

# 兴蒙、吉黑地区岩石圈电性结构特征

刘国兴 张志厚 韩江涛 唐君辉

(吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**采用具有国际先进水平的二维连续自动反演技术对收集的 MT 资料进行了二维反演和综合解释。得到了不同地区 MT 剖面的二维电性结构断面。通过二维反演断面发现了松辽盆地的东西边界较陡,而南部边界较缓的电性结构;发现在火山地区 12~30 km 深度普遍存在低阻物体,为解释火山地区深部存在岩浆囊提供了依据。另外,于桦南—饶河重新实施的 MT 剖面,其二维反演断面也较清楚地揭示出:剖面西段为高阻特征且具有稳定的岩石圈厚度(80~90 km),该区段对应佳木斯地块;剖面中部具有明显的电性梯度带,该梯度带为确定佳木斯地块的东界位置及其深部结构形态提供了依据;剖面东段则揭示了佳木斯地块以东地区浅部为逆冲推覆体,深部为多个高阻块体与低阻条带相间的电性结构。

**关键词:**兴蒙、吉黑地区;岩石圈;电性结构;二维反演;佳木斯地块

**中图分类号:**P313.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2006)04-0824-08

## 1 前言

兴蒙、吉黑地区岩石圈电性结构研究是国土资源部“兴蒙、吉黑地区岩石圈三维结构及其演化”项目中的一部分。研究目标是以区内已有大地电磁测深资料为基础,采用先进的 MT 二维反演技术,对已有 MT 资料进行再处理,归纳总结不同资料区的岩石圈电性结构特征,并提出新的认识。另外为了配合区内岩石圈三维结构研究,搞清佳木斯地体及东缘地区相邻地质体的深部结构关系,为深入研究这一地区岩石圈圈层结构及地球动力学问题提供新的依据,还于桦南—饶河重新布置了 240 km 的 MT 剖面,以深化对该地区岩石圈结构与演化的研究和认识。

多年来,曾有很多地质学家和地球物理学家从不同角度对兴蒙、吉黑地区岩石圈结构进行过研究<sup>[1-6]</sup>。满洲里—绥芬河地学断面<sup>[7-8]</sup>作为中国岩石圈研究计划的重要成果,对东北地区的岩石圈结构与演化做了较系统的研究。综合前人研究成果和对收集资料的再处理,尤其是经过二维自动反演和综合解释,使笔者对松南、辽北地区;满洲里—绥芬河断面域;长白山火山区;镜泊湖火山地区岩石圈电性结构及特点有了一些新的认识。通过对桦南—饶河大地电磁剖面的反演解释,为该地区岩石圈电性结构,地体边界及地球动力学等

问题提供了新的深部地球物理依据。

## 2 MT 资料收集

在研究区内,曾围绕大庆油田区的详细勘探及外围油气资源勘查,由油田及不同科研单位完成了大量的大地电磁测深的探测,但这些工作多数都以浅层研究为主。出于以上原因,收集了区内已有的以深部探测为目的的大地电磁测深 332 个物理点的资料(图 1,表 1),而且这些资料基本都是经过实时处理的视电阻率数据和一维反演成果。对于二维反演只是对少数测点进行了验证性拟合计算,对整条剖面的连续二维反演还都没有进行过。所收集到的资料都是按大地电磁野外工作规范而获得的,而且都与各相应的研究报告一起经过了相关部门的审查和正式验收。资料的质量和精度都是可靠的。

## 3 不同地区 MT 资料的二维反演及岩石圈电性结构特征

### 3.1 二维有限元光滑模型反演

光滑模型反演<sup>[9-11]</sup>是一种将大地电磁测深资料转换为电阻率—深度模型的有效稳健的反演方法。对于简单的一维反演,通常由每个观测点观测到的视电阻率和相位确定层状大地模型的电性参数——层电阻率和厚度,从而可将观测数据

收稿日期:2005-12-27;改回日期:2006-5-11

基金项目:国土资源部岩石圈三维结构研究专项计划项目(2001010206)资助。

作者简介:刘国兴,男,1951年生,教授,从事电法勘探教学与研究工作;E-mail:guoxing@jlu.edu.cn。

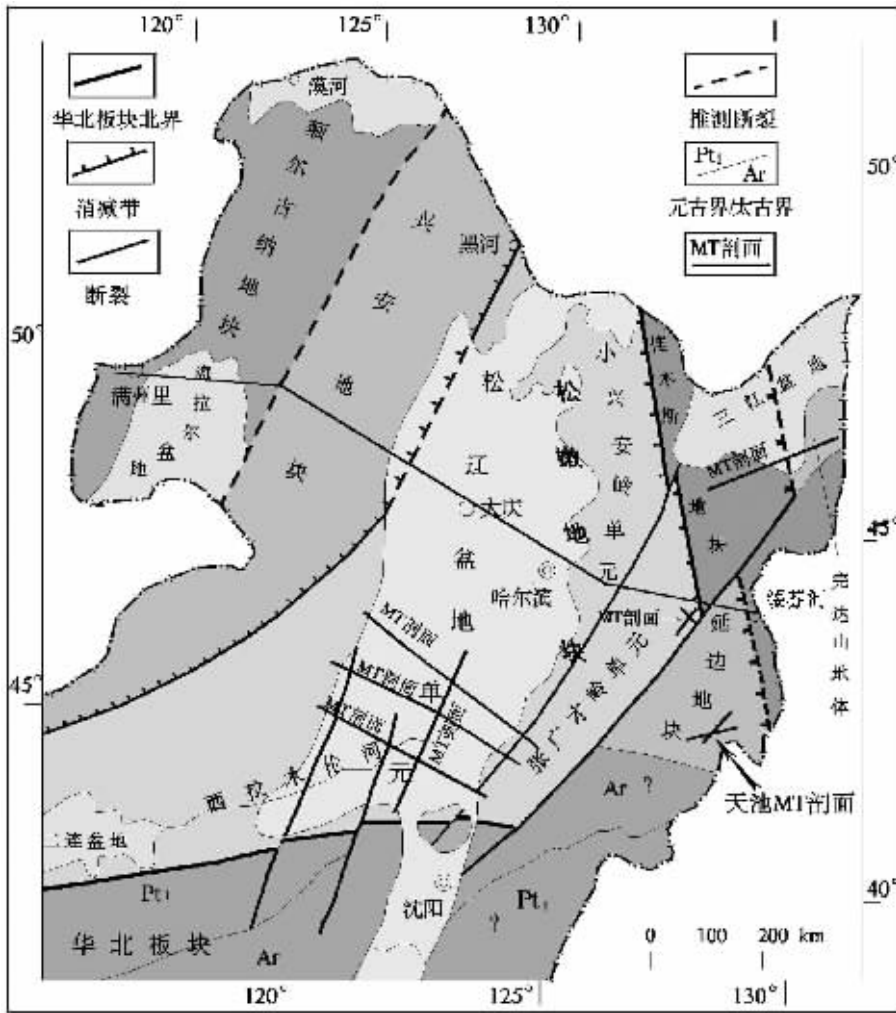


图 1 构造背景及 MT 剖面分布

Fig.1 Tectonic setting and MT profile location

转换为电阻率-深度函数。但在光滑模型反演中,地电模型的层数由观测频点数确定。每一层的厚度由相应频率电磁波穿透深度确定,并在反演过程中保持不变,而每一层的电阻率初始值由视电阻率确定。在迭代反演过程中,层电阻率被不断修改,直到计算的大地电磁响应与观测数据尽可能的接近,同时电阻率模型保持一定的光滑性要求。反演模型的光滑性要求层与层之间电阻率的变化不大,导致模型在垂向上平滑地变化。

### 3.2 松南—辽北地区 MT 资料的二维反演及岩石圈电性结构特征

对松南、辽北地区 1996 年完成的昌图—扎鲁特旗 (LSA)剖面、科右中旗—辽源 (LSB)剖面、内蒙瓦房店—吉林营城子 (LSC)和科左后旗—乾安 (LSD)剖面,利用二维有限

元光滑模型反演方法进行了整条剖面的反演,反演结果清晰揭示出整条剖面横向和纵向的地电结构,对盆地、盆地边界及盆地外围的电性特点都反映的很清楚。其中科右中旗—辽源 (LSB)剖面、内蒙瓦房店—吉林营城子 (LSC)剖面所反映的电性边界很陡,而科左后旗—乾安 (LSD)剖面所反映的电性边界则很缓。下面给出科左后旗—乾安 (LSD)剖面的二维反演结果。

科左后旗—乾安剖面为北北东走向,基本与前 3 条 (LSA, LSB, LSC)的走向正交,剖面起于科左后旗 (翁斯)终止于松辽盆地中的乾安。剖面全长 290 km,共有 MT 测点 56 个。二维反演结果清楚地反映了由剖面南部 (盆地边缘)向剖面北部 (盆地中心)逐渐加深的变化,变化趋势较缓,没有北东向剖面盆地内和盆地外电性分界陡立的现象,这是通过二

表 1 MT 资料情况统计  
Table 1 Statistics of MT data

松南—辽北地区(1995 年)					
周期/s	LSA 线/个	LSB 线/个	LSC 线/个	LSD 线/个	合计
0.005~100	54	48	49	46	197
500		10	11	9	21
1000	12	15	13		49
2000		2	1		3
4000	4	3	5	1	13
合计	70	78	79	56	283
满洲里—绥芬河地学断面					
1360		22			22
4096		8			8
合计		30			30
镜泊湖地区					
1300	NW2-01, NW2-02, NW2-04, NW2-05, NW2-06, NW2-07 NW4-00, NW4-01, NW4-02, NW4-03, NW4-J3, NW4-04 NE02, NE03, NE04, NE05, NE06, NE07, NE08				6 6 7
合计					19
长白山地区					
4096	不同方向大地电磁测深剖面解释成果				
合计					
总计					332

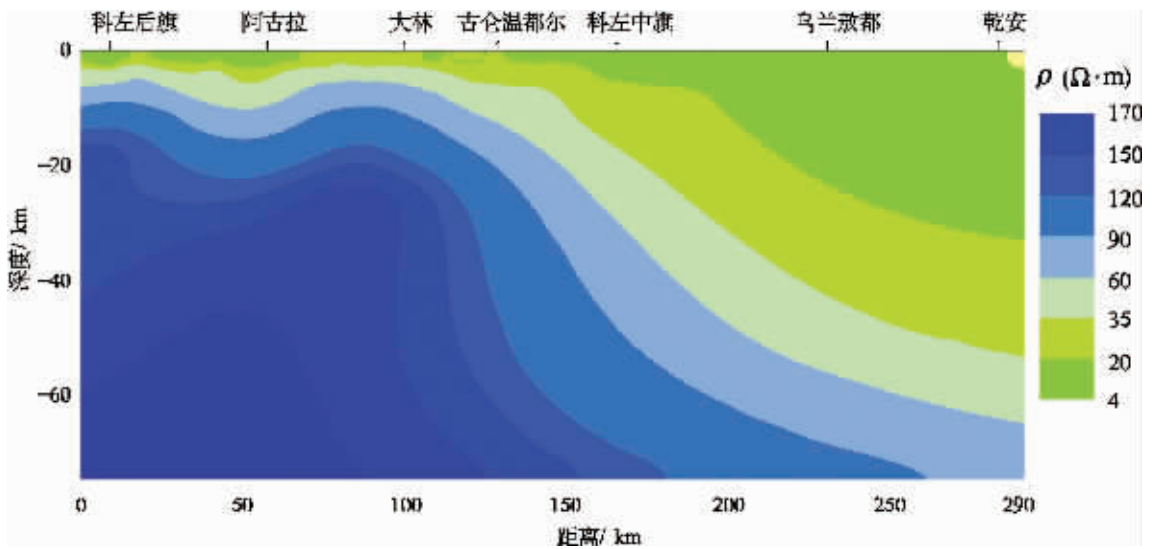


图 2 科左后旗—乾安 MT 剖面二维反演断面图

Fig.2 2D inversion cross-section of the Kezuo Houqi-Qian'an MT profile

维反演得到的结果(图 2)。

根据 MT 一维<sup>①</sup>和二维反演结果, 该地区除松辽盆地外, 在 8~48 km 存在断续出现的壳内高导层<sup>②</sup>, 软流圈深度为 58~126 km<sup>③</sup>, 总体来看, 软流圈的隆起区对应中生代的凹陷区。在深大断裂处软流圈的变化幅度都很大, 表明一些超

壳断裂也与软流圈的隆起相对应。

### 3.3 满洲里—绥芬河地学断面 MT 资料二维反演及岩石圈电性结构特征

满洲里—绥芬河地学断面全长 1 300 km, 共布设了 30 个 MT 测点。剖面穿过海拉尔盆地、松辽盆地、兴安地体、佳

①徐宝慈, 王东波, 等. 非震物探方法研究松南辽北地区深部构造和深层勘探目标(科研报告), 1996.

木斯地块(南部边缘)等多个较大的地质单元。在二维反演中采用先进的反演软件,将 1 300 km 长度内的所有测点一次性完成整条剖面的反演,二维反演断面图(图 3)主要反映了该断面域岩石圈电性结构。主要特征如下:

(1) 根据电性差异将断面域划分为 7 个电性块体,整个

木斯地块的西界以沿着牡丹江断裂分布的构造混杂岩为标志<sup>[3]</sup>,东界位置一直没有较明确的认识。由于该区东部是吉黑地区唯一分布有中生代海相地层的区域<sup>[3,5]</sup>,而且这套海相地层中伴生有镁铁质、超镁铁质堆积杂岩和枕状玄武岩(饶河蛇绿岩),因此,它们与佳木斯地块的关系多年来也一直为人

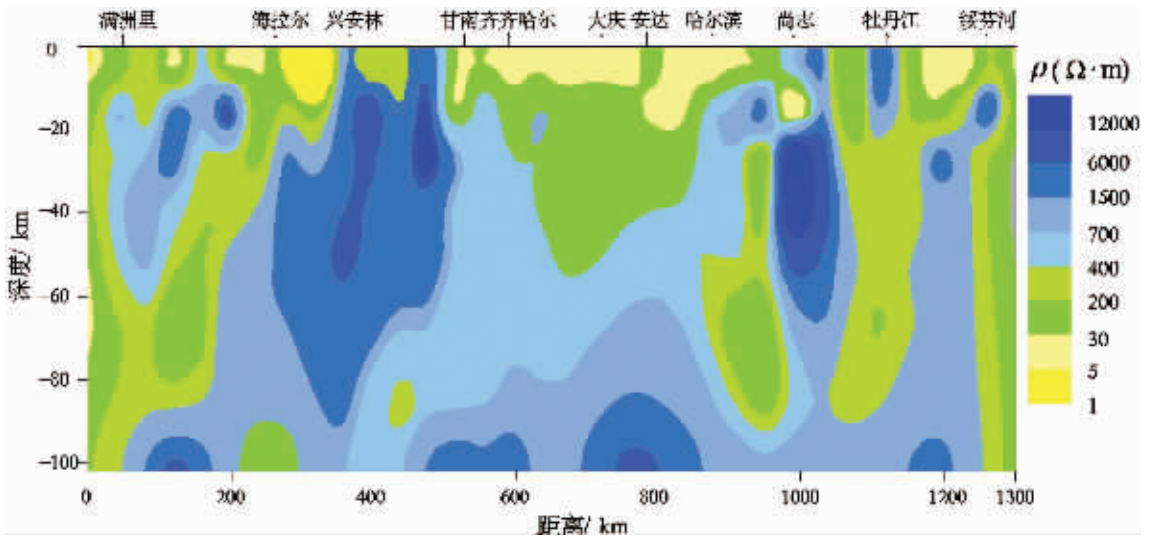


图 3 满洲里—绥芬河断面域二维反演断面图

Fig.3 2D inversion cross-section of the Manzhouli-Suifenhe MT profile

剖面二维反演结果的区域性电性变化与一维解释划分的块体相吻合,与地质上的构造分区也很接近。

(2) 断面域内,除松辽盆地整体呈低阻显示而无法确定有无壳内高导层外,其他地区均有壳内高导层分布<sup>[6]</sup>。深度在 20~38 km 范围变化,厚度为 2~3 km,电阻率一般为 10~50  $\Omega \cdot m$ 。敦密断裂带以东出现有 2 层壳内高导层。

(3) 在松辽盆地内,存在有厚度较大的低阻层,其厚度至少在 40 km,电阻率为 3~8  $\Omega \cdot m$ 。

(4) 断面域内幔内高导层深度为 60~118 km,基本上与地形起伏成镜像对称关系。在断面西端的满洲里附近岩石圈厚度为 118 km,在海拉尔盆地、巴林、松辽盆地(大庆)岩石圈厚度为 60 km 左右,在断面的东端岩石圈厚度约为 90 km<sup>[6]</sup>。

(5) 盆地的东、西边界产状很陡,这与松南、辽北地区横穿松辽盆地的(LSB)和(LSC)剖面所反映的盆地界线特征一致。

### 3.4 佳木斯地块及以东地区 MT 资料二维反演及岩石圈电性结构特征

多年来,围绕佳木斯地块(或称为地体)和饶河蛇绿岩的性质及其相互关系等问题作过一些研究<sup>[5-9]</sup>,虽然满洲里—绥芬河地学断面对揭示该区的深部结构起到了重要作用,但因断面位置限制,对佳木斯地块及以东地区这一十分重要的地质构造单元的结构与构造关系尚缺乏有力的深部证据。佳

木斯地块的深部结构,揭示地块东部边界的位置、深部构造形态及其与东部万大地体的关系,于 2002 年 8—9 月间实施了西起佳木斯地块中部的桦南经宝清到饶河,长达 240 km 的 MT 探测剖面,为深入研究上述问题提供深部电性结构依据。

#### 3.4.1 桦南—饶河 MT 剖面二维电性结构特征

通过数据处理和二维反演,得出了沿剖面的横向及纵向的电性结构特征,从二维反演断面图(图 4)可以看出,断面内横向上电性结构分区明显,整个剖面上显示出 3 种电性模式,宝清以西为明显的高阻区,该高阻区对应佳木斯地块。宝清附近显示出较明显的电性结构变化,深部电阻率等值线竖直而密集,表明该处有较陡的电性分界线,这应该是存在较大型地质构造界线的有力新证据。宝清以东,浅部有一薄层,薄层下为低阻条带夹局部高阻块体相间的结构(图 4)。

综合一维反演和二维反演结果,参考满洲里—绥芬河断面对岩石圈底界的解释方法和解释结果,得出本剖面的纵向电性结构关系和地质解释(图 5),在宝清以西为高阻区,地壳电性结构较稳定,属稳定而古老的佳木斯地块的主体部分,岩石圈底界在 80~90 km;宝清附近显示了明显的电性结构分界线,该处的电性结构特征及软流圈上隆的特点与该位置南部牡丹江地区近 60 km 深软流圈隆起<sup>[8]</sup>和该位置北部俄罗斯境内近 60 km 软流圈隆起的存在<sup>[9]</sup>有很好的 consistency,故可推断这

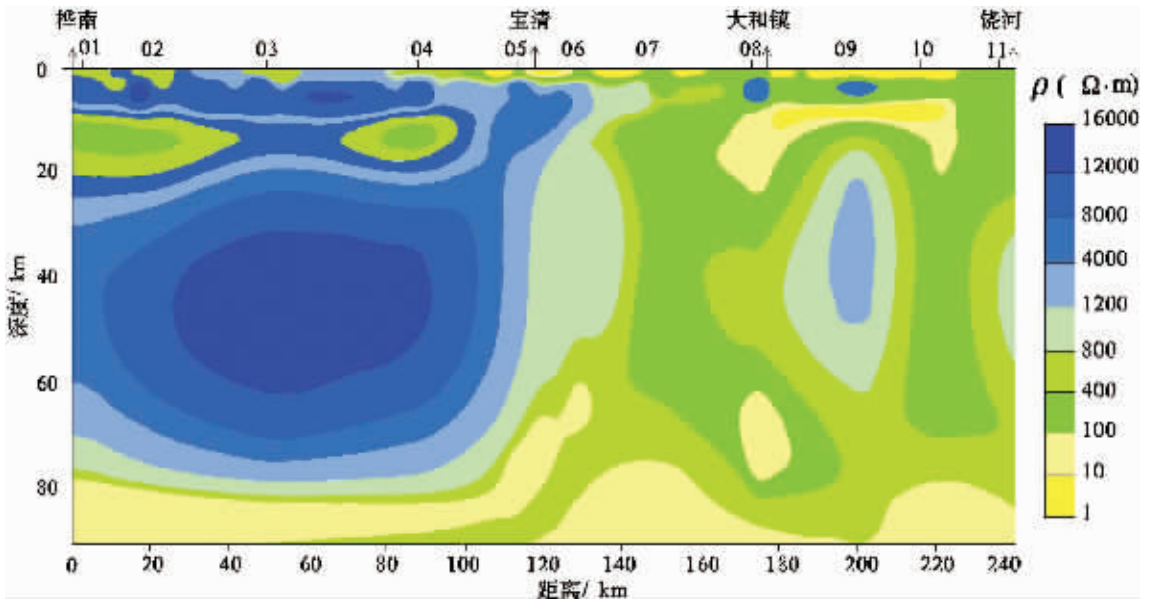


图4 桦楠—饶河 MT 剖面二维反演断面图

Fig.4 2-D inversion cross-section of the Huanan-Raohe MT profile

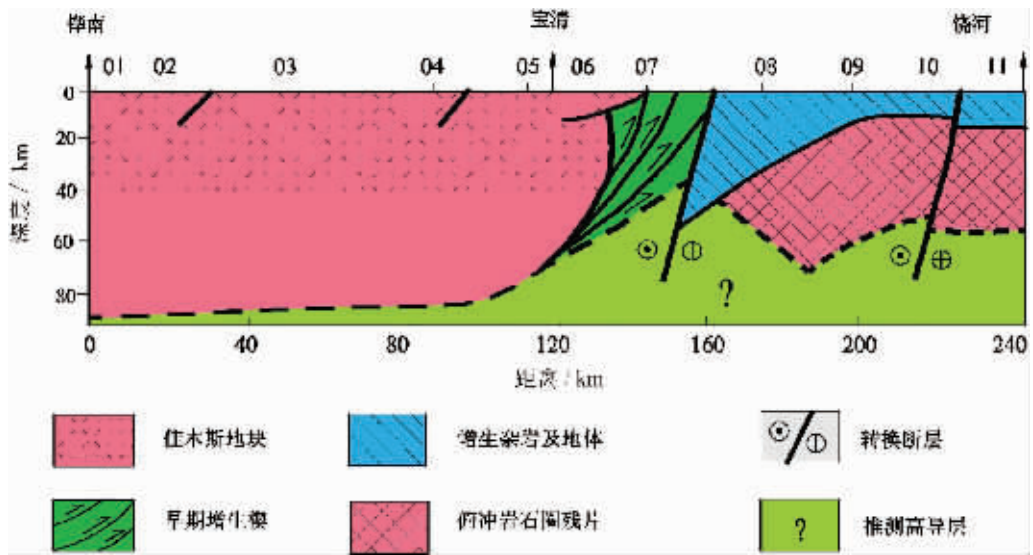


图5 桦楠—饶河 MT 剖面地质解释成果

Fig.5 Geological interpretation of the Huanan-Raohe MT profile

里就是佳木斯地体的东界，而且很可能还是吉黑东部一条很重要的边界构造带；剖面东段，据该段电性结构特征并结合近年来地质、地球物理研究结果，可解释为，在佳木斯地块以东曾发生过洋壳向大陆边缘的俯冲，深部的高阻块体很可能是向佳木斯地块东缘之下俯冲的岩石圈板片，而饶河蛇绿岩是

在这一过程中逆冲到大陆边缘之上的岩片(图5)。结合中国大陆东缘中—新生代以来所发生的一系列左行走滑事件，笔者认为，大规模走滑事件主要是沿着早期拼合带处发生的，它们不但肢解了早期俯冲的岩石圈板片，而且为新生代玄武岩的喷发提供了通道，从而形成了近于直立的低阻带(图4~5)。

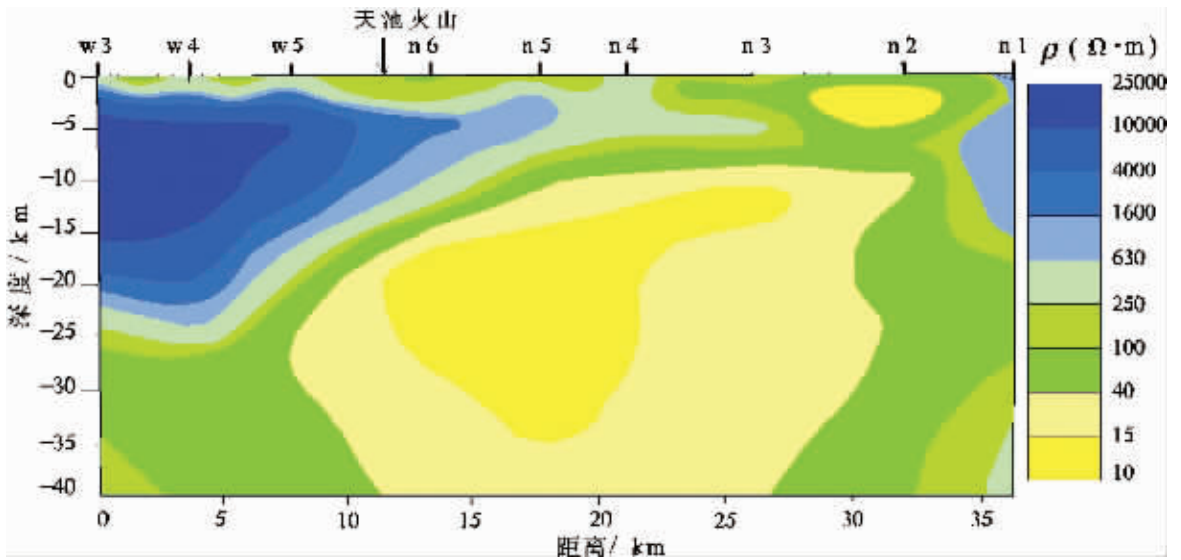


图 6 长白山天池北北东向剖面二维反演断面图

Fig.6 2D inversion cross-section of the Changbaishan-Tianchi section

### 3.5 长白山天池火山区 MT 资料二维反演及岩石圈电性结构特征

长白山天池火山是处于休眠状态、具有潜在喷发危险的活火山<sup>[12-14]</sup>。1995年7—8月由中国地震局对天池火山实施了不同方向的 MT 探测。研究结果曾指出,对一个休眠的活火山进行其未来喷发危险性估计,其深部是否存在活动的岩浆系统是一个重要条件<sup>[14]</sup>。NNE 方向二维反演结果表明在 20~25 km 深处存在低阻(岩浆囊)系统。岩浆囊可能有根,向下继续延伸,深度值得进一步研究<sup>[14]</sup>。结果表明,在长白山天池及其以北和以东地区,约 12 km 深处存在电阻率很低的地质体,电阻率为 10 到几十  $\Omega \cdot m$ ,也可能是地壳岩浆囊<sup>[15-17]</sup>。

本次研究将长白山天池火山区不同方位的 MT 剖面资料进行了二维反演,从 NNE 方向的反演结果(图 6)看出,在 n5 测点下约 20 km 的深度上存在低阻体,这是火山地区深部可能存在岩浆囊的一个依据。反演结果还表明,在火山口附近软流圈深度明显变浅,在几千米长度的剖面上软流圈深度变化梯度很大,形成软流圈的突变,这可能是火山区的一个共同特点。

### 3.6 镜泊湖火山地区

镜泊湖位于黑龙江省宁安县境内,敦密断裂带西侧,在镜泊湖西北约 50 km 的森林中有 13 个火山口,并被命名为全新世火山群。对于火山的研究,其深部是否存在活动的岩浆系统是一个重要条件<sup>[14]</sup>。为了查清火山区的深部结构,了解深部是否存在岩浆囊,进行火山喷发的预测研究,吉林大学地球探测科学与技术学院于 2000 年 7—9 月,在该区进行了 30 个点的大地电磁测深剖面。由二维反演结果得出,在火山区深部存在明显的局部低阻体,该低阻体很可能是岩浆囊<sup>[18]</sup>。

结合该地区一维反演和二维反演结果得出:镜泊湖火山区软流圈上界面深度为 70~100 km<sup>[18]</sup>。火山口及火山口两侧软流圈深度有明显的不同,在火山口处软流圈深度明显变浅。

### 参考文献(References):

- [1] 方盛明,余钦范,张先康.中国东部及其邻域岩石圈底界面特征及地震活动性[J].地球物理学报,2001,44(1):48~53.  
Fang Shengming, Yu Qinfan, Zang Xiankang. Characteristics of the lithospheric bottom interface and seismicity in eastern China and its vicinity [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44 (1):48~53(in Chinese).
- [2] 叶茂,张世红,吴福元.中国满洲里—绥汾河地学断面域古生代构造单元及其演化[J].长春地质学院学报.1994,24(3):241~245.  
Ye Mao,Zhang Shihong,Wu Fuyuan.The classification of the Paleozoic tectonic units in the area crossed by M-S GGT[J].Journal of Changchun University of Earth Sciences,1994,24 (3):241~245(in Chinese with English abstract).
- [3] 曹熹,党增欣,张兴洲,等.佳木斯复合地体[M].长春:吉林科学技术出版社,1992.  
Cao Xi, Dang Zengxin, Zhang Xingzhou, et al. Jiamusi Composite Terrane[M].Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1992 (in Chinese).
- [4] 任向文,吴福元.大陆岩石圈地幔形成与演化研究的新进展[J].地球物理学进展,2002,17(3):514~524.  
Ren Xiangwen,Wu Fuyuan. New progress of the formation and evolution of subcontinental lithospheric mantle [J].Progress in Geophysics, 2002, 17(3):514~524(in Chinese with English abstract).
- [5] 张兴洲.黑龙江岩系—古佳木斯地块加里东缝合带的证据[J].长春

- 地质学院学报,1992, 22:94~101.
- Zhang Xingzhou.Evidence of Heilongjiang rock formation—ancient triple junction Kiamusze massif Caledonian suture zone[J].Journal of Changchun University of Earth Sciences,1992,22:94 ~101 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张兴洲, 张元厚. 蓝片岩与绿片岩共存: 龙江岩系构造演化新证据[J].长春地质学院学报. 1991.21(3):277~282.
- Zhang Xingzhou,Zhang Yuanhou.Coexistence of blue schist and greenschist:fresh evidence of Gragon River rock formation structural evolution [J].Journal of Changchun University of Earth Sciences,1991,21(3):277~282(in Chinese with English abstract).
- [7] 张贻侠, 孙运生, 张兴洲, 等. 中国满洲里—绥芬河地学断面[M].北京:地震出版社, 1998.
- Zhang Yixia,Sun Yunsheng,Zhang Xingzhou,et al.Manzhouli—Suifenhe Geoscience Transects[M].Beijing:Seismological Press,1998 (in Chinese).
- [8] 金旭, 杨宝俊. 中国满洲里—绥芬河地学断面地球物理场及深部构造特征研究[M].北京:地震出版社,1994.
- Jin Xu,Yang Baojun. Geophysical Field and Deep Structure Manzhouli—Suifenhe Geoscience Transects [M].Beijing:Seismological Press,1994(in Chinese with English abstract).
- [9] Constable S C,Parker R L, Constable C G,et al.Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from elcctromagnetic sounding data[J].Geophysics, 1987,52(3):289~300.
- [10] De Groot—Hedlin C, Constable S.Occam's inversion to generate smooth two—dimensional models from magnetotelluric data [J]. Geophysics, 1990,55(12):1613~1634.
- [11] Dittmer J K.The inversion of magnetic and resistivity data using the simulating annealing algorithm[J].Geophysical Prospecting,1995,43: 397~416.
- [12] 刘若新, 李继泰, 魏海泉, 等. 长白山天池火山:一座具有潜在喷发危险的近代火山[J].地球物理学报,1992,35(5):661~665.
- Liu Ruoxin, Li Jitai,Wei Haiquan, et al.Volcano at Tianchi Lake, Changbaishan MT:A modern volcano with potential danger of eruption[J].Acta Geophysica Sinica, 1992,35(5):661~665(in Chinese).
- [13] 刘若新, 魏海泉, 李继泰, 等.火山作用与人类环境[M].北京:地震出版社, 1995.108~115.
- Liu Ruoxin, Wei Haiquan, Li Jitai, et al.Volcanism and Human Environmental [M].Beijing:Seismological Press, 1995.108~115 (in Chinese).
- [14] 刘若新, 魏海泉, 李继泰, 等. 长白山天池火山近代喷发 [M].北京:科学出版社, 1998. 23.
- Liu Ruoxin, Wei Haiquan,Li Jitai,et al.The Modern Eruption of Changbaishan—Tianchi Volcano[M].Beijing: Science Press,1998. 23 (in Chinese).
- [15] 汤吉, 刘铁胜, 江钊, 等.长白山天池火山区大地电磁测深初步观测[J].地震地质. 1997,19(2):164~170.
- Tang Ji,Liu Tiesheng,Jiang Zhao, et al. Preliminary observations of the Tianchi volcano area in Changbaishan by MT method [J]. Seismology and Geology, 1997,19 (2):164~170 (in Chinese with English abstract).
- [16] 汤吉, 邓前辉, 赵国泽, 等. 长白山天池火山区电性结构和岩浆系统 [J].地震地质, 2001, 23(2):191~200.
- Tang Ji, Deng Qianhui, Zhao Guoze, et al. Electric Conductivity and magma chamber at the Tianchi Volcano Area in Chang Baishan Mountain [J].Seismology and Geology, 2001,23 (2):191~200(in Chinese with English abstract).
- [17] 张先康, 张成科, 赵金仁, 等. 长白山天池火山岩浆系统深部结构的地震测深研究[J].地震学报,2002,24(2):135~143.
- Zhang Xiankang,Zhang Chengke, Zhao Jinren,et al.Deep seismic sounding investigation into the deep structure of the magma system in Changbaishan Tianchi volcanic region [J].Acta Seismologica Sinica,2002,24(2):135~143(in Chinese with English abstract).
- [18] 朱仁学, 付维洲, 孟令顺, 等. 黑龙江镜泊湖火山地区电性结构初步研究[J].地震地质, 2001,23(2):186~190.
- Zhu Renxue, Fu Weizhou,Meng Lingshun, et al. Preliminary study on electric structure in the Jingbohu volcano area of the Heilongjiang Province [J]. Seismology and Geology, 2001,23(2): 186~190(in Chinese with English abstract).

## Features of the electric structure of the lithosphere beneath the Hinggan–Inner Mongolia and Jilin–Heilongjiang regions

LIU Guo–xing, ZHANG Zhi–hou, HAN Jiang–tao, TANG Jun–hui

(College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin China)

**Abstract:** Two–dimensional (2D) inversion and integrated interpretation of the gathered MT data were made by using 2D continuous automatic inversion technology and 2D electric structure cross–sections of the MT profiles were obtained in different areas. The 2D inversion cross–sections show that the eastern and western boundaries of the Songliao basin are steeper while the southern boundary is gentler and that low–resistivity objects are commonly present at 15–30 km depth in volcanic areas, which offers a basis for interpreting the existence of a magma pocket at depth of volcanic areas. In addition, the cross–section of 2D inversion of the MT data re–surveyed along Huanan–Laohe has also clearly revealed the following: the western segment of the cross–section has a high resistivity feature and a persistent lithospheric thickness (80–90 km), corresponding to the Jiamusi massif. The central segment of the cross–section obviously contains an electricity gradient zone, which furnishes a basis for the determination of the eastern boundary of the Jiamusi massif and its deep structure configuration. The eastern segment of the cross–section reveals a thrust nappe at shallow depth in an area east of the Jiamusi massif and an electric structure composed of alternate high–resistivity strips and low–resistivity strips at depth.

**Key words:** Hinggan –Inner Mongolia and Jilin –Heilongjiang regions;lithosphere;electric structure;2D inversion;Jiamusi massif

---

**About the first author:** LIU Guo–xing, male, born in 1951, professor, mainly engages in the teaching and study of electrical prospecting; E–mail: guoxing@jlu.edu.cn.