

# CSAMT在可地浸砂岩型铀矿勘查中的应用

王志宏<sup>1,2</sup> 杨进<sup>1</sup> 山科社<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学 北京 100083; 2. 核工业航测遥感中心 河北 石家庄 050002)

摘要:介绍了可控源音频大地电磁测深法的基本原理及资料处理方法,并通过实例介绍了该方法在新疆、内蒙古等地可地浸砂岩型铀矿勘查方面的应用效果。

关键词:可控源音频大地电磁;砂岩型铀矿;铀矿勘查

中图分类号:P631 文献标识码:A 文章编号:1000-8918(2005)03-0227-03

可控源音频大地电磁(controlled source audio frequency magneto-telluric,简称CSAMT)是利用接地水平电偶源为信号源的一种频率域电磁测深法,CSAMT采用了大功率的人工场源,具有信号稳定、信噪比高、穿透能力强、探测深度大等特点<sup>[1,2]</sup>。近几年,CSAMT作为研究可地浸砂岩型铀矿成矿环境的有效手段,在研究盆地基底埋深起伏、盖层及成矿目的层的展布规律、确定隐伏构造方面得到了广泛应用。

可地浸砂岩型铀矿的形成是可提供铀源的岩石经过风化分解后,形成含铀含氧水溶液,含铀含氧水沿含有机质、黄铁矿等的缓倾斜透水砂岩缓慢流动过程中,逐渐氧化围岩各种还原成分,形成舌状层间氧化还原带。在氧化还原过渡带,地下水自由氧耗尽,地球化学性质急剧变化,形成一个明显的氧化还原界面,进而形成铀矿床<sup>[3]</sup>。可地浸砂岩型铀矿不同于其他类型矿床,其成矿地质条件严格,控矿因素多,勘查过程中的一项重要任务就是查明铀矿床形成的成矿环境及追踪容矿主砂体的空间展布规律等。

## 1 CSAMT基本原理及资料处理

### 1.1 CSAMT基本原理

CSAMT测量原理与常规大地电磁(MT)类似,主要是针对天然信号随机性大,信号弱的特点,采用人工方式向地下发送不同频率的交变电流,形成交变电磁场,在距发射源足够远的地方通过测量相互正交的电场分量 $E$ 与磁场分量 $H$ ,求得地下介质电阻率和阻抗相位:

$$\rho = \frac{1}{5f} \left[ \frac{E}{H} \right]^2, \varphi = \varphi_E - \varphi_H,$$

式中 $f$ 为频率, $\rho$ 为电阻率,由于地下介质是不均匀的,计算的 $\rho$ 值称为视电阻率; $\varphi$ 为阻抗相位; $E$ 为电场分量; $H$ 为磁场分量。测量过程中通过调整供电频率的高低,可得到不同深度的地电信息,从而达到垂向频率测深的目的。

探测深度理论上为一个趋肤深度 $\delta$ , $\delta \approx 503 \sqrt{\rho/f}$ ,这表明,CSAMT探测深度随视电阻率的增加和频率的降低而增大。

### 1.2 CSAMT的数据处理

#### 1.2.1 干扰信号的剔除

在信号采集过程中由于人为或天然因素,可能出现随机干扰信号。它主要影响视电阻率曲线,使其中个别频点发生跳跃,如果不进行处理,将会影响最终的反演结果。处理方法是对视电阻率曲线进行编辑,直接删除个别跳跃较大的频点。

#### 1.2.2 静态校正

表层电性不均匀会使CSAMT的视电阻率曲线发生移位,而相位却仍保持不变,对移位了的视电阻率曲线进行校正,即静态校正。K. L. Zonge曾导出了CSAMT视电阻率与相位之间满足<sup>[4]</sup>

$$\varphi = \frac{\pi}{4} \left( 1 + \frac{d \ln \rho}{d \ln W} \right)$$

$$\rho = \rho_n \exp \left[ - \frac{4}{\pi} \int_{W_N}^W \left( \varphi - \frac{\pi}{4} \right) d \ln W \right].$$

式中 $\rho_n$ 为地表电阻率,可从静态位移影响不大地区的测深曲线求取; $W_N$ 为测深曲线最高频率,要求当 $W = W_N$ 时 $\theta = \pi/4$ ; $W$ 是待求视电阻率 $\rho_a$ 处的电磁场的频率; $\varphi$ 是 $E$ 与 $H$ 之间的相位差,是 $W$ 的函数<sup>[5]</sup>。根据上式可以对静态位移进行校正。

### 1.2.3 场源校正

场源对 CSAMT 测量结果的影响十分明显,场源校正主要为校正非平面波影响(近区和过渡区)。由于中生代盆地盖层电阻率较小,并且成矿目的层埋深较浅,CSAMT 基本在远区场测量,很少出现近区数据,场源校正只做了过渡区校正。过渡区校正用 MacInnes 的计算方法,其原理是以远区射线尼亚电阻率为初始值,解通用阻抗方程,然后进行迭代反演求出过渡区校正后的视电阻率值。

### 1.2.4 圆滑模型反演

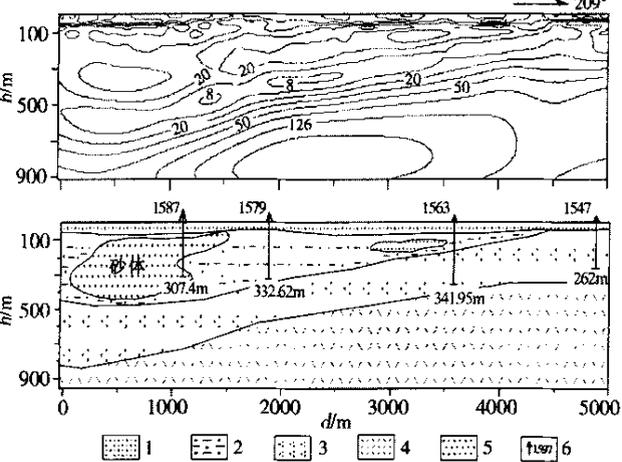
利用二维圆滑模型(SCS2D)反演方法对 CSAMT 数据进行二维反演,SCS2D 反演观测视电阻率与阻抗相位数据,确定模型的电阻率。反演过程中采用均方差来衡量数据拟合度及模型的粗糙度等,要求所得模型圆滑,数据拟合差最小<sup>①</sup>。

## 2 CSAMT 在砂岩型铀矿床上的应用实例

野外工作使用美国 Zonge 公司生产的 GDP32<sup>II</sup> 多功能电法仪,供电极距  $AB = 1 \text{ km}$ ,收发距  $r > 4 \text{ km}$ ,采用赤道装置进行标量测量。GDP32<sup>II</sup> 系统使用了高精度石英钟同步,在 CSAMT 方法中,进行的是绝对相位测量,故它的观测相位精度很高。

### 2.1 新疆伊犁盆地扎格斯泰应用效果

新疆伊犁盆地 511 矿是我国最早使用地浸方法并获得成功的砂岩型铀矿床之一,在该盆地 CSAMT 测量的目的是进一步查明基底埋深起伏特征及盖层和成矿目的层的展布特征,图 1 为沿 15 号钻探勘探线布置的 CSAMT 测量综合成果。



1—第四系砂、砾岩 2—侏罗系泥质粉砂岩 3—三叠系砂岩及砾岩 4—基底火山岩 5—圈定的砂体 6—钻孔

图 1 伊犁盆地 15 线剖面综合成果

在电阻率断面图上,可以划分出 4 个电性层。第一电性层厚 90 m,电阻率  $50 \sim 80 \Omega \cdot \text{m}$ ,横

向上连续分布,延伸稳定,为地表干燥的砂、砾沉积物的反映。第二电性层为从北东到南西厚度从 400 m 到几十米的电性层,电阻率为  $20 \sim 40 \Omega \cdot \text{m}$ ,横向连续性较差,为侏罗系中下统水西沟含煤碎屑岩的反映。横向连续性的变化,正好反映了沉积相的变化。第三电性层为 1 条带状上部低阻、下部偏高阻的电性层,上部电阻率为  $10 \sim 20 \Omega \cdot \text{m}$ ,下部电阻率为  $20 \sim 40 \Omega \cdot \text{m}$ ,横向连续性好,为三叠系中上统小泉沟群河、湖相碎屑沉积物的反映。第四电性层电阻率  $> 60 \Omega \cdot \text{m}$ ,为石炭、二叠系浅变质的中酸性火山岩、火山碎屑岩基底高阻体的反映。电阻率  $60 \Omega \cdot \text{m}$  等值线附近的等值线密集带为盖层与基底的分界,密集带的延伸及起伏特征反映了基底埋深由南西北东逐渐加深,南西侧埋深约 300 m,而北东侧大于 1 km。通过对电阻率断面与钻探资料分析,确定砂体的电阻率一般为  $30 \Omega \cdot \text{m}$  左右,圈定了砂体的相对位置。

### 2.2 新疆伊犁盆地北缘应用效果

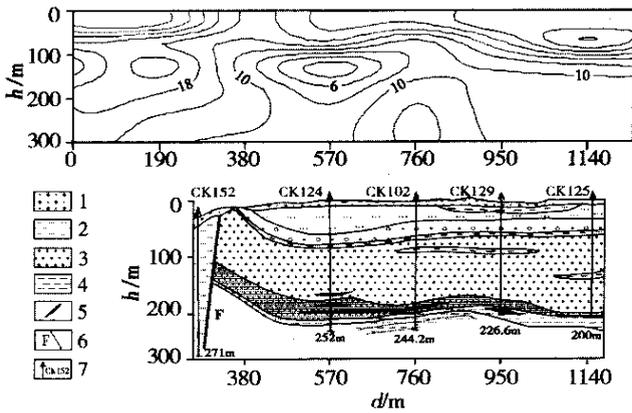
图 2 为新疆伊犁盆地北缘新城子地段沿钻探勘探线布置的 CSAMT 测量综合成果。本地区地表第四系砂砾岩为中高阻,电阻率为  $30 \sim 50 \Omega \cdot \text{m}$ ,第三系与侏罗系为以泥质为主的砂砾岩为低阻,电阻率为  $5 \sim 15 \Omega \cdot \text{m}$ ,厚度较大,与上覆地层及基底电阻率差异明显。由于低阻层厚度太大,用一般电法对低阻层深部形态认识已很困难。CSAMT 测量过程中,通过加大发射电流、降低测量频点等方法,使测量深度达到了 1 km 左右,查明了深部低阻层的形态特征,为进一步钻探工程提供了重要依据。

### 2.3 内蒙古二连盆地的应用效果

内蒙古查干诺尔地区为二连盆地可地浸砂岩型铀矿的主攻地区之一,为了查明砂岩型铀矿成矿的控矿构造,布置了 CSAMT 测量剖面,图 3 为 L43 线 CSAMT 综合成果。

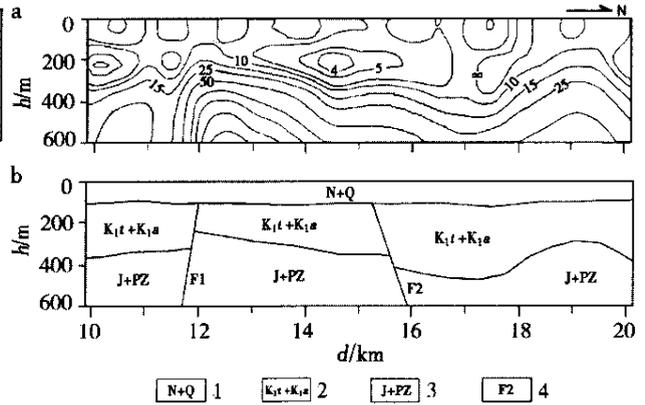
在电阻率断面图(图 3a)中,距离 11.5 km 及 16.5 km、深度 300 ~ 400 m 处,电阻率等值线出现畸变、错断现象,推测为隐伏断裂 F1、F2,两断层均为正断层,断层倾角较大。F1 断层南倾,北盘上升,南盘下降,两盘埋深差异较大。F2 断层北倾,北盘下降,南盘上升,两盘埋深差异较小。这 2 个隐伏断裂对测区成矿斜坡带起着控制性作用。在 CSAMT 测量的基础上,在该测线进行了高分辨率浅层地震测量,证实了 F1、F2 隐伏断层的存在。

① Uchita T. Smooth 2D inversion for magneto-telluric data based on statistical criterion ABIC. Journal of Geomagnetism and geo-electricity.



1—第四系砂砾岩 2—第三系砂岩、粉砂岩 3—上侏罗统含钙质砂岩夹泥岩 4—中下侏罗统泥岩 5—铀矿体 6—断层 7—钻孔

图2 新城子 CSAMT 测量综合成果



1—第三系及第四系砂砾岩 2—下白垩统砂岩、砾岩及泥岩 3—侏罗系及古生界地层 4—断层

图3 查干诺尔地区 L43 线 CSAMT 综合成果

### 3 结论

CSAMT 在可地浸砂岩型铀矿床的勘查中可以取得很好的找矿效果,能够准确反映盖层及基底的情况,查明成矿目的层的展布特征,圈定砂体范围,确定隐伏断裂构造位置,为指导砂岩型铀矿的带钻区调提供可靠的依据,节省开支,提高效益。

### 参考文献:

[1] 黄世杰. 层间氧化带砂岩型铀矿的成矿条件及找矿判据[J]. 铀矿地质, 1994, 12(1).

[2] 何继善. 可控源音频大地电磁测深[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1990.

[3] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 1999.

[4] 陈乐寿,王光镔. 大地电磁测深法[M]. 北京:地质出版社, 1991.

[5] Sternberg B K. Correction for the static shifts in MT using transient electromagnetic sounding[J]. Geophysics, 1988, 53(1).

## THE APPLICATION OF CSAMT TO THE EXPLORATION OF IN-SITU LEACHABLE SANDSTONE TYPE URANIUM DEPOSITS

WANG Zhi-hong<sup>1,2</sup>, YANG Jin<sup>1</sup>, SHAN Ke-she<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences Beijing 100083, China 2. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China)

**Abstract:** CSAMT is a frequency magnetotelluric method. This paper describes its measurement and data processing mechanism and also reports its application achievements in several known in-situ leachable sandstone type uranium deposits in Xinjiang and Inner Mongolia.

**Key words:** CSAMT; sandstone type uranium deposits; application

作者简介:王志宏(1973-)男,1997年毕业于中国矿业大学煤田地质系,任职于核工业航测遥感中心,主要从事电磁法研究工作。现为中国地质大学(北京)博士研究生。