

电磁法在新疆干旱区找水效果及适应性探讨

王卫江^{1,2}, 兰险³, 刘学清³

(1. 吉林大学综合信息矿产预测研究所, 吉林 长春 130026; 2. 新疆维吾尔自治区地质调查院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局物化探大队, 新疆 昌吉 831100)

摘要:运用加拿大 PHOENIX 公司 V5 系统 MT 大地电磁法、美国 GEOMETRICS 公司 EH-4 系统电导率成像法、加拿大 PHOENIX 公司 V5(2000)系统 CSAMT 可控源音频磁大地电流法、V5(2000)系统 TDEM 瞬变电磁法及法国 IRIS 公司 NUMIS 系统 NMR 核磁共振法, 在新疆典型干旱水文类型已知条件区开展找水试验研究工作, 探讨新疆典型干旱水文类型区几种先进的电磁法及其有效性、适应性, 对今后在新疆干旱区开展电磁法找水工作提供参考。

关键词:电磁法 MT; NMR 原理及系统; 试验效果; 找水适应性; 找水方法

1 几种先进的电磁法基本工作原理

电磁法工作基本原理是观测天然或人工场源在大地中的电磁场分布特征, 研究地电断面所代表的地质信息。电磁法中 MT 大地电磁测深法、CSAMT 可控源音频磁大地电流法、EH-4 电导率成像法、NMR 核磁共振属于频率域电磁法, TDEM 瞬变电磁法属于时间域电磁法, NMR 则是分析电磁波所激励的地下水体中氢原子核共振能量, 进行直接找水的电磁法^[1]。

2 典型干旱类型区找水试验效果

2.1 乌鲁木齐柴窝堡试验区 W13 井区试验效果

试验区地层结构由单一砂砾石向粘土砂砾石互层过渡, 几种电磁法及其系统试验结果基本上代表对该类型区地下水探测效果^①(图 1)。

水文地质特征 地下 0~84.73 m 为卵砾石结构; 84.73~478.76 m 为砂砾、卵石结构; 478.76 m 以下为泥岩。水位埋深 102.65 m, 含水层 1 层, 位于 102.65~478.76 m。

物探方法运用效果 ①地层结构划分。EH-4 系统电性分层与钻井资料最接近, 其次为 CSAMT、MT 系统, NMR 测深结果可判断 100 m 深度地层颗粒度的大小变化; ②含水层位探测。MR 系统反映潜水面和地层单位体积含水量准确, EH-4、CSAMT 系统推断潜水面位置较准确, MT 推断潜水面位置准确性稍低; ③含水层划分精度。MR 系统对 100 m 深度内含水层位

探测精度在 90% 左右, EH-4 对含水层界面划分与实际情况基本对应, CSAMT、MT 反演结果对含水层下界面划分偏深。

2.2 乌鲁木齐柴窝堡试验区 W12 井区试验效果

水文地质特征 地下 0~22.35 m 为砾石层; 22.35~63.6 m 为亚砂土、亚粘土、砂砾石互层; 63.6~126.9 m 为亚粘土层; 126.9~146.7 m 为砂砾石亚粘土互层; 146.7~169.16 m 为粘土层; 169.16~188.49 m 为砾石、亚砂土、亚粘土互层, 含水层 7 层, 水位埋深为 14.03 m。

物探方法运用效果 ①地层结构划分。NMR 依据衰减时间 T_2^* 参数可推断井区砂砾石粒度, EH-4 划分的 4 层电性层与实际地层对应, CSAMT、MT 反演结果地层划分不明显(图 2); ②含水层层位探测。NMR 测深对地下 100 m 深度内 3 个含水层反映较好, EH-4 二维反演结果可推断含水层大体分布情况, CSAMT、MT 含水层反映欠佳; ③含水层划分精度。NMR 确定的第一含水层上、下界面位置的误差小于 1 m, 浅部分辨率很高, 第二含水层比实际含水层厚度偏大 2 m; 第三含水层比实际上界面偏浅, 可见, NMR 随深度加大分辨能力逐渐降低。EH-4、CSAMT、MT 系统对粘土、砂、砂砾石互层含水层分层精度较低; ④第四系基底划分。EH-4 较准确划分了试验区第四系基底; MT、CSAMT 能划分试验区第四系基底; NMR 系统探测不到第四系基底。试验结果基本代表新疆干旱冲洪积细粒平原环境区几种电磁法及其系统地下水探测效果。

2.3 新和县齐满乡试验区 S13 井旁试验效果

水文地质特征 地层共分 4 大层位, 各层位普遍

收稿日期: 2004-04-18; 修订日期: 2004-07-02; 作者 E-mail: Wang_wj_0601@tam.com

第一作者简介: 王卫江(1969-), 男, 江苏如皋人, 高级工程师, 1991 年毕业于中国地质大学, 在读硕士, 从事矿产地球物理勘查工作

① 新疆地质调查院, 中国地质大学. 新疆干旱地区地下水资源勘查地球物理方法应用示范与方法优选研究报告, 2002

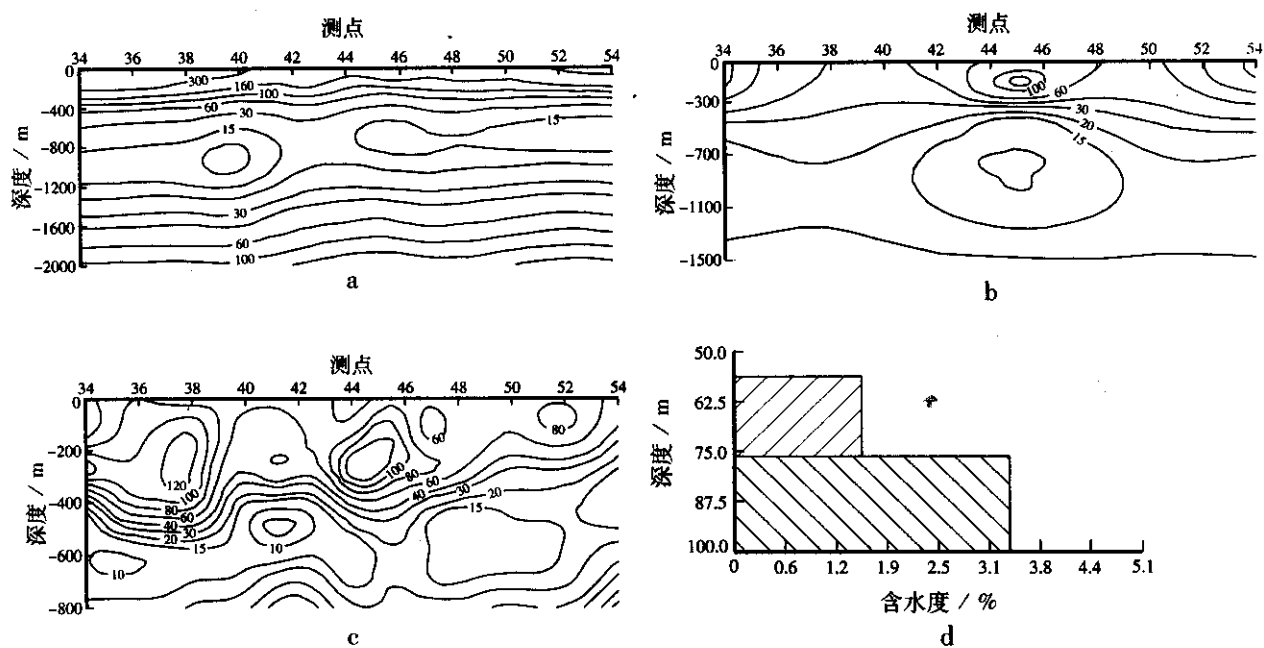


图 1 乌鲁木齐柴窝堡 W13 井区电磁法断面图

Fig. 1 Electromagnetic section map of Chaiwopu W13 well in Urumqi

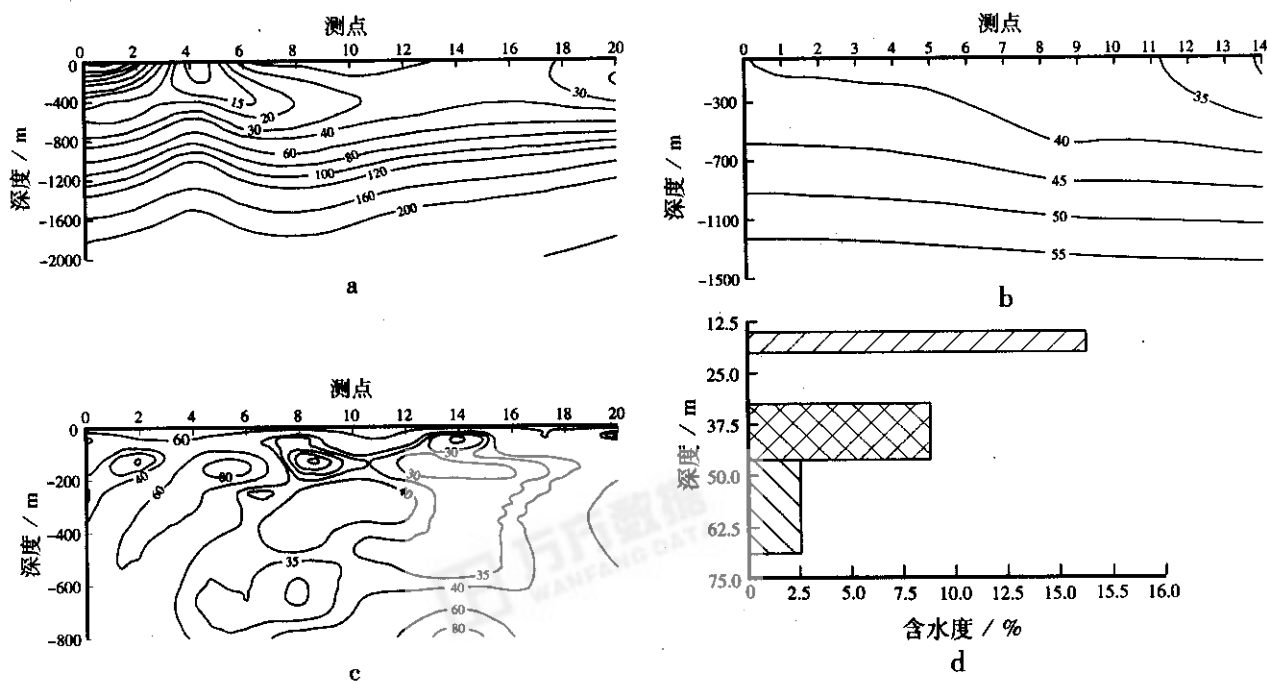
a——MT 法(音频段)反演断面图(单位: \dot{U} m); b——CSAMT 法反演断面图(单位: \dot{U} m);c——EH-4 法反演断面图(单位: \dot{U} m); d——NMR 断面图

图 2 乌鲁木齐柴窝堡 W12 孔旁电磁法断面图

Fig. 2 Electromagnetic sectional map of Chaiwopu W12 well in Urumqi

a——MT 法(音频段)反演断面图(单位: \dot{U} m); b——CSAMT 法反演断面图(单位: \dot{U} m);c——EH-4 法反演断面图(单位: \dot{U} m); d——NMR 解释断面图

含水,低矿化度承压水主要位于第4 大层位中.第一 大层位 0~2 m,亚粘土水矿化度高;第2 大层位 2~15 m,亚粘土、中粗砂,“砂”占 36.6%;第3 大层位 15~55 m,含砾中细砂,砂层含水矿化度小于 2 g/L;第4 大层位 55~514 m,粉细砂、中细砂、亚粘土互层,砂占 36.6%,砂层含水矿化度小于 2 g/L.区内下伏地层为古近—新近系(图 3).

物探方法运用效果 ①地层结构划分.地电断面图上,MT 可分出第四纪与古近—新近纪地层界面,对第四纪内部分层不明显;CSAMT、EH-4 反演结果第 1 个电性层与井区第 1、2 层位对应;第 2 个电性层与井区第 3、4 层位相对应;第 3 个电性层反映工区低阻地层;TEM 地下 400 m 以内分层情况与 EH-4 基本一

致,400 m 以下地层情况无法反映;NMR 衰减时间 T_2^* 可间接划分地下 100 m 范围内地层结构变化.②承压水层位探测.MT 对位于 55~514 m 的承压水含水层反映不清楚;EH-4、CSAMT 能反映出深层承压淡水层的存在,与 CSAMT 不同 EH-4 可根据断面电性变化间接推断地层含水矿化度变化情况;TEM 断面图在 100~360 m 深度段电性变化反映出存在承压淡水层;NMR 详细划分出地下 100 m 深度内 5 个含水层.③含水层分层精度.NMR 含水层分层精度与实际情况误差小于 10%;CSAMT 划分含水层的精度与 EH-4 接近,但确定上界面误差较 EH-4 大;TDEM 确定承压水上界面偏深,下界面偏浅;MT 不能划分 500 m 以内的含水层层位.

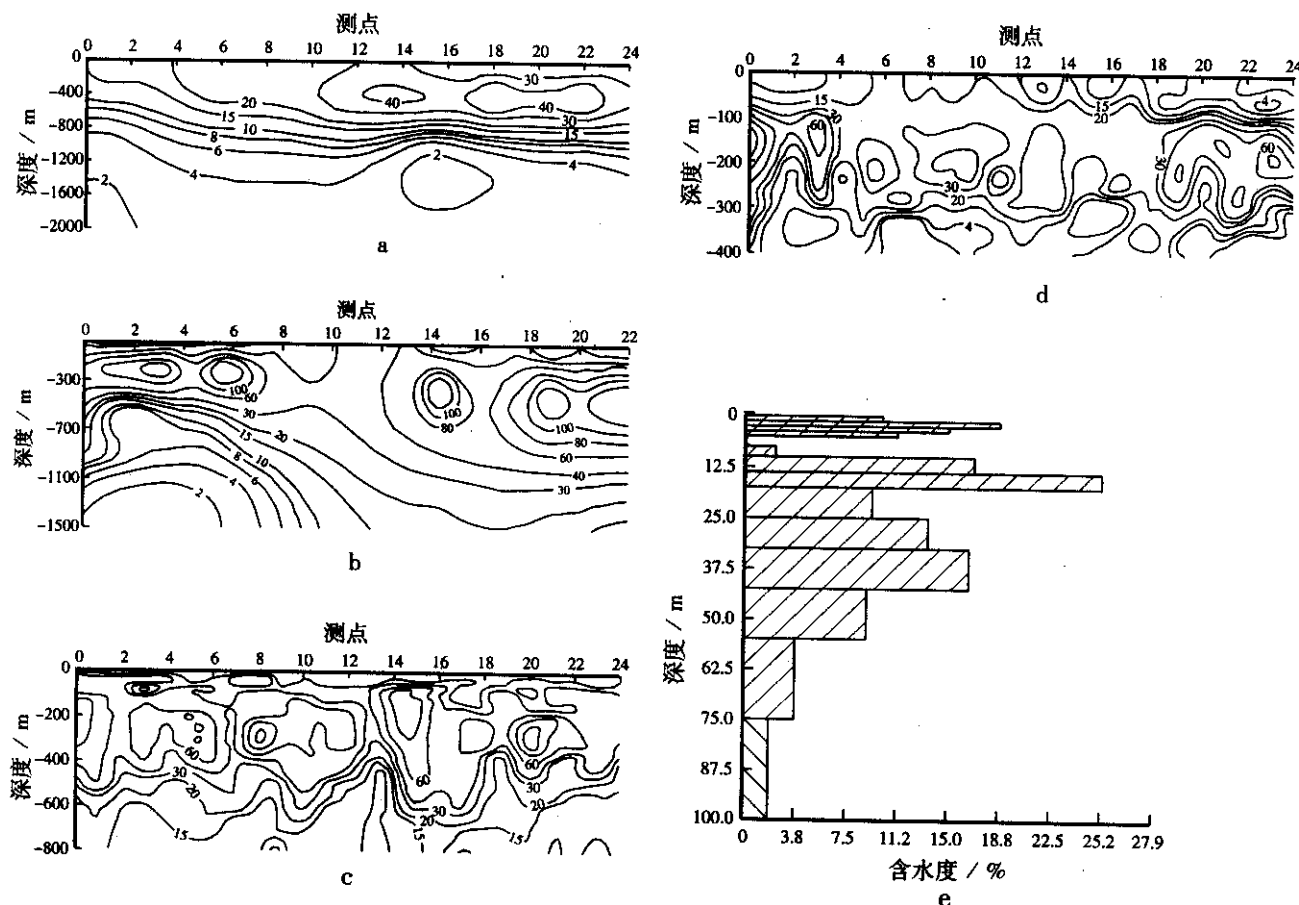


图3 新和县齐满乡 S13 井旁电磁法断面图

Fig. 3 Electromagnetic sectional map of Qimanxiang S13 well in Xinhe county

a—MT 法反演断面图(单位:Ω·m);b—CSAMT 反演断面图(单位:Ω·m);

c—EH-4 法反演断面图(单位:Ω·m);d—TDEM 法反演断面图(单位:Ω·m);e—NM 解释断面图

2.4 塔克拉玛干沙漠 KT₂ 井区试验效果

试验结果基本代表沙漠腹地沉积环境条件下几种电磁法及其系统地下水探测效果。

水文地质特征 KT₂ 井深 886.02 m, 岩性结构柱状图中地表以下 30.79 m 为粉细砂层, 其中 2.7 m 深度内为干燥的粉细砂层, 30.97 m 至终孔, 岩性为含粘土粉细砂、细砂、中粗砂、砂粘土互层^①。地表以下 2.7~300 m 为高矿化度水分布空间, 随深度增长水矿化度递减, 300~560 m 水矿化度较稳定, 560 m 以下水矿化度略有降低, 780~826 m 深层弱承压水层水矿化度为 4.808 g/L。

物探方法运用效果 ①地层结构划分评价, MT、EH-4 都不能划分 KT₂ 井沙漠区地层结构; ②含水层位结构探测, MT、EH-4 都不能探测评价 KT₂ 井区含水层位结构, 但是, EH-4 测深电阻率变化与地下水矿化度变化情况吻合较好, 可依据电阻率变化划分不同矿化度水体界线; NMR 在 130 m 深度内分 3 个含水层, 而实际含水层有 5 个, 说明在隔水层较薄并且富水性较差情况下, 隔、含水层的界限难以划分; ③含水层分层精度, MT、EH-4 系统无法评价含水层具体层位; NMR 法 30 m 深度内, 探测最小含水层厚度 2 m, 深度大于 50 m 时, 对小于 4.4 m 隔水层难以划分。

塔克拉玛干沙漠 CSAMT、TEM 法效果 新疆水利部门曾进行过塔中油田供水 CSAMT 法物探勘查工作, 工作结果 CSAMT 有效探测深度内基本无法划分地层岩性, 但 CSAMT 利用电性差异划分了地下咸淡水的分区界线; 马兰基地对外技术部运用 TDEM 法在油区物探找水工作基本划清了工区地层地电结构特征, 找到工区故(古)河道的分布位置及地下淡水体的赋存空间, 但有效勘探深度一般在 250 m 范围内。

3 电磁法在典型干旱区找水适应性

3.1 不同水文类型区地层结构划分比较

MT、EH-4、CSAMT、TEM 垂向分辨能力与需划分的地电特征层厚度、埋深及与之接触地层电阻率差异有关^②。同时, 垂向上系统采样数据密度越大, 垂向分辨率也就越高。在 0.1 Hz 以上频点区, EH-4 由于采样频点数最多, 相对来讲采集到的地电信息量也最大, 对地电结构或地层结构(当地层结构有电性差异时)反应最灵敏; TDEM 与 CSAMT 采样频点基本相当, 但 TDEM 分辨区间主要集中在地下 0~400 m 范围内,

这个深度内 TDEM 分辨率高于 CSAMT, 400 m 深度以下地电信息 TEM 难以获取, 而 CSAMT 则能提取 0~1 000 m 深度内地电信息; V5 系统 MT 法分辨率相对以上 3 种方法最低; NMR 测深在其探测深度范围内, 分辨含水层富水性的能力优于上述 4 种方法。

3.2 不同水文类型区含水层位探测能力比较

NMR 可以直接分辨多层介质中含水与非含水层。MT、EH-4、CSAMT、TDEM 划分含水层层位仅依靠含水层与上覆地层电阻率的差异, 有时, 频段采样率高低决定探测能力和精度, EH-4 与 TDEM 探测能力与精度相对高于 CSAMT、MT。

3.3 不同水文类型区含水层分层精度比较

探测含水层层位 NMR 精度很高, MT、EH-4、CSAMT、TDEM 分辨含水层是根据含水层相对其围岩介质电性差异特征, 它们都不能直接分辨含水层。

3.4 勘探深度比较

相关试验结果显示, 在同一地电条件区, 能达到最浅勘探深度的系统及方法排序为: NMR < EH-4(标准) < TEM < CSAMT < MT; 能达到最大勘探深度的系统及方法排序为: MT > EH-4(低频) > CSAMT > TEM > NMR; 地电断面垂向上勘探范围最大的系统及方法排序为: EH-4(标准装置与低频装置共同使用) > CSAMT > MT 音频段 > TEM > NMR。

3.5 不同水文类型区第四系基底划分比较

当第四系基底与下伏地层电性特征具备明显差异时, MT、EH-4、CSAMT、TDEM 法均能划分第四系基底, 但要考虑第四系基底埋深与方法的有效探测深度间关系。NMR 由于探测深度的局限性, 一般情况下不用该方法划分第四系基底。

3.6 地下水矿化度探测力及分辨力比较

MT、EH-4、CSAMT、TDEM 都属电阻率测量方法, 在新疆第四系找水工作中, 通过建立电阻率与地层颗粒度及地下水矿化度之间的模型相关关系, 达到推测工作区水文地质情况的目的。一般获得的电阻率信息量越大, 判断地下水矿化度变化的依据就越充分, 因此, 仪器采样率的高低、采样点分布的范围将决定地下水矿化度判断的准确性。

EH-4 的标准装置和 TDEM 装置分辨相对较浅深度, 具有矿化度差异水体的能力较高; CSAMT 与 EH-4 低频装置可以用于分辨中深度区具有矿化度差异水体; V5 系统的 MT 分辨水矿化度差异能力较弱; 地下水矿化度与 NMR 法相位差之间存在正相关关系, 但目前缺少建立相关方程和模型的试验数据, NMR 法只能定性判断地下水矿化度的大小。

① 新疆第一水文地质大队. 新疆塔克拉玛干沙漠中 KT₂ 号孔水文地质勘查研究报告, 1997

② 中国地质大学, 新疆地质调查院. 新疆干旱地区地下水资源勘查评价物探工作手册, 2002

3.7 不同环境条件下各方法适应性评价

电磁法野外工作中令人头痛的问题之一,就是噪声对测量工作产生的干扰。电噪声强度达到5 000 nV地区,MT、EH-4、CSAMT、TDEM、NMR都难以工作;电噪声强度2 000~3 000 nV地区,人工源的CSAMT、TDEM系统可重复性明显高于人工源、天然源组合使用的EH-4系统和纯天然源的MT系统;电噪声强度在1 000~2 000 nV幅值条件下,人工源电磁法和天然源电磁法都可以工作;很多试验结果表明NMR抗干扰能力较弱。

3.8 极端困难区方法适应性比较

该类地区在新疆主要为沙漠腹地及沙漠边缘地带。该类地区开展电磁法工作,如果设计要求的勘探深度不超过300 m,最好的办法是采用对地条件无任何要求的TEM法;如果设计勘探深度超过300 m,解决接地电阻问题后,3种方法中首选EH-4低频装置,其次MT,最后是CSAMT。因为:EH-4、MT天然场源资料处理认识相对简单;CSAMT人工场源在大厚度极低电阻覆盖区存在发射-接收距与信号平面波场区之间的矛盾,另外,资料解释上存在过渡场、阴影及场源附加效应等一系列令人头痛问题。

3.9 野外工作效率、工作成本比较

测点点距100~200 m或更小时,以日完成测点数做为标准,工作效率排序为CSAMT>EH-4>TEM>MT音频区>NMR。各方法成本排序与工作效率排序一致。当测点点距500~1 000 m或更大时,工作效率排序变为EH-4>TEM>MT音频区、NMR、CSAMT。各方法日产值排序为EH-4>TEM>MT音频区、NMR、CSAMT。测点点距继续加大时,CSAMT效率就很低了,成本上升也很快。

上述比较反映了MT音频区、EH-4、TEM、NMR都适合中小比例尺剖面工作,CSAMT则适合大比例尺扫面工作。

4 不同条件干旱区找水工作方法建议

基于大量试验基础上,笔者在新疆两大水域系统主要水文类型区,根据各方法系统适应性、有效性、成本因素,对物探找水工作方法及方法组合提出如下建议。

4.1 准噶尔水域系统典型水文地质类型区

(1) 天山北麓山前平原的乌鲁木齐—玛纳斯—精河等地冲洪积扇带,东段山前平原的阜康—奇台、阿尔泰山前布尔津至哈巴河、和布克赛尔谷地、塔

城盆地、博乐谷地、伊犁谷地、托里盆地、巴里坤、三塘湖、吉木乃等地的山前小型洪积扇群,这些地区含水类型主要为单一潜水,含水岩组地电特征主要为卵砾石、砂卵砾石、砂砾石互层结构的含水层,厚度几十至1 000 m不等,含水层稳定,透水性强,水质矿化度一般小于0.5,局部1~1.5,电阻率一般在几十~200 $\Omega \cdot m$,第四系基底与下伏地层有电性差异^[2]。在考虑文化噪声条件下找水物探最佳方法选择选EH-4标准装置、TEM或常规电测深。

(2) 天山北麓各河流域中、下游冲积平原带、冲湖积平原及其各山间盆地细土带地区,含水类型主要为多层结构的粗砂砾石及粗、中、细、粉砂含水层,其间夹大厚度粘土类隔水层。潜水层总厚度20~60 m,承压水顶板埋深30~150 m,300 m深度内有3~4层承压含水层厚度,总厚度15~80 m。水质矿化度一般1~2 g/L,第四系电阻率一般在100 $\Omega \cdot m$ 范围内,矿化潜水层、承压水层、隔层之间有电性差异。在考虑文化噪声条件下找水物探最佳方法选择选EH-4标准装置、TEM,在电磁工作异常区可用少量浅震工作详细划分含水层顶、底板位置,配合电阻率参数定量解释。

(3) 天山北麓低山丘陵、准噶尔东西低山丘陵及岛状残山的中生代局部泥盆、石炭系碎屑岩含水层、准噶尔盆地东北缘剥蚀平原及伊犁、巴里坤、三塘湖等山间盆地古近—新近系红层中的泥质砾岩、砂岩、砾质砂岩含水层夹大厚度泥质类岩层构成单斜或向斜承压水,含水层厚度不稳定,富水性变化大,水质矿化度一般1~2 g/L,局部大于2 g/L,含水层与围岩地层存在电性差异。找水物探最佳方法选择选EH-4标准装置,勘探深度不大时可选择TEM。

(4) 准噶尔盆地古尔班通古特大沙漠中部沙漠区,含水类型主要为高矿化潜水下伏的弱承压水,多层结构的粗、中、细砂及砂粘土层普遍含水,潜水顶板埋深一般3~10 m,电阻率1~n $\Omega \cdot m$,低矿化度水与下伏古河道或古冲湖积平原关系密切,矿化度一般大于2 g/L,电阻率几至十几 $\Omega \cdot m$ 。找水物探最佳方法首选EH-4低频装置其次MT。

4.2 塔里木水域系统典型水文地质类型区

(1) 塔里木盆地北、西缘阿克苏、盖孜河洪积扇带、巴音布鲁克、库米什、拜城、塔什库尔干潜水盆地山前带、天山南麓东段、喀什三角洲山前平原及吐鲁番北盆地南部、北部、焉耆盆地西部、南部、哈密盆地北缘、柯坪盆地等山前平原及塔里木河、

●新疆地质矿产勘查开发局地下水资源勘查项目组.新疆维吾尔自治区地下水资源勘查战略研究报告,1999

孔雀河冲积平原、昆仑—阿尔金山北麓等山前洪积扇带和乌什、乌恰潜水盆地。这些地区含水层含水的砂卵石、砂砾石、含泥砂砾石、砂层岩性基本稳定、透水性尚好、水质复杂、水交替强烈、厚度200~300 m、地下水埋深水位变化大,水质矿化度一般小于1 g/L,局部1~3 g/L,测区电阻率一般在几十至100 $\Omega \cdot m$,含水层、隔水层及第四系基底与下伏地层存在电性差异。在强文化噪声背景下找水物探方法选择TEM或常规电测深,在一般文化噪声条件下找水物探最佳方法选择EH-4标准装置。

(2) 孔雀河、渭干河、开都河、阿克苏河中下游冲积平原、吐鲁番盆地与柯坪盆地中、下游冲积平原、喀什噶尔河、叶尔羌河中、下游冲积平原区,含水类型为上部潜水下部承压水,潜水为砂砾石、粗砂、含水层,厚20~60 m,水质矿化度一般1~3 g/L,地下水位埋深变化大;承压水为砾砂、中粗砂含水层,顶板埋深100~360 m不等,含水层厚度变化大,各地不一,但200 m深度内可见稳定2~3层承压含水层,电阻率

一般十几至几十 $\Omega \cdot m$,潜水层与承压水有电性差异。在强文化噪声背景下找水物探方法选择常规电测深,一般文化噪声条件下找水物探最佳方法选择EH-4。

(3) 塔克拉玛干大沙漠腹地高矿化潜水下伏弱承压水区,含水岩组为粗、中、细砂及粉细砂夹粘土互层结构,地层普遍含水,潜水顶板埋深2~15 m,水质矿化度几至几十 g/L,随深度增加有下降趋势,同时,深层弱承压水(相对低矿化度水)与下伏古河道或古冲标准装置。

湖积平原关系密切,地电特征一般表现出地层电阻率1~n $\Omega \cdot m$,找水物探最佳方法选择EH-4低频装置或MT,当古河道或古冲湖积平原埋藏小于200 m时,可选用TEM。

参考文献

- [1] 蒋邦远.实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M].北京:地质出版社,1998.
- [2] 新疆通志·地质矿产志编纂委员会.新疆通志·地质矿产志[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1997.

DISCUSSION ABOUT EFFECT AND ADAPTABILITY OF ELECTROMAGNETIC METHOD IN SEEKING WATER IN XINJIANG ARID REGION

WANG Wei-jiang, LAN Xian, LIU Xue-qing

(1. Graduate School of Synthesis Information of Mineral Prediction, Jilin University, Changchun, Jilin, 130026, China;
2. Xinjiang Geological Survey Institute, Xinjiang, Urumqi, 830000, China; 3. Brigade of physics and Chemistry
Exploration, Xinjiang Geology and Mineral Bureau Xinjiang Changji, 831100, China)

Abstract: Different geophysical method, including MT method of V5 system of Canadian PHOENIX CORPORATION, the EH4 system of American GEOMETRICS CORPORATION, the CSAMT method and the TDEM method of V5(2000) system of Canadian PHOENIX CORPORATION and NMR method of NUMIS system of France IRIS CORPORATION, was used in Xinjiang drought region for seeking water. This paper discussed the effect, adaptability, fieldwork efficiency, cost etc of different advanced MT method and gives useful advice for seeking water in drought area of Xinjiang using MT method.

Key words: theory and system of MT; NMR Experimental effect; adaptability of seeking water