

doi: 10.11720/wtyht.2020.0198

田红军,尹文斌,刘光迪,等.广域电磁法在低阻覆盖区的应用与评价——以河南中牟为例[J].物探与化探,2020,44(5):1025-1030.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0198>

Tian H J, Yin W B, Liu G D, et al. The application and evaluation of the wide field electromagnetic method in the low resistance coverage area: Exemplified by Zhongmu area of Henan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1025-1030. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0198>

# 广域电磁法在低阻覆盖区的应用与评价 ——以河南中牟为例

田红军<sup>1,2</sup>, 尹文斌<sup>1,2</sup>, 刘光迪<sup>1,2</sup>, 蒋永芳<sup>1,2</sup>, 游文兵<sup>1,2</sup>

(1. 湖南继善高科技有限公司, 湖南长沙 410208; 2. 湖南省深地资源电磁法勘探工程技术研究中心, 湖南长沙 410208)

**摘要:** 在分析和总结河南中牟含气页岩层电阻率等物理性征基础上, 将广域电磁法勘探技术用于南华盆地低阻覆盖区页岩气探测, 获得工作区地下 5 km 内地层电阻率分布规律和特征, 查明了工作区的构造展布, 同时揭示了以二叠系太原组、山西组以及上、下石盒子组为主要目的层的含气页岩发育特征。此次探测工作表明, 在低阻覆盖区广域电磁法是获取南华盆地深部含气页岩埋深和分布范围的有效探测手段, 可为后期有利区带评价、区块优选页岩气层提供地球物理参数。

**关键词:** 低阻覆盖区; 南华盆地; 广域电磁法; 含气页岩

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2020)05-1025-06

## 0 引言

我国页岩气地质储量非常丰富<sup>[1-3]</sup>, 开发页岩气对改善能源结构、实现绿色低碳发展将起到积极的推动作用。河南省地质勘查队伍近年来在中牟县发现了丰富的页岩气资源, 获得了稳定的页岩气气流, 技术可采储量达 127.5 亿 m<sup>3</sup>, “牟页 1 井”也是河南省首口页岩气井。近年来, 相关单位在中牟工作区块确定了 5 个有利工作区, 并在区块东南部发现厚度较大、含气量较好的地层<sup>[4-12]</sup>。工作区内开展地质工作较少, 仅开展了二维地震及少量参数孔施工, 孔深均不大于 3 000 m, 工作程度相对较低; 同时, 区内上部存在厚层低阻覆盖层, 常规的电磁勘探技术难以满足勘探要求。

为了深化对低阻覆盖区构造复杂区深部地质的认识, 同时探讨适合于低阻覆盖区电磁勘探方法, 在河南中牟工作区开展了广域电磁法勘探。通过深部页岩气勘探, 落实工作区断裂展布和构造单元划分,

为确定地层展布、深大断裂的分布、有利区带评价和区块优选提供技术支撑, 为后期深部勘探提供地球物理参数。

## 1 工作区地质地球物理特征

根据目前所掌握的地、物、科研等资料, 结合区域地质特征综合分析, 暂推定工作区内发育地层主要为奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系。其中, 二叠系由太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组、平顶山组及孙家沟组构成, 太原组、山西组、下石盒子组为页岩气主要目的层系。

由于中牟区块还没有开展相关电磁法勘探工作, 未获得相关的地表电性参数资料, 主要参考牟页 1 井的电测井资料(表 1): 第四系—馆陶组为低阻覆盖区, 平均电阻率 < 10 Ω·m, 厚度为 1 400 m 左右; 和尚沟组—平顶山组为中低阻, 平均电阻率约为 70 Ω·m, 厚度约 600 m; 平顶山组为中阻, 平均电阻

收稿日期: 2020-03-20; 修回日期: 2020-08-28

作者简介: 田红军(1988-), 男, 2015年毕业于中南大学, 主要研究方向为电磁法理论与数据处理。Email: 821327420@qq.com

表 1 牟 1 井电测井资料

Table 1 Stratigraphic table of the electrical characteristics of Mou 1 well

层号	顶深/m	底深/m	层厚/m	有效厚度/m	RLLD/(Ω·m)	RLLS/(Ω·m)	MFSL/(Ω·m)
第四系	0	197.8	197.8	197.8			
明化镇组	197.8	873	675.2	675.2			
馆陶组	873	1482.8	609.8	609.8	5.556	3.797	2.812
和尚沟组(刘家沟)	1482.8	1893.3	410.5	410.5	91.44	84.863	62.046
孙家沟组	1893.3	2071.1	177.8	177.8	52.055	49.394	34.502
平顶山组	2071.1	2174.1	103	103	214.114	202.666	50.647
上石盒子组	2174.1	2495.2	321.1	321.1	24.398	23.361	10.704
下石盒子组	2495.2	2798.4	303.2	303.2	17.75	16.74	8.407
山西组	2798.4	2889.8	91.4	91.4	49.443	45.289	21.062
太原组	2889.8	2971.8	82	82	646.303	301.79	21.097
本溪组	2971.8	2987.8	16	16	2381.969	2137.384	193.5
马家沟组	2987.8	3020.8	33	33	183.625	170.723	

率约为 200 Ω·m,厚度约 100 m;目的层上石盒子组、下石盒子组为低阻层,平均电阻率约为 20 Ω·m,厚度为 630 m 左右。目的层之下的山西组—马家沟组为电性层由中低阻向高阻过渡层,其中马家沟组地层可视为本次勘探的基底。总体而言,工作区地表 1 400 m 为厚层状的低阻覆盖区。

## 2 广域电磁法的有效性分析

本次野外采用广域电磁法的工作模式是测量电场水平分量  $E_x$  :

$$E_x = \frac{Idl}{2\pi\sigma r^3} [1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)], \quad (1)$$

根据式(1)定义广域意义上的视电阻率:

$$\rho_a = K_{E-E_x} \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I} \cdot \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)}, \quad (2)$$

$$K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot MN},$$

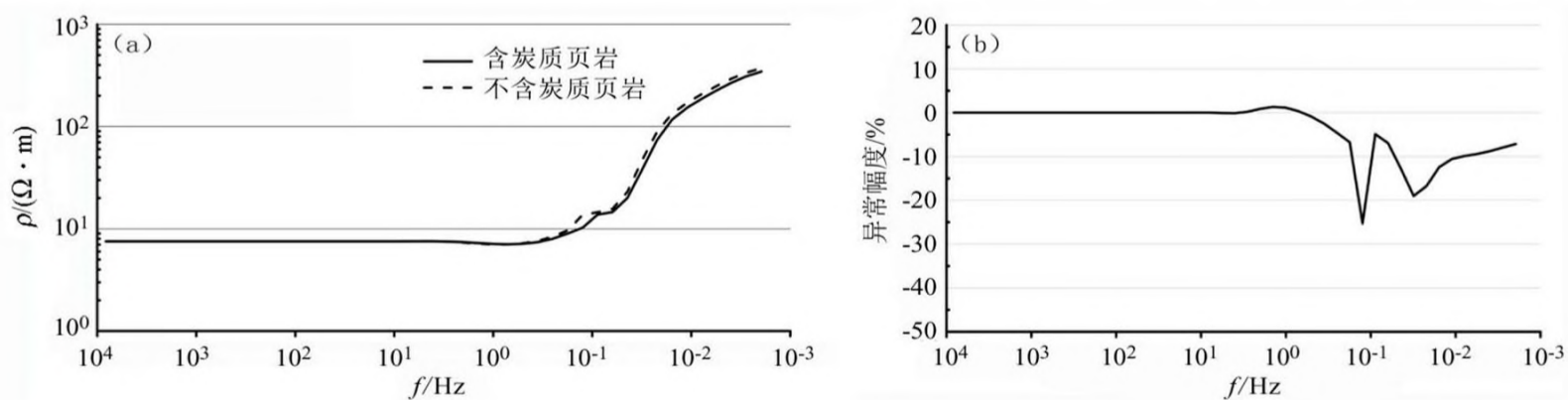
$$\Delta V_{MN} = E_x \cdot MN,$$

$$F_{E-E_x}(ikr) = 1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)。$$

式中: $E_x$  为  $x$  方向的电场水平分量; $\rho_a$  为广域视电阻率; $I$  为供电电流; $dL$  为供电点  $AB$  的直线长度; $\varphi$  为测点与供电点  $AB$  中点的连线的夹角; $r$  为测点到供电点  $AB$  中点的距离; $i$  为虚数单位; $k$  为波数。

根据牟页 1 井物性参数统计资料及其他地质资料,建立了工作区的地球—地质物理模型:第一层为第四系—新近系馆陶组,厚度为 1 400 m,电阻率为 5 Ω·m;第二层为三叠系和尚沟组—二叠系平顶山组,厚度为 600 m,电阻率为 70 Ω·m;第三层为二叠系以中粗粒长石石英砂岩为主的平顶山组,厚度为 100 m,电阻率为 200 Ω·m;第四层为本次勘探的目的层——以页岩为主的二叠系上石盒子组和下石盒子组,厚度为 630 m,电阻率为 20 Ω·m;第五层为山西组—马家沟组,电阻率为 1 000 Ω·m。

假设没有炭质页岩时电阻率为 20 Ω·m,收发距  $r=16$  km,频率范围为 8 192~0.001 17 Hz。由图 1 可见,由于炭质页岩表现为低电阻率特性,综合电阻率降低,因此进入过渡场的频率较低,如果二叠系上石盒子组和下石盒子组不含炭质页岩,电阻率与上覆地层一致,则地层的综合电阻率升高,导致进入过



a—视电阻率曲线对比;b—异常幅度百分比

a— comparison of apparent resistivity curves; b— percentage of exceptions

图 1 广域电磁法正演曲线及异常百分比曲线

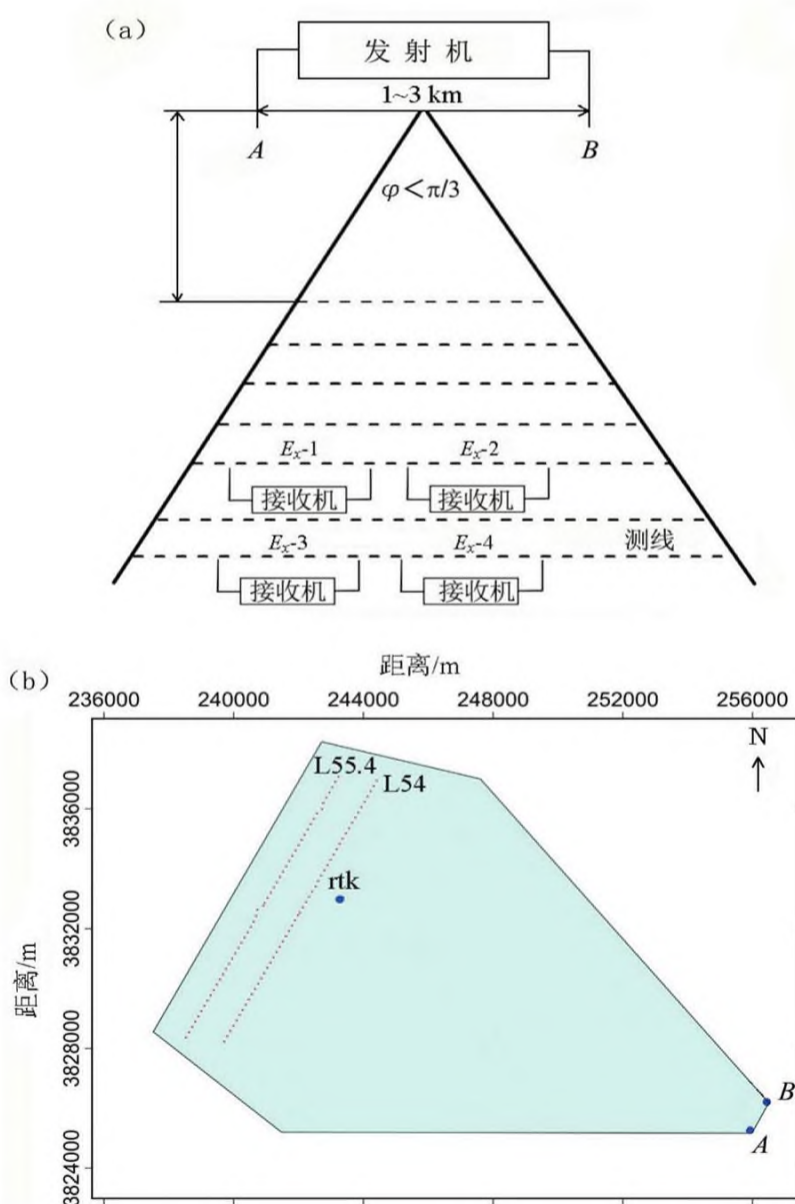
Fig.1 Forward curve and abnormal percentage curve of wide field electromagnetic method



渡场的频率较高。从图中看出,两支曲线在趋肤深度未达到目的层埋深时几乎无差异,达到趋肤深度频率以下后,两支曲线的差异明显,最大时异常可达 30%(图 1b),这说明应用广域电磁法获得的视电阻率曲线异常可以识别上石盒子组和下石盒子组是否含有碳质页岩。

### 3 工作部署

测线布置如图 2 所示,布置了 2 条平行测线 L54 和 L55.4,每条测线长 10 km,线距为 1 km,点距为 100 m,广域电磁法物理点共计 100 个。采用的测量频率为 0.011 7~8 192 Hz,适合探测从地表到地下 7 000 m 范围的目标体。发射电流为 146 A,发射电压为 950 V,收发距离分别为 17 km(L54 线)和 18 km(L55.4 线)。



a—广域电磁法野外施工示意;b—测线部署  
a—field construction schematic diagram of wide-area  
electromagnetic method; b—line deployment chart

图 2 广域电磁法测线施工布设示意

Fig.2 Layout of widefield electromagnetic survey line

### 4 资料处理与解释

资料处理采用自主研发的“重磁电三维反演成像解释一体化系统”GME\_3DI(V6.01)中的广域电磁法带源数据处理模块。本次反演主要以二维连续介质反演成果为主,资料处理以该区的电性资料为基础,结合区域地质信息和地层岩性资料,建立测区的地电模型。首先对所采集的广域电磁法实测数据进行预处理,进行一维连续介质反演成像;然后以一维反演成像的结果为基础,再进行二维连续介质反演成像;最后基于二维反演成果,进行地层划分和成果推断解释。图 3、图 4 分别为 2 条测线的广域电磁法二维反演电阻率断面和地质推断解释结果。

整体上,广域电磁法反演成像揭示了 3 套低阻层、3 套中阻层和 1 套高阻层共计 7 套近似水平分布的电性层。其中,L54 线随着反演深度加深,电性层呈缓倾斜状变化,低阻层电阻率变化范围在 3~9  $\Omega \cdot m$ ,中阻层电阻率变化范围 10~100  $\Omega \cdot m$ ,高阻层电阻率 >100  $\Omega \cdot m$ 。拟地震图揭示了本区地层界面近似水平,构造单一,L54 线大号点向低频倾斜。

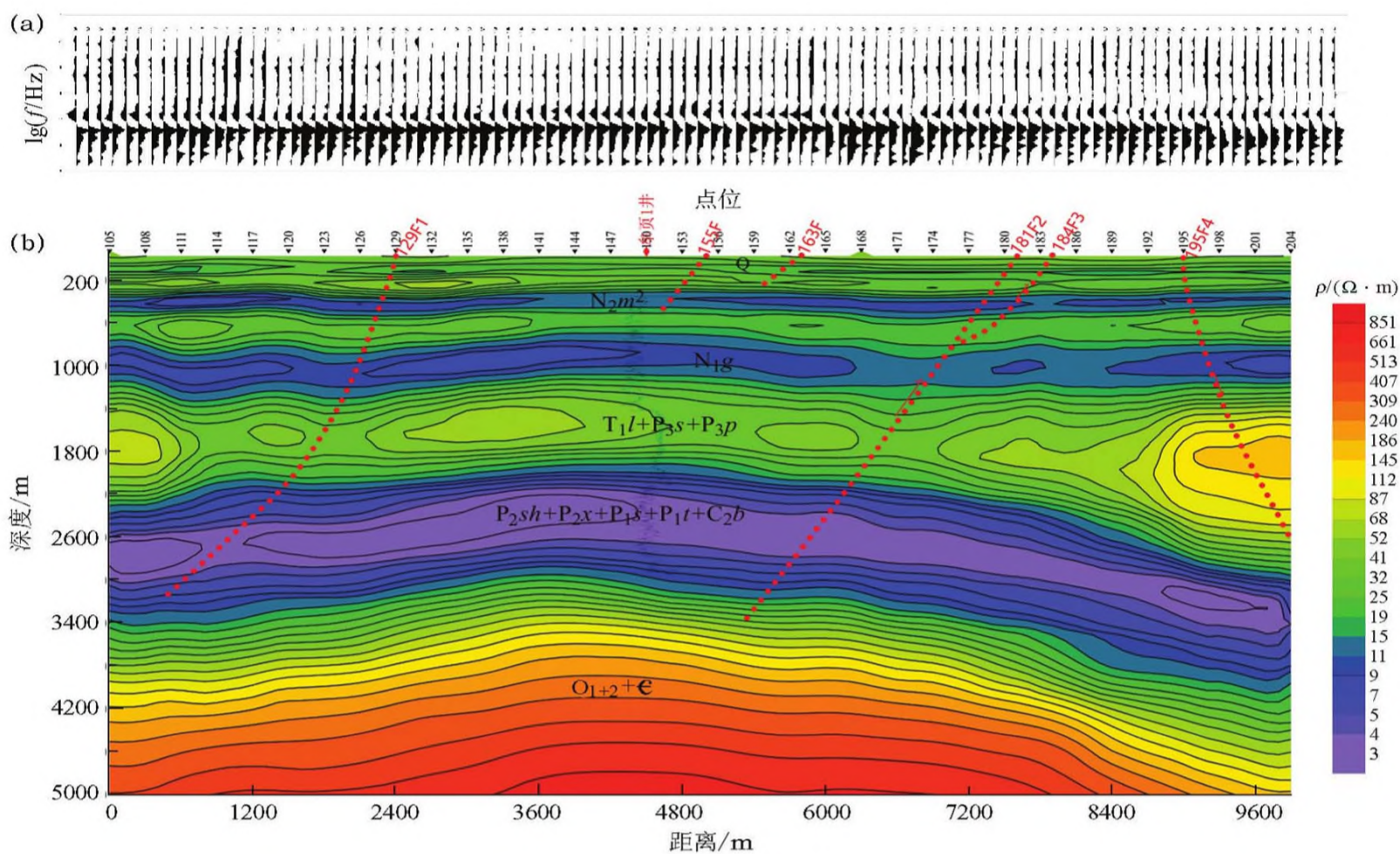
结合牟页 1 井和地质解释资料,广域电磁法反演成像结果显示埋藏深度 2 000~3 500 m 为含页岩层的有利地段。牟页 1 井电测井资料以及地质资料揭示了二叠系下统太原组( $P_{1t}$ )、山西组( $P_{1s}$ )和二叠系上、下石盒子组( $P_{2sh}$ 、 $P_{2x}$ )的电阻率值在 3~9  $\Omega \cdot m$ ,为主要的页岩层。

根据牟页 1 井揭示的地层特征,推断埋深 2 000~3 500 m 的石炭系本溪组( $C_2b$ )至二叠系下统太原组、山西组和二叠系上、下石盒子组表现为低阻,电阻率值在 3~9  $\Omega \cdot m$ ;视厚 800 m 及 800 m 以上的稳定低阻层是本区最有前景的目的层,以 4  $\Omega \cdot m$  为限圈定的下石盒子组高有机含量低阻带是本区最有前景的页岩气层。埋深在 750~1 500 m 的中新统馆陶组( $N_{1g}$ )其视厚度达 400 m,因电性稳定,厚度稳定,可视为本区又一重要的页岩气目的层。

L55.4 和 L54 线反演成像揭示测区发育有多条断裂构造,共计推测出 10 条断裂构造。其中,F2、F3 断裂是区内重要断裂构造,决定了中二叠世—三叠纪的隆起、凹陷的分布。其他断裂构造未对低阻目的层造成明显破坏。

查明了工作区内基底起伏、埋藏深度和地层在空间上的主要分布。L55.4 线基底呈背形构造特征变化,埋藏深度在 3200m 左右,L54 线基底呈 WS 高 EN 低的倾斜构造特征变化,WS 方向埋藏深度在



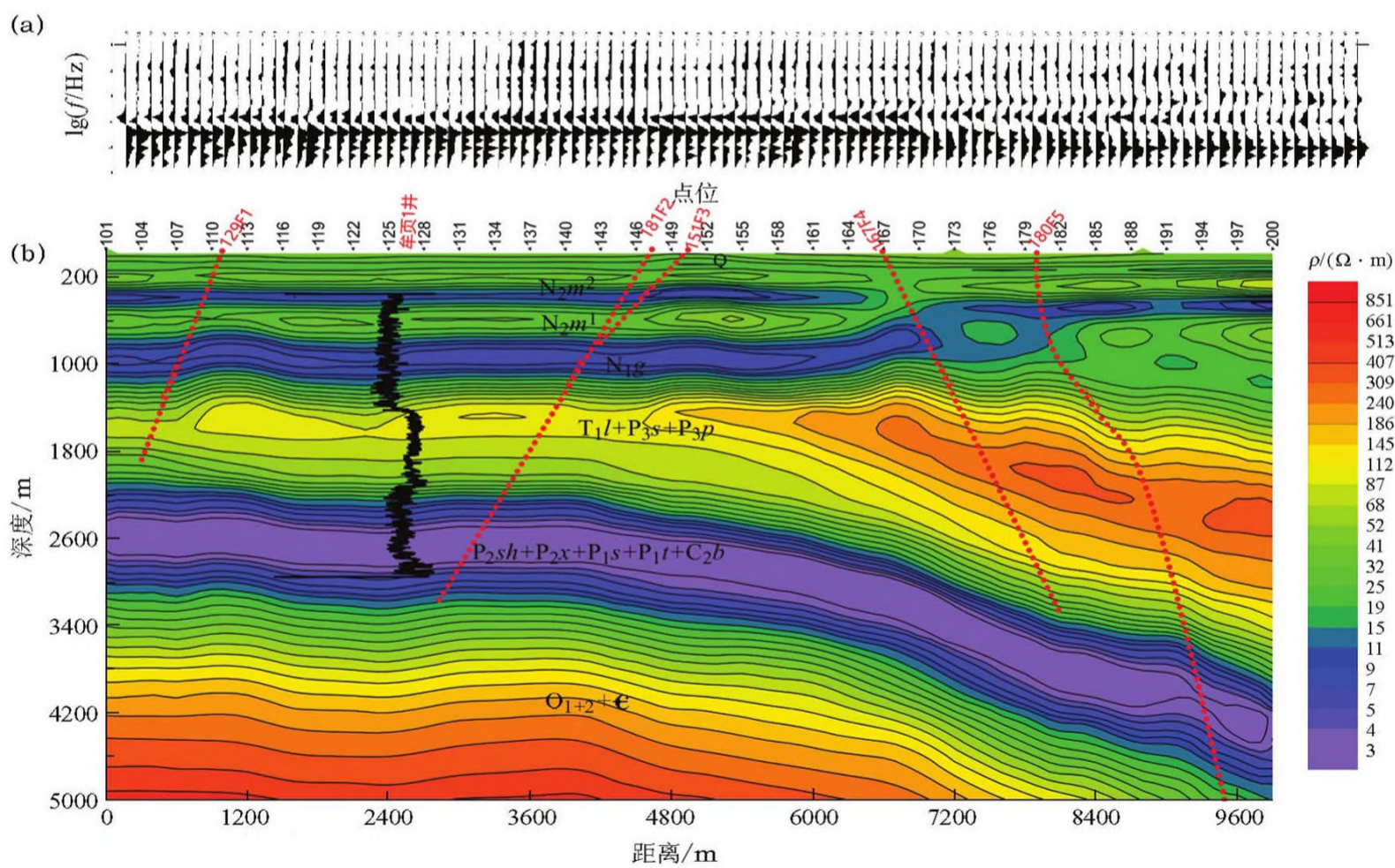


a—拟地震断面;b—反演成果及地质解释断面

a—quasi seismic section; b—inversion results and geological interpretation profile

图3 L55.4线综合成果断面

Fig.3 Line55.4 comprehensive achievement profile



a—拟地震断面;b—反演成果及地质解释断面

a—quasi seismic section; b—inversion results and geological interpretation profile

图4 L54线综合成果断面

Fig.4 Line54 comprehensive achievement profile



3 200 m, EN 方向 200 号点未见基底,说明基底埋藏深度在 5 000 m 以下;电性特征表现为高阻。

## 5 结论

在低阻覆盖区开展高精度大深度广域电磁法探测,采用自主研发的“重磁电三维反演成像解释一体化系统”进行广域电磁法反演成像,有效揭示了工作区地下 5 km 电阻率分布规律和特征。探测结果表明,埋藏深度 2 000~3 500 m 为含页岩层的有利地段。

通过本次野外工作,形成了适用于河南中牟低阻覆盖区页岩气勘探的广域电磁法数据采集及处理流程,表明广域电磁法能够克服低阻覆盖层的影响,是获取页岩层分布范围和埋深的一种有效探测手段,为后期有利区带评价和区块优选提供了地球物理参数和技术支撑。

**致谢:**感谢河南省地质调查院提供试验区块,感谢中南大学李帝铨教授对修改论文提出宝贵的意见,感谢张贤对论文的修改提供帮助。

## 参考文献 (References):

- [1] 张金川,徐波,聂海宽,等.中国页岩气资源勘探潜力[J].天然气工业,2008,28(6):136-140.  
Zhang J C, Xu B, Nie H K, et al. Exploration potential of shale gas resources in China [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 136-140.
- [2] 刘德良,曹高社,谈迎.华北盆地南缘发现寒武系烃源岩及油显示[J].石油学报,2000,9(5):10.  
Liu D L, Cao G S, Tan Y. Discovery of Cambrian source rocks and oil in the south margin of north China basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 9(5): 10.
- [3] 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,2009,14(3):1-5.  
Pan R F, Huang X S. Shale gas and its exploration prospects in China [J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(3): 1-5.
- [4] 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):810-818.  
Liu Z W, Sa L M, Yang X, et al. Needs of geophysical technologies for shale gas exploration [J]. OGP, 2011, 46(5): 810-818.
- [5] 宋慧波,胡斌,张璐,等.河南省太原组沉积时期岩相古地理特征[J].沉积学报,2011,29(5):876-888.  
Song H B, Hu B, Zhang L, et al. Characteristics of lithofacies paleogeography of the Taiyuan formation sedimentary period, Henan Province [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(5): 876-888.
- [6] 魏晓亮,张金川,党伟,等.牟页1井海陆过渡相页岩发育特征及其含气性[J].科学技术与工程,2016,9(26):42-50.  
Wei X L, Zhang J C, Dang W, et al. Characteristics and gas bearing property of transitional shale in well Mouye 1 [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 9(26): 42-50.
- [7] 解东宁.南华北盆地晚古生代以来构造沉积演化与天然气形成条件研究[D].西安:西北大学,2007.  
Xie D N. Tectonic and sedimentary evolution and natural gas formation conditions in south China basin since late Paleozoic [D]. Xi'an: Northwest University, 2007.
- [8] 徐汉林,赵宗举,杨以宁,等.南华北盆地构造格局及构造样式[J].地球学报,2003,24(1):27-33.  
Xu H L, Zhao Z J, Yang Y N, et al. Structural pattern and structural style of the Southern North China Basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2003, 24(1): 27-33.
- [9] 成海燕,李安龙,龚建明.陆相烃源岩评价参数浅析[J].海洋地质动态,2008,24(2):6-10.  
Cheng H Y, Li A L, Gong J M. Analysis of continental hydrocarbon source rock evaluation parameters [J]. Marine Geology Frontiers, 2008, 24(2): 6-10.
- [10] 朱晓军,蔡进功.泥质烃源岩的比表面与有机质关系研究进展及意义[J].石油与天然气地质,2012,33(3):375-384.  
Zhu X J, Cai J G. Progress and significant of research on relation between specific surface area and organic matter in argillaceous source rocks [J]. Oil and Gas Geology, 2012, 33(3): 375-384.
- [11] 陶士振,刘德良,李昌伟,等.华北陆块新区新层页岩气潜在勘探新领域——南华北下寒武统马店组烃源岩及其含气系统[J].天然气地球科学,2014,25(11):1767-1780.  
Tao S Z, Liu D L, Li C W, et al. Potential new field of shale gas exploration in the new layer of north China block-source rocks and their gas bearing system of the lower Cambrian matdian formation in the north of Nanhua [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(11): 1767-1780.
- [12] 何继善.广域电磁测深法研究[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(3):1065-1072.  
He J S. Research on wide-area electromagnetic sounding method [J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2010, 41(3): 1065-1072.
- [13] 何继善.广域电磁法和伪随机信号电法[M].北京:高等教育出版社,2010.  
He J S. Wide-area electromagnetic method and pseudo-random signal electricity method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [14] 董宁,许杰,孙赞东,等.泥页岩脆性地球物理预测技术[J].石油地球物理勘探,2013,48(s1):69-71.  
Dong N, Xu J, Sun Z D, et al. Shale brittleness prediction by geophysical methods [J]. OGP, 2013, 48(s1): 69-71.
- [15] 金之钧.中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题[J].地学前缘,2005,12(3):15-22.  
Jin Z J. Particularity of petroleum exploration on marine carbonate in China sedimentary basins [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 15-22.
- [16] 丁文龙,李超,李春燕,等.页岩裂缝发育主控因素及其对含气性的影响[J].地学前缘,2012,19(2):212-220.  
Ding W L, Li C, Li C Y, et al. Dominant factor of fracture development in shale and its relationship to gas accumulation [J]. Earth

Science Frontiers, 2012, 19(2): 212 - 220.

[17] 朱裕振, 许聪悦. 广域电磁法深部找矿实验效果[J]. 物探与化探, 2011, 35(6): 743 - 746.

Zhu Y Z, Xu C Y. Experimental results of deep prospecting by wide-area electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(6): 743 - 746.

[18] 周必文, 凌帆.  $E-E_x$  广域电磁法探测火山岩油气藏的实验研究[J]. 油气地球物理, 2012, 30(3): 56 - 59.

Zhou B W, Ling F. Experimental study of  $E-E_x$  wide-field electromagnetic method for detecting volcanic oil and gas reservoirs [J]. Oil and Gas Geophysics, 2012, 30(3): 56 - 59.

## The application and evaluation of the wide field electromagnetic method in the low resistance coverage area-Exemplified by Zhongmu area of Henan Province

TIAN Hong-Jun<sup>1,2</sup>, YIN Wen-Bin<sup>1,2</sup>, LIU Guang-Di<sup>1,2</sup>, JIANG Yong-Fang<sup>1,2</sup>, YOU Wen-Bing<sup>1,2</sup>

(1. Hunan Geosun High-Tech Co., Ltd., Changsha 410208, China; 2. Hunan Deep Earth Resources Electromagnetic Exploration Engineering Technology Research Center, Changsha 410208, China)

**Abstract:** Based on an analysis and summary of the physical properties of the gas-bearing shale layer in Zhongmu area of Henan Province, the authors used the wide-area electromagnetic exploration technology to detect shale gas in the low-resistance coverage area of the Nanhua Basin, obtained the distribution regularity and characteristics of the stratigraphic resistivity within 5km under the work area, and ascertained the structural distribution of the work area. In addition, the development characteristics of gas-bearing shales were revealed, with the main target layers being the Permian Taiyuan Formation, Shanxi Formation, Upper Shihezi Formation and Lower Shihezi Formation. The results show that, in the low-resistance coverage area, the wide-field electromagnetic method is an effective detection method to obtain the buried depth and distribution range of deep gas-bearing shale in the Nanhua Basin, providing geophysical parameters for the evaluation of favorable zones in the later period and the optimization of shale gas layers in the block.

**Key words:** low resistance coverage area; Nanhua basin; wide field electromagnetic method; gas-bearing shale

(本文编辑:沈效群)