

饮水困难区地下水勘察新技术的应用

刘伟, 李泽坤

(中国水利水电科学研究院牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010010)

[摘要] 饮水困难区一般来说是指对于安全的饮用水源的获取存在困难的地区。主要分布在我国中部、西部的部分地区和华北的局部地区, 在西北部情况尤为严重。虽然导致区域饮水困难有多方面的原因, 自然条件的因素在大多数地区还是首当其冲的。从水文地质学的角度来看, 一些饮水困难区即所谓贫水区, 表现为水文地质条件复杂, 区域地下水的补给、径流与排泄条件不清, 地下水在时间、空间上变化较大等特征, 难以用传统的地质方法与常规的地球物理方法找到。随着研究工作的深入与科学技术的发展, 一些新方法与新技术被引进到地下水勘察工作中来, 在一些饮水困难区, 甚至被认为是无水区的地区找到了地下水。而依托先进找水技术的综合物探方法找水模式也已初具雏型, 并且在实践中取得了一定成效, 为饮水困难区的地下水勘察工作提供了技术依托。

[关键词] 饮水困难区 地下水勘察 新技术

[中图分类号] P641.72

[文献标识码] A

[文章编号] 0459-5331(2010)01-014-06

Liu Wei, Li Ze-kun. Advanced geophysical means on groundwater exploration in drinking-water lacking regions[J]. *Geology and Exploration*, 2010, 46(1): 0147-0152.

饮水困难区一般来说是指地下水位埋深在200m以内, 单井涌水量小于5t/h的地区。在我国西部很多地区均有分布。尤其在西北干旱半干旱地区, 分布的面积更广, 贫水的状况更严重。在总面积约372万多平方公里的西北干旱半干旱区, 73%以上地区年平均降水量仅为189.6mm, 有的地方在极端年份降水量仅50mm左右, 水资源天然匮乏, 具备典型的资源性缺水的特征。

饮水困难区的缺水状况得到了国家有关部门的高度重视, 在“948”农业引进计划的支持下, 我所于2000年开始实施“贫水区先进找水技术和设备引进”项目, 从法国IRIS公司引进了核磁共振找水系统(NUMIS), 在饮水困难区的地下水勘察工作中取得了许多成果; 于2004年开始实施“深层地下水先进找水技术和设备”项目, 从美国Geomtrics公司引进了Stratagem EH-4连续电导率成像系统, 在构造裂隙水与深部隐伏含水层(组)的勘察工作中取得了显著的效果。在农村饮水安全工程建设工作中, 上述引进技术发挥了重要的作用。在国家科技支撑计划重点项目“农村安全供水集成技术与示

范”项目中, 这二项引进技术的技术内涵得以进一步深化, 而基于这二种方法的饮水困难区综合物探方法找水模式也已初具雏型, 开始进入推广的阶段。

1 核磁共振找水系统(NUMIS)

核磁共振(PMR)找水技术产生于二十世纪50年代, IRIS于1997年生产出定型产品, 随后进入实践领域, 在非洲、中东、北美、欧洲、亚洲等多个国家得到了广泛的应用。由于对于技术引进的目的性和所处的特殊地理环境, 我所成为该项技术在世界范围内应用的最多的单位, 在饮水困难区的地下水勘察工作中取得了大量实践成果。

1.1 核磁共振(PMR)方法

核磁共振(PMR)是一种非侵入的测量方法。在适当的频率下(拉莫尔频率), 水分子中的氢原子被施加于地面环路中的交变电流脉冲所形成的交变电磁场激发, 产生共振, 当环路中的电流关闭后, 水分子中的氢质子因相位的改变而产生了弛豫磁场, 弛豫磁场的特征可体现在地面的环路中, 接收机因此可对各脉冲所激发质子产生的磁场进行测量、计

[收稿日期] 2009-09-01; [修订日期] 2009-11-01; [责任编辑] 陈喜峰。

[基金项目] 本文得到“十一五”国家科技支撑计划重大项目“农村安全供水集成技术与示范”资助。

[第一作者简介] 刘伟(1966年—), 男, 留美访问学者, 现就职于中国水利水电科学研究院牧区水利科学研究所, 高级工程师, 主要从事地下水勘探与开发工作。

算,进而得到有关地下水的信息。在探测深度范围内岩层中有自由水存在,就有核磁共振响应,水量越大,核磁响应信号越强(Pan Yu-ling, *et al.* , 2003)(图 1)。

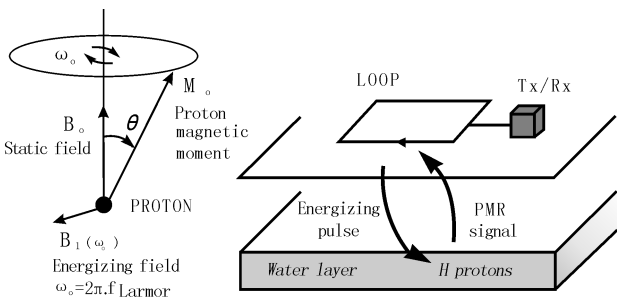


图 1 核磁共振基本原理

Fig. 1 Proton magnetic resonance method

- 图中:
- B_0 —地球磁场,用以确定质子的拉莫尔频率: $F(\text{Hz}) = 0.04218B_0$ 。(nT);
 - B_1 —激发磁场;
 - θ —H 质子共振相位;
 - M_0 —H 质子总量;
 - ω_0 —脉冲的频率;
 - LOOP—发射/接收闭合线圈;
 - T_x/R_x —脉冲发生器/信号接收器;
 - Energizing pulse—施加的脉冲;
 - PMR signal—核磁共振信号;
 - Water layer—含水层;
 - H protons—氢质子

通过方程 $e(t) = e_0 \exp(-t/T_2^*) \sin(\omega_0 t + \omega_0)$, 可得到不同脉冲下信号的振幅、频率、相位、信噪比、衰减时等参数,这些参数有助于对探测的有效性与成果解译的合理性作出判断,均以折线图的方式表达出来,非常直观。

解译结果以直方图的形式表达,横坐标为含水量,表示含水体积的大小,同时配有光谱色标,表示岩层的衰减时,因此可推断含水层的岩性;纵坐标为深度,以算术坐标的方式表示(陈文升, 1992)。

1.2 核磁共振(PMR)找水实践

阿巴嘎旗查干淖尔苏木地处内蒙古锡林郭勒盟中北部,苏木所辖草场大部分为缺水草场,过度放牧使得草原生态遭到破坏,草场退化严重,而水资源的匮乏又成为生态系统修复的瓶颈,因此,畜牧业难以形成可持续化发展,当地牧民生活贫困。

区域内地表均被新生界地层所覆盖,无基岩出露,揭露地层一般为白垩系下统、上第三系及第四

系。第四系(Q)主要为现代风积残坡积及湖积物,工作区内分布普遍,其砾石具有一定的磨圆度,成分复杂,但一般与邻近丘陵区分布的基岩有密切关系,厚度<20m,与下伏地层不整合接触;第三系(N)广布全区,产状平缓,主要堆积物以砂、泥质为主,含有砾石、泥质结核及铁锰结核等,岩性及厚度变化较大,岩性主要为杂色、红色泥岩、砂岩、砂砾岩、粉砂岩,厚度>50m,与下伏地层不整合接触;白垩系下统巴彦花组(K_1b)广布全区,主要岩性为砂质泥岩、泥岩、砂岩、粉砂岩及砂砾岩等,属内陆湖相沉积。据邻区的地质工作资料,区域内第三系地层与白垩系地层的不整合接触面具备储水的有利条件(内蒙古区测队, 1979)。

根据区域的水文地质条件,结合所承担的饮水安全项目,将该处选为“薄层含水层勘察技术研究”的试验点。在 2007 年,用核磁共振(PMR)方法在该区域进行找水试验研究工作,取得了理想的效果。图 2 所示的核磁共振(PMR)探测,是一个典型实例。经钻探证实,在 13~14m、49~51m 深度内共有二个含水层,经钻孔抽水实验,水位降深 16m 时单井最大涌水量 840t/d。经水样化学分析,水质达到国家生活饮用水卫生标准,能够作为人畜用水的水源。

2 Stratagem EH-4 连续电导率成像系统

Stratagem EH-4 连续电导率成像系统通过发射和接收地面电磁波来进行电阻率测深,可由连续的测深点阵形成地下二维电阻率剖面,能够探测地下浅至几米深及千余米的地层结构,在地下水勘察领域适用于寻找构造裂隙水(张惠等, 2008)。

2.1 EH-4 方法

方法的理论基础基于大地电磁测深的理论,是一种张量测量的方法。系统对天然电磁场(在天然场弱到无法采集足够用于数据解译信号时附加人工源)的电、磁特征以一定的频率域进行测量,测量结果经傅立叶变换计算出不同深度地层的视电阻率,据此得到地层的电性结构,进而发现有利的储水构造。E 表示电场, H 表示磁场, 4 表示互相正交的四个方向。

阻抗 Z 为天然电场和磁场水平分量的比值。在均匀大地的情况下,此阻抗与入射场的极化和大地电阻率以及电磁场的频率有关,关系如式(1):

$$z = \sqrt{\rho \mu \pi f} (1-i) \tag{1}$$

式中, f 是频率, ρ 是电阻率, μ 是磁导率。由(1)式可得到计算大地电阻率的公式,如式(2):

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E}{H} \right| \tag{2}$$

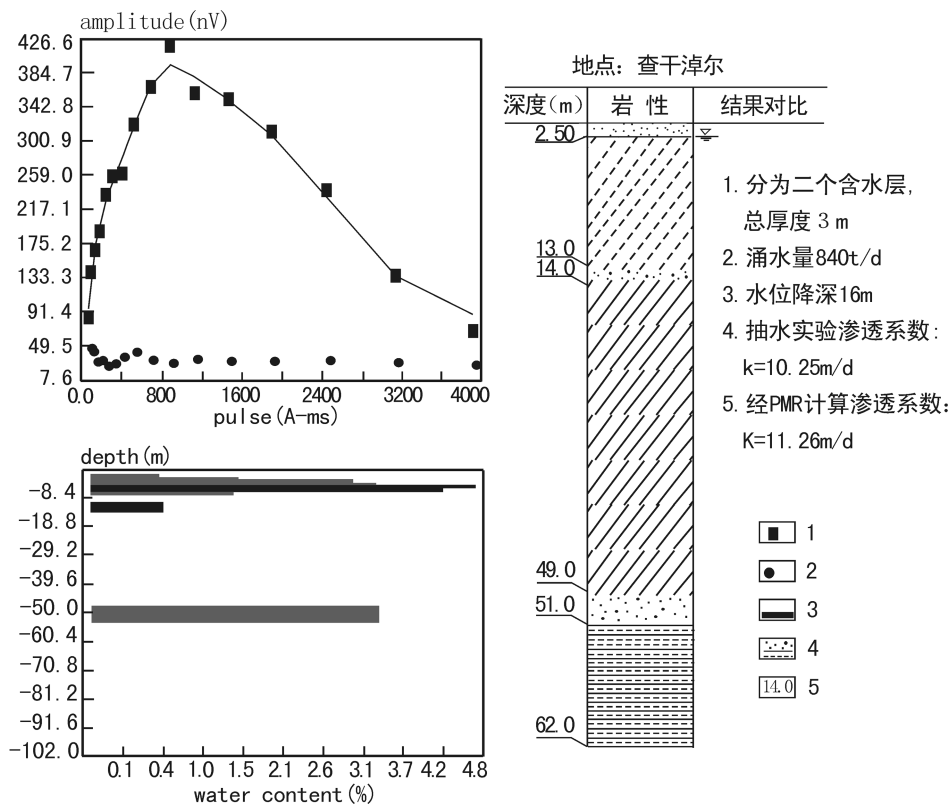


图 2 核磁共振 (PMR) 勘察实例

Fig. 2 Example of proton magnetic resonance (PMR) sounding

1-核磁共振信号振幅;2-环境噪音信号;3-解译含水性;4-地层岩性;5-地层层位

1-amplitude of PMR signal;2-environmental noise signal;3-inversion water content;4-lithology of stratum;5-depth of stratum

式中 ρ 的单位是 $\Omega \cdot m$, E 的单位是 mv/km , H 的单位是 nT 。

对于水平分层大地,此表达式仍然适用,但用它计算得到的电阻率将随频率的改变而变化,因为大地的穿透深度或趋肤深度与频率有关,如式(3):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \approx 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \tag{3}$$

式中的单位是 m 。此时由(2)式计算得到的电阻率则为视电阻率。因此,在一个宽频带上测量 E 和 H ,计算出相应的视电阻率和相位,可确定地下构造的空间形态(黄兆辉等,2006;李琪,1991;柳建新等,2008;朴化荣,1990;汤井田等,2005;汤井田等,2008;王家映,1998)。

根据多年来对方法的研究,同时结合岩(矿)石的物性测定,解译的视电阻率与岩性存在表 1 中的对应关系(地质矿产部水文地质工程地质技术方法研究队,1978)。

2.2 Stratagem EH-4 找水实践

西乌珠穆沁旗阿拉坦高勒苏木位于内蒙古中部,小兴安岭北坡边缘。区域断裂构造复杂,岩浆活

动频繁,地下水的时空分布规律难以掌握,当地居民长期存在饮水安全的问题。

表 1 岩(矿)石 EH4 电性参数表

Table 1 EH4 electrical parameters of rock

岩(矿)石名称	电阻率变化范围($\Omega \cdot m$)	平均值($\Omega \cdot m$)
粘土及淤泥质	30 ~ 100	60
砂岩	150 ~ 1200	400
泥岩	30 ~ 400	110
页岩	500 ~ 1000	700
花岗岩	800 ~ 2000	1200
灰岩	1000 ~ 3000	1500
氧化矿体	120 ~ 600	250
硫化矿体	10 ~ 200	50
煤系地层	<30	10
煤系地层	<30	10

区域上断裂构造可划分为北北东向、北东向、东西向及南北向四组,其中以北北东向和北东向占主导地位。上述两组断裂绝大部分分布在工作区西北

处,可划分为三个挤压破碎带。东西向的断裂多呈片段出露,北西向和南北向断裂不太发育。区域出露地层主要为下古生界锡林郭勒杂岩(Pz_1x_1)、中石炭统本巴图组(C_2b)、上石炭统阿木山组(C_3a)、下二叠统盐池北山组(P_1y)、达里诺尔组(P_1d)、哲斯组(P_1z)、上二叠统包尔敖包组(P_2b)、林西组(P_2l)、中下侏罗统阿拉坦合力群($J_{1-2}al$)、上侏罗统查干诺尔组(J_3c)、道特诺尔组(J_3d)、布拉根哈达组(J_3b),零星出露下白垩统巴彦花组(K_1b),第四系全新统(内蒙古区测队,1979)。

根据区域的水文地质条件,结合所承担的饮水安全项目,将该处选为“基岩山区地下水勘察技术研究”的试验点,用 EH-4 方法寻找有利于储水的断裂构造。在 2007 年,共进行了六条剖面的测量,确定了一个井位,现已成井,钻孔涌水量 38t/h,水质达到国家生活饮用水卫生标准,能够作为人畜用水的水源。

图 3 所示探测实例是所作的第五条剖面,共布置了 31 个测深点,全长 1600 m。解译的电性层与地层对应如下:

地层	电性层
黄土及残坡积物	30 ~ 60 $\Omega \cdot m$
粉砂质板岩、泥岩	60 ~ 250 $\Omega \cdot m$
砂质板岩	250 ~ 1000 $\Omega \cdot m$

中细粒花岗岩 >1000 $\Omega \cdot m$
从 EH4 剖面上来看,在 V-14 ~ V-17 点之间,是一条储水断裂构造,宽度约 150 m,深达 700 余米。设计钻孔在 V-15 处,设计孔深 230 m。在-30 ~ -50 m、-100 ~ -110 m、-198 ~ -207 m 间构造破碎发育,-220 m 处见完整花岗岩终孔。

3 综合物探方法找水实例

核磁共振(PMR)方法与 EH-4 方法在 2008 年被同时应用在“四子王旗库伦图乡孟家打花村人饮工程”项目中,在完成项目地下水勘察任务的过程中,对二种方法的互补性做了一些研究,对基于这二种方法的综合物探方法找水模式进行了探索(龙凡等,2006)

勘察区位于四子王旗东部的缺水草原上,自然条件恶劣,地质条件复杂,该村及附近八个自然村共计 1200 人口存在饮水困难。结合饮水科技支撑项目,该地适合作为“山区基岩裂隙水勘察技术方法体系研究”的实验点。

勘察区区域构造上受阴山纬向构造带控制,经历了古生代以来历次构造变动,活动相当强烈,地层褶皱、断裂破碎发育,断层破碎带与一系列拗陷、隆起大致呈东西向。地层出露主要有震旦系、老第三系和侵入体,在沟谷附近有薄层第四系覆盖。区域

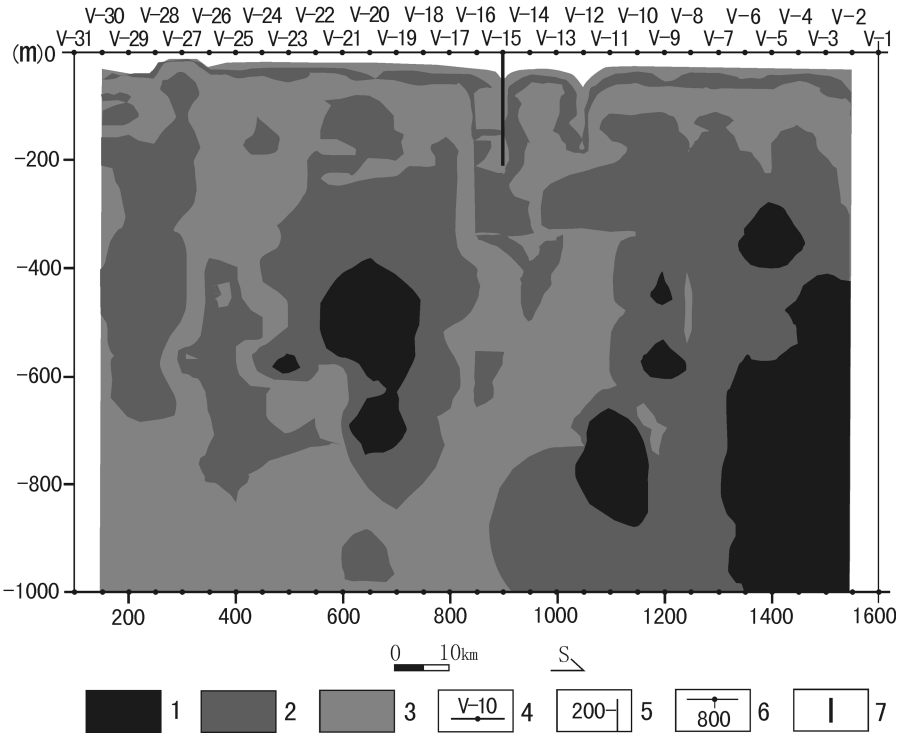


图 3 Stratagem EH4 勘察实例

Fig. 3 Example of Stratagem EH4 sounding
1-500 $\Omega \cdot m$; 2-125 $\Omega \cdot m$; 3-30 $\Omega \cdot m$; 4-测深点; 5-深度; 6-剖面位置; 7-验证钻孔
1-500 $\Omega \cdot m$; 2-125 $\Omega \cdot m$; 3-30 $\Omega \cdot m$; 4-sounding site; 5-depth; 6-location of section; 7-drilling hole

含水层组主要为第三系碎屑岩类型裂隙孔隙承压水含水层组和基岩裂隙水含水层组,富水程度变化较大,含水层岩性分别为浅砖红色、灰白色砂岩夹泥质砂砾岩,棕红、杂色泥岩和加里东期闪长岩、华力西期的花岗闪长岩、花岗岩、黑云母花岗岩及燕山期斑状花岗岩等(内蒙古自治区 114 地质队,1982)。

根据区域水文地质条件,共布置了三条 EH4 剖面,在剖面上选择有利点位用 Numis 系统进行核磁共振(PMR)探测,进而确定地下水的开采方案。图 4 为实践成果之一,根据 EH4 剖面形态,确定了核磁共振(PMR)测量点位;根据核磁共振(PMR)解译结果,确定了井位及井身结构。

钻孔揭露,在 70~73m、138~146m 分别见到第三系碎屑岩类承压水含水层,在 174~186m 见基岩裂隙水含水层,经抽水实验,钻孔涌水量 42t/h,水质达到国家生活饮用水卫生标准,能够作为人畜用水的水源。

4 结语

贫水区的地下水勘察工作是一项艰苦的工作,取得成果难度较大。概括起来有两个方面,一方面

是勘察方法的原因,另一个是勘察工作环境。

随着工作的不断深入,有些贫水区缺水的问题解决了,有些还有待于进一步工作,有待于勘察技术的进步。根据二十多年的找水实践,我们深深体会到勘察技术对这项工作的重要性。从最初的直流电法到现在的核磁共振(NUMIS)与 EH-4 连续电导率成像,走过了一条技术创新的路子。引进适宜的先进技术,在实践中对技术的内涵进行充分的消化吸收,掌握其有效性与局限性,对于实践中所遇到的问题及时反馈给设备的研发单位,以利于仪器的不断完善,使之更好的为社会服务,这是在应用物探勘察新技术方面的一些体会。

勘察工作环境是贫水区找水工作难做的另一个因素。许多贫水区处在“老、少、边、贫”地区,当地人民生活贫困,找水工作在这些地方是一项造福社会的工作,社会效益很大,而经济效益却相对较小。在市场经济条件下,这种状况不利于勘察工作的开展、技术的进步和队伍的稳定。在全国农村饮水安全工程“十一五”规划实施以来,勘察工作的社会环境有所改善,体现在有市场需求,有经费保障。因此,为使贫水区地下水勘察工作可持续的进行下去,

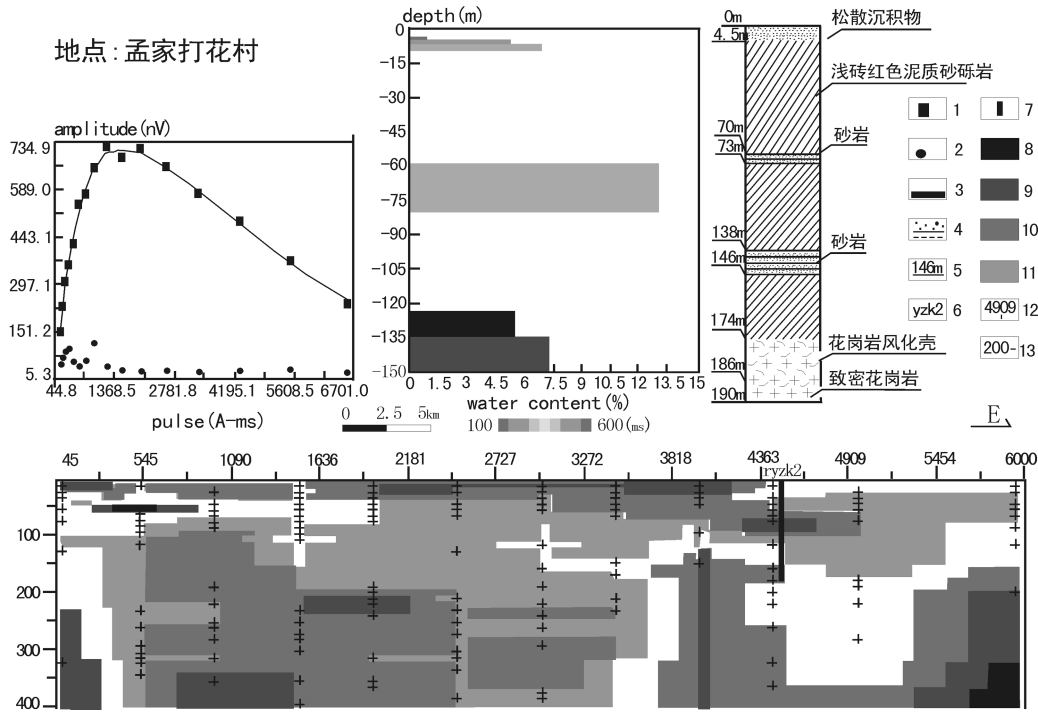


图 4 核磁共振(PMR)与 Stratagem EH4 联合应用实例

Fig. 4 Example of PMR and Stratagem EH4 combined sounding

1-核磁共振信号振幅;2-环境噪音信号;3-解译含水量;4-地层岩性;5-地层层位;6-钻孔编号;7-钻孔;8-高阻带;9-高中阻过
渡带;10-中阻带;11-低阻带;12-剖面位置;13-深度
1-amplitude of PMR signal;2-environmental noise signal;3-inversion water content;4-lithology of stratum;5-depth of stratum;6-number
of drilling hole;7-drilling hole;8-high resistivity zone;9-high-middle resistivity transmit zone;10-moderate resistivity zone;11-low
resistivity zone;12-location of section;13-depth

还需要国家在政策和资金等方面的继续支持,形成一个产业化发展模式。

[References]

Chen Wen-Sheng. 1992. Method of proton magnetic resonance instrument [M]. Publisher of geology;8-15

The research team on Hydrogeology and engineering geology means, ministry of geology, china. 1978. Hydrogeology manual[M]. Publisher of geology;532

Huo Ming-Yuan. 1992. The method on system exploration technology and synthetize evaluation in groundwater resources[M]. Publisher of science;40-45

Huang Zhao-hui, Di Qing-yun, Hou Sheng-Li. 2006. CSAMT static correction and its application[J]. Progress in Geophysics, 21(4): 1290-1295

Long Fan, Han Tian-cheng, Shong Chang-qing. 2006. The research on geophysical means application in groundwater detecting[A]. Chinese geophysical society, geophysical committee of national security project. Geophysics research in national security project[C]. Publisher of Bai Shan ;1-3

Li Qi. 1991. Introductory geophysical data inversion [M]. Publisher of geology;34-37

Liu Jian-Xin, Tong Xiao-Zhong, Cheng Yun-Tao, Yang Xiao-Hong, Xie Wei. 2008. Application of effective apparent resistivity in two-dimensional inversion of EH-4 data[J]. Geology and Exploration, (3): 56-59

Nei Mongol geology survey team. 1979. Regional geology survey (1: 200000) [M]. Nei Mongol geology bureau;25-28

No. 114 geology survey team, Nei Mongol. 1982. Hydrogeological investigation report on water-supplying for agriculture in Wulanhua basin, Siziwang city, Nei Mongol (1:50000) [M]. Nei Mongol geology bureau;17-19

Pan Yu-ling, Li Zhen-Yu, Deng Jing-Wu, Zhang Bing. 2003. Hydrogeological investigation in china[A]. BRGM. 2ND INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE MAGNETIC RESONANCE SOUNDING-METHOD APPLIED TO NON-INVASIVE GROUNDWATER INVESTIGATIONS[C]. BRGM, IRIS, EAGE;89-93

Piao Hua-Rong. 1990. The theory of electromagnetic sounding[M]. Publisher of geology;6-10

Tang Jing-Tian, He Ji-Shan. 2005. Controllable source audio frequency magnetotelluric sounding method and practice[M]. Publisher of cen-

tral-south university;33-51

Tang Jing-tian, Xiao Xiao, Du Hua-Kun, Wang Ye. 2008. Application of RRI theory in EH4 data inversion [J]. Geolog and Exploration , (1):75-79

Wang Jia-Ying. 1998. The theory on geophysical data inversion[M]. Publisher of china university of geology;6-10

Zhang Hui, Xie Hui-Lin, Wu Xiang-Bin. 2008. Application of audio megnetotellurics and high-power induced polarization for concealed ores in the EERGUNA metallogenic belt[J]. Geology and Exploration, (5):76-80

Zhao Jing-xiang. 1992. electromagnetic method in geophysical exploration [M]. Beijing ; Publisher of geology;14-16

[附中文参考文献]

陈文升. 1992. 核磁共振地球物理仪器原理[M]. 地质出版社;8-15

地质矿产部水文地质工程地质技术方法研究队. 1978. 水文地质手册[M]. 地质出版社;532

黄兆辉,底青云,侯胜利. 2006. CSAMT 的静态效应校正及应用[J]. 地球物理学进展, 21(4): 1290-1295

龙凡,韩天成,宋长青. 2006. 勘探地球物理在地下水探测中的研究[A]. 中国地球物理学会, 国家安全地球物理专业委员会. 国家安全工程地球物理研究[C]. 白山出版社;1-3

李琪. 1991. 物探数值方法导论[M]. 地质出版社;34-37.

柳建新,童孝忠,程云涛,杨晓宏,谢维. 2008. 有效视电阻率在音频大地测量数据二维反演中的应用[J]. 地质与勘探, (3):56-59

内蒙古区测队. 1979. 1:20 万区域地质调查[M]. 内蒙古地矿局;25-28

内蒙古自治区 114 地质队. 1982. 内蒙古自治区四子王旗乌兰花盆地农牧业供水水文地质详查报告(1:5 万) [M]. 内蒙古地矿局: 14-17

朴化荣. 1990. 电磁测深法原理[M]. 地质出版社;6-10

汤井田,何继善. 2005. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 中南大学出版社;33-51

汤井田,肖晓,杜华坤,王烨. 2008. RRI 方法在 EH-4 数据解释中的应用[J]. 地质与勘探, (1):75-79

王家映. 1998. 地球物理反演理论[M]. 武汉:中国地质大学出版社: 6-10

张惠,谢玲琳,吴湘滨. 2008. 大功率激发极化和音频大地电磁联合应用方法在额尔古纳成矿带寻找隐伏矿的应用研究[J]. 地质与勘探, (5):76-80

赵经祥. 1992. 地球物理勘探电磁[M]. 地质出版社;14-16

Advanced Geophysical Means on Groundwater Exploration
in Drinking-water Lacking Regions

Liu Wei, Li Ze-Kun

(The Institute of Water Resources Research for Pastoral Area, IWHR, Hohhot 010010)

Abstract: Drinking-water lacking region is usually addressed to the place where drinking-water is hard to obtain. It is mainly located in central, western and northern China. The condition is most serious in the northwestern part of China. Natural environment is no doubt the key factor among reasons that result in drinking-water shortage. In some cases, drinking-water lacking region is equal to non-groundwater region in hydrogeology. Recharging, flowing and discharging of groundwater are all unclear there. It is very hard to be discovered using routine geophysical means. With development of research, some advanced methods are introduced to the field. Groundwater keeps on being detected in the region. At same time, the model based on the combined geophysical method is being built up and is proved to be efficient in the practice of groundwater exploration.

Key words: drinking-water lacking region, groundwater exploration, advanced method