文章编号：1004—5589（2018）01—0250—09

伊通盆地西北缘断裂乐山南段电磁异常特征与地质单元

孙晓东[1,2]，曾昭发[1,2]，王学刚[1,2]，于清水[3]，张建民[1,2]，刘卓[1,2]

1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院，长春 130026；
2. 国土资源部 应用地球物理重点实验室，长春 130026；
3. 中国电力工程顾问集团 东北电力设计院有限公司，长春 130021

摘要：本文运用可控源音频大地电磁测深（CSAMT）方法对伊通盆地西北缘断褶带进行勘探。将所得的电性剖面与区域地质地球物理资料进行有机结合后，对研究区域进行了综合地质解释，发现研究区由大黑山隆起、西北缘断褶带及伊通盆地三个地质单元构成。通过电性剖面特征共划分出两条北东向的断裂（F_1, F_2），一条近东西向的断裂（F_3），确定了各地层结构，以及地层单元间的接触关系为构造接触。

关键词：伊通盆地；断褶带；电性剖面；地质单元；CSAMT

中图分类号：P631.325；P542.3　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2018.01.023

Electromagnetic anomalies and geological units in southern Leshan segment of the northwestern margin of Yitong Basin

SUN Xiao-dong[1,2], ZENG Zhao-fa[1,2], WANG Xue-gang[1,2], YU Qing-shui[3], ZHANG Jian-min[1,2], LIU Zhuo[1,2]

1. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;
2. Ministry of Land and Resources Key Laboratory of Applied Geophysics, Changchun 130026, China;
3. China Power Engineering Consulting Group Northeast Electric Power Design Institute Co. Ltd, Changchun 130021, China

Abstract: The aim of the study is to use the CSAMT method to explore the fault-fold belt in the northwestern margin of Yitong Basin. Comprehensive geologic interpretation of the study area is achieved on the basis of the combination of the electrical profile obtained from each survey line and the regional geophysical data. The result shows that the study area consists of three geological units, e.g. the Daheishan uplift, the fold belt in the northwestern margin and the Yitong Basin. Two NE-trending faults (F_1 and F_2) and one nearly EW-trending fault (F_3) are delineated by the electrical profile features. The stratigraphic framework is subsequently defined and tectonic contact between the stratigraphic units is identified.

Key words: Yitong Basin; fault-fold belt; electrical profile; geological unit; CSAMT

0 引言

伊通—舒兰断裂带（伊舒断裂），沿北东向贯穿吉林省中部，全长约300 km，宽5～20 km。断裂带内发育厚达近6 km的中、新生代陆相沉积地层，是中国重要的油气、地热资源勘探区。前人在该地区开展了众多研究，章振铨提出“伊舒断裂带上地慢上隆引起垂直应力增大，导致最大剪应力

收稿日期：2017-05-16；**改回日期**：2017-11-27
基金项目：吉林省长白山玄武岩地区地热资源调查（2014-13）.
通讯作者：于清水（1989－），男，工程师，主要从事工程与环境地球物理研究及基桩检测. E-mail：yuqingshui@nepdi.net

的增大，使北东向的伊舒断裂带表现出较大的活动性”的地震成因观点[1]；周永胜认为从晚白垩至古近纪末，伊舒盆地的演化依次经历了裂谷前隆升剥蚀、张裂深陷、充填淤积和后期改造 4 个阶段[2]；殷长建等通过对中、细粒黑云母二长花岗岩中黑云母单矿物的放射性同位素定年的研究后，讨论和概括了伊通—舒兰断裂带在侏罗世—古近纪时期，构造性质的多次复杂演化历史[3]；唐大卿等认为盆地西北缘受侧向挤压形成 2 ~ 4 km 宽的西北缘断褶带，具有良好的油气成藏条件和潜力[4]；李默然认为盆地西北缘的构造样式有挤压走滑型构造和强挤压型构造[5]。虽然前人在伊通盆地做过非常多的工作，但由于地震资料没有覆盖到盆地的西北缘边界，而且盆地地表因受到植被和第四系风化层覆盖，断裂很少出露地表，导致以往对西北缘断裂带内部的性质认识不一致[6-9]。本文在前人研究的基础之上，通过可控源音频大地电磁测深反演得到电阻率剖面，结合区域地质资料对研究区进行了综合地质解释，讨论了伊通盆地西北缘断褶带乐山南段的可控源电磁响应特征、地质特征和构造特征。研究证实，伊通盆地西北缘断裂带的性质有利于油气的运移和成藏，对指导伊通盆地的进一步油气勘探具有一定的指导意义。

1　郯庐断裂与伊通盆地

1.1　场区地质背景

郯庐断裂是中国东部规模宏大的北东向断裂带，其北段过渤海湾，沿辽河一带进入吉、黑两省，经伊通、舒兰、依兰、罗北延伸进入俄罗斯境内，断裂沿途多次被北西向或东西向断裂截切，形成了一系列右旋阶梯状构造[10-14]，其中活动性强烈的地段往往扩展为局部断陷盆地，如渤海湾盆地、下辽河盆地。吉林省境内，郯庐断裂在四平二龙山水库、孤店子两处分别被北西向的东辽河断裂和北西向的第二松花江断裂截切，其间在西北和东南两支边缘断裂的控制下演化发展为新生代伊通断陷盆地（图 1）。盆地由莫里青断陷、鹿乡断陷和岔路河断陷 3 个二级构造单元和西北缘断褶带等三

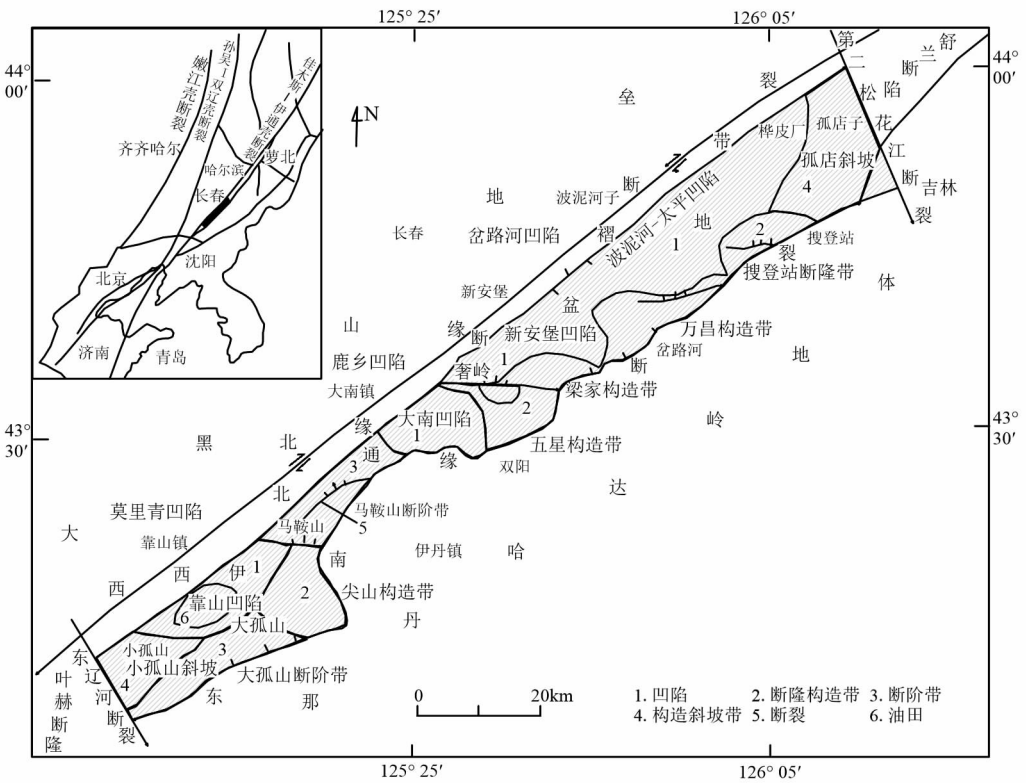


图 1　伊通盆地构造单元划分图[4]

Fig. 1　Tectonic unit division map of Yitong Basin

级构造单元组成[15]。盆地内部沉积充填了巨厚古近系地层，厚度一般在 2 000 ~ 5 000 m。从图 1 中可以看出在盆地西北缘断裂控制下，自西北侧大黑山隆起向东南经 2 ~ 4 km 宽的西北缘断褶带过渡到伊通盆地断陷区。本次利用 CSAMT 测量结果进行研究，探明了区内西北缘断褶带及其两侧的电磁响应，构造特征和地层单元。

1.2 场地及周边地质环境

测量场地位于乐山镇向南 2 km 处，东西介于倪家屯和于家磨坊之间，横跨低丘陵和平原两个地貌单元，其界线呈北西向延展。测量场地介于两个地质单元之间（图 2），西侧为大黑山隆起，大面积出露早古生代志留系桃山组地层（S_1t），岩性为粉细砂岩夹泥晶灰岩；中间出露白垩系泉头组地层（K_1q），岩性为粉细砂岩为主夹杂泥岩层，含水性较好；东部为断陷区，地形平坦，出露地层为新生代始新统地层（E_2-3s），岩性以黑色泥岩为主，少量灰色粉细砂岩[16]。CSAMT 测线近垂直于上述不同时代地层界线布设，以期取得较好的地质探测效果。

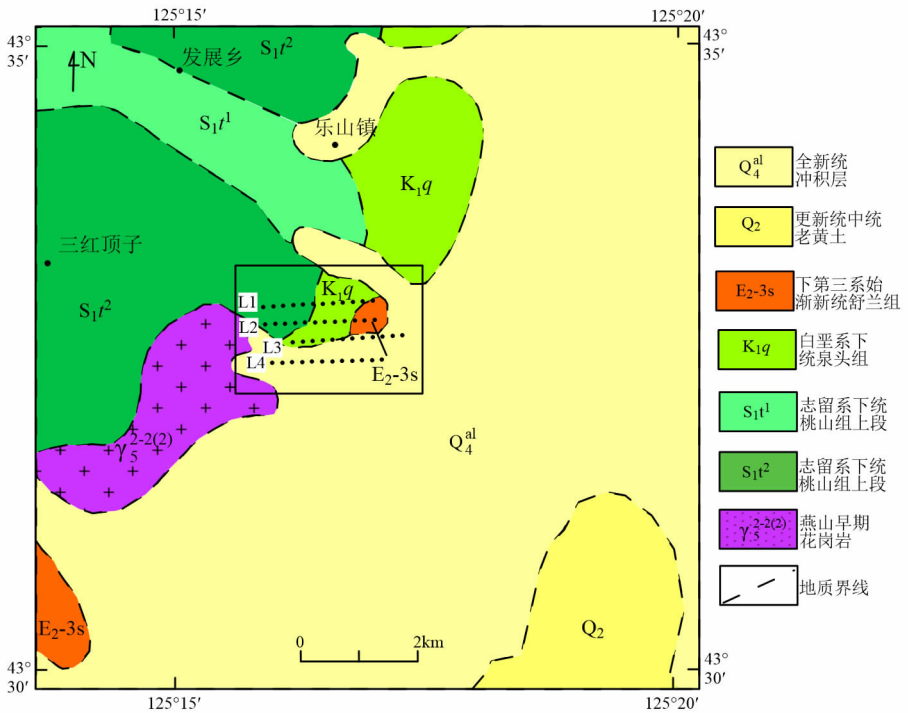


图 2 研究区及其周边地质图

Fig. 2 Geological map of studied area and its surrounding

2 CSAMT 测量的数据反演

为查明本场地内伊通盆地西北缘及其两侧的构造特征，采用 CSAMT 方法进行测量，根据场地所处的地形地貌特征及其地层走向等特征，在勘探区内由北至南依次布设 4 条（L1 ~ L4）近东西向测线，测线间距为 300 m，测点间距为 50 m（图 2），每条测线均为 1.8 km 长，剖面方向由西向东，收发距 >10 km。为保证观测数据的可靠性，对 L1 线的第 130 测点进行重新布线观测，两次观测结果的残差曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出，两次观测结果的极差为 35 Ω · m，视电阻率均方根相对误差为 2.48%，满足≤5% 的规范要求。两次测量结果只有在低频段具有一定变化，中、高频部分具有较高的一致性，说明本次研究所应用的数据可靠。

为了提高数据反演效果，采用 Phoenix 公司提供的 CMT Pro Version4.2 软件将观测到的数据转化到 TM 模式下的视电阻率和相位值，用 CSAMT 数据预处理软件（MTsoft2D）进行静态校正和空间滤波等处理，用美国 Zonge 公司开发的软件

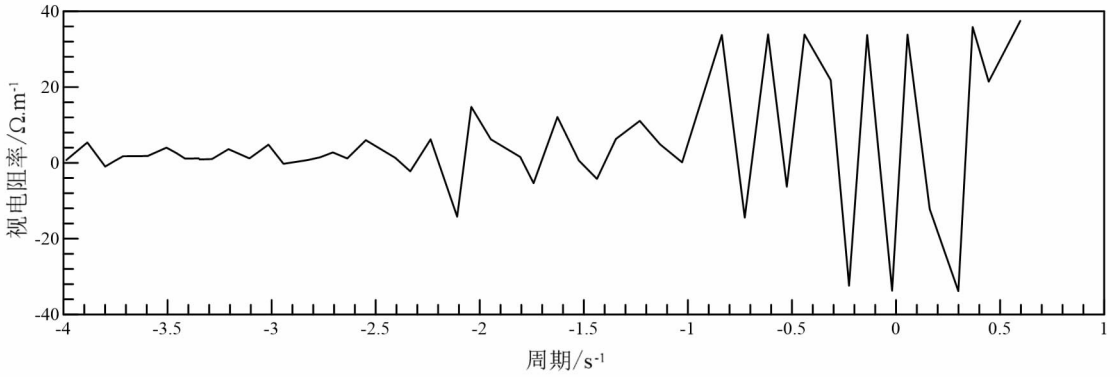


图 3　视电阻率残差曲线

Fig. 3　Curve of resistivity residual

（SCS2D）进行反演。反演初始模型为 Bostic 模型，反演层数设置为 31 层，最大反演深度设置为 2 900 m。各测线的拟合差如图 4 所示，反演最大拟合差不超过 11，反演结果具有较大的可信度，各测线电阻率剖面如图 5 ~ 图 8 所示，从图中可以看出，各电阻率剖面数值上的连续性、变化规律的相似性以及形态特征的可比性，宏观上再次验证了反演结果的可靠性。

3　CSAMT 测量结果的地质解释

在电剖面中电阻率参数及形态特征是岩性、岩体形态和产状的电性反应。电阻率值相同或相近的点，剖面中的高阻相对低阻的分界面或不同电性体的接触面，均可在相邻的剖面中具有一定的电性反应，这些规律为识别断裂、划分底层并赋予相应的地质体及地质意义提供依据。

3.1　电性特征与断裂

以 4 条电阻率剖面提供的电性信息为基础，参考区域地球物理资料和地质构造的研究成果[17-21]，在测线控制区内共划定 3 条断裂（图 9）。

F_1 断裂　在 L1 ~ L4 剖面中的位置分别为 108 测点、208 测点、302 测点和 406 测点，断裂电性表现为近于垂向的低阻带，电阻率值 < 100 Ω · m，两侧为不同的高阻地层，沿断裂方向，虽然电阻率发生一定变化，但低阻带的形态和产状是稳定的。断层走向近南北，高角度略倾向东，在 L2 线与 L3 线之间受 F_3 断裂影响，断裂走向由近南北向转为北北东向。

F_2 断裂　在 L1 ~ L4 剖面中的位置分别为 131 测点、225 测点、321 测点和 421 测点，L1 线与 L2 线在断层处电性特征表现为明显的高、低阻地层的接触带，两侧电阻率值相差 10 倍以上，沿断裂各剖面的电阻率有一定变化，尤其在 L3 剖面和 L4 剖面中断裂电性参数信息减弱，但从野外地面露头、基底形态及中、高阻电性地层断续特征上证实断层仍然存在。断裂走向北东，高角度倾向西北，东南侧为巨厚超低阻层，厚度 > 2 500 m，表明 F_2 东南侧为断陷区。

F_3 断裂　在 L1 ~ L4 电性剖面中，根据电阻率数值和形态特征，又可将其分为两组：L1，L2 为一组形态相同的高阻剖面；L3，L4 为一组形态相近的低阻剖面，并且这两组剖面间形态特征仍具有相似性和可比性，特别是 F_1 断裂以极其相似的“人”字形电阻率特征纵贯 4 条剖面，但两组剖面电阻率值在 L2 和 L3 线间发生跃变，据此推断 L2 和 L3 线间存在一条近东西向的断裂 F_3。F_3 断裂南侧沉积盘，控制了古近系低阻层和新近系地层沉积。

根据 F_1 和 F_2 断裂两侧的地质特征、岩性分布和地层结构，经对比分析可以看出，F_1 和 F_2 断裂分别为伊通盆地西北缘断褶带的西支和东支断裂，F_1 为西北缘断裂，F_2 为控盆断裂，F_1 和 F_2 断裂之间为断褶带，被中生代白垩系地层充填。

3.2　电性特征与地层结构

CSAMT 方法勘探深度在正常情况下可达到 3 000 m ±，并能进行纵向电性分层，但随着勘探深度的增加，其分辨率会随之降低，只能从宏观上划分构造层。笔者以纵向电性分层为基础划分构造

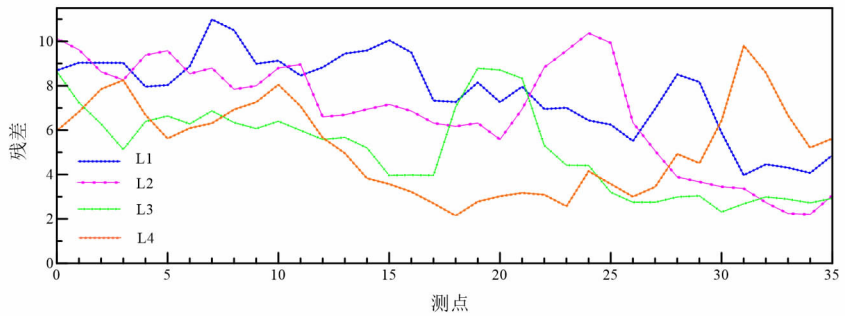


图 4 反演结果拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of inversion result

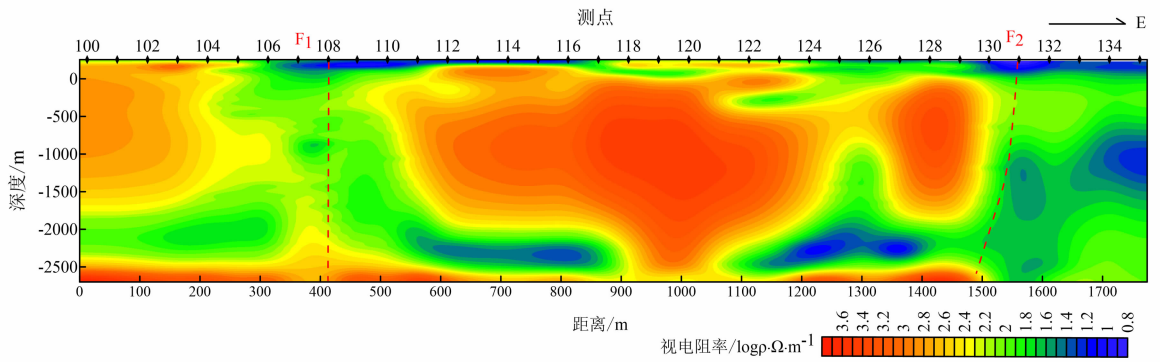


图 5 L1 线电性剖面图

Fig. 5 Electrical profile of L1 line

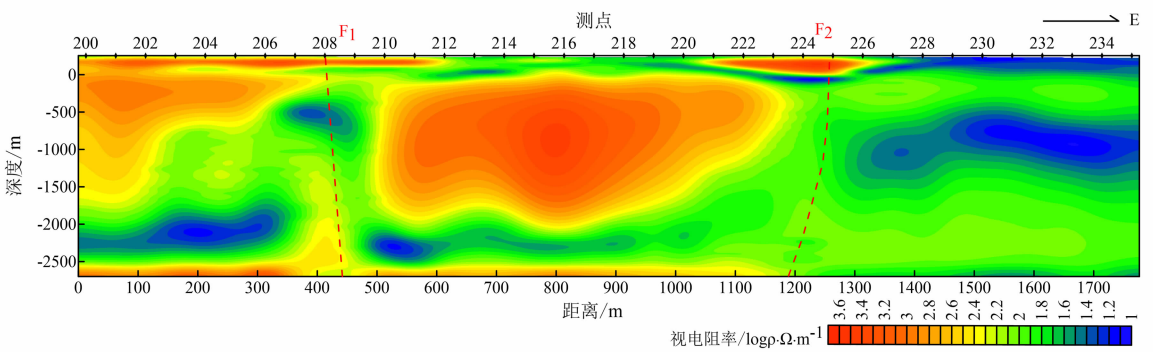


图 6 L2 线电性剖面图

Fig. 6 Electrical profile of L2 line

层，在本场区内取得了较好的地质效果。

以 L2 剖面为例（图 10），不考虑地表第四系分布不均匀引起的局部异常，在西北缘断褶带内（F_1 与 F_2 之间）电剖面表现为 3 个电性层，自上而下为：

中生代泉头组粉细砂岩层（K_1q），电阻率 100 Ω · m ±，近水平状，厚 200 m；中生代营城组安山岩、凝灰岩（K_1y），电阻率为 1 000 Ω · m ±，近水平状发育，厚 1 700 m；中生代沙河子组砂砾岩层（$K_1\hat{s}$），电阻率 100 Ω · m ±，呈近水平状发育，厚约 700 m；下部为高阻基底。

在 F_2 断裂以东断褶皱区内，快速堆积了新生代始新统低阻层，亦可划分为 3 个构造层，该结果与前人场地邻近测量的莫里青工区地震剖面的 3 个

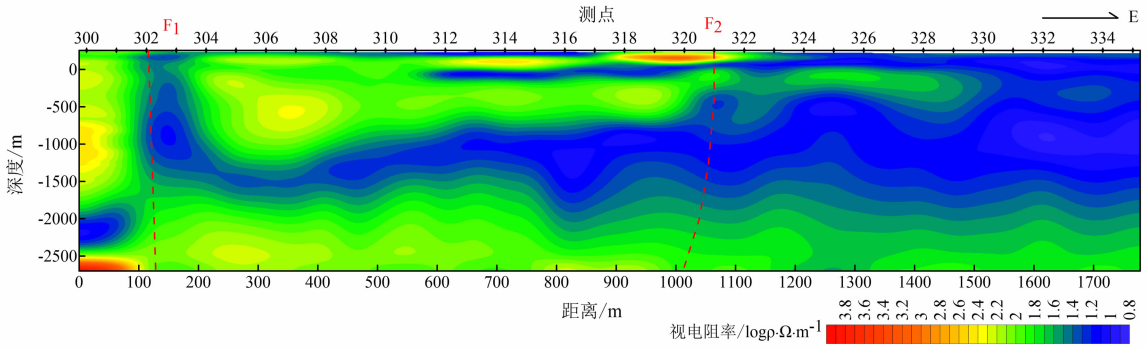


图 7　L3 线电性剖面图

Fig. 7　Electrical profile of L3 line

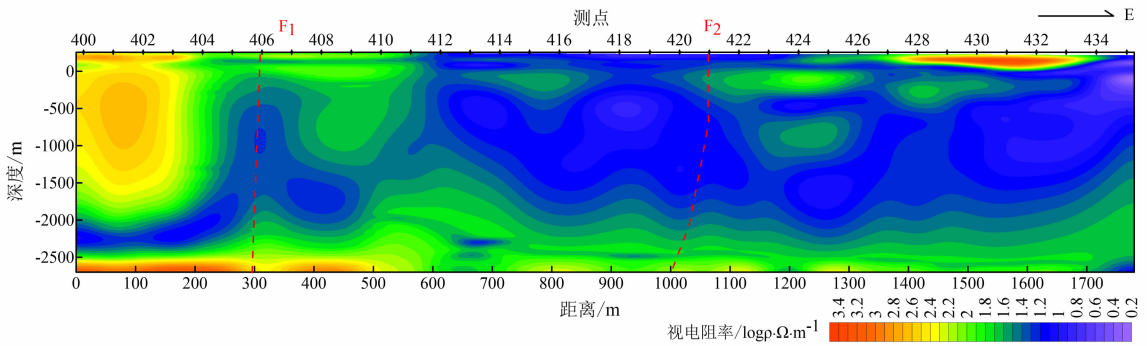


图 8　L4 线电性剖面图

Fig. 8　Electrical profile of L4 line

构造层相一致[14]，自上而下为：

近水平状发育 600 m 厚的始新统泥岩、粉细砂岩互层，电阻率为 80 ~ 100 Ω · m；近水平状发育，厚约 600 m 的始新统奢岭组地层，岩性为黑色泥岩为主夹杂粉细砂岩，电阻率在 50 Ω · m ±；水平状发育厚度达 1 500 m 的始新统双阳组地层，岩性为粉细砂岩夹泥岩层，电阻率介于 80 ~ 100 Ω · m 之间。

3.3　电性特征与地质单元

将断层划定结果与场区地质图对比可以看出，实测断裂与场区内地表地质界限高度吻合，即 F_1 断裂是早古生代地层与中生代地层的分界线，F_2 为中生代地层与新生代地层的分界断裂，二者将乐山南段划分为 3 个电阻率差异明显的地质单元（图 9），依次为大黑山隆起、伊通盆地西北缘断褶带及伊通盆地，相邻地质单元为断层接触关系。场区南部划分的 F_3 断裂与近东西向延展的第四系地质界线是一致的，在 F_3 断裂南侧，F_2 断裂东南部超低阻始新统地层增厚，视电阻率仅 20 Ω · m ±。

以 L2 剖面为例，各地质单元中地层的电阻率参数为：F_1 断裂西北侧为大黑山隆起，其早古生代桃山组地层电阻率值介于 300 ~ 600 Ω · m；F_1 与 F_2 之间为西北缘断褶带，其中生代泉头组地层电阻率为 100 Ω · m ±；F_2 以东南侧为伊通盆地，其新生代始新统地层电阻率值介于 50 ~ 80 Ω · m。

3.4　断裂与油气成藏的控制作用

综合 4 条电性剖面的电阻率分布特征及地层结构再次证实伊通盆地西北缘为一反转构造，通过对场区的野外观察和电性剖面分析，F_1 断裂和 F_2 之间中、高阻岩体呈串珠状分布，顶部呈断续分布，表明伊通盆地西北缘出现了大规模的挤压破碎带与剥蚀等作用，这些地质作用的结果为油气的运移和储存提供了有利空间，在西北缘褶皱带内出现的雁列式断块构造圈闭、岩性圈闭，为油气的聚集成藏

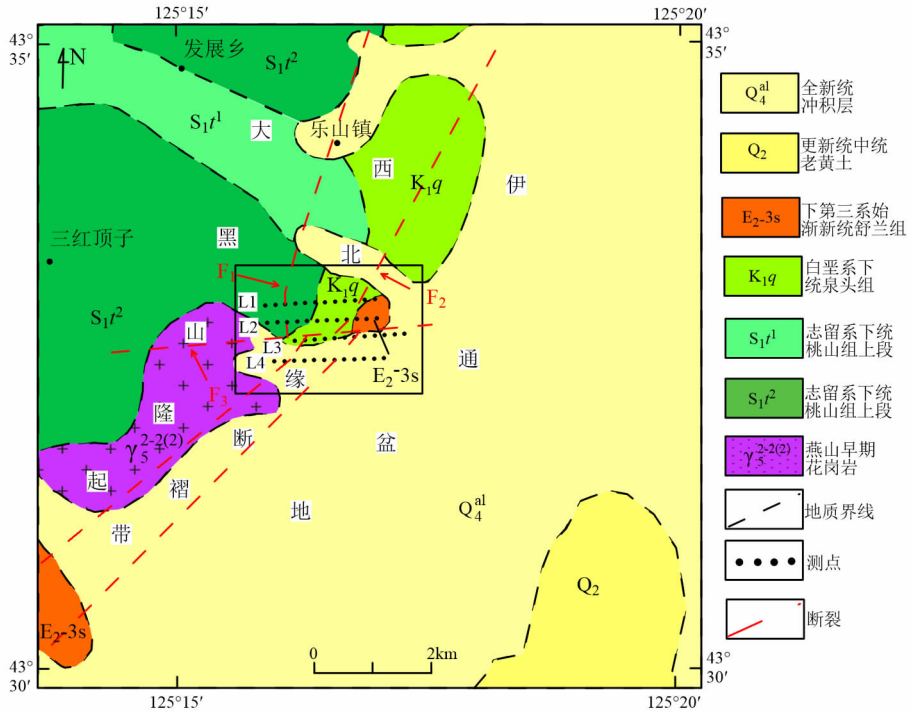


图 9　场区断裂与岩性分区图

Fig. 9　Fracture of field area and lithologic zoning map

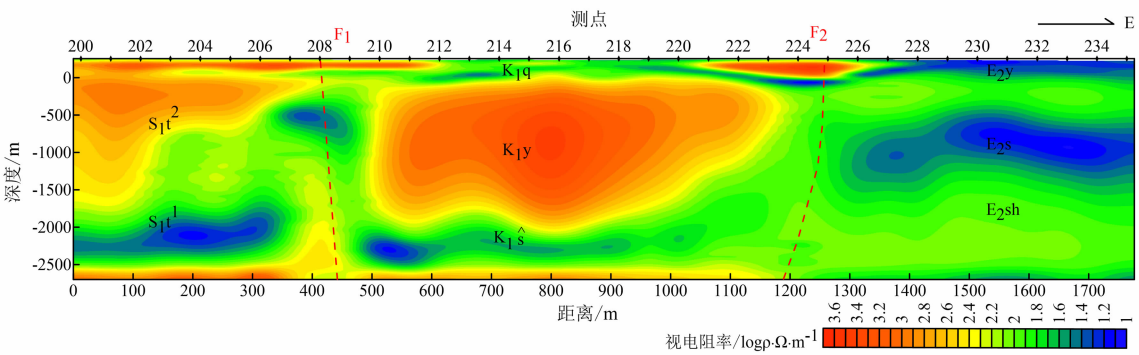


图 10　地质剖面解释图

Fig. 10　Interpretation of geological profile

提供了优质的封闭条件。

4　结论

（1）在研究场区内共划分出了 3 条断裂，探明了乐山南段由大黑山隆起、西北缘断褶带以及伊通盆地 3 个地质单元构成，各地质单元电性特征显著，相互间接触关系为构造接触。

（2）CSAMT 方法在乐山南段的应用中，在断裂推断、地质单元划分以及地层结构划分方面均具有良好的效果，为认识区域地质特征提供了重要信息。

致谢　感谢《吉林省长白山玄武岩地区地热资源调查》项目对本文的资助，并特别感谢张良怀研究员对本文的帮助。

参考文献：

［1］ 章振铨. 松花江断裂活动特征及伊舒断裂带地震成

因机制的初步探讨［J］. 防灾减灾学报，1987，3（3）：75-81.
ZHANG Zhen-quan. The faulting characteristics of Songhua River and Yishu fault earthquake genesis mechanism of preliminary discussion［J］. Journal of Disaster Prevention and Mitigation，1987，3（3）：75-81.

［2］ 周永胜，王东坡，杨丙中，等. 伊舒地堑的构造-沉积演化及其聚油条件［J］. 沉积与特提斯地质，1993，13（5）：1-15.
ZHOU Yong-sheng，WANG Dong-po，YANG Bing-zhong，et al. The tectonic and sedimentary evolution of the Yishu graben and its oil accumulating conditions［J］. Journal of Sediment and Tethys Geology，1993，13（5）：1-15.

［3］ 殷长建，彭玉鲸，王彦生，等. 伊舒断裂带年代学新证据［J］. 吉林地质，2005，24（1）：6-15.
YIN Chang-jian，PENG Yu-jing，WANG Yan-sheng，et al. The new evidence of Yishu fault chronology［J］. Journal of Jilin Geological，2005，24（1）：6-15.

［4］ 唐大卿. 伊通盆地构造特征与构造演化-典型走滑伸展盆地剖析：博士学位论文［D］. 北京：中国地质大学，2009.
TANG Da-qing. The structural character and tectonic evolution of Yitong Basin-analysis of a typical strike-slip and extensional basin：doctor's degree thesis［D］. Beijing：China University of Geosciences，2009.

［5］ 李默然. 伊通盆地西北缘鹿乡—岔路河断陷成藏条件研究：硕士学位论文［D］. 大庆：东北石油大学，2015.
LI Mo-ran. The study of the reservoir forming conditions for Yitong Basin northwestern edge Luxiang－Chaluhe：master's degree thesis［D］. Daqing：Northeast Petroleum University，2015.

［6］ 江涛，邱玉超，宋立斌，等. 伊通盆地西北缘断裂带的性质［J］. 现代地质，2009，23（5）：860-864.
JIANG Tao，QIU Yu-chao，SONG Li-bin，et al. Fault nature of north-west fault zone in Yitong Basin and its relation with reservoir accumulation［J］. Geoscience，2009，23（5）：860-864.

［7］ 孙丽娜，黄光明. 伊通盆地岔路河断陷西北缘断裂带构造特征研究［J］. 地质学刊，2009，33（4）：366-370.
SUN Li-na，HUANG Guang-ming. Tectonic characteristics of the fault zone in the northwestern margin of the Chaluhe fault depression in Yitong Basin［J］ Journal of Geology，2009，33（4）：366-370.

［8］ 李畅，胡望水，李涛，等. 伊通盆地西北缘反转构造特征分析［J］. 石化技术，2015，22（11）：142-143.
LI Chang，HU Wang-shui，LI Tao，et al. Analysis on characteristics of inversion structures in the northwestern margin of Yitong Basin［J］. Petrochemical Technology，2015，22（11）：142-143.

［9］ 田占峰，毛星，罗旭，等. 音频大地电磁测深法在电性结构研究中的应用：以郯庐断裂带宿迁段为例［J］. 物探与化探，2016，40（4）：732-736.
TIAN Zhan-feng，MAO Xing，LUO Xu，et al. The application of AMT method to the electrical structure study：a case study of Suqian sector of Tan－Lu fault zone［J］. Geophysical and Geochemical Exploration，2016，40（4）：732-736.

［10］ 刘昌铨，刘光夏，杜官恒. 从郯庐古裂谷中段的地壳结构特征探讨人工地震测深在矿产远景预测中的作用［J］. 物探与化探，1987，11（4）：19-27.
LIU Chang-quan，LIU Guang-xia，DU Guan-heng. The role of artificial seismic sounding in perdiction of one potential as investigated in the light of crustal rexture in the middle party of the Tanlu paleorift［J］. Geophysical and Geochemical Exploration，1987，11（4）：19-27.

［11］ 刘茂强. 伊通—舒兰地堑地质构造特征及其演化［M］. 北京：地质出版社，1993：1-2.
LIU Mao-qiang. Geological tectonic features and evolution of Yitong-Shulan graben［M］. Beijing：Geological Publishing House，1993：1-2.

［12］ 张凤旭，刘万崧，张兴洲，等. 用重力三方向小子域滤波解释伊通盆地断裂［J］. 地球科学，2009，34（4）：665-672.
ZHANG Feng-xu，LIU Wan-song，ZHANG Xing-zhou，et al. Explanation of faulted structure in Yitong Basin using three-directional small subdomain filtering［J］. Earth Science，2009，34（4）：665-672.

［13］ 孟婧瑶，刘永江，梁琛岳，等. 佳—伊断裂带韧性变形特征［J］. 世界地质，2013，32（4）：800-807.
MENG Jing-yao，LIU Yong-jiang，LIANG Chen-yue，et al. Characteristics of ductile deformation of Jiamusi-Yitong fault［J］. Global Geology，2013，32（4）：800-807.

［14］ 唐大卿，陈红汉，孙家振，等. 郯庐断裂带伊通段新生代构造演化特征及其控盆机制［J］. 大地构造与成矿学，2010，34（3）：340-348.
TANG Da-qing，CHEN Hong-han，SUN Jia-zhen，et al. Cenozoic tectonic evolution of the Yitong part of the Tan－Lu fault zone and its control on Yitong Basin［J］.

Tectonics and Metallogeny, 2010, 34 (3): 340-348.

[15] 唐大卿, 何生, 陈红汉, 等. 伊通盆地新近纪以来的反转构造特征 [J]. 石油学报, 2009, 30 (4): 506-512.
TANG Da-qing, HE Sheng, CHEN Hong-han, et al. Characteristics of inversion structures in Yitong Basin since Neogene [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30 (4): 506-512.

[16] 孙守亮, 郭巍, 刘群, 等. 伊通盆地鹿乡断陷始新统双阳组沉积相与沉积演化 [J]. 世界地质, 2010, 29 (3): 419-430.
SUN Shou-liang, GUO Wei, LIU Qun, et al. Sedimentary facies and evolution of Eocene Shuangyang Formation in Luxiang fault depression of Yitong Basin [J]. Global Geology, 2010, 29 (3): 419-430.

[17] 唐大卿, 何生, 陈红汉, 等. 伊通盆地断裂体系特征及其演化历史 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2009, 39 (3): 386-396.
TANG Da-qing, HE Sheng, CHEN Hong-han, et al. Fault system's characteristics of Yitong Basin and its evolution [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39 (3): 386-396.

[18] 邵建波, 毕守业. 吉林省东部主要北东向断裂带地质特征及地壳演化 [J]. 吉林地质, 1995, 14 (1): 35-39.
SHAO Jian-bo, BI Shou-ye. Geological characteristics and crustal evolution of the main northeastern fault zone in eastern Jilin Province [J]. Jilin Geology, 1995, 14 (1): 35-39.

[19] 刘万崧, 周云轩, 卢炎, 等. 基于位场信息的伊舒地堑莫里青断陷西北缘断裂性质 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2005, 35 (增刊1): 46-50.
LIU Wan-song, ZHOU Yun-xuan, LU Yan, et al. Faulted nature of the fault on the northwestern margin Yishu graben information to potential field Moliqing [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2005, 35 (Suppl. 1): 46-50.

[20] 李洪革, 李本才, 韩龙, 等. 伊通地堑二号断层几何学特征及其与油气关系 [J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39 (5): 614-617.
LI Hong-ge, LI Ben-cai, HAN Long, et al. Geometric feature of No. 2 fault in Yitong graben and its relation to oil-gas [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39 (5): 614-617.

[21] 闵伟, 焦德成, 周本刚, 等. 伊兰—伊通断裂全新世活动的新发现及其意义 [J]. 地震地质, 2011, 33 (1): 141-150.
WEI Wei, JIAO De-cheng, ZHOU Ben-gang, et al. The significance of discovery on Holocene activity on the Yilan –Yitong fault in Northeast China [J]. Seismology and Geology, 2011, 33 (1): 141-150.