

doi: 10.11720/wtyht.2015.5.05

刘祜, 魏文博, 程纪星, 等. 音频大地电磁测深在江西修武盆地页岩气目标层研究中的应用[J]. 物探与化探, 2015, 39(5): 904-908. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.5.05>

Liu H, Wei W B, Cheng J X, et al. The application of AMT to the target layer study of shale gas in Xiuwu basin, Jiangxi Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(5): 904-908. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.5.05>

# 音频大地电磁测深在江西修武盆地页岩气目标层研究中的应用

刘祜<sup>1,2</sup>, 魏文博<sup>1</sup>, 程纪星<sup>2</sup>, 漆富成<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 核工业北京地质研究院中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029)

**摘要:** 介绍了音频大地电磁测深法在探测修武盆地页岩气目标层黑色泥页岩中的应用效果, 利用 AMT 探测得到的电阻率断面, 从深至浅划分了 5 个电性层, 查清了罗洞向斜地层结构和断裂构造的发育特征; 根据黑色泥页岩相对围岩的低阻特征, 查清了黑色泥页岩目标层的埋深、厚度及展布特征, 在罗洞向斜核部, 页岩气目标层埋深大约 1 000 m, 目标层厚 160~200 m。AMT 探测结果为修武盆地页岩气远景预测及评价、页岩气探井的部署提供了重要依据。

**关键词:** 音频大地电磁; 页岩气; 黑色泥页岩; 地层结构

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2015)05-0904-05

页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中, 以吸附或游离状态为主要存在形式的天然气, 页岩气藏中的天然气不仅包括了存在于裂缝中的游离相天然气, 也包括存在于岩石颗粒表面上的吸附气<sup>[1-2]</sup>。目前世界上掀起了页岩气勘探开发的热潮, 我国存在发育页岩气的地质背景和条件, 随着我国经济发展对油气资源需求的不断增加, 页岩气资源的勘探已经得到了决策部门以及油气公司的高度重视。目前页岩气勘探的方法与传统油气资源勘探类似, 主要依靠地震勘探方法<sup>[3-9]</sup>, 由于泥页岩地层与上下围岩的地震传播速度不同, 在泥页岩的顶底界面会产生较强的波阻抗界面, 结合录井、测井等资料识别可以用来查明页岩气地层特征、构造特征、沉积特征, 以及页岩气储层特征等。我国还处于页岩气勘探起步阶段, 目前大部分工作集中在资源调查评价和有利区优选, 然而地震勘探投入巨大, 因此开展一些成本较低的非地震物探方法大致查明页岩气层深度、厚度等关键地质要素是非常必要的。一些研究人员探讨非地震勘探技术, 如康新功<sup>[10]</sup>、刘海良<sup>[11]</sup>等人对在我国开展页岩气勘探的电法进行了

适用性的讨论, 张春贺<sup>[12]</sup>等人开展了时频电磁法圈定富含有机质页岩层的研究。

此次依托中国地质调查局全国页岩气资源调查评价与勘查示范试点课题, 研究利用音频大地电磁测量方法(AMT)来查明页岩气目标层深度、厚度特征, 以及构造发育特征等, 通过在赣北修水—武宁盆地罗洞向斜的应用试验表明, 由于泥页岩层相对围岩为低阻, 利用 AMT 方法可有效圈定泥页岩层展布、深度、厚度变化等特征。由于 AMT 方法轻便、高效、经济, 在页岩气勘探的前期, 利用 AMT 方法探测页岩气目标层可降低页岩气勘探风险, 增加决策依据。

## 1 研究区地质特征

研究区位于江西北部修水县至武宁县内的修水—武宁盆地。大地构造处于扬子准地台东南缘江南台隆北缘及其与下扬子台褶带南缘的过渡部位, 该区经历了地槽、准地台—地台及大陆边缘活动等三个大的构造演化阶段, 加里东期以上升为主, 伴随有褶皱作用, 燕山期表现为强烈的断裂作用, 喜山期

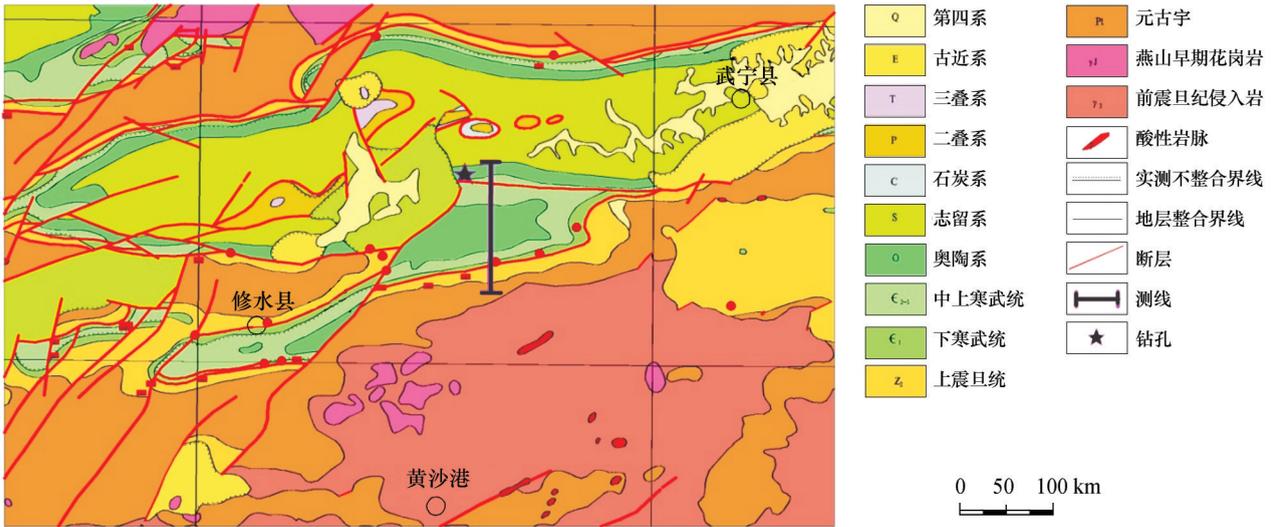


图 1 研究区地质构造简图

为平缓的拗褶作用。

区内地层发育较全,自中元古界双桥山群至三叠系及古近系和第四系均有不同程度的分布,但以中元古界和新元古界震旦系至下古生界志留系为主。双桥山群是区内出露最老的地层,它构成本区的基底构造层,其岩性主要为泥砂质板岩、凝灰质板岩。

寒武—志留系盖层根据沉积相、建造组合特征可划分为三部:最下部为洞门组( $Z_1d$ ),由陆缘—滨岸相碎屑岩组成;中部为南沱组( $Z_1n$ )冰碛岩和上震旦统陡山沱组( $Z_2d$ )、皮园村组( $Z_2p$ )以及下寒武统王铺组( $\epsilon_{1w}$ )、观音堂组( $\epsilon_{1g}$ )组成的碳硅泥页岩系(其自下而上为含铁锰质碳酸盐岩→碳酸盐岩夹硅质岩→硅质岩夹碳酸盐岩和炭质泥岩→炭质泥岩的变化系列);上部由中、上寒武统,奥陶系及志留系构成。寒武系杨柳岗组( $\epsilon_{2y}$ )、华严寺

组( $\epsilon_{3h}$ )和西阳山组( $\epsilon_{3x}$ )的岩性主要为灰黑色灰岩,奥陶系以硅质泥页岩为主。志留系梨树窝组( $S_1l$ )以页岩为主,夹砂岩、粉砂岩,坟头组( $S_2f$ )主要为粉砂岩、粉砂质页岩。

修武盆地为一复式向斜结构,南部为罗洞次向斜,北部修武盆地主向斜。页岩气主要目的层为震旦系皮园村组( $Z_2p$ )、下寒武统王铺组( $\epsilon_{1w}$ )、观音堂组( $\epsilon_{1g}$ )的灰黑色含碳页岩和碳质页岩。修武盆地黑色页岩发育<sup>[13-14]</sup>,根据秦伟颖<sup>[15]</sup>等人的研究,修武盆地具有较好的页岩气成藏条件。本次物探勘查的目的是基本查清罗洞向斜的地层结构、断裂构造产状、黑色页岩的分布等,为本区页岩气评价及页岩气探井的布设提供依据。

## 2 研究区岩石电性特征

根据前人对本区岩石物性的统计(表 1),前震

表 1 研究区不同时代岩石电阻率统计

| 地层时代             |                      | 岩性                     | 一般值            | 常见值           |              |
|------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|--------------|
| 古近系              | E                    | 红层堆积砂砾岩                | 329~4 000      |               |              |
| 中寒武统             | 杨柳岗组 $\epsilon_{2y}$ | 泥质灰岩                   | 184~1 400      | 50~250        |              |
|                  |                      | 条带状灰岩、瘤状灰岩             | 1 067~48 480   | 2 600~4 500   |              |
| 下寒武统             | 观音堂组 $\epsilon_{1g}$ | 炭质页岩、炭质泥岩、含炭泥岩         | 6~34           | 20            |              |
|                  | 王音铺组 $\epsilon_{1w}$ | 高炭泥质岩,炭质泥岩、磷结核炭质页岩     | 5~3 000        | 5~20          |              |
| 上震旦统             | 灯影组 $Z_2dn$          | 含炭硅质岩                  | 800~40 000     | 1 800~4 000   |              |
|                  |                      | 硅质泥岩、硅质岩               | 13 250~342 222 | 5 300~5 800   |              |
|                  |                      | 压碎白云岩、硅质白云岩            | 232~11 000     | 1 300~3 500   |              |
| 下震旦统             | 陡山沱组 $Z_2d$          | 泥质白云岩                  | 278~66 600     | 1 400~3 000   |              |
|                  |                      | 南沱组 $Z_1n$             | 含砾冰碛泥岩、冰碛砂岩    | 582~689 524   | 5 000~20 000 |
|                  |                      | 洞门组 $Z_1d$             | 长石英砂岩          | 1 278~216 600 | 1 278~20 000 |
| 青灰色条带状硅质岩、粉砂质细砂岩 | 1 170~93 600         |                        | 10 000~20 000  |               |              |
| 中元古界             | 双桥山群 $Pt_2$          | 泥质板岩、千枚状泥质板岩           | 152~96 000     | 800~6 000     |              |
|                  |                      | 泥岩、砂岩、千枚岩、千枚状板岩、凝灰质粉砂岩 | 340~8 889      | 3 500~6 000   |              |

注:引自核工业北京地质研究院(张待时等,1993)

且系的泥岩、砂岩、千枚岩、千枚状板岩等岩石电阻率通常都大于  $1\ 000\ \Omega \cdot m$ , 表现为中高阻。震旦系桐门组、南沱组、陡山沱组、灯影组的各类岩石电阻率常见值在  $1\ 000 \sim 20\ 000\ \Omega \cdot m$ , 总体表现为高阻特征。寒武系王音铺组和观音堂组的碳质页岩、含碳泥岩电阻率常见值在  $5 \sim 20\ \Omega \cdot m$ , 表现为低电阻率特征。但寒武系杨柳岗组的条带状灰岩、瘤状灰岩电阻率常见值在  $2\ 000 \sim 4\ 600\ \Omega \cdot m$ , 为高阻, 泥质灰岩电阻率为低电阻率特征; 古近系红层砂砾岩电阻率一般在  $329 \sim 4\ 000\ \Omega \cdot m$  为相对高阻。另外表中没有的志留系岩层主要由砂岩、砂质页岩组成, 电阻率应该也表现为低阻。

从以上分析可知, 泥岩、页岩的电阻率很低, 砂岩、粉砂岩电阻率处于中等, 而灰岩电阻率最高。过渡性岩石电阻率取决于其矿物含量及结构。可以看出, 由于页岩气目标层低阻特征明显, 为 AMT 方法的开展提供了很好的物性基础。

### 3 工作方法

音频大地电磁测量 (AMT) 方法利用的场源为太阳风和雷电产生的天然电磁场, 通过测量不同频率的电磁场, 就可以探测不同深度地下地质体电阻率的分布特征, 解决具有电阻率差异的各种地质问题。AMT 探测的频率范围为  $1 \sim 10^4\ Hz$ , 其解决地质问题的深度通常在  $2\ km$  以内。

本次 AMT 测量采用加拿大凤凰公司的 V8 多

功能电磁采集系统, 采用 EMAP 方式进行张量数据采集。野外数据采集时 3 台 V8 仪器同时进行测量, 中间一台 V8 主机测量相互正交的磁场  $H_x$ 、 $H_y$  和电场  $E_x$ 、 $E_y$  共 4 道数据, 两边布置 2 台采集站, 仅测量电场  $E_x$ 、 $E_y$  2 道数据, 测量间距为  $50\ m$ , 电极距  $50\ m$ , 从而减少静态效应的影响, 提高最终资料的纵横向分辨率。AMT 野外采集时间为  $30 \sim 60\ min$ , 以保证 AMT 能采集到最低  $5\ Hz$  的天然场信息, 并且保证信号的信噪比较高, 从而探测  $1\ 000\ m$  深度范围内的地质目标。

数据处理时, 首先人工分析时间序列数据, 剔除两端干扰大的数据, 再对数据进行 ROBUST 处理, 以压制干扰, 提高数据信噪比, 得到张量阻抗。再采用正则化二维反演方法对测线数据进行反演处理, 得到电阻率断面图。

### 4 AMT 探测成果

从 AMT 反演后得到的电阻率断面 (图 2) 可看出, 整个电阻率剖面由南向北表现了向斜特征, 在  $2\ km$  后, 电阻率表现为连续的层状分布, 表明了修武盆地罗洞向斜地层较稳定, 变化平缓。电阻率从下往上总体可分为 5 层。

第一层为灰黑色高阻, 整体表现为电阻率大于  $1\ 000\ \Omega \cdot m$ , 分布于剖面  $2\ km$  以南, 主要对应的地层为  $Pt_2$  (双桥山群) 和  $Z_1n$  (南沱组) 的长石石英砂岩和冰碛砾岩, 此地层为老地层, 受上覆地层压力影

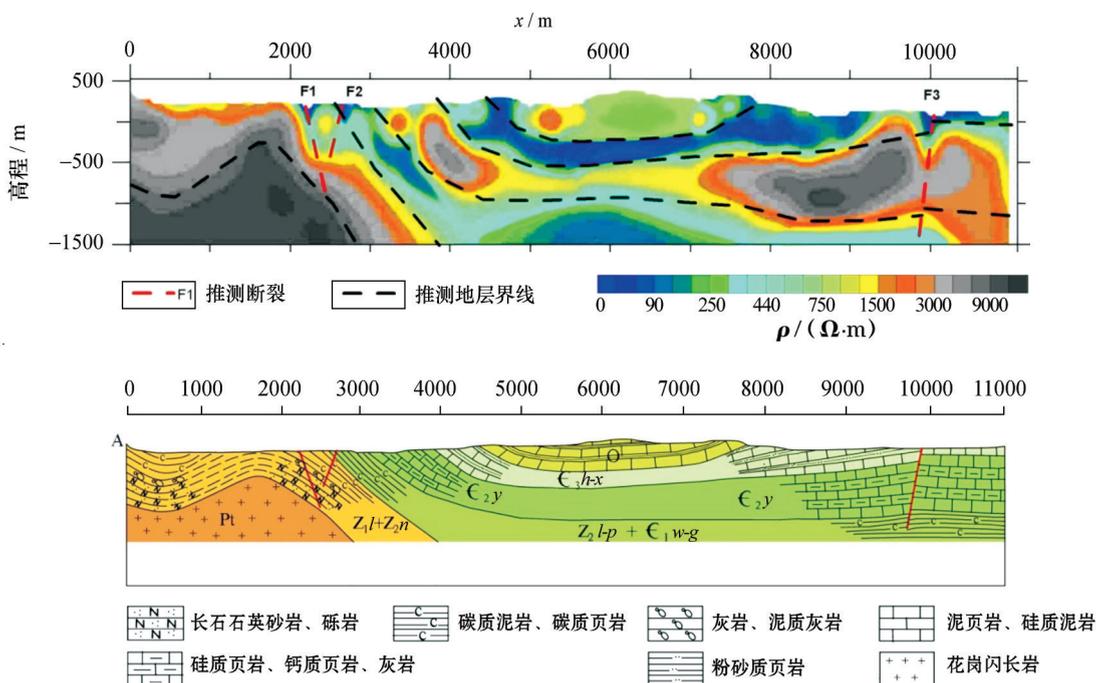


图 2 修武盆地 AMT 电阻率反演及推断解释成果

响,岩石结构致密,其电阻率特性表现为高阻,深部存在的大于  $10^4 \Omega \cdot m$  的高阻体可能为侵入上涌的花岗岩;由于受构造挤压作用,此地层层状特征不明显,但高电阻率的性质反映了岩性的特征。

第二层为有南向北缓慢倾斜的低阻层,该低阻层总体是连续的,电阻率小于  $500 \Omega \cdot m$ ;在剖面 4.5~7.5 km 处有一向上拱起的低阻发育,表明该地区深部曾发生过构造运动,形成了褶皱;该低阻层应该对应蓝田组、皮园村组、王音铺组和观音堂组的泥质页岩夹硅质页岩、碳质页岩夹硅质页岩、碳质页岩、碳硅质页岩,这些岩石总体都表现为低阻特征,当硅质含量高时,电阻率会升高些,使得电阻率达到  $300 \sim 500 \Omega \cdot m$ ,其他地段主要为黑色页岩,电阻率小于  $300 \Omega \cdot m$ 。

表 2 电性层与地层及岩性对应关系

| 电性层特征                         | 地层                             | 岩性            |
|-------------------------------|--------------------------------|---------------|
| 高阻 ( $>1000 \Omega \cdot m$ ) | Pt <sub>2</sub> (双桥山群)         | 长石石英砂岩为主      |
|                               | Z <sub>1n</sub> (南沱组)          | 冰碛砾岩          |
| 低阻 ( $<500 \Omega \cdot m$ )  | Z <sub>1l</sub> (蓝田组)          | 泥质页岩夹硅质页岩     |
|                               | Z <sub>2p</sub> (皮园村组)         | 碳质页岩夹硅质页岩     |
|                               | $\in_1w$ (王音铺组)                | 碳质页岩          |
|                               | $\in_1g$ (观音堂组)                | 碳硅质页岩         |
| 高阻 ( $>1000 \Omega \cdot m$ ) | $\in_2y$ (杨柳岗组)                | 灰岩、条带状灰岩夹泥质灰岩 |
| 低阻 ( $<500 \Omega \cdot m$ )  | $\in_3h-x$ (华严寺组和西阳山组并层)       | 泥质灰岩夹页岩       |
| 高阻夹低阻                         | O <sub>1y-n</sub> (印渚埠组和宁国组并层) | 页岩夹灰岩         |

另外,根据电阻率的横向变化特征,推测了 3 条断裂构造。在剖面 2 km 附近发育的向下延伸的舌状低阻为一条控盆断裂 F1, F1 断裂控制了罗洞向斜的产状特征,在剖面 2.6 km 处存在的小舌状低阻应该也为一条断裂(F2)的反映,推测为 F1 断裂的次级断裂。在剖面 10 km 附近存在的向下发育的低阻为 F3 断裂的反映,此断裂为罗洞次斜在北部西边一条已知逆断层在东部的延伸,倾向南,证实了前人推测此处存在的一条逆断层的存在。

从反演后的电阻率剖面看,目的层观音堂组和王音铺组的黑色页岩表现为低阻,特征明显,连续性较好,在罗洞向斜中心其埋深接近 1 km,黑色页岩厚度较大,大于 300 m。

中国地质调查局油气中心和江西省页岩气调查研究院根据本次音频大地电磁探测成果,结合地质调查及其他资料,在罗洞向斜北部大田村附近部署了一口页岩气预探井赣页 1 井(见图 1),位于罗洞向斜的北部边缘,赣页 1 井离物探剖面垂向距离 2.5 km。钻孔结果表明,页岩气目标层(皮园村组、王音铺组、观音堂组)黑色页岩埋深为 668 m,厚度 200 m。地表地质调查表明,皮园村组一般厚 200 m,

第三层为高阻层,电阻率整体大于  $1000 \Omega \cdot m$ ,主要为杨柳岗组的灰岩、条带状灰岩以及泥质灰岩,其中两端的高阻为灰岩和条带状灰岩,电阻率为大于  $3000 \Omega \cdot m$ ,中部 5~7 km 处的低阻反映的是泥质灰岩,电阻率在  $1000 \sim 3000 \Omega \cdot m$ ,此特征表明该地层在沉积时可能发生了相变。

第四层为低阻层,电阻率整体小于  $500 \Omega \cdot m$ ,应该对应华严寺组和西阳山组并层的泥质灰岩,该层连续性较好,低阻分布稳定,表明沉积过程稳定。

第五层表现为高阻夹低阻特征,表现了印渚埠组和宁国组并层的页岩夹灰岩性质,当页岩中夹灰岩少时表现为低阻,页岩中夹灰岩多时表现为高阻。电性层与地层及岩性对应关系见表 2。

最厚可达 406 m,与下伏地层之间普遍存在滑脱断层,因滑失而厚度减小为 39~197 m。王音铺组厚 59~143 m,观音堂组厚 92~274 m,因此罗洞向斜深部黑色页岩层厚在 100~600 m<sup>[15]</sup>。考虑到黑色泥页岩厚度的变化,以及物探剖面距钻孔的距离等,认为此次物探剖面推测的成果基本可靠。

## 5 结论

本次工作对利用音频大地电磁法来探测页岩气黑色页岩层进行了有益的试验,通过应用研究得到以下结论:

(1) 利用 AMT 探测成果,基本查清修武盆地罗洞向斜的结构,罗洞向斜在剖面上长约 8 km,为一宽缓向斜。

(2) 根据 AMT 探测结果,基本查清了地层结构。从深至浅,划分了 5 个电性层,有的电性层能直接对应地层,如第三层高阻电性层对应杨柳岗组,有的电性层是多个地层并层的反映,如第四层低阻层对应华严寺组和西阳山组并层。

(3) 得到了罗洞向斜中页岩气目标层特征。在罗洞向斜页岩气目标层位(Z<sub>2l</sub>/Z<sub>2p</sub>、 $\in_1w$ 、 $\in_1g$ )为

黑色页岩系组,显示为低电阻率特征,在向斜核部,埋深大约 1 000 m,目标层厚 160~200 m。

(4) 在南方海相沉积地区,由于页岩气黑色泥页岩目标层相对围岩表现为低阻,物性条件充分,音频大地电磁法效果较好。但由于南方海相沉积区一般都多期沉积,有多层泥页岩分布,使得整个地层的纵向电阻率较低,因此探测深度不大,其有效探测深度一般不超过 2 km。

(5) AMT 方法由于存在体积效应,其探测分辨率相对地震方法较低,但由于 AMT 方法设备轻便、勘探成本低,施工效率高,且探测低阻的黑色岩系灵敏,因此在页岩气勘探的前期,可利用 AMT 方法,充分发挥其优点,为页岩气勘探选区和评价提供了深部地质资料。

致谢:本项目得到了漆富成研究员、张宇龙高工的热情指导与帮助;在野外工作期间,得到江西省页岩气调查开发研究院刘建峰高工、曾里工程师的大力协助,在此一并表示衷心感谢!

#### 参考文献:

- [1] 左学敏,时保宏,赵靖舟,等.中国页岩气勘探研究现状[J].兰州大学学报,2010,46:73-75.
- [2] 潘仁芳,黄晓松.页岩气及国内勘探前景展望[J].中国石油勘探,2009(3):1-5.
- [3] 郑军卫,孙德强,李小燕,等.页岩气勘探开发技术进展[J].天

- 然气地球科学,2011,22(3):511-517.
- [4] 许洁,许明标.页岩气勘探开发技术研究[J].长江大学学报,2011,8(1):80-82.
- [5] 刘振武,撒利明,杨晓,等.页岩气勘探开发对地球物理技术的需求[J].石油地球物理勘探,2011,46(5):810-819.
- [6] 滕龙,徐振宇,黄正清,等.页岩气勘探中的地球物理方法综述及展望[J].资源调查与环境,2014,35(1):61-66.
- [7] 袁桂琴,孙跃,高卫东,等.页岩气地球物理勘探技术发展现状[J].地质与勘探,2013,49(5):945-950.
- [8] 李曙光,程冰洁,徐天吉.页岩气储集层的地球物理特征及识别方法[J].新疆石油地质,2011,32(4):351-352.
- [9] 郭东鑫,张跃磊,张彦起,等.渝黔湘秀山区块页岩气二维地震勘探研究[J].西安科技大学学报,2014,34(2):188-193.
- [10] 唐新功,胡文宝,苏朱刘,等.我国南方地区页岩气电勘探技术初探[J].长江大学学报,2011,8(11):33-34.
- [11] 刘海良,苏文利,罗振佳,等.页岩气、油页岩资源的电阻率法勘查[J].物探与化探,2012,36(3):503-506.
- [12] 张春贺,刘雪军,何兰芳,等.基于时频电磁法的富有机质页岩层系勘探研究[J].地球物理学报,2013,56(9):3173-3183.
- [13] 王运,胡宝群,高海东,等.修武盆地寒武统黑色岩系铀矿物赋存特征及富集机理[J].铀矿地质,2014,30(1):1-7.
- [14] 叶少贞,孔凡兵.修武地区黑色岩系型钒矿地质特征及成因浅析[J].资源环境与工程,2006,20(5):501-504.
- [15] 秦伟颖,韩秋,王金路.修武盆地页岩气成藏条件分析[J].能源研究与管理,2013,2013(3):46-49.
- [16] 陈乐寿,王光镔.大地电磁深法[M].北京:地质出版社,1990.
- [17] 汤井田,何继善.可控源音频大地电磁法及其应用[M].长沙:中南大学出版社,2005.

## The application of AMT to the target layer study of shale gas in Xiuwu basin, Jiangxi Province

LIU Hu<sup>1,2</sup>, WEI Wen-Bo<sup>1</sup>, CHENG Ji-Xing<sup>2</sup>, QI Fu-Cheng<sup>2</sup>

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. CNNC Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029)

**Abstract:** The application effects of AMT in the exploration of shale gas target layer in the black silk shale of Xiuwu basin are described in this paper. The resistivity section obtained by AMT was divided into 5 layers from the deep part to the shallow part, the AMT explored the development characteristics of the stratigraphic structure and faulted structure of the Luodong syncline. The AMT also explored the buried depth, thickness and distribution characteristics of the black silk shale targets on the basis of the low resistance of the black silk shale relative to surrounding rocks. The buried depth of shale gas targets in Luodong synclinal core is about 1 000 m, and the thickness of the target layer is 160~200 m. The exploration results by AMT provide an important basis for the prognosis and evaluation of shale gas and the well deployment for shale gas exploration in Xiuwu basin.

**Key words:** AMT; shale gas; black silk shale; stratigraphic structure

作者简介:刘祐(1976-),男,湖南常宁人,高级工程师,在读博士,现从事电磁勘探方法的研究及应用工作。E-mail:liuhu9818@163.com