZHUANG B H, WANG Y W. Discussion and application of conversion about specific yield[J]. Coal Technology, 2016, 35(8): 211-213. (in Chinese)) DOI: 10. 13301/j. cnki. ct. 2016. 08. 087.
- [13] 凤蔚,王晓燕,刘振英,等.松散岩类承压含水层影响半径计算方法[J].人民黄河,2017,39(12):57-61. (FENG W, WANG X Y, LIU Z Y, et al. Calculating methods of influence radius in the confined aquifer of loose stuff [J]. Yellow River, 2017, 39(12): 57-61. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2017. 12. 014.
- [14] 杨明坤,刘生财.单孔和多孔抽水试验确定承压含水层影响半径准确性的对比分析[J].市政技术,2014,32(1):109-111. (YANG M K, LIU S C. Contrastive analysis of influence radius accuracy of confined aquifer determined by single and multiple well pumping test [J]. Municipal Technology, 2014, 32(1): 109-111. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-7767. 2014. 01. 032.
- [15] 杨亚新,罗齐彬,张叶,等.铀矿找矿中 $\alpha$ 径迹测量方法的影响因素研究[J].地球物理学报,2018,61(11):4702-4711. (YANG Y X, LUO Q B, ZHANG Y, et al. Study on influence factors of the  $\alpha$ -track measuring method for uranium prospecting [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(11): 4702-4711. (in Chinese)) DOI: 10. 6038/cjg2018l0552.
- [16] 姜涛,刘国安,吴建勇,等.粤北某铀矿勘查区深部铀矿找矿潜力分析[J].地质与勘探,2018,54(1):52-58. (JIANG T, LIU G A, WU J Y, et al. Analysis of prospecting potential of deep uranium deposits in an uranium exploration area of north Guangdong Province [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(1): 52-58. (in Chinese)) DOI: 10. 13712/j. cnki. dzykt. 2018. 01. 006.
- [17] 刘波,张新军,王兴.测氡法在低射气区隐伏断层探测的应用[J].煤矿安全,2015,46(5):156-159. (LIU B, ZHANG X J, WANG X. Application of Radon measurement in blind fault detection of low radioactive area [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(5): 156-159. (in Chinese)) DOI: 10. 13347/j. cnki. mkaq. 2015. 05. 045.
- [18] 骆欢,衣鹏.基于氦同位素的闸塘渗漏检测研究[J].人民长江,2017,48(24):101-105. (LUO H, YI P. Study on sluice leakage detection based on Rn isotope [J]. Yangtze River, 2017, 48(24): 101-105. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2017. 24. 020.
- [19] 刘静,刘盛东,杨胜伦,等.采动过程中顶板围岩水渗流自然电位响应特征[J].煤炭学报,2013,38(6):1031-1037. (LIU J, LIU S D, YANG S L, et al. Self-potential response characteristics to water seepage in wall rocks affected by mining [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 1031-1037. (in Chinese)) DOI: 10. 13225/j. cnki. jccs. 2013. 06. 031.
- [20] 王俊业.应用自然电场法研究地下水流场[J].物探与化探,2002,26(2):140-142. (WANG J Y. The application of natural electric field method to the study of groundwater flow field [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 26(2): 140-142. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-8918. 2002. 02. 013.
- [21] 朱宏军,黄选明,胡莉莉,等.煤矿水地质勘探中稳定流抽水试验确定水文地质参数讨论[J].中国安全生产科学技术,2014,10(3):24-29. (ZHU H J, HUANG X M, HU L L, et al. Discussion on determining the hydrogeological parameters in steady flow pumping test of coal mine hydrogeological exploration [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(3): 24-29. (in Chinese)) DOI: 10. 11731/j. issn. 1673-193x. 2014. 03. 04.
- [22] 张高锋,穆建军,李晓辉,等.基于抽水试验的地热储层水文地质特性研究[J].地下水,2009,31(3):114-116. (ZHANG G F, MU J J, LI X H, et al. Research on hydrogeological characteristics of geothermal reservoir based on water pumping experiment [J]. Ground Water, 2009, 31(3): 114-116. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-1184. 2009. 03. 038.
- [23] 孙尚云,王大设,陈从磊.基于Excel的钻孔单位涌水量换算[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2013,33(3):21-23. (SUN S Y, WANG D S, CHEN C L. Excel-based conversion of specific inflow in borehole [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 33(3): 21-23. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1098. 2013. 03. 005.
- [24] 中国地质调查局.水文地质手册[M].第二版.北京:地质出版社,2012:647-648. (Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey. Handbook of hydrogeology [M]. Editon 2. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 647-648. (in Chinese))
- [25] 刘兆昌,李广贺,朱琨.供水水文地质[M].北京:中国建筑工业出版社,1998:97-99. (LIU Z C, LI G H, ZHU K. Water supply hydrogeology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998: 97-99. (in Chinese))