第 20 卷　第 3 期　　地 球 物 理 学 进 展　　Vol. 20　No. 3
2005 年 9 月(页码:828～833)　　PROGRESS IN GEOPHYSICS　　Sep.　2005

利用瞬变电磁技术进行地下水资源勘察

嵇艳鞠[1]，林　君[1]，朱凯光[1]，李海生[2]，王　艳[1]，陈祖斌[1]
(1. 吉林大学智能仪器与测控技术研究所,长春 130026；2. 内蒙古牧区水利研究所,呼和浩特 010020)

摘　要　为解决内蒙古白旗地区水资源严重短缺的问题,采用瞬变电磁技术进行水资源勘察.本文通过分析平原地区含水层的矿化度和孔隙度对岩石电阻率的影响,得出在内蒙古干旱牧区浑善达克沙地的含水砂砾岩电阻率值为 75～150 Ω·m 之间变化.以导电球体为模型来计算地下含水层异常的可分辨时间窗口,确定该区地下含水层异常出现最大值的探测条件.瞬变电磁技术在结合已知自流井的电性差异基础上,可以对地下水的含水层和含水深度进行准确勘察,确定新的水井 5 位置,经钻孔验证喷水量达到每小时 100 m^3 以上,满足白旗供水需求.验证了瞬变电磁技术在地下水资源勘察中的有效性,为西部地区水资源的评价提供了重要的技术依据.

关键词　瞬变电磁技术,地下含水层,岩石电阻率,时间窗口
中图分类号　P631　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1004-2903(2005)03-0828-06

Underground water prospecting by Transient electromagnetic method

JI Yan-jun[1], LIN Jun[1], ZHU Kai-guang[1], LI Hai-sheng[2], WANG Yan[1], CHEN Zu-bin[1]
(1. *Jilin University, Institute of Brainpower Instrument and Measure Control, Changchun* 130026, *China;*
2. *Inner Mongolia Institute of Water Resources, Hohhot* 010020, *China*)

Abstract　In order to resolve the problem of severely lack of water resource in Neimenggu, the TEM (Transient electromagnetic method) is applied in water prospecting. Through analyzing the relation between the resistivity and mineralization and rock hole of plain area watering layer, it is derived that the conglomerate resistivity varies from 75 to 150Ω·m in Hunshandake desert. Based on model of conductive sphere the differentiable time window of the abnormal of watering layer can be calculated. Then exploring condition is determined for finding the maximum abnormal of watering layer in this area. The location and the depth of watering layer can be exactly confirmed by TEM combining with electric difference of the known artesian well. The new decided well 5 can spout out 100 m3 per hour, meeting the need of BaiQi water supply. This proves the validity of TEM applied in the water resource prospecting, which is important to the West Area water resource evaluation.

Keywords　TEM, the underground water layer, rock resistivity, time window

0　引　言

水资源勘察是西部大开发战略的重要内容之一,水资源的严重短缺制约着西部地区经济发展、社会进步、生活和生态环境的改善[1].目前地下水资源勘察可以采用多种物探方法进行,其中核磁共振方法在直接探查地下水方面取得了明显的地质效果,由于该方法抗电磁干扰能力很低,勘探深度仅能达到 70～100 m,不能满足探测深部地下水的需要 *.瞬变电磁技术(Transient Electromagnetic Method,简称 TEM)虽然是通过测量地下介质电阻率进行间接找水的一种技术,但具有独特的优势,不仅勘探深度大,而且具有较强的抑制天电干扰,对低阻层的分辨具有较高的精度. TEM 技术可以根据地下介质电阻率值的变化来确定含水层、评价水质,利用电阻率值直接区分咸水和淡水.

在 1986 年 Fitlermen、1988 年 Mills 等人对于勘察地下盐水进行了研究[2,3],在 1994 年,M. Gold-

收稿日期　2004-12-10；**修回日期**　2005-02-18.
基金项目　国家自然科学基金项目(40074045)和吉林大学校内创新基金资助.
作者简介　嵇艳鞠(1972 -),女,汉,黑龙江省人,吉林大学讲师,地球信息与探测技术专业博士,主要从事电磁法正、反演计算,数据处理研究.(E-mail:jiyanju0218@sina.com)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

man 等人采用核磁共振与瞬变电磁法在以色列对地下水资源勘查进行研究[4],国内学者中国地质大学的潘玉玲对采用核磁共振方法找水进行了详细的研究.本文介绍 TEM 技术找水原理和技术特点的基础上,利用吉林大学研制的 ATEM-Ⅱ瞬变电磁测量系统在我国内蒙古牧区找水的应用实例,论述了 TEM 技术在勘察地下引用水、地下水资源评价等方面的效果.

1　瞬变电磁勘探原理

对于半径为 a 的单匝回线铺设于均匀非磁性导电半空间表面,导电率为 σ_0,回线内通以阶跃变化的电流 I,则均匀半空间的感应电压响应为[5]

$$\varepsilon_c = \frac{2\pi I}{\sigma_0 a}\int_0^{\infty} xJ_1^2(x)\frac{1}{\sqrt{\pi t\alpha}} \times\{e^{-x^2\alpha} - x\sqrt{\pi t\alpha}[1-\phi(x\sqrt{t\alpha})]\}dx, \quad (1)$$

其中,时间常数为

$$\alpha = \frac{1}{\sigma_0\mu_0 a^2},$$

误差函数为

$$\phi(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^y e^{-t^2}dt.$$

对一阶贝塞尔函数 J_1 的平方项展开,然后逐项积分,得到均匀大地重叠回线的响应[6]

$$\varepsilon_c = \frac{2Ia\mu_0\sqrt{\pi}}{t}\left(\frac{\mu_0\sigma_0 a^2}{4t}\right)^{\frac{3}{2}} \times\sum_{m=0}^{\infty}\frac{(-1)^m(2m+2)!}{m!(m+1)!(m+2)!(2m+5)}\left(\frac{\mu_0\sigma_0 a^2}{4t}\right)^m, \quad (2)$$

测得的感应电压可以形成异常剖面曲线,通过计算(2)式得出地下介质的视电阻率,采用一维反演进行对数据进行处理,得到电阻率反演结果[7],进而得到地下含水的情况.

2　地下含水层异常可分辨的时间窗口

由于围岩的影响,有时很难发现地下低阻异常,就需要研究可以发现地下低阻异常的时间窗口.本文以导电球体为模型来近似地下含水层来计算异常的可分辨时间窗口.

对于半径为 a、电导率 σ_1 的球体在电导率 σ_h 围岩中,早期和晚期的电磁响应中,围岩起主要作用,只有在中期时,含水层的低阻异常才能表现,因此需要确定异常出现的时间窗口,只有在异常的时间窗口内才可以发现含水层.为了简化计算,忽略导电球体与围岩之间的相互耦合作用,并定义综合响应为导电球体与围岩各自产生的响应算数相加.时间窗口定义为 $\varepsilon(t)$

$$\varepsilon(t) = \frac{\varepsilon_0(t)+\varepsilon_1(t)}{\varepsilon_0(t)} = 1+\frac{\varepsilon_1(t)}{\varepsilon_0(t)}, \quad (3)$$

其中 $\varepsilon_0(t)$ 为围岩的综合响应感应电压,$\varepsilon_1(t)$ 为球体的响应感应电压.

在早期、晚期的综合响应和围岩响应表达式简化为

$$\varepsilon_1(t) \approx k_1\frac{1}{t^{7/2}}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_0(t) \approx k_2\frac{1}{t^{5/2}}, \quad (5)$$

其中,k_1、k_2 为常数.

将(4)式和(5)式代入(3)式中,可以得到时间窗口的比值的变化情况.在取样时间为零时,由于趋附效应,球体引起的感应电压为零,此时 $\varepsilon_0(t)$ 比 $\varepsilon_1(t)$ 大,时间窗口的比值小于 1.在早期,$\varepsilon_1(t)$ 和 $\varepsilon_0(t)$ 相比,可以忽略不计,时间窗口的比值为 1;随取样时间增大,$\varepsilon_1(t)$ 和 $\varepsilon_0(t)$ 的响应符号相反,并且 $\varepsilon_1(t)$ 不可以忽略,因此时间窗口的比值从 1 开始下降并小于 1;在晚期,取样时间值变得更大,$\varepsilon_1(t)$ 变小趋向零,所以时间窗口的比值变小趋于 1,只有中期时间窗口的比值呈最大,为大于 1 的数,即所谓可分辨的时间窗口,在这段时间范围才可以发现围岩中的低阻体,并且围岩电导率与球体的电导率比值越大,低阻异常越容易发现.

通过计算得到围岩中导电球体在中期时综合响应表达式为

$$\varepsilon_1(t) = \frac{6\phi_0}{\sigma_0\mu_0 a^2}\times\left(\frac{r_1 a}{r_1 z}\right)^3\times\left\{e^{-\pi^2\alpha}\times\left[-1-\frac{\sigma_h\pi(z^2+r_1)}{2\sigma_0 a^2}+\left(\frac{\sigma_h}{\sigma_0}\pi^2\right)^2\times\frac{R^2\times(z-r_1)}{8a^4}\right] - \frac{5}{8\sqrt{\pi t^4}}\times\left(\frac{\sigma_h}{\sigma_0}\right)^2\times a^4\times(z^3+r_1^3)\times\left(\frac{\sigma_0\mu_0}{t}\right)^{7/2}\right\}, \quad (6)$$

其中,r_1 为发射线圈半径,

$$r_1 = \sqrt{z^2+r_1^2},$$

$$R = r+r_1,$$

$$\phi_0 = \mu_0 s_0 H_0 = \frac{\pi\mu_0 r_1}{2},$$

$$\alpha = \frac{1}{\sigma_0\mu_0 a^2},$$

$$D_0 = 2\pi\sqrt{\frac{2t}{\mu_0\sigma_0}}$$

为扩散参数,z 为球体的深度.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

将(6)式代入(6)式计算得

$$\varepsilon(t) = 1 + \frac{\varepsilon_1(t)}{\varepsilon_0(t)} = 1 + \frac{60\sqrt{\pi a}}{(b^2\pi^1 + h^2)^3} \times\frac{\sigma}{\sigma_h} \times\left(\frac{t}{\sigma_0\mu_0}\right)^{5/2} \times\exp(-\pi^2 t/\sigma_h\mu_0 a^2) . \quad (7)$$

图 1 为时间窗口的比值与扩散参数之间的关系曲线,当探测条件满足

$z/a = 1.5$,

$r_1/a = 1$,

$\sigma_h/\sigma_0 = 10$

时,在

$D_0/a = 1 \sim 2$

之间出现最大值,含水层异常表现明显.

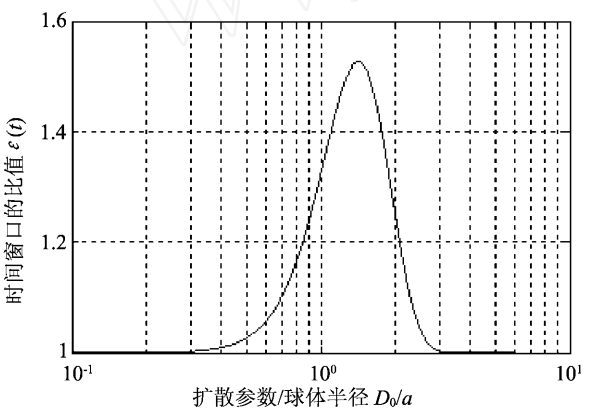


图 1 时间窗口与扩散参数之间的关系曲线

Fig. 1 Relation between time window and diffusion parameter

3 电阻率与水矿化度、岩石孔隙度的关系

西部平原地区的岩性主要以砂、砂砾石、粘土、和砂质粘土为主,在内蒙古干旱牧区浑善达克沙地,地下含水层为第四系全新统风积砂孔隙潜水和第三系上新统和白垩系巴彦花组地层砂岩、砂砾岩层中承压自流水.第四系全新统风积砂孔隙潜水的水量大小随沙丘底部红色泥岩顶板的起伏而变化,第三系上新统红色泥岩分布广、厚度大,红色泥岩构成良好的区域性隔水层,而在第三系下白垩统巴彦花组地层中的砂岩、砂砾岩层中埋藏承压自流水,水化学类型为 HCO3-Ga·Mg 型,矿化度小于 1g/L,水质较好,符合国家居民生活饮用水标准.

岩石层电阻率的变化主要受岩性和地下水的矿化度的变化两个因素控制,其电阻率取决于岩石层的孔隙度和粘土的含量[9,10],孔隙度、矿化度对岩层电阻率影响很大,岩石电阻率与水矿化度、岩石孔隙度的关系见表 1,当矿化度一定时,岩石的电阻率随孔隙度增大而减小.当孔隙度不变时,则电阻率随矿化度增大而减小.根据计算得到表 1 的数据,可以了解含水层电阻率的变化情况,为确定含水层提供重要的依据.

表 1 岩石电阻率与水矿化度、岩石孔隙度的关系(单位 Ω·m)

Tab. 1 The resistivity, mineralization and rock hole of rock (unit: Ω·m)

孔隙度	15～25 % 砂砾石	25～35 % 粗中砂	30～40 % 粉细砂	40～50 % 粘土、砂粘土
矿化度:1g/L	150～75	75～30	40～25	25～20
矿化度:2g/L	90～45	45～18	24～15	15～12

4 勘察实例

内蒙古白旗是水资源严重短缺的城镇之一,位于锡林郭勒盟南部的浑善达克沙地南缘,该旗所在地明安图镇每年缺水 35.73 万 m^3,日缺水 979 m^3,只能靠水质不符合卫生标准的自备水源井解决.为此,急需开辟新的水源地,扩大供水区域和范围.初步确定该旗北部的阿拉腾嘎达斯苏木境内为富水区,地理位置为东径 114°43′～114°53′和北纬 42°36′～42°44′之间,测区内发育有近东西向断层 F1 和北北东向断层 F3,F3 为 1/50 万普查资料提供,图 2 为白旗阿拉腾嘎达斯苏木测区的水文地质图,在勘察区有一口 1978 年形成的自流井 (井 1),为白垩系砂岩断裂带构造水,目前每天自流量为 600 m^3,在自流井周围寻找新的水资源地,已经成为非常重要的任务.根据 NMR 方法勘察的结果,在相对富水区布设钻孔井 2,喷水量在 9.88 m 降深涌水量 1.17 m^3/h,而吉林大学浅层地震方法的勘察成果布设井 5,喷水量在 121.2 m 降深涌水量为 30.5 m^3/h.两水井出水量均不及自流井的喷水量,不能满足白旗居民的引用水需求量,为此,需要确定新的引用水源地.

采用吉林大学研制的 ATEM-Ⅱ瞬变电磁系统,重叠回线装置,边长 100×100 m,发射电流 13A,关断时间 130 μs,发射频率 25 Hz,线同步方式,均匀密集采样方式,采样率 5μs,叠加次数 1024,布设 L1、L4、L3 共 3 条剖面,长度分别为 400 m、700 m、850 m,其中剖面 L1 穿过 1978 年形成的自流井,L4 剖面穿过地震方法勘察确定的井 2,L3 剖面平行 L4 线,距 L4 剖面 220 m,见水文地质结果图 2

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

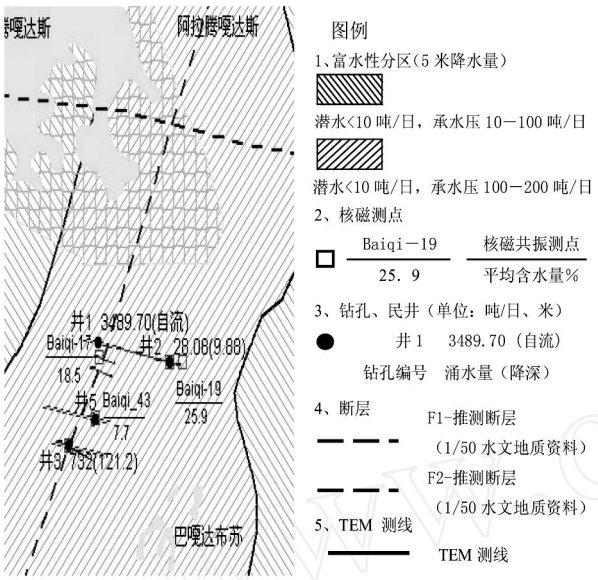


图 2　测区的水文地质图

Fig. 2　The hydrology geologic map of the detected region

勘察数据经过处理,图 3 为白旗 L1 反演电阻率断面图,从剖面上可见明显的低阻异常带,自流井位于低阻异常带的西边缘,低阻异常带确定为含水断裂带,断裂带呈直立高角度,深度在 - 250 m 左右,宽度 180 m 左右,电性反映为 90～130 Ω ·m,此值与平原地区含水的砂砾岩石典型电阻率值相符,该测线的结果为测线 L3、L4 的解释提供了重要的依据.

L4 剖面通过井 4,剖面长度 700 m,勘探深度 - 280 m,300 m 为井 3,图 4 为 L4 剖面的反演电阻率断面图. L4 剖面发现明显的低阻异常带,确定低阻异常带为断裂带,断裂带呈直立高角度,同剖面 L1 反映一致,深度 - 200 m 左右,宽度 550 m 左右,电性反映为 100～130 Ω ·m. 井 3 位于低阻异常带的中部靠西,电性反映为 140 Ω ·m ,- 160 m 以上和 - 180 m 以下为高阻层,说明含水层厚度薄,同时也说明地层电性为 140 Ω ·m 时的富水性较电性为 130 Ω ·m 时的富水性差一些. 在 300 m 处勘探结果同钻井 3 的资料一致,并推测在 200 m 处 - 120 m 深的为富水性较好.

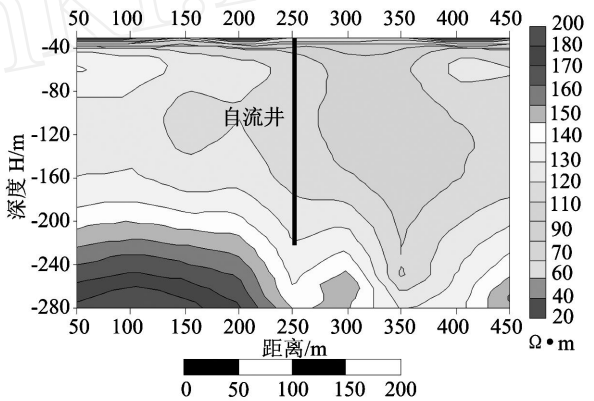


图 3　白旗 L1 瞬变电磁勘探的反演结果图

Fig. 3　Section of apparent at at L1th line of Baiqi

TEM 技术在剖面 L4 勘察结果说明了浅层地震勘察喷水量小的原因,为了确定新的水井位置,在 L4 剖面北边 220 m 确定剖面 L3 进行勘察,地形平坦,以便选择合适的位置布井,剖面长度 850 m,图 5 为 L3 测线的电阻率断面图.

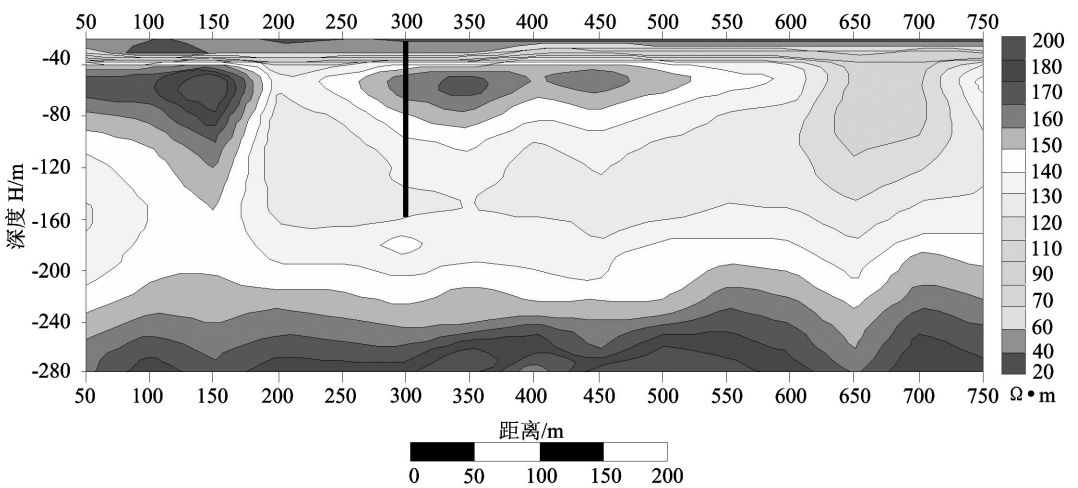


图 4　白旗 L4 瞬变电磁勘探的反演结果图

Fig. 4 Section of apparent at L4th line of Baiqi

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

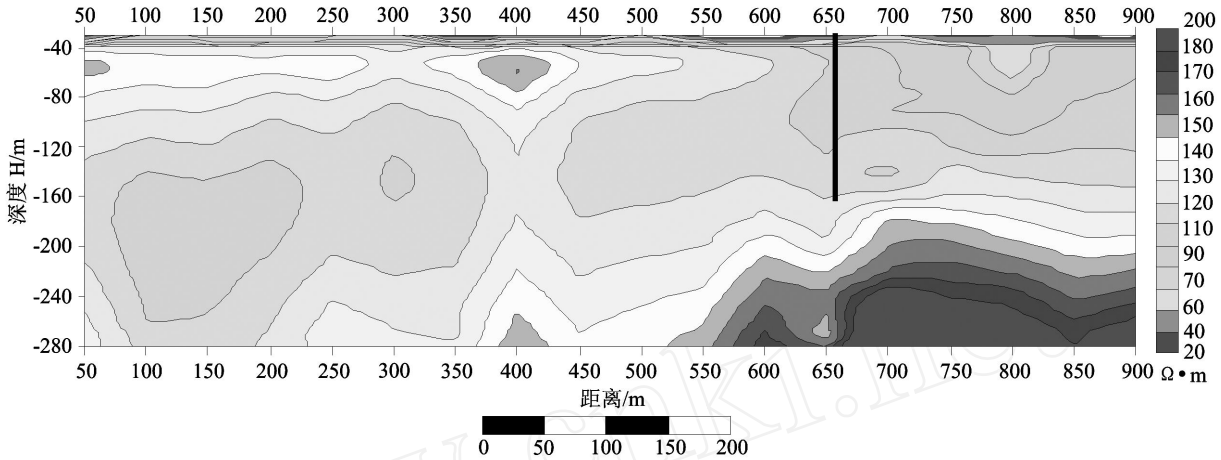


图 5 白旗 L3 瞬变电磁勘探的反演结果图

Fig. 5 Section of apparent at L3th line of Baiqi

L3 剖面发现两处明显的低阻异常带,确定低阻异常带为断裂带,其中东部 800 m 处,解译深度为 - 80 m 左右,宽度 300 m 左右,西部 200 m 处,解译深度为 - 280 m 左右,宽度 300 m 左右,电性反映为 90～130 Ω·m. 初步确定在西部 200 m 处深度为 - 160 m～ - 250 m 为富水性较好的区域,可以钻孔水井,而东部的 800 m 处电阻率值比自流井处电阻率值低很多,确定含水,深度比较浅,建议采用核磁共振方法勘察验证,确定该测点为 Baiqi - 43 勘察点,结果表明在该点,平均含水率 7.7 %,解译含水层厚度 98 m,解译渗透系数 1.239 4 m/d,初步确定为断层带. 该点电阻率值比较低但含水量很小,其主要原因是近地表含粘土量比较大所导致. 而在 650～700 m 中间电阻率同自流井的值比较接近,建议在 500 m 与 750 m 中间打井. 经内蒙古牧区水利研究所在 675 m 处打井验证,称为井 5,钻孔深度 168 m,下管成井深度 158 m,根据钻探取芯和测井解释结果,如表 2 所示的钻孔资料,0～15 m 为第四系,为风积中细砂,含水层厚度约 10 m,类型为孔隙潜水. 15～158 m 为断裂带充填物,岩性以中细砂、中粗砂、红色粘土、砂砾石为主,含水层厚度约 28.7 m,类型为孔隙自流承压水. 下部为白垩系下统巴彦花组砂岩、灰色泥岩、泥质砂砾岩含卵石,未打穿,含水层类型为孔隙自流承压水,自流量较小. 井 5 承压水头 + 2.55 m,42.24 m 降深涌水量为 58 m^3/h,75 m 降深,涌水量可达 100 m^3/h 以上.

5 结 论

(1) 采用 TEM 技术查明浅层地震勘察方法确定的井 2 喷水量小的原因,确定井 5 位置,经钻孔验证,井 5 喷水量较大,由自流井 1 和井 5 可以满足 3 000 m^3/d 的供水需求,而且根据保守资源估算,阿苏木水源地可以保证每天 3 000 m^3 开采 30 年,并且水质较好,水化学类型为 HCO3-Na 型水,各项指标均符合国家居民生活饮用水标准.

(2) TEM 技术勘察地下水资源具有优势,勘察深度大、抗干扰能力强,结合核磁共振方法对地下水勘察对西部水资源勘察提供了新的有效技术.

致 谢 感谢内蒙古牧区水利研究所所长魏永富、总工李海生的大力支持.

参 考 文 献 (References):

[1] 李茂榕,王平,王赟. 西部地下水资源勘查的综合地球物理问题—以鄂尔多斯盆地白垩系地下水勘查为例[J]. 地球物理学进展, 2001,16(3):119～126.

[2] Fitlermen D V, Stewart M T. Transient electroma-gnetic soundingsfor groundwater[J]. Geophysics,1986,51(4):995～1006.

[3] Hoekstra M T, Blohm P M, Evans L. Time Domain Electro-magnetic Sounding for mapping seawater intrusion in Monterey County[J]. Ground Water, 1988,26:771～782.

[4] Goldman M, Rabinovich B. Application of the integrated NMR-TDEM method in groundwater exploration in Israel[J]. Journal of Applied Geophysics, 1994,31(4):27～52.

[5] 嵇艳鞠,林君,程德福,于生宝. ATEM—Ⅱ瞬变电磁仪数据处理软件的研制与应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2003,33(2):242～245.

[6] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘察[M]. 北京,地质出版社,1998,150～200.

[7] Raiche A P, Spies B R. Coincident loop transient electromag-

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

netic master curves for interpretation of two-layer earths[J]. Geophysics,1981,46(1):46～53.

[8] Kaufman A A, Keller G V. 频率域和时间域电磁测深[M]. 王建谋译. 地质出版社,1987.

[9] 潘玉玲, 张昌达. 地面核磁共振找水理论和方法[M],武汉,中国地质大学出版社, 2000 年,98～107.

[10] 武毅. 鄂尔多斯白垩系盆地地下水地球物理勘查特点和技术[J]. 地球学报,2003,24(5):479～482.

[11] 林君,陈鹏程,姜弢,陈祖斌. 浅层地震探测的可控震源信号设计[J]. 地球物理学进展,2004,19(4):807～811.

欢迎订阅　　《地球物理学进展》　　ISSN 1004-2903
CN 11-2982-P

季　刊　　2006 年每期定价 35 元　　全年 140 元

《地球物理学进展》1986 年创刊,由中国地球物理学会和中国科学院地质与地球物理研究所共同主办,是地球物理及相关学科的综合性学术期刊。国内外公开发行。《地球物理学进展》是中国科技核心期刊,为《中文核心期刊要目总览》2004 版、《中国科技论文与引文数据库(CSTPC)》、《中国科学引文数据库核心库》等收录。本刊主要报道地球物理学及相关学科领域的最新研究成果和学科发展动态,探讨我国地球物理学科的发展战略和发展趋势,主要刊载国内外未公开发表的有创新性或意义重大的研究论文和综述文章。为国民经济建设和学科发展服务。本刊面向国内外各种行业特别是能源、矿产、地质、工程、交通、军事从事地球物理及相关领域工作的科研、生产、管理等方面人士和高等院校广大师生。

订购办法主要有两种:

(1) 向天津全国非邮发报刊联合征订服务部订阅

地　　址: 天津市大寺泉集北里别墅 17 号;　　邮　编: 300385
电　　话: 022 - 23973378,23962479;　　传　真: 022 - 23973378
E-mail: http://www.LHZD.com;　　E-mail: LHZD@public.tpt.tj.cn
户　　名: 天津市河西区联合征订服务部
开 户 行: 工商行天津市尖山分理处
银行帐号: 0302060509104619603

(2) 直接向本刊编辑部订阅(邮局汇款和单位电汇两种方式)

邮局汇款地址: 北京市 9825 信箱《地球物理学进展》编辑部
电　　话: 010 - 62007700; 010 - 62007909; 010 - 62007696
联 系 人: 刘少华,肖台琴,徐雅玲,汪海英
E-mail: shliu@mail.igcas.ac.cn; xtq@mail.igcas.ac.cn; xyl@mail.igcas.ac.cn; wanghy@mail.igcas.ac.cn; prog@mail.igcas.ac.cn;

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net