

# 多种物探技术勘查宁南深层岩溶水的组合试验

武毅<sup>1 2</sup> 郭建强<sup>1 2</sup> 曹福祥<sup>2</sup> 孙晟<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学,湖北 武汉 430073; 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:基于宁夏南部山区深层岩溶水赋存特点,对 EH-4 电导率成像法、瞬变电磁法、高分辨率浅层地震法、放射性法组合勘查宁南深层岩溶水试验结果及钻探结果进行分析,提出目前该类地下水的最优化勘查模式。

关键词:深层岩溶水,物探技术方法组合,最优化模式

中图分类号:P631.3+2

文献标识码:A

文章编号:1000-8918(2002)02-0113-05

物探技术方法门类繁多,各种物探方法都有自身的适用范围和局限性。因此在解决某类地下水勘查问题时,选择最有效、最经济的方法与方法组合,是关系到勘查效果及成本高低的首要问题。对于浅层地下水的勘查,目前国内外都具有比较成熟的技术,已取得了良好的效果。而对于深层地下水的勘查,物探技术还不成熟,当含水层埋深超过 200 m,甚至更深时,常规的物探方法分辨能力不够,造成深层地下水勘查工作难度很大。

宁夏南部山区处于鄂尔多斯盆地西缘,位于中国东西部 2 个不同性质的地质单元的衔接地带。在该区域,由震旦系、寒武系、奥陶系组成的宽约 30 km 的南北向古脊两侧受基底断裂控制,地质构造分布不均且较复杂。根据前人资料,该区域地下赋水构造埋深较大,通常约 400~600 m。因此,宁南山区地下水的勘查目标是深埋岩溶水,要求物探仪器设备具有较高的分辨率和大的勘探深度。另外,宁南地区多为黄土丘陵区,黄土覆盖巨厚,沟谷纵横,切割严重,水位埋深大,这种地貌的特殊性也决定着对地下水勘查技术的特殊要求。因此,单纯的 1 种或 2 种物探勘查技术在该区域进行深层岩溶水的勘查都不会圆满地解决问题,急需各种物探技术发挥各自的特点,利用综合物探的技术优势,提高勘查结果的准确性和可靠性。

## 1 物探技术组合试验分析

### 1.1 地质—地球物理模型

宁南深层岩溶水的富水性主要受岩溶发育程度

和发育规律所控制,因此勘查深层地下水实质上是寻找深部地质构造为主要目标。从地球物理场来讲,完整的围岩与破碎带所表现的地球物理参数有明显的差异。对于完整的围岩,电阻率反映为高阻,值的大小主要取决于岩性成分、结构等因素;宁南深埋岩溶区下伏基岩为奥陶系灰岩,电阻率值达 600  $\Omega \cdot m$  以上;地震波沿连续岩性界面传播,由于岩性界面波阻抗差异形成反射波,在地震剖面上表现为连续反射波组。对于破碎的基岩,电阻率值除受岩性结构、成分的影响外,岩石的破碎程度、充填物的性质、地下水的矿化度、温度、压力等因素都会对电阻率值有重要影响。一般情况下,破碎带与完整的围岩相比电阻率值将会降低。地震波传播在遇到断层构造时,除产生一次反射波外,还将产生断面反射波、绕射波等特殊波。地震剖面上反射波同相轴将出现中断、紊乱和错动等现象。放射性元素将沿裂隙通道从地层深处向地表运移,在地表裂隙出口形成放射性异常晕,产生高值放射性异常。

### 1.2 物探技术方法的选择

物探技术方法是在考虑地质、地貌条件及宁南深层地下水勘查特点的基础上,根据不同的地球物理场特征而选择的,采用多种物探手段组合开展试验。选择的技术方法有:EH-4 电导率成像法、TEMS-3S 瞬变电磁测深法、高分辨率浅层地震法及放射性法( $\alpha$  杯法),这些既有过去很成熟的方法,又有代表当今国际先进水平的新技术、新方法。

#### 1.2.1 EH-4 电导率成像法

EH-4 电导率成像系统是磁偶源天然场与部分

可控源相结合的频率域测深系统,既进行天然场法测量又可进行部分人工场法测量,人工发射源可弥补信号较弱的天然场来完成整个工作的频段测量。该方法设备轻便,操作简单,适合宁南地貌特点,是其他类似的电磁法设备(V5及GDP-32等)系列无法比拟的,在分辨率方面,该系统接收频点多达60个左右,而其他类似设备为20~30个,反映该系统频点丰富,分辨率要高于其他设备。因此,无论在场地条件还是分辨率方面,该系统最适合宁南深埋岩溶地下水的勘查工作。

EH-4电导率成像法主要是通过观测地层电性参数在纵向及横向上的变化特征,来确定地层岩性结构、岩溶发育带或岩石破碎位置以及预测地下水水质的变化规律,是一种先进的频率域电磁法勘查技术,代表当今国际上电磁法勘查技术的发展趋势,其主要特点是探测深度大、分辨率高,不足之处是存在静态和近场影响。

### 1.2.2 瞬变电磁测深法

瞬变电磁法探测深度的大小取决于激励电流和发射线框边长。TEMS-3S瞬变电磁测深系统的激励电流可达100~200 A,激励场源采用单脉冲激励,由傅里叶变换可知其具有较宽频带且低频成分丰富,说明该系统具有大的勘查深度及较高的分辨率,可穿透高层阻,适合宁南山区深埋岩溶地下水的勘查工作。

TEMS-3S瞬变电磁测深法属于时间域电磁法勘查技术,用于地下水勘查时间不长,但具有很大潜力。其特点是观测纯二次场,且不受地形影响,可以弥补EH-4电导率成像系统受静态和近场影响的不足。

### 1.2.3 高分辨率浅层地震法

高分辨率浅层地震法是一种勘探地下精细地质构造的成熟技术,其以岩石弹性性质为依据,通过分析检波器拾取的人工地震反射波信号来获取地下构造形态及岩性参数。选用高频、高能量震源激发地震波,小道距、小排列采集反射地震波,可提高勘探深度、时间和空间分辨率。利用地震折射波法提取浅层低速带速度信息,校正反射波信号以消除地形起伏影响。此方法主要用于配合EH-4电导率成像系统准确划分地层岩性,判定断层倾向、倾角等参数,以弥补EH-4刻画深部构造精度的不足。但此方法成本相对较高,且测量繁琐。

### 1.2.4 放射性法( $\alpha$ 杯法)

由于氡气沿构造从深部向地表运移,在构造近

地表出口形成氡气晕,使该部位与围岩地表之间产生明显的放射性氡异常, $\alpha$ 杯法对此异常反应灵敏,但只能定性确定地质构造平面位置且工作效率低。

## 1.3 物探勘查技术的组合应用

根据上述物探勘查技术的基本原理和工作特点,物探技术组合试验的应用原则是:以瞬变电磁法、放射性 $\alpha$ 杯法进行初勘,发挥对构造反映灵敏的特点,确定地层的大致结构特征和有意义的异常段,为开展详查工作提供靶区;在此基础上,开展EH-4电导率成像、高分辨率浅层地震工作,更详细地确定地层结构和地质构造位置,为准确地确定井位提供详细的科学依据。图1为多种方法组合模式。

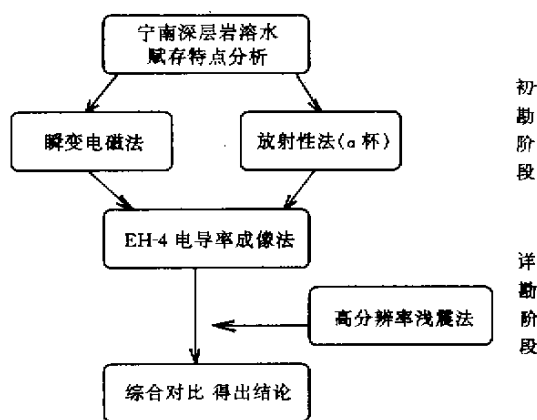


图1 宁南深层岩溶水勘查多种物探方法技术组合模式

## 2 物探技术组合试验结果分析

组合试验工作点选择在宁南同心县下马关地区。根据前人资料,地层情况是:第四系岩性为干黄土层,下伏第三系岩性不明。基岩为奥陶系的平凉组(岩性以砂岩为主)和马家沟组(岩性为灰岩)。多种物探方法技术组合试验结果见图2、图3。

### 2.1 $\alpha$ 杯、瞬变电磁法剖面特征

$\alpha$ 杯剖面(图2a)沿测线方向560~800 m和920~1 060 m之间均有高值异常,推断为断层反映,其中560~800 m之间异常明显,幅值最高达160~230脉冲/3分钟,而920~1 060 m之间异常则较微弱,这可能是因为覆盖层厚度加大造成异常显示较弱。

瞬变电磁法各时间道高值异常位置与 $\alpha$ 杯测量结果显示完全一致(图2b)。剖面560~710 m之间异常显示不仅在时间上早(约1 ms),而且幅值高,说明其埋深浅,而且破碎程度较高。另外,从瞬变电磁视电阻率随深度变化的断面(图2c)也可以看出:剖

面沿测线方向 560~620 m 之间及 920 m 左右,视电阻率等值线发生变化,推断为断层反映,与  $\alpha$  杯勘查结果一致,但反映的电阻率值较低,与之后的 EH-4 详查结果有一定差异,这可能是由瞬变电磁测深系统误差所造成的。

2.2 地震剖面特征

地震时间剖面(图 2d)上可划分出 3 个地震反射标准层,按照从深到浅的顺序分别命名为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  反射波组。根据区域地质资料, $T_3$  是基岩的反射, $T_2$  和  $T_1$  是基岩以下的地层岩性变化的反映。

$T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  反射波组反映出地层从西向东埋深逐渐变浅的趋势,3 个反射波组发生中断、错动的位置对应 3 条较大的断裂构造,分别命名为  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  断层。其中  $F_1$  规模较大,断层面西倾,倾角为  $74^\circ$ 。 $F_2$ 、 $F_3$  断层规模较小。 $F_2$  断层为逆断层,断层面东倾,倾角为  $58^\circ$ ; $F_3$  断层为正断层,断层面西倾,倾角为  $74^\circ$ 。 $F_2$ 、 $F_3$  断层只错动  $T_2$ 、 $T_3$  反射波组,未向下延伸,推断  $F_2$ 、 $F_3$  断层是次级构造。

2.3 EH-4 视电阻率断面特征

2.3.1 地层结构特征

下马关白家滩地区地层按地下电性大致可划分为 3 个大层:50 m 以上,视电阻率大于  $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ,推测为干燥黄土覆盖或冲积物;第二层 50 m 至 80~160 m 左右,视电阻率为  $50\ \Omega\cdot\text{m}$  左右,推测为略潮湿的黄土层;第三层 80~160 m 以下,视电阻率达  $100\sim1\,000\ \Omega\cdot\text{m}$ ,推测为基岩地层。在 EH-4 电阻率断面(图 3)上,可将第 3 层划为 2 个亚层:80~160 m 至 250~400 m,视电阻率值为  $100\sim300\ \Omega\cdot\text{m}$ ,增幅较小,平缓,推测其为奥陶系砂岩;250~400 m 以下视电阻率梯度增大,视电阻率迅速增高,达  $1\,000\ \Omega\cdot\text{m}$  以上,推测为奥陶系灰岩反映。

2.3.2 基岩构造特征

从下伏基岩第三层的电阻率畸变特征可以看出,青龙山西侧基岩向下马关盆地方向呈阶梯状下降,大致可分为 2 个阶梯:剖面沿测线方向 0~800 m 为第一台阶,基岩埋深 100~150 m 左右;800~1\,200 m 为第二台阶,基岩埋深约 200 m。其中第一台阶存在一个次级凹陷。

将 EH-4 电阻率断面基岩电阻率畸变特征与地震剖面相结合,并参考  $\alpha$  杯、瞬变电磁结果,推测各断层特征归纳于表 1。

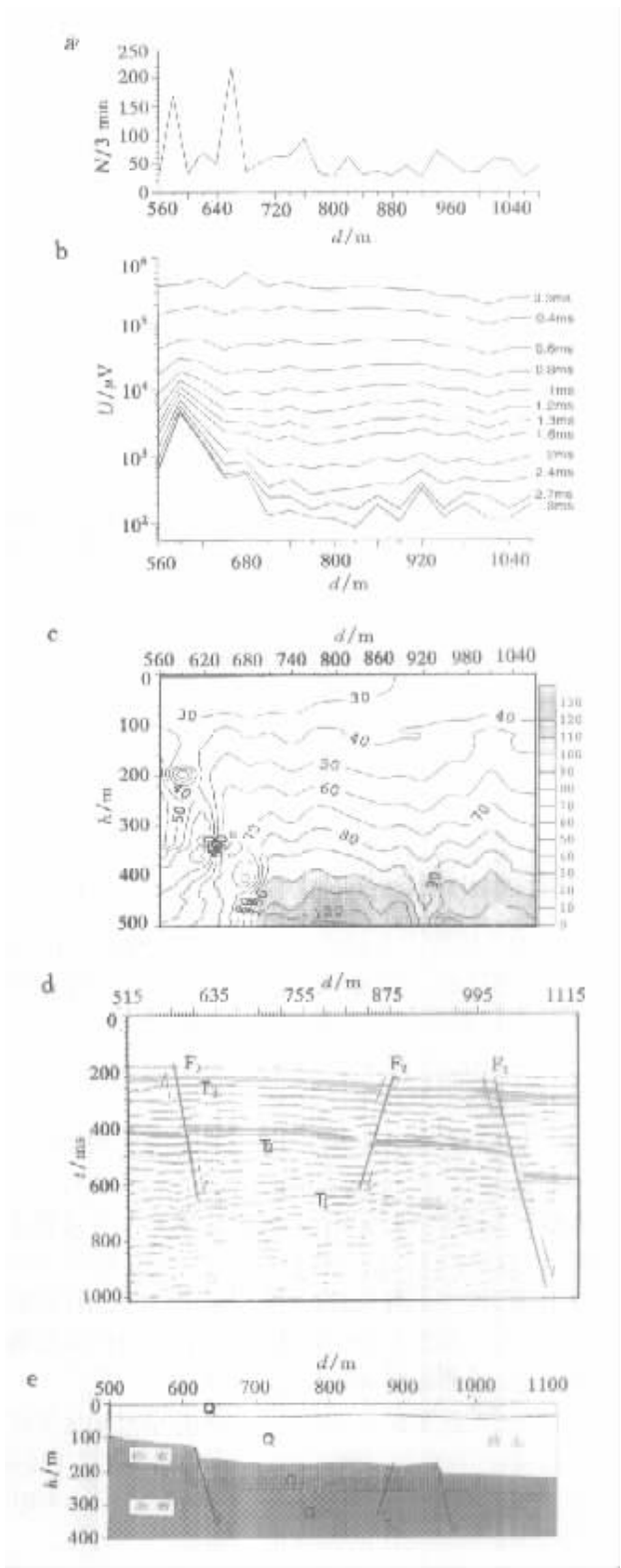


图 2 多种物探方法组合试验结果

a— $\alpha$  杯法剖面 b—瞬变电磁法时间道 c—视电阻率剖面;  
d—地震剖面 e—地质断面

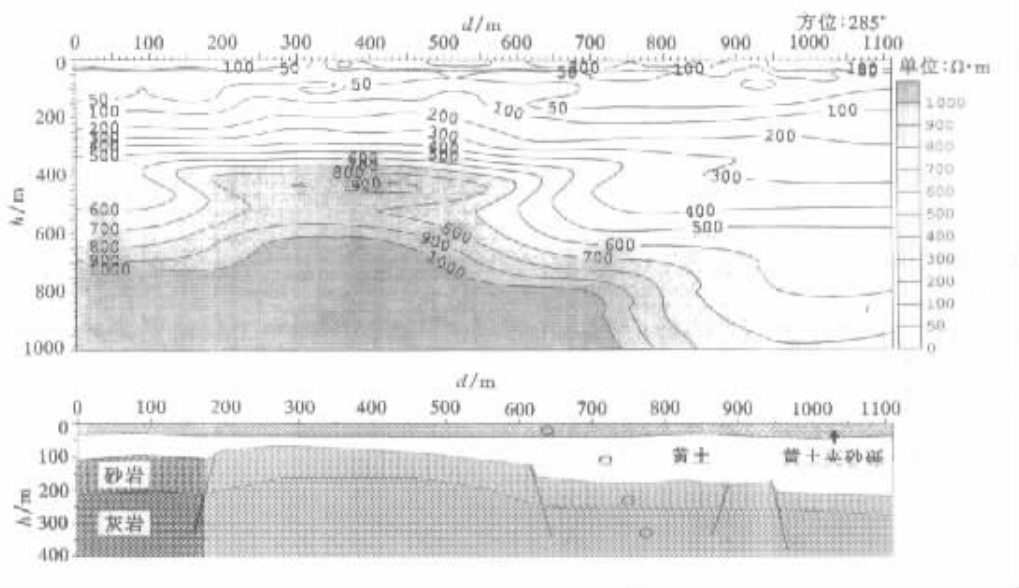


图 2 多种物探技术勘查宁南深层岩溶水组合试验效果及钻探结果

表 1 下马关白家滩地区推测断层特征

编号	性质	倾向	倾角	断距/m
F <sub>1</sub>	正断层	西	74°	20 ~ 99
F <sub>2</sub>	逆断层	东	58°	10 ~ 22
F <sub>3</sub>	正断层	西	75°	
F <sub>4</sub>	正断层	东	75°	

3 各种物探技术勘查结果的有效性分析

EH-4 电导率成像法作为一种新的物探技术 ,在微观上更详细、更丰富地提供了地质信息 ,对地层结构的划分、地质构造的确定更为准确 ,是地下水勘查中最主要的一种先进手段 ,其勘查结果更为有效 ,效果更为明显。

高分辨率浅层地震法是从不同岩性的波阻抗差异角度出发 ,进行地层岩性的划分、地质构造特征的确定。其勘查结果准确 ,并配合 EH-4 更为精确地确定了地层结构、地质构造的产状(包括断层的倾向、倾角、性质) ,为精确确定孔位提供了更为详细的资料。由于本次工作侧重于深部信息 ,第四系基底界面与其他物探结果存在较大的差异。

瞬变电磁测深法反映的各时间道信息辅助 EH-4 更准确地判定地质构造的平面位置 ,弥补了 EH-4 电导率成像系统受静态影响的不足。放射性  $\alpha$  杯法对地质构造反映灵敏 ,结果准确可靠。

经过上述分析可知 ,EH-4 电导率成像法、高分辨率浅震法、瞬变电磁法、放射性法的组合应用于宁南深层岩溶水的勘查 ,不同方法的地球物理参数从不同角度所反映的地质信息、地质构造基本一致 ,实现了相互补充、相互印证之目的。

基于勘查结果分析 ,再结合工作点的水文地质条件认为 :该地区第三系以下 ,剖面位置 600 ~ 1 190 m 左右 ,电阻率较低 ,岩石破碎程度高 ,裂隙较为发育。对确定孔位来讲 ,以寻找主构造的次级构造为主 ,通常大规模的构造对地下水孔位的确定无实际意义 ,而小型的次级构造对地下水的勘查更为有利。因此 ,该地区地下水孔位应以 F<sub>3</sub> 次级构造为目标 ,在平面位置上应位于 620 m 左右 ,孔深度在 600 m 以内 ,在 450 ~ 500 m 左右 ,预计可见断层构造。

经钻探 ,该井成功出水且日出水量大于 3 000 m<sup>3</sup> ,是该区出水量最大的一口井 ,也是该区域地下水勘查的一大突破 ,所揭露的地层与勘查结果推断结构基本吻合 ,充分证实了上述 4 种方法组合可以作为宁南深层岩溶水勘查的一种有效、合理的技术模式。

4 结论

EH-4 电导率成像法、瞬变电磁法、高分辨率浅震法和放射性  $\alpha$  杯法 4 种方法组合勘查宁南深层岩溶地下水 ,各种物探技术获取的不同地球物理参数从不同角度所反映的地质信息基本一致 ,达到了相互补充、相互印证之目的 ,且试验结果与钻探结果有良好的一致性 ,表明组合方法对宁南深层岩溶地下水的勘查是合理的、经济的、有效的 ,是目前该类地下水勘查的最优化模式。

参加本次试验工作的人员还有杨桂新、毕占义、彭成、朱庆俊、李文俊、孙向华、连捷等同志 ,在此一并致谢。

## THE COMBINATION OF VARIED GEOPHYSICAL TECHNIQUES IN EXPLORING DEEP-SEATED KARSTIC WATER OF SOUTH NINGXIA

WU Yi<sup>1,2</sup>, GUO Jian-qiang<sup>1,2</sup>, CAO Fu-xiang<sup>2</sup>, SUN Sheng<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430073, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental geology, CAGS, Baoding 071051, China)

**Abstract**: Based on the storage properties of deep-seated karstic water in south Ningxia, this paper analyses the test results of the combination of four geophysical techniques in exploring deep-seated karstic water of south Ningxia, and describes the drilling effects. On such a basis, an optimal exploration model for the exploration of this kind of groundwater at present is put forward.

**Key words**: deep-seated karstic water of south Ningxia; combination of geophysical techniques; optimal model

作者简介: 武毅 (1963 - ) 男, 1986 年毕业于武汉地质学院物探系。高级工程师, 中国地质科学院水文地质环境地质研究所地下水勘查研究部副主任, 长期从事水文物探的研究工作。现在中国地质大学(武汉)攻读博士学位。

(上接 109 页)

**Abstract**: The development of oil and gas geochemical exploration in the past forty odd years has been full of frustrations. We have persisted in introducing techniques from abroad, test and reformation, opening up new roads and bringing forth new ideas, and, as a result, gradually established and formed oil and gas exploration techniques with Chinese characteristics. The Chinese characterization has been realized in such aspects as the sieving of geochemical methods and indices, the study of application conditions, the improvement of analytical technology, and the data processing, interpretation and evaluation. The further introduction of new techniques and methods from abroad, the utilization of the experience of other countries for reference, and the bringing forth new ideas in practice are absolutely necessary to sustainable development of oil and gas exploration.

**Key words**: oil and gas geochemical exploration; method and index; application condition; test technique; Chinese characterization

作者简介: 刘崇禧 (1937 - ) 男, 教授级高级工程师, 现从事油气化探和油田水文地质研究工作, 公开发表论文 73 篇, 专著和与他人合著 5 部。

(上接 112 页)

## REE CHARACTERISTICS AND ORE SOURCE STUDIES OF LONGBAOSHAN COMPLEX

XIA Qing-lin<sup>1</sup>, CHEN Yong-qing<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100083, China)

**Abstract**: In Mesozoic, Longbaoshan intermediate - alkaline complex was formed as a result of two stages of magmatic intrusion. As shown by statistical analysis of REE in the complex, the total content of  $w_{\Sigma\text{REE}}$  is nearly 2.5 times as high as the Clarke value, the ratio of  $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$  is nearly 9 times that of the crust, and light REE is greatly enriched, whereas Eu and Ce are slightly depleted. The REE distribution patterns of various stages of intrusives and auriferous quartz veins are basically similar to each other, all dipping steeply towards the right. Nevertheless,  $\Sigma\text{REE}$  and LREE are richer in auriferous quartz veins than in magnetite. Combined with the geological and geochemical characteristics, the authors conclude that magma and metallogenetic materials of the complex were derived mainly from the same magma chamber in the upper mantle, and assimilated and mixed with the wall rocks during the intrusion of magma into the crust.

**Key words**: REE, ore source, metallogenetic diversity, Longbaoshan complex

作者简介: 夏庆霖 (1968 - ) 男, 2000 年毕业于中国地质大学(武汉)矿产普查与勘探专业, 获硕士学位。现为中国地质大学(武汉)讲师, 主要从事数学地质、遥感地质、矿产勘查评价的科研和教学工作, 发表论文 7 篇。

万方数据