

刘 营,徐义贤,张胜业等. 华南地区岩石圈电性特征及其地球动力学意义. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4234-4244, doi: 10.6038/cjg20131226.

Liu Y, Xu Y X, Zhang S Y, et al. Lithospheric electrical characteristics in South China and its geodynamic implication. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(12): 4234-4244, doi: 10.6038/cjg20131226.

华南地区岩石圈电性特征及其地球动力学意义

刘 营¹, 徐义贤^{1,2*}, 张胜业¹, 杨文采³, 杨 波¹

¹ 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074

² 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

³ 中国地质科学院, 北京 100037

摘 要 岩石圈-软流圈界面(The Lithosphere-Asthenosphere Boundary, LAB)是地球内部主要界面之一. 大地电磁测深(Magnetotelluric, MT)是研究地球壳幔电性结构最有效的方法, 利用长周期大地电磁测深数据可以较好地探测 LAB. 在 SinoProbe-01-03 课题的资助下, 首次获得了华南地区 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 网度的高质量大地电磁测深数据. 利用一维奥卡姆(Occam)算法反演了 MT 阻抗的反对角线元素所计算出的平均视电阻率. 根据一维地电结构可以将华南地区岩石圈划分为五种类型: 以湖南邵阳和贵州施秉为代表的克拉通型, 以四川达州和彭州及湖北荆门为代表的构造边界型, 以浙江湖州和广东云浮为代表的岩石圈中等改造型, 以江西赣州、广东揭阳及福建霞浦为代表的岩石圈强烈改造型, 以湖北英山为代表的造山带型. 除湖南邵阳、贵州施秉及广东揭阳外, 华南地区岩石圈厚度为 60~145 km. 本文研究表明华南地区岩石圈显示出南北两侧上抬、中部下凹、东部受不均匀改造的趋势, 这一结果与之前发表的文献所揭示的华南地区岩石圈东薄西厚的典型特征是不同的. 研究结果反映华南地区岩石圈稳定性较好, 晚中生代以来的构造伸展作用对岩石圈的改造程度有限, 可能主要以不同形式的软流圈底辟为主.

关键词 岩石圈-软流圈界面(LAB), 长周期大地电磁测深, 岩石圈地电结构, 华南, 岩石圈改造

doi: 10.6038/cjg20131226

中图分类号 P631

收稿日期 2012-04-06, 2012-06-28 收修定稿

Lithospheric electrical characteristics in South China and its geodynamic implication

LIU Ying¹, XU Yi-Xian^{1,2}, ZHANG Sheng-Ye¹, YANG Wen-Cai³, YANG Bo¹

¹ Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

² Key Laboratory of Geo-detection, Ministry of Education, Wuhan 430074, China

³ Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract The lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) is one of the main boundary of the earth's interior. Magnetotelluric (MT) sounding is the most effective method for investigation of the electrical structure of the crust and upper mantle of the earth. LAB is feasibly detectable by using long-period MT data. The high-quality MT data had been acquired on grid of $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ in South China under SinoProbe-01-03 project. We inverted the average apparent resistivity calculated from the off-diagonal elements by using one-dimension Occam's method. We interpret the recovered 1D geoelectric structure by classifying the lithosphere of the South China as five different types: (1) the craton type, the representative data are from Shaoyang (Hunan Province)

基金项目 国家深部探测技术与实验研究专项课题(SinoProbe-01-03)资助.

作者简介 刘营,男,1989年生,在读博士研究生,主要从事大地电磁正反演研究. E-mail: liuying061074@126.com

* 通讯作者 徐义贤,男,1965年生,教授,主要从事大地电磁测深和地震面波勘探理论与应用研究.

E-mail: xyxian@cug.edu.cn 或 xyxian65@aliyun.com

and Shibing (Guizhou Province) sites; (2) the tectonic boundary type, the representative data are from Dazhou and Pengzhou (Sichuan Province) as well as Jingmen (Hubei Province) sites; (3) the moderate reformed lithosphere type, the representative data are from Huzhou (Zhejiang Province) and Yunfu (Guangdong Province) sites; (4) the strong reformed lithosphere type, the representative data are from Ganzhou (Jiangxi Province) and Jieyang (Guangdong Province) as well as Xiapu (Fujian Province) sites; (5) the orogenic belt type, the representative data is from Yingshan (Hubei Province) site. The lithospheric thicknesses of the South China vary from 60 km to 145 km except Shaoyang, Shibing and Jieyang sites. Our results show that the lithosphere of the South China is thinner in the south and north regions, and thicker in the middle region; while the lithosphere of the South China is unevenly reformed in the east region. The results in present study are different from that of the previously published literatures, in most of which indicated that the significant characteristic of the lithospheric thickness of the South China is thinning from west to east. Our results support that the lithosphere of the South China is mechanically strong and hence stable. The tectonic extension occurred since the Late Mesozoic may limitedly reform the lithosphere of the South China, and the most possible reforming mechanism is by hot asthenospheric materials diapiring and underplating.

Keywords Lithosphere-asthenosphere boundary (LAB), Long-period magnetotelluric, Geoelectrical structure of lithosphere, South China, Lithospheric reforming

1 引言

岩石圈与软流圈边界(LAB)的物理和化学起因及其控制板块运动的机制是长期困扰固体地球科学家们的课题之一^[1-3]. LAB最早是流变学上的定义. 岩石圈意指地球上力学性质强的外壳,可以在地质历史上长时间支撑差异应力. 岩石圈之下为力学性质上弱的软流圈,软流圈容许与均衡调整相关的物质流动. 而今,根据测定方法的不同岩石圈已经被定义成岩性岩石圈、地震学岩石圈、电性岩石圈、温度岩石圈、弹性岩石圈等^[4]. 岩石学方法受限于包裹体的获取,因而只能给出大范围的LAB信息^[5]. 大地电磁学(MT)和地震学方法是测定LAB的主要手段^[2-4,6]. 一般地,将MT反演所获得的上地幔第一个相对高导层的顶部视为LAB^[6-7]. 欧洲大陆的对比研究表明^[8]:根据地震波速度各向异性及接收函数成像确定的LAB与根据MT探测到的上地幔高导层所推断的LAB在显生宙的中欧地区较为一致,而在其它地区差别很大,说明至少存在两种可能的原因:①在不同的大地构造单元,LAB的地质属性不同,因而在地球物理参数上并不具有同一性. 也就是,LAB并不同时具有低速、高导以及速度强各向异性在LAB深度上截止等地球物理性质^[9-10]; ②LAB横向变化大,目前采用的地震学和MT方法

不能精确确定其深度. 相较于地震学方法,利用MT确定LAB具有成本低的优势,但根据单个测点资料确定的LAB精度有限. 从MT具有空间平均效应和大量实测资料的结果来看,它给出的结果一般是稳定的、在平均意义上是可靠的.

华南地区以东南沿海发育大规模火成岩和扬子板块内部发育巨厚元古界地层为主要特征. 在华南地区业已开展的MT工作主要与油气勘探有关,与LAB有关的研究工作则相对较少. 李立^[11]根据我国早期MT探测成果对中国大陆地壳上地幔电性特征进行了分析. 徐常芳^[12]探讨了中国大陆地壳上地幔电性结构和地震分布规律之间的可能关联. 徐克定^[13]通过多条大地电磁剖面,对华南部分区域的大陆岩石圈层圈结构进行了研究. 孙洁等^[14]根据MT资料研究了华南地区岩浆活动与深部电性结构的关系. 罗志琼等^[15]根据375个MT测深点资料确定了中扬子地区的岩石圈厚度,并探讨了其对该区油气勘探的意义. 刘国兴等^[16]给出了东南沿海地区岩石圈电性结构,并讨论了其地球动力学意义. 除MT外,前人在华南地区利用地震学和地热学方法也开展了诸多研究工作^[17-20],但是不同方法定义的岩石圈不同,各种方法所估计的LAB深度存在一定差异.

在SinoProbe-01-03课题资助下,我们首次获得了扬子板块和华南造山带及海南岛 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 网格共

12 个测点最长周期为 1 万秒的 MT 资料,并根据一维 Occam 反演^[21]结果采用梯度法确定了 LAB 的深度,计算了相应的岩石圈积分电导.为了验证结果的可靠性,进行了必要的一维数值试验.本文主要报道上述结果,并讨论所获得的 LAB 及岩石圈积分电导的地质意义.

2 根据一维 MT 反演结果确定 LAB 的模型数值试验

前已述及,一般将上地幔第一个高导层的顶界面视为 LAB.对 MT 数据进行一维反演可以获得各向同性或者各向异性层状电性结构,但根据反演结果一般难以准确读取上地幔第一个高导层的顶界面.由于 LAB 下方导电性迅速增强,因此学者们将反演所获得模型的电阻率梯度最大处当做 LAB 的位置,但仍缺乏理论模型的数值试验结果作为依据.进一步地,当存在或缺乏壳内高导层、电性层存在方位各向异性等情形,对采用梯度法确定上地幔高导层顶面的精度尚需进一步论证.为了研究华南地区长周期 MT 资料确定的 LAB 的可信度,我们考虑华南地区典型的岩石圈一维地电结构,进行了大量的数值试验.为简洁计,此处给出 2 种模型(见表 1)的数值试验结果:

表 1 模型参数表

Table 1 The model parameters

层位	模型 1		模型 2			
	h/km	$\rho/(\Omega\text{m})$	h/km	$\rho_1/(\Omega\text{m})$	$\rho_2/(\Omega\text{m})$	$\alpha_s(^{\circ})$
1	5	100	5	500	1000	40
2	15	2000	120	400	2000	30
3	5	10		20	200	20
4	100	2000				
5	50	10				
6		200				

(1)存在壳内高导层和高导厚层软流圈的电各向同性层状模型,(2)电性层为方位各向异性模型.数值试验中对模型正演所得数据均加入了 2% 的高斯噪声,初始模型均为具有 1000 Ωm 的 30 层对数域等厚层状模型.

对于电各向同性层状模型,当同时存在壳内高导层和高导厚层软流圈时,一维 Occam 法反演结果可以很好地恢复真实地电结构(见图 1a).此时无论采取极值法(把莫霍面以下第一个相对低阻层的上界面作为 LAB)还是梯度法,估计的 LAB 深度值均为 127.225 km,与理论模型的 125 km 十分接近.

对于方位各向异性层状模型,采用了一维各向异性反演(图1b,1c)和各向同性反演(图1d).各向

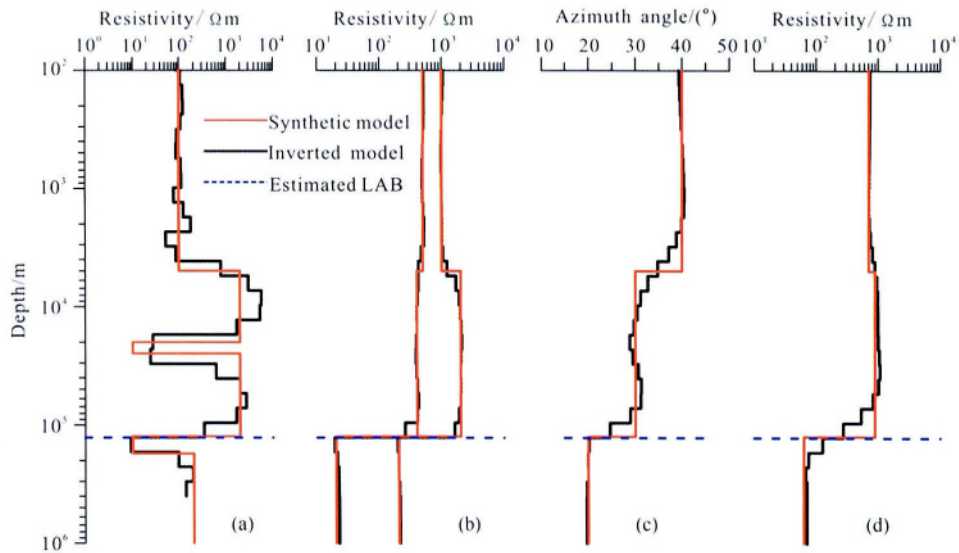


图 1 模型 1 与模型 2 反演结果与理论模型的对比图

(a)模型 1 反演结果与理论电阻率模型的对比图;(b)模型 2 各向异性反演结果与理论电阻率模型的对比图;
(c)模型 2 各向异性反演结果与理论模型方位角的对比图;(d)模型 2 各向同性反演结果与理论平均电阻率模型对比图.

Fig. 1 Comparisons between inversion results and theoretical models of model 1 and model 2

(a) The resistivity model of model 1; (b) The resistivity model of model 2; (c) The azimuth angle model of model 2; (d) The average resistivity model of model 2.

异性反演采用 Pek & Santos (2006) 提出的方法^[22],输入数据含全部阻抗元素.各向同性反演采用 Occam 法,输入数据为平均视电阻率.利用各向异性程序进行反演与真实模型非常接近,根据电阻率最大梯度确定的 LAB 深度为 127.2 km.根据笔者的经验,各向异性反演对原始数据的质量要求很高,实测数据往往很难满足.用平均视电阻率数据进行各向同性一维 Occam 反演(图 1d),对所得模型用梯度法进行估计,LAB 的深度在 127 km 附近,与理论模型的 125 km 十分接近.这个数值试验表明:对于电性方位各向异性层状模型,用平均视电阻率作为输入数据进行各向同性反演,对反演结果应用梯度法估计 LAB 的深度具有较高的精度.

3 长周期 MT 资料的观测与数据处理

在华南地区进行了 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 网格的 MT 数据采集,计 12 个测点(表 2).每个测点观测时间不少于 7 天,估计 MT 响应函数的频率范围为 320 Hz~10000 s.投入的采集仪器包括:加拿大凤凰公司生产宽频大地电磁仪 MTU-Net、乌克兰 LCISR 研究所生产的长周期大地电磁仪 LEMI-417M 以及德国 Metronix 公司生产的全频带大地电磁仪 GMS07e.采集方式有两种:(1)MTU-Net 和 LEMI-417M 组合,(2)GMS07e 系统(三根感应磁棒和 FGS03 三分量磁通门磁力仪组合).

采用人工时间序列挑样或功率谱筛选、Robust 估计^[23]、远参考处理^[24]、阻抗张量分解^[25-26]等技术

进行数据处理,最终获得视电阻率与相位曲线.利用 WAL 方法^[27-28]判别了 10 s、100 s、1000 s 及 10000 s 周期地电结构的维数性(图 2),计算了对应的平均 Parkinson 感应箭头^[29](图 3).由于华南地区干扰因素比较多、地下结构复杂,相位曲线也发生了畸变而且难以消除,因此本文利用平均视电阻率(荆门测点例外,由于 ρ_{yx} 质量差,故只采用 ρ_{xy} 视电阻率曲线)进行一维 Occam 反演,获得的一维地电模型及拟合情况分别见图 4—图 8.采用梯度法估计了每个测点的 LAB 深度(图 9a),计算了岩石圈积分电导(LAB 以上总纵向电导)(图 9b)和平均电阻率(表 2).

4 华南 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 网格岩石圈电性结构及其地球动力学意义

华南地区在 $10 \sim 10^4$ s 周期范围内主要为三维电性结构(图 2),不存在简单的一维和二维电性结构.在不同的深度范围内高导体的分布差异性明显(图 3).华南地区赣州、邵阳、施秉、云浮及揭阳测点的 Parkinson 感应箭头的幅值大,其余测点均较小(图 3b).湖州、赣州、揭阳测点在 10 s 周期的 Parkinson 感应箭头指向(SW $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$)基本一致,云浮测点 Parkinson 感应箭头指向发生约 90° 偏转(WNW 方向),它们均指示上地壳横向上由高阻体向高导体的转换.邵阳、施秉及云浮测点在 1000 s 周期的 Parkinson 感应箭头指向基本一致(约 SE $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$),指示岩石圈深部横向上由高阻体向高导体的转换.由于点距近 400 km,对 Parkinson 感应箭头的

表 2 华南地区长周期 MT 测点及估计的 LAB 深度值和岩石圈积分电导值

Table 2 Long period MT stations and estimated LAB depth and integral conductance in South China

测点编号	地域	经度($^{\circ}$ E)	纬度($^{\circ}$ N)	LAB 深度值(km)	岩石圈积分电导值(S)	平均电阻率(Ω m)
HZ	浙江湖州	120.0024	30.9867	113.5	1996	56.9
YS	湖北英山	115.9388	31.0068	68.3	124	550.8
JM	湖北荆门	112.0228	31.0540	59.9	4437	13.5
DZ	四川达州	108.0019	31.0585	76.1	1275	59.7
PZ	四川彭州	104.0094	31.0084	120.7	23265	5.2
XP	福建霞浦	120.0156	26.9636	143.2	147	974.1
GZ	江西赣州	116.0064	26.9793	137.0	321	426.8
SY	湖南邵阳	111.9831	26.9772	238.5	74	3223.0
SB	贵州施秉	108.0004	26.9771	183.2	123	1489.4
JY	广东揭阳	115.9972	22.9832	183.2	46	1158.7
YF	广东云浮	111.9972	22.9823	69.4	6414	10.8
QZ	海南琼中	109.9778	19.0091	111.8	96	1164.6

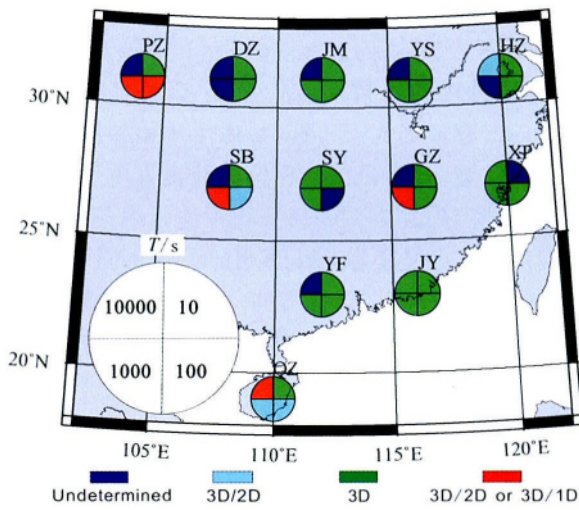


图 2 华南 12 个标准点长周期 MT 资料 WAL^[28] 维数性分析结果

维数性分析结果以下方给出的不同颜色表示，
左下方指示不同象限对应的周期

Fig. 2 The WAL^[28] dimensional analysis results of long-period MT data of 12 standard sites in South China. The colours indicate the dimensionality corresponding to different periods which are marked in the different quadrants postulated in the lower left.

上述分析只对测点附近的电阻率横向变化有意义。

根据 $4^\circ \times 4^\circ$ 网格长周期 MT 一维反演结果，华南地区壳内和上地幔一般存在四个高导层：第一个高导层的深度在 10~25 km 范围内，电阻率约 10~60 Ωm ，为壳内高导层，主要与发育壳内剪切带产生蛇纹岩化及含盐流体相关^[30]。第二个高导层在 25~50 km 之间，电阻率约 10 Ωm ，对应于电性

Moho^[31]。除湖南邵阳和贵州施秉及广东揭阳测点外，第三个高导层的深度在 60~145 km 范围，电阻率低，小于或等于 10 Ωm ，对应于电性 LAB；第四个高导层的深度在 200~350 km 之间，电阻率为 10~30 Ωm ，为幔内高导层，推测为幔内熔融体。沿北纬 27° 线 LAB 深度较大，在 120~230 km 之间；沿 31° 线测点的 LAB 深度次之，在 60~120 km 之间。研究结果并不支持华南地区电性岩石圈东薄西厚的观点，而是显示出岩石圈南北两侧上抬、中部下凹、东部受不均匀改造的趋势，反映华南地区岩石圈稳定性较好，晚中生代以来的构造伸展作用^[32-33]对岩石圈的改造程度有限，可能主要以不同形式的软流圈底辟^[34]为主。

根据一维地电结构可以将华南地区岩石圈划分为五种类型：克拉通型(图 4)、构造边界型(图 5)、岩石圈中等改造型(图 6)、岩石圈强烈改造型(图 7)及造山带型(图 8)。

华南克拉通型地电结构(图 4)表现为电性岩石圈厚度大、电性 Moho 清晰、岩石圈平均电阻率值高(表 2)。湖南邵阳和贵州施秉测点实测视电阻率曲线类型与加拿大 Slave 克拉通基本相同(对比文献^[31]图 3)，估计的 LAB 分别为 238.5 km 和 183.2 km，岩石圈平均电阻率分别达到 3223 Ωm 和 1489 Ωm 。地热学研究^[35]表明湖南邵阳和贵州施秉测点均位于平均热流值等于或低于 50 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 区域，在华南地区属于“冷”岩石圈。

构造边界型岩石圈电性结构以四川达州和彭州

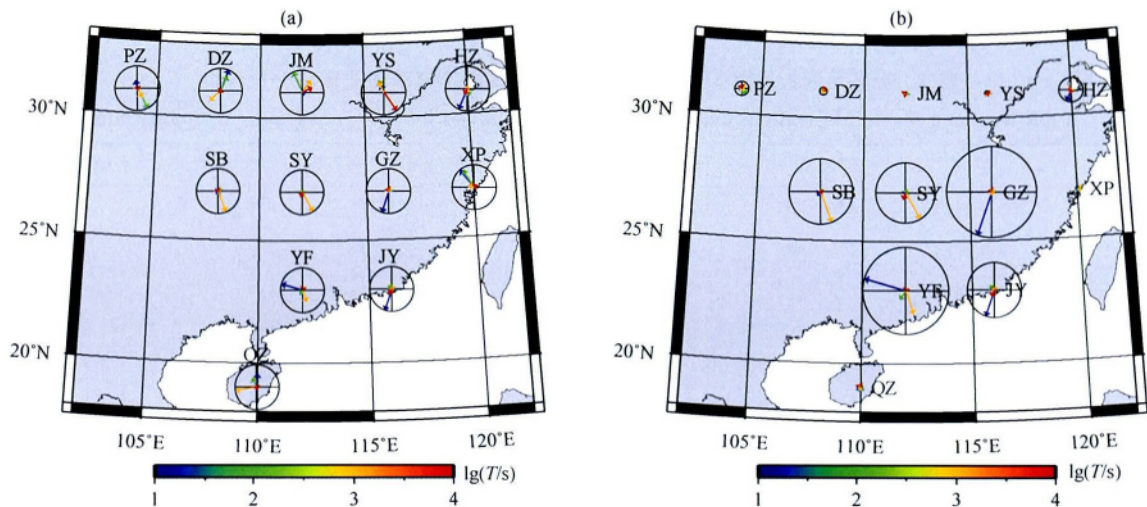


图 3 华南地区 $4^\circ \times 4^\circ$ 网格长周期 MT 资料计算的 4 个频段平均感应箭头图

(a) 单点归一化；(b) 华南地区整体归一化。

Fig. 3 The average induction arrows of four frequency bands calculated by long-period MT data of $4^\circ \times 4^\circ$ grid in South China. (a) The inductive arrows normalized by the single station; (b) The inductive arrows normalized by maximum of total stations in South China.

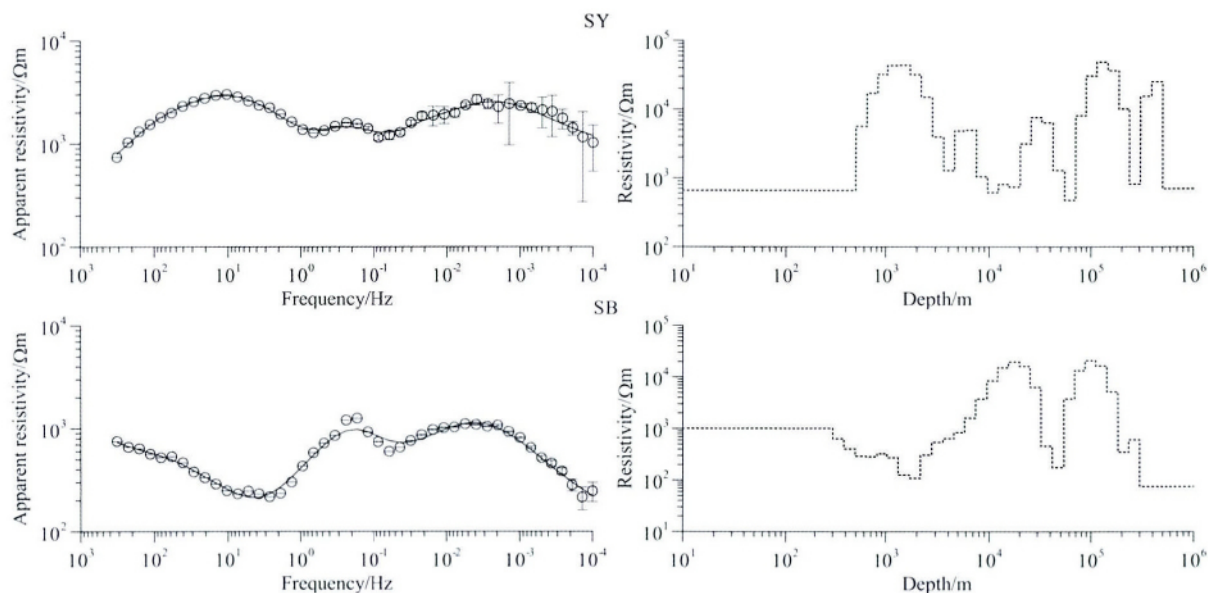


图 4 华南克拉通型一维地电结构(上:湖南邵阳 下:贵州施秉)
黑色圆圈表示平均视电阻率,黑色实线表示拟合曲线,黑色虚线表示反演所得模型
Fig. 4 One dimensional geoelectrical structure of the craton type in South China
(Upper: Shaoyang, Hunan Lower: Shibing, Guizhou)

The black circle indicates the average apparent resistivity, the black solid line indicates the predicted curve, and the black dashed line indicates the inverted final model.

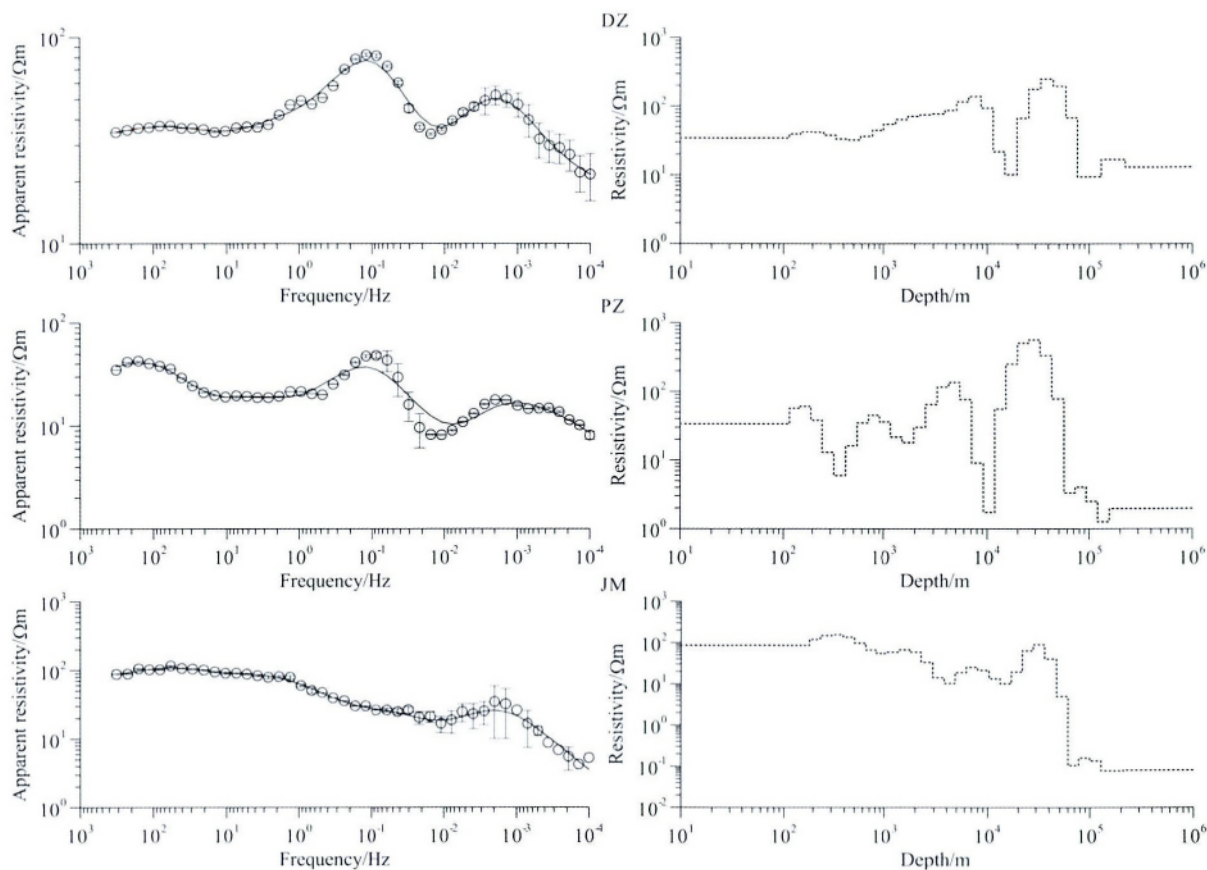


图 5 华南构造边界型岩石圈一维地电结构(上:四川达州 中:四川彭州 下:湖北荆门)
黑色圆圈表示平均视电阻率,黑色实线表示拟合曲线,黑色虚线表示反演所得模型

Fig. 5 One dimensional geoelectrical structure of the tectonic boundary type in South China
(Upper: Dazhou, Sichuan Middle: Pengzhou, Sichuan Lower: Jingmen, Hubei)
The black circle indicates the average apparent resistivity, the black solid line indicates the predicted curve, and the black dashed line indicates the inverted final model.

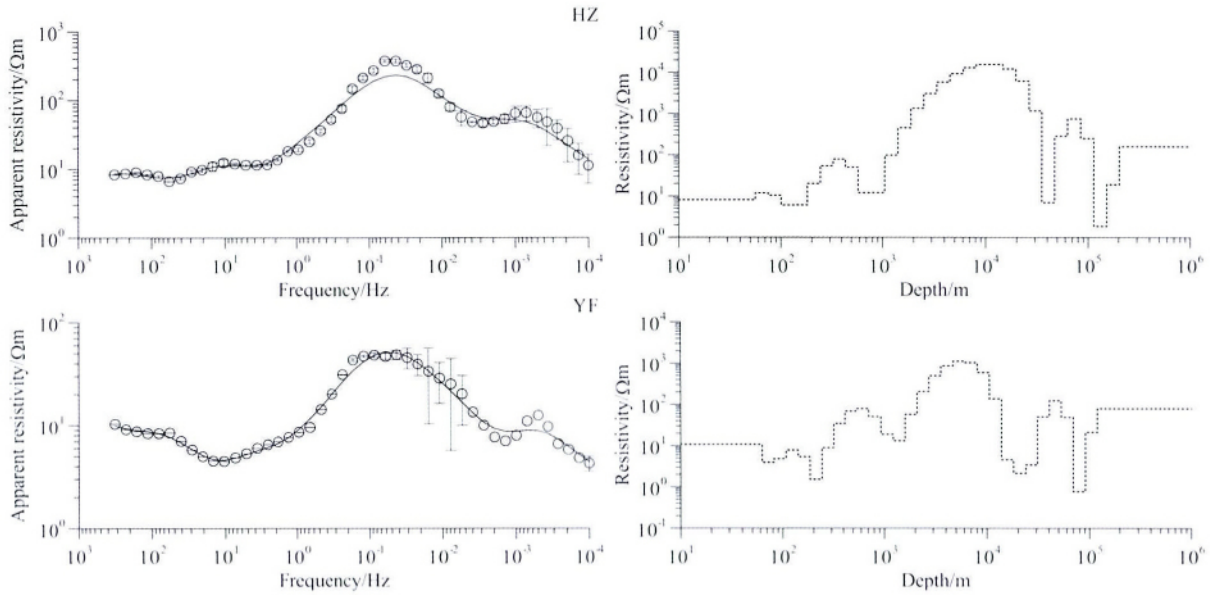


图 6 华南中等改造型岩石圈一维地电结构(上:浙江湖州 下:广东云浮)

黑色圆圈表示平均视电阻率,黑色实线表示拟合曲线,黑色虚线表示反演所得模型

Fig. 6 One dimensional geoelectrical structure of the moderate reformed lithosphere type in South China

(Upper: Huzhou, Zhejiang lower: Yunfu, Guangdong)

The black circle indicates the average apparent resistivity, the black solid line indicates the predicted curve, and the black dashed line indicates the inverted final model.

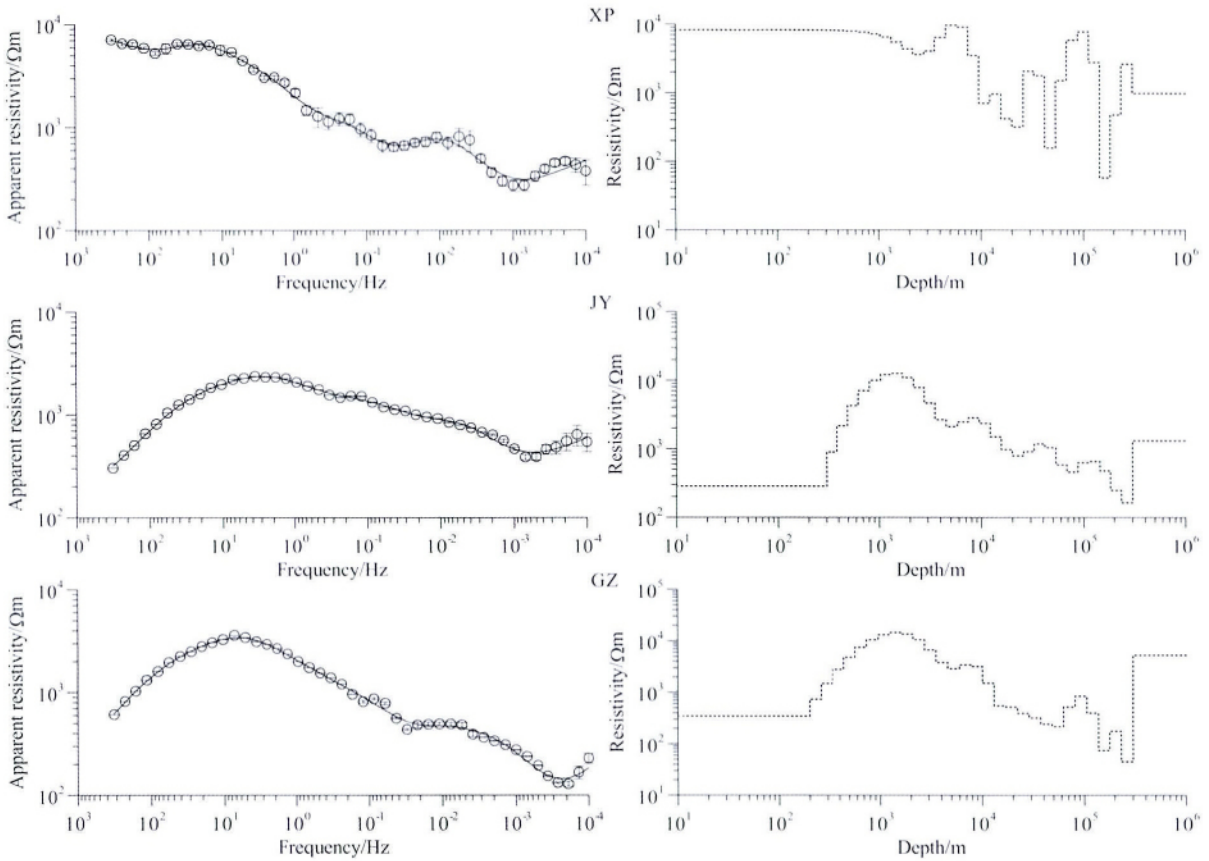


图 7 华南强烈改造型岩石圈一维地电结构(上:福建霞浦 中:广东揭阳 下:江西赣州)

黑色圆圈表示平均视电阻率,黑色实线表示拟合曲线,黑色虚线表示反演所得模型

Fig. 7 One dimensional geoelectrical structure of the strong reformed lithosphere type in South China

(Upper: Xiapu, Fujian Middle: Jieyang, Guangdong Lower: Ganzhou, Jiangxi)

The black circle indicates the average apparent resistivity, the black solid line indicates the predicted curve, and the black dashed line indicates the inverted final model.

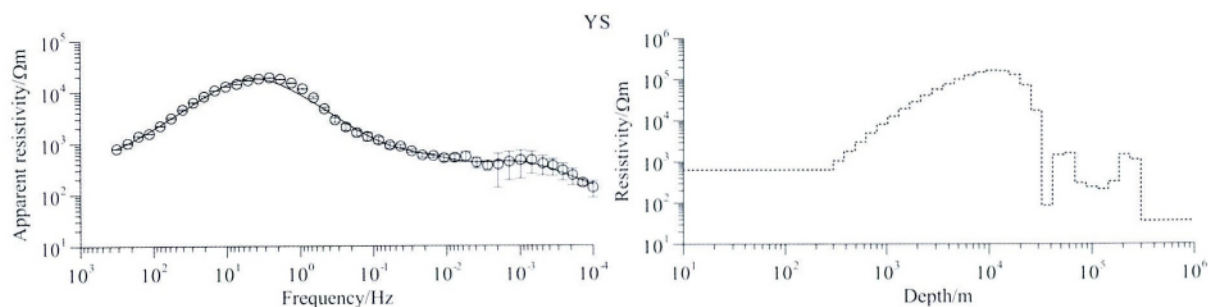
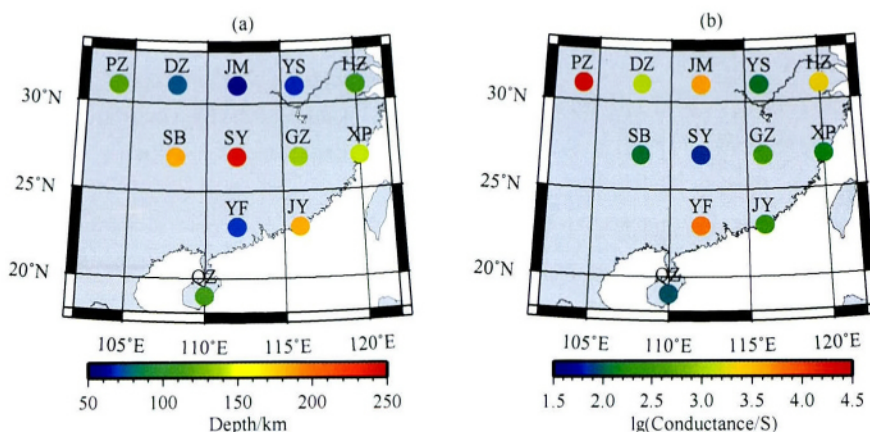


图 8 华南造山带型岩石圈一维地电结构(湖北英山)

黑色圆圈表示平均视电阻率, 黑色实线表示拟合曲线, 黑色虚线表示反演所得模型

Fig. 8 One dimensional geoelectrical structure of the orogenic belt type in South China (Yingshan, Hubei)

The black circle indicates the average apparent resistivity, the black solid line indicates the predicted curve, and the black dashed line indicates the inverted final model.

图 9 华南地区 4° 网格长周期 MT 资料估计的 LAB 深度(a)和岩石圈积分电导(b)Fig. 9 The LAB depth (a) and integral conductance (b) estimated by long-period MT data of $4^\circ \times 4^\circ$ grid in South China

及湖北荆门测点为代表(图 5), 以无电性 Moho 为主要特征, 其它特征还包括岩石圈导电性好(平均电阻率小于 $60 \Omega\text{m}$)、中上地壳高导层发育、LAB 以下电阻率低($<20 \Omega\text{m}$)。四川达州和彭州测点的电性结构指示地壳由弱的上地壳和强的下地壳组成, 上地壳与下地壳在力学性质上解耦, 佐证了四川地块发育双层变质基底且存在上部变质层滑脱^[36]。地热学^[35]研究指示四川达州和彭州测点均位于热流值 $50 \sim 60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 区域, 在正常热状态下, “湿”岩石圈是解释这一类电性结构的选项。因此, 达州和彭州位于四川地块与周边构造带的转换边界, 由发育岩石圈尺度的剪切带而形成高的导电性。湖北荆门测点位于太行山至武陵山重力梯度带上, 岩石圈厚度明显比其两侧小, 推测与所在构造带软流圈的上升有关。

岩石圈中等改造型电性结构以浙江湖州和广东云浮测点为代表(图 6), 主要特征为岩石圈导电性好(平均电阻率小于 $60 \Omega \cdot \text{m}$)、上地壳电阻率远高于下地壳、LAB 以下电阻率中等($20 \sim 50 \Omega\text{m}$)。这种

类型岩石圈的地壳由强的上地壳和弱的下地壳组成, 推测上地壳与下地壳在力学性质上解耦。地热学^[35]研究指示浙江湖州和广东云浮测点均位于热流值 $60 \sim 70 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 区域, 暗示岩石圈遭受热侵蚀, 或有局部软流圈底辟。浙江湖州测点位于前人推测的大别—舟山岩石圈断裂带^[34]和新安江壳幔韧性剪切带^[19]端点处附近, 而广东云浮测点位于前人推测的赣湘桂弱岩石圈减薄带和华夏强岩石圈减薄带的转换带上^[19], 故它们代表一类岩石圈中等改造型电性结构。

岩石圈强烈改造型电性结构以江西赣州、广东揭阳及福建霞浦测点为代表(图 7), 主要特征为岩石圈导电性中等(平均电阻率处于 $400 \sim 1200 \Omega\text{m}$ 之间)、中下地壳高导层不发育、电性 Moho 不明显而 LAB 清晰、岩石圈厚度偏大、LAB 以下电阻率高(均值大于 $100 \Omega\text{m}$)。上述 3 个测点的实测视电阻率曲线的尾支明显上升, 指示这种类型岩石圈对应的软流圈较薄。地热学^[35]研究指示上述测点均位于平均热流值大于 $70 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 区域, 暗示岩石圈遭受

强烈热侵蚀. 值得注意的是上述测点位于前人所称的华夏岩石圈强减薄区域^[19], 但长周期 MT 资料揭示其电性岩石圈厚度均超过 130 km, 与中扬子正常岩石圈厚度相当. 刘国兴等^[16]完成的华南沿海地区 MT 二维反演结果也揭示江西赣州和会昌之间及潮州附近岩石圈厚度在 100 km 以上. 如果用大洋板块俯冲时刮削下来的洋壳沉积物叠置在岩石圈下部导致岩石圈增厚机制^[16]来解释福建霞浦和广东揭阳测点的电性结构, 则无法解释这两处偏高的岩石圈平均电阻率. 另外, 江西赣州测点的电性结构不符合造山带“厚壳薄圈”特征(见后续分析), 因而不能用陆内造山机制^[16]来解释. 一种可能的机制是福建霞浦、江西赣州及广东揭阳测点在晚中生代末期以来构造伸展背景下发生了岩石圈底部的拆沉和垫托作用, 并伴随有大规模岩浆侵入事件, 造成改造后的岩石圈厚度增大而软流圈变薄, 同时由于壳内大量侵入岩和超镁铁质岩石的板底垫托使得岩石圈的平均电阻率偏高. 东南沿海地区岩石圈遭受上述改造作用在时间和空间上极不均一, 某些区域的岩石圈拆沉作用可能还在进行之中, 如梅州—平和—长泰一带显示明显的软流圈物质上升^[16], 而另一些区域已完成岩石圈的“新生”, 因此简单的“减薄”机制难以解释东南沿海地区现今的岩石圈电性结构.

造山带型岩石圈电性结构以湖北英山测点为代表(图 8), 主要特征是厚壳薄幔且地壳电阻率高、电性 Moho 清晰.

5 结 论

(1) 利用大地电磁法探测 LAB, 通过对不同的地电模型进行反演模拟发现: 地表低阻层、地表方位各向异性对估计 LAB 没有影响; 当存在低阻软流圈时, 能较准确地判断 LAB 位置; 利用梯度法估计 LAB 位置具有较高的精度.

(2) 华南地区 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 长周期 MT 测点所获得的电性岩石圈并不是简单的东薄西厚, 而是显示出南北两侧上抬、中部下凹、东部受不均匀改造的趋势, 反映华南地区岩石圈稳定性较好, 晚中生代以来的构造伸展作用对岩石圈的改造程度有限, 而且在时间和空间上不均一.

(3) 本文将华南岩石圈电性结构划分成克拉通型、构造边界型、岩石圈中等改造型、岩石圈强烈改造型及造山带型, 分别描述了它们的主要特征, 对今后的长周期 MT 资料解释提供了参照物.

华南地区经历了多期大规模构造运动, 岩石圈结构和构造复杂. 加密测点和延长观测周期对于利用长周期 MT 资料研究华南地区岩石圈结构和构造、预测大型成矿带及油气田远景区均具有重要意义. 致谢 感谢中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院蒋礼、张秉政、周文豪、张西君、王重阳等在采集华南地区 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 网度高质量长周期 MT 数据中所付出的艰辛劳动. 感谢 Sinoprobe-01 项目对本文的资助.

参考文献 (References)

- [1] Fischer K M, Ford H A, Abt D L, et al. The lithosphere—asthenosphere boundary. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2010, 38: 551–575.
- [2] Williams M L, Fischer K M, Freymueller J T, et al. Unlocking the Secrets of the North American Continent: An EarthScope Science Plan for 2010–2020, February, 2010, 78 pp.
- [3] Lay T, ed. Seismological Grand Challenges in Understanding Earth's Dynamic Systems. Report to the National Science Foundation, IRIS Consortium, 2009, 76 pp.
- [4] Eaton D W, Darbyshire F, Evans R L, et al. The elusive lithosphere—asthenosphere boundary (LAB) beneath cratons. *Lithos*, 2009, 109: 1–22.
- [5] O'Reilly S Y, Griffin W L. The continental lithosphere—asthenosphere boundary: Can we sample it? *Lithos*, 2010, 120: 1–13.
- [6] 魏文博, 金胜, 叶高峰等. 大陆岩石圈导电性的研究方法. *地学前缘*, 2003, 10(1): 15–22.
Wei W B, Jin S, Ye G F, et al. Methods to study electrical conductivity of continental lithosphere. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2003, 10(1): 15–22.
- [7] 袁学诚. 中国地球物理图集. 北京: 地质出版社, 1996.
Yuan X C. Atlas of geophysics in China. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [8] Jones A G, Plomerova J, Korja T, et al. Europe from the bottom up: A statistical examination of the central and northern European lithosphere—asthenosphere boundary from comparing seismological and electromagnetic observations. *Lithos*, 2010, 120: 14–29.
- [9] Ichiki M, Uyeshima M, Utada H, et al. Upper mantle conductivity structure of the back-arc region beneath northeastern China. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(19): 3773–3776.
- [10] 赵国泽, 詹艳, 王立凤等. 鄂尔多斯断块地壳电性结构. *地震地质*, 2010, 32(3): 345–359.
Zhao G Z, Zhan Y, Wang L F, et al. Electric structure of the crust beneath the Ordos fault block. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2010, 32(3): 345–359.
- [11] 李立. 中国大陆地壳上地幔电性特征. *地球物理学报*, 1996,

- 39(增刊): 130-140.
- Li L. The geoelectrical characteristic of crust and upper mantle in the continental region of China. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1996, 39 (supp): 130-140.
- [12] 徐常芳. 中国大陆地上地慢电性结构及地震分布规律(一). *地震学报*, 1996, 18(2): 254-261.
- Xu C F. The earthquake distribution and the resistivity structure in the Chinese mainland. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1996, 18(2): 254-261.
- [13] 徐克定. 中国南方大陆岩石圈结构分析. *海相油气地质*, 2000, 5(3/4): 31-46.
- Xu K D. The structure analysis of South China mainland lithosphere. *Marine Origin Petroleum Geology* (in Chinese), 2000, 5(3/4): 31-46.
- [14] 孙洁, 晋光文, 江钊等. 用大地电磁测深法研究华南地区岩浆活动及深部结构. *地震地质*, 2001, 23(2): 328-329.
- Sun J, Jin G W, Jiang Z, et al. Magmatic activity and the deep structure of South China inferred from magnetotelluric sounding data. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2001, 23(2): 328-329.
- [15] 罗志琼, 王家映, 邓忠凡等. 中扬子地区大地电磁与油气构造研究. *石油物探*, 1996, 35(3): 71-81.
- Luo Z Q, Wang J Y, Deng Z F, et al. The study of MT and hydrocarbon tectonic in central Yangzi area. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 1996, 35(3): 71-81.
- [16] 刘国兴, 韩凯, 韩江涛. 华南东南沿海地区岩石圈电性结构. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(2): 536-544.
- Liu G X, Han K, Han J T. Lithosphere electrical structure in southeast coastal region, South China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2012, 42 (2): 536-544.
- [17] 安美建, 石耀霖. 中国大陆岩石圈厚度分布研究. *地学前缘*, 2006, 13(3): 23-30.
- An M J, Shi Y L. Review on lithospheric thickness research of the Chinese continent. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2006, 13(3): 23-30.
- [18] 李廷栋. 中国岩石圈的基本特征. *地学前缘*, 2010, 17(3): 1-13.
- Li Y T. Principal characteristics of the lithosphere of China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2010, 17(3): 1-13.
- [19] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏等. 华南地区岩石圈三维结构类型与演化动力学. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(4): 301-312.
- Cai X L, Zhu J S, Cao J M, et al. Three-dimensional tectonic types and evolutionary dynamics of lithosphere of South China region. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 2003, 27 (4): 301-312.
- [20] 朱介寿, 蔡学林, 曹家敏等. 中国及相邻区域岩石圈结构及动力学意义. *中国地质*, 2006, 33(4): 793-803.
- Zhu J S, Cai X L, Cao J M, et al. Lithospheric structure and geodynamics in China and its adjacent areas. *Geology in China* (in Chinese), 2006, 33(4): 793-803.
- [21] Constable S C, Parker R L, Constable C G. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 1987, 52: 289-300.
- [22] Pek J and Santos F A M. Magnetotelluric inversion for anisotropic conductivities in layered media. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, 158: 139-158.
- [23] Egbert G D, Booker J R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1986, 87(1): 173-194.
- [24] Gamble T D, Goubau W M, Clarke J. Magnetotellurics with a remote magnetic reference. *Geophysics*, 1979, 44(1): 53-68.
- [25] Groom R W, Bailey R C. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B2): 1913-1925.
- [26] McNeice G W, Jones A G. Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data. *Geophysics*, 2001, 66 (1): 158-173.
- [27] Weaver J T, Agarwal A K, Lilley F E M. Characterisation of the magneto-telluric tensor in terms of its invariants. *Geophysical Journal International*, 2000, 141: 321-336.
- [28] Martí A, Queralt P, Ledo J. WALDIM: A code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariants of the magnetotelluric tensor. *Computers & Geosciences*, 2009, 35: 2295-2303.
- [29] Parkinson W D. The influence of continents and oceans on geomagnetic variations. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 1962, 6: 441-449.
- [30] 徐义贤. 中下地壳高导层成因研究综述. *地质科技情报*, 1995, 14(3): 15-22.
- Xu Y X. Review of the mechanism of the high conduction layers in middle to lower continental crust. *Geological Science and Technology Information* (in Chinese), 1995, 14 (3): 15-22.
- [31] Jones A G, Ferguson I J. The electric Moho. *Nature*, 2001, 409: 331-333.
- [32] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. *地学前缘*, 2004, 11(1): 45-55.
- Mao J W, Xie G Q, Li X F, et al. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2004, 11(1): 45-55.
- [33] 舒良树. 华南构造演化的基本特征. *地质通报*, 2012, 31(7): 1035-1053.
- Shu L S. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2012, 31(7): 1035-1053.
- [34] 陈陆生, 张永鸿, 徐师文等. 下扬子及邻区岩石圈结构构造特征与油气资源评价. 北京: 地质出版社, 1999: 1-287.

Chen H S, Zhang Y H, Xu S W, et al. The lithospheric textural and structure features as well as oil and gas evaluation in the lower Yangtze area and its adjacent region, China. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-287.

- [35] 汪洋. 华北和华南岩石圈热状态、流变学特征与地壳成分. 北京: 地质出版社, 2006: 1-91.

Wang Y. Lithospheric thermal state, rheology and crustal composition of north and south China. Beijing: Geological

Publishing House, 2006: 1-91.

- [36] 朱英. 中国及邻区大地构造和深部构造纲要: 全国 1:100 万航磁异常图的初步解释. 北京: 地质出版社, 2004: 1-90.

Zhu Y. A framework: Geotectonic and deep crustal architectural features of China and some peripheral areas: Interpretation of aeromagnetic map series 1:1000000. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1-90.

(本文编辑 刘少华)