

# 鄂尔多斯白垩系盆地地下水 地球物理勘查特点和技术

武毅<sup>1,2)</sup>

(1) 中国地质大学, 湖北 武汉 430074 (2) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 保定 071051)

**摘要** 从鄂尔多斯白垩系盆地地下水地球物理勘查特点出发, 分析了该地区地球物理勘查所要解决的两大问题: ①查明白垩系盆地地层分布特征; ②进行地下水的水质判别。提出了应用频率域电磁法即  $E_{h-4}$  电导率成像系统解决上述两大问题的可能性, 结合实例对勘查结果进行了分析, 指出了  $E_{h-4}$  电导率成像系统勘查白垩系地层分布的合理性和进行水质判别的关键问题, 认为  $E_{h-4}$  电导率成像系统勘查鄂尔多斯白垩系盆地地下水是合理和有效的。

**关键词** 鄂尔多斯 白垩系盆地  $E_{h-4}$  电导率成像系统 地层分布 水质

## Characteristics and Techniques of Geophysical Exploration in Search for Groundwater in Ordos Cretaceous Basin

WU Yi

(1) China University of Geosciences, Wuhan, Hubei, 430074;

2) Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Baoding, Hebei, 071051)

**Abstract** Stratigraphic distribution and groundwater quality are two key problems which need to be solved in the geophysical prospecting for groundwater in Ordos Cretaceous Basin. This paper analyzes these problems and gives some exploration examples. At the same time, it is pointed out that the  $E_{h-4}$  electrical conductivity imaging system is useful in investigating the stratigraphic distribution and determining the water quality.

**Key words** Ordos Cretaceous basin  $E_{h-4}$  electrical conductivity imaging system stratigraphic distribution water quality

鄂尔多斯白垩系盆地是鄂尔多斯地块白垩系分布区, 是陕甘宁蒙中生代大陆型内陆拗陷的一部分, 属半封闭式沉积向斜盆地, 盆地中堆积了厚达千余米的白垩系下统志丹群地层, 岩性以砂质泥岩、泥质砂岩、砂岩为主。其水文地质特征为: 白垩系志丹群碎屑岩为连续的但不均质的含水综合体, 属裂隙孔隙双重介质。其中胶结差、疏松的砂岩孔隙度大、裂隙发育, 是良好的储水、导水介质; 胶结好、坚硬的砂岩孔隙度小、裂隙不发育, 富水性差; 泥岩的孔隙度低, 裂隙小且又闭合, 为相对的隔水层。

白垩系志丹群为内陆盆地河湖相沉积, 岩相具空间变化复杂造成水质及其水量具有变化复杂和高

原自流水盆地的特征。盆地周边和底部或受断陷盆地阻隔, 或以弱透水的泥岩、泥质灰岩为主的侏罗系构成了相对隔水的边界。潜水主要赖以大气的就地补给, 承压水以潜水的越流和来自上游的地下径流为主要补给源<sup>①</sup>。

以上地质和水文地质特征反映到地球物理勘查表现为: ①盆地地层岩性之间物性差异较小; ②勘探深度大(达千余米); ③由于该盆地为胶结-半胶结的裂隙孔隙水, 占地理环境变化较大, 造成水质和水量变化较大。因此, 选择合理、有效的地球物理勘探手段, 才能查明白垩系地层的分布埋藏特征以及各含水层岩组的水质、水量变化特征, 为查明整个白垩系

本文由地质调查项目“鄂尔多斯盆地地下水勘查”(编号: K5.2.1)资助。

改回日期: 2002-5-21, 责任编辑: 宫月萱。

第一作者: 武毅, 男, 1963年生, 高级工程师, 在读博士研究生, 主要从事水文物探技术方法研究。

① 陕西省地质队编等, 1999. 鄂尔多斯盆地地下水勘查设计书。

盆地地下水的形成、演化、赋存、富集规律提供依据。

## 1 物探方法的选择

针对白垩系盆地地下水勘察的特点,可供选择的方法有:电法(包括电阻率法及激发极化法)和地震法。

根据白垩系盆地的地质-地球物理模型,采用弹性波勘查与电性勘查相结合的方式是解决白垩系盆地地层岩性与水质变化特征的最佳组合。但由于地震勘探经费高,成本较大,一般在面积性工作中较少使用。因此,从解决问题的能力与面积等特点出发选择电法是比较合理和经济的方法。

盆地中存在一个明显的水质问题,能够间接反映地下水矿化度的物理参数只有电阻率值,应用地层电阻率与岩性、孔隙度以及温度的关系,求取赋存于地层中水的矿化度是目前唯一的途径。因此,应用电阻率法勘查是首选方案。

电法勘探作为地球物理的一大门类最基本的方法为直流电阻率法、激发极化法和交流电阻率法。对于鄂尔多斯白垩系盆地来说,交流电阻率法最适用于该地的地下水研究,该方法包括频率域电阻率法和时间域电阻率法2种类型。频率域电阻率法具有勘探深度大,效率高,分辨率高等特点,满足白垩系盆地地下水勘察的需要。 $E_{h-4}$ 电阻率成像是频率域电阻率法中一种新技术的产物,在现有技术条件下,最大程度地发挥了频率域电阻率法分辨率高、轻便、勘探深度大等特点,是电磁法最新技术的体现(郭建强等,1998;武毅等,2001)。

$E_{h-4}$ 电导率成像系统属于天然场源与部分可控源相结合的一种电磁测深系统,研究的是响应与

频率之间的关系,其观测的基本参数为:正交的电场分量( $E_x, E_y$ )和磁场分量( $H_x, H_y$ )。由电磁法理论可知,地层的视电阻率值由下式求出:

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (1)$$

其中, $\rho_s$ 为地层视电阻率; $f$ 为电磁频率; $E_x$ 为电场强度; $H_y$ 为磁场强度。

根据电磁波在介质中的传播特征,趋肤深度由下列公式给出:

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2)$$

其中, $\delta$ 为趋肤深度(m); $\rho$ 为地层平均视电阻率( $\Omega \cdot m$ ); $f$ 是频率(Hz)。

由(2)式可见,在给定情况下,频率与趋肤深度成反比,即:频率越大,勘探深度越小,反之,频率越小,勘探深度越大。这样就可通过改变不同频率达到探测不同深度电性变化的目的。

利用该系统勘查白垩系盆地具有轻便灵活、便于野外工作、可作单点或连续测深和高密度的数据采集等特点。磁探头频率响应范围为:0.1~1 000 Hz,共有58个频点(表1)。

从表中可见,该系统频点丰富且频率较低,说明其分辨率高,探测深度大。资料处理采用EMAP法,最大限度地消除静态影响,有利于判别地下水水质。

## 2 勘查效果

### 2.1 白垩系地层分布特征

白垩系地层地下水以碎屑岩孔隙水为主要特征,其主要含水层为砂岩。由于沉积地层颗粒、胶结成分、胶结程度以及水质等的变化,会引起地层电阻

表1  $E_{h-4}$ 接收频点

Table 1 Receiving frequency point of  $E_{h-4}$

序号	频点/Hz	序号	频点/Hz	序号	频点/Hz	序号	频点/Hz	序号	频点/Hz	序号	频点/Hz
1	0.1166	11	0.5412	21	2.510	31	11.70	41	54.10	51	251.0
2	0.1359	12	0.6310	22	2.930	32	13.60	42	63.10	52	293.0
3	0.1585	13	0.7356	23	3.410	33	15.80	43	73.6	53	341.0
4	0.1858	14	0.8577	24	3.980	34	18.50	44	85.80	54	398.0
5	0.2154	15	1.000	25	4.640	35	21.50	45	100.0	55	464.0
6	0.2512	16	1.170	26	5.410	36	25.10	46	117.0	56	541.0
7	0.2929	17	1.360	27	6.310	37	29.30	47	136.0	57	631.0
8	0.3415	18	1.580	28	7.360	38	34.10	48	158.0	58	736.0
9	0.3981	19	1.850	29	8.580	39	39.80	49	185.0		
10	2.150	20	2.150	30	10.00	40	46.40	50	215.0		

率的变化。所以通过地面勘测地下地层电性的变化达到划分地层的目的。一般含水砂岩电阻率呈高阻特征,其绝对值的大小反映岩性与水质的特征。而泥岩、砂质泥岩、泥质砂岩电阻率呈低阻特征。图 1 为鄂尔多斯白垩系盆地某地段的  $E_h-4$  电导率成像系统勘查剖面。其中 BK1、BK2 为 2 个已知孔。BK1 孔白垩系地层底板 598.57 m,根据测井资料,白垩系地层视电阻率大于  $27 \Omega \cdot m$ ,其中上部视电阻

率值大于  $40 \Omega \cdot m$ ,最高值可达  $70 \Omega \cdot m$ 。BK2 孔白垩系地层底板埋深 844 m,根据测井资料该孔视电阻率值远低于 BK1 孔之值,仅有几个至十几个欧姆。两孔相差 50 km 左右,地层岩性变化较大。由此可以看出, $E_h-4$  电导率成像系统勘查结果与 2 个已知孔结果十分吻合。从区域地质结构上看, $E_h-4$  电导率成像系统勘查结果反映出地层分布上该地段白垩系地层底板埋深由东至西逐步加大的特点。同

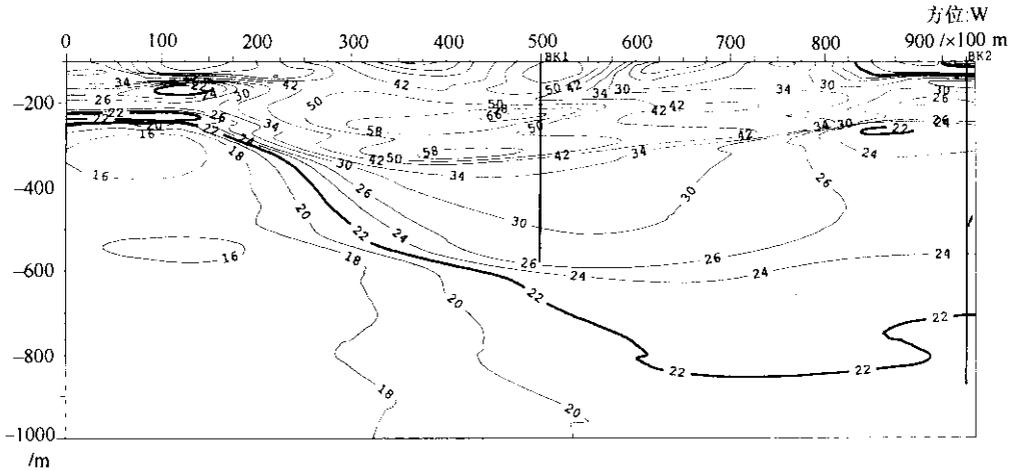


图 1 鄂尔多斯白垩系盆地靖边至安边的  $E_h-4$  勘查剖面

Fig.1 The  $E_h-4$  surveying section between Jingbian and Anbian

时,局部电阻率不均匀分布的特征反映了古地理环境变化的特点,是使水质发生复杂变化的原因之一,与实际情况基本一致。

### 2.2 水质变化特征

2.2.1 水质判别的依据 所有物理参数中,唯有电性参数(电阻率)与地下水水质关系最为密切(郭建强等 2001)。因此,要进行水质的评价,重要的任务是如何定量准确地求得地层电阻率及地层水溶液电阻率。在进行水质评价时,首先要分析该地层哪种影响因素是主要因素,并进行必要的分析。针对白垩系地层的特点,该区孔隙度占主要因素。

根据阿尔奇公式,地层水溶液电阻率与地层电阻率、孔隙度之间的关系为:

$$R_w = \varphi^m / a \times R_o$$

式中, $R_w$  为地层水溶液电阻率( $\Omega \cdot m$ ); $R_o$  为地层电阻率( $\Omega \cdot m$ ),可根据实测值经处理后求得; $\varphi$  为地层孔隙度,可由测井资料求得; $a$  为与岩石性质有关的岩性系数; $m$  为与岩石孔隙度结构有关的孔隙指数。

从上式可知,影响  $R_w$  的因素除  $\varphi$ 、 $R_o$  外,还与岩性系数  $a$ 、孔隙结构系数  $m$  有关。 $a$  值的大小反

映粘土含量的多少, $a$  值的降低反映粘土含量增加。 $m$  值的大小只与孔隙的几何形状有关,即与岩石颗粒的形状和比面、分选程度、胶结程度、压实程度和各向异性有关。孔隙几何形状愈复杂, $m$  值愈高。据资料,一般  $m$  值取 1.5~2.0,在  $m$  取得后,可根据已知孔的资料反算出  $a$  值。

此外,对于埋深较大(一般大于 300 m)的地层电阻率值则要考虑温度影响,进行温度校正。其校正公式为:

$$R_t = R_{18} [1 + \alpha(t - 18)]$$

式中: $R_t$  为温度为摄氏度的地层电阻率; $R_{18}$  为温度为 18℃ 的地层电阻率; $\alpha$  为地层地温梯度(鄂尔多斯白垩系盆地地层地温梯度一般为 0.02/m)。

在已知上述参数后,可根据阿尔奇公式计算出地层水溶液的电阻率,考虑地层温度、水化学类型等因素后,按照地层水的温度、矿化度和电阻率的关系图进行地下水水质的评价(希尔契,1989)。其基本流程图如图 2。

2.2.2 白垩系盆地地下水水质评价实例 根据白垩系盆地已施工的 BK1、BK2 孔资料,主要含水层

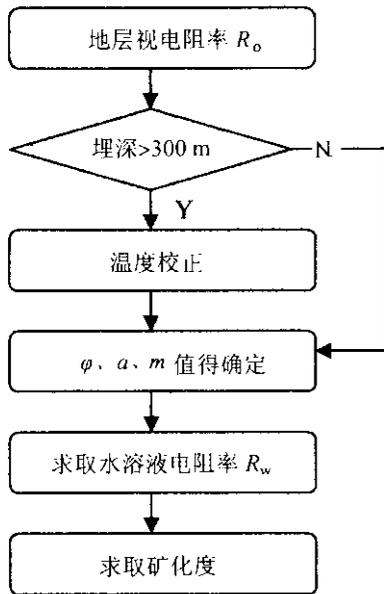


图2 地下水矿化度评价流程图

Fig. 2 Flow chart of evaluating groundwater salinity

有2层:上层为环河-华池组含水岩组,下层为洛河组含水岩层。评价的过程首先根据BK2孔的资料确定 $m$ 为1.5的情况下,求取 $a$ 值,再进行BK1孔的水质判别。

(1)环河-华池组: BK2孔矿化度为4.465 g/L,孔隙度为0.12~0.18,取孔隙度的平均值0.15,温度为22℃,按照它们之间的关系可求得地层水溶液的电阻率 $R_w$ 为1.25  $\Omega \cdot m$ ,由 $E_h-4$ 勘查结果该地层电阻率 $R_o$ 为8  $\Omega \cdot m$ ,经温度校正后 $R_o$ 为12  $\Omega \cdot m$ ,根据阿尔奇公式求得 $a=0.56$ 。

BK1孔含水层地下水的矿化度 $E_h-4$ 勘查结果可知,地层电阻率 $R_o$ 为50  $\Omega \cdot m$ ,孔隙度 $\varphi$ 为0.275,将上述参数代入阿尔奇公式求得地层水溶液电阻率为:

$$R_w = \varphi^m / a \times R_o = 0.275^{1.5} / 0.56 \times 50 \\ = 12.87 \Omega \cdot m$$

这样该层地下水的矿化度为0.48 g/L,与BK1孔该层实际矿化度0.55 g/L十分接近。

(2)洛河组: BK2孔矿化度为1.795 g/L,孔隙度为0.17,温度为30℃,对应的地层水溶液电阻率 $R_w=2.65 \Omega \cdot m$ ,由 $E_h-4$ 勘查结果该地层电阻率 $R_o=6 \Omega \cdot m$ ,据阿尔奇公式求得 $a=0.16$ 。

BK1孔含水层地下水的矿化度为地层电阻率

$R_o$ 为25  $\Omega \cdot m$ ,孔隙度 $\varphi=0.17$ ,将上述参数代入阿尔奇公式求得地层水溶液电阻率 $R_w=10.95 \Omega \cdot m$ 。从而求得该含水层矿化度为0.42 g/L,与BK1孔该层实际矿化度0.46 g/L十分接近。

可见,利用 $E_h-4$ 电导率成像系统,结合白垩系地层的实际情况选择岩性系数和孔隙结构系数后,能够较准确地进行地下水水质的判别,且结果十分接近。

### 3 结论

$E_h-4$ 电导率成像系统频点丰富具有较高的分辨率,且勘探深度大,对鄂尔多斯白垩系盆地地下水的勘查工作是可行、有效的。能清晰地反映出白垩系地层及结构的变化特征。

利用 $E_h-4$ 电导率成像系统测得电阻率值进行水质的判别具有较大的可靠性。分析该地区影响电阻率测量的主要因素是孔隙度后,选择与岩性有关的岩性系数 $a$ 和与岩性孔隙结构有关的孔隙指数 $m$ 值是进行鄂尔多斯白垩系盆地地下水水质判别的关键。

由于水质的判别实例较少,有待进一步完善和提高。

### 参考文献

- 希尔契 D W. 1989. 现代测井解释. 北京: 石油工业出版社.  
郭建强, 武毅等. 1998.  $E_h-4$ 电导率成像系统简介及其应用. 物探与化探, 22(65): 458~464.  
郭建强, 武毅等. 2001. 西北地区孔隙地下水矿化度评价的地球物理方法研究与应用. 地球学报, 22(4): 375~379.  
武毅, 郭建强等. 2001. 宁南深埋岩溶水勘查的物探新技术. 水文地质工程地质, 28(2): 45~48.

### References

- Hilchie Da W. 1989. Advanced Well Log Interpretation. Beijing: Petroleum Industry Publishing House (in Chinese).  
Guo Jianqiang, Wu Yi et al. 1998. A brief description of the  $E_h-4$  electrical conductivity imaging system and its application. Geophysical and Geochemical Exploration, 12(65): 458~464 (in Chinese with English abstract).  
Guo Jianqiang, Wu Yi et al. 2001. The application of geophysical techniques to estimating salinity of porous groundwater in Northwest China. Geoscintia Sinica ACTA, 22(4): 375~379 (in Chinese with English abstract).  
Wu Yi, Guo Jianqiang et al. 2001. New techniques application in the Exploration of Ningnan Deep—seatal karst waters. Hydrogeology and Engineering Geology, 28(2): 45~48 (in Chinese with English abstract).