doi: 10.11720/wtyht.2019.1249

孙求实,袁杰,宗文明,等.广域电磁法在辽西地区牛营子凹陷油气资源潜力评价中的应用[J].物探与化探,2019,43(1):64-69.http://doi.org/ 10.11720/wtyht.2019.1249

Sun Q S, Yuan J, Zong W M, et al. The application of wide field electromagnetic method to the oil and gas exploration of Niuyingzi sag in Liaoxi area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1):64-69.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1249

广域电磁法在辽西地区牛营子凹陷 油气资源潜力评价中的应用

孙求实1,袁杰2,宗文明1,孙守亮1,部晓勇1,朱恒1,张涛1,鞠楠1

(1.中国地质调查局 沈阳地质调查中心,辽宁 沈阳 110034;2.江苏省有色金属华东地质勘查局八 一四队,江苏 南京 210007)

摘要:将广域电磁法应用于辽西地区牛营子凹陷中元古界碳酸盐岩推覆体覆盖区,取得了良好的效果。首次在该 地区发现隐伏于碳酸盐岩推覆体之下的厚层北票组烃源岩地层,并得到钻孔验证;揭示了该区侏罗系北票组地层 相对于上、下地层显示为低阻的特性,获得了地下电性体真实的电阻率特征;丰富了燕辽沉降带东部的勘探层系, 将该地区原有的中新元古界单一勘探层系拓展为中新元古界黑色碳酸盐岩地层和中生界北票组泥岩两套油气勘 探层系。

关键词: 广域电磁法; 燕辽沉降带东段; 油气勘探; 烃源岩 **中图分类号:** P613 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2019)01-0064-06

0 引言

牛营子凹陷为辽西凌源一宁城盆地东南部的次级凹陷,属于燕辽沉降带的东段^[1-3],凹陷近 NE 走向,长约 20 km,宽约 6 km。2015 年中国地质调查局 沈阳地质调查中心在该区钻探工作过程中,在牛地 1 井井下钻遇富含油地层,证实该凹陷为含油气凹 陷,这为进一步在该区开展工作提供了依据。

为揭示牛营子凹陷构造演化特征和地层展布规 律,探索适合应用于辽西地区规模小、构造复杂凹陷 的高效、低耗的地球物理方法,中国地质调查局沈阳 地质调查中心联合江苏省有色金属华东地质勘查局 八一四队,在牛营子凹陷采用广域电磁法开展地质 探测工作。通过本次研究,了解了该区域由浅及深 的电阻率变化规律,丰富了燕辽沉降带东部的勘探 层系,首次揭示出燕辽沉降带东段牛营子凹陷中元 古界蓟县系高于庄组之下隐伏着一套厚度较大的低 阻地层,并得到钻孔验证。此次工作印证了广域电 磁法在构造复杂的小型凹陷具有极佳的适用性,并 为该地区后续油气勘探工作的开展奠定了基础。

1 区域地质和地球物理概况

牛营子凹陷位于内蒙古、河北、辽宁三省交汇, 为凌源—宁城盆地的次级凹陷,位于盆地东南部,大 地构造划分上属于燕山陆内造山带的东延,北为内 蒙地轴,南为华北地台^[4-5]。凹陷内地层发育较全, 主要分布有长城系、蓟县系、寒武系、奥陶系、侏罗系 和白垩系,地表零星见青白口系、二叠系地层,地表 无厚层侏罗系北票组地层出露^[6]。岩浆岩不发育, 局部出露辉绿岩脉。凹陷构造复杂,经历了印支期 和燕山期多次构造事件,地层多呈高角度,局部见倒 转。从地表观察,整体上凹陷自 NW—ES 存在推覆 构造,西北部白垩统义县组角度不整合覆于褶皱变 形的侏罗统髫髻山组地层之上,如图 1。

根据牛营子地区实测物性标本提出该地区电性 分层方案,如表1所示。侏罗系北票组泥砂互层夹

收稿日期: 2018-06-25;修回日期: 2018-09-18

基金项目:中国地质调查局项目"松辽外围南部盆地群油气基础地质调查"(DD20160167)

作者简介: 孙求实(1988-),男,硕士,工程师,从事油气基础地质调查研究工作。Email:70416484@qq.com



1—测线位置;2—正断层;3—逆断层;4—逆冲推覆构造;5—侵 入岩;6—第四系;7—白垩系义县组(K_1y);8—侏罗系髫髻山组 (J_2t);9—侏罗系邓杖子组(J_2d);10—侏罗系海房沟组(J_2h); 11—二叠系石盒子组(P_2s);12—寒武系-奥陶系并层(ϵ -O); 13—中-新元古界并层

1—line position; 2—normal fault; 3—reverse fault; 4—thrust fault; 5—intrusive rock; 6—Quaternary; 7—Cretaceous Yixian formation; 8—Jurassic Tiaojishan formation; 9—Jurassic Dengzhangzi formation; 10—Jurassic Haifanggou formation; 11—Permian Shihezi formation; 12—Cambrian-Ordovician strata; 13—Mesoproic-Neoproterozoic strata

图1 牛营子凹陷地质概图

Fig.1 Geological sketch of Niuyingzi depression

煤线,海房沟组砾岩夹煤层与寒武系、奥陶系、中-新远古界碳酸盐岩地层有明显的电阻率差异:泥岩、 砂岩电阻率一般小于 220 Ω · m(均值约为 130 Ω · m),表现为低阻,碳酸盐岩地层电阻率一般大于 2000 Ω · m(均值约为 6 300 Ω · m),表现为相对高 阻。侏罗系泥、砂互层地层呈低阻的电性特征,中元 古界碳酸盐岩地层呈高阻电性特征,二者差异明显, 这是使用广域电磁法勘探的良好物性前提,如有侏 罗系泥岩、砂岩层存在则在电阻率断面上会呈现出 明显的低阻特征。

2 工作原理及方法

广域电磁法(WFEM)是何继善相对于传统可控 音频大地大地电磁法(CSAMT)和磁偶源频率测深 法(MELOS)提出的一种人工源频率域电测测深 法^[7]。"广域"是指突破"远区"的局限,从场的统一 性出发,将"远区"、"过渡区"的局限,从场的统一 性出发,将"远区"、"过渡区"与"近区"统一起 来^[8]。广域电磁法具有有效观测平面范围大,同时 获得观测信号强、数据精度高、勘探深度大、对地下 电阻率变化敏感、装备简单轻便等特点,能较为真实 地反映地下电阻率的变化,适合碳酸盐岩推覆体覆 盖区以及构造复杂区的工作开展^[9-11]。

广域电磁法因场源不同分为电流源广域电磁法 和垂直场源广域电磁法。本次研究的地质体碳酸盐 岩与泥岩、砂岩层电阻率差异显著,因此采用电流源 广域电磁法进行勘探。该方法采用一对接地电极形 成电流源作为人工接地场源,测量电磁场中的某个 电磁场分量,从而计算广域视电阻率,达到探测不同 埋深地质目标体的目的。

均匀地表之水平电偶极源激励的电场 x 分量可 表示为

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

广域电磁视电阻率可定义为

$$\rho_{\alpha} = K_{E-E_{x}} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_{x}}(ikr)} , \qquad (2)$$
$$K_{E-E_{x}} = \frac{2\pi r^{3}}{dL \cdot MN} ,$$
$$\Delta V_{MN} = E_{x} \cdot MN \circ$$

式中: K_{E-E_x} 为装置系数; φ 为方位角; F_{E-E_x} (ikr)为电 磁响应函数;k为波数, $k^2 = i\omega\mu\sigma$, μ 为介质的磁导 率, ω 为介质圆频率; ΔV_{MN} 为观测电位差;MN为点 距;dL为供电线长度;I为发射电流;r为收发距。

从上述公式可以看出,与需要测量电场、磁场分量的 CSAMT 法比较,广域电磁法只需测量电场分量 E_x ,再经过迭代就能获得广域视电阻率,因此其勘探精度和效率更高,装备亦更为简单轻便^[12-13]。

测线布置如图 1 所示。2 条测线长都是 5 km, 总长度 10 km,L1 线垂直构造带,L2 线与 L1 线过牛 地 1 井呈"十"字交叉,点距 100 m,总物理点 102 个。仪器采用中南大学研发的广域电磁仪,测量频

Table 1 Statistical table of physical parameters								
地−电分层	代号	主要岩性	标本数	电阻率范围/(Ω・m)	电性特征			
侏罗系土城子组	J_3t	粉砂岩、含砾粉砂岩	37	102~172	低阻			
侏罗系髫髻山组	$J_2 t$	安山岩、角砾熔岩	62	562~846	次低阻			
侏罗系海房沟组	J_2h	复成分砾岩、砂岩、页岩夹煤线	32	163~220	低阻			
侏罗系北票组	J_1b	泥岩、砂岩夹煤线	27	110~130	低阻			
奧陶系	0	灰岩、白云岩	29	5100~9150	高阻			
寒武系	E	泥晶灰岩	24	2073~6304	次高阻			
青白口系	Qb	灰岩、白云岩	50	6367~13497	高阻			
洪水庄组	Jxh	粉砂质泥岩、钙质页岩	32	192~231	低阻			
长城系—蓟县系雾迷山组	Ch-Jxw	白云岩、灰岩、砂岩	185	1496~9672	次高阻			
太古宇	Ar	斜长角闪岩、变粒岩、片麻岩	67	3208~3906	次高阻层			
岩体	γ	花岗岩	65	5226	次高阻体			

表1 测区物性参数统计

率是3、5、6、7、9、11 频组,频率范围是0.015625~ 8192 Hz,发射总电流80A,发射电压700~800V,1线 的收发距离为17.8 km,2线的收发距离为15.1 km。

3 广域电磁法探测有效性分析

根据区内的物性资料统计,以中生代隐伏盆地 为目标层,大体可分为三个电性层,自上而下分别 为:①中新元古界长城系—蓟县系,岩性以白云岩、 灰岩为主,为高阻层,厚度约1000m;②中生界侏罗 系北票组,岩性为砂岩、泥岩及煤层,为中低组层,厚 度约为500m;③古生界寒武系—奥陶系,岩性以灰 岩为主,为中高阻层,厚度约为800m。

按照上述地质结构建立了一维层状介质正演模型,从上至下电阻率分别为:第一层为1000 Ω · m; 第二层是北票组时电阻率为200 Ω · m,不是北票组 时电阻率为800 Ω · m;第三层基底为800 Ω · m,模 型正演参数与野外采集一致。图2a中存在中生代 隐伏盆地和不存在中生代隐伏盆地所对应的两支视 电阻率曲线在达到趋肤深度(及盆地基底)频率以 下后表现出明显的差异,最大异常幅差可达50% (图2b),这说明根据广域电磁法视电阻率曲线异常 能够识别中新元古界推覆体下存在的中生界隐伏盆 地。







4 资料处理及解释

本次研究以凌源一宁城盆地以往项目中的电法 资料为基础,综合研究区地质认识和地层岩性的电 性资料建立地电模型。图 3 为 L1 测线广域电磁法 反演电阻率解释剖面,该测线横切构造线,能较好地 反应出研究区的构造特征和下伏北票组地层的展布 特征,因此选取该剖面展开讨论。图 4 为 L2 测线广 域电磁法反演电阻率解释剖面,该测线平行构造带, 研究区的逆冲推覆构造在该剖面图并不能得到很好 的反应,因此不作展开讨论。但图 4 中能够明显看 出,黑色方框内的北票组低阻地层分布稳定且厚度 较大。

L1 测线上地表至海拔高程 300 m 范围的电阻 率值为 800~1 200 Ω·m,显示为次高阻,是第一电 性层;海拔高程 300~-100 m 的电阻率值为 150~ 250 Ω·m,显示为低阻,是第二电性层;海拔-100~ -900 m 的电阻率值为 1000~3 000 Ω·m,显示为高 阻,是第三电性层;海拔-900~-1600 m 的电阻率值



1—逆冲推覆构造;2—地层界线;3—花岗岩体;4—长城系;5—蓟县系;6—蓟县系高于庄组;7—蓟县系杨庄组;8—蓟县系雾迷山组;9—寒 武系;10—奥陶系;11—侏罗系北票组;12—侏罗系海房沟组

1-thrust fault; 2-stratigraphic boundary; 3-granitic pluton; 4-Changchengian; 5-Jixianian; 6-Jixianian Gaoyuzhuang formation; 7-Jixianian Yangzhuang formation; 8-Jixianian Wumishan formation; 9-Cambrian; 10-Ordovician; 11-Jurassic Beipiao formation; 12-Jurassic Haifanggou formation

图 3 牛营子凹陷 L1 测线广域电磁法视电阻率反演解释剖面







Fig.4 The apparent resistivity inversion profile of wide fieldelectromagnetic sounding of L2 line in Niuyingzi depression

· 67 ·

为100~150 Ω · m,显示为低阻,是第四电性层;海 拔-1600~-2300 m 的电阻率值为1500~3000 Ω · m,显示为高阻,为第五电性层。

整体来看,电阻率断面分层清晰且构造上能很 好地反演出双重逆冲构造样式。结合之前地质工作 和岩石标本电性测试数据,认为第一电性层为中元 古界蓟县系雾迷山组灰岩和白云岩,第二电性层为 中生界侏罗系海房沟组组砾岩、砂岩、粉砂岩,第三 电性层为中元古界蓟县系杨庄组和高于庄组灰岩、 白云岩,第四电性层为中生界侏罗系北票组泥岩、砂 岩,第五电性层为古生界碳酸盐岩。

该电阻率断面纵向上电阻率变化梯度大,特别 是海拔-900~-1600m的第四电性层,低阻特征明 显,电性特征与上下岩层差异大。该低阻层推测为 北票组泥岩,之前在牛营子凹陷区域地质调查和基 础油气调查过程中未见有北票组大套的厚层泥岩, 燕辽沉降带东部中新元古界碳酸盐岩推覆体下亦未 发现过此套泥岩。为确定中新元古界碳酸盐岩推覆 体下侏罗系北票组泥岩存在与否,以L1广域电磁法 反演电阻率解释剖面图作为主要依据,结合地表露 头观察及实测剖面,部署了一口地质井——辽凌地 1井。该井在1527m钻穿上覆中元古界推覆体,钻 遇该套低阻泥岩层,如图5所示。

界	系	组	深度/m	岩性柱	岩性定名	
新生界	第四系		25	ToT TOT	腐殖土、含砾石	
中生界	侏罗系	海房沟组	272		绿色、灰绿色 中、粗砾岩,底 部灰色砂岩薄 层	
中元	蓟县系	杨庄组	889		灰色、灰红色白 云岩、灰岩、白 云质灰岩	
	蓟县系	高于庄组	1527		灰色、灰黑色白 云岩、灰岩、白 云质灰岩	
中生界	侏罗系	北票组	1720		黑色、灰黑色泥 岩泥质粉砂岩, 局部见灰绿色 泥质粉砂岩, 1596~1600 m、 1680~1683 m、 1686~1691 m 见气层	

图 5 辽凌地 1 井地层剖面

Fig.5 The stratigraphic section of LLD1 well

从图可以看出辽凌地1井于广域电磁剖面与 L1线广域电磁法反演电阻率解释剖面图的对应性 极好,说明广域电磁法在牛营子凹陷这种构造复杂 的小型凹陷有极佳的适用性,很好地印证了广域电 磁法在本地区油气勘探的有效性。

5 结论

运用广域电磁法在辽西牛营子凹陷开展探测研 究,将该方法首次应用于燕辽沉降带东部构造复杂 且被中元古界碳酸盐岩推覆体覆盖的小规模凹陷, 取得了良好的效果。

本次探测丰富了燕辽沉降带东部的勘探层系, 首次揭示了燕辽沉降带东段牛营子凹陷中元古界蓟 县系高于庄组之下隐伏着一套厚度较大的低阻北票 组地层,并得到钻孔验证,将该地区原有的中新元古 界单一勘探层系拓展为中新元古界黑色碳酸盐岩地 层和中生界北票组泥岩两套油气勘探层系。

广域电磁法是圈定牛营子凹陷下伏北票组烃源 岩分布范围和埋深的有效探测手段,此次工作对今 后在同类型盆地开展油气工作具有参考意义。

参考文献(Reference):

- [1] 孙求实,部晓勇,宗文明.凌源—宁城盆地中元古代早期盆地构造演化过程研究[J].地质评论,2017,63(S0):133-135.
 Sun Q S, Gao X Y, Zong W M.Study on tetonic evolution process of early mesoproterozoic in Lingyuan—Ningcheng basin[J].Geological Review,2017,63(S0):133-135.
- [2] Hu J M, Zhao Y, Liu X W, et al. Early mesozoic deformations of the eastern Yanshan thrust belt, borthern China [J]. Int Earth Sci (Geol Rundsch), 2010, 99:785 - 800.
- [3] Cope T, Graham S A, Ritts B D, et al. Carboniferous-Permian sedimentation on the northern margin of north China: implications for regional tectonics and climate change[J]. Int Geol Rev, 2005, 47(3):270-296.
- [4] Davis G A, Zheng Y D, Wang C. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces [J]. North China GSA Mem, 2001, 194: 171 – 197.
- [5] Ma Y S, Cui S Q, Zeng Q L, et al. Yanshanian compression and extension in the Yan-shan area(in Chinese with English abstract)
 [J]. Geol Bull China, 2002, 21 (4-5); 218 - 223.
- [6] Meng Q R, Hu J M, Jin J Q, et al. Tectonics if the Mesozoic wide extensional basin system in the China-Mongolia border region [J]. Basin Res, 2003.15:397 - 415.
- [7] 何继善,李帝铨,戴世坤.广域电磁法在湘西北页岩气探测中的应用[J].石油地球物理勘探,2014,49(5):1006-1012.
 He J S, Li D Q, Dai S K.Shale gas detection with wide field electromagnetic method in north-western Hunan[J]. Oil Geophysical

Prospecting, 2014, 49(5): 1006 - 1012.

[8] 凌帆,朱裕振,周明磊,等.广域电磁法在南华北盆地长山隆起 页岩气资源潜力评价中的应用[J].物探与化探,2017,41(2): 369-376.

Ling F, Zhu Y Z, Zhou M L, et al.Shale gas potential assessment of Changsan uplift area in southern north China basin by using wide field electromagnetic method [J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2):369 – 376.

- [9] 曹彦荣,宋涛,韩红庆,等.用广域电磁法勘查深层地热资源
 [J].物探与化探,2017,41(4):678~683.
 Cao Y R,Song T, Han H Q, et al. Exploration of deep geothermal energy resources with wide field electromagnetic method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017,41(4):678-683.
- [10] 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. Wide field electromagnetic sounding methods [J]. Journal of

Central South University: Science and Technology, 2010, 41(3): 1065 - 1072.

- [11] 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 field electromagnetic mehtod and pseudorandom signal electric method[M].Beijing:Higher Education Press, 2010.
- [12] Zhang S H, Zhao Y, Song B, et al. Petrogenesis of the Middle Devonian Gushan diorite pluton on the northern margin of the North China block and its tectonic implications [J]. Geol Mag, 2010, 144(3):553 - 568.
- [13] 符超,袁博,李学兰.广域电磁法在保靖页岩气勘探中的应用
 [J].工程地球物理学报,2016,13(4):416-422.
 Fu C,Yuan B,Li X L, et al.The exploration of wide field electromagnetic mehtod on shale gas[J].Chinese Journal of Engineering Geophysice,2016,13(4):416-422.

The application of wide field electromagnetic method to the oil and gas exploration of Niuyingzi sag in Liaoxi area

SUN Qiu-Shi¹, YUAN Jie², ZONG Wen-Ming¹, SUN Shou-Liang¹,

GAO Xiao-Yong¹, ZHU Heng¹, ZHANG Tao¹, JU Nan¹

(1. Shenyang Center of Geological Survey, CGS, Shenyang 110034, China; 2. No. 814 Geological Party, East China Geological Exploration Bureau of Jiangsu Nonferrous Metals, Nanjing 210007, China)

Abstract: The authors applied the wide field electromagnetic method to conducting work in Mesoproterozoic carbonatite nappe area and achieved good result. It is for the first time that Beipiao source formation was discovered below the carbonatite nappe, which was further proved by well cores. It shows low resistance in comparison with things of its adjacent layers. The actual electronic resistance of underground electric body was also obtained. These discoveries have enriched the exploration strata of the east Yanliao subsiding belt and expanded one Mesoproterozoic exploration stratum to two exploration strata, i.e., the Mesoproterozoic black carbonate stratum and mudstone stratum.

Key words: wide field electromagnetic method; east Yanliao subsiding belt; oil and gas exploration; hydrocarbon source rock

(本文编辑:沈效群)