韩 凯,刘国兴,韩江涛.乐昌一霞葛 MT 剖面深部电性结构研究.地球物理学进展,2012,27(3):0997-1007,doi:10.6038/j. issn.1004-2903.2012.03.021.

HAN Kai, LIU Guo-xing, HAN Jiang-tao. The deep electrical structure of the Lechang-Xiage profile with MT method. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2012, 27(3):0997 1007, doi:10.6038/j.issn. 1004-2903. 2012. 03.021.

乐昌一霞葛 MT 剖面深部电性结构研究

韩 凯, 刘国兴, 韩江涛* 韩 松 (吉林大学地球探测科学与技术学院,长春 130026)

摘 要 为研究华南地区的壳幔电性结构,完成了华南地区乐昌—霞葛大地电磁测深剖面的探测,获得了该剖面的地电模型,并结合领子、极化图和感应夫量等信息对地电模型进行了研究,对华南的电性结构、断裂特征和壳幔 结构有了新的认识.研究结果表明:剖面上地壳西厚东薄,表面被大量的花岗岩高阻体所覆盖,6条断裂沿剖面展 布. 剖面两端岩石圈增厚,厚度超过100 km,推测剖面西段岩石圈增厚是由于陆内挤压造山或陆内碰撞汇聚造山作 用,而剖面东端的岩石圈增厚形成于大洋板块的俯冲;中部岩石圈减薄,厚度在60~80 km之间,可能是与软流圈 物质上侵有关.

关键词 大地电磁测深,华南地区,电性结构,壳慢结构 doi:10.6038/j.issn.1004-2903.2012.03.021 中图分类号 P319 文献标识码 A

The deep electrical structure of the Lechang-Xiage profile with MT method

HAN Kai, LIU Guo-xing, HAN Jiang-tao, HAN Song

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

Abstract In order to study the electrical structure of crust-mantle in South China, this study completes magnetotelluric sounding profiles detection in Lechang - Xiage, South China, acquiring the profile of the electrical structure model. It also studys the electrical structure combining tipper, the polarizing figure, the induction sensor model and other information thus gain new understandings of electrical structure, fracture characteristics and crust-mantle structure in South China. The results show that the west part is thicker than the east part on the crust, which is covered by a lot of granite with high resistance body, and six fractures distribute along the profile. The lithosphere gets thick at both ends of the profile by 100 km. It is speculated that the thickness in the western part is due to intracontinental compression orogeny or intracontinental collision and convergence orogeny, while that of the eastern section is formed by oceanic plate subduction; the lithosphere gets thin in the central part by $60 \sim 80$ km, which may relates to the intrusion of asthenospheric material.

Keywords magnetotelluric sounding, South China, electrical structure, crust-mantle structure, electrical structure

0 引 言

大陆地壳的形成和演化以及壳幔体系的相互作 用,是当今地球科学的重大基础理论问题. 华南地区 处于欧亚板块和太平洋板块的交接部位,是东亚大陆边缘的重要组成部分,其复杂的地质背景和强烈的构造运动使华南地区的地壳、地幔经历了多期次的复杂演化过程^[1].长期以来,对华南地区壳幔结构

收稿日期 2011-09-10; 修回日期 2011-12-12. 投稿网址 http://www.progeophys.cn

基金项目 国家"深部探测技术与实验研究专项"课题(Sinoprobe02-04-02)资助.

作者简介 韩凯,男,1987年生,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事大地电磁测深研究.(E-mail,hankai_1987@126.com)

^{*}通讯作者 韩江涛,男,1982年生,辽宁凌源人,讲师,主要从事电法勘探理论应用研究.(E-mail:hanjt@jlu.edu.en)

与大地构造的关系有着不同的认识^[1-4,16],也曾有不 少的学者讨论过壳幔深层结构与大地构造的关 系^[2-5,16],但由于深部地球物理资料的缺乏,难以形 成统一的结论.因此,对华南地区的深部壳幔结构与 构造研究显得尤为重要.

自 20 世纪 50 年代以来,为了从整体上研究和 认识地球,国际地学组织实施了"国际地球物理年" 等国际合作研究计划.从 20 世纪 80 年代开始,为了 阐明岩石圈物质组成、结构构造、演化及动力学机 制,国际组织实施了"国际岩石圈动力学和演化"及 "国际岩石圈一生物圈计划"等大型国际合作研究计 划.自 20 世纪 60 年代板块构造学说提出后,人们把 注意力集中到研究地球岩石圈的结构构造及其动力 过程^[7].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,目前 已取得了令人瞩目的成就^[69],深化了对岩石圈的性 质、成因的认识,为建立地球系统科学的知识体系奠 定了良好基础.

大地电磁测深可以提供深部较准确的电性信息,近年来随着电磁仪器和数据处理手段的发展,大地电磁测深数据采集质量与反演精度都得到了很大的提高,在解决深部地质问题中发挥了越来越重要的作用^[2,5,9-13,19].根据 20 世纪 90 年代以来的大地电磁研究成果显示,华南地区发育有壳内、壳幔和幔

内高导层,板内构造活动受高导层的控制,但是关于 高导层的分布是否连续、广泛的说法不一^[24].大地 电磁探测结果还显示华南地区的地下电性特征表现 为横向不均匀性,呈非层状结构,并归纳总结出火成 岩的电阻率值在 n×10² ~n×10⁵ Ω·m之间,喷出 岩的电阻率值低,侵入岩的电阻率值高^[5].但由于受 之前大地电磁测深点数量不足、仪器精度不够和数 据处理手段落后的限制,使大地电磁测深研究结果 达不到实际的精度要求.本文根据乐昌一霞葛大地 电磁剖面的探测结果,在前人研究的基础上,对该剖 面的壳幔电性结构特征进行深入探讨,并讨论了其 地学意义.

1 大地电磁测深野外数据采集

1.1 测线布置

吉林大学在 2009 年承担了华南地区大地电磁 测深观测实验与壳/幔电性结构研究课题,共布设了 11 条 MT 剖面. 2010 年 2~4 月完成了乐昌一霞葛 剖面大地电磁野外数据采集工作.

乐昌一霞葛大地电磁测深剖面共布设测点 36 个,由于剖面位置区域地形恶劣,部分地区交通极不 便利,工业发达,使剖面上的部分测点无法按设计点 位布置,导致点距增大或缩小,但大部分测点保证点 距在 9~13 km 之间,平均点距为 11.37 km.



图 1 乐昌—霞葛大地电磁测深剖面测点分布 Fig. 1 Sites distribution of Lechang - Xiage magnetotelluric sounding profile

27 卷



Fig. 2 2D skewness image of Lechang-Xiage MT profile (a)Real image of 2D skewness; (b)Imaginary part image of 2D skewness

1.2 数据采集

野外数据采集采用了加拿大凤凰公司生产的 MTU-5a 大地电磁观测系统. MTU-5a 系统可以同 时采集三个磁场分量和两个电场分量. 观测时间均 大于 20 小时. 测量的频率范围为 360 ~ 0.00041 Hz.

野外数据采集获得的大地电磁数据质量良好, 80%以上的测点曲线形态清晰,连续性好.同时进 行了检查点的观测,检查点数大于总观测点的5%, 在未排除干扰因素的影响下检查点与原始观测数据 的均方误差均小于10%.这表明我们的 MT 野外观 测质量良好,数据采集是成功的.

1.3 数据处理与反演

随着现代大地电磁探测技术的发展,目前在大 地电磁数据处理和反演方面已经形成了一些成熟的 方法:大地电磁场时间序列的 Robust 处理、 Rhoplus分析、复阻抗张量分解等数据处理技术, 反演方法有 MT 二维快速松弛反演(RRI)、二维 Occam 反演、二维共轭梯度反演(CG)等方法^[10-12].

对野外采集数据进行数据处理时,采用了静校 正、人机交互、Robust 处理和远参考等去噪方法,有 效的去除了干扰因素,使视电阻率和相位曲线更加 圆滑,数据质量可信度更高.

1.3.1 介质维数和区域构造走向的判断

在对地下介质维数和区域构造走向判断时利用 了不同的方法.其中偏离度是反映地下介质维数的 重要指标,一般认为偏离度值越大,地下构造越接近 三维特征,偏离度值越接近零时地下介质二维特征 越明显,但是由于实际地下介质的复杂性,在现实中 不存在绝对的二维构造,所以一般认为偏离度值在 0.3以下就可以把地下的电性结构看成是二维的. 从图 2 中可以看出在浅部偏离度值较低呈现出二维 特性,但是在深部偏离度值偏大,呈现出三维电性结 构特征,但是低频部分偏离度值偏大的原因也与低 频数据的信噪比较差有关,所以我们认为乐昌一霞 葛大地电磁测深剖面更加接近二维,可以对其进行 相应的二维特征分析.

大地电磁场的极化特征表示某个固定频率的电 磁场的方向特征,因此大地电磁场的极化特征对于 反映构造的维数特别灵敏.由于在二维构造中,有 TE和TM两种极化模式存在,在水平方向上,电性 是不均匀的,具有强烈的方向性,那么有 $Z_{xy}(r) \neq Z_{yx}(r)$,从而反映出构造的主轴方向特征.而在三维 构造情况下,电性构造在水平方向上具有更强烈的 非均匀性,导致在水平面内,电性分布无明显的优势 方向, $Z_{xx}(r)$ 和 $Z_{yy}(r)$ 的出现,就是三维性存在的佐 证,它们的数值愈大,表明三维性愈强.

图 3 中列出的是剖面上部分测点的极化图, 虚 线的部分为 $Z_{xy}(r)$, 实线的部分为 $Z_{xx}(r)$. 从图中 可以看出 1 号点、8 号点和 31 号点的 $Z_{xy}(r)$ 主轴呈 现出北东向, 在 15 号点的 $Z_{xy}(r)$ 主轴方向为北西 向, 说明剖面上主要的构造方向应该为北东向, 而在



图 3 乐昌一霞葛 MT 剖面部分测点不同频率极化图

(a).1 号点极化图;(b).8 号点极化图(c).15 号点极化图;(d).24 号点极化图;(e).31 号点极化图

Fig. 3 Different frequency polarizing figure of some sites along Lechang - Xiage MT profile

(a). Polarizing figure of site 1; (b). Polarizing figure of site 8; (c). Polarizing figure of site 15;

(d). Polarizing figure of site 24; (e). Polarizing figure of site 31 $\,$

15 号点附近呈现出北西向构造;值得注意的是 24 号点在浅部呈现出北东向的构造,但是在深部却呈 现出北西向的构造,说明了剖面地下构造特征的复 杂性、多期性. 另外,在图中还可以看出,在高频部 分, Z_x(r)的值一般较小,而在随着频率的降低, Z_x(r)的值开始越来越大,表明深部电性构造三维 性强,无明显构造主轴,这和上面的偏离度研究结果 是一致的.

1.3.2 二维反演

前面我们已经提到,目前大地电磁测深资料的

二维反演有多种成熟的方法,但反演参数选择和反 演模式的选取对反演结果有较大影响.本文在对乐 昌一霞葛剖面进行反演时采用了 ZONGE 公司的二 维 MT/AMT 数据反演软件(SCS2D),它是属于平 滑模拟反演软件,可以进行 TM 模式、TE 模式和联 合模式的反演.为了呈现出地下介质的真实电性特 征,我们采用统一的参数分别进行 TM 模式、TE 模 式、TE& TM 联合模式反演,最后根据所掌握的研 究区内地质构造特点,参考其它地质、地球物理资 料,分析、比较不同模式得到的二维反演模型,发现



图 4 乐昌—霞葛 MT 剖面导电性特征 Fig. 4 Conductivity characteristics of Lechang - Xiage MT profile



Fig. 5 Comparis on of theoretical response of 2D inverse and real data of Lechang-Xiage MT profile (a) Real apparent resistivity contour diagram of imitative; (b) Theoretical apparent resistivity

contour diagram of imitative

TE& TM 联合模式反演得到的反演模型更加符合 研究区深部地下介质电性结构特征,即图 4. 根据反 演误差分析,原始数据与二维反演模型的理论响应 数据均方误差为 4. 69%,其等值线对比图见图 5,可 以看出原始数据与二维反演模型的理论响应的等值 线图基本上是一致的,表明反演结果是真实可信的.

2 电性结构分析

2.1 电性特征分析

沿剖面自西向东分别隶属于两个构造单元:华 夏地块和东南沿海地块,而华夏地块内部的电性结 构特征比较复杂,可分成三个部分.MT 剖面显示,

1001

剖面横向上表现出明显的电性不均匀性,在地壳中 普遍发育高阻体,局部有电阻率值很低的低阻区. 剖 面沿纵向上可以大致划分为三个电性层.

第一个电性层厚度在剖面的西部要明显大于东 部,底界面深度在剖面的西部可以接近 50 km,但是 剖面的中东部却只有 20~30 km 深. 高阻体普遍发 育,在高阻体之间也发育有规模较小的低阻体,电阻 率值在 $2 \times 10^3 \sim n \times 10^4 \Omega \cdot m$ 之间. 在华夏地块中, 第一个电性层电性特征更为复杂,发育有一系列的 高阻体和断裂带,其中 I 区的电阻率值较小,电性特 征比较简单,仅在1~2号点之间有少量的高阻体存。 在,3~4号点之间有一个向下延伸的低阻区,深度 约十几公里,在Ⅰ区和Ⅱ区之间存在一个电阻率值 很低并一直延伸到软流圈的低阻区. Ⅱ区的第一电 性层基本被高阻覆盖,7~10 号点之间出现有规模 较大的高阻体,深度接近 50 km,其电阻率值可以达 到 n×10⁴ Ω • m, [] 区 8 号点的浅部存在一个被高 阳体包围的低阳体,但是规模较小,Ⅲ区在16~17 和 20~21 号点之间也都存在几公里到十几公里厚 度不等的高阻体,而在19号点和26号点却存在电 阻率值仅有几十到几百 Ω·m 的低阻体. 华夏地块 与东南沿海地块以 26 号点下规模巨大的低阻带为 分界,两侧的电性特征差异明显,东南沿海地块的表 层几乎全部被高阻体覆盖,电阻率值在 3×10³ Ω·m 以上,仅在梅州地区存在一个规模不大的低阻区.

第二电性层的底界面埋深变化较大,呈现出和 第一电性层不同的特征,其厚度在剖面的东西两端 要大于剖面的中间部分,其中在华夏地块的 1~5 号 点和东南沿海地块的 35~37 号点之间其底界面埋 深均大于 100 km;而在华夏地块 I 区的 5~15 号点 以及华夏地块和东南沿海地块分界处的 25~27 号 点之间其底界面存在上凸现象,在 5~15 号点处其 底界面向上延伸至 70 km 深,25~27 号点之间甚至 上凸至 50 km 以上.第二电性层的电性特征总体变 化比较平缓,电阻率值相对差异较小,一般在 500~ $2 \times 10^3 \Omega \cdot m$ 之间,但是在 5~6 号点和 25~27 号 点之间出现低阻特征,其中 25~27 号点之间得电阻 率值甚至低至几十 $\Omega \cdot m$.

第三电性层顶界面即第二电性层的底界面,埋 深在剖面东西要明显深于剖面的中间,呈现出"蘑 菇"状.在华夏地块的 II、III 区和东南沿海地块西侧 的下部存在明显的上凸特征.

第三电性层总体上电性特征较简单,电阻率值 相比其他两个电性层也是最低的,一般都在几百 Ω•m以下,在5~15号点和23~27号点软流圈上
 隆现象比较明显,尤其是在23~27号点之间,上侵
 深度甚至接近50km,此处的电阻率值也较低.

2.2 断裂特征分析

华南地区在志留纪时华夏板块与扬子板块开始 进行拼接,侏罗纪的时候太平洋板块开始以较快速 率向中国大陆板块小角度俯冲^[26],长时期的剧烈构 造运动形成了华南地区的复杂地质状况,也相应的 形成了一系列规模不等、性质不同的断裂构造,这些 断裂构造主要有 NE 向、NNE 向和 NNW 向构成, 它们组成了华南地区复杂的断裂系统.

为了更好的研究断裂带的性质,我们利用感应 矢量, 倾子, 纵向电导, 极化图等参数来对断裂带进 行研究,作为大地电磁测深的主要参数之一,感应矢 量(主要是实感应矢量)在大地电磁测深研究深部地 电构造中有着广泛的应用.一般认为,实感应矢量的 物理意义明确,其大小反映了大地电导率的横向变 化梯度,其方向指向电流聚集的方向,一般情况下由 高阻指向低阻[14-17]. 大地电磁测深的另外一个重要 参数是倾子,它可以反映地电构造的水平非均匀性, 在资料解释特别是在断裂的判别上可以起到十分重 要的作用[19]. 而根据极化图特征可以判断出断裂带 的走向特征.此外,剖面 20 km 深的纵向电导特征 也在一定程度上提供了确定断裂位置的依据,因为 断裂带通常都是与低阻特征的岩石破碎带共存的. 析,发现在上地壳中普遍存在规模不大的低阻区和 明显的电性梯度带,这些低阻区与电性梯度带通常 与断裂带造成的岩石破碎熔融、水富集有关,因此在 剖面中可以初步确定出有 6 条明显的断裂带,再根 据已有资料[18,20]分别确定出断裂的名称,并利用上 述参数对断裂特征进行了研究.

吉安一四会断裂(F1):从图 4 中可以看出,4~ 6 号点之间为明显的低阻梯度带,梯度带西侧的岩 石圈视电阻率值明显要小于东侧.从感应矢量图中 可以看出,位于 4~5 号点之间存在一个明显的电性 梯度带,并且切割较深,可以影响到频率在 0.1 Hz 以下的深度,从纵向电导来看在 5 号点纵向电导有 一个极大值,所以本文推断在 5 号点附近有一断裂 存在,断裂带约宽 10~20 km,切割地壳至 20~ 25 km,产状陡立,属于壳内深大断裂.断裂的倾向 可以从图 7 的倾子特征中看出,该断裂的走向为 NNE.

赣江断裂(F2):在 8~9 号点存在被高阻体所

万方数据



(a). Features of tipper; (b). Real features of tipper; (c). Imaginary part features of tipper.

包围的低阻区,对应的感应矢量图上 8~9 号点之间 感应矢量发生汇聚,切割深度要比 F1 浅,表示此处 存在一个规模小于 F1 的断裂带.从图 7 中可以看 出赣江断裂的倾向为东南,根据极化图可以确定出 该断裂的走向也为 NNE.根据电性特征以及感应矢 量、倾子特征本文推断该断裂切割深度约为 20 km, 宽约 10 km,产状陡立.

河源一邵武断裂(F3):在剖面的 17~19 号点 之间有一个电阻率值在 20Ω•m 的低阻区,纵向电 导在此处有一个明显的极大值,同时从感应矢量图 中看出,箭头在17~18 号点间汇聚,并且一直延伸 到很低的频率,所以确定此处有一个深大断裂带存 在.从感应矢量图中还可以看出该断裂带影响范围 很大,在14~20 号点之间均有体现,宽度达到60~ 70 km.从倾子特征图中判断该断裂倾向东南,切割 深度很大,可达 30 km,倾角约 50°.根据极化图显 示,此区域的主构造方向为 NNW 方向,局部地区为 NNE 方向. 澳门一建阳断裂(F4):该断裂不能直接从剖面 的电性特征和纵向电导等信息上确定它的存在,但 根据感应矢量特征图可以确定它的存在,它的影响 范围为21~24号点之间,其中在22~24之间更加 明显,断裂切割深度也比较大,可达20多公里,宽度 为30 km左右.并且该断裂在倾子异常特征图上的 特征表现的同样不明显,仅在倾子实部异常特征图 上有体现,但是依然可以判断出该断裂的倾向为东 南,产状较陡立.根据极化图显示,断裂总体走向 为 NNE.

政和一大浦断裂(F5):在剖面的 30~31 号点 之间虽然没有明显的电性梯度带存在,可是第一电 性层厚度在此发生了明显变化,在西侧第一电性层 厚达三十多公里,在东侧却急剧减薄至十几公里,推 测是由于断裂的存在导致断裂上盘(西侧)下沉,断 裂的下盘(东侧)上升形成的.分析感应矢量图,在 28~31 号点之间明显存在断裂,切割深度为 15~ 20 km. 此区域的倾子受到比较严重的干扰,所以无 法对断裂的倾向信息做出判断,但是根据相应的电 性梯度带的倾向推断该断裂的倾向为北西向. 据极 化图显示,该断裂得总体走向 NNE.

福安一南靖断裂(F6):该断裂位于剖面的 32~ 34 号点之间,从电性特征上看地壳中并无相伴而生 的低阻体,而在上地幔中却存在一个具有一定规模 的低阻体,视电阻率值约为 200 Ω·m,形成了一个 上地幔高导层,从感应矢量图中看到该断裂切割深 度很深,已经达到该高导层的位置.从倾子特征图中 看到该断裂的倾向特征明显,为北西向.从极化图的 分析中得出,该断裂在浅部的走向为 NNE 向,但是 随着深度的增加,走向方向开始变为 NNW 向.

3 乐昌—霞葛 MT 剖面电性结构的地质 涵义

3.1 剖面电性结构的地质涵义

从剖面上可以看到,地壳中发育有规模不一的 高阻区和低阻区,由于华南复杂的地质环境,相应高 阻区和低阻区的形成原因也不尽相同,我们根据它 们的不同特征来分别推测它们的形成原因,希望能 对其动力学背景有所了解.

3~4 号点之间在 20 km 以上部分有一个并不 明显的低阻区,本文推测此低阻区为一个裂陷盆地. 在扬子板块和华夏板块进行拼接之后,华南地区进 入了造山活动时期,在后造山活动时期伴随有强烈 的拉张伸展作用,地壳和岩石圈在拉张作用下减薄、 破裂沉陷而形成裂陷盆地.拉张伸展的动力来源于 地球内部的热扰动使地幔上隆,岩石圈减薄,另外强 烈的壳幔作用使下地壳发生破碎,或者发生局部熔 融,从而导致地壳沉陷形成盆地.之后盆地中接受海 相与陆相低阻沉积物而形成一个低阻区.

5~6 号点之间属于赣江断裂的位置,低阻区存 在于 8~20 km 之间,低阻特征十分明显,并且低阻 区的下部有一个并不明显的通道和软流圈相连.推 测此处的低阻区形成与岩石圈的拉伸、软流圈的上 侵有关,上面提到华南地区曾经处于拉张伸展环境 下,并导致岩石圈的拉裂和破碎,在破碎比较严重的 地区软流圈的高温流体必定会沿着破碎带上侵,形 成低阻通道,当上侵到一定深度的时候会由于动力 的不足而停止上侵,高温流体停留在那里侵蚀周围 破碎的围岩形成"囊状"低阻区.

8 号点和 19 号点处存在的低阻区规模并不大, 推测是由于在构造运动中强烈的壳幔作用下,使部 分岩石脱水或部分熔融而导致局部电阻率值下降形 成低阻区,同时断裂带的存在必然产生岩石破碎作 用,破碎的岩石空隙之间被低阻流体所填充也会导 致电阻率值急剧下降.

25~27 号点之间的低阻梯度带低阻特征最为 显著,规模也是最大的,低阻区从软流圈一直上侵到 上地壳,此处的低阻梯度带形成原因与5~6号点之 间的低阻区有类似的地方,也有其独特性.本文推测 25~27 号点之间的低阻梯度带形成原因是在太平 洋板块向华南板块俯冲作用下,导致岩石圈发生强 烈的破碎上隆,形成一个岩石圈破碎带,一部分岩石 圈物质拆沉进入软流圈,导致岩石圈急剧减薄,同时 软流圈物质开始沿着破碎带上侵,一直到上地壳才 停止.可以看出此处的低阻通道至今仍十分清晰,说 明此处的"热通道"动力充足,并未随时间的推移而 减弱,也就是说至今仍有一个持续的动力来推动,这 个动力也许就来自大洋板块持续的俯冲作用.

在 30~33 号点下面也同样存在一个低阻区,此 低阻区的电性特征并不明显,但是埋深很深,位于上 地幔中,且与下面的软流圈并不相连,本文推测此处 的低阻区形成机制在初期是和 26 号点处的相同,与 大洋板块的俯冲和软流圈物质剧烈的上侵有关,但 是大洋板片叠置在岩石圈的下部导致此区域与软流 圈隔离开来,由于大洋板块俯冲的动力依然存在,壳 幔作用使此部分的壳幔物质保持熔融状态,从而形 成了 30~33 号点间的上地幔高导层.

另外剖面上大量存在的高阻体也非常引人注

万方数据

目,其中在 7~10 号点之间存在的高阻体规模巨大, 埋深可达 50 km. 资料显示^[21-24] 华南中生代花岗岩 分布广泛,但目前对华南中生代大地构造格局与构 造演化问题的认识还存在重大分歧,存在多种构造 观点,多数地质学家认为与大洋板块的俯冲作用有 关,是太平洋构造域的组成部分. 然而,近年来的研 究表明,中国东南大陆白垩纪的岩浆作用与岩石圈 的伸展作用有关,南岭地区侏罗纪大规模的岩浆作 用亦受控于岩石圈的伸展和裂解^[21].

华南加里东期的古生代花岗岩,主要分布于湘-赣、湘-桂和桂-粤交界地区[22],虽然分布并不广泛, 但它们以面积巨大的岩基产出,其动力学背景至今 仍不是十分清楚.在中生代华南地区由于受太平洋 动力学体系的影响,造成沿海地区拉张伸展,地壳变 薄,地幔上隆,幔源岩浆底侵,并使下部地壳部分熔 融形成花岗质岩浆,由此引发了大规模的火山-侵入 活动,形成了华南地质历史上规模最大的花岗质火 山-侵入杂岩,中生代花岗岩分布面积广泛,早中生 代印支期花岗岩仅分布于华南的内陆,燕山期花岗 岩构成了华南花岗岩的主体,从中侏罗世开始,花岗 岩的体积大规模增长. 华南还普遍存在新生代的花 岗岩,但是无论从规模还是分布范围上都要小于中 生代的花岗岩,其分布范围主要位于沿海区的 NNE 向火山岩带,在剖面上位于 29~37 号点之间,从剖 面上可以看出其厚度可从几公里至 20 km 左右,其 形成完全受控于太平洋构造域的影响.

多期次的岩浆活动使华南地区花岗岩大面积分 布,局部地区花岗岩规模巨大,同时在强烈的壳幔作 用下花岗岩与周围围岩可能发生重熔现象,岩石成 分相互混合,冷凝之后便形成了规模巨大的高阻体, 另外也不排除巨大的高阻体的一部分是由混杂岩组 成的,这些混杂岩可以是由一种或多种岩性组成.

3.2 岩石圈特征分析

从图 4 判断, 剖面的岩石圈由第一电性层和第 二电性层共同组成, 从图中可以清晰地看出岩石圈 的厚度变化, 岩石圈在剖面东西两端的厚度要大于 100 km, 在剖面中间减薄至 60~80 km.

剖面的西部(I区)岩石圈厚度可达 120 km,根 据研究发现此部分位于湘赣粤交会处,是扬子板块 和华夏板块的碰撞接合带,在中三叠世中晚期印支 运动中遭受了强烈的陆内挤压造山或陆内碰撞汇聚 造山作用,强烈的褶皱及逆冲推覆造成岩石圈的增 厚,虽然在之后此区域进入后造山拉张构造环境,深 部岩石圈发生拆沉作用^[23]使岩石圈的厚度急剧的 下降,但岩石圈拆沉的物质进入软流圈之后,一部分 与软流圈物质混合在一起形成电阻率值较高的混杂 岩区,随着深部软流圈物质上侵能量的减弱,这个混 杂岩区便冷凝固结形成新的岩石圈,这样一来岩石 圈的厚度就相比其他部分要厚的多.

剖面东段的岩石圈增厚却是直接形成于大洋板 块的俯冲作用,当大洋板块开始向中国大陆板块俯 冲的时候是以较小的角度、较快的速度俯冲的^[24], 强烈的碰撞挤压作用使岩石圈产生剧烈的褶皱而增 厚,随着时间的推移,俯冲的速度减慢,角度增加,而 大角度向下俯冲的大洋板片叠置在大陆岩石圈的下 部,形成了巨厚的岩石圈,有证据显示大洋板块向大 陆俯冲至 200 km 深度的时候才停止并消失于软流 圈,但是当深度大于一定程度的时候大洋板块便在 高温的作用下发生部分熔融,才形成了如今厚度约 100 km 的岩石圈.

3.3 软流圈特征分析

如上所述, 剖面的第三电性层是一个电阻率值 较低的稳定低阻层, 本文认为第三电性层就是软流 圈, 在剖面的中部其顶界面埋深比其它的部分要浅, 在 50~80 km 之间, 属于岩石圈减薄, 软流圈上侵 区, 整个软流圈的顶部呈现出"蘑菇云"特征.

剖面中部的软流圈顶界面在 60~80 km 之间, 本文推测此部分的岩石圈厚度较薄的原因可能是扬 子板块和华夏板块的碰撞作用力并未传导到此处, 而大洋板块的俯冲作用力传导至此处的时候作用也 已经很小,都不足以导致地壳岩石圈的明显汇聚增 厚,在中生代华南地区由于受太平洋动力学体系的 影响,造成沿海地区拉张伸展,地壳变薄,地幔上隆, 岩浆底侵,岩石圈拆沉,并使下部地壳部分熔融,那 么本区并未增厚的岩石圈再经过拉伸拆沉作用必然 导致岩石圈厚度的强烈消减.

同时随着大洋板块和拆沉的岩石圈的下沉,需 要一个上升流来平衡,于是在俯冲带上热的软流圈 的物质开始沿着岩石圈减薄的地区上升,形成一定 规模的地幔上隆.强烈的岩浆上侵会在地表伴随产 生热点现象,这些热点在形成的初期由于有充足的 能量,可能冲破地壳形成岩浆的喷发,这也许是沿海 地区分布有大规模火山岩的原因之一.随着时间延 续,大洋板块俯冲的作用减弱,岩浆上侵的动力逐渐 变弱,岩浆便停留在较深的部位,地面火山喷发逐渐 停止,热点现象也开始变的并不明显.不过大洋板块 的俯冲并未停止,其影响力也依然能够体现,据资料 显示^[25]在东南沿海地区目前有大量的地热资源存 在,在福建境内存在四个高温地热田:

1)福州及其附近(永泰、连江、德化等)地区;

2)厦门、漳州及共附近地区(华安、平和、南靖、 同安,永定等);

3) 安溪、永春地区;

4)大田、清流、永安地区,这表明虽然岩浆活动 性减弱,但在东南沿海地区的岩浆房的埋深还并不 是很深,在地面上依然有热点体现.25~27号点之 间上侵至上地壳的低阻区可能是岩浆前期上侵的通 道,随着上侵能量的减弱,其它部分的岩浆逐步冷却 凝结,可是这个通道虽然缩小却依然保留,并未完全 冷凝.

4 结 论

华南地区先后经历了多期次裂谷、造山作用和 多期次的岩浆活动,形成了华南地区特有的壳幔结 构,其中碰撞造山作用,后造山时期的拉张伸展作用 和大洋板块的俯冲是华南壳幔作用的主要动力.本 文通过对华南地区乐昌一霞葛大地电磁测深剖面的 二维反演结果进行研究,讨论了华南地区的断裂构 造的分布状态和壳幔电性结构特征,并分析了相应 的地质涵义.这些研究对于华南地区并不十分明确的 深部壳幔结构研究具有明显的科学意义,研究表明:

1)华南东南部地壳总体上呈现出西厚东薄的状态,沿海地区的地壳厚度要明显小于内陆地区,在西部内陆局部地区地壳厚度接近 50 km,而东部却在20~30 km之间;地壳中花岗岩高阻体大量分布,在 剖面西部呈现出大规模块状分布,而在剖面东部呈 连续型分布;地壳中电性突变带与断裂带相互对应, 为了研究相应的断裂特征,我们利用倾子,极化图以 及感应矢量进行了相应分析,事实证明这些参数对 断裂特征的确定是非常有用的.

2) 剖面两端岩石圈增厚,厚度超过 100 km,推 测剖面西段岩石圈增厚是由于陆内挤压造山或陆内 碰撞汇聚造山作用,而剖面东端的岩石圈增厚形成 于大洋板块的俯冲;中部岩石圈减薄,厚度在 60~ 80 km 之间,可能是与软流圈物质上侵有关.

3)华南地区壳幔高导层发育并不广泛,在剖面 中仅在 30~33 号点的 30~40 km 深处存在一个上 地幔高导层,但是规模不大,推测与大洋板块的俯冲 导致软流圈物质强烈上侵有关,后期由于软流圈上 侵的动力减弱和局部的壳幔作用,使该部分物质与 软流圈隔离开来形成高导层.强烈的壳幔作用和软 流圈的强烈上侵不仅导致了剖面中部岩石圈的减 薄,也形成了剖面上大量覆盖的火山岩和 25~27 号 点之间直达上地壳的低阻通道.

鉴于华南地区壳幔结构的复杂性,单纯的用二 维剖面并不能从整体上诠释其壳幔结构的特征,随 着工作的深入,我们下一步将对华南的三维壳幔结 构进行研究.

参考文献(References):

- 王德滋,沈渭洲. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地学前 缘, 2003,10(3):209-220.
 Wang D Z, Shen W Z. Genesis of granitoids and crustal evolution in Souhteast China. Earth Science Frontiers (in Chinesc), 2003,10(3):209 220.
- [2] 邓前辉,刘国栋,刘金汉等. 湖北襄樊-福建罗源的大地电磁测量 与地壳上地幔电性特征研究. 地震地质,1990,12(2);149-158. Deng Q H, Liu G D, Liu J H, et al. The observation of magnetotelluric and electrical characteristics of the crust-upper mantle along Hubei Xiangfan-Fujian Luoyuan profile. Seismology and geology (in Chinese),1990,12(2);149-158.
- [3] 李立.中国大陆地壳上地慢电性特征.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 (in Chinese),1996,39(Supplement):130-140.
- [4] 徐克定.中国南方大陆岩石圈结构分析.海相油气地质,2000,5
 (4):31-46.

Xu K D. The structure analysis of South China mainland lithosphere. Marine Origin Petroleum Geology (in Chinese), 2000,5(4):31-46.

[5] 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. Magmatic activity and the deep structure of South China inferred from magnetotelluric sounding data. Scismology and Geology (in Chinese),2001,23 (2);328-329.

[6] 金文山,孙大中. 华南大陆深部地壳结构及其演化. 北京:地质 出版社,1997.

Jin W S, Sun D Z. South China Continental Structure and Evolution of Deep Crust (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1997.

[7] 朱介寿,蔡学林,曹家敏等.中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化.北京:地质出版社,2005. Zhu J S, Cai X L, Cao J M, et al. South China and East China Sea Three-Dimensional Structure and Evolution of the Lithosphere (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House,2005.

[8] 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.

Wang Y. North and South China Lithosphere Thermal State, Rheological Characteristics and Crustal composition (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2006.

1007

 [9] 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 Jianusi massif and its eastern edge.

 Chinese J. Geophys. (in Chinese),2006,49(2):598-603.
 [10] 谭捍东,魏文博,Unsworth M等. 西藏高原南部雅鲁藏布江 缝合带地区地壳电性结构研究. 地球物理学报,2004,47(4):

Tan H D, Wei W B, Unsworth M, *et al.* Crustal electrical conductivity structure beneath the Yarlung Zangbo Jiang suture in the southern Xizang plateau. Chinese J. Geophys. (in Chinese) ,2004 ,47(1);685-690.

[11] 魏文博,金胜,叶高峰等.藏北高原地壳及上地幔导电性结构——超宽频带大地电磁测深研究结果.地球物理学报, 2006,49(4):1215-1225.

> Wei W B, Jin S, Ye G F, et al. Conductivity structure of crust and upper mantle beneath the northern Tibetan Plateau; Results of super-wide band magnetotelluric sounding. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(4); 1215-1225.

[12] 金胜,魏文博,叶高峰等,班公一怒江构造带的电性结构 特——大地电磁探测结果,地球物理学报,2009,52(10); 2666-2675.

> Jin S, Wei W B, Ye G F, et al. The electrical structure of Bangong-Nujiang suture: resulta from magnetotelluric sounding detection, Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2009, 52(10):2666-2675.

[13] 汤吉,詹艳,赵国泽等. 青藏高原东北缘玛沁一兰州一靖边剖 面地壳上地幔电性结构研究. 地球物理学报,2005,48(5): 1205-1216.

Tang J, Zhan Y, Zhao G Z, *et al*. Electrical conductivity structure of the crust and upper mantle in the northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau along the profile Maqên-Lanzhou-Jingbian. Chinese J. Geophys. (in Chinese) ,2005, 48(5):1205-1216.

- [14] Bahr K. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion. J. Geophys, (Zeitschrift fuer Geophysik), 1988,62:119-127.
- [15] Gary W M, Alan G J. Multisite, mutifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data. Geophysics, 2001, 66 (1):158-173.
- [16] (Ted) Lilley F E M. Magnetotelluric tensor decomposition;
 Part I, Theory for a basic procedure, Geophysics, 1998, 63
 (6):1885-1897.
- [17] Sims W E, Bostick F X, Smith H W. The estimation of magnetotelluric tensor elements from measured data. Geophysics, 1971, 36:938-942.
- [18] 王联魁,杨文金,张绍立等. 华南两个不同成因系列花岗岩分 布图(1:200000). 北京,中国科学院地球化学研究所,1985.
 Wang L K, Yang W J, Zhang S L. The Map of Two Different Series of Granite Distribution in South China (1:200000) (in Chinese). Beijing: Institute of Geochemistry Chinese

Academy of Sciences, 1985.

[19] 于鹏,吴健生,王家林等.利用长周期 MT 数据研究沪浙地区 深部断裂结构.同济大学学报(自然科学版),2008,36(4): 549-554.

Yu P,Wu J S, Wang J L, et al. Long period magnetotelluric data-based study on deep fault structure in Shanghai and Zhejiang Area. Journal of Tongji University (Natural Science) (in Chinese), 2008, 36(4):549-554.

- [20] 陈秋英,陈传昌. 福建政和-海丰断裂带地震活动特征分析. 华 南地震,2009,29(1):109-114.
 Chen Q Y, Chen C C. Relative study on earthquakes in the middle broken belt of Haifeng-Zhenghe, Fujian Province and earthquakes in Shunchang. South China Journal of Seismology (in Chinese),2009,29(1):109-114.
- [21] 赵希林. 福建省上杭地区中生代花岗岩体的年代学、岩石学、 地球化学特征及其地质意义. 北京;中国地质科学院,2007. Zhao X L. The Geochronology Petrography and Geochemical Characteristics of Mesozoic Granitoids from Shanghang Area in SW Fujian and Their Implications (in Chinese), Beijing; Chinese Academy of Geological Sciences, 2007.
- [22] 徐夕生. 华南花岗岩-火山岩成因研究的几个问题. 高校地质 学报,2008,11(3):283-294.
 Xu X S. Several problems worthy to be noticed in the research of granites and volcanic rocks in SE China. Geological Journal of China Universities (in Chinese),2008,14(3):283-294.
- [23] 李金冬. 湘东南地区中生代构造-岩浆-成矿动力学研究. 北 京:中国地质大学,2005.

Li J D. Mesozoic Tcctonic-Magma-Mineralization in Southeastern Hunan Province (in Chinese). Beijing, China University of Geosciences, 2005.

[24] 周新民,李武显.中国东南部晚中生代火成岩成因;岩石圈消 减和玄武岩底侵相结合的模式.自然科学进展,2000,10(3): 240-247.

Zhou X M. Li W X. The genesis of Southeast China late Mesozoic igneous rock: A combination model of lithosphere subduction and underplating of mafic magma. Progress in Natural Science (in Chinese), 2000, 10(3): 240-247.

[25] 董永福,赵云华,福建省高温地热资源. //任湘,刘时彬,顿主 佳.中国两藏高温地热开发利用国际研讨会论文选.北京:地 质出版社,1993,230-234.

Dong Y F, Zhao Y H. A view of geothermal fields of high thermal water in Fujian Province, China, // REN X, LIU S B, DUN Z J. China's Tibet high-temperature geothermal development and utilization Selected Papers International Symposium (in Chinese). Beijing, Geological Publishing House, 1993; 230-234.

[26] 赵海玲,秋永军,刘振文等.东南沿海地区新生代火山作用和 地幔柱. 地质学报,2004,78(6):781-788.
Zhao H L, Di Y J, Liu Z W, et al. Cenozoic volcanism and mantle plume along Southeast Coast of China [J]. Acta Geologica Sinica (in Chinese),2004,78(6):781-788.

685-690.