

刘国兴,张兴洲,杨宝俊等. 佳木斯地块及东缘岩石圈电性结构特征. 地球物理学报, 2006, 49 (2): 598 ~ 603

Liu G X, Zhang X Z, Yang B J, et al. Electrical structures of the lithosphere along the Jiamusi massif and its eastern edge. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49 (2): 598 ~ 603

佳木斯地块及东缘岩石圈电性结构特征

刘国兴, 张兴洲, 杨宝俊, 翁爱华, 唐君辉, 李雪森

吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

摘 要 佳木斯地块及东缘是中国东北地区的重要地质构造单元. 为探测该地区地壳深部结构与构造关系, 沿桦南—饶河实施了 240 km 的大地电磁测深的探测研究. 采用光滑模型二维反演方法对桦南—饶河大地电磁剖面的探测数据进行了二维反演和综合地球物理解释. 研究结果揭示了研究区断面域的电性结构: (1) 剖面西段具有稳定的高阻特征且具有稳定的岩石圈厚度 (约 90km), 在十几公里深度范围存在壳内高导层, 该区段对应佳木斯地块. (2) 剖面中部具有明显的电性梯度带, 该梯度带反映了佳木斯地块的东界位置及其深部的结构形态. (3) 剖面东段电性特征揭示了佳木斯地块以东区段浅部为逆冲推覆体, 深部为多个高阻块体和低阻条带相间的电性结构, 这些高阻块体可能为早期俯冲的岩石圈残片.

关键词 佳木斯地块, 桦南—饶河, 大地电磁法, 岩石圈, 电性结构

文章编号 0001-5733(2006)02-0598-06

中图分类号 P631.319

收稿日期 2005-08-20, 2005-11-20 收修定稿

Electrical structures of the lithosphere along the Jiamusi massif and its eastern edge

LIU Guo-Xing, ZHANG Xing-Zhou, YANG Bao-Jun, WENG Ai-Hua, TANG Jun-Hui, LI Xue-Sen

College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract The Jiamusi massive and its eastern edge are important geologic structural unit in the northeast part of China, its structure meaning has drawn extensive attention. To detect the relationship of deep crust construction and structure between Jiamusi massive and its east region, a research of MT detection along the Huanan-Raohe line (about 240km) has been conducted. By adopting two-dimensional smooth model to inverse the MT data of Huanan-Raohe MT profile, the result has distinctly revealed electrical structure of the section: (1) In west segment of the section there is a geosphere which has a stable high resistivity feature and stable thickness about 90km, within the depth of more than ten kilometers exists a high conductivity layer, corresponding to Jiamusi massive, (2) The central part of the section obviously contains a geoelectro gradient zone, which indicates the east boundary of the Jiamusi massive and its deep configuration state, (3) The east segment of the section indicates that the east superficial segment of the Jiamusi massive is thrust nappe, and the several high resistivity bodies in the deep are probably earlier subducted lithosphere relic.

Key words Jiamusi massif, Huanan-Raohe, Magnetotelluric method, Lithosphere, Electrical structure

基金项目 国土资源部兴蒙 - 吉黑岩石圈三维结构研究项目 (20001010204) 资助.

作者简介 刘国兴,男,1951 年生,教授,1977 年毕业于长春地质学院物探系,主要从事电法勘探理论教学与应用研究工作.

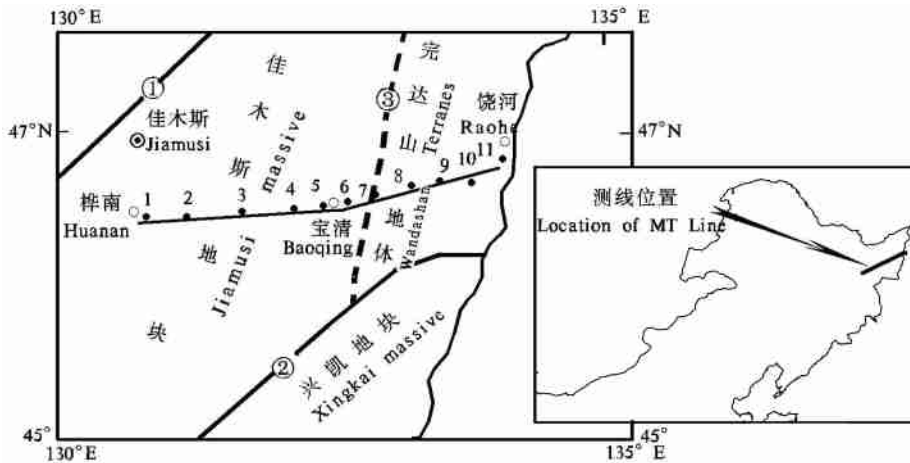
E-mail: guoxing@jlu.edu.cn

1 引言

我国对岩石圈的研究始于 20 世纪 70 年代末,随后积极参与 80 年代的国际岩石圈计划,取得了令人瞩目的成就。随着对岩石圈研究的深化,近年来许多专家和学者对大陆岩石圈的演化、局部地区岩石圈-软流圈的结构^[1,2]、大陆局部地区造山带岩石圈的密度与磁性特征^[3]、岩石圈流变机制与局部地区热结构^[4~7]、青藏高原岩石圈现代运动机制和应力场扩张^[8,9]、岩石圈三维结构的数值模拟^[10]、岩石圈结构层析成像^[11]等方面进行了深入研究和探讨,取得了诸多重要的研究成果。

满洲里—绥芬河地学断面^[12]作为我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系统的研究,但由于剖面位置的限制,对佳木斯地块及其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。以往的研究认为佳木斯地块是巨型海西褶皱带中的稳定地块,主要由太古代的麻山群、元古代的黑龙江群两套变质地层和大面积的元古代花岗质岩石组成。然而近十几年来的一系列研究证明,佳木斯地块中所

谓的黑龙江群变质地层是一套含有解体蛇绿岩残块、并遭受了高压变质作用的构造混杂岩;而所谓太古代麻山群的麻粒岩相变质作用发生在早古生代早期,它与大面积的花岗质岩石一起构成了一个外来地体,规模上相当一个微板块^[13~16]。佳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^[15],东界的位置一直没有明确的认识。由于该区东部是吉黑地区惟一分布有中生代海相地层的区域^[14,15],而且这套海相地层中伴生出现镁铁质、超镁铁质堆积杂岩和枕状玄武岩(即所谓的饶河蛇绿岩),因此,它们与佳木斯地块的关系多年来一直为人们所关注^[13~19]。为深入探讨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完达山地体的结构关系,于 2002 年 8 月至 9 月实施了西起佳木斯地块中部的桦南县(东经 130°38'58",北纬 46°11'1"),经宝清至饶河(东经 133°39'28",北纬 46°27'2")的大地电磁探测剖面,对其进行了壳、幔电性结构的探测研究。剖面由西向东依次经过佳木斯地块东部及其晚古生代沉积盖层,三江盆地南缘和饶河蛇绿岩带,全长近 240km。共设置大地电磁测点 11 个,平均点距 20km 左右。测线位置及测点分布见图 1。



佳伊断裂 Jiayi fault; 敦密断裂 Dunmi fault; 推测断裂 Inferred fault, 1, 2, ..., 11 为测点。

图 1 研究区构造背景及大地电磁测线位置示意图

Fig. 1 Sketch map of main geological units MT profile location

2 数据采集与资料处理

2.1 数据采集与适时处理

野外观测采用美国 Zonge 公司生产的 GCP32-II 型多功能电测系统,其工作频率范围在 8192 ~ 0.0003Hz 之间。为了保证数据质量,每个测点的记

录时间都在 18 ~ 24h。在野外数据采集过程中,适时完成时间序列的 FFT 和 Robust 处理,并相应完成各频段部分数据的视电阻率计算。

2.2 资料处理

在野外适时完成的视电阻率计算只是抽取部分 Robust 处理结果的计算,因此,在室内尚须对资料进行再处理,包括对全部适时处理数据视电阻率的计

算、曲线的编辑、圆滑、曲线极化模式的确定、曲线畸变分析和电性结构维数分析等。

2.2.1 极化模式和区域电性构造二维性的确定

由于剖面所在地区的区域地质构造走向已大致明确,基本为南北方向,经张量阻抗分析得出的主轴方位角与区域地质走向基本一致,因此可确定 xy 曲线为 TE 极化曲线, yx 曲线为 TM 极化曲线。根据各

测点二维偏离度的统计(见表 1)大部分测点在大部分频段的二维偏离度 S 小于 0.25,说明沿剖面的电性结构总体上可以用二维模型近似。只是在宝清以东的 8 和 9 两个测点的低频段二维偏离度较大些,这反映了该区段深部电性结构的复杂性,在此区段二维模型可信度相对低一些,但对区域构造解释影响不会很大。

表 1 桦南—饶河大地电磁剖面二维指数 S 统计表

Table 1 Skewness of Huanan-Raohe MT profile

点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$T < 100s$	<0.15	<0.15	<0.15	<0.25	<0.25	<0.25	<0.25	<0.25	<0.25	<0.25	<0.3
$T > 100s$	<0.25	<0.25	<0.25	<0.25	<0.25	<0.25	<0.25	>0.3	>0.3	>0.25	<0.25

注: T 为周期。

2.2.2 一维反演

研究表明,无论在何种二维构造上,用 TE 曲线进行一维反演,总能给出比较真实的深部电性层深度^[21,22]。故采用广义逆矩阵反演方法对各测点 TE

极化方式的视电阻率数据进行了一维反演,以确定各主要电性层的的界线。图 2 是桦南—饶河大地电磁剖面各测点一维反演模型。图中 D 为沿剖面方向的距离, H 为深度。

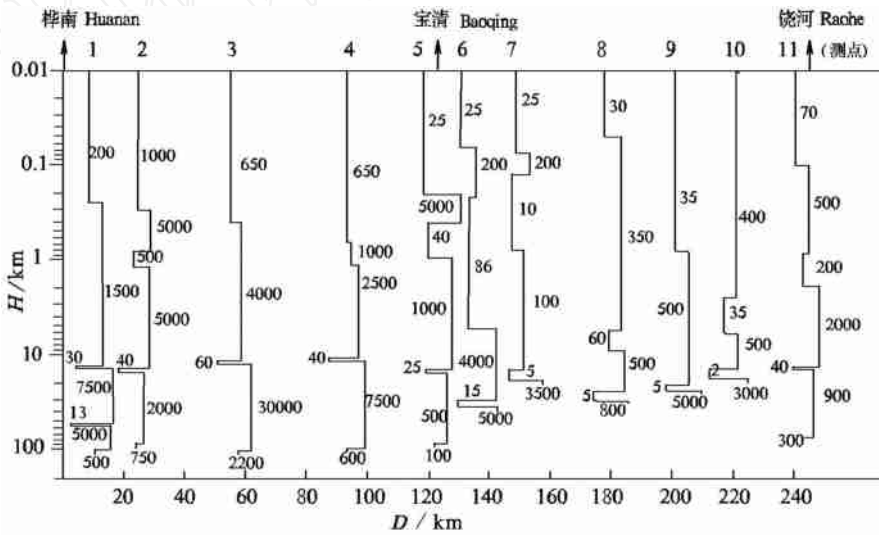


图 2 桦南—饶河大地电磁一维解释模型(图中数字为电阻率,单位 $\Omega \cdot m$)

Fig. 2 1-D inversion model for Huanan-Raohe MT section

2.2.3 二维反演

以上资料处理和区域构造走向分析说明,大地电磁剖面范围的电性结构可以用二维模型近似,二维电性结构的走向基本与剖面垂直,因此沿剖面进行二维反演是可行的。二维反演采用了较为先进的“光滑模型自动反演”方法。光滑模型反演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^[23,24]。这种反演方法有如下

优点:

- (1) 对 TM 模式或 TE 模式之一或同时进行反演,充分利用观测数据,能获得更多的地下电性分布信息。
- (2) 在作二维有限元正演模拟时,考虑地形起伏的影响,避免常规大地电磁测深的静态校正,使计算结果与实际观测更为接近。
- (3) 整个反演过程完全自动化,除了约束初始模

型外,无须人为干预,因此处理结果更为客观.

图 3 为桦南—饶河大地电磁测深剖面的二维光滑反演视电阻率-深度断面图.

3 电性结构分析

二维反演得到的电性结构(图 3)清楚揭示了整个断面内的电性结构特征:在横向上电性分区十分明显,由西向东可分为 3 个区块,西部(1~5 号点)高阻稳定区块()、中部(6~7 号点)电阻率梯度带()和东部(8~11)高阻微型块体和低阻条带相间区块(). 西部高阻区()电性结构较稳定,在十

几公里深度有连续的壳内高导层分布,高导层厚为 1~2km,电阻率 30~60 m. 由一维反演得出的幔内高导层顶界(岩石圈底界)在 85~95km 之间. 中部()宝清附近显示出明显的电性结构变化特征,深部视电阻率等值线竖直而密集,显示该处有较陡的电性分界线,这是存在较大型地质构造界线的有力新证据. 梯度带以东()区,浅部有一薄层,薄层下为高阻块体和低阻条带相间的结构,在梯度带以东近 100 多公里长的区段没有规则的岩石圈底部界线,整体上表现为以良导为主,在良导区域内存在 4 个规模在 20~30km 宽的高阻块体. 高阻块体之间的良导区域呈近直立状,由 50~60km 深度向上延续

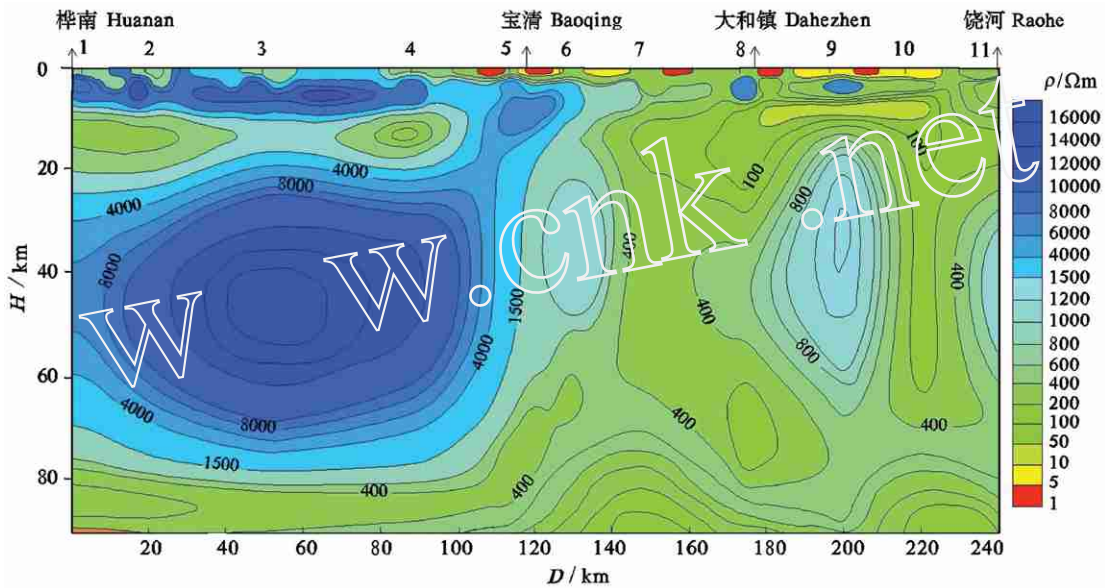


图 3 桦南—饶河 MT 剖面二维反演断面图

Fig. 3 Two-dimension result of Huanan-Raohe MT section

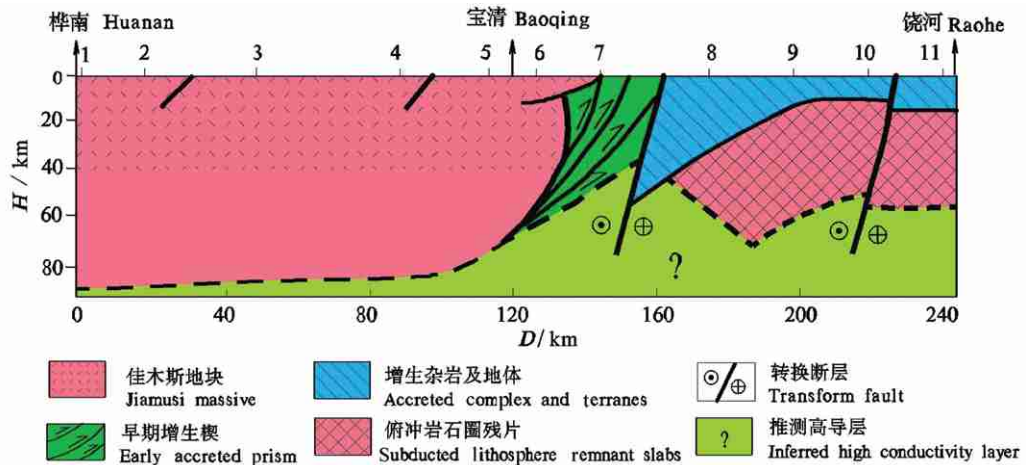


图 4 桦南—饶河 MT 剖面地质解释

Fig. 4 Geology interpretation results of Huanan-Raohe MT section

到 6~8km 深度被一近水平的高导层所截。因此,6~8km 深度的高导层是一个重要的构造界面,它向西倾伏在佳木斯地块东缘的逆冲块体之下。极不规则的电性结构反映出该区是一个极其活动的构造区域。

4 结论与讨论

(1) 从一维和二维反演结果所揭示的电性结构来看,整个剖面以宝清附近的电阻率梯度带为界分为东、西两大部分,这两大部分有明显的电性结构差别。西部(区)是电性结构相对稳定的佳木斯地块。地块的上地壳内分布有壳内高导层,地块内部出露有大量的花岗质岩石,以高阻为特征。

(2) 宝清附近(区)(6、7号点)的电阻率梯度带,从电性变化、宽度、形态上看,此处无疑为深大构造分界线。结合满-绥地学断面研究成果,即南部牡丹江地区近 60km 深软流圈隆起(满绥断面)^[12,20]和北部俄罗斯境内近 60km 深软流圈隆起的存在^[17],可以认为,这里不但是佳木斯地块的东界,而且是吉黑东部一条重要的边界构造带(图 3 和图 4)。

(3) 剖面东段没有明显的岩石圈底部界限,上地壳存在不规则的高导层,深部的壳幔及岩石圈的调整极不均衡,新生代玄武岩活动强烈也足以证明这一点。结合近年来地质研究结果,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 4)。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,我们有理由认为,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,从而形成近于直立的低阻带(图 3 和图 4)。

桦南—饶河大地电磁测深研究结果从电性方面为认识佳木斯地块的岩石圈结构、确定其东界的位置与深部结构形态,揭示地块东缘与饶河蛇绿岩带的关系,探索东北亚大陆边缘演化的地球动力学过程都提供了有价值的新信息和证据,这些新的信息和证据对于兴蒙—吉黑地区岩石圈结构研究取得新的进展有着十分重要的意义。

参考文献 (References)

[1] 任向文,吴福元. 大陆岩石圈地幔形成与演化研究的新进展.

地球物理学进展,2002,17(3):514~524

Ren X W, Wu F Y. New progress of the formation and evolution of subcontinental lithospheric mantle. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2002, 17(3):514~524

[2] 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. 地球物理学报,2001,44(1):48~53

Fang S M, Yu Q F, Zhang X K. Characteristics of the lithospheric bottom interface and seismicity in eastern China and its vicinity. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, 44(1):48~53

[3] 赵俊猛,李植纯,程宏岗. 天山造山带岩石圈密度与磁性结构研究及其动力学分析. 地球物理学报,2004,47(6):1061~1067

Zhao J M, Li Z C, Cheng H G, et al. Structure of lithospheric density and geomagnetism beneath the Tianshan orogenic belt and their geodynamic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(6):1061~1067

[4] 魏荣强,臧绍先. 岩石圈流变结构的一种新的应变率约束. 地球物理学报,2004,47(6):1029~1034

Wei R Q, Zang S X. A new constraint on strain rate of the rheological structure of the lithosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(6):1029~1034

[5] 何丽娟. 岩石圈流变性对拉张盆地构造热演化历史的影响. 地球物理学报,2002,45(1):49~55

He L J. Effects of lithospheric rheology on thermal mechanical modeling of extensional basins. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(1):49~55

[6] 臧绍先,刘永刚,宁杰远. 华北地区岩石圈热结构的研究. 地球物理学报,2002,45(1):56~66

Zang S X, Liu Y G, Ning J Y. Thermal structure of the lithosphere in north China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(1):56~66

[7] 臧绍先,李昶,魏荣强. 岩石圈流变机制的确定及影响流变强度的因素. 地球物理学进展,2002,17(3):50~60

Zang S X, Li C, Wei R Q. The determination of rheological mechanics of lithosphere and the influencing factors on the rheological strength of lithosphere. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2002, 17(3):50~60

[8] 徐纪人,赵志新,石川有三. 青藏高原中南部岩石圈扩张应力场与羊八井地热异常形成机制. 地球物理学报,2005,48(4):861~869

Xu J R, Zhao Z X, Ishikawa Yuzo. Extensional stress field in the central and southern Qinghai-Tibetan plateau and dynamic mechanism of geothermic anomaly in the Yangbajain area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(4):861~869

[9] 李岩峰,张贵宾,高锐. 岩石圈根拖曳作用在青藏高原西部和东部造山中的比较研究. 地球物理学报,2004,47(6):1053~1060

Li Y F, Zhang G B, Gao R. A comparative study on the effect of a down-pulling lithospheric root beneath the West and East collision mountain ranges in the Qinghai-Tibet plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(6):1053~1060

[10] 韩露,丁毅,张贵宾. 中国岩石圈三维结构数值模拟数据

- 库. 地球物理学进展, 2003, **18** (2) : 312 ~ 315
 Han L., Ding Y., Zhang G.B. Numerical simulation database of China 3-D lithosphere structure. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2003, **18** (2) : 312 ~ 315
- [11] 杨卓欣, 张先康, 赵金仁等. 长白山天池火山区三维地壳结构层析成像. 地球物理学报, 2005, **48** (1) : 107 ~ 115
 Yang Z X., Zhang X K., Zhao J R. Tomographic imaging of 3D crustal structure beneath Changbaishan-Tianchi volcano region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48** (1) : 107 ~ 115
- [12] 张贻侠, 孙运生等. 中国满洲里—绥芬河地学断面. 北京: 地震出版社, 1998
 Zhang Y X., Sun Y S., et al. Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transects (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1998
- [13] 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. 长春地质学院学报, 1991, **21** (3) : 277 ~ 282
 Zhang X Z., Zhang Y H. Coexistence of blue schist and greenschist: fresh evidence of dragon river rock formation structural evolution. *Journal of Changchun University of Earth Sciences* (in Chinese), 1991, **21** (3) : 277 ~ 282
- [14] 张兴洲. 黑龙江岩系-古佳木斯地块加里东缝合带的证据. 长春地质学院学报, 1992, **22** (博士论文库) : 94 ~ 101
 Zhang X Z. Evidence of Heilongjiang rock formation-ancient triple junction Kiamusze massif Caledonian suture zone. *Journal of Changchun University of Earth Sciences* (in Chinese), 1992, **22** (Doctora thesis volume) : 94 ~ 101
- [15] 曹 熹, 党增欣, 张兴洲等. 佳木斯复合地体. 长春: 吉林科学技术出版社, 1992
 Cao X., Dang Z X., Zhang X Z., et al. Jiamusi Composite Terrane (in Chinese). Changchun: Jilin Sciences Technology Press, 1992
- [16] Wilde S A., Zhang X Z., Wu F Y. Extension of a newly identified 500Ma metamorphic terrane in Northeast China: further U-Pb SHRIMP dating of the Mashan Complex, Heilongjiang Province, China. *Tectonophysics*, 2000, **328** : 115 ~ 130
- [17] 赵春荆, 彭玉鲸, 党增欣等. 吉黑东部构造格架及地壳演化. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1996
 Zhao C J., Peng Y J., Dang Z X., et al. Structural Skeleton and Earth's Crust Evolution in Eastern Jilin and Heilongjiang (in Chinese). Shenyang: Liaoning University Press, 1996
- [18] 邵济安, 唐克东著. 中国东北地体与东北亚大陆边缘演化. 北京: 地震出版社, 1996
 Shao J A., Tang K D. Evolution of Northeast China Terrain and Northeast Asia Continent (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1996
- [19] 刘先文, 申宁华, 葛肖红. 吉黑东部中生代两种机制的碰撞构造. 长春地质学院学报, 1994, **24** (4) : 385 ~ 389
 Liu X W., Shen N H., Ge X H. Mesozoic collision tectonics in eastern Jilin and Heilongjiang Provinces, Northeast China. *Journal of Changchun University of Earth Sciences* (in Chinese), 1994, **24** (4) : 385 ~ 389
- [20] 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. 北京: 地震出版社, 1994
 Jin X., Yang B J. Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transects (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1994
- [21] 朱仁学, 胡祥云. 格尔木—额济纳旗地学断面岩石圈电性结构的研究. 地球物理学报, 1995, **38** (增刊 II) : 46 ~ 57
 Zhu R X., Hu X Y. Study on the resistivity structure of the lithosphere along the Gblmud-Ejin Qi geoscience transect. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 1995, **38** (Suppl. II) : 46 ~ 57
- [22] 刘国栋, 邓前辉. 电磁方法研究与勘探. 北京: 地震出版社, 1993
 Liu G D., Deng Q H. Study and Prospecting of MT and Electromagnetic Method (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993
- [23] Constable S C., Parker R L., Constable C G., et al. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 1987, **52** (3) : 289 ~ 300
- [24] De Groot-Hedlin C., Constable S. Occam's inversion to generate smooth two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 1990, **55** (12) : 1613 ~ 1634

(本文编辑 刘少华)