

# 应用 AMT 确定月牙泉回灌治理中的导水构造

卢放<sup>1</sup>, 阎红霞<sup>2</sup>, 武毅<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051
2. 河北大学建筑工程学院, 保定 071002

**摘要** 随着敦煌地区经济发展和人口增长, 对地下水的巨量需求导致过度抽取, 地下水位急剧下降, 沙漠奇观月牙泉面临干涸的困境。查明敦煌月牙泉地区的水文地质条件, 弄清该地区地下水的循环规律, 及时保量向月牙泉补充地下水, 是一个亟待解决的问题。根据断层、导水古河道和围岩之间的物性差异, 结合现有的水文地质资料, 利用音频大地电磁测深法, 查明了月牙泉导水构造的分布, 为月牙泉地质环境治理提供可靠的基础资料。勘查结果显示月牙泉及其附近地区分布有明显的断层和导水古河道, 应用音频大地电磁测深法确定断层、导水古河道的分布具有明显的地质效果, 为月牙泉地下水回灌工程的开展提供科学依据。

**关键词** 月牙泉; 断层; 导水古河道; 音频大地电磁测深法; 电阻率

**中图分类号** P631

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.03.010

## Application of AMT to Detection of Water Conducted Structures in Recharging Governance of Crescent Spring

LU Fang<sup>1</sup>, YAN Hongxia<sup>2</sup>, WU Yi<sup>1</sup>

1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, China
2. College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, Baoding 071002, China

**Abstract** With the economy development and population increase of Dunhuang, the pattern of water exploitation changes with each passing day. A tremendous demand for underground water results in excessive pumping, and water level falls sharply. Environments which focused on water resources become more and more maladjusted, and Crescent Spring which called as desert resort will dry up nearly. Finding out hydrogeological condition of Crescent Spring in Dunhuang and underground water circulation rules, and underground water recharging of Crescent Spring sufficiently and timely is an anxious problem to be resolved, which is important in economic merit and society significance. Based on the difference in physical property between fault, water conducted ancient riverways and their ambient rocks, an audio frequency magnetotelluric method was applied with geological data to determine distribution of water conducted structures, which provides reliable data for geological environment governance of Crescent Spring. The results obviously show that there are faults and water conducted ancient riverways in Crescent Spring and its ambient area. The conclusion can be drawn that evident geological effect can be obtained by audio frequency magnetotelluric method to define location of fault and water conducted ancient riverways and it can provide scientific foundation for underground water recharging in Crescent Spring.

**Keywords** Crescent Spring; fault; water conducted ancient riverway; audio frequency magnetotelluric method; resistivity

月牙泉位于甘肃省河西走廊西端的敦煌市, 为“敦煌八景”之一, 得名“月泉晓澈”。月牙泉东西长近 100 m, 南北宽约 25 m, 弯曲如新月, 因而得名, 有“沙漠第一泉”的美称。

月牙泉的起源有以下解释<sup>[1]</sup>: 1) 古河道残留湖。认为月牙泉是党河的一段古河道, 党河改道后, 大部分古河道被黄

沙淹没, 仅月牙泉地势较低, 地下水汇集成湖。湖水不断得到地下潜流的补给, 因而不会枯竭。2) 断层渗泉。认为月牙泉附近有一东西向的断层, 断层上盘抬高了地下含水层, 下盘降到附近潜水面时, 潜流涌出成泉。

20 世纪 70 年代中期, 敦煌当地垦荒造田, 过度的抽水灌溉

收稿日期: 2013-07-09; 修回日期: 2013-11-26

作者简介: 卢放, 工程师, 研究方向为水文地质、工程地质和环境工程地球物理勘探应用技术, 电子邮箱: lufang1977@126.com

引用格式: 卢放, 阎红霞, 武毅. 应用 AMT 确定月牙泉回灌治理中的导水构造[J]. 科技导报, 2014, 32(3): 67-70.

导致地下水位急剧下降,因此月牙泉也日渐干涸<sup>[2-4]</sup>。1985年月牙泉平均水深仅为0.7~0.8 m。水少导致月牙泉蜕变成两个小泉,不再形成月牙形。“月牙泉是否会消失”成为国人关注的焦点。

弄清月牙泉及其周边地区的水文地质条件,向月牙泉补充水源,对月牙泉进行人工回灌,是重振月牙泉美丽景色的重要途径之一<sup>[5]</sup>。在现有地质资料的基础上,利用音频大地电磁测深法(AMT)查明月牙泉的地层结构,以及断层、导水古河道的分布,为进一步治理月牙泉提供重要依据,具有显著的社会意义。

### 1 工作区地质特征

党河-鸣沙山地区,第四系分布广泛。全新统(Q<sub>4</sub>)风积砂主要分布在月牙泉及其以南,岩性以细砂为主,大部分为流动沙丘。党河附近全新统(Q<sub>4</sub>)主要是淤泥质粉砂及亚砂土。更新统(Q<sub>1</sub>-Q<sub>3</sub>)主要为砂及亚黏土,上段颗粒较粗。

月牙泉区域自上而下分别为:1)全新统(Q<sub>4</sub>)为淤泥质粉砂。2)上、中更新统(Q<sub>3</sub>-Q<sub>2</sub>)上段以中粗砂为主,且含钙质胶结层;下段以粉细砂为主。3)下更新统(Q<sub>1</sub>)为粉砂岩、黏土互层。

### 2 工作区地球物理前提

全新统(Q<sub>4</sub>)风积细砂、淤泥质粉砂,电阻率表现为低值。上更新统、中更新统(Q<sub>3</sub>-Q<sub>2</sub>)含砾粗中砂和钙质胶结层颗粒大、孔隙度大,电阻率为高值。下更新统(Q<sub>1</sub>)粉细砂、黏土互层颗粒小、孔隙度小,电阻率为低值。

工作区全新统、上更新统、中更新统以及下更新统在电性上存在着不同程度的差异,具备了开展音频大地电磁测深法的地球物理前提。

### 3 AMT(音频大地电磁测深法)

#### 3.1 基本原理

地球物理勘探的物性参数和对应的分支方法很多。根据不同的地质条件,可以选择不同的方法来解决地层结构、断层、古河道、采空区和岩溶塌陷等各类地质问题<sup>[6-8]</sup>。

本次AMT勘查工作采用EH4型StrataGem电磁系统。与传统一维垂向电测深相比<sup>[9]</sup>,StrataGem是一种用于电阻率测量的MT(大地电磁测深法)设备,测深范围从几米至两千米左右。该设备使用天然源或人工源信号进行连续的地电测深<sup>[10]</sup>。在地表测点处同时观测电场和磁场的波动变化,可以获得测点下地层的电阻抗信息。场的测量将持续几分钟时间,经过傅立叶变换后,得到功率谱。使用这些功率谱来计算阻抗,是一个复杂的、和频率有关的过程。高频数据反映浅部的信息,而低频数据反映深部的信息。AMT测深方法能够给出接收机所处测点下部垂向视电阻率值,以及该测点处的地电曲线。其方法原理与传统的MT法一样,利用天然电

磁场信号作为一次场,该一次场是平面电磁波,垂直入射到大地介质中。由电磁场理论可知,大地介质中将会产生感应电磁场,感应电磁场与一次场是同频率的。在均匀大地和水平层状大地情况下,波阻抗 $Z$ 是电场 $E$ 和磁场 $H$ 的水平分量的比值。

$$Z = \left| \frac{E}{H} \right| e^{i(\varphi_E - \varphi_H)} \quad (1)$$

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

$$\rho_{yx} = \frac{1}{5f} |Z_{yx}|^2 = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (3)$$

式中, $Z$ 为波阻抗, $\Omega$ ;  $E$ 为电场强度,mV/km;  $H$ 为磁场强度,nT;  $\varphi_E$ 为电场相位,  $\varphi_H$ 为磁场相位,mrad;  $\rho_{xy}$ 为以 $E_x$ 和 $H_y$ 的比值来表示的电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $f$ 为频率,Hz;  $Z_{xy}$ 为以 $E_x$ 和 $H_y$ 的比值来表示的波阻抗, $\Omega$ ;  $E_x$ 为电场强度 $E$ 在 $x$ 方向的分量,mV/km;  $H_y$ 为磁场强度 $H$ 在 $y$ 方向上的分量,nT;  $\rho_{yx}$ 为以 $E_y$ 和 $H_x$ 的比值来表示的电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $Z_{yx}$ 为以 $E_y$ 和 $H_x$ 的比值来表示的波阻抗, $\Omega$ ;  $E_y$ 为电场强度 $E$ 在 $y$ 方向的分量,mV/km;  $H_x$ 为磁场强度 $H$ 在 $x$ 方向上的分量,nT。必须注意的是,此时的 $E$ 与 $H$ ,应理解为一次场和感应场的空间张量叠加后的综合场,简称总场。在电磁理论中,把电磁场( $E$ 与 $H$ )在大地中传播时,其振幅衰减到初始值 $1/e$ 时的深度,定义为穿透深度或趋肤深度( $\delta$ ):

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (4)$$

由(4)式可知,趋肤深度( $\delta$ )将随电阻率( $\rho$ )和频率( $f$ )的变化而变化。因此,在一个宽频带上观测电场和磁场信息,由此计算出视电阻率和相位,可确定出大地的地电特征和地下构造,这就是EH4观测系统的原理。

#### 3.2 野外工作方法

本次勘查工作使用的频率为10~100 kHz,采用标量观测方式。由东向西,布置了月牙泉(I线)、合水四队(II线)和黑山咀子(III线)3条测线,均为近南北向。月牙泉(I线)测点距为25 m,电偶极矩为25 m。合水四队(II线)测点距为50 m,电偶极矩为50 m。黑山咀子(III线)测点距为25 m,电偶极矩为25 m。

在野外工作中,开工前后均进行平行试验。在数据采集时,尽量选择好的工作时段,增加叠加次数,采集过程中对时序文件进行实时监测,以此来确保数据采集的质量。在原始资料预处理阶段,首先对照野外原始记录,检查各个测点的坐标及电偶极距的正确性。其次,回放每个测点的原始时序文件,逐点、逐屏对时序进行挑选,剔除存在明显干扰的时序信号,减少随机干扰对数据质量的影响。

#### 3.3 异常处理和解释

对野外采集的时间序列数据进行预处理后,在现场进行FFT变换,获得电场和磁场虚实分量和相位数据,对每一个测点进行编辑,舍掉畸变的频点,保留高质量的频点数据。然后进行地形校正和一维Bostick反演,最后成图。

AMT以地下介质的电磁性差异为基础。由于地下岩石成因不同,受构造运动的影响,在纵向和横向上会产生电阻率变

化。此外岩石的电阻率值还与地层结构、成分,岩石颗粒的大小、密度以及地下水含量等因素有关,因此可根据反演断面图电阻率特征的分布情况,推断解释地下目标体的埋深、形态及分布规律。

#### 4 应用实例

图1、图2和图3分别为由东向西依次布置的月牙泉(I线)、合水四队(II线)和黑山咀子(III线)勘查成果图,图中等值线为电阻率,单位是 $\Omega \cdot m$ 。

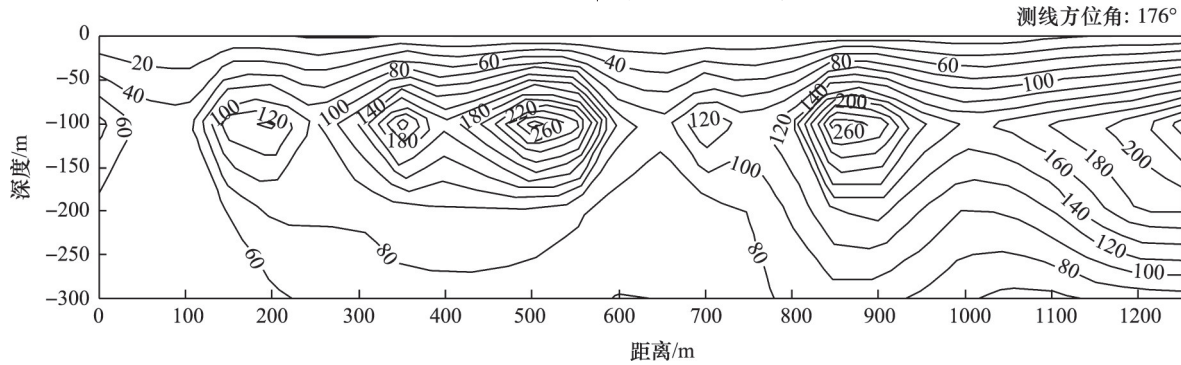


图1 月牙泉(I线)勘查成果

Fig. 1 Survey results of crescent spring (line I)

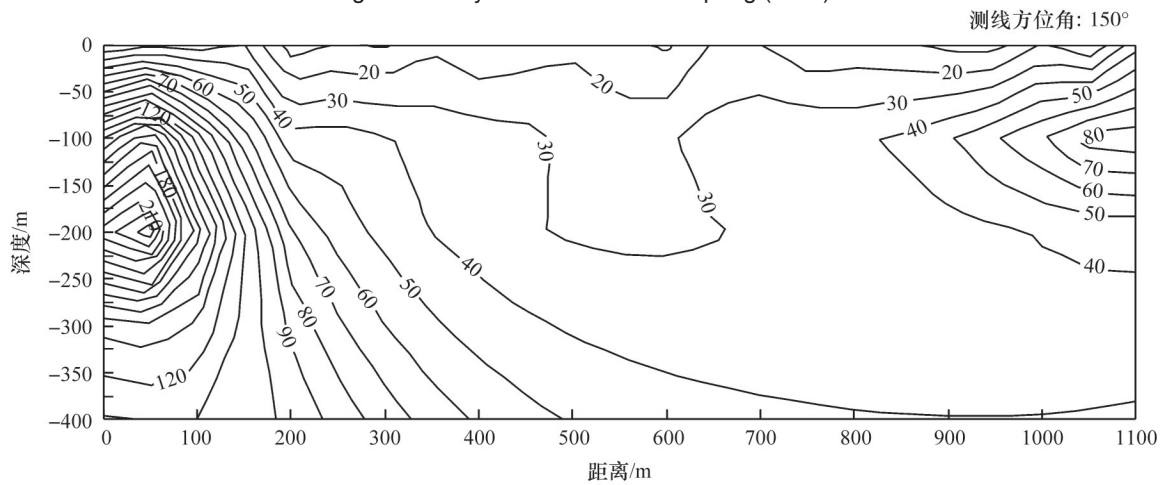


图2 合水四队II线勘查成果

Fig. 2 Survey results of the fourth team of Heshui (line II)

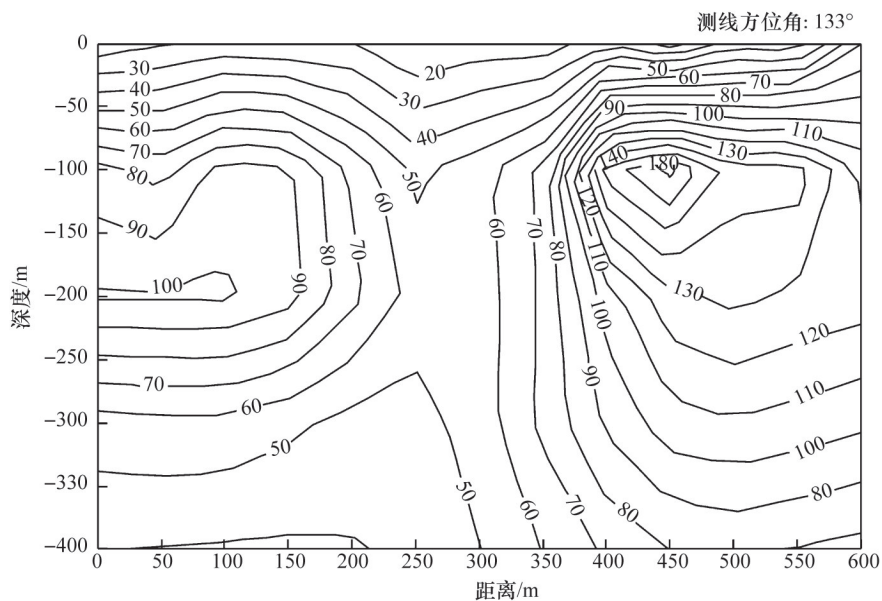


图3 黑山咀子III线勘查成果

Fig. 3 Survey results of Heishan Zuizi (line III)

东侧月牙泉I线(图1),埋深约0~25 m,地层整体呈低阻反映,推测为全新统(Q<sub>4</sub>)风积细砂、淤泥质粉砂。埋深25~175 m,地层整体呈高阻反映,推测为上更新统、中更新统(Q<sub>3</sub>-Q<sub>2</sub>)含砾粗中砂。需要注意的是,其中埋深100 m左右,电阻率值呈现水平带状高阻,为本测线电阻率最高值区域,推测为钙质胶结层。埋深175 m以下,电阻率剧烈下降,呈现低阻趋势,推测为下更新统(Q<sub>1</sub>)粉细砂、黏土互层。

合水四队II线(图2),测线900~1100 m段,埋深100 m左右,电阻率值呈现水平带状高阻,推测为钙质胶结层。测线0~100 m段,埋深200 m左右,电阻率值呈现水平带状高阻,推测为钙质胶结层。测线100~300 m段,电阻率等值线出现急剧变化,呈现近陡立状,推测为断层的反映。断层向东南方向倾斜(合水四队II线方位角为150°),并且使两侧钙质胶结层产生近100 m的断距。测线450~650 m段,埋深100~200 m,存在本测线电阻率最低值区域,根据地质资料,推测为导水古河道。

西侧黑山咀子III线(图3),测线400~600 m段,埋深100 m左右,电阻率值呈现水平带状高阻,推测为钙质胶结层。测线0~150 m段,埋深200 m左右,电阻率值呈现水平带状高阻,推测为钙质胶结层。测线200~350 m段,电阻率等值线呈现近陡立状,推测为断层的反映,断层南东方向倾斜,并且使两侧钙质胶结层产生近100 m的断距。

由于合水四队II线和黑山咀子III线之间的测线距较大,合水四队II线中的导水古河道未能在黑山咀子III线上出现。

## 5 结论

1) 月牙泉地区全新统、上更新统、中更新统和下更新统出现电阻率异常高值或电阻率异常低值,是本工作区开展AMT工作的地球物理前提。

2) 在满足地球物理前提的条件下,采用AMT确定工作区全新统、上更新统、中更新统和下更新统的地层结构、断层以及导水古河道的分布,其结论是基本可靠的。

3) AMT数据采集速度快、成本低、数据量大、分辨率高,有效克服了传统一维垂向电测深的缺点。

4) 应尽可能地收集工作区地质资料,建议在AMT的基础上,引入其他物性参数,开展多种综合物探工作,相互验证,克服多解性以取得更符合实际的地质效果。

5) 由于本次工作为普查性质,测线距偏大,推断结果难免有所误差。建议开展进一步的详查工作,详细追索古河道、断层在空间上的分布特征,确定地层结构和导水构造,为下一步月牙泉地质环境治理工作提供更为可靠的科学依据。

## 参考文献(References)

[1] 邓永光, 杨俊仓. 敦煌盆地环境地质变化趋势及治理对策探讨[J]. 绿色科技, 2012(4): 227-230.  
Deng Yongguang, Yang Juncang. Environmental geology variation

trend of Dunhuang Basin and its countermeasures[J]. Journal of Green Science and Technology, 2012(4): 227-230.

[2] 宁立波, 张阳, 杨俊仓, 等. 敦煌盆地重点区土地荒漠化变化特征及原因分析[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(6): 65-68.  
Ning Libo, Zhang Yang, Yang Juncang, et al. Analysis of land desertification variation characteristics and its reasons in the key areas of Dunhuang Basin[J]. Geography and Geo-Information Science, 2011, 27(6): 65-68.

[3] 陈明霞. 敦煌湿地生态环境现状与保护恢复对策[J]. 湿地科学与管理, 2007, 3(3): 38-41.  
Chen Mingxia. Current status of wetland environment in Dunhuang and countermeasures for protection and restoration[J]. Wetland Science & Management, 2007, 3(3): 38-41.

[4] 周长进, 董锁成, 李岱, 等. 敦煌市水资源的可持续利用及调控对策[J]. 自然资源学报, 2007, 22(4): 516-523.  
Zhou Changjin, Dong Suocheng, Li Dai, et al. The Characteristics and the sustainable utilization of water resources in Dunhuang city of Gansu province, China[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(4): 516-523.

[5] 贾贵义, 程旭学. 浅议敦煌市环境地质及月牙泉治理[J]. 甘肃科技, 2006, 22(8): 22-25.  
Jia Guiyi, Cheng Xuxue. Environmental geology in dunhuang and environmental governance of Crescent Spring[J]. Gansu Science and Technology, 2006, 22(8): 22-25.

[6] 许福美, 雷芳芳, 吴志杰, 等. 顶峰山矿区水文地质特征与防治水措施[J]. 科技导报, 2011, 29(15): 66-69.  
Xu Fumei, Lei Fangfang, Wu Zhijie, et al. Hydrogeological features and measures for water control in Dingfengshan mine[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(15): 66-69.

[7] 郑瑞宏. 多种方法对导水断层的探测和分析[J]. 科技导报, 2008, 26(22): 44-46.  
Zheng Ruihong. Various method of exploration and analysis on fault that may transmit water[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(22): 44-46.

[8] 刘树才, 刘鑫明. 采动影响下导水构造电性变化的视电阻率特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 316-321.  
Liu Shucai, Liu Xinming. Characteristics of apparent resistivity with the electrical changing of water conducted structures under the mining-induced effect[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(3): 316-321.

[9] 韩德品, 李丹, 程久龙, 等. 超前探测灾害性含导水地质构造的直流电法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 635-639.  
Han Deping, Li Dan, Cheng Jiulong, et al. DC method of advanced detecting disastrous water-conducting or water-bearing geological structures along same layer[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 635-639.

[10] 邓明, 刘方兰, 张启升, 等. 海陆联合大跨度多点位海底大地电磁同步数据采集[J]. 科技导报, 2006, 24(10): 28-32.  
Deng Ming, Liu Fanglan, Zhang Qisheng, et al. Long-span and multi-point synchronizing data acquisition for seafloor magnetotelluric based on union of marine and land[J]. Science & Technology Review, 2006, 24(10): 28-32.

(责任编辑 侯澄芝)