

# AMT 法勘查额济纳盆地与巴丹吉林沙漠接触关系

武毅, 孙银行, 卢放, 胡文广, 连捷, 于蕾

中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051

**摘要** 查明额济纳盆地东部与巴丹吉林沙漠之间的接触关系, 有助于分析额济纳盆地地下水水位下降、生态环境恶化的原因。通过当地地质资料和物探方法的对比分析, 选择合理有效的音频大地电磁法 (AMT) 物探手段, 在该区域进行了原始创新性的勘查工作。勘查结果认为额济纳盆地上升、巴丹吉林沙漠下降, 两侧地层岩性厚度变化较大, 推断额济纳盆地与巴丹吉林沙漠为张性断层接触。研究可为分析两者之间地下水转化关系和额济纳盆地地下水水位下降原因、探讨盆地与沙漠区地下水形成机制提供依据, 对恢复治理额济纳盆地生态环境具有一定帮助。

**关键词** 额济纳盆地; 巴丹吉林沙漠; 接触关系; AMT 勘查

**中图分类号** P319

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.20.002

## Audio Magnetotelluric Survey in Ejina Basin for the Contacting Relationship with the Badain Jaran Desert

WU Yi, SUN Yinhang, LU Fang, HU Wenguang, LIAN Jie, YU Lei

Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, China

**Abstract** The contact relationship between the Ejina Basin and the Badain Jaran Desert can be used to analyze the Ejina Basin groundwater level drops and the environmental degradation. By comparing local geological and geophysical methods of data analysis, the reasonable and effective audio magnetotelluric (AMT) geophysical methods are selected in the region to carry out original and innovative explorations, and a good result is achieved. Survey results suggest that the Ejina Basin is in rising, Badain Jaran Desert in declining, the lithology thicknesses on both sides see a great change, and the contact between the Ejina Basin and the Badain Jaran Desert is an extensional fault. The results can provide a basis for the analysis of the groundwater transforming relationship and, the Ejina Basin groundwater level declining in the studied area, and for the study of the groundwater formation mechanism in basin and desert, which is of important social significance for the recovery and the management of the ecological environment in the Ejina Basin.

**Keywords** Ejina Basin; Badain Jaran Desert; contact relationship; audio magnetotelluric survey

额济纳盆地与巴丹吉林沙漠行政区划隶属于内蒙古自治区阿拉善盟, 大部分地区为戈壁沙漠, 属大陆性温带干旱气候, 具有日照长、冬冷夏热、昼夜温差悬殊和多风沙等特点<sup>[1]</sup>。黑河流域地下水出山后, 流经张掖盆地、酒泉东盆地, 从鼎新谷地进入额济纳旗盆地, 流经约 800 km 在狼心山一带分为东、西两个支流, 分别流向额济纳旗盆地北部的东、西居延海<sup>[2]</sup>。近几十年以来由于黑河上游、中游地下水的大量开采、地表水蒸发等多种因素影响, 额济纳盆地地下水水位持续下

降, 额济纳盆地沙漠化逐步严重, 生态环境恶化。为此, 国家自然科学基金委员会对黑河流域地表水与地下水相互转化观测与机制研究设立了重点项目, 目的是通过详细评价地下水水资源量, 合理分配地下水资源, 为治理恢复该区域生态环境提供科学依据。其中的关键问题之一是必须查明额济纳盆地与巴丹吉林沙漠之间的接触关系。但额济纳盆地东部与巴丹吉林沙漠西部是历次水文地质调查的薄弱环节。尤其两者之间接触关系不明, 造成许多专家对这两个地区之间的

收稿日期: 2014-01-20; 修回日期 2014-04-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (91025019)

作者简介: 武毅, 高级工程师, 研究方向为水工环地球物理勘查技术, 电子信箱: ffswyi@163.com

引用格式: 武毅, 孙银行, 卢放, 等. 额济纳盆地与巴丹吉林沙漠接触关系[J]. 科技导报, 2014, 32(20): 22-26.

地下水转化关系、额济纳盆地地下水水位下降原因以及盆地与沙漠区地下水形成演化机制观点不一,甚至矛盾较大<sup>[9]</sup>。为解决此问题,项目组通过对该区域地质资料和物探方法适用条件进行分析,选择合理有效的音频大地电磁法物探手段在该区域进行了原始创新性勘查工作,取得明显效果,本文报道相关成果。

### 1 研究区地质背景

额济纳盆地东临巴丹吉林沙漠,西接马鬃山,南以哨马营隆起为界与鼎新谷地分割,北为丘陵山地,是一个相对独立的沉积盆地。

盆地岩性结构分为单一结构区和多层结构区2部分。单一结构区内,岩性以含砾粗中砂、泥质砂砾石、砾质砂为主,主要分布于盆地的南侧;多层结构区内,岩性以粉细砂、黏土、中细砂互层为主。盆地基底埋深由马鬃山东界向东逐渐增大,由50 m增至350余m,其中在建国营和吉日乃湖一带埋深最大为350 m左右。基底岩性为第三系和白垩系地层。

盆地含水层为第四系松散层,地下水埋深在南部潜水区内由南至北由30 m变至3 m左右,在北部承压区为3~5 m。承压水的顶板埋深在承压区中心地带,埋深最大为30~50 m,该盆地承压区非中心地带为10~30 m。在该盆地的东南部即吉日乃湖一带承压水的顶板埋深也较大为30~50 m。

巴丹吉林沙漠地质构造上属于阿拉善地块,地貌形态缓和,主要为剥蚀低山残丘与山间凹地组成,第四系沉积物普遍覆盖于地表,形成广泛的戈壁和沙漠,地层岩性以细砂和中砂为主。其中上层以中砂为主,含量大于细砂,下层以细砂为主,含量大于中砂,极粗砂、粗砂、极细砂、细砂含量很少且不含黏粒<sup>[9]</sup>。

### 2 物探技术方法应用

查明额济纳盆地与巴丹吉林沙漠接触关系可采用的地球物理方法主要有:常规直流电阻率法、音频大地电磁法、地震法等<sup>[5,6]</sup>。结合工作区地质环境特点选择物探方法应遵循以下原则:1) 地层岩性有明显的物性(电阻率、波速或波阻抗等)差异;2) 物探方法具有一定的勘查深度(500 m);3) 物探方法具有较高分辨率;4) 工作效率要高;5) 不破坏地质环境。

工作区位于额济纳盆地东部与巴丹吉林沙漠接壤地带,属于国家自然生态保护区,沙丘、沙地以及圈闭的保护区遍地可见,交通条件极差。为达到工作目的,物探勘查工作需深入到沙漠内3~7 km,野外施工难度进一步加大。由于不允许破坏地表地质环境,一些方法不适合在此地区施工。鉴于上述工作区地质环境特点,表1给出不同物探方法适用性评估。

表1 不同物探方法适用性评估

Tabel 1 Assessment the suitability of different geophysical methods

方法	物性特征	勘查深度	分辨率	工作效率	地表破坏性	适用性
直流电阻率法	电阻率	随着供电电极距增大而增大	随勘查深度增大分辨率降低	至少需要6人工作,跑极困难,效率低	无破坏性	不宜适用
音频大地电磁法	电阻率	天然电磁场频率越低,勘查深度越大	频点丰富,分辨率高	需要3~4人工作,效率高	无破坏性	适用
地震法	波速或波阻抗	激发能量越大勘查深度越大	分辨率高	至少需要10人以上工作,工作效率低	采用震源车,对地表无破坏;人工炸药激发,破坏性强	不适用

从表1可以看出,音频大地电磁法最适宜在该工作区开展工作,但利用该方法的最基本条件和工作区地层岩性电阻率必须有明显差异。表2是结合前人资料统计出工作区不同

表2 工作区不同地层岩性对应电阻率统计

Tabel 2 Resistivity results from different formation lithologies in the work area

不同地层岩性	电阻率/( $\Omega \cdot m$ )
第四系中砂	> 40
第四系细砂	5 ~ 40
第四系盐碱地、黏土、粉细砂	< 5
第三系泥岩	< 25
碎屑岩	20 ~ 50
火山岩	> 50

地层岩性对应的电阻率值,可见该地区不同地层岩性电阻率差异满足音频大地电磁法工作条件。

#### 2.1 音频大地电磁法工作原理

音频大地电磁法研究的是响应与频率之间的关系,频率越低勘查深度越大,该法以测量天然场为主。通过实时信号时域采集(电场分量 $E_x$ 、 $E_y$ ,磁场分量 $H_x$ 、 $H_y$ )和数据处理(傅氏变换,可得互功率谱),可得地层卡尼亚电阻率,从而解决有关的地质问题<sup>[7,8]</sup>。由美国 Geometric 公司和 EMI 公司生产的 EH-4 电导率成像系统,在磁探头频率响应为 10~100000 Hz 时有 58 个频点,具有采集频点丰富(保证勘查分辨率高)、频率低(保证勘探深度大)的特点,该设备还具有全过程显示功能,可以有效进行质量控制,提高工作效率<sup>[9~11]</sup>。

视电阻率计算公式为

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (1)$$

式中,  $f$  为电磁波频率, Hz;  $\rho$  为视电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $E_x$  为平行于测线方向的电场强度, mV/km;  $H_y$  为垂直于测线方向的磁场强度, nT。

趋肤深度计算公式<sup>[12]</sup>为

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2)$$

式中,  $\delta$  为趋肤深度, m。

由式(2)可知, 在给定情况下, 频率与趋肤深度成反比。频率越大, 勘探深度越小; 频率越小, 勘探深度越大。可以通过改变频率达到探测不同深度电性变化的目的<sup>[13]</sup>。

## 2.2 工作部署与数据采集

为查明额济纳盆地与巴丹吉林沙漠之间的接触关系, 垂直两者接触走向布置勘查剖面3条(图1)<sup>[1]</sup>。

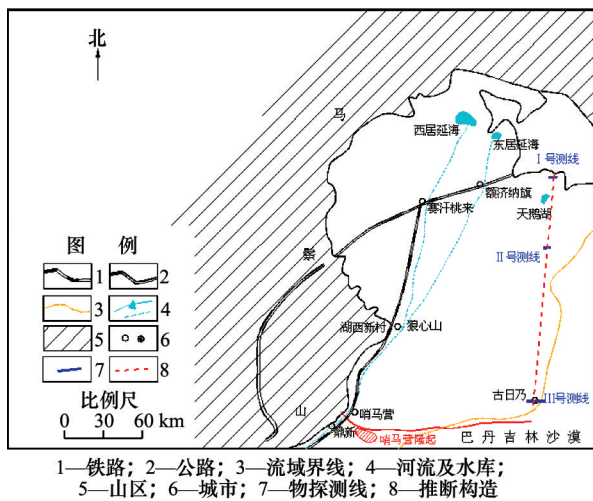


图1 研究区物探工作布置

Fig. 1 Study area layout

数据采集采用EH-4电导率成像系统, 电偶极距25~30 m, 点距300 m, 测量方式为标量测量, 测量电极采用钛钢电极, 磁探头响应频率为10~100000 Hz。

## 2.3 资料处理

### 2.3.1 数据整理

首先对数据进行初步整理, 选择有效数据点和重复采集数据中效果较好的点。针对一些干扰较大的点, 做标记, 在后续资料处理和解释中做重点处理和分析。

### 2.3.2 时序分析

分析对比单个测点不同观测次数时间域电磁道曲线, 剔除噪声干扰较大的曲线。

### 2.3.3 一维数据处理

在时序分析的基础上, 对新功频率谱做进一步处理。分析视电阻率曲线和相位曲线, 剔除尖峰或跳跃频点, 保证曲线光滑连续, 相位在20°~80°之间变化, 相关度值介于0.8~1.0。

### 2.3.4 二维处理

二维处理是采用电磁排列剖面(electron magnetic array profile, EMAP)法<sup>[14]</sup>进行拟二维处理, 主要进行EMAP滤波处理。EMAP滤波处理是一种波数域低通滤波, 用来衰减滤波截止频率上高防横向变化。

### 2.3.5 博斯蒂克(bostick)反演

数据经EMAP处理后进行bostick反演处理。Bostick法基于大地电磁测深曲线低频渐进线的性质, 将视电阻率随周期(或频率)变化曲线变换为电阻率随深度变化曲线<sup>[15]</sup>。Bostick反演是一种具有代表性的近似反演方法, 尽管结果不够精确, 但运算简便, 能直观地给出地下电阻率随深度的变化形式, 已得到广泛应用。

### 2.3.6 数据成图

Bostick反演后, 进行数据成图。主要采用Surfer软件把数据绘制成二维电性剖面, 进而对二维电性剖面做进一步的分析 and 地质解释。

## 3 勘查效果与分析

结合电磁法勘查结果(图2)、区域地质、水文地质资料, 从以下3个方面对勘察效果进行分析。

### 3.1 构造空间位置分布特征

以电阻率等值线发生畸变为依据对构造空间位置进行解释。在勘查的3个剖面中(图2), 电阻率等值线分别在图2(a)3300 m、图2(c)2700 m、图2(e)3000 m处发生垂直的畸变现象, 各处两侧电阻率值也不同, 因此, 推断上述各处为断裂通过位置。其次, 结合等值线畸变的倾向, 推断出断裂的产状, 综观图2中3条剖面综合分析认为, 断层均显示为西倾, 断层倾角较大, 约为70°。结合图1中的红色虚线推断断层走向, 为北北东向。

### 3.2 地层岩性及断层两侧基底埋深分布特征

地层岩性判别及断层两侧基底埋深确定是以地层电阻率值大小为依据。地层岩性界面及基底埋深界面的划分是依据电阻率等值线梯度变化(拐点)特征。依据表2中提供的工作区地层电阻率大小及图2各勘查剖面电阻率大小, 推断本次工作区内断层两盘地层岩性及其埋深分布特征如下。

I号测线, 额济纳盆地一侧, 埋深100 m以内, 电阻率小于5  $\Omega \cdot m$ , 推断该层为第四系黏土、细砂层, 且地下水矿化较高, 在浅层地表形成盐碱地; 在水平位置0~1200 m埋深100~500 m和水平位置1200~2400 m埋深100~250 m范围内, 电阻率为5~20  $\Omega \cdot m$ , 推断为第三系泥岩; 在水平位置1200~3150 m埋深0~250 m范围内, 电阻率大于50  $\Omega \cdot m$ , 推断地层为碎屑岩。第三系泥岩和碎屑岩地层由西向东抬升, 在水平位置2400~3150 m范围内出露地表。巴丹吉林沙漠一侧, 埋深50 m以内, 电阻率小于20  $\Omega \cdot m$ , 推断为第四系细砂; 埋深50 m以下, 电阻率为20~50  $\Omega \cdot m$ , 推断为碎屑岩地层。

II号测线, 额济纳盆地一侧, 埋深100 m范围内, 电阻率

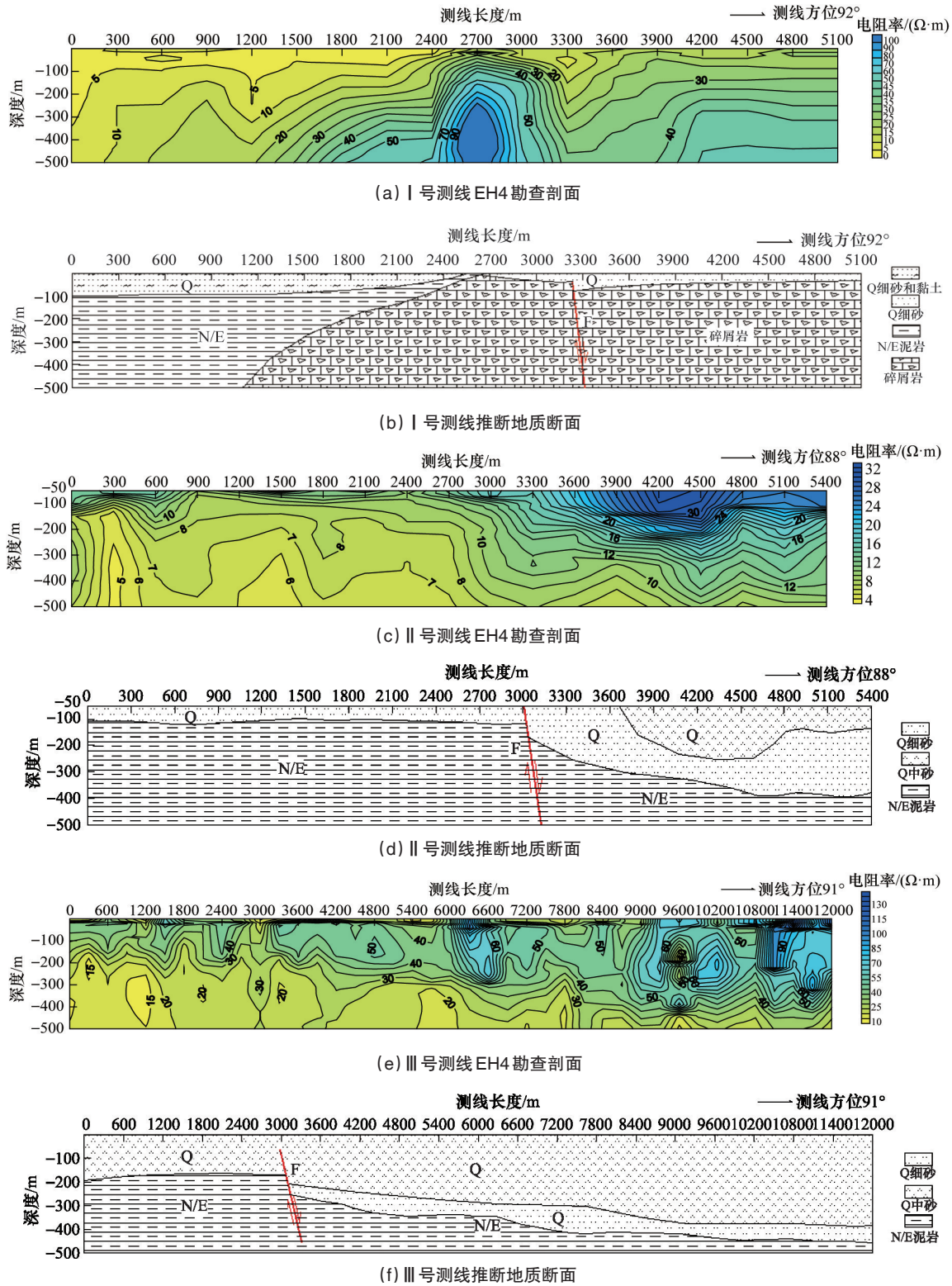


图2 额济纳盆地与巴丹吉林沙漠接触关系电磁法勘查结果和推断地质断面

Fig. 2 Electromagnetic exploration results and the inferred geological section for the contact relationship between Ejina basin and Badain Jaran desert

大于  $10 \Omega \cdot m$ , 推断为第四系细砂层, 该层低板稍有起伏, 个别地段变浅(如水平位置 900~1400 m 和 2100~2700 m); 埋深 100 m 以下, 电阻率小于  $10 \Omega \cdot m$ , 推断该层为第三系泥岩。巴丹吉林沙漠一侧, 在水平位置 3750~4750 m 埋深 150~250 m

和水平位置埋深 100 m 范围内, 电阻率大于  $40 \Omega \cdot m$ , 推断为第四系中砂; 在埋深 100~150 m 至 400 m 范围内, 电阻率在  $10\sim40 \Omega \cdot m$ , 推断为第四系细砂; 第四系中砂和细砂层总体厚度自西向东增大, 剖面范围内最大深度为 400 m; 其下电阻率

小于  $10 \Omega \cdot m$ , 推断为第三系泥岩。

III号测线, 额济纳盆地一侧, 埋深 250 m 以内, 电阻率大于  $25 \Omega \cdot m$ , 推断为第四系中砂层, 该层基本稳定; 埋深 250 m 以下, 电阻率小于  $25 \Omega \cdot m$ , 推断为第三系泥岩。巴丹吉林沙漠一侧, 埋深 300~400 m, 电阻率大于  $40 \Omega \cdot m$ , 推断为第四系中砂; 埋深 400~450 m。电阻率在  $25 \sim 40 \Omega \cdot m$ , 推断为第四系细砂; 其下电阻率小于  $25 \Omega \cdot m$ , 推断为第三系泥岩。

从上述描述中可以看出, 额济纳盆地第四系厚度由北向南埋深由小(100 m 左右)变大(250 m 左右), 岩性颗粒由细(黏土、粉细砂)变粗(中砂); 巴丹吉林沙漠第四系厚度由北部的 50 m 变为南部的 450 m 左右, 岩性颗粒除 I 号线有变化(原因是由于测线位于山丘内, 地质构造发育, 引起地层变化)外, 按大小分为上下 2 层, 上层以中砂为主, 下层细砂为主。总体上额济纳盆地与巴丹吉林沙漠基底均为第三系泥岩。

纵观额济纳盆地和巴丹吉林沙漠地层岩性的变化规律, 推断额济纳盆地地层(下盘)上升, 巴丹吉林沙漠地层(上盘)下降, 因而推断两者之间接触的断层其性质为正断层。

#### 4 结论

通过分析选择音频大地电磁法勘查额济纳盆地与巴丹吉林沙漠接触关系是合理有效的。勘查结果与区域地质、水文地质资料结合分析, 对盆地与沙漠接触关系得出以下结论: 1) 额济纳盆地与巴丹吉林沙漠为断层接触, 且断层走向为北北东-南南西。断层为张性断层(正断层), 额济纳盆地一侧为上升盘, 巴丹吉林沙漠一侧为下降盘。2) 额济纳盆地第四系厚度由北向南埋深由小(100 m 左右)变大(250 m 左右), 地层岩性颗粒由细(黏土、细砂)变粗(中砂); 巴丹吉林沙漠第四系厚度由北部的 50 m 变为南部的 450 m 左右, 地层岩性颗粒按大小分为上下两层, 上层以中砂为主, 下层以细砂为主。

#### 参考文献(References)

[1] 迟振卿, 王永, 姚培毅, 等. 内蒙古额济纳旗地貌特征及其构造、气候事件[J]. 地质评论, 2006, 52(3): 370-379.  
Chi Zhenqing, Wang Yong, Yao Peiyi, et al. Tectonic and climatic events recorded by morphologic units in Ejin Qi, Inner Mongolia[J]. Geological Review, 2006, 52(3): 370-379.

[2] 武选民, 史生胜, 黎志恒, 等. 西北黑河下游额济纳旗盆地地下水系统研究(上)[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(1): 16-20.  
Wu Xuanmin, Shi Shengsheng, Li Zhiheng, et al. Research on the groundwater system of northwest Ejin Qi in Heihe River basin(1)[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, 29(1): 16-20.

[3] 李文鹏, 康卫东, 刘振英. 西北典型内流盆地水资源调控与优化利用模式: 以黑河流域为例[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 39-64.  
Li Wenpeng, Kang Weidong, Liu Zhenying. Water resources control and its optimal utility pattern of the northwest typical inland river basin: a case study of the Heihe River basin[M]. Beijing: Geology Press, 2010: 39-46.

[4] 赵景波, 张冲, 董知宝, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山粒度成分与沙山形成[J]. 地质学报, 2011, 85(8): 1389-1394.

Zhao Jingbo, Zhang Chong, Dong Zhibao, et al. Particle size composition and formation of the Mega-Dune in the Badian Jaran desert [J]. Acta geologica Sinica, 2011, 85(8): 1389-1394.

[5] 姜枚, 谭捍东, 曾普胜, 等. 云南腾冲火山构造区马站—固东岩浆囊的地球物理模式[J]. 地球学报, 2012, 33(5): 731-739.  
Jiang Mei, Tan Handong, Zeng Pusheng, et al. Geophysical mode of mazhan-gudong magma chamber in Tengchong volcano-tectonic area [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(5): 731-739.

[6] 董治平, 张元生. 河西走廊中部地区三维速度结构研究[J]. 地球学报, 2007, 28(3): 270-276.  
Dong Zhiping, Zhang Yuansheng. A study of the 3-D velocity structure in central Hexi corridor[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(3): 270-276.

[7] 杨进, 安海忠. 音频大地电磁法在秦岭地区的地质效果[J]. 物探与化探, 1995, 19(4): 286-290.  
Yang Jin, An Haizhong. Geological effects of audio-frequency magnetotelluric method in qinling region[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1995, 19(4): 286-290.

[8] 武毅, 郭建强, 曹福祥, 等. 多种物探技术勘查宁夏南深层岩溶水的组合试验[J]. 物探与化探, 2002, 26(2): 113-117.  
Wu Yi, Guo Jianqiang, Cao Fuxiang, et al. The combination of varied geophysical techniques in exploring deep-seated karstic water of south ningxia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 26(2): 113-117.

[9] 罗延钟, 何展翔, 马瑞伍, 等. 可控源音频大地电磁法的静态效应校正[J]. 物探与化探, 1991, 15(3): 196-202.  
Luo Yanzhong, He Zhanxiang, Ma Ruiwu, et al. The correction of static effects in sonic frequency telluric electromagnetic method of controllable source[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1991, 15(3): 196-202.

[10] 任伟, 金胜. 应用音频大地电磁法探测内蒙古巴丹吉林高大沙山结构及成因[J]. 现代地质, 2011, 25(6): 1167-1173.  
Ren Wei, Jing Sheng. Applying audio-magnetotelluric method to the study of megadune structure and formation in Badian Jaran desert, inner Mongolia[J]. Geoscience, 2011, 25(6): 1167-1173.

[11] 林品荣, 郭鹏, 石福升, 等. 大深度多功能电磁探测技术研究[J]. 地球学报, 2010, 31(2): 149-154.  
Lin Pinrong, Guo Peng, Shi Fusheng, et al. A study of the techniques for large-depth and multi-functional electromagnetic survey[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(2): 149-154.

[12] 孟贵祥, 兰险. EH-4 电导率成像系统的特点及其在金属矿勘探中的应用[J]. 矿床地质, 2006, 25(1): 36-42.  
Meng Guixiang, Lan Xian. Characteristics of EH-4 electrical conductivity imaging system and its application to ore exploration[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(1): 36-42.

[13] 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.  
Wu Yi. Characteristics and techniques of geophysical exploration in search for groundwater in ordos cretaceous basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24(5): 479-482.

[14] Bostick Jr F X. Electromagnetic array profiling (EMAP)[C]//1986 SEG Annual Meeting. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 1986.

[15] 朱崇利. 数据处理前后博斯蒂克反演对比[J]. 科学技术与工程, 2013, 26(13): 7736-7739.  
Zhu Chongli. Comparison of the bostick inversion before and after the data processing[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 26(13): 7736-7739.

(编辑 田恬)