

doi:10.3799/dqkx.2014.059

准噶尔中东部地区深部电性结构电磁探测

田少兵,蔡建超,胡祥云*,李建慧,曾思红,徐珊

中国地质大学地球物理与空间信息学院,湖北武汉 430074

摘要: 为了解准噶尔盆地深部构造特征,综合利用“深部探测技术与试验研究(SinoProbe)”项目在准噶尔盆地 45°N 88°E 处建立的大地电磁标准点实测资料,应用非线性共轭梯度法(NLCG)对该测站两条短剖面进行二维反演,结合新疆准噶尔盆地地质资料,对该地区地壳电性结构进行了初步分析,发现准噶尔盆地中东部地区地下结构具有很好的电性分层.与现有地质资料相结合,分析发现其电性分层与地壳分层具有较好的对应.根据岩石层电导性推断:研究区域莫霍面埋深在 46 km 附近,岩石圈厚度在 100 km 左右.研究结果对准噶尔中东部地区深部地壳结构的认识具有一定的参考价值.

关键词: 电磁探测;大地电磁;准噶尔盆地;非线性共轭梯度法(NLCG);电性分层;地壳结构;岩石圈.

中图分类号: P313.3 **文章编号:** 1000-2383(2014)05-0620-09 **收稿日期:** 2013-05-23

Deep Conductivity Structure in Middle-East Junggar Basin Using MT

Tian Shaobing, Cai Jianchao, Hu Xiangyun*, Li Jianhui, Zeng Sihong, Xu Shan

Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In order to understand the deep structural characteristics of Junggar basin, the conductivity structure of the region is analyzed in the paper using MT data obtained at standard points (45°N 88°E) in Junggar Basin based on SinoProbe project. Employing the method of nonlinear conjugate gradient for a 2D inversion of two short profiles in the study area, and analysis of the regional geological data, it is found that the ground has a good electrical layered structure in the middle-east Junggar Basin. A comparative analysis of the electrical layer and the crustal structure is made on the basis of geological data, finding that they show good consistency. Finally, it is concluded that the Moho depth is about 46 km, and the thickness of the lithosphere is about 100 km. The results can better the understanding of deep crustal structure in Middle-East Junggar Basin.

Key words: electromagnetic prospecting; magnetotellurics; Junggar basin; nonlinear conjugate gradient methods(NLCG); electrical layer; crustal structure; lithosphere.

0 引言

准噶尔盆地作为中国西部有利的油气战略接替区,已经成为西部油气勘探的热点区域和前沿领域,准噶尔盆地基底和地壳分层研究将对油气勘探具有重要意义.陈俊湘和陈景亮(2002)通过对地震波速度转换波特征的分析,认为准噶尔盆地缺失深变质岩系的结晶基底;徐果明等(2007)采用 Rayleigh 面波双台法从对中国西部地区三维横波速度的研究中得出准噶尔盆地有较高的上地幔速度结构,软流层

不明显;张季生等(2004)由航磁异常判断在准噶尔盆地地下存在太古代或早元古代陆壳,位于地壳深部的古老结晶基底为薄板状体,赋存于下地壳中;曲国胜等(2008,2009)运用转换波剖面、人工地震深反射—折射剖面和重磁反演等将准噶尔盆地地质结构划分为沉积盖层、古生界褶皱基底和结晶基底壳层,并阐述了不同时期沉积—构造空间展布规律;齐雪峰等(2010)对准噶尔盆地腹部深层断裂和古隆起特征进行了分析;李德江等(2005)从层序地层学角度建立了准噶尔全盆地范围的层序地层格架.但是从

基金项目: 深部探测专项(No.SinoProbe-02-01);国家自然科学基金(No.41274077);湖北省自然科学基金(No.2011CDA123);中国地质大学特色团队(No.CUG130103).

作者简介: 田少兵(1990—),男,硕士在读,地球探测与信息技术专业.E-mail:shaobing_tian@126.com

*** 通讯作者:** 胡祥云, E-mail: xyhu@cug.edu.cn

地下介质导电性对该地区进行地下地层结构分析,目前还未见到相关报到.本文以大地电磁测深为基础,对准噶尔盆地中东部地区地下电性结构进行分析,并与前人结果进行对比分析,分析结果对完善准噶尔地区深部地壳结构分层具有一定意义.

1 准噶尔地区地质概况

从全球大地构造角度看,新疆位于印度地台、阿拉伯—非洲地盾、俄罗斯地台和西伯利亚地台等古大陆之间的复杂巨型构造区的很小一部分(李锦铁和肖序常,1999).本研究的主要区域介于西伯利亚地台与塔里木—中朝地台之间的巨型地槽区内一个较大中间陆块,即准噶尔地块.准噶尔盆地位于新疆北部地区,是我国中西部重要的前陆盆地,面积约 13 万 km²,沉积厚度最大为 16 km 左右,是我国西部油气储量和产量最多的盆地,其腹部是我国第二大沙漠——古尔班通古特沙漠.本次探测的中心点位于准噶尔盆地—古尔班通古特沙漠中东部,测区地理坐标 44°28′N~45°17′N,87°40′E~88°30′E,如图 1 中所示.

2 大地电磁数据采集及处理

2011 年 8 月份,“深部探测技术与实验研究(Si-

noProbe)”项目中大地电磁参数标准网开始在准噶尔盆地建立 45°N 88°E 大地电磁参数标准点,野外采用 Lemi-417 和 MTU-5A 仪器分别进行长周期数据和宽频数据采集.标准点使用正十字布极方式进行观测,一个中心点同时辅助观测 8 个辅助观测站,其分布呈短“十”字剖面,中心测站采用宽频大地电磁仪加长周期大地电磁仪采集超宽频大地电磁场信号,中心观测站采集宽频(320.000 0~0.000 5 Hz)以及长周期(0.1~10 000.0 s)大地电磁信号,辅助测站采集宽频大地电磁场信号.辅助点宽频观测要求观测时间 20 h 以上,保证观测信号的频率范围达到 320.000 0~0.000 5 Hz;中心观测站长周期观测时间在一周以上,宽频观测在 20 h 以上,保证观测信号频率范围在 320.000 0~0.000 1 Hz 的范围内.中心点观测站点误差不超过 5 km,4 个方向的辅助测站分别距离中心点距离为 20 km 和 40 km,点位误差不超过 10 km(杨长福等,2003;程远志等,2011).测站布设有 2 条剖面,东西剖面:长 66 km,以中心点坐标为中心(ZXD),向东西各 2 个辅助测点(E1, E2, W1, W2);南北剖面:长 73 km,同样以中心点坐标为中心,向南北各 2 个辅助测点(S1, S2, N1, N2),如图 1 中红色测线所示.本文以这两条剖面为基础,分别对其进行处理和反演解释,并结合现有地质资料对该区深部电性结构进行初步研究.

首先,对所有测点的电性主轴方向、二维偏离

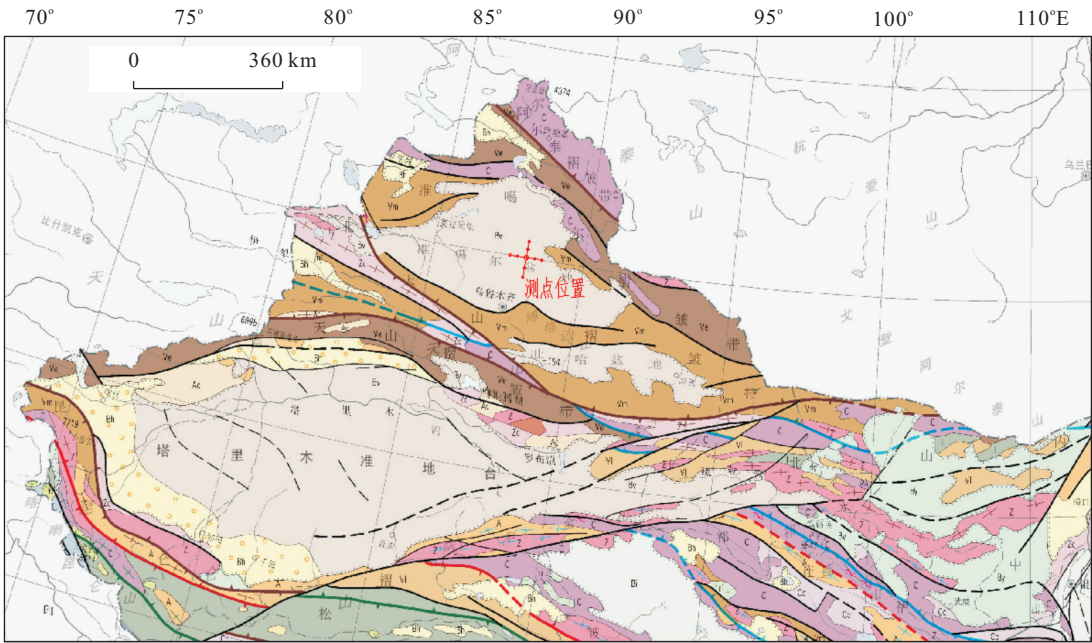


图 1 准噶尔盆地大地电磁测点位置
Fig.1 Measuring points of magnetotelluric in Junggar basin

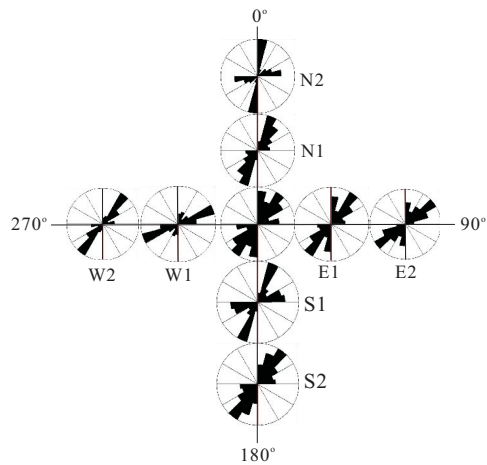


图 2 测区各测点阻抗张量的 Swift 最佳电性主轴分布
Fig.2 The distribution of best electrical axis with Swift impedance tensor principal of all measuring points of the survey area

度、视电阻率和阻抗相位曲线进行分析.如图 2 所示,为所有测点的阻抗张量 Swift 最佳主轴分布图,图中圆半径表示周期大小,半径越大表明周期越大,即低频部分对应信息.从图 2 中可以看出,整个测区电性主轴方向大致趋向于北东 40°,各测点具有较好的一致性.在确定了区域构造走向后,把坐标轴旋转到电性主轴方位上,并定义构造走向为 X 轴,则进行大地电磁数据转换即可得出两种模式的视电阻率和阻抗相位的频率响应,并定义 XY 模式为 TE 极化模式,YX 模式为 TM 极化模式.对每个测点进行二维偏离度计算,如图 3 所示,可以得出,研究区域 90%以上二维偏离度小于 0.3,除了在剖面西部低频部分出现了一小部分的横向不均匀外,研究区大部分地区二维偏离度都在 0.1 左右,说明研究区大部分地区地下结构具有很好的二维性,运用二维

模型可以较好的近似测区地下电性结构.因此,该测站东西和南北两条短剖面二维反演结果具有较大的可信度.

目前常用的具有代表性的二维反演方法有二维奥卡姆反演法 (Occam) (Groot-Hedlin and Constable, 1990), 二维快速松弛反演法 (RRI) (Simith and Booker, 1991), 非线性共轭梯度反演法 (NLGG) (Rodi and Mackie, 2001), 简化基奥卡姆反演方法 (ReBocc) (Siripunvaraporn and Egbert, 2000; 胡祖志等, 2005; 韩波等, 2012) 等.通过对该测站进行多种反演方法的二维反演,对比分析发现,各种方法在主要电性结构分界面上具有较高的一致性,其中非线性共轭梯度法的反演效果相对更好,由于研究区地下结构趋向于二维性,联合反演的效果相比单个 TM、TE 模式反演结果要好.本文展示其中效果较好的非线性共轭梯度法联合反演结果(图 4, 图 5),并对其电性结构进行分析.

在非 线性 共 轭 梯 度 法 (NLGG) (Rodi and Mackie, 2001) 反演中,目标函数定义为:

$$\varphi(m) = \Delta d^T V^{-1} \Delta d + \lambda m^T L^T L m, \tag{1}$$

式中: $\Delta d = d - F(m)$; $d = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T$ 为观测数据向量; $F(m)$ 为模型正演响应函数; $m = [m_1, m_2, \dots, m_N]^T$; λ 为正则化参数正定矩阵; V 代表残差向量的方差; L 为一简单的二次差分算子,当网格模型块是均匀的; Lm 是近似于视电阻率对数的拉普拉斯算子.

将(1)线性化处理后可得:

$$\varphi(m) \approx \tilde{\varphi}_0 = \frac{1}{2} \Delta m^T A \Delta m + B^T \Delta m + C, \tag{2}$$

式中:

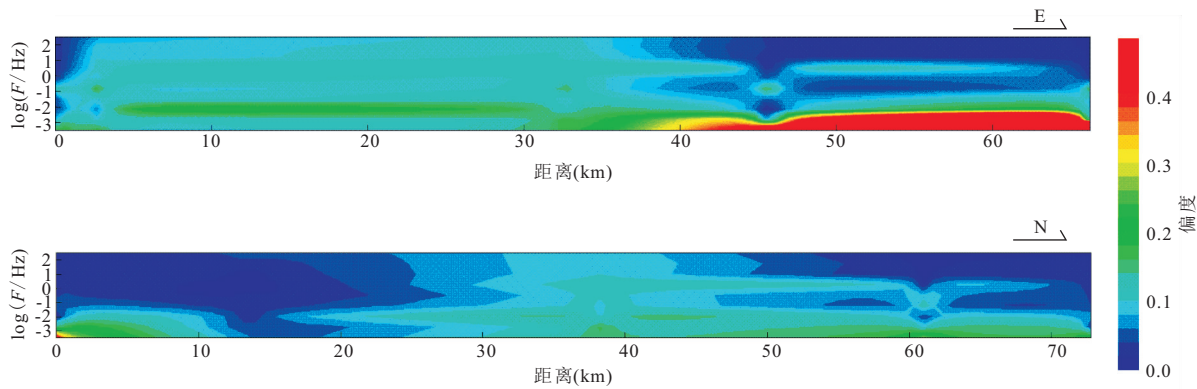


图 3 测区两条剖面的二维偏离度平面分布(东西向与南北向)

Fig.3 The plane distribution of 2D-approximator for the two profiles in survey area

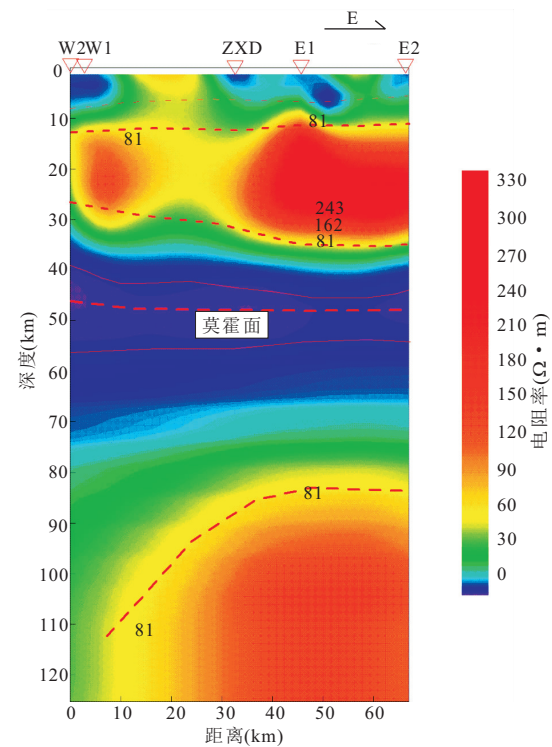


图 4 基于非线性共轭梯度法东西(W-E)方向二维反演剖面
Fig.4 The latitudinal direction profile(W-E) of 2D inversion based on nonlinear conjugate gradient methods

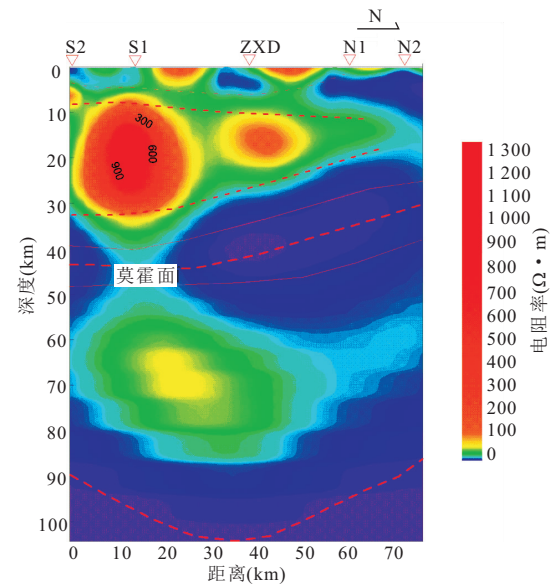


图 5 基于非线性共轭梯度法南北(S-N)方向二维反演剖面
Fig.5 The north-south direction profile(S-N) of 2D inversion based on nonlinear conjugate gradient methods

$A=2(G_0^T V^{-1} G_0 + \lambda L^T L),$
 $B=2(\lambda L L^T m_0 - G_0^T V^{-1} \Delta d_0),$
 $C=\Delta d_0^T V^{-1} \Delta d_0 + \lambda m_0^T L L^T m_0.$
求解的主要过程为:

$$\begin{cases} m_0 = given, \\ \varphi(m_k + \alpha_k p_k) = \min \varphi(m_k + \alpha p_k), k = 0, 1, 2, \dots, \\ m_{k+1} = m_k + \alpha_k p_k. \end{cases} \quad (3)$$

其通过非精确的一维搜索来确定每一步的步长 α_k , 无需计算 Hessian 矩阵, 其搜索方向通过迭代得到,

$$\begin{cases} p_0 = -C_0 g_0 \\ p_k = -C_k g_k + \beta_k p_{k-1} \end{cases}, k = 1, 2, \dots, \quad (4)$$

式中: C_k 为预条件因子, 并没有一个通用的预条件因子适合所有问题, 要依具体问题而定 (Newman and Alumbaugh, 2000; Newman and Boggs, 2004; 韩波等, 2012); β_k 是由 Polak-Ribiere 公式计算, 即:

$$\beta_k = \frac{g_k^T C_k (g_k - g_{k-1})}{g_{k-1}^T C_{k-1} g_{k-1}}, \quad (5)$$

其与共轭梯度法 (CG) 不同的是不要求搜索方向关于一些固定矩阵两两共轭, 只需要其满足如下条件即可:

$$p_k^T (g_k - g_{k-1}) = 0. \quad (6)$$

近年来非线性共轭梯度法广泛应用于地球物理反演问题, 相对于其他非线性反演方法其效率高, 计算稳定, 适用于大规模的地球物理反演问题. 运用该方法进行反演可以很好地兼顾反演速度和反演效果.

3 电性反演结果

结合该区地质及其他资料对二维反演结果进行分析, 可得到研究区深部电性结构特征, 具体分析如下:

W-E 剖面 (图 4): 整条剖面显示了很好分层性, 地表存在不连续的低阻带, 对应为新生代沉积层, 埋深从几百米到几千米不等, 向深部电阻率逐渐增加, 在 12~13 km 深处出现一明显的电性分层界面, 推断为沉积盖层基底界面; 埋深 12~33 km 深度存在一高阻层, 在西部高阻层较东部要薄, 且在 W1 点和 ZXD 之间存在一低阻薄弱带; 在埋深 46 km 左右存在一厚度 10~15 km 的高导层, 该高导层西厚东薄, 西部向上凸起; 在本剖面中, 埋深 85~115 km 处存在一东高西低的倾斜电性分界面.

S-N 剖面 (图 5): 从图中可以看出, 地表存在一南厚北薄的沉积层, 表现为不连续的低阻带, 测点南部可达到 6 km, 北部深度有 3 km 左右; 在 N1 点到 N2 段, 埋深 3~13 km 处存在一低阻块体, 并向北

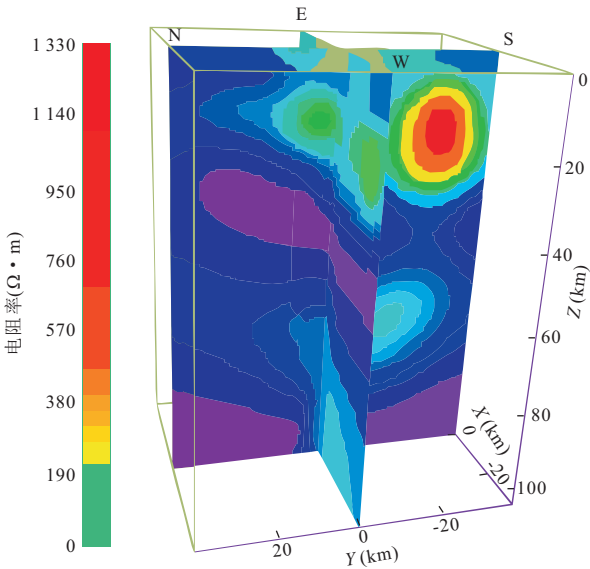


图 6 测区拟三维大地电磁反演剖面图(X 指向东,Y 指向北)
Fig. 6 Pseudo-Three-Dimensional magnetotelluric inversion profile of the survey area

延伸;埋深 9~12 km 处,存在一电性分界面,由南向北逐渐加深,并在 N1 点附近中断,推断其为沉积盖层基底界面;在 S1 和 S2 测点下方,存在一中心埋深 20 km,厚 20 km,南北延伸 25 km 的高阻异常体,且该异常体电阻率与其围岩相比高出很多,并向上层隆起;与 W-E 剖面相似,该剖面 40~45 km 埋深处,存在一厚度在 10 km 左右的高导层,该高导层在北部向上隆起,中心深度 35 km 左右,南部中心深度 45 km 左右,测点 S1 下方该深度处电阻率相对较高;在该剖面 90~100 km 深处存在一中心向下凹陷的上地幔低阻分界面。

将两条相互垂直的剖面结合可得出拟三维剖面,如图 6 所示,从图中我们可以看到,两条剖面在电性分层上有较好的吻合,在西南方向埋深 20 km 左右存在一较大的高阻层,向东北方向逐渐减薄,电阻率降低。下地壳低阻层也有很好的吻合,该低阻层由北西向东南倾斜,两条剖面在测站中心点埋深 45 km 附近汇合,向东南逐渐变薄。总的来看在三维结构上,该区域电性结构深度在 90 km 以内具有很好的成层性,深部 100 km 左右,两条剖面均出现了电性分层界面,但界面下层电阻率存在一定的差异。

4 准噶尔盆地深部电性结构探讨

从图 4 和图 5 两剖面不难看出,准噶尔盆地中东部地区,其地下电性结构成层性较为明显,可以把

该地区地壳的电性层分为上、中和下 3 层(鲁兵等, 2003;金胜等,2010),上层基本对应上地壳,浅层存在 8 km 左右的沉积岩层,在其下为 2~5 km 厚的结晶基底,在东西方向该层厚度平均在 12~13 km,且厚度较为均匀;在南北方向上,剖面北部 N1 到 N2 出现低阻块体,由于剖面测点长度有限,推测该低阻体与北部下地壳隆起有关,上地壳表现为南薄北厚,深度最大也达到 13 km 左右.此与很多以往得出的准噶尔盆地沉积盖层深度有较好的吻合(詹艳等,1999)。

中电性层为一连续高阻层,对应中地壳,厚度平均在 20 km 左右.东西方向上,高阻层厚度从西到东逐渐增加,范围在 15~20 km;南北方向上,南部高阻层厚度变化较大,最大可达到 30 km,从南向北逐渐变薄,最薄处大概 10 km 左右;根据相关地质资料(刘训,2005),将此高阻层岩性推测为花岗岩.由于测区位于准噶尔盆地中东部地区,属于稳定地块,因此推测在测点 S1 与 S2 下的高阻异常体为上地壳基底构造异常,该隆起与其下部上地幔向上凸起有关。

下电性层对应埋深 33~55 km 的地层,电阻率较低,且存在高导层.由于大地电磁反演的非唯一性,且地球电导率横向非均匀性对解释结果的影响,所确定的高导层埋深含有误差,与地震资料所得莫霍面相比较,出现幅度不大的上下浮动,就现有的资料很难将这一高导层单纯的归属于下地壳或是上地幔,根据该区域资料的统计平均而言,其更象是一个壳幔过渡带.通过之前的分析可以得到,在准噶尔盆地中东部地区地壳下部 40~55 km 深处存在一异常高导层,电阻率在 0~4 Ω·m 之间,东西方向较为均匀且大致呈水平层状结构,如图 4 中所示,高导层以 46 km 为中心;南北方向呈北高南低的层状分布特征,如图 5 中所示,剖面北部高导层中心界面在 35 km 左右,南部高导层中心界面在 45 km 左右,研究区地幔在北西部隆起.而有相关报到在青藏高原内部及柴达木盆地下部地壳 40~50 km 深存在地震波低速层,并将其解释为部分熔化(中国科学院地球物理研究所,1981);河西走廊盆地下部地壳 45~50 km 处存在异常低阻层,并将其解释为地壳、上地幔内水合二氧化碳等挥发性组分活动的原因(林长佑等,1984);由于准噶尔盆地大地热流密度值在 (41~61)×10⁶ W/m²,平均值为 53.4×10⁶ W/m²,比全国的平均值 63×10⁶ W/m² 要低得多,属于“冷盆”(刘训,2005),因此其低阻层是由于熔融或部分

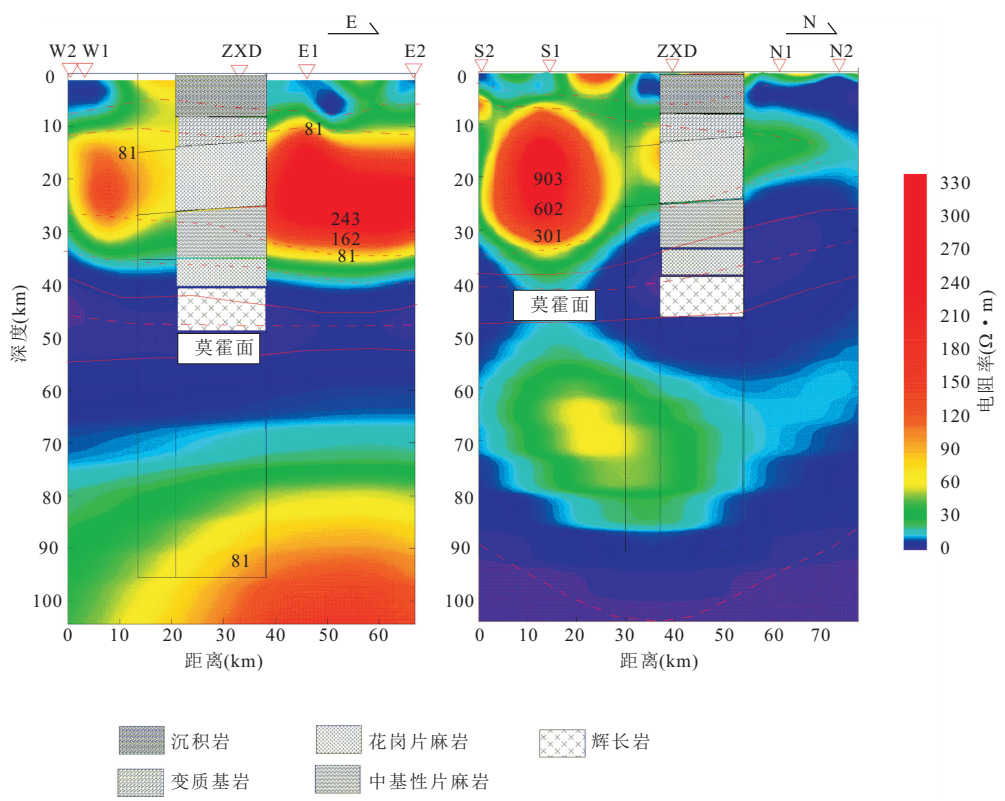


图 7 准噶尔盆地地层岩性结构与 MT 反演对比结果

Fig.7 The comparison result of MT inversion and formation lithology charateristics of Junggar Basin

熔融的可能性较小,其低阻层成因与河西走廊柴达木盆地较为相似,为地壳、上地幔水合二氧化碳等挥发性组分活动的原因.通过分析将该低阻异常层中心部位推断为莫霍面,如图 4 与图 5 中所示,可以推断准噶尔盆地中东部地区莫霍面深度在 46 km 左右(上下浮动范围为 40~55 km),林关岭和刘春涌(1995)编制的新疆莫霍面等深线图中所反映的准噶尔盆地中东部地区,莫霍面深度在 43~53 km;徐果明等(徐果明等,2007)从地震横波速度结构分析获得的在准噶尔盆地地区莫霍面深度在 50 km 左右,Wang *et al.*(2003)和 Zhao *et al.*(2003)等从地震测深剖面得出准噶尔盆地莫霍面深度变化较大,介于 44~56 km 之间.可见,大地电磁测深法在准噶尔盆地所得到的莫霍面电性结构分层与其他方法所得结果具有较好的一致性.

根据准噶尔盆地地层岩性结构(刘训,2005)资料,对比大地电磁反演结果进行分析.如图 7 所示,可以得出,在地层划分上,近地表 0~8 km 岩性为沉积岩,其与表层的低阻层有一定的对应性;在 8~13 km,存在一倾斜的沉积盖层基底,在岩性上其对应为变质基岩;在 13~26 km,为花岗片麻岩,其在电性结构上反映为高阻层;在 26~35 km 深处,为

中基性片麻岩,其在反演结果中对应一电性过渡带,成层性较好;在 35~40 km 处,与 13~26 km 深处岩性相似,同样为花岗片麻岩,但是其电阻率值与地壳中层相比大大的降低,由几百到几千 $\Omega \cdot \text{m}$ 下降到几十 $\Omega \cdot \text{m}$,可能是由于随着深度增加,地下温度和压力增加,以及存在水、二氧化碳等挥发性组分活动而导致其电阻率大大降低;在 40~48 km 深处,其岩性为辉长岩,从地震波速度方面分析,在该界面上下两个地层的纵波速度存在一个较大的跳跃,在该层上大地电磁反演表现为超低阻层,其反映为一壳幔过渡带,因此从大地电磁反演效果来推断该低阻层中心位置为莫霍面.从以上分析可以得到,通过大地电磁测深反演结果与该区地层岩性结果也有较好的对应性,该反演结果对准噶尔盆地地下地层结构的划分具有参考价值.

下面将本文结果和地层岩性结构与曲国胜等对准噶尔盆地地壳分层结构的划分进行对比分析,如表 1 所示,表中人工地震、地震转换波与重磁反演数据均来自曲国胜等(曲国胜等,2008),地层岩性数据来自刘训(刘训,2005).地震波的分辨率相对于大地电磁要高,因此在对比中将曲国胜等的部分数据进行了合并,并将其原来的界面埋深转变成了地层埋

表 1 准噶尔盆地地壳分层结构对比

Table 1 The comparison of crustal layering structure in Junggar basin

构造层	埋深 (km)	波速 (km/s)	密度 (g/cm ³)	磁化强度 (10 ⁴ A/m)	地质推断		MT 推断	
					岩性	埋深 (km)	电性分层	埋深 (km)
沉积盖层 (K+R+Q+J)	0~8	V _p :2.00~4.20 V _s :1.00~2.40	2.35~2.41	60	沉积岩	1~8	低阻层	3~8
沉积盖层 (T+P)	8~16	V _p :4.20~5.40 V _s :2.30~3.00	2.45	80	变质基岩	8~13	低阻向高阻过度层	8~13
古生界褶皱基底	6~16	V _p :4.20~5.50 V _s :2.30~2.80	2.64	80~150	变质基岩	8~13	低阻向高阻过度层	8~13
前寒武系结晶基底 (结晶基底上层)	16~28	V _p :6.10~6.70 V _s :3.30~3.80	2.73~2.80	200	花岗片麻岩	13~26	高阻层	13~28
结晶地壳中层	28~39	V _p :6.90~7.10 V _s :3.90~4.10	2.8~2.85	盆地中部上地壳中存在 在高磁化体强度为 290~330	中基性片麻岩	26~35	高阻到低阻过度层	28~35
					花岗片麻岩	35~40	低阻层	35~40
结晶地壳下层	39~52	V _p :7.00~7.40 V _s :4.00~4.30	2.87	100~120	辉长岩	40~48	超低阻层	40~55
上地幔顶部	52~	V _p :7.80~8.10 V _s :4.40~4.57	2.93~3.32	10		48~	电阻开始变高	55~

深,以更好的与本文结果进行对比.从表 1 中可以看出,大致的分层在各种方法之间均有较好的对应性.其中古生界褶皱基底界面变化范围在 6~16 km,变化范围较大,而对应在电性界面上为 8~13 km 的均匀电性层,且该层在 12~13 km 处有明显的电性分界面,这说明在该处界面的划分,大地电磁测深法更为精确.

在南北剖面发现上地幔存在高导层,其顶界面深度在 90~105 km,电阻率在 0~4 Ω·m.有报道(国家地震局兰州地震大队电磁测深组,1976)提出在西北银川地堑内地壳中部高导层埋深 30 km 左右,上地幔高导层埋深 70~80 km;兰州—固原一带中地壳高导层埋深在 27~28 km,上地幔低阻层埋深在 80~90 km;阿拉善地块地壳中部高导层在 30 km 左右,上地幔高导层埋深在 120 km 以下,柴达木盆地上地幔高导层深度在 140 km 以下,鄂尔多斯地块上地幔高导层埋深约 100 km(顾群等,1980;林长佑等,1995).从西北部分地区的上地幔高导层的埋深分布,发现准噶尔盆地地层结构与其较为相似,可以得出准噶尔盆地在 90~105 km 出现上地幔高导层同样较为可信.

本文根据刘训 2005 年发表的新疆地学断面成果讨论中国西北盆—山区的地壳构造演化(刘训,2005)中关于准噶尔盆地岩石圈构造特征与大地电磁测深所得电性层进行对比分析,其对比结果如表 2 所示.

表 2 大地电磁电性层与地学断面分层对比结果(单位:km)

Table 2 The comparison result of geoscience transect and MT electric layers

准噶尔盆地	大地电磁探测结果	地质断面结果(刘训,2005)
莫霍面深度	40~55	45
上地壳厚度	12~13	10~18
中地壳厚度	10~30	20
下地壳厚度	10~15	15
岩石圈底面深度	90~105	120~160

由表 2 可以看出,在地壳分界面上大地电磁推测结果与地质有很好的 consistency,但是由于大地电磁在垂向上分辨率有限,因此在分层范围上有一个较大的波动区间,而差别较大的是岩石圈的厚度,从电性分层角度来讲,上地幔出现的第一个高导层顶界面在 90~105 km,推断岩石圈厚度在 100 km 左右,而地质推断在 120~160 km(刘训,2005;邱瑞照等,2008),这里也是本文与以往研究的一个较大的差异之处.

5 结论

通过上述反演结果及分析,可以看出在新疆准噶尔盆地中东部地区各地质构造单元的电性差异在反演结果中有较好的反映,和地质及其他方法得出的地层结构有较好的一致性.把该地区地壳从电性结构上划分为 3 层,且在地壳下部存在一厚度在

10 km左右的超高导层,推断此处为莫霍面所在位置(以46 km深度为中心).发现在中心测点南15~35 km范围内,中心埋深20 km厚度20 km左右有一相对其围岩较高的高阻异常块体,并推测其隆起与其下部上地幔局部隆起有关.从电性分层来讲,准噶尔盆地中东部地区岩石圈厚度可能在100 km左右.对比研究区地壳岩性结构发现,本次反演结果所推断的地下电性结构具有准噶尔盆地地区的一般特征.

由于在该地区现有MT资料有限,测点间距较大,并不能对该异常区进行详细的推断,本文只是对准噶尔盆地中东部地区深部电性结构进行初步的研究,后续可以增加大量的MT测点资料采集,并对该区域进行更深一步的研究.

References

- Chen, J. X., Chen, J. L., 2002. Basement of Junggar Basin and Its Seismic Velocity Characteristics. *Xinjiang Petroleum Geology*, 23(6): 474—477 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y. Z., Hu, X. Y., Wang, C., 2011. Construction Method of Magnetotelluric Parameter Standard Point 45° N 86° E. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 8(5): 515—520 (in Chinese with English abstract).
- Electromagnetic Sounding Group in Lanzhou Seismic Brigade of State Seismological Bureau, 1976. On the Electric Conductivity Characteristics of the Northern Portion of the North-South Earthquake Belt of China. *Acta Geophysica Sinica*, 19(1): 28—34 (in Chinese with English abstract).
- Groot-Hedlin, C. D., Constable, S. C., 1990. Occam's Inversion to Generate Smooth, Two-Dimensional Models from Magnetotelluric Data. *Geophysics*, 55(12): 1613—1624. doi:10.1190/1.1442813
- Gu, Q., Sun, J., Shi, S. L., et al., 1980. The Features of Highly Electrical Conductivity Layer in North China and Northwest China Regions. *Seismology and Geology*, 2(2): 21—30 (in Chinese with English abstract).
- Han, B., Hu, X. Y., He, Z. X., et al., 2012. Mathematical Classification of Magnetotelluric Inversion Methods. *Oil Geophysical Prospecting*, 47(1): 177—187 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z. Z., Hu, X. Y., Wu, W. L., et al., 2005. Compared Study of Two-Dimensional Magnetotelluric Inversion Methods. *Coal Geology & Exploration*, 33(1): 64—68 (in Chinese with English abstract).
- Institute of Geophysics, Academia Sinica, 1981. Explosion Seismic Study for Velocity Distribution and Structure of the Crust and Upper Mantle from Daamxung to Yadong of Xizang Plateau. *Acta Geophysica Sinica*, 24(2): 155—170 (in Chinese with English abstract).
- Jin, S., Zhang, L. T., Wei, W. B., et al., 2010. Magnetotelluric Method for Deep Detection of Chinese Continent. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 808—817 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. J., Yang, J. S., Zhu, X. M., 2005. Study on the Sequence Stratigraphy of Junggar Basin. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 20(3): 60—66, 71 (in Chinese).
- Li, J. Y., Xiao, X. C., 1999. Brief Reviews on Some Issues of Framework and Tectonic Evolution of Xinjiang Crust, NW China. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 405—419 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. Y., Wu, Y. X., Yang, C. F., 1995. The High Conductivity Layer and Crust-Mantle Transition around the Moho of Tianshui. *Acta Seismologica Sinica*, 17(2): 230—236 (in Chinese).
- Lin, C. Y., Zhang, Y. L., Si, Y. L., et al., 1984. On the Magnetotelluric Research in the Eastern Region of the He-Xi Corridor. *Acta Geophysica Sinica*, 27(2): 131—143 (in Chinese with English abstract).
- Lin, G. L., Liu, C. Y., 1995. Basic Characteristics of Deep-Seated Tectonics in Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 13(1): 56—66 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X., 2005. A Study of the Crustal Tectonic Evolution in Basin-Mountain Areas of Northwest China in the Light of Xinjiang Geotranssect. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(2): 105—112 (in Chinese with English abstract).
- Lu, B., Xu, K. Q., Lu, C. Y., 2003. Electrical Structure of Crust in the Qiangtang Region, Northern Tibet and Its Geological Significance. *Earth Science Frontiers*, 10 (Suppl.): 153—159 (in Chinese with English abstract).
- Newman, G. A., Alumbaugh, D. L., 2000. Three-Dimensional Magnetotelluric Inversion Using Non-Linear Conjugate Gradient. *Geophys. J. Int.*, 140(2): 410—424. doi: 10.1046/j.1365-246x.2000.00007.x
- Newman, G. A., Boggs, P. T., 2004. Solution Accelerators for Large-Scale Three-Dimensional Electromagnetic Inverse Problems. *Inverse Problems*, 20(6): 151—170. doi: 10.1088/0266-5611/20/6/S10
- Qi, X. F., Wu, X. Z., Liu, D. G., et al., 2010. The Deep Structural Features and Hydrocarbon Prospect in Hinterland of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 31(2): 111—114 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, R. Z., Li, W. Y., Zhou, S., et al., 2008. Types, Petrological

- Structure and Their Implications Lithospheric in North-western China Continent. *Northwestern Geology*, 41 (2):1—21(in Chinese with English abstract).
- Qu, G.S., Ma, Z.J., Chen, X.F., et al., 2009. On Structures and Evolutions in Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 30(1):1—5(in Chinese with English abstract).
- Qu, G.S., Ma, Z.J., Shao, X.Z., et al., 2008. Basements and Crust Structures in Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(6):669—674(in Chinese with English abstract).
- Rodi, W.L., Mackie, R.L., 2001. Nonlinear Conjugate Gradients Algorithm for 2-D Magnetotelluric Inversion. *Geophysics*, 66(1):174—187. doi:10.1190/1.1444893
- Simith, J.T., Booker, J.R., 1991. Rapid Inversion of Two and Three-Dimensional Magnetotelluric Data. *J. Geophys. Res.*, 96:3905—3922. doi:10.1029/90JB02416.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G., 2000. An Efficient Data-Subspace Inversion Method for 2-D Magnetotelluric Data. *Geophysics*, 65(3):791—803. doi:10.1190/1.1444778
- Wang, Y. X., Mooney, W. D., Yuan, X. C., et al., 2003. The Rustal Tructure from the Altai Mountains to the Altyn Tagh Fault, Northwest China. *J. Geophys. Res.*, 108 (B6):1—16. doi:10.1029/2001JB000552
- Xu, G.M., Yao, H.J., Zhu, L.B., et al., 2007. Shear Wave Velocity Structure of the Crust and Upper Mantle in Western China and Its Adjacent Area. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(1):193—208(in Chinese with English abstract).
- Yang, C.F., Lin, C.Y., Wang, S.M., et al., 2003. Preliminary Study of the Deep Conductivity Structure in Lanzhou Region. *Journal of Seismological Research*, 26 (4):350—354 (in Chinese with English abstract).
- Zhan, Y., Zhao, G.Z., Tang, J., et al., 1999. Electric Structure of the Crust of the Manas Earthquake Area in Xinjiang Autonomous Region. *Seismology and Geology*, 21(2):159—167 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. S., Hong, D. W., Wang, T., 2004. Geophysical Researches on the Basement Properties of the Junggar Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(4):473—478 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. M., Liu, G. D., Lu, Z. X., et al., 2003. Lithospheric Structure and Dynamic Processes of the Tianshan Orogenic Belt and the Junggar asin. *Tectonophysics*, 376 (3—4):199—239. doi:10.1016/j.tecto.2003.07.001
- 疆石油地质, 23(06):474—477.
- 程远志, 胡祥云, 王程, 2011. 45°N 86°E 大地电磁参数标准点建设方法研究. *工程地球物理学报*, 8(5):515—520.
- 顾群, 孙洁, 史书林, 等, 1980. 华北、西北一些地区地壳和上地幔内高导层. *地震地质*, 2(2):21—30.
- 国家地震局兰州地震大队电磁测深组, 1976. 中国南北地震带北段地壳和上地幔电性特征. *地球物理学报*, 19(1):28—34.
- 韩波, 胡祥云, 何展翔, 等, 2012. 大地电磁反演方法的数学分类. *石油地球物理勘探*, 47(1):177—187.
- 胡祖志, 胡祥云, 吴文鹏, 等, 2005. 大地电磁二维反演方法对比研究. *煤田地质与勘探*, 33(1):65—69.
- 金胜, 张乐天, 魏文博, 等, 2010. 中国大陆深探测的大地电磁探测研究. *地质学报*, 84(6):808—817.
- 李德江, 杨俊生, 朱筱敏, 2005. 准噶尔盆地层序地层学研究. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 20(03):60—66, 71.
- 李锦轶, 肖序常, 1999. 对新疆地壳结构及构造演化几个问题的简要评述. *地质科学*, 34(4):405—419.
- 林长佑, 武玉霞, 杨长福, 1995. 天水地区莫霍面附近的高导层及壳幔过渡带. *地震学报*, 17(2):230—236.
- 林长佑, 张云琳, 司玉兰, 等, 1984. 河西走廊东部地区的大地电磁测深研究. *地球物理学报*, 27(2):131—143.
- 林关玲, 刘春涌, 1995. 试论新疆深部构造基本特征. *新疆地质*, 13(1):56—66.
- 刘训, 2005. 从新疆地学断面的成果讨论中国西北盆—山区的地壳构造演化. *地球学报*, 26(2):105—112.
- 鲁兵, 徐可强, 刘池阳, 2003. 藏北羌塘地区的地壳电性结构及其意义. *地学前缘*, 10(特刊):153—159.
- 齐雪峰, 吴晓智, 刘得光, 等, 2010. 准噶尔盆地腹部深层构造特征与油气前景. *新疆石油地质*, 31(02):111—114.
- 邱瑞照, 李文渊, 周肃, 等, 2008. 中国西北大陆岩石圈类型、岩石学结构及其意义. *西北地质*, 41(2):1—21.
- 曲国胜, 马宗晋, 陈新发, 等, 2009. 论准噶尔盆地构造及其演化. *新疆石油地质*, 30(01):1—5.
- 曲国胜, 马宗晋, 邵学钟, 等, 2008. 准噶尔盆地基底构造与地壳分层结构. *新疆石油地质*, 29(06):669—674.
- 徐果明, 姚华建, 朱良保, 等, 2007. 中国西部及其邻域地壳上地幔横波速度结构. *地球物理学报*, 50(01):193—208.
- 杨长福, 林长佑, 王书明, 等, 2003. 兰州地区深部电性结构的初步研究. *地震研究*, 26(4):350—355.
- 詹艳, 赵国泽, 汤吉, 等, 1999. 新疆玛纳斯地震区地壳深部的电性结构. *地震地质*, 21(2):159—167.
- 张季生, 洪大卫, 王涛, 2004. 由航磁异常判断准噶尔盆地基底性质. *地球学报*, 25(04):473—478.
- 中国科学院地球物理研究所, 1981. 西藏高原当雄—亚东地带地壳与上地幔结构和速度分布的爆炸地震研究. *地球物理学报*, 24(2):155—170.

附中文参考文献

陈俊湘, 陈景亮, 2002. 准噶尔盆地基底及其地震速度特征. 新