

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2016.01.008

华北克拉通东北边界带深部电性结构特征

董泽义¹⁾ 汤吉^{1)*} 陈小斌¹⁾ 王立凤¹⁾
王继军¹⁾ 孟补在²⁾ 白云²⁾

1) 中国地震局地质研究所, 北京 100029

2) 辽宁省地震局, 沈阳 110031

摘 要 在华北克拉通东北边界带, 完成了 1 条 NW-SE 走向长约 900km 的大地电磁测深剖面工作; 该剖面西北始于中亚造山带内部的贺根山杂岩带, 向 SE 依次穿过宝力道弧、索伦-林西缝合带、温都尔庙杂岩带、白乃庙弧、内蒙地轴、燕山造山带、最后终止于华北克拉通内部的辽河拗陷。采用大地电磁阻抗张量分解技术对所有测点的维性、区域地电走向进行了分析, 沿剖面的数据具有较好的二维性。利用 NLGG 二维反演方法, 得到了沿剖面地下二维电阻率结构。从电性结构上看, 沿剖面电阻率结构具有横向分块的特征, 大致可以分为 3 个主要的电性区, 呈现高阻—低阻—高阻的变化; 中亚造山带与华北克拉通显示出不同的电阻率变化特征, 前者变化剧烈, 后者变化相对平缓; 索伦-林西缝合带和内蒙地轴中下地壳分别存在 1 个大范围的低阻体, 可能是由深部流体以及部分熔融所致。基于研究区的深部电性结构及其他地质与地球物理观测资料, 我们推测: 1) 西伯利亚板块与华北板块的最终缝合位置可能在锡林浩特断裂与西拉木伦河断裂之间的区域; 2) 燕山造山带下较厚的高阻体可能起到了构造屏障的作用, 使克拉通内外的上地幔顶部具有不同的对流模式, 从而减弱了中亚造山带构造演化对华北克拉通东部破坏的影响作用。

关键词 中亚造山带 华北克拉通 大地电磁测深 深部电性结构

中图分类号: P315.72⁺²

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2016)01-0107-14

0 引言

华北克拉通东北边界带地处古亚洲洋域与滨太平洋域的交会部位; 在大地构造位置上, 华北克拉通东北边界带是南部的华北克拉通和北部的中亚造山带 2 个一级构造单元边界带的一部分(图 1)。华北克拉通是地球上最古老的克拉通之一, 自 18 亿年前克拉通化之后至早中生代, 一直保持相对稳定。然而, 中生代、新生代以来, 华北地台经历了大规模而强烈的岩石圈改造和破坏过程, 尤其是东部地区, 岩石圈地幔根减薄, 物理化学性质发生根本性的改变, 并伴随着广泛的岩浆活动、频繁的板内地震、大规模的盆地与大量金属矿产资源的形成(朱日祥等, 2011)。关于华北克拉通构造活化和破坏的动力学过程和机制, 是目前地学界的 1 个热点研究问题, 但至今对一些关键问题仍然存在争议, 其中对华北克拉通岩石圈的减薄机制目前具有代表性的观点有拆沉与热侵蚀 2 种模型(徐义刚, 1999; Gao *et al.*, 2004; Deng *et al.*, 2007),

[收稿日期] 2014-11-25 收稿, 2016-01-08 改回。

[基金项目] 国家自然科学基金(40974041)资助。

* 通讯作者: 汤吉, 研究员, E-mail: tangji@ies.ac.cn。

而可能导致华北克拉通破坏的动力学原因主要包括如下观点:晚石炭世古亚洲洋向 S 的俯冲、三叠纪扬子克拉通与华北克拉通的碰撞和新生代古太平洋板块的俯冲(朱日祥等, 2009)。位于华北克拉通与西伯利亚板块之间的中亚造山带是世界上最宽阔、发展历史最长、构造岩浆活动最复杂的 1 条巨型增生造山带, 显生宙期间, 先后经历了古亚洲洋俯冲闭合、陆陆汇聚及碰撞后伸展等地质过程(Xiao *et al.*, 2003, 2004, 2009)。过去几十年, 地质学家们在该区域做了很多卓越的工作, 并提出了多种构造演化模式(Jian *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2013), 但至今仍对一些重要的地质问题存在争议。例如, 古亚洲洋最终闭合的时间和位置, 华北克拉通与西伯利亚板块碰撞缝合线的位置等问题。过去对于上述这些争议问题的认识, 主要来自于地表构造及岩石地球化学研究, 但由于其采用的深部样品的分布具有局限性和不均匀性, 大大制约了从整体上对问题的认识, 因此亟待深部地球物理观测提供证据与约束。

近年来, 中国的专家学者在华北克拉通利用不同的地震方法开展了大量的深部结构探测工作, 这些研究工作加深了我们对华北克拉通内部及其周边板块现今岩石圈深部结构特征的认识, 为探讨华北克拉通岩石圈的构造演化提供了丰富的地震波速结构资料(陈凌等, 2010a)。与地震方法相比, 大地电磁测深法(MT)在很多方面可以看作是一种与其互补的有效方法, 它因其对于地球深部的矿物组分、温度和流体(如主要成分、挥发物、流体和熔体等)上的细微变化非常敏感, 目前已被国内外学者广泛应用于探测岩石圈深部结构(Unsworth, 2010; Xiao *et al.*, 2011)。在国家自然科学基金的资助下, 我们采用先进的采集仪器在华北克拉通东北边界带实施完成了 1 条西起内蒙古苏尼特左旗, 东至辽宁锦州的常规、长周期大地电磁测深剖面, 为研究中亚造山带的构造演化历史、华北克拉通破坏的动力学机制提供了新的深部依据。本文对采集的大地电磁测深数据进行了分析、处理与解释, 获得了该区的二维地壳上地幔电阻率结构, 并对深部电性结构特征进行了分析, 同时结合其他地球物理与地质资料, 探讨了华北板块和西伯利亚板块碰撞缝合带的位置、华北板块与周边块体的深部构造关系以及边界带在克拉通破坏过程中所起的作用等问题。

1 大地电磁剖面位置与研究区概况

苏尼特左旗—锦州大地电磁测深剖面整体呈 NW-SE 走向, 西起中蒙边界苏尼特左旗的查干敖包, 经锡林浩特、赤峰、朝阳, 东至辽宁锦州的凌海县, 全长约 900km。沿剖面共布设了 32 个测深点, 分布在内蒙古测区的测点相对较稀, 而在辽宁测区的相对密集, 整个剖面测点平均点距约 25km。该剖面跨越了中亚造山带东南部的贺根山杂岩带、宝力道弧、索伦-林西缝合带、温都尔庙杂岩带、白乃庙弧和华北克拉通北缘的内蒙地轴、燕山造山带、辽河拗陷共 8 个构造单元; 穿过的大断裂带主要有二连-贺根山断裂(F_1)、锡林浩特断裂(F_2)、林西断裂(F_3)、西拉木伦河断裂(F_4)、赤峰-开源断裂(F_5)、凌源-北票断裂(F_6)、阜新-山海关断裂(F_7)(辽宁省地质矿产局, 1989; 内蒙古地质矿产局, 1991)(图 1)。

2 大地电磁数据采集与处理

2.1 野外数据采集与处理

大地电磁野外数据采集工作基本于 2012 年内完成, 沿测线共观测到了 32 个有效测点的数据(图 1), 其中常规 MT 测点 22 个(白色点)、长周期 MT 测点 10 个(红色点)。在数据采集

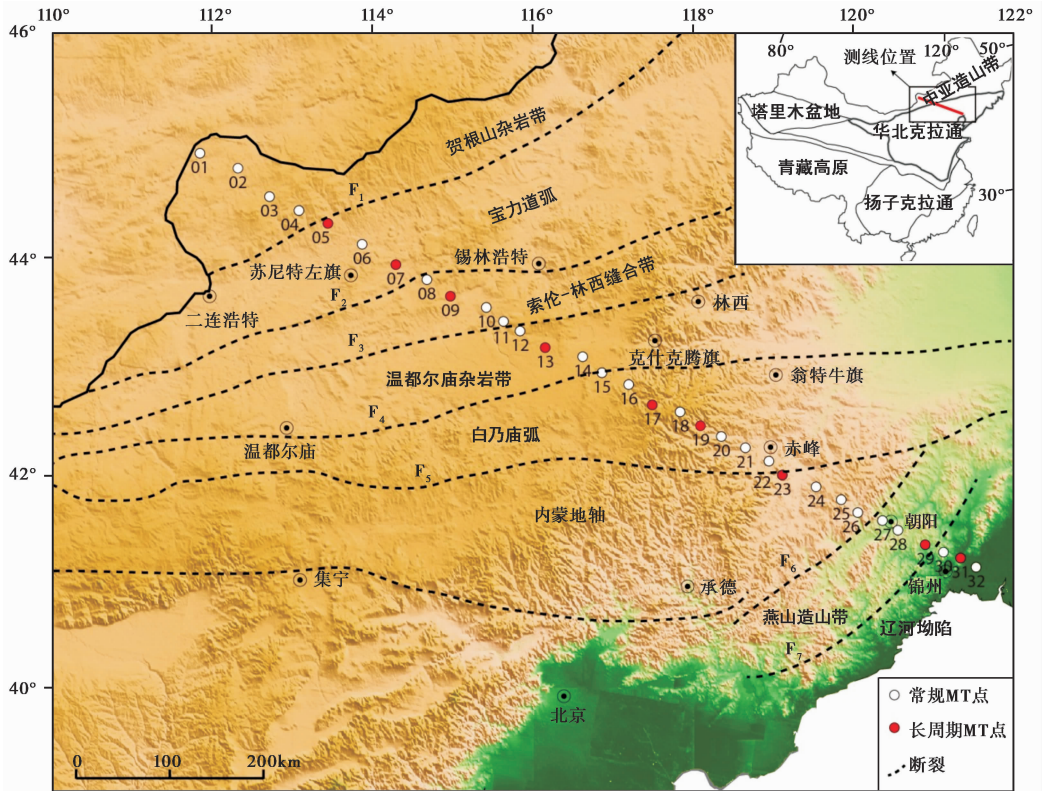


图 1 研究区大地构造简图(据 Xiao *et al.*, 2003 修改)及大地电磁测点位置

Fig. 1 Simplified tectonic map of the study area(modified from Xiao *et al.*, 2003)and location of magnetotelluric sites.

F_1 二连-贺根山断裂; F_2 锡林浩特断裂; F_3 林西断裂; F_4 西拉木伦河断裂;

F_5 赤峰-开原断裂; F_6 凌源-北票断裂; F_7 阜新-山海关断裂

过程中,采集仪器使用加拿大凤凰公司生产的 MTU-5A 大地电磁观测系统,每台仪器都用自带的 GPS 进行同步,每个测点同时记录 3 个磁场分量(H_x , H_y , H_z)和 2 个相互垂直的电场分量(E_x , E_y)。为了保证数据质量和探测深度,每个常规 MT 点的观测时间 >20h,每个长周期 MT 点的观测时间 >70h。本次野外数据采集没有单独布设远参考站,由于沿剖面每天保证同时有 2 台仪器通过 GPS 同步方式采集数据,而且测点间距相对较大,因此 2 测点之间可以互为参考来实现远参考道观测技术(Gamble *et al.*, 1979),达到提高数据质量的目的。

经过野外数据采集,得到了所有测点的原始时间序列。在数据处理过程中,首先采用凤凰公司提供的 SSMT2000 数据处理软件将原始时间序列经过快速傅氏变换,得到电磁场的自、互功率谱,然后采用远参考 Robust 资料处理技术(Egbert *et al.*, 1996)估算大地电磁阻抗张量,最终获得了所有测点的阻抗张量响应以及对应的视电阻率和相位曲线。根据各点处理的视电阻率和相位曲线来看,内蒙古测区大部分测点数据质量较好,而在辽宁测区,由于人文与工业干扰较严重,测点的数据质量相对较差。对于常规 MT 数据,有效频点的平均周期范围在 0.003~3 000s 左右,部分测点的最长周期可达 5 000s 以上;对于长周期 MT 数据,有效频点的平均周期范围在 0.003~10 000s 左右。

2.2 视电阻率与阻抗相位曲线分析

分析每个测点的视电阻率与阻抗相位曲线既可定性了解该测点地下电性随深度的变化,又可了解沿剖面不同构造单元的电性特征。图2给出了沿剖面位于不同构造单元的8个典型测点的测量方向视电阻率和阻抗相位曲线,多数测点的最长资料周期达到近 10^4 s,保证了观测资料探测深度达到60km以上。测点1—4对应贺根山杂岩带,该构造单元电性结构相对简单,视电阻率曲线对应层状介质的曲线类型为K、AK型,区域内视电阻率的变化反映出由浅层至深部的电性结构变化具有低—高一低的电性特征;测点5—7对应宝力道弧,该构造单元的曲线类型以K、KH为主,视电阻率曲线变化平缓,说明视电阻率在纵向上变化较小;测点8—11对应索伦—林西缝合带,视电阻率曲线的主要类型为HK型,个别测点曲线为K型,视电阻率整体水平较低,相对于宝力道弧,视电阻率值明显降低;测点12—15对应温都尔庙杂岩带,视电阻率曲线以HK型为主,与相邻的索伦—林西缝合带相似,视电阻率整体水平较低;测点16—22对应白乃庙弧,视电阻率曲线以H型为主,视电阻率值相对于温都尔庙杂岩带明显增高;测点23—26对应内蒙地轴,测点的曲线类型以K型为主,反映了地下低—高一低的电性结构,由高频到低频对应于从浅部到深部,视电阻率值相对于邻区地块偏大,表明内蒙地轴从表层往下即是巨厚的高阻基岩,属于相对高阻区;测点27—29对应燕山造山带,曲线类型有QH型、K型、HK型,表明该单元内构造环境复杂;测点30—32对应辽河坳陷,视电阻率曲线类型主要为K型,0.1Hz附近的曲线极大值与上地壳高阻基底有关。总体而言,沿剖面西北部增生带电性结构相对简单,而东南部的克拉通结构明显较为复杂。

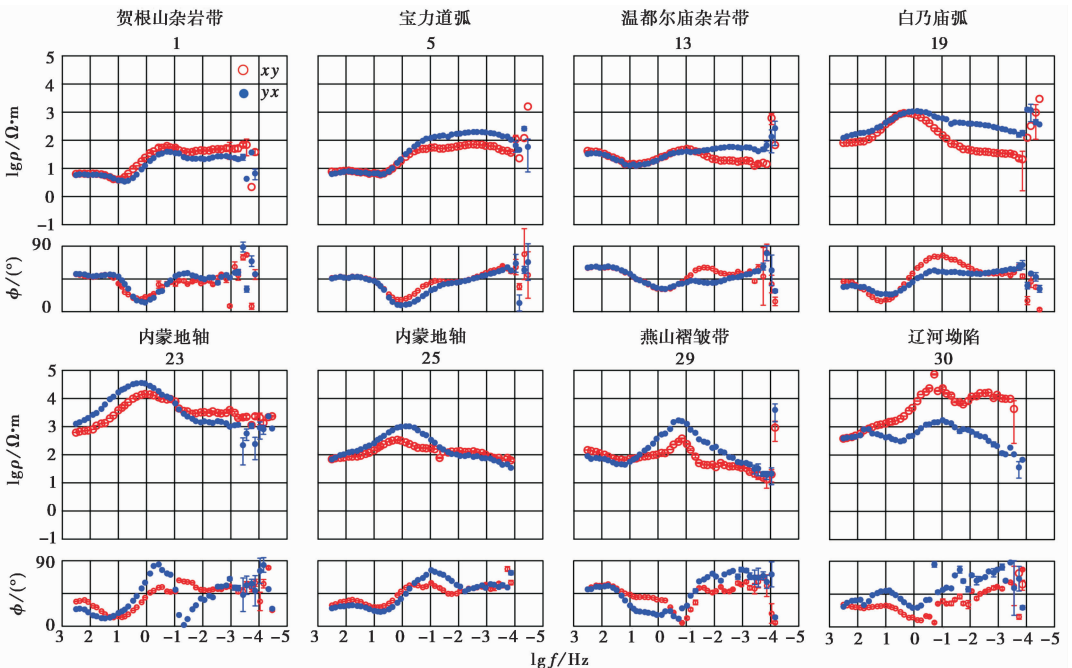


图2 不同地块典型测点的视电阻率与阻抗相位曲线

Fig. 2 Apparent resistivity and phase curves for typical sites in different tectonic units.

2.3 维性与电性构造走向分析

在获得张量阻抗数据之后,首先采用了受畸变影响更小的 Bahr 阻抗分析方法 (Bahr, 1988) 计算相位灵敏二维偏离度 (η),对沿剖面测点之下区域电性结构的维性进行分析。理论上,沿一维或二维介质,二维偏离度应为 0,但在深部探测中,通常认为当二维偏离度的值 < 0.3 时,可以近似为二维构造。图 3 给出了所有测点相位灵敏二维偏离度沿剖面方向的拟断面图。从图 3 可以看出,沿剖面大部分区域 (蓝色) 的二维偏离度 < 0.3 ,但在少数测点的深部区域二维偏离度 > 0.3 ,可能由于低频段观测资料受干扰和叠加不够或该区域构造复杂具有三维特征,但总的来说,剖面整体表现基本满足二维性假设,对该剖面的数据进行二维反演可以较好地揭示出地下真实的结构特征。

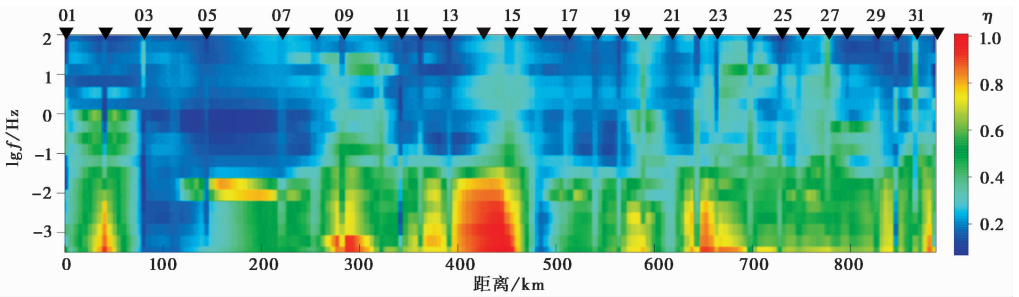


图 3 沿剖面相位灵敏二维偏离度拟断面图

Fig. 3 Pseudo-section of phase sensitivity skewness (η).

同时,利用相位张量分析方法 (Caldwell *et al.*, 2004) 对所有测点的张量阻抗数据进行了分析,得到了各测点不同频率的最佳主轴方位。图 4 给出了 0.1 s、10.3 s、113.6 s、909.1 s 4 个周期各测点的最佳主轴方位。从高频到低频,主轴方位大致表现一致,大部分测点的主轴方位角在 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间变化,满足二维性较好的测点的主轴方位角基本指向 $N30^{\circ} \sim 40^{\circ} E$ 。结合研究区内的地质构造走向可以判定,区域电性构造走向大致沿着 $N35^{\circ} E$ 方向。

3 二维大地电磁反演

在大地电磁数据二维反演前,根据上述的电性构造走向分析结果,将剖面 MT 数据全部旋转至区域构造走向方向上 (即 $N35^{\circ} E$),此时 MT 数据可分解为 TE 与 TM 2 组相互独立的极化模式数据,TE 模式中电流平行于构造走向方向,而 TM 模式中电流垂直于构造走向方向。同时,通过比较相邻的同一构造单元测点的视电阻率曲线,对存在静位移现象的部分测点进行了静位移校正。

二维反演方法选择了目前广泛使用的非线性共轭梯度 (NLCG) 法 (Rodi *et al.*, 2001),整个反演过程都是在 MT-Pionner 大地电磁可视化集成软件系统下完成的 (陈小斌等, 2004)。在二维反演中,为了得到可靠的反演结果,我们分别选用单极化模式 (TE, TM) 和双极化联合 (TE+TM) 的 MT 数据,使用不同反演参数进行了大量的反演计算,反演结果显示 TE 模式以及 TE+TM 模式的二维反演结果的数据拟合普遍较差,这可能与数据的三维性有关。关于不同极化模式数据对二维反演结果影响的问题,前人做过许多研究 (蔡军涛等, 2010; 张乐天等, 2012)。一般认为 TE 极化模式对深部结构变化更灵敏, TM 极化模式对表层结构变化更敏感,但在受

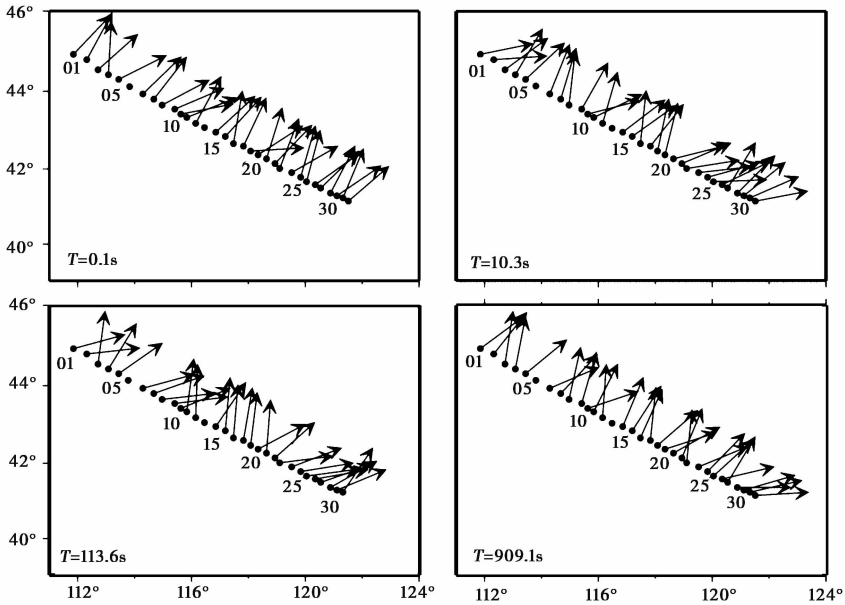


图 4 0.1s、10.3s、113.6s、909.1s 4 个周期所有测点的最佳主轴方位角

Fig. 4 Azimuths of principal axis at each site for periods of 0.1s, 10.3s, 113.6s and 909.1s.

三维结构影响明显时, 单独 TM 模式反演比利用 TE 模式或 TE+TM 模式联合反演更合理, 反演结果中的虚假构造会明显减少, 能够比较准确地反映地下电性结构分布状态。综上所述, 经过反复的反演计算对比, 最终选择拟合情况最好的 TM 极化模式反演结果作为最后的解释剖面。

反演中采用的初始模型为 $100\Omega\text{m}$ 的均匀半空间, TM 模式数据的门槛误差为 0.05, 利用测点中心网格的自动生成技术构建带地形的初始模式网格(陈小斌等, 2009), 横向网格数 115 个, 纵向网格 128 个。NLGG 反演算法中存在 1 个重要的参数正则化因子 τ , 它能折中平衡模型光滑度与数据拟合度, 选择不同的正则化因子(在 0.1~1 000 之间取十几个值)进行多次反演, 通过反映模型光滑度与数据拟合度的 L 曲线分析确定最可靠的正则化因子(李冉等, 2014)。图 5 为不同光滑因子取值的 L 曲线, 横轴为评价模型光滑度的约束目标函数(φ_m)的平方根; 纵轴为数据拟合均方差(RMS)。如图所示, L 曲线的转折处对应的光滑因子 $\tau=15$ (黑色实心圆)既能保证模型的光滑度, 又满足数据拟合的要求, 最终的反演数据拟合差 $RMS=2.06$ 。

图 6 还给出了 TM 模式的视电阻率和阻抗相位实测数据与反演模型响应的拟断面图(图中白色处为数据不好被删除的频点), 对比二者可见, 实测数据能被理论响应较好地拟合, 表明沿剖面二维反演结构具有较高的可信度。

4 电性结构特征分析

由于测点稀疏, 对地表电性特征的反映是很粗略的, 因此, 本文主要关注深部的电性结构特征。图 7 给出了苏尼特左旗—锦州剖面二维反演得到的深部电性结构图像, 图中的蓝色表示相对高电阻率, 红色表示相对低电阻率。根据国际地学断面内蒙古东乌珠穆沁旗—辽宁东沟的深部探测结果(卢造勋等, 1993), 我们在图 7 中也给出了该区的莫霍面深度, 另外沿剖面

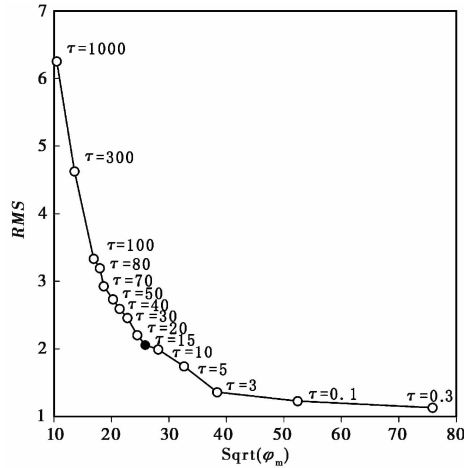
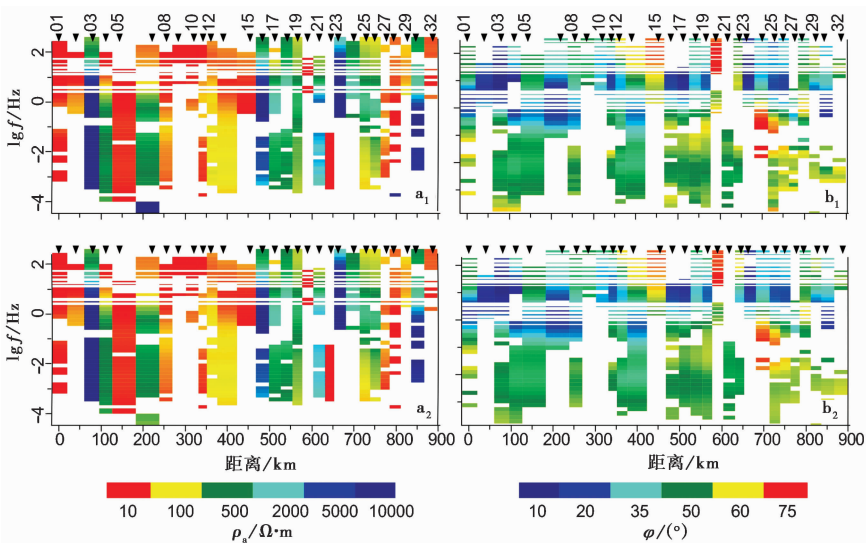
图 5 不同光滑因子的 L 曲线Fig. 5 L -curve analysis for different regularization parameters.

图 6 苏尼特左旗—锦州剖面二维反演数据拟合图

Fig. 6 Fitting result of 2-D inversion along the profile.

a_1 实测的视电阻率； a_2 计算的视电阻率； b_1 实测的相位值； b_2 计算的相位值

的地形变化也添加在图中。结合该区域的地质与地球物理研究成果，下文对深部电性结构特征进行了解译。

构造区电性特征：总体上看，剖面所穿过的各个构造单元，电性结构特征差异明显，二维电性结构呈现出横向分块特征，沿剖面从西北至东南以 F_2 、 F_4 为分界线大致可分为 3 个电性区域。

(1) 贺根山杂岩带与宝力道弧为第 1 电性区，该区主要是由古生代蛇绿岩、火山岩、变质

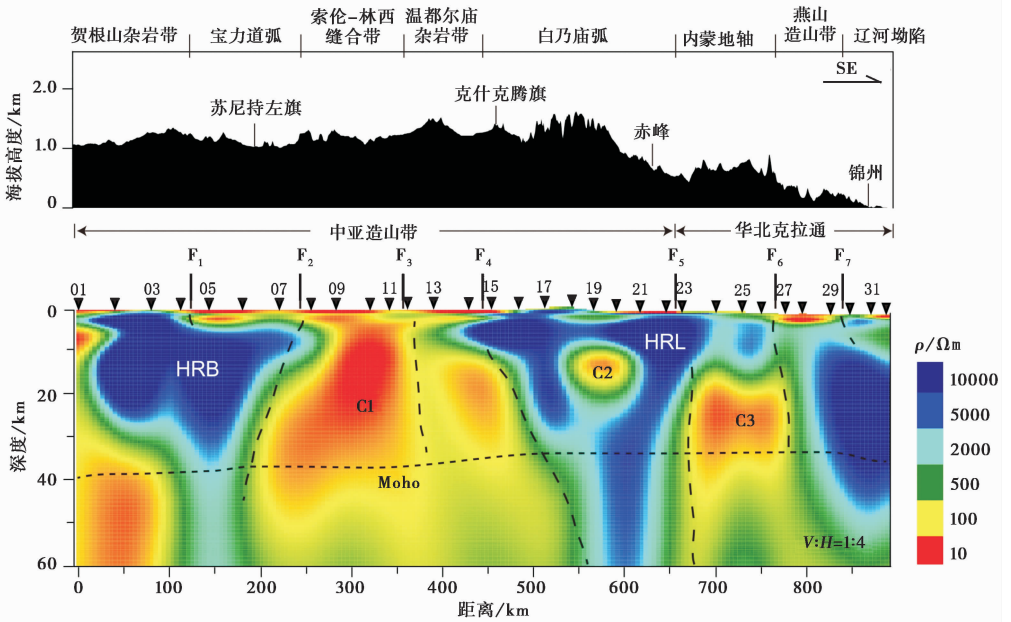


图7 二维反演电性结构模型

Fig. 7 Electrical resistivity structure model derived by 2D inversion.

岩和硅质岩等组成的混杂岩带(程三友等, 2013);从本次 MT 二维反演结构上看,整个区域电阻率相对较高,自浅层到约 35km 深度为厚的高阻体(HRB),高阻体下方为低阻层,该低阻层表现为横向不均匀性,北部电阻率值高于南部,这些特征与该区域早期的电磁探测结果一致(卢造勋等, 1993)。

(2)索伦-林西缝合带与温都尔庙杂岩带为第 2 电性区,该区夹于锡林浩特断裂(F_2)与西拉木伦河断裂(F_4)之间,电性结构上整个区域表现为低电阻率特征,索伦-林西缝合带下方的电阻率尤为低。索伦-林西缝合带被许多地质学家认为代表了西伯利亚板块与华北板块之间的古亚洲洋闭合的位置,古生代期间,古亚洲洋向华北板块和西伯利亚板块的持续俯冲,在南北两侧形成了一系列的俯冲增生体;到晚二叠世,洋壳的俯冲基本结束,华北板块和西伯利亚板块在此碰撞拼合(陈斌等, 2001; Xiao *et al.*, 2003; Windley *et al.*, 2007),中生代该区构造环境由挤压环境转变成了伸展拉张环境,岩浆活动剧烈频繁,如此大规模的低阻体可能与岩浆活动有关,深大断裂的存在为熔融物质的上涌提供了有利条件。因此,图 7 中的大规模低阻带 C1 很可能与深部岩浆活动有关。

(3)白乃庙弧、内蒙地轴、燕山造山带与辽河拗陷构成了第 3 电性区,该区整体上表现为高电阻特征,整个上地壳由相对高层(HRL)覆盖,但在中下地壳深度,也发育着零星的高导体,如在白乃庙弧下 15~20km 深度的高导体(C2)、内蒙地轴下 20~45km 深度的高导体(C3)。白乃庙弧是由钙碱性拉斑玄武岩、石英质火山岩、碱性玄武岩、火山角砾岩、集块岩、花岗闪长岩、花岗岩等组成,被认为是古亚洲洋向 S 俯冲的大陆边缘(Xiao *et al.*, 2003),中上地壳电性结构的高阻层应该为地表大面积花岗岩的深部反映,该区域的地壳速度结构研究也发现上地壳高速体的存在(李文辉等, 2014),这与我们的结果具有对应关系。考虑到古亚洲洋的俯

冲及后期板块的碰撞造山伸展作用, 白乃弧下的高导体 C2 很可能是地下流体与部分熔融共同作用的结果。内蒙地轴是华北克拉通最北边的近 EW 向的构造单元, 在电性结构中, 表层至 20km 深度为厚的高阻层, 20km 深度以下 (C3) 表现为上地幔局部隆起特征, 在 S 波速度结构中, 内蒙地轴也呈现上地幔局部隆起特征 (Tang *et al.*, 2008); 中上地壳的高阻层可能与内蒙地轴的早前寒武结晶基底有关, 而下地壳至上地幔的高导体可能与晚石炭世—早侏罗世内蒙地轴经历了较大规模的岩浆活动有关。

断裂带电性特征: 从图 7 可以看出, 剖面经过的主要断裂带有锡林浩特断裂 (F_2)、林西断裂 (F_3)、西拉木伦断裂 (F_4)、赤峰—开源断裂 (F_5) 和凌源—北票断裂 (F_6), 在电性结构上均表现为明显的电性边界或电性过渡带。 F_2 为宝力道弧与索伦—林西—缝合带的边界, 两侧电性差异明显, 西北侧表现为高阻, 东南侧表现为低阻, 深部可延伸到上地幔顶部, 属于岩石圈深大断裂, 总体表现为向 NW 倾。 F_3 从浅至深近直立发育, 电性上表现为约 20km 宽的过渡带, 电阻相对较高, 而两侧均为低阻体。 F_4 被认为是 1 条 EW 走向规模较大的压性岩石圈深大断裂, 在地球物理场上表现为 EW 向延伸的重力和磁场异常带 (张振法等, 2001); 从电性结构上看, 该断裂两侧电性差异明显, 深部可延伸至岩石圈, 向 SE 倾, 这一特征与早期的电磁探测结果是一致的 (白登海等, 1993; 卢造勋等, 1993)。 F_5 在地学界被认为是北部增生带与南北克拉通的分界线, 电性上也表现为此特征。断裂北侧的地壳电阻率结构变化起伏, 符合造山带的特征; 而断裂南侧的地壳电阻率结构变化相对平稳, 符合稳定克拉通的特征。 F_6 两侧深部电性差异也明显, 北部的内蒙地轴深部表现为高导的局部隆起, 而南部的燕山造山带表现为厚的高阻体。 F_1 与 F_7 在浅部两侧电性差异明显, 而在深部两侧电性几乎无差异, 正如前文所述, 数据点距较大, 对浅部构造的分辨能力较低, 因此在此不对 F_1 与 F_2 的空间展布进行讨论。

5 讨论

前文已对剖面经过的各构造区及深大断裂带的电性特征进行了详细的分析, 下文结合该剖面的电性结构特征, 对研究区中几个重要的构造问题进行讨论。

(1) 西伯利亚板块与华北板块的最终缝合位置。关于西伯利亚板块与华北板块缝合的位置, 在地学界一直存在争议, 地质学家们依据蛇绿岩出露的位置, 划出了 4 条缝合带: 贺根山缝合带、苏尼特左旗—锡林浩特缝合带、索伦—林西缝合带、温都尔庙—西拉木伦缝合带 (韩国卿等, 2011); 但目前多数中外学者 (Sengör *et al.*, 1993; Xu *et al.*, 1997; Xiao *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2009) 认为, 2 板块最终的缝合位置在索伦—林西缝合带, 而时间为晚二叠世。从本文给出的二维电阻率模型上看, 中亚造山带的索伦—林西缝合带与温都尔庙杂岩带区整个地壳属于高导异常区, 电阻值明显低于周围的地块, 并且地块边界断裂 F_2 与 F_4 都属于岩石圈深大断裂, F_2 向 NW 倾, F_4 向 SE 倾, 这可能标志着该区域曾是古板块的俯冲带, 分别经历过向 N 与向 S 的 2 次俯冲 (Miao *et al.*, 2007)。古亚洲洋闭合之后, 该区进入陆内造山作用, 构造运动最为强烈, 伴随着剧烈的岩浆活动 (Windley *et al.*, 2007), 同时深大断裂为热液物质的上移提供了通道, 形成了大规模的高导异常体。通过以上的分析, 我们推测西伯利亚板块与华北板块的最终缝合位置应该是 1 个宽约上百 km 的带, 位于锡林浩特断裂 (F_2) 与西拉木伦河断裂 (F_4) 之间的区域。

(2) 中亚造山带与华北克拉通的深部构造关系。大量的岩石学、地球化学和地球物理观察

结果显示,华北克拉通东部在中生代晚期至新生代经历了广泛的岩浆活动、显著的构造伸展,岩石圈厚度明显减薄并伴随着岩石圈地幔性质的改变(陈凌等,2010b;朱日祥等,2012)。关于导致华北克拉通破坏的动力学原因一直有不同的观点,发生在华北克拉通及周边的构造事件,如石炭纪古亚洲洋向 S 俯冲、三叠纪扬子板块与华北板块的碰撞、中生代—新生代太平洋板块俯冲。此外,冈瓦那超大陆裂解、地幔柱作用、印度板块与欧亚大陆的碰撞,均被列入可能的原因(朱日祥等,2009)。中亚造山带南接华北板块,讨论它们之间的深部构造关系,对于认识中亚造山带的构造演化在华北克拉通破坏中所起的作用具有重要意义。从二维深部电性结构上看,中亚造山带与华北克拉通的边界带深部主要表现为高阻区,仅仅在华北克拉通的内蒙地轴存在局部高导异常体(C3),该异常可能是由中亚造山带与华北克拉通深部地质作用引起的上地幔热物质上涌造成的,但南部的燕山造山带具有较深的高阻体,它可能会起到构造屏障的作用,使克拉通内外上地幔顶部具有不同的对流模式,从而会减弱中亚造山带与华北板块深部地质作用对华北克拉通东部破坏的影响,因此,我们认为中亚造山带的构造演化对破坏华北克拉通的稳定性产生了一定的影响,但它不是华北克拉通破坏的主要动力学因素。

6 结论

本文对通过华北克拉通东北边界带的内蒙古苏尼特左旗—辽宁锦州的大地电磁测深剖面数据进行了详细的处理分析和二维反演,获得了沿剖面的深部电性结构。经过对深部电性结构特征的分析与讨论,我们可以得到以下几点认识:

(1)纵观整个电性剖面,呈现为横向分块的特征,沿剖面从西北到东南大致可以分为 3 个电性区,表现为高阻—低阻—高阻的变化。中亚造山带各构造单元电性结构的横向变化比较复杂,反映了该区经历了复杂的板块俯冲—汇集—碰撞地质演化的深部过程,而南部的华北板块内深部电性结构的横向变化相对平缓,表现为稳定的克拉通特征。

(2)锡林浩特断裂(F_2)与西拉木伦河断裂(F_4)之间宽约 100km 的区域可能为西伯利亚板块与华北板块最终缝合的位置。缝合带位置具备壳、幔源物质向上运移的通道,其控制的次级断裂为成矿物质的积聚提供了良好的环境,因此,该区域具有深部找矿的远景。

(3)中亚造山带的构造演化会对华北克拉通的稳定性产生影响,但与太平洋板块的 W 向俯冲相比,它不是华北克拉通破坏的主要动力学因素。

尽管我们给出了研究区的深部电性结构,并对该区的重要构造问题提出了看法,但一方面由于测点分布较稀疏,我们对浅部构造的约束有限,另一方面,一些地区的结构具有三维性,二维反演结果只能近似地反映地下深部的结构特点,而全面详实地了解地下结构信息,对研究该区的构造演化和成矿作用具有十分重要的意义,因此,今后在此加密测点以及进行三维观测是非常有必要的。

致谢 感谢江汉石油管理局物探公司在数据采集工作中给予的帮助,以及内蒙古自治区地震局与辽宁省地震局对研究工作的支持。

参 考 文 献

理学报, 36(6): 773—783.

- BAI Deng-hai, ZHANG Li, KONG Xiang-ru. 1993. A magnetotelluric study of the Paleozoic collision zone in the east of Inner Mongolia- II: Two dimensional modeling [J]. Chinese Journal of Geophysics, 36(6): 773—783 (in Chinese).
- 蔡军涛, 陈小斌, 赵国泽. 2010. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(二): 反演数据极化模式选择 [J]. 地球物理学报, 53(11): 2703—2714.
- CAI Jun-tao, CHEN Xiao-bin, ZHAO Guo-ze. 2010. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric II: Which data polarization mode should be used in 2D inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 53(11): 2703—2714(in Chinese).
- 陈斌, 赵国春, Wilde Simon. 2001. 内蒙古苏尼特左旗南 2 类花岗岩同位素年代学及其构造意义 [J]. 地质论评, 47(4): 361—367.
- CHEN Bin, ZHAO Guo-chun, WILDE Simon. 2001. Subduction- and collision-related granitoids from southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: Isotopic ages and tectonic implications [J]. Geological Review, 47(4): 361—367 (in Chinese).
- 陈凌, 程骋, 危自根. 2010a. 华北克拉通边界带区域深部结构的特征差异性及其构造意义 [J]. 地球科学进展, 25(6): 571—581.
- CHEN Ling, CHENG Cheng, WEI Zi-gen. 2010a. Contrasting structural features at different boundary areas of the North China Craton and its tectonic implications [J]. Advances in Earth Science, 25(6): 571—581 (in Chinese).
- 陈凌, 危自根, 程骋. 2010b. 从华北克拉通中、西部结构的区域差异性探讨克拉通破坏 [J]. 地学前缘, 17(1): 212—228.
- CHEN Ling, WEI Zi-gen, CHENG Cheng. 2010b. Significant structural variations in the central and western North China craton and its implications for the craton destruction [J]. Earth Science Frontiers, 17(1): 212—228(in Chinese).
- 陈小斌, 赵国泽. 2009. 自动构建大地电磁二维反演的测点中心网格 [J]. 地球物理学报, 52(6): 1564—1572.
- CHEN Xiao-bin, ZHAO Guo-ze. 2009. Automatic construction of a Site-Centered Grid (SCG) for 2D magnetotelluric inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(6): 1564—1572(in Chinese).
- 陈小斌, 赵国泽, 詹艳. 2004. MT 资料处理与解释的 Windows 可视化集成系统 [J]. 石油地球物理勘探, 39(B11): 11—16.
- CHEN Xiao-bin, ZHAO Guo-ze, ZHAN Yan. 2004. A visual integrated windows system for MT data processing and interpretation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 39(B11): 11—16(in Chinese).
- 程三友, 刘少峰, 苏三. 2013. 索伦-林西缝合带北侧西段中二叠统哲斯组砂岩碎屑分析及其构造意义 [J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 36(2): 161—167.
- CHENG San-you, LIU Shao-feng, SU San. 2013. Rock characteristics of Zhesi Formation of middle Permian to the north of Suolon-Lunxi Suture and its tectonic implication [J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 36(2): 161—167(in Chinese).
- 韩国卿, 刘永江, 温泉波, 等. 2011. 西拉木伦河缝合带北侧二叠纪砂岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其构造意义 [J]. 地球科学, 36(4): 687—702.
- HAN Guo-qing, LIU Yong-jiang, WEN Quan-bo, et al. 2011. LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital zircons from the Permian sandstones in north side of Xar Moron River suture belt and its tectonic implications [J]. Earth Science, 36(4): 687—702(in Chinese).
- 李冉, 汤吉, 董泽义, 等. 2014. 云南南部地区深部电性结构特征研究 [J]. 地球物理学报, 57(4): 1111—

1120.

- LI Ran, TANG Ji, DONG Ze-yi, *et al.* 2014. Deep electrical conductivity structure of the southern area in Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(4): 1111—1122(in Chinese).
- 李文辉, 高锐, Keller Randy, 等. 2014. 华北克拉通北缘(怀来—苏尼特右旗)地壳结构 [J]. *地球物理学报*, 57(2): 472—483.
- LI Wen-hui, GAO Rui, KELLER Randy, *et al.* 2014. Crustal structure of the northern margin of North China craton from Huailai to Sonid Youqi profile [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(2): 472—483(in Chinese).
- 辽宁省地质矿产局. 1989. 辽宁省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Liaoning Province. 1989. *Regional Geology of Liaoning Province* [M]. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- 卢造勋, 夏怀宽. 1993. 内蒙古东乌珠穆沁旗—辽宁东沟地学断面 [J]. *地球物理学报*, 36(6): 765—772.
- LU Zao-xun, XIA Huai-kuan. 1993. Geoscience transect from Dong Ujimqinqi, Nei Mongol, to Donggou, Liaoning [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 36(3): 765—772(in Chinese).
- 内蒙古地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia. 1991. *Regional Geology of Inner Mongolia* [M]. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- 徐义刚. 1999. 岩石圈的热-机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 18(1): 3—7.
- XU Yi-gang. 1999. Roles of thermo-mechanic and chemical erosion in continental lithospheric thinning [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 18(1): 3—7(in Chinese).
- 张乐天, 金胜, 魏文博, 等. 2012. 青藏高原东缘及四川盆地的壳幔导电性结构研究 [J]. *地球物理学报*, 55(12): 4126—4137.
- ZHANG Le-tian, JIN Sheng, WEI Wen-bo, *et al.* 2012. Electrical structure of crust and upper mantle beneath the eastern margin of the Tibetan plateau and the Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(12): 4126—4137(in Chinese).
- 张振法, 姜建利, 秦增刚, 等. 2001. 根据地质和地球物理资料重新厘定槽台界线: 关于华北地台与兴蒙古生代地槽褶皱系界线的划分 [J]. *中国地质*, 28(9): 1—12.
- ZHANG Zhe-fa, JIANG Jia-li, QIAN Zeng-gang, *et al.* 2001. Redefinition of boundaries of geosynclines and platforms based on geological and geophysical data: A case study of the boundary between the North China platform and the Hinggan-Mongolian geosynclinal fold belt [J]. *Geology in China*, 28(9): 1—12(in Chinese).
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制 [J]. *中国科学(D辑)*, 41(5): 583—592.
- ZHU Ri-xiang, CHEN Lin, WU Fu-yuan, *et al.* 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton [J]. *Science in China (Ser D)*, 41(5): 583—592(in Chinese).
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 2012. 华北克拉通破坏 [J]. *中国科学(D辑)*, 42(8): 1135—1159.
- ZHU Ri-xiang, XU Yi-gang, ZHU Guang, *et al.* 2012. Destruction of the North China Craton [J]. *Science in China (Ser D)*, 42(8): 1135—1159(in Chinese).
- 朱日祥, 郑天愉. 2009. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系 [J]. *科学通报*, 54(14): 1950—1961.
- ZHU Ri-xiang, ZHENG Tian-yu. 2009. Destruction geodynamics of the North China Craton and its Paleoproterozoic plate tectonics [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(14): 1950—1961(in Chinese).
- Bahr K. 1988. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: Regional induction and local telluric distortion [J]. *J Geophys*, 62: 119—127.
- Caldwell T G, Bibby H M, Brown C. 2004. The magnetotelluric phase tensor [J]. *Geophysical Journal International*.

158(2): 457—469.

- Chen B, Jahn B M, Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 245—257.
- Deng J F, Su S G, Niu Y L, *et al.* 2007. A possible model for the lithospheric thinning of North China Craton: Evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism [J]. *Lithos*, 96(1): 22—35.
- Gamble T D, Goubau W M, Clarke J. 1979. Magnetotelluric with a remote magnetic reference [J]. *Geophysics*, 44: 53—68.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton [J]. *Nature*, 432: 892—897.
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, *et al.* 2008. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: Implications for continental growth [J]. *Lithos*, 101(3): 233—259.
- Miao L, Zhang F, Fan W M, *et al.* 2007. Phanerozoic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling orogenic belt in North China: Constraints from geochronology of ophiolites and associated formations [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 280(1): 223—237.
- Rodi W, Mackie R L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion [J]. *Geophysics*, 66(1): 174—187.
- Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 364: 299—307.
- Tang Q S, Chen L. 2008. Structure of the crust and uppermost mantle of the Yanshan Belt and adjacent regions at the northeastern boundary of the North China Craton from Rayleigh wave dispersion analysis [J]. *Tectonophysics*, 455(1): 43—52.
- Unsworth M. 2010. Magnetotelluric studies of active continent-continent collisions [J]. *Surveys in Geophysics*, 31(2): 137—161.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31—47.
- Xiao Q B, Zhao G Z, Dong Z Y. 2011. Electrical resistivity structure at the northern margin of the Tibetan plateau and tectonic implications [J]. *Journal of Geophysical Research*, 116(B12): B12401.
- Xiao W J, Windley B F, Badarch G, *et al.* 2004. Paleozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of Central Asia [J]. *Journal of the Geological Society*, 161: 339—342.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, *et al.* 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt [J]. *Tectonics*, 22(6).
- Xiao W J, Windley B F, Huang B C, *et al.* 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implication for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1189—1217.
- Xu B, Charvet J, Chen Y, *et al.* 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): Framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1342—1364.
- Xu B, Chen B. 1997. Framework and evolution of the middle Paleozoic orogenic belt between Siberian and North China Plates in northern Inner Mongolia [J]. *Science in China (Ser D)*, 40(5): 463—469.

DEEP ELECTRIC STRUCTURE BENEATH NORTHEASTERN BOUNDARY AREAS OF THE NORTH CHINA CRATON

DONG Ze-yi¹⁾ TANG Ji¹⁾ CHEN Xiao-bin¹⁾ WANG Li-feng¹⁾
WANG Ji-jun¹⁾ MENG Bu-zai²⁾ BAI Yun²⁾

1) *Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*

2) *Earthquake Administration of Liaoning Province, Shenyang 110031, China*

Abstract

Magnetotelluric data are collected along a NW-SE trending and about 900km long profile within northeastern boundary areas of the North China craton (NCC). This profile extends from the Hegenshan belt within the Central Asian orogenic belt (CAOB), across the Baolidao arc, Solonker-Linxi suture zone, Ondor Sum accretion complex, Bainaimiao arc, Inner Mongolia paleo-uplift, Yanshan belt, and ends on the Liaohe depression of the NCC. Impedance tensor decomposition methods are used to study the dimensionality and geo-electric strike of MT data of the region. Two-dimension (2D) analysis is appropriate for this profile. The 2-D subsurface electrical resistivity structure along profile is obtained using the non-linear conjugate gradient (NLGG) algorithm. The electrical resistivity structure is characterized by lateral segmentation, and divided into high resistive, low resistive, and high resistive areas; The lateral variation of electrical resistivity is significant within the CAOB, but it is smooth in the NCC; The extensive high conductive body (HRB) is observed in the mid-low crust beneath the Solonker-Linxi suture zone and Inner Mongolia paleo-uplift, respectively; The low resistivity could be due to the partial melts and crustal flows. Based on our electrical resistivity structure and other geological, geophysical observations, we speculate that (1) the final suturing of the Siberian craton to the NCC could be along the areas between Xilinhot Fault and Xar Moron Fault; (2) the relatively thick high resistive body beneath the Yanshan belt may serve as a tectonic barrier separating the on-craton and off-craton regions into different upper mantle convection system, and lower the effect of tectonic evolution of CAOB on the destruction to NCC.

Key words Central Asian orogenic belt, North China craton, magnetotelluric, deep electric structure

[作者简介] 董泽义, 男, 1984年生, 2015年在中国地震局地质研究所获博士学位, 助理研究员, 主要从事大地电磁测深法深部结构探测及动力学研究, E-mail: dongzy09@gmail.com。