

doi: 10.12029/gc20220515

罗卫锋, 胡志方, 李桂林, 杨小鹏, 何兰芳, 杨云见, 孙启隆, 张平川, 张启燕. 2022. 大地电磁技术测定的准噶尔盆地乌伦古坳陷至北隆起带石炭系及油气前景分析[J]. 中国地质, 49(5): 1591–1604.

Luo Weifeng, Hu Zhifang, Li Guilin, Yang Xiaopeng, He Lanfang, Yang Yunjian, Sun Qilong, Zhang Pingchuan, Zhang Qiyan. 2022. Carboniferous strata and their oil and gas prospects from Wulungu depression to the north uplift in the Junggar Basin based on magnetotelluric technology[J]. Geology in China, 49(5): 1591–1604(in Chinese with English abstract).

## 大地电磁技术测定的准噶尔盆地乌伦古坳陷至北隆起带石炭系及油气前景分析

罗卫锋<sup>1</sup>, 胡志方<sup>1</sup>, 李桂林<sup>1</sup>, 杨小鹏<sup>2</sup>, 何兰芳<sup>3</sup>, 杨云见<sup>4</sup>, 孙启隆<sup>1</sup>, 张平川<sup>1</sup>, 张启燕<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 4. 东方地球物理公司综合物化探处, 河北 涿州 072751)

**摘要:**【研究目的】本文以准噶尔盆地乌伦古坳陷至乌伦古北隆起带为研究区, 研究石炭纪地层沉积、分布特征, 为该区域地质结构研究和油气勘查工作提供了依据和参考。【研究方法】采集大地电磁测深数据, 结合以往重磁地震资料, 采用二维共轭梯度反演、最优化电性分层等技术获取石炭纪地层、断裂构造展布特征, 为火成岩覆盖区研究石炭纪地层提供了有效的方法。【研究结果】利用大地电磁测深技术结合重磁地震资料开展综合处理分析, 获得研究区石炭系厚度图、石炭系埋深图, 初步确定了上下石炭统的分界面, 查明了石炭纪地层的分布特征, 索索泉凹陷、福海坳陷和扎河坝坳陷为 3 个石炭纪地层沉降中心, 具有较好的油气勘查前景。【结论】在火成岩覆盖区, 采用大地电磁测深、重磁地震综合处理解释技术为石炭纪地层研究提供了有效的技术支撑。

**关键词:** 石炭系; 火成岩; 大地电磁测深; 地震勘探; 综合处理解释; 油气勘查工程; 乌伦古凹陷; 准噶尔盆地

**创 新 点:** 利用高质量的大地电磁数据、重磁资料有效识别具有电阻率、密度、磁化率差异的火成岩区地层的分布, 降低了火成岩区地层识别的不确定性; 查明准噶尔盆地乌伦古坳陷至乌伦古北隆起带石炭纪地层的分布特征, 初步确定上下石炭统的分界面。

中图分类号: P631.325; P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2022)05-1591-14

## Carboniferous strata and their oil and gas prospects from Wulungu depression to the north uplift in the Junggar Basin based on magnetotelluric technology

LUO Weifeng<sup>1</sup>, HU Zhifang<sup>1</sup>, LI Guilin<sup>1</sup>, YANG Xiaopeng<sup>2</sup>, HE Lanfang<sup>3</sup>, YANG Yunjian<sup>4</sup>,  
SUN Qilong<sup>1</sup>, ZHANG Pingchuan<sup>1</sup>, ZHANG Qiyan<sup>1</sup>

(1. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, 4. Non Seismic Department, BGP Inc., CNPC, Hebei 072751, Zhuozhou, China)

**Abstract:** This paper is the result of oil and gas exploration engineering.

收稿日期: 2019-07-01; 改回日期: 2020-03-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC060110204)、中国地质调查局项目(DD20160170)联合资助。

作者简介: 罗卫锋, 男, 1973 年, 高级工程师, 从事非地震资料处理解释及其方法研究; E-mail: luoweifeng\_08@163.com。

通讯作者: 胡志方, 男, 1966 年, 博士, 教授级高级工程师, 从事石油地质综合研究; E-mail: huzhifangogs@163.com。

**[Objective]** In this paper, the sedimentary and distribution characteristics of Carboniferous strata are studied in the study area from Wulungu Depression to Wulungu North Uplift in Junggar Basin, which provides a basis and reference for the study of geological structure and oil and gas exploration in this area. **[Methods]** Acquisition of magnetotelluric sounding data, combined with previous gravity, magnetic and electrical seismic data, using two-dimensional conjugate gradient inversion, optimization of electrical stratification technology to obtain the distribution characteristics of Carboniferous strata and fault structure, provides an effective method for the study of Carboniferous strata in igneous rock covered area. **[Results]** Using magnetotelluric sounding technology combined with gravity, magnetic, electrical and seismic data to carry out comprehensive processing and analysis, the thickness map and burial depth map of the Carboniferous system in the study area were obtained, the interface between the upper and lower Carboniferous strata was preliminarily determined, and the distribution characteristics of the Carboniferous strata were identified. The Suosuoquan sag, Fuhai depression and Zhaheba depression are three subsidence centers of Carboniferous strata, which have good prospects for oil and gas exploration. **[Conclusions]** In igneous rock covered area, the comprehensive processing and interpretation technology of magnetotelluric sounding and gravity-magnetic-electric-seismic provides effective technical support for the study of Carboniferous strata.

**Key words:** Carboniferous; igneous rock; magnetotelluric sounding; seismic exploration; Interpretation of comprehensive processing; oil and gas exploration engineering; Wulungu depression; Junggar basin

**Highlights:** The distribution of igneous rock strata with resistivity, density and magnetic susceptibility differences is effectively identified by using high-quality magnetotelluric data and gravity and magnetic data, which reduces the uncertainty of strata identification in igneous rock areas; The distribution characteristics of Carboniferous strata from Wulungu Depression to Wulungu North Uplift in Junggar Basin were identified, and the interface between upper and lower Carboniferous strata was preliminarily determined.

**About the first author:** LUO Weifeng, male, 1973, senior engineer, engaged in non-seismic data processing interpretation and method research; E-mail: luoweifeng\_08@163.com.

**About the corresponding author:** HU Zhifang, male, in 1966, Ph.D., professor of engineering, engaged in petroleum geological research; E-mail: huzhifangogs@163.com.

**Fund support:** Supported by National Key R & D Plan project (No. 2016YFC060110204) and the project of China Geological Survey (No. DD20160170).

## 1 引 言

野外地质考察、钻探及烃源岩生烃模拟研究认为准噶尔盆地东北缘乌伦古坳陷至乌伦古北隆起带具有一定的资源潜力,自20世纪50年代开始先后开展了物探地质、钻井等多种方法的勘探工作。利用地震资料结合钻井标定预测乌伦古地区石炭系火成岩的分布,综合野外露头、钻井、地震等资料进行联合研究,分析乌伦古坳陷石炭系内部层系结构与展布,但由于火成岩的屏蔽作用,石炭系地震反射信噪比低,呈杂乱反射,利用地震资料难以有效查明石炭纪地层分布特征,油气勘探一直没有取得有效突破。大地电磁测深法具有勘探深度大、对高导层敏感、不受高阻层屏蔽、施工方便、成本低等优点,所以决定在乌伦古坳陷至乌伦古北隆起带开展大地电磁测深法,目的是查明该区石炭纪地层分布特征。通过采集高质量的大地电磁数据,利用二

维共轭梯度反演、最优化电性分层等技术,结合重磁、地震资料综合解释,初步确定了上下石炭统的分界面,查明了石炭纪地层分布特征,对该地区地质结构研究和油气勘查工作将起到积极作用。

## 2 地质概况

乌伦古坳陷由索索泉凹陷、红岩断阶两个二级构造单元组成,地层自下而上发育有石炭系、三叠系、侏罗系、白垩系及古近系—新近系等地层,二叠系缺失,发育石炭系火山岩和中新界碎屑岩两类储层,其中石炭系火山岩是主要的储层。研究区存在三套烃源岩,即中下侏罗统、上三叠统白碱滩组炭质泥岩、暗色泥岩和石炭系姜巴斯套组、滴水泉组暗色泥岩,侏罗系烃源岩属于有机质类型较差的烃源岩,有机质演化程度低,处于未熟—低熟阶段,三叠系未进入大量生气期,生烃潜力有限,下石炭统姜巴斯套组、滴水泉组烃源岩具有较大的生烃潜

力,是该区主要的烃源岩。

乌伦古北隆起带包括红岩断阶北凸起、福海拗陷、扎河坝拗陷、科克森套隆起4个二级构造单元,主要地层为新生界、二叠系、上石炭统、下石炭统和前石炭纪基底,缺失中生界,二叠纪、石炭纪地层厚度横向上变化较大,总体呈北薄南厚,向北部厚度逐渐减薄至尖灭。区内存在的生油岩为下二叠统卡拉岗组暗色泥岩、煤和石炭系恰其海组暗色泥岩类生油岩以及泥盆系蕴都喀拉组粉砂质泥岩和芒克鲁组暗色生物泥晶灰岩、生物碎屑灰岩;下二叠统卡拉刚组、上石炭统恰其海组火成岩发育,为较好的储集层。

### 3 资料采集技术

研究区布设大地电磁测深剖面200 km,点距200 m,测线2条(图1),其中WLG-CEMP-01线105 km,坐标点528个,WLG-CEMP-02线95 km,坐标点475个。

野外数据采集使用加拿大凤凰地球物理公司生产的MTU-5A大地电磁测深系统,采用张量四分量观测,单个采集站上同时观测两个方向的电场分量 $E_x$ 、 $E_y$ ,一个排列(小于10道)观测一组磁场分量 $H_x$ 、 $H_y$ ;  $E_x$ 、 $H_x$ 布设方向与测线方向一致, $H_y$ 、 $E_y$ 布设方向垂直测线方向,并通过GPS进行同步采集,测量频率为320~0.001 Hz。测点平均观测时间为11.8 h,采用Robust和远参考技术削弱噪声干扰(图2),增强有用信号,提高信噪比,获得了品质优良的原始资料。

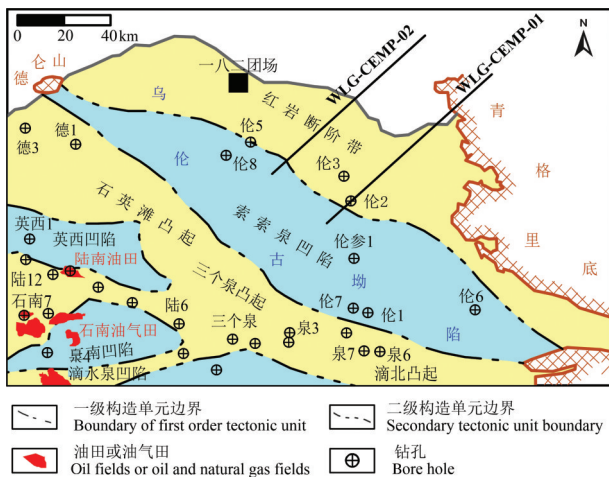


图1 大地电磁测深剖面布置图  
Fig.1 Magnetotelluric sounding survey line layout in the work area

### 4 资料处理与反演

依据大地电磁测深勘探原理,定性分析频率域的成果,全面把握原始资料中所提供的信息,对研究区构造、断层、地层起伏变化等建立整体认识;在定性认识的基础上,结合已知地质物探成果进行综合地质解释。

#### 4.1 资料预处理

大地电磁资料预处理包括极化模式识别、去噪处理、及静位移校正等,其中模式识别和静位移校正是资料预处理重要的一环。

资料处理中一般采用张量旋转的方法把原始资料变换到电性主轴上,但电性主轴与地质构造走向可能一致,也可能相互垂直,因此需要进行模式识别。判断方法:TE极化平行构造走向,比TM稳定,因而同一构造单元相邻测点 $\rho_{TE}$ 曲线比 $\rho_{TM}$ 曲线平滑连续;二维情况下高阻基底隆起区TM模式低频段视电阻率 $\rho_{TM}$ 大于TE模式视电阻率 $\rho_{TE}$ ,基底凹陷沉降区TE模式低频段视电阻率 $\rho_{TE}$ 大于TM模式视电阻率 $\rho_{TM}$ 。根据经验, $\rho_{TE}$ 反映深层电性特征较好, $\rho_{TM}$ 曲线反映浅层电性特征较好,此次资料处理选择TE模式视电阻率 $\rho_{TE}$ 进行反演。

静位移校正首先是采用空间滤波、大地电磁函

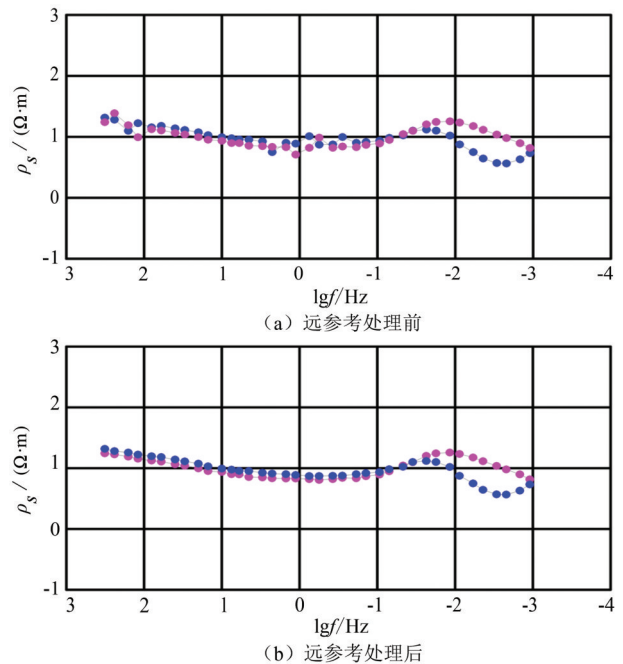


图2 远参考处理前后对比图  
Fig.2 Comparison before and after remote reference processing



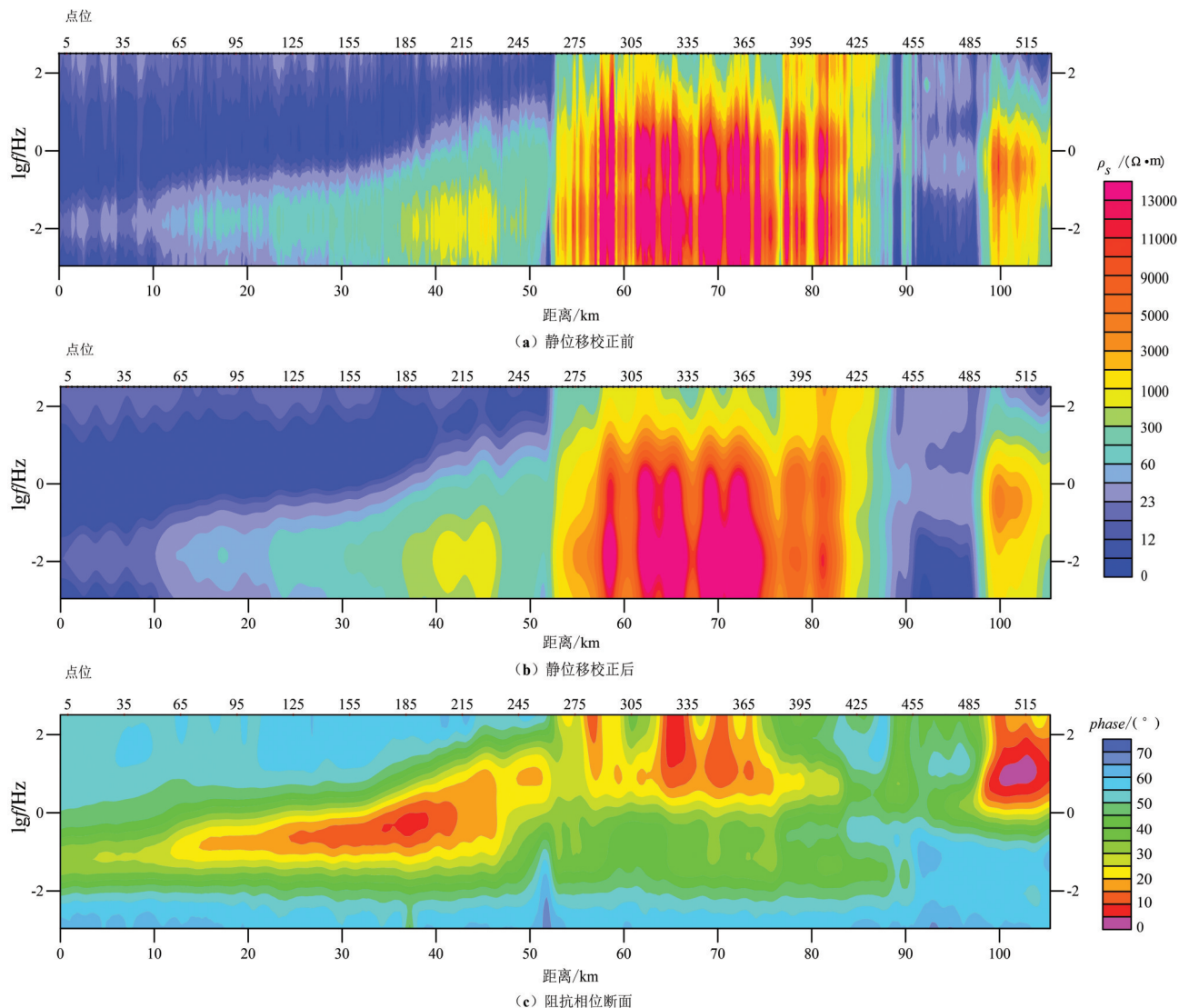


图3 WLG-CEMP-01测线静位移校正效果对比图

Fig.3 Comparison of static displacement correction effect of Line WLG-CEMP-01

数向上延拓技术进行处理,然后利用可视化人机交互数据处理系统,参考地面地质、结合测区内电测井信息进行微调,取得了较好的效果。图3是WLG-CEMP-01线视电阻率静位移校正前后对比图,校正前原始等值线横向连续性较差,纵向上密集陡直,存在“挂面条”现象;静校正后,视电阻率等值线横向上变化规律性明显,同时保留了原始剖面的形态,而且与相位剖面形态具有较好的一致性。

#### 4.2 资料定性分析

定性分析主要是对实测曲线类型、总纵向电导以及视电阻率和阻抗相位断面进行分析,定性地把握测区的电性特征、基底隆凹变化、构造单元区分、

断层分布及地层变化规律。

研究区MT测点视电阻率曲线类型主要以HK、AK、AHK型为主,图4是WLG-CEMP-01线视电阻率曲线类型分布图,索索泉凹陷、红岩断阶带视电阻率曲线类型为HK型,电性层呈低、次低、次高、高、低的变化特征,极小值在1~0.1 Hz,基底埋深由南西往北东逐渐变浅;红岩断阶北凸起视电阻率曲线类型为AHK型,石炭系火山岩出露,测点电阻率值100~10000  $\Omega \cdot \text{m}$ ;扎河坝坳陷视电阻率曲线类型为HK型,1~10 Hz,与索索泉凹陷比较,基底埋深较浅;科克森套隆起带视电阻率曲线类型为AK型,属隆起带典型曲线。



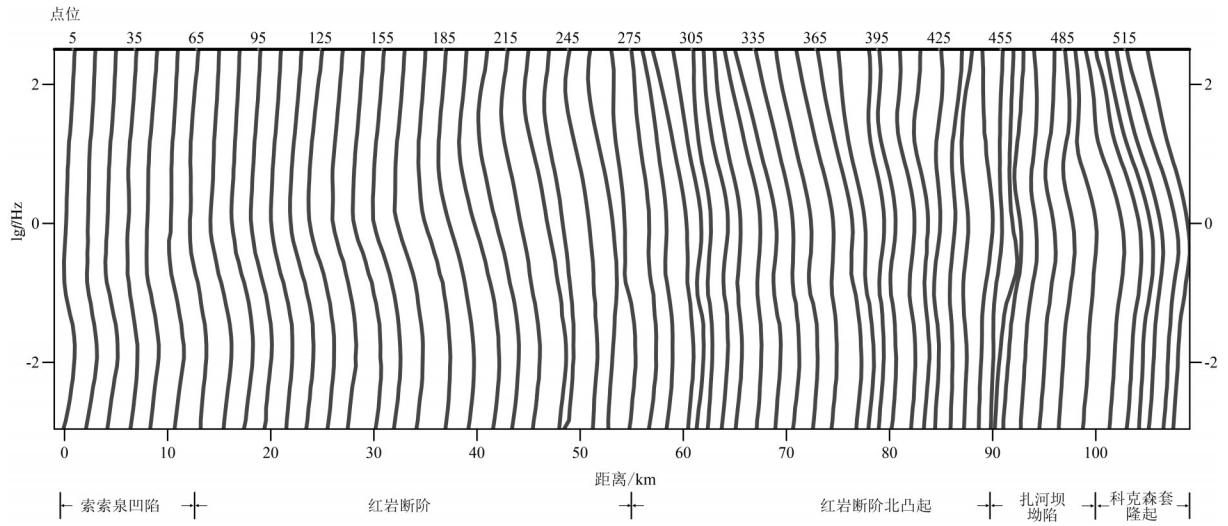


图4 WLG-CEMP-01 测线视电阻率曲线类型分布图  
Fig.4 Distribution map of apparent resistivity curve type of line WLG-CEMP-01

### 4.3 资料反演

大地电磁二维反演方法众多,选择反演方法不仅要考虑研究区地电特征而且要看具体的反演效果。本次选择二维连续介质反演和二维共轭梯度反演两种反演方法进行对比分析,两种反演均能揭示地下电性层起伏形态,大轮廓是一致的,但二维共轭梯度反演结果更加客观真实(图5),电阻率变

化特征与电测井曲线吻合较好,所以选择二维共轭梯度反演作为本次的主要反演方法。

二维共轭梯度反演基本思想是把共轭性与最速下降方法相结合,利用已知点处的梯度构造一组共轭方向,并沿这组方向进行搜索,求出目标函数的极小点,迭代计算简单,所占存储单元少,且有较快的收敛速度和二次终止性等优点。为减少反演

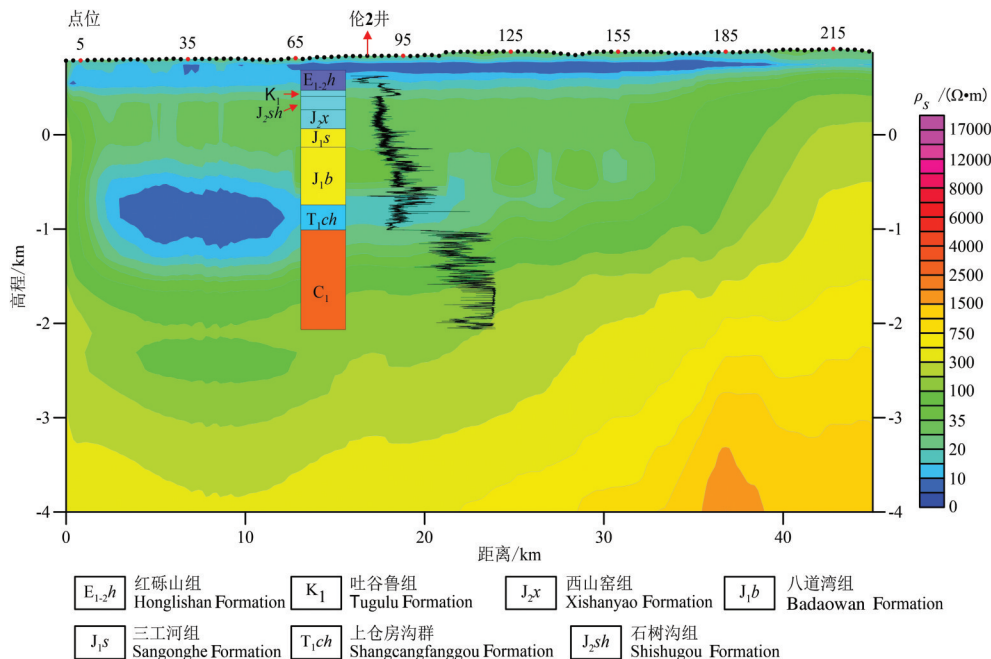


图5 伦2井电测井曲线与WLG-CEMP-01测线(南部)电阻率反演剖面对比图  
Fig.5 Comparison between Lun 2 drilling and line WLG-CEMP-01(South)

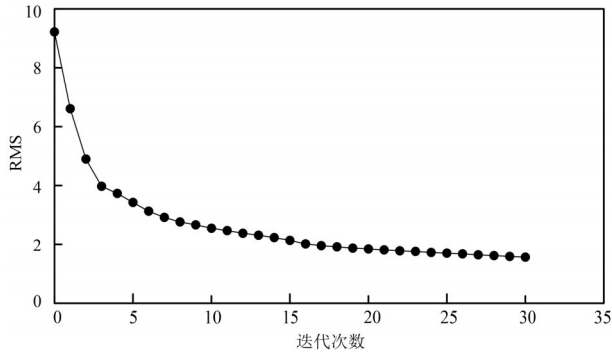


图6 拟合曲线  
Fig.6 Fitting curve

的多解性,在构建目标函数时引入正则化思想:

$$P^s(m) = \varphi(m) + as(m)$$

式中  $\varphi(m)$  为数据拟合差方程,  $s(m)$  为模型空间的目标函数,以先验模型的最小二范数作为模型目标函数:  $s(m) = \|m - m_{ref}\|^2$ , 式中  $m_{ref}$  为参考模型,  $m$  为电层率  $\sigma$ ,  $\alpha$  为正则化因子。反演正则化问题的关键是正则化因子的选取,本次反演程序引入动态的正则化因子,每次迭代取迭代数据目标函数与模型目标函数的比作为初值。经过31次迭代,均方根误差(RMS)为1.56,反演结果拟合较好,拟合曲线如图6。

## 5 资料综合解释

### 5.1 资料综合解释方法

首先利用层间离差计算方法对电法反演数据体进行最优化分层处理,使地层界面位置、起伏变化、产状特征相对更为直观,提高电阻率反演剖面的纵向分辨率,然后在此基础上利用电测井、岩石物性资料对反演剖面进行电性标定解释,最后结合以往地质物探资料开展综合解释,降低处理解释的多解性,提高解释的可靠性。资料综合解释方法流程见图7。

### 5.2 电法反演剖面标定解释

#### 5.2.1 最优化电性分层

电法反演剖面以电阻率随深度变化的形式展现,相当于地震的速度剖面,地层界面、断裂等地质信息不直观。利用层间离差计算方法对电法反演数据体进行最优化分层处理,分层目标使得各层段内部的电阻率物性差异性最小,层段间的电阻率物性差异性最大,充分反映地下地电模型的分层规律,提高了MT反演剖面的纵向分辨率,为反演剖面

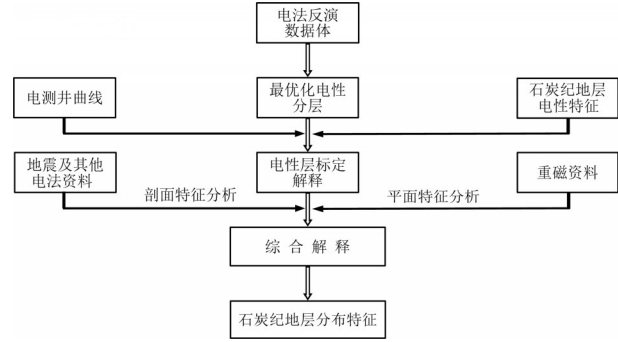


图7 资料综合解释流程图  
Fig.7 Flow chart of data comprehensive interpretation

电性层准确标定奠定了可靠、准确的基础。

图8是WLG-CEMP-01线经最优化电性分层技术处理后的分层剖面,比较清楚地反映剖面上的构造特征,横向上反映不同电性层沿测线的形态起伏及厚度的变化,可以直观地追踪电性界面和断裂信息。

#### 5.2.2 电性层标定解释

电性层标定依据研究区岩石的电性资料和电测井资料来进行,剖面标定解释主要有两个方面:

(1)分析统计地层露头实测电阻率,总结石炭系与围岩地层之间的电性变化规律。表1为乌伦古坳陷石炭系与围岩电性统计,石炭系与围岩、上石炭统与下石炭统之间均存在较为明显的电性差异,上三叠统电阻率平均值  $346 \Omega \cdot m$ ,为低阻标志层,上石炭统电阻率平均值  $3053 \Omega \cdot m$ ,总体表现为高阻层,下石炭统电阻率平均值  $463 \Omega \cdot m$ ,为中低阻层,前石炭系(AnC)电阻率在  $3343 \Omega \cdot m$  以上,为基底高阻层。

(2)利用钻井电测井曲线、分层结果进行标定解释。红岩断阶带伦2井位于WLG-CEMP-01线85号测点位置(图5),该井在1831.5 m 钻遇下石炭统(表2),但没有钻穿石炭系,电测井曲线上下三叠统与下石炭统电阻率差异大,存在明显的电性分界面,与电法反演剖面变化特征基本吻合。

扎河坝凹陷富浅1井位于WLG-CEMP-01线447号测点位置(图8),该井表层钻遇30多米第四系后进入石炭系宝塔玛依内山组,完钻井深340 m,没有钻穿石炭系;富参1井距WLG-CEMP-01线24 km,表层钻揭26.00 m 第四系后直接进入石炭系宝塔玛依内山组,新近系、二叠系卡拉岗组缺失,完钻井深1748 m,井底层位为石炭系宝塔玛依内山

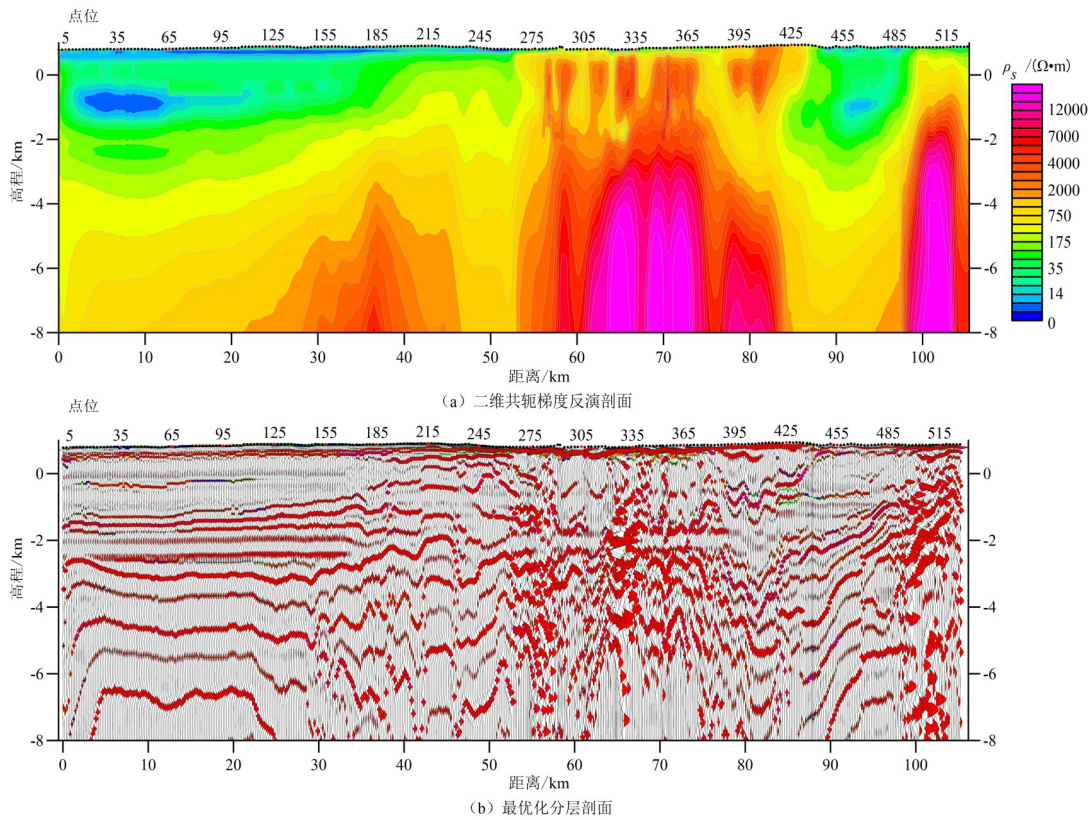


图8 WLG-CEMP-01测线界面信息提取对比图  
Fig.8 Interface information contrast map of line WLG-CEMP-01

组;富浅1井、富参1井钻遇地层与WLG-CEMP-01线电法反演剖面地质解释基本吻合。

### 5.3 综合解释

以本次采集的两条大地电磁测深测线为主,结合以往在乌伦古坳陷及红岩断阶完成二维地震测线、2016年乌伦古坳陷完成的11条时频电磁测线、2010年扎河坝坳陷完成的建场测深测线及覆盖全区的重磁资料进行综合解释,充分发挥多信息、多属性联合解释的优势。

#### 5.3.1 剖面综合解释

(1) 与地震资料进行对比分析,根据地震解释分

层结果进行时深转换,确定各个地层的埋深和厚度变化,标定大地电磁测深剖面,进行辅助解释。图9为电法WLG-CEMP-02线南部与相邻地震测线NE275线北部剖面对比图。因石炭系顶部火成岩的屏蔽作用,NE275测线石炭系及其以下地层地震反射信噪比低,地震资料品质低,石炭系上覆各层地震反射连续,成层性较好,石炭系顶面起伏与电法WLG-CEMP-02线剖面特征一致,两者剖面地质结构形态大体上相同,说明大地电磁测深剖面处理到位,能够反映区域构造特征。

(2) 与时频电磁、建场测深资料进行对比,分析

表1 乌伦古坳陷岩层及电性特征

Table 1 Strata and electrical characteristics of Wulungu Depression

系	统	组	符号	岩性特征	$\rho / (\Omega \cdot m)$	电性
三叠系	上统	白碱滩组 /黄山街组	T <sub>3b</sub> /T <sub>3h</sub>	粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩	131~554	低阻
石炭系	上统	宝塔玛依 内山组	C <sub>2b</sub>	橄榄玄武岩、玄武岩、安山岩、安山 玢岩、凝灰岩、凝灰质砂岩等	162~9602	高阻
	下统	滴水泉组	C <sub>1d</sub>	碳质泥岩、粉砂岩、细砂岩	44~1173	中低阻
泥盆系—奥陶系/前石炭系			D-O/AnC	花岗斑岩、云母石英片岩、绿泥石 片岩、角闪石英片岩、板岩、片麻岩	243~4628	高阻



表2 伦2井地层分层对比数据

Table 2 Stratigraphic correlation data of Lun 2 drilling					
界	系	统	群/组	地层符号	底界深度/m
新生界	古近系		索素泉组	E <sub>3-N<sub>1</sub>s</sub>	123
		—新近系	古—始新统	红砾山组	E <sub>1-2h</sub>
	白垩系	下统		K <sub>1</sub>	403
中生界	侏罗系	中统	石树沟群	J <sub>3s</sub>	545
			西山窑组	J <sub>3x</sub>	750
		下统	三工河组	J <sub>1s</sub>	946
		八道湾组	J <sub>1b</sub>	1564.05	
	三叠系	下统	上仓房沟群	T <sub>1ch</sub>	1831.5
古生界	石炭系	下统		C <sub>1</sub>	2895.27

大地电磁测深和时频电磁、建场测深反演剖面起伏形态、电阻率高低变化,判断电性层位、隆凹格局是否一致,若不一致分析存在差异的原因。

5.3.2 平面综合解释

对以往重力资料进行重新解释,分析研究区剩余重力异常特征,剩余重力异常反应沉积岩的厚度变化、基底顶面的起伏形态。研究区大地电磁测深剖面起伏形态与剩余重力异常(图10)形态的隆坳关系一致,说明剩余重力异常真实反映了区域的隆坳格局;在剩余磁力异常图上(图11,图12),高频磁力异常呈等轴状、环状及串珠状展布,与电法剖面上块状高电阻率异常体相对应,主要为侵入岩的反映;中低频磁力异常主要为晚石炭世火山喷发岩的反映,电法剖面上火山喷发岩呈中高电阻率特

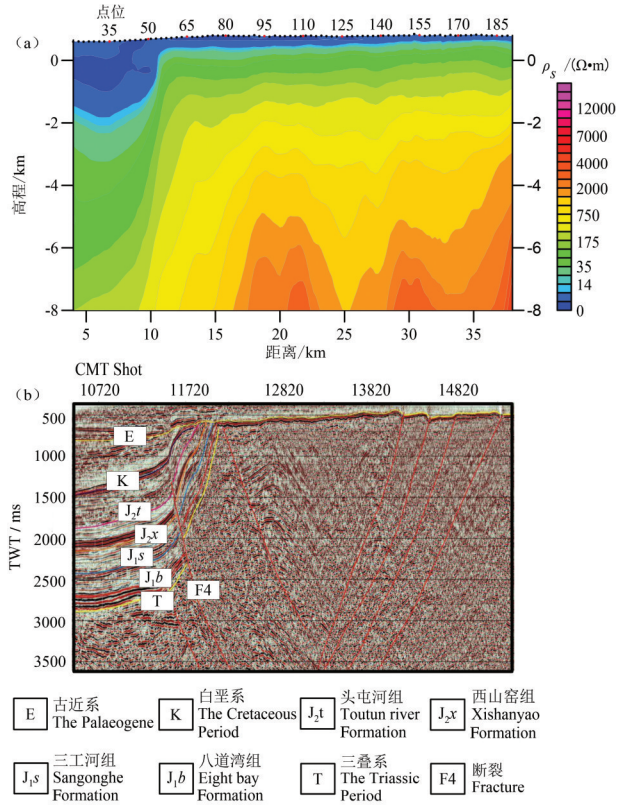


图9 WLG-CEMP-02(南部)二维电阻率反演剖面(a)与NE275线地震剖面(b)对比图  
Fig.9 Comparison of the two-dimensional resistivity inversion profile of WLG-CEMP-02 (a) and the seismic profile of line NE275 (b)

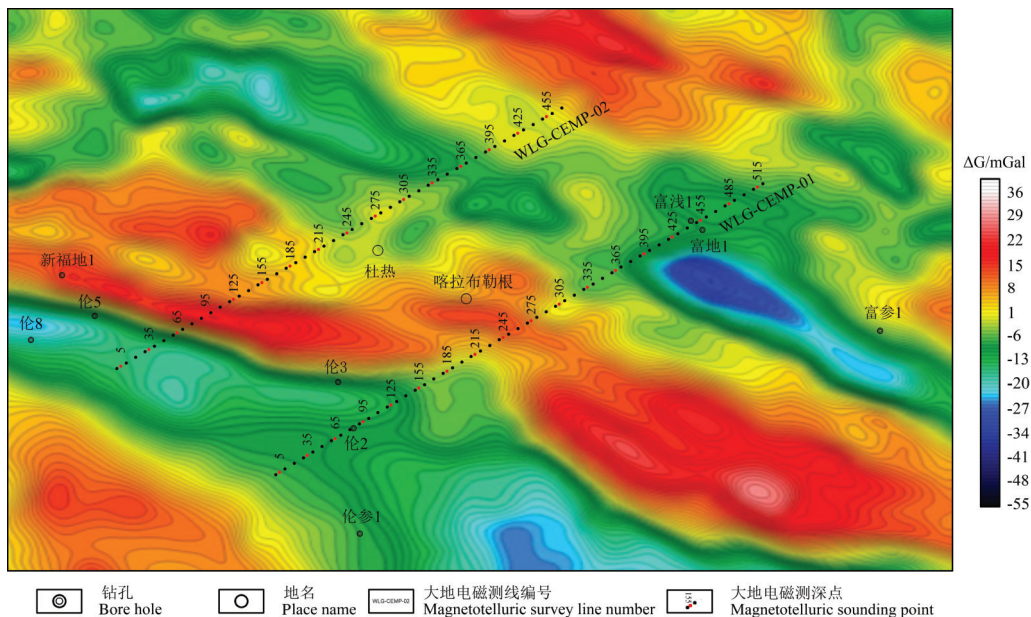


图10 研究区剩余重力异常图  
Fig.10 Residual gravity anomaly map of the study area

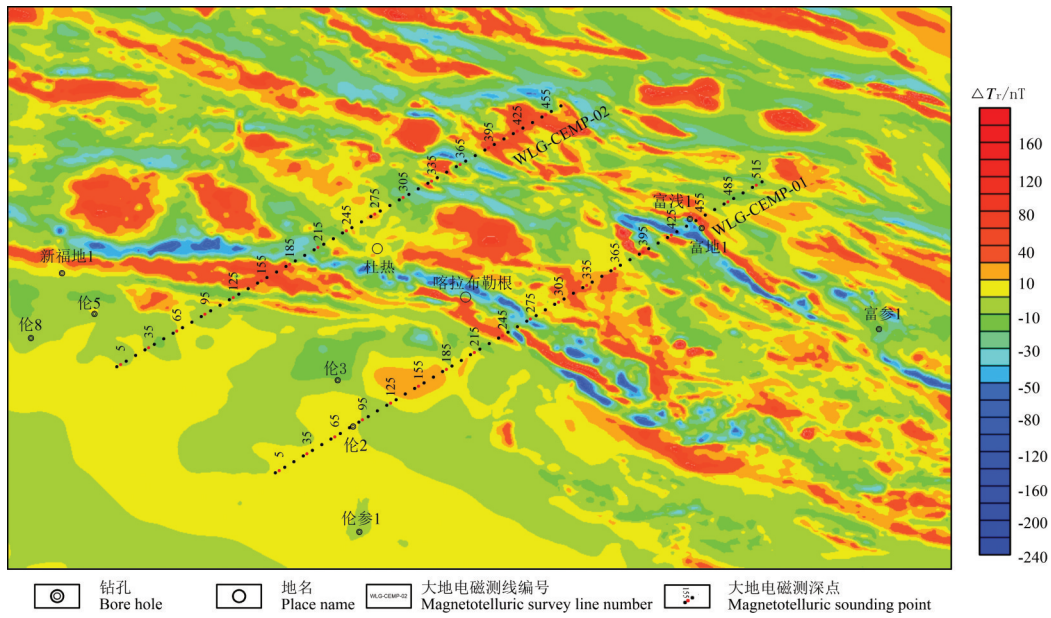


图11 研究区剩余航磁异常图  
Fig.11 Residual aeromagnetic anomaly map of study area

征,火山碎屑岩、碎屑岩呈低电阻率特征。因此,电法剖面结合磁力异常分布特征可以对石炭纪地层的分布进行综合解释。

### 5.4 石炭纪地层分布特征

#### 5.4.1 剖面特征

图13、图14分别为WLG-CEMP-01线、WLG-CEMP-02线综合解释剖面。图中的中下部高层层

反映上石炭统地层的分布,主要为火山岩地层,局部夹碎屑岩,总体表现出高阻特征;图中的下部中低阻层则反映下石炭统地层的分布,主要为碎屑岩沉积地层,局部地区夹火山岩地层,总体表现出中低阻特征。

在WLG-CEMP-01线78-106号点三叠系(T)与下石炭统滴水泉组(C<sub>1d</sub>)直接接触,在该区域由于

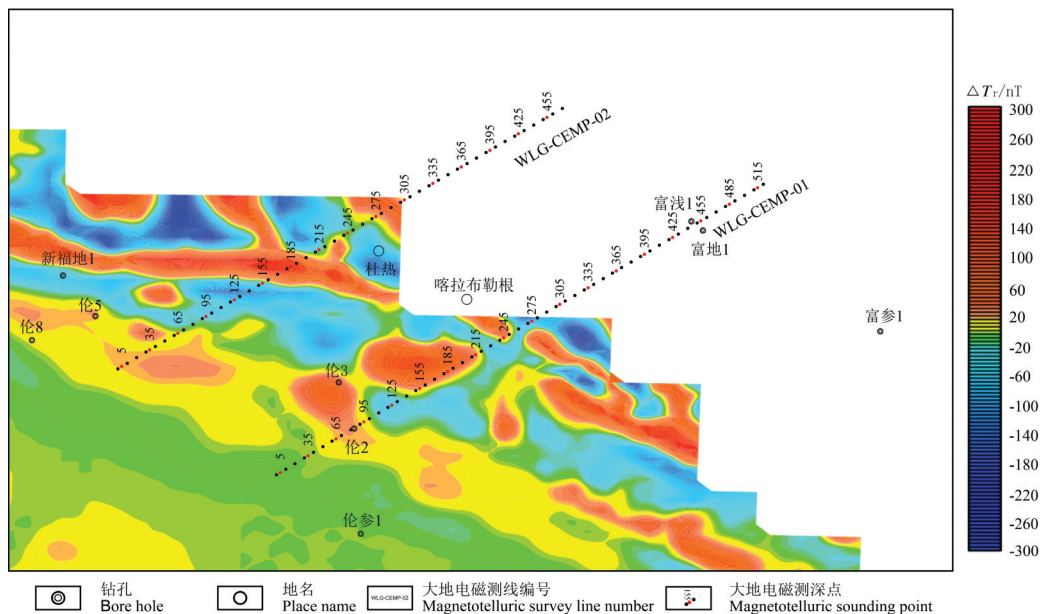


图12 研究区剩余地磁异常图  
Fig.12 Residual geomagnetic anomaly map in the study area



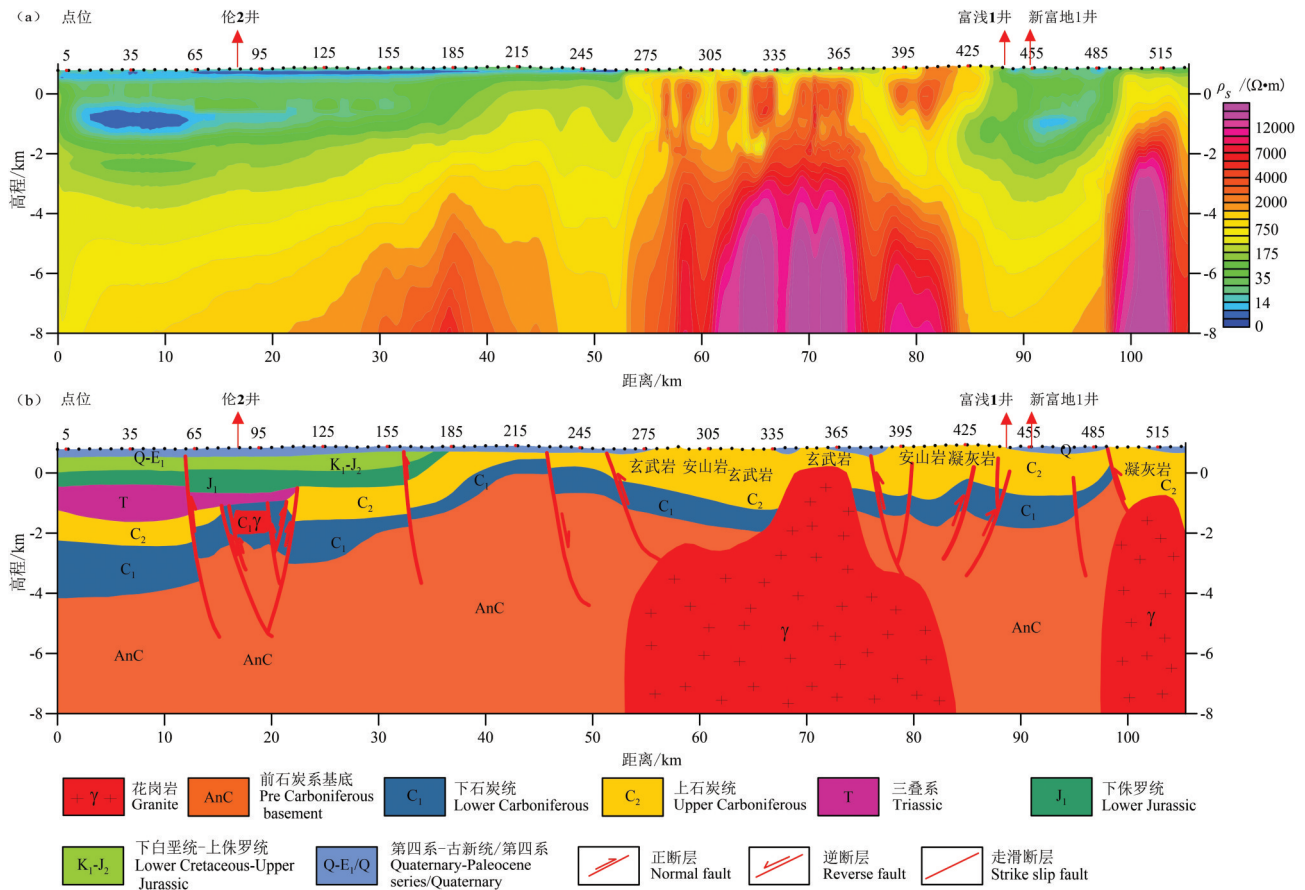


图 13 WLG-CEMP-01 线解释剖面图  
 Fig.13 Interpretation profile of line WLG-CEMP-01

断裂作用导致下石炭统滴水泉组(C<sub>1d</sub>)地层向南逆冲,上石炭统巴塔玛依内山组(C<sub>2b</sub>)地层缺失。除 WLG-CEMP-01 线 78-106 号点外,上石炭统(C<sub>2</sub>)在整条测线基本都有分布,主要岩性为火山喷发岩、火山碎屑岩和火山熔岩;下石炭统(C<sub>1</sub>),除了在红岩断阶北凸起 334-375 号点和科克森套隆起 495-528 号点没有分布,该地层在整条测线其他地区基本都有分布,主要岩性为砂泥岩、火山碎屑岩。

红岩断阶北凸起、科克森套隆起带大部分地段地表出露上石炭统火山岩,扎河坝拗陷、福海弧后裂谷盆地第四系-古新统地层厚度约几十米厚,覆盖在石炭纪地层上。

5.4.2 石炭系底面埋深特征

由研究区石炭系底面埋深图(图 15)可见,索索泉拗陷至乌伦古北隆起带石炭系底面埋深总体呈现出“南西部深、中部和北东部浅、扎河坝拗陷和福海拗陷较深”的特征,按构造单元分别叙述如下:

索索泉拗陷:其北侧断裂活动强烈,断距较大,上盘红岩断阶带抬升较高,下盘索索泉拗陷沉积厚度较大,沉降中心紧靠北侧的断阶带,拗陷表现为南薄北厚、南缓北陡的箕状形态;石炭系底面埋深一般在 3200~6800 m,最深处可达 7000 m 以上。

红岩断阶:北与红岩断阶北凸起相接,南与索索泉拗陷相接。从三叠纪晚期一直持续到侏罗纪晚期,在由北向南的挤压力作用下,工作区发生南北沉降分异,北部抬升,主体呈现南深北浅的斜坡构造形态,石炭系底面埋深一般在 1200~3800 m。

红岩断阶北凸起:位于红岩断阶北东部,扎河坝拗陷和福海拗陷南西部,主体呈北西走向,局部表层为第四纪地层,中生界缺失,上石炭统在该区大部分地区出露,深部有巨大花岗岩岩体侵入,石炭系底面埋深一般在 1200~2800 m。

扎河坝拗陷和福海拗陷:北西向展布沉积构造,扎河坝拗陷石炭系底面埋深一般在 1200~2800 m,福



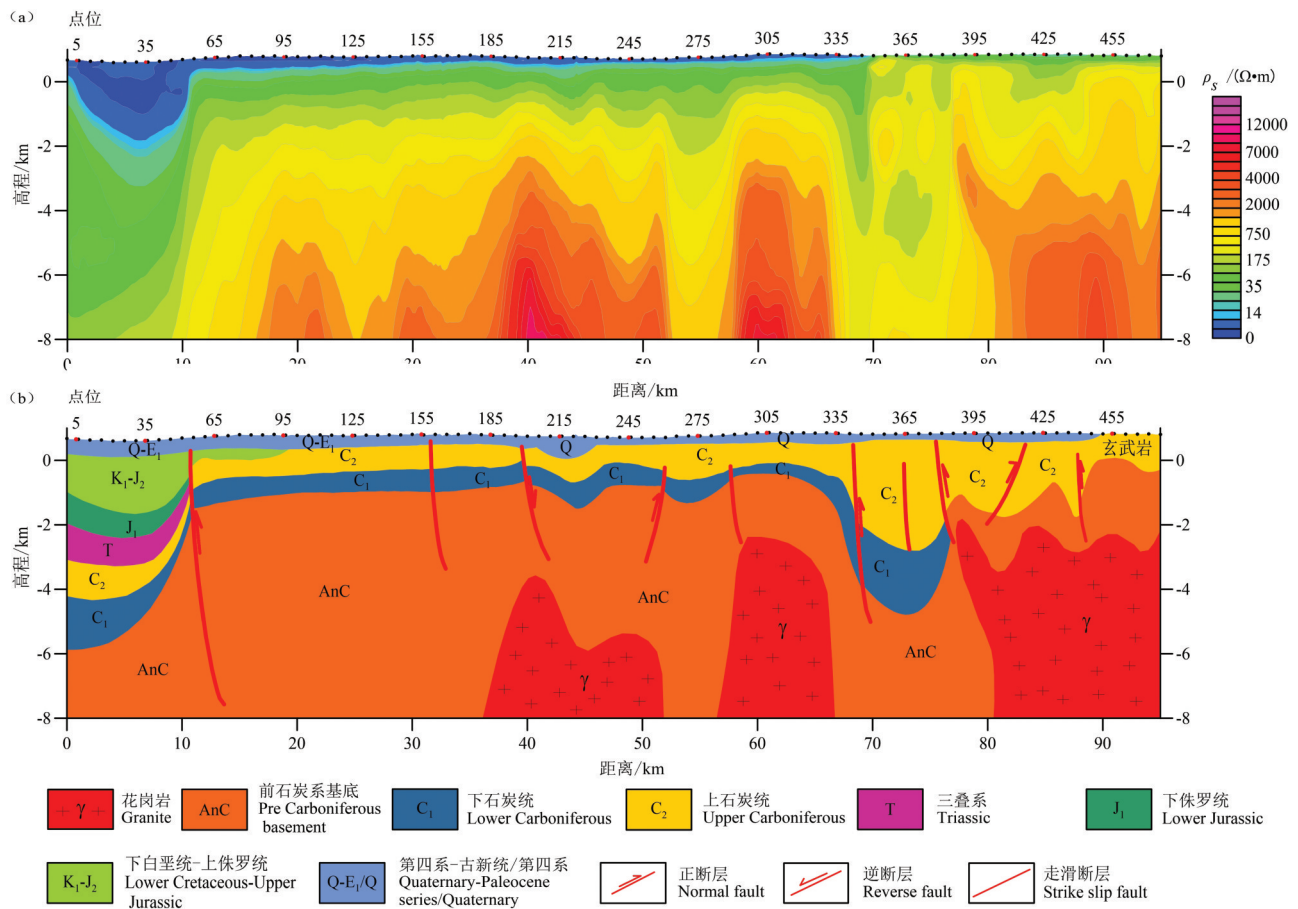


图14 WLG-CEMP-02线综合地质解释剖面(a)和二维共轭梯度反演剖面(b)  
Fig.14 Interpretation profile of line WLG-CEMP-02

海坳陷石炭系埋深一般在2400~5000 m。

科克森套隆起:主体呈北西走向,与南侧的坳陷表现为高角度冲断接触关系,石炭系埋深一般在1200~3200 m。

#### 5.4.3 石炭系厚度分布特征与油气前景分析

由研究区石炭系厚度图(图16)可见,石炭纪地层在研究区内基本都有分布,上石炭统比下石炭统分布更广,厚度也更厚。南西部索索泉凹陷石炭系残留厚度最大,厚度1000~3000 m,其中上石炭统厚度300~1000 m,下石炭统厚度700~2000 m;扎河坝坳陷石炭系残留厚度900~2800 m,其中上石炭统厚度600~1800 m,下石炭统厚度300~1000 m,新富地1井钻遇石炭纪地层及厚度与大地电磁测深反演剖面解释吻合较好;福海坳陷石炭系残留厚度1000~4500 m;中部和北东部的红岩断阶、红岩断阶北凸起、科克森套隆起石炭纪残留厚度最浅,厚度1000~

2000 m。

整个石炭纪地层在索索泉凹陷、扎河坝坳陷、福海坳陷是3个沉降中心;石炭纪地层在红岩断阶向北东方向埋深逐渐变浅,下石炭统厚度逐渐变浅,几乎尖灭,此区域不具备油气勘探前景,但到福海坳陷和扎河坝坳陷,石炭纪地层埋深突然变深,生油层及储盖组合都超过1000 m,两个坳陷具有一定的油气勘探前景。

## 6 结论

通过乌伦古坳陷至乌伦古北隆起带大地电磁测深资料采集、处理与反演,结合以往重磁电震资料综合解释,获得以下认识:

(1) 研究区石炭纪地层埋深总体呈西南部深、北东浅、扎河坝坳陷和福海坳陷较深的特征,索索泉凹陷石炭系残留厚度最大,福海坳陷、扎河坝坳

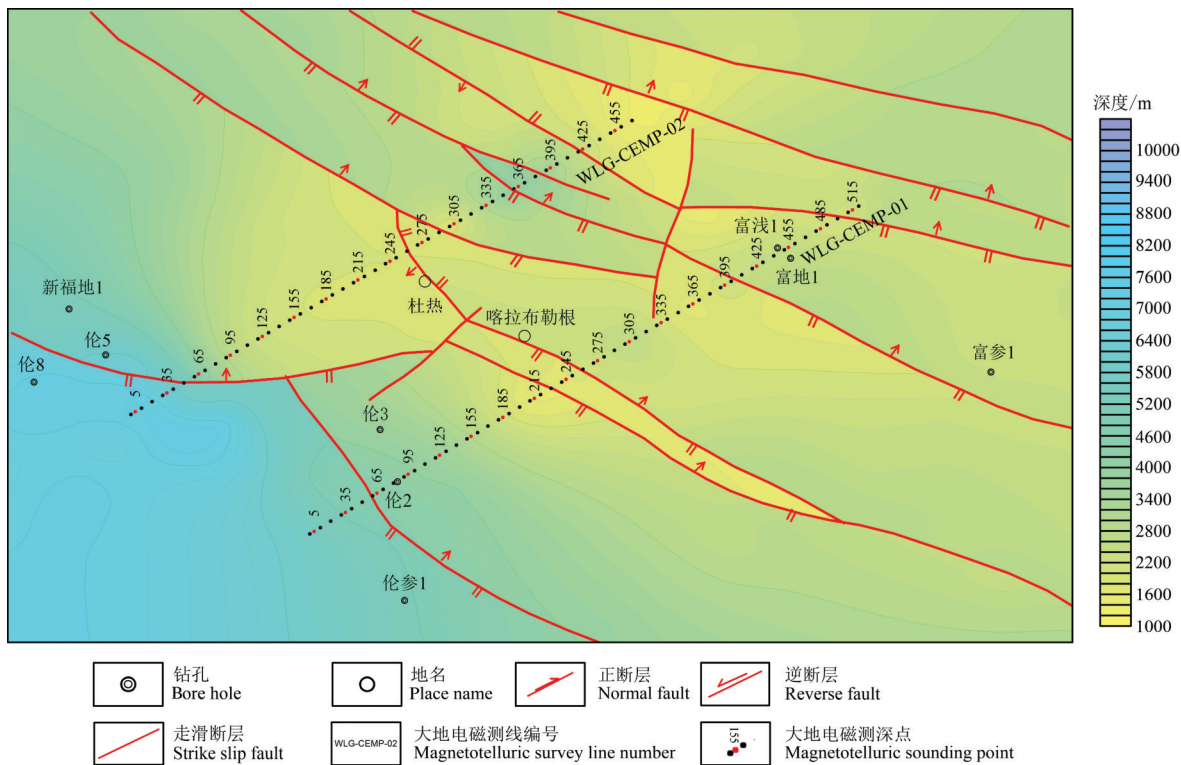


图 15 乌伦古坳陷至乌伦古北隆起带石炭系底面埋深图

Fig.15 Carboniferous base layer Buried depth map from Wulungu Depression to Wulungu North Uplift Zone

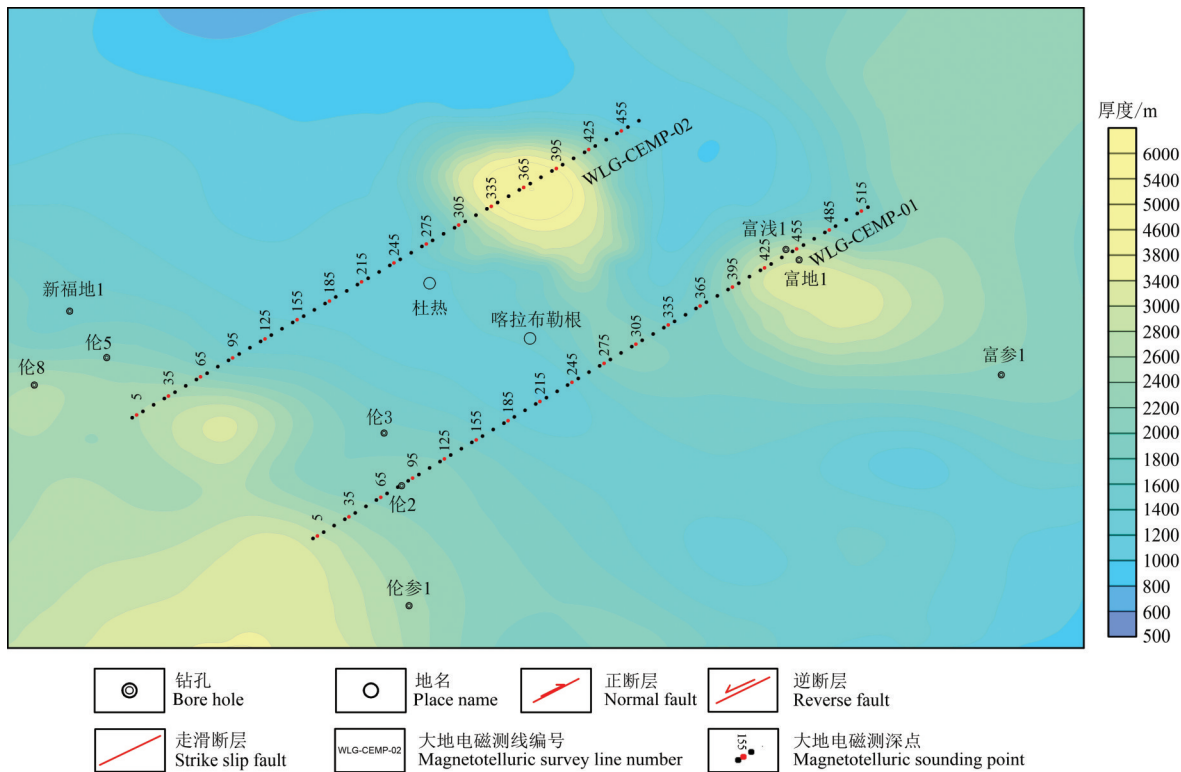


图 16 乌伦古坳陷至乌伦古北隆起带石炭系厚度图

Fig.16 Carboniferous thickness map from Wulungu Depression to Wulungu North Uplift Zone

陷石炭系残留厚度次之,红岩断阶、红岩断阶北凸起、科克森套隆起石炭系残留厚度最浅。

(2)除了局部地区上石炭统在研究区均有分布,下石炭统除科克森套隆起及红岩断阶北凸起局部地段其他地区均有分布,初步确定了上下石炭统的界面。

(3)索索泉凹陷、福海坳陷和扎河坝坳陷3个构造单元下石炭统生油层、上石炭统和中生界储集层、中生界盖层整个生储盖组合和含油气条件较好,圈闭构造油气成藏条件具备,具有较好的油气勘探前景。

## References

- Chen Leshou, Wang Guange. 1990. Magnetotelluric Sounding Method[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Chen Zhankun, Xie Guojun, Zhang Fushun. 2010. Petroleum geologic characteristics and exploration strategy in Wulungu Depression of Junggar Basin[J]. Xinjiang Geology, 28(1): 67–70(in Chinese with English abstract).
- Dai Shikun, Li Li. 1999. EMAP data processing under complex terrain and surface conditions[C]//Annual General Assembly of the Chinese Geophysical Society, 74(in Chinese).
- Dai Shikun, Xu Shizhe. 1997. Rapid inversion of magnetotelluric data for 2-D and 3-D continuous media[J]. Oil Geophysical Prospecting, 32(3): 305–317(in Chinese with English abstract).
- Guo Jianying, Li Zhiming. 2009. Study of gas source and characteristics of Carboniferous hydrocarbon source rock in the Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 31(3): 275–282(in Chinese with English abstract).
- Guo Qiang, Li Ziyang, Qin Mingkuan, Zhong Dakang, Zhang Fangdong, Jia Cui, Wu Jun. 2014. Discussion of hydrothermal sedimentary sequence in Baiyinchagan Sag of Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 32(5): 810–815(in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Chen Xinfu, Kuang Jun, Yuan Hang, Fan Chun, Tang Yong, Wu Xiaozhi. 2010. Distribution of Carboniferous source rocks and petroleum systems in the Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 37(4): 397–408(in Chinese with English abstract).
- He Sheng. 2017. Wulungu Region in Junggar Basin carboniferous source characteristics and potential of oil and gas[J]. Science Technology and Engineering, 17(12): 167–172(in Chinese with English abstract).
- Hu Zhuzhi, Hu Xiangyu, Wu Wenpeng, Sang Zhuo. 2005. Compared study of twodimensional magnetotelluric inversion methods[J]. Coal Geology & Exploration, 33(1): 64–68(in Chinese with English abstract).
- Kang Min, Hu Xiangyun, Kang Jian, Li Deqing. 2017. Compared of magnetotelluric 2D inversion methods[J]. Progress in Geophysics, 32(2): 476–486(in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Liu Dongqin, Yang Lunkai, He Lanfang. 2004. Application of continuous electromagnetic profiling in exploration in foothill belt[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 43(5): 492–496(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaojun, Wang Jialin, Wu Jiansheng. 2007. Inversion algorithm of 2D magnetotelluric data using regularized conjugate gradient method[J]. Shanghai Land & Resource, 101(1): 71–74(in Chinese).
- Nan Dongchen, Qiang Jianke. 2012. Application of magnetotelluric inversion of continuous media to Lujiang– Zongyang ore[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 9(3): 273–278(in Chinese with English abstract).
- Pu Dan, Lei Wan, Li Yi, Wang Kai, Chen Siyu. 2013. Application of geophysical data in the comprehensive interpretation of petroleum geology and geophysics[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 37(4): 18–25(in Chinese with English abstract).
- Qin Xin, Xu Wenrui, Wen Jun, Song Zhihua, Yang Jun. 2019. Research and application of seismic exploration technology in Ulungur area, Junggar Basin[J]. Xinjiang Oil & Gas, 15(3): 1–6(in Chinese with English abstract).
- Sun Weibin, Luo Weifeng, Song Qunhui. 2002. Application of acquisition system with remote reference in complex area for electro-magnetic exploration[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 12(4): 275–277(in Chinese).
- Tan Shaoquan. 2012. Carboniferous formation characteristics and exproation direction for Wulungu Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 34(4): 65–68(in Chinese).
- Wang Jiaying. 1997. New development of magnetotelluric sounding in China[J]. Acta Geophysica Sinica, 40(s1): 206–216(in Chinese with English abstract).
- Wang Qianjun, Cao Gaoshe, Xing Zhou, Wangjinduo. 2018. Geochemical features and geological significance of oil seepages in Northeastern Wulungu Depression[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 39(4): 377–383(in Chinese with English abstract).
- Wang Shengzhu, Li Yanli, Zhang Kuihua, Lin Huixi, Qu Yansheng. 2015. Thermal pyrolysis of hydrocarbon generation for different carboniferous source rocks in Junggar basin[J]. Global Geology, 34(3): 697–704(in Chinese with English abstract).
- Wei Wenbo. 2002. New advance and prospect of magnetotelluric sounding (MT) in China[J]. Progress in Geophysics, 17(2): 245–254(in Chinese with English abstract).
- Xu Xingyou, Zhu Rifang, Wang Youyan, Wang Xianmei. 2003. Hydrocarbon generation simulation of hydrocarbon source rocks in Dishuiquan Formation, East Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 22(4): 9–12(in Chinese with English abstract).
- Yan Jiayun, Lü Qintian, Luo Fan, Chen Anguo, Ye Gaofeng, Zhang Yongqian, Zhang Kun, Zhao Jinhua, Zhang Chong, Liu Zhendong, Liu Yan. 2019. Where is Qinzhou– Hangzhou juncture belt? Evidence from integrated geophysical exploration[J]. Geology in



- China, 46(4): 690–703703(in Chinese with English abstract).
- Yang Jing, Xiao Hongyue, Jiang Yadong, Yang Wu. 2015. The study and application of static displacement correction for magnetotelluric sounding data processing[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 37(2): 187–192(in Chinese with English abstract).
- Yang Sheng, Bao Guangshu, Zhang Quansheng. 2002. A study on the application of remote reference magnetotelluric sounding technique[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 26(1): 61–66(in Chinese with English abstract).
- Yang Sheng, Yao Zhilong, Liu Junchang. 2002. Magnetotelluric sounding study of the northern Hebei depression[J]. *Geology in China*, 29(4): 421–425(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianguo, Wu Xin, Zhao Haitao, Qi Youzheng, Fang Guoyou. 2015. A simulated annealing method for time-domain electromagnetic survey data inversion[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 37(1): 220–225(in Chinese with English abstract).
- Zhang Kuihua, Li Yanli, Zhang Guanlong, Bai Zhongcai. 2013. The further understanding of Carboniferous source rocks in Wulungu Depression[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, (5):1–6(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lin, Du Xiaodi, Li Feng, Li Zhao, Sun Xiangcan, Li Qingyao, Tang Yong. 2016. Hydrocarbon source rocks evaluation of the Wulungu Depression, Junggar Basin[J]. *China Mining Magazine*, 25(9):141–147(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenhao, Wang Dandan, Li Shizhen, Zhou Xingui, Zhang Jiaodong, Liu Weibin, Zhou Ximing, Wang Peiye. 2019. The application of gravity magnetic-electric prospecting engineering for Carboniferous-Permian petroleum geological survey in Sanjiang Basin, Heilongjiang Province[J]. *Geology in China*, 46(1): 191–201(in Chinese with English abstract).
- Zhu Chuanqing, Yang Shuijiang, Li Tongbin, Liu Haiying. 2007. Application of optimization layering technology to CEMP profile in Kekeya complicated fore mountains area[J]. *Progress in Geophysics*, 22(2): 562–566(in Chinese with English abstract).
- 陈乐寿,王光镔.1990.大地电磁测深法[M].北京:地质出版社.
- 陈占坤,谢国军,张福顺.2010.准噶尔盆地乌伦古坳陷石油地质特征及勘探方向[J].*新疆地质*, 28(1):67–70.
- 戴世坤,李丽.2002.复杂地形和地表条件下EMAP资料处理[C]//中国地球物理学会第十五界年会论文集, 74.
- 戴世坤,徐世浙.1997.MT二维和三维连续介质快速反演[J].*石油地球物理勘探*, 32(3):305–317.
- 国建英,李志明.2009.准噶尔盆地石炭系烃源岩特征及气源分析[J].*石油实验地质*, 31(3):275–282.
- 何登发,陈新发,况军,袁航,樊春,唐勇,吴晓智.2010.准噶尔盆地石炭系烃源岩分布与含油气系统[J].*石油勘探与开发*, 37(4):397–408.
- 何胜.2017.准噶尔盆地乌伦古地区石炭系油气源特征及潜力探讨[J].*科学技术与工程*, 17(12):167–172.
- 胡祖志,胡祥云,吴文鹏,桑卓.2005.大地电磁二维反演方法对比研究[J].*煤田地质与勘探*, 33(1): 64–68.
- 康敏,胡祥云,康健,李德庆.2017.大地电磁二维反演方法分析对比[J].*地球物理学进展*, 32(2):476–486.
- 刘宏,刘东琴,杨轮凯,何兰芳.2004.连续电磁剖面法在山前带勘探中的应用[J].*石油物探*, 43(5):492–496.
- 刘小军,王家林,吴健生.2007.二维大地电磁正则化共轭梯度法反演算法[J].*上海国土资源*, 101(1):71–74.
- 南东辰,强建科.2012.大地电磁连续介质反演在庐枞矿集区的应用[J].*工程地球物理学报*, 9(3): 273–278.
- 蒲丹,雷宛,李怡,王凯,陈思宇.2013.综合物探资料在油气地质地球物理综合解释中的应用[J].*东北石油大学学报*, 37(4):18–25.
- 秦鑫,徐文瑞,温军,宋志华,杨军.2019.新疆准噶尔盆地乌伦古地区地震勘探技术攻关与应用[J].*新疆石油天然气*, 15(3):1–6.
- 孙卫斌,罗卫峰,宋群会.2002.复杂地区电磁法勘探远参采集系统的应用[J].*物探装备*, 12(4):275–277.
- 谭绍泉.2012.乌伦古坳陷石炭系地层特征与勘探方向[J].*石油天然气学报*, 34(4):65–68.
- 王家映.1997.我国大地电磁测深研究新进展[J].*地球物理学报*, 40(s1):206–216.
- 王千军,曹高社,邢舟,王金铎.2018.乌伦古坳陷东北侧油苗地化特征及其意义[J].*新疆石油地质*, 39(4):377–383.
- 王圣柱,李艳丽,张奎华,林会喜,曲彦胜.2015.准噶尔盆地石炭系不同类型烃源岩生烃模拟研究[J].*世界地质*, 34(3):697–704.
- 魏文博.2002.我国大地电磁测深新进展及展望[J].*地球物理学进展*, 17(2):245–254.
- 徐兴友,朱日房,王岫岩,王先美.2003.准噶尔盆地准东滴水泉组烃源岩生烃物理模拟研究[J].*大庆石油地质与开发*, 22(4):9–12.
- 严加永,吕庆田,罗凡,陈安国,叶高峰,张永谦,张昆,赵金花,张冲,刘振东,刘彦.2019.钦杭何在?来自综合地球物理探测的认识[J].*中国地质*, 46(4): 690–703.
- 杨婧,肖宏跃,蒋亚东,杨武.2015.几种大地电磁测深资料静态位移校正方法的研究与应用[J].*物探化探计算技术*, 37(2):187–192.
- 杨生,鲍光淑,张全胜.2002.远参考大地电磁测深法应用研究[J].*物探与化探*, 26(1):61–66.
- 杨生,姚治龙,刘俊昌.2002.冀北坳陷大地电磁测深研究[J].*中国地质*, 29(4): 421–425.
- 张建国,武欣,赵海涛,齐有政,方广有.2015.时间域电磁勘探数据的模拟退火法反演研究[J].*电子与信息学报*, 37(1): 220–225.
- 张奎华,李艳丽,张关龙,白仲才.2013.乌伦古坳陷石炭系烃源岩再认识[J].*西南石油大学学报(自然科学版)*, (5):1–6.
- 张林,杜小弟,李锋,李昭,孙相灿,李清瑶,唐勇.2016.准噶尔盆地乌伦古坳陷主力烃源岩分析[J].*中国矿业*, 25(9):141–147.
- 张文浩,王丹丹,李世臻,周新桂,张交东,刘卫彬,周锡明,王佩业.2019.重磁电勘探在黑龙江三江盆地石炭系一二叠系油气地质调查中的应用[J].*中国地质*, 46(1): 191–201.
- 朱传庆,杨书江,李同彬,刘海樱.2007.最优化电性分层技术在柯克亚山前带的应用[J].*地球物理学进展*, 22(2):562–566.

## 中文参考文献