

# 华北中部岩石圈电性结构

## ——应县—商河剖面大地电磁测深研究

魏文博, 谭捍东, 金 胜, 邓 明, 叶高峰, 邓靖武, 万战生

(中国地质大学地球物理系, 北京 100083)

**摘要:** 2001年, 沿着山西应县到山东商河, 重新布置大地电磁测深剖面进行研究. 采用现代先进的大地电磁数据处理技术和快速松弛二维反演方法获得该剖面二维电性结构模型, 从而充分展示了华北地区岩石圈电性结构的特点. 从电性特征上讲, 华北岩石圈以太行山前断裂为界划分为东、西两区, 东区为低阻区, 西区为高阻区. 在东区, 上地壳电性结构基本与华北裂谷系的隆、拗构造格局相对应, 岩石圈的电导最高达  $3 \times 10^4$  S, 远远大于强烈活动的安第斯山岩浆弧区和青藏高原岩石圈的电导. 这里, 在构造连接部位的地壳中有不连续的高导体存在, 电导率大约  $0.1 \sim 0.8$  S/m. 在西区, 太行山和恒山的岩石圈为高阻块体, 表现出稳定大陆区岩石圈导电性结构的特点. 但恒山高阻块体之下发现一组向西缓倾的高导层, 其电导率为  $0.04 \sim 0.25$  S/m, 顶面在 20 km 深处, 底面深度大约 40 km.

**关键词:** 华北; 大地电磁测深; 岩石圈; 电性结构.

**中图分类号:** P631.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2383(2002)05-0645-06

**作者简介:** 魏文博(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事地球物理学的教学与研究.

## 0 引言

对于研究中国大陆中生代演化的动力学模型, 东部华北地区古大陆克拉通解体和岩石圈减薄的深部过程是亟待深入研究的重要科学问题.

在华北, 有关火山活动与地幔捕虏体的研究表明, 华北大陆岩石圈可能在燕山期开始发生巨大的减薄作用<sup>[1]</sup>, 喜山期又发生另一次岩石圈减薄事件, 使原本巨厚的华北大陆岩石圈受到强烈改造, 导致现今岩石圈结构强烈的不均一性; 并且, 区内强烈的地震活动和大量活动断裂发育及山区抬升、平原下沉的诸多现象又表明华北岩石圈现今仍是一个活动的岩石圈. 然而, 我们还不能确切地知道: 现今减薄了的华北岩石圈还有多厚? 是地幔盖层还是地壳在减薄? 在多大范围内减薄? 什么样的原因导致减薄? 其深部过程如何? 减薄掉的物质是如何运移的? 岩石圈的物质状态是否有变化? 现今仍在活动的岩石圈的能量来源于何方? 岩石圈应该如何分

区? 它们与表壳构造之间是如何相互作用的? 等等. 要回答这一系列问题, 基本的出发点还在于确实了解华北岩石圈结构的各种特征; 查明区内各构造单元之间的深层耦合关系, 这些对于创立中国大陆岩石圈形成、演化理论有十分重要的科学意义.

因此, 自 20 世纪 70 年代以来, 在华北地区开展过大量以研究岩石圈结构和深部地质过程为目标的地球物理探测, 但投入的方法技术以地震深探测为主, 有关岩石圈电性结构的研究并不多. 除了穿过本区的 4 条地学大断面包含少量大地电磁测深 (MT) 以外, 还在京、津、唐、张地区布置过 2 条测线 31 个 MT 测点<sup>[2]</sup>; 在邢台地区布置过 4 条测线, 共 45 个测点<sup>[3]</sup>; 沿山西阳高一河北容城也布置了 19 个测点<sup>[4]</sup>. 而这些大地电磁测深的数据采集, 多数是在 20 世纪 90 年代以前完成的, 使用的仪器有从德国引进的 MMS-03 大地电磁系统和国内自行研制的 SD-1 型大地电磁仪, 它们与现代的 MT-24 或 V5-2000 大地电磁系统相比, 性能上存在较大差距, 这势必影响数据采集的质量. 另一方面, 由于当时技术发展水平的限制, 大地电磁测深数据处理和反演技术远比现在落后, 这很可能影响当时大地电磁测

深资料解释结果的可靠性.此外,除 4 条地质大断面以外,区内现有的大地电磁测深剖面通常较短,不利于研究大区域性的壳幔结构;而在地质大断面上大地电磁测深的点距较大,一般在 30~50 km 之间,有些地方甚至更大,这显然不可能对岩石圈电性结构有比较深入的认识.

但是,深入研究华北岩石圈的电性结构,不仅可以提供有关岩石圈地质构造轮廓的信息,更重要的是可以间接反映现今地下深部的热结构特征和物质状态分布特点;同时,对于华北油气、矿产、地热资源预测和评价及地震灾害预测、预报也有明显的实际意义.当前,随着科学技术的发展,国内在大地电磁测深方面,无论是仪器、数据采集或数据处理和反演都有了长足的进步.我国的大地电磁测深已可实现超宽频带、高精度测量技术;在数据处理和反演等方面也基本与国际先进技术接轨.因此,有必要在华北地区选择重要区段重新布置大地电磁测深剖面,进一步详细查明岩石圈电性结构特点,从而研究深部的热结构特征和物质状态分布,为讨论华北地区古大陆克拉通解体、岩石圈减薄的深部过程提供较可靠的依据.

## 1 野外观测与室内数据处理及反演

2001 年 11~12 月间,我们从山西应县出发,向东南越过恒山、太行山脉,穿过河北平原,抵达山东商河,全程 600 余 km,直线距离 450 km;共布置 34 个大地电磁测深点,平均点距约 10~15 km,即构成“应县—商河大地电磁测深剖面”(图 1).该剖面位置大致与“响水—满都拉”GGT 地质大断面的中段

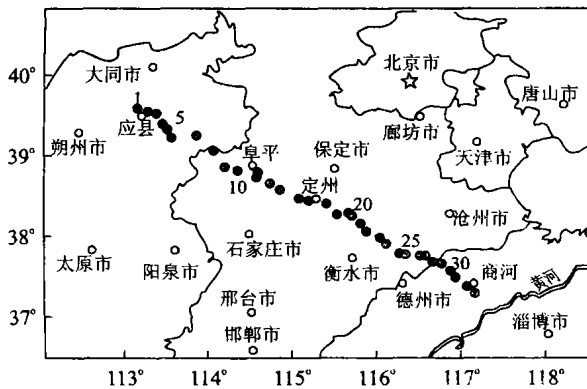


图 1 应县—商河大地电磁测深剖面位置

Fig. 1 Location of Yingxian-Shanghe MT profile

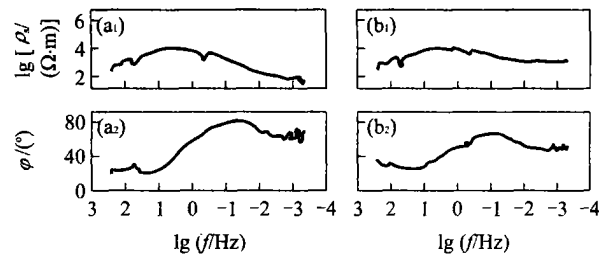


图 2 HB08 号点大地电磁测深曲线

Fig. 2 MT sounding curves of HB08 survey station

a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> 分别为 HB08 号点 XY 极化模式视电阻率和阻抗相位; b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> 分别为 HB08 号点 YX 极化模式视电阻率和阻抗相位

(淄博—应县)重合,但测点却密得多(淄博—应县剖面上,测深点平均点距约 50 km);因此,其研究成果比“响水—满都拉”地质大断面关于地壳电性结构的研究成果更细致,也更接近真实.

为了取得可靠的研究成果,首先必须保证野外数据采集质量,这除了需要先进的仪器之外,还需要先进的数据采集技术.在进行应县—商河剖面的大地电磁数据采集时,我们选用了美国 EMI 公司的 MT-24 局域网络型大地电磁系统.该系统是目前最先进的宽频大地电磁测深仪器,它包括电道采集箱(FAM-2)、磁道采集箱(FAM-3)、带 GPS 的控制存储单元(CSU-GPS)、磁传感器(BF-7、BF-4)和不极化电极等.仪器具有低噪声、大动态范围、多道、多功能的特点;配置的磁传感器频带为 0.000 1~1 000 Hz,灵敏度为 0.3 V/nT.

在野外数据采集时,记录大地电磁场 5 个分量的“时间序列”,每个测点上记录时间均大于 20 h,所采集的 MT 信号的频率范围为  $3.2 \times 10^2 \sim 4.6 \times 10^{-4}$  Hz.为了改善野外数据采集质量,观测时以相邻测点互为参考,实施了远参考道技术,参考点与观测点距离约 10~15 km.

当取得可靠的野外数据后,我们采用目前最先进的 MT 数据处理技术对数据进行处理.这包括时间序列的 Robust 估计、Rhoplus 分析和复阻抗张量分解<sup>[5]</sup>.经过处理,得到高精度的大地电磁响应估计值(图 2).随即运用二维快速松弛反演算法进行 MT 数据的二维反演<sup>[6]</sup>.如图 3 所示,该剖面二维反演模型 MT 响应的理论计算结果与实测数据大体相似,这表明 MT 二维反演结果与观测剖面实际的地壳电性结构相近.图 4 为应县—商河剖面大地电磁二维反演模型,断面上的色块反映了反演模型的电性结构图像.

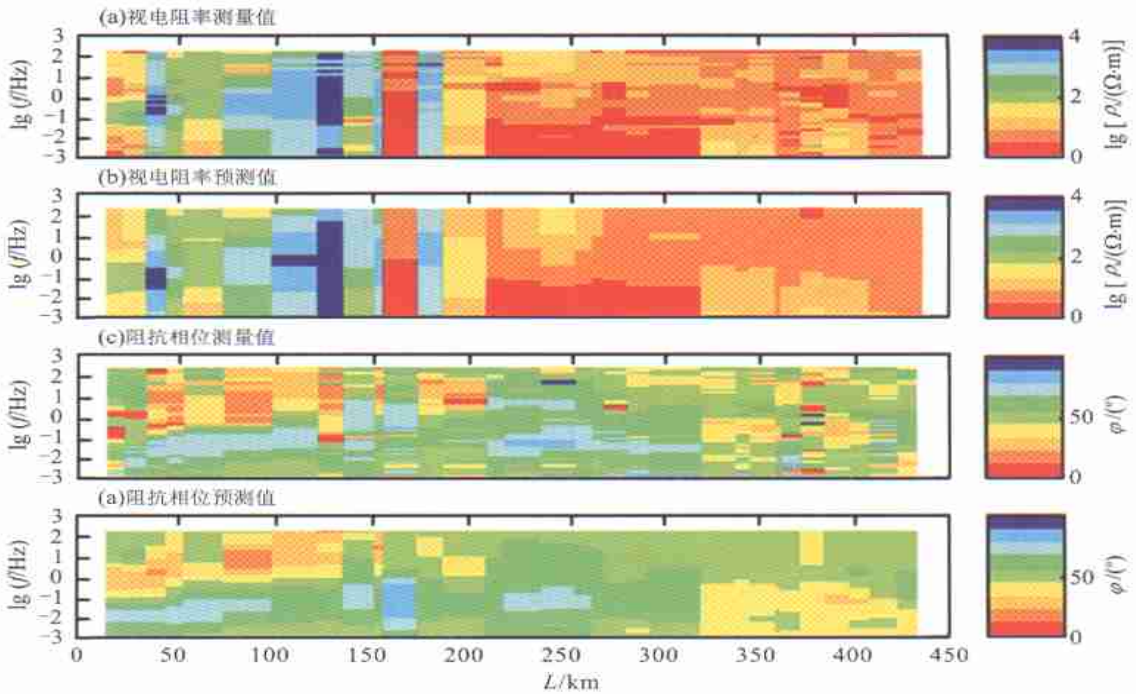


图3 MT 二维反演时 TM 模式的拟合结果

Fig.3 Comparison between theoretical response of inversion model and real data

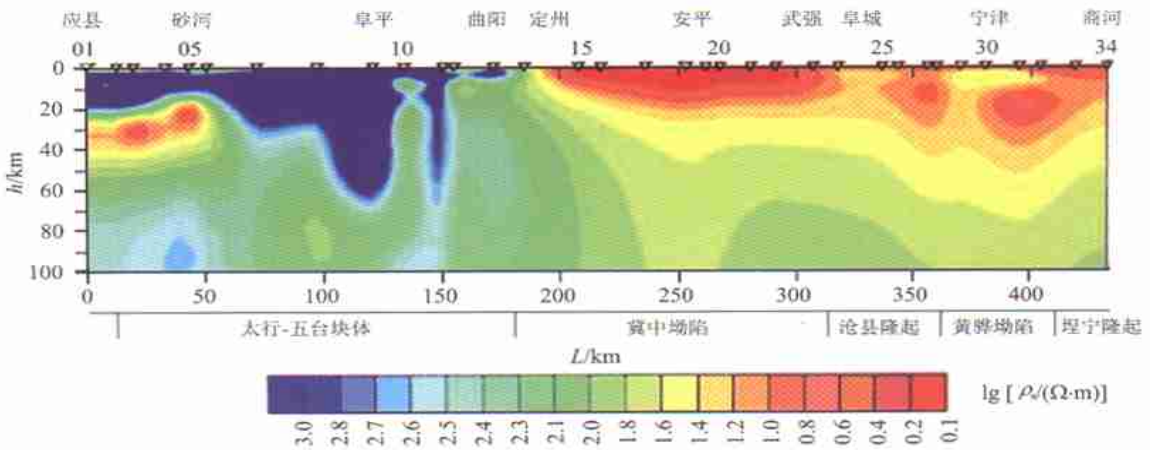


图4 应县—商河大地电磁二维反演模型

Fig.4 Model from 2-D inversion of MT data along Yingxian-Shanghe profile

红色表示“低阻体”,蓝色表示“高阻体”;“色标”表示的是电阻率的常用对数值,单位为  $\Omega \cdot m$

## 2 华北中部岩石圈电性结构

如图1所示,应县—商河大地电磁测深剖面位于华北地区中部.沿剖面方向的地势西高东低,剖面西部高程一般在海拔1 000~1 500 m,东部在40~50 m,落差超过1 000 m.自西向东,剖面跨越太行—五台地块和华北裂谷带4个基本构造单元,即冀中拗陷、沧县隆起、黄骅拗陷和埧宁隆起.因

此,研究沿剖面的壳、幔结构,基本能反映华北中部岩石圈的构造格局.图4为应县—商河剖面的壳、幔电性结构模型.从宏观上看,模型清楚地显示,以位于曲阳附近的太行山前断裂为界,剖面分为东西两部分,其壳、幔电性结构截然不同.

剖面西部为高阻(低电导)区,东部为低阻(高电导)区.东部岩石圈的电导通常比西部高2~3个数量级,最高达  $3 \times 10^4$  S(图5).除导电性上的差异

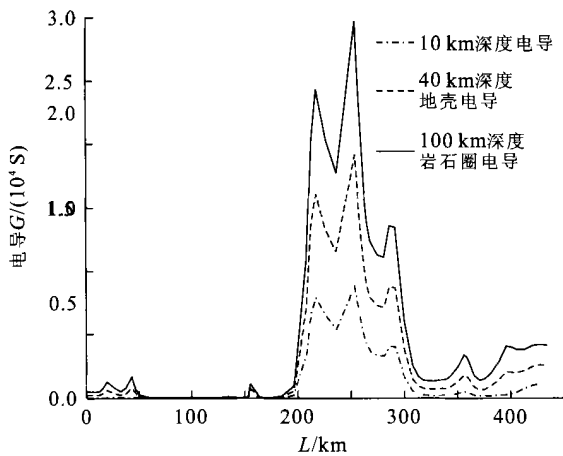


图 5 应县—商河岩石圈电导剖面曲线

Fig. 5 Distribution curve of lithospheric electric conductivity along Yingxian-Shanghe profile

以外,导电性随深度的变化以及沿剖面的分布也有明显的不同.在剖面东部,地下介质的导电性大致呈“层状”分布,随深度增大,介质电导率逐渐减小;大约当深度超出 80 km 时,电导率趋于稳定,约 0.01 S/m.但在剖面西部,地下介质大多呈“高阻块体”,其电导率小于  $4 \times 10^{-3}$  S/m;而当深度大于 150 km 时,电导率增大,并趋于  $6.25 \times 10^{-3}$  S/m.显然,应县—商河剖面的壳、幔导电性结构,在东西两边的这些区别足以说明,太行—五台地块与华北裂谷带的岩石圈构造和热状态有很大差别.

仔细分析应县—商河壳、幔电性结构的特征不难看出,在曲阳存在一组向东倾斜、规模巨大的电性梯度带,其延深超出 50 km.这显然可以证明太行山前断裂是一组向东倾斜、岩石圈尺度的深断裂,它把华北岩石圈划分为两大单元,东部即华北裂谷带,西部为太行—五台地块.

在华北裂谷带,地壳电阻率等值线的分布总体上表现出基底向东倾斜,东陡、西缓,规模巨大的箕状断陷,断陷内呈分层结构的特点;沿剖面方向等值线的起伏正反映了裂谷带内坳、隆相间的构造格局,其中规模最大的构造单元属冀中拗陷(图 4).图 5 是应县—商河剖面地壳导电性分析的结果,如图 5 所示冀中拗陷区内,地下 10 km 深度以上(即地壳沉积表层)的电导远远大于其他构造单元,其最大值近  $9 \times 10^3$  S.由此可见,区内沉积盖层属于良导电性地层.电性结构的特征表明,冀中拗陷为两翼略不对称的断陷盆地,东陡、西缓,基底深度大于 15 km,电阻率约  $10 \sim 20 \Omega \cdot \text{m}$ (图 4).盆地基底

随着深度增大,地壳电阻率缓慢上升,到上地幔深度,趋于  $100 \Omega \cdot \text{m}$ ;但区内岩石圈整体仍表现出良导电性特点,若以 100 km 深度计算,岩石圈的电导在  $1 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$  S 之间(图 5),比西藏高原相同深度岩石圈的电导大得多<sup>[7]</sup>,更远远大于稳定地台区岩石圈的电导<sup>[8]</sup>.从冀中拗陷沿剖面向东即沧县隆起、黄骅拗陷和埕宁隆起,其岩石圈的电导在  $1.3 \times 10^3 \sim 4.2 \times 10^3$  S 之间,小于冀中拗陷,却远大于剖面西部的太行—五台地块.在构造连接部位的地壳中有不连续的高导体存在,电导率大约  $0.1 \sim 0.8$  S/m;高导体之下,地壳导电性随深度的变化完全与冀中拗陷区相同,但电阻率等值线明显下凹,这似乎可以说明,在华北裂谷带地壳的厚度具有向东增厚的趋势,最薄的地方位于冀中拗陷区内(图 4);而在上地幔的深度(约大于 50 km),冀中拗陷和黄骅拗陷均出现向下延伸的相对低阻带.

在剖面西部,即太行—五台地块,它包括太行山和恒山.区内地壳浅表的电导很低,一般在  $0.1 \sim 13$  S 之间;即便是岩石圈整体,其电导也只有  $10 \sim 780$  S(图 5).这显然说明太行山和恒山地区的岩石圈属于高阻块体.如图 4 所示,阜平—砂河为太行山区,区内地壳的电导率在  $2.5 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-4}$  S/m 之间,其电阻率断面等值线的形态似乎显示出太行山下巨大“山根”的轮廓.“山根”的底界起伏大,最浅的地方底面深度小于 40 km,最大的深度近 70 km,位于阜平以西.在阜平的东侧,大地电磁测深还发现一组陡立的、狭窄的电性异常带,它把高阻的地壳割裂开.其西边即太行高阻块体,东边是一组向上地幔延伸、狭窄的高阻异常体.沿剖面向西,砂河至应县之间即恒山山脉,其地壳的电导率与太行山相近,断面上高阻块体的底界面起伏不大,深度大约 20 km.在这高阻块体之下,发现一组向西缓倾的高导层;高导层的电导率为  $0.04 \sim 0.25$  S/m,底面大约在 40 km 深处.越过高导层向下,地壳的电阻率增大,在 100 km 深处达到最大值,而后减小并逐渐趋于稳定值.

但是,令人遗憾的是不论在华北东部或西部,我们都没有发现上地幔存在前人所发现的、明显的“高导层”.这就使得利用岩石圈导电性特征划分华北“软流圈”顶面的研究陷入了困境.

显然,应县—商河大地电磁测深资料的二维反演给出了比较准确的壳、幔电性结构图像,这为我们从电性的角度精细地描述了华北中部岩石圈构

造的特点,其主要认识归纳如下:(1)从电性特征上讲,华北地区岩石圈以太行山前断裂为界划分为东、西两区;东区为低阻区,其岩石圈电导率由浅到深逐渐减小,这与稳定大陆区岩石圈的导电性结构不同;西区为高阻区,岩石圈电导率由浅到深,先减小达最小值,后逐渐增大,表现出稳定大陆区岩石圈导电性结构的特点。(2)大地电磁探测结果证明,太行山前断裂为一组向东倾斜、岩石圈尺度的深断裂。(3)在华北东部,上地壳电性结构基本与华北裂谷系的隆、拗构造格局相对应;其中,冀中拗陷的规模最大,拗陷区内岩石圈的电导高达  $3 \times 10^4 \text{ S}$ , 远远大于强烈活动的安第斯山岩浆弧区和西藏高原岩石圈的电导。(4)沧县隆起、黄骅拗陷和埕宁隆起,其岩石圈的电导在  $1.3 \times 10^3 \sim 4.2 \times 10^3 \text{ S}$  之间,小于冀中拗陷,却远大于剖面西部的太行—五台地块。在构造连接部位的地壳中有不连续的高导体存在,电导率大约  $0.1 \sim 0.8 \text{ S/m}$ 。(5)太行山和恒山,岩石圈为高阻块体;剖面上电阻率断面等值线的形态似乎显示出太行山下巨大“山根”的轮廓,“山根”的底面起伏大,最浅的地方底面深度小于  $40 \text{ km}$ ,最大的深度近  $70 \text{ km}$ ,位于阜平以西。(6)恒山高阻块体之下发现一组向西缓倾的高导层,其电导率为  $0.04 \sim 0.25 \text{ S/m}$ ,顶面在  $20 \text{ km}$  深处,底面深度大约  $40 \text{ km}$ 。(7)虽然仅仅根据应县—商河剖面的电性结构图像还很难令人信服地划分出华北中部地壳和上地幔的界面(莫霍面)及“软流层”顶面的位置,但可以认识到这2个界面的复杂性,这包括性质的复杂性和空间分布的复杂性。从宏观上,我们可以定性地判断出华北地区西部的地壳和岩石圈厚度大于东部的;而在东部,又有向东相对增厚的趋势,地壳和岩石圈厚度最薄的地方在冀中拗陷。

### 3 结束语

我们关于华北岩石圈结构的研究还仅仅是一个开始。这里发表的只是大地电磁探测在华北地区发现的一些“现象”的罗列,还来不及进行深入的分析。尤其是,如何根据电性特征较准确地判断华北地区地壳厚度的变化?如何重新认识“软流圈”的电性特征?怎么具体界定华北地区“软流圈”的顶面位置?这些都还存在着许多疑惑,还有待于深入研究。

多年来在西藏所做的研究使我们强烈地意识

到,解决西藏高原隆升机制问题不能把西藏孤立起来研究,而应该站在中国大陆演化的高度上去探讨;把西部岩石圈增厚和东部岩石圈减薄的问题紧密地联系起来,寻求一种统一的解释。但这是一个复杂的、探索性很强的过程,因而又是一个长期的过程。这要从岩石圈结构的研究开始,它的进展依赖于多种先进地球物理技术的应用,这些地球物理技术从不同的角度为岩石圈结构提供了各种物理的证据,帮助我们的“思维”不断地逼近现今岩石圈结构的真实面貌。只有在这个基础上,才有可能把中国大陆东、西部结合起来研究,也才有可能真正取得中国大陆动力学研究的进展。从这角度上看,深入研究华北地区岩石圈结构具有相当重要的科学意义。

### 参考文献:

- [1] 邓晋福,赵海玲,莫宣学,等. 中国大陆根—柱构造——大陆动力学的钥匙[M]. 北京:地质出版社,1996. 30—39.  
DENG J F, ZHAO H L, MO X X, et al. Continental roots-plume tectonics of China — key to the continental dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996, 30—39.
- [2] 秦馨菱, Pedersen L B, 赵玉林, 等. 唐山地震区地壳电性结构及 MT 探索潜在震源的可能性[J]. 地震学报, 1991, 13(3): 354—363.  
QIN X L, Pedersen L B, ZHAO Y L, et al. Conductivity structure of crust in the Tangshan seismic area and the possibility of exploring potential seismic sources by magnetotelluric method [J]. Chinese Journal of Acta Seismologica Sinica, 1991, 13(3): 354—363.
- [3] 邓前辉,张木生,詹艳,等. 邢台震区地壳上地幔电性结构及其构造意义[J]. 地震地质, 1997, 19(2): 155—163.  
DENG Q H, ZHANG M S, ZHAN Y, et al. Geoelectrical structure of the crust and upper mantle in the Xingtai earthquake area and its tectonic implications [J]. Chinese Journal of Seismology and Geology, 1997, 19(2): 155—163.
- [4] 赵国泽,刘铁胜,江钊,等. 山西阳高一河北容城剖面大地电磁资料的二维反演解释[J]. 地球物理学报, 1997, 40(1): 38—45.  
ZHAO G Z, LIU T S, JIANG Z, et al. Two-dimensional inversion of MT data along Shanxi Yanggao-Hebei Rongcheng profile [J]. Acta Geophysica Sinica, 1997, 40(1): 38—45.

- [5] Egbert G D, Booker J R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions, geophysics [J]. J Roy Astr Soc, 1986, 87: 175—194.
- [6] Smith J T, Booker J R. Rapid inversion of two- and three-dimensional magnetotelluric data [J]. J Geophys Res, 1996, 96(B3): 3905—3922.
- [7] Wenbo W, Martyn U, Jones A, et al. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies [J]. Science, 2001, 292: 716—718, .
- [8] 石应骏, 刘国栋, 吴广耀, 等. 大地电磁测深法教程 [M]. 北京: 地震出版社, 1985. 23—34.
- SHI Y J, LIU G D, WU G Y, et al. A course in magnetotelluric method [M]. Beijing: Seismology Publishing House, 1985. 23—34.

## Conductivity Structure of Lithosphere in Central North China: Magnetotelluric Study of Yingxian—Shanghe profile

WEI Wen-bo, TAN Han-dong, JIN Sheng, DENG Ming, YE Gao-feng, DENG Jing-wu,  
WAN Zhan-sheng

(*Department of Geophysics, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** In 2001, an MT sounding profile was relocated from Yingxian, Shanxi Province to Shanghe, Shandong Province. The advanced MT data processing method and rapid release inversion (RRI) were employed to establish a 2D model of conductivity structure showing fully the features of conductivity structure of the lithosphere in North China. In terms of conductivity, the North China lithosphere is classified as eastern and western parts with the frontal fault in the Taihang mountain as the corresponding boundary line. The eastern part is characterized by the low-resistance conductivity, and the western part is characterized by the high-resistance conductivity. In the eastern part, the conductivity structure in the upper crust corresponds roughly to the uplift and depression tectonic structure of the North China rift system, with the maximum conductivity of the lithosphere reaching  $3 \times 10^4$  S, far greater than that of magma arc area in Andes and the lithosphere of the Tibet plateau where the volcanic activities are violent. Here, discontinuous highly-conductive bodies, whose conductivity is about 0.1—0.8 S/m, are present in the crust of the contact zone. In the western part, the lithosphere of the Taihang and Hengshan mountains, composed of high-resistance conductivity bodies, is characterized by the conductivity structure of a stable continental lithosphere. However, a group of westward-inclined highly-conductive layers, whose conductivity is 0.04—0.25 S/m, whose top layer is located at the depth of 20 km and whose bottom layer is located at the depth of around 40 km, were discovered under the Hengshan high-resistance conductivity body.

**Key words:** North China; magnetotelluric; lithosphere; conductivity structure.