

中国大陆深探测的大地电磁测深研究

金胜^{1,2)}, 张乐天^{1,2)}, 魏文博^{1,2)}, 叶高峰^{1,2)}, 刘国兴³⁾, 邓明^{1,2)}, 景建恩^{1,2)}

1) 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京, 100083;

2) 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京, 100083;

3) 吉林大学, 长春, 130026

内容提要:通过对地震波速度、密度、磁性、导电性等物理场进行观测,研究地壳与上地幔的物性与结构特征,将为研究地球内部物质状态、地壳运动过程及其动力学机制等科学命题提供科学依据,同时也将为寻找深部大型矿床提供信息。大地电磁深探测方法作为研究地球壳幔电性结构的主要地球物理方法,在国内外完成了大量探测工作,取得了许多重要的研究成果。在研究壳幔构造方面,大地电磁法和地震方法一起被视为两大支柱方法,在世界范围内解决大陆动力学问题方面已有许多成功的应用范例。但由于大地电磁探测以天然电磁场作为场源,在矿集区等强干扰地区往往很难采集到高信噪比的数据,抗干扰能力较弱。同时,大地电磁与地震数据的约束反演以及联合解释目前尚没有达到实用化,这些都限制了大地电磁数据的处理及解释精度。“深部探测技术与实验研究”(SinoProbe)专项下属的“深部探测技术实验与集成”项目将选择青藏高原、西部造山带与华南山区结晶岩等复杂地质条件和不同人文干扰水平地区,以大地电磁探测与地震探测作为主要手段,研究深部精细地球物理探测技术的集成,并且通过实验剖面研究这些实验区的壳幔结构特征。其中的“大地电磁测深大剖面观测实验与壳/幔三维电性研究”课题,将通过在实验区的大地电磁观测实验,研究适用于不同地质条件及干扰水平地区的大地电磁数据采集方法技术以及精细处理与反演方法,同时探讨大地电磁数据与地震数据的约束反演以及联合解释。该研究将提高深部地球物理探测精度,为深部精细地球物理探测方法技术集成以及区域地球物理精细探测提供范例。已经完成的青藏高原东北缘西秦岭造山带和福建结晶岩地区的大地电磁观测试验表明,在这些典型地质构造区域,虽然存在施工困难,干扰水平大等各种不利因素,但只要采取合适的野外观测技术,并通过数据精细处理与反演计算,是能够获得高质量的大地电磁数据以及可靠的电阻率分布模型。试验所取得的成果,将为实现“深部探测技术实验与集成”项目科学目标和研究任务提供重要的技术支撑与保障。

关键词:壳幔电性结构;大地电磁;数据采集与处理;观测实验

随着地球科学的发展以及人类对资源的需求不断增长,进行地球深部探测来研究大陆演化奥秘,寻找更多资源,进行环境保护,是当代地球科学的主要任务。地球物理观测是进行地球深部探测的重要方法技术,很多发达国家自上世纪70年代以来,陆续启动了深部地球物理探测计划,获得了一系列重大成果。其中,大陆岩石圈导电性结构的研究是地球深部探测的一个重要组成部分,有关大陆岩石圈导电性的研究可以为大陆动力学、地质灾害防治、矿床成因研究等提供重要的支撑。大地电磁观测是研究地球深部电性结构与构造的主要地球物理方法,被广泛应用于油气勘探、矿产资源勘探以及深部地球物理调查等领域。在研究壳幔构造方面,大地电磁

测深和地震方法一起被视为两大支柱方法,两者相互验证、相互补充,在世界范围内解决大陆动力学问题方面已有许多成功的应用范例。

“深部探测技术与实验研究”(英文缩写SinoProbe)专项的主要研究任务之一是集成关键的地壳深探测技术,进行大探测深度和高分辨率的地球物理探测方法以及不同地球物理方法技术的集成、约束反演与联合解释研究,并选择重点实验区进行方法技术的有效性试验,为我国启动全面的地壳探测工程做好方法技术试验与准备(董树文等,2009)。SinoProbe专项下属的“深部探测技术实验与集成”项目将针对中国大陆青藏高原、西部造山带与华南山区结晶岩等复杂地质条件和深部物性特

注:本文为国家专项“深部探测技术与实验研究”(编号SinoProbe-02)资助的成果。

收稿日期:2010-01-14;改回日期:2010-04-12;责任编辑:周健。

作者简介:金胜,男,1970年生。副教授,从事地球物理学的教学与研究。电话:010-82321295;Email:jinshe@cugb.edu.cn。

点,研究深部精细地球物理探测技术的集成,并且通过实验剖面研究这些实验区的壳幔结构特征。要完成项目的研究目标,大地电磁探测是不可或缺的深部地球物理探测技术,研究大地电磁数据与地震数据的约束反演以及联合解释,将提高深部地球物理探测精度,为深部精细地球物理探测方法技术集成以及区域地球物理精细探测提供范例。

虽然大地电磁探测已经成为深部地球物理探测的一种主要方法技术,但仍有许多技术问题需要进一步研究与解决。比如大地电磁探测的抗干扰能力较弱,特别是在矿集区及经济发达区等强干扰地区往往很难采集到高信噪比的数据。而无论是研究深部地质构造还是寻找深部的隐伏矿床,都不可能完全避开强干扰地区,为了提高大地电磁的应用效果,需要研究强干扰等特殊地区的数据采集方法技术及特殊处理技术。通过在实验区的大地电磁观测实验,研究适用于不同地质条件及干扰水平地区的大地电磁数据采集方法技术以及精细处理与反演方法以及大地电磁探测与地震探测的集成与约束反演方法,将推动大地电磁探测方法的技术进步,提高大地电磁的应用效果,为获取地下不同深度的准确的电性结构分布以及进行壳幔结构特征研究提供技术支撑。

1 地球的导电性及大地电磁探测发展现状

1.1 地球的导电性

描述岩石导电性通常使用电阻率与电导率参数,它们互为倒数。矿物与岩石的导电性具有很大差别,比如纯金属和石墨的导电性很好,具有低电阻、高电导特征;而水晶的导电性则很差,具有高电阻、低电导特征。地球的地壳与上地幔是由多种岩石与矿物组成的,其导电性受到构造特征、物质成分、晶体结构、岩石矿物和密度、温度、压力等多种因素的影响,在估算地壳与上地幔的总体导电性时必须考虑不同的矿物组合与导电机制。

根据地震学的研究结果,地球内部主要划分为地壳、地幔和地核 3 个主要的层圈,按照当前地学界比较一致的认识,地壳加上地幔盖层也就是人们通常所指的岩石圈。总体上看,地壳最上部发育的是沉积层,其下即上地壳,主要是花岗质岩层,中地壳是花岗闪长质—闪长质岩层,下地壳则是玄武质岩—变质玄武质岩层;而上地幔盖层主要是由纯橄榄岩和橄榄岩组成(黄怀曾等,1994)。由于上、下地壳与上地幔的物质组成及所处物理状态的不同,其

导电性是有明显差异的,图 1 是根据探测结果总结的稳定大陆岩石圈的电阻率典型电阻率分布。

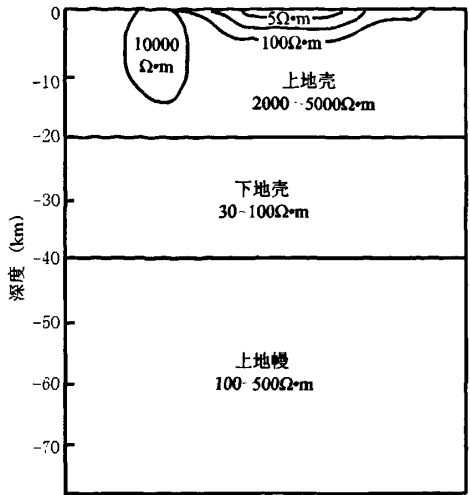


图 1 稳定构造区大陆岩石圈的典型电阻率分布

Fig. 1 Typical electrical resistivity model of stable structure area in continent

沉积盆地或沉积盖层由于孔隙、裂隙发育及水流动的作用而表现为低阻特征;上地壳主要由火成岩与变质岩组成,通常为高阻特征(2000~5000 Ω·m);相反,在许多区域下地壳却通常表现为低阻特征,对产生低阻层的原因目前学术界尚存在不同看法。有学者认为下地壳低阻层是由于相互连通的石墨层导致的(Yardley et al., 1997);但大多数地球物理学者认为下地壳的低阻层是由于下地壳中存在的水流体导致的(Marquis et al., 1992)。由于下地壳低阻层的存在,使得利用大地电磁数据确定上地幔的电阻率变得困难,但是在下地壳相对缺失的地区,上地幔的电阻率可以进行估算,大致在 100~500 Ω·m (Jones et al., 2001)。但是,越来越多的地球物理探测资料已经证实,岩石圈普遍存在“不均匀性”,其各个层圈的导电性也有很大的变化范围。研究表明,地壳中的低阻层可能主要是与地下介质出现局部熔融、塑性、流变等物质状态的改变等等有密切关系(Frost et al., 1989; Nover et al., 1998; 魏文博等,2006)。

1.2 大地电磁探测发展现状

大地电磁测深法是以天然的平面电磁波作为场源,通过观测相互正交的电磁场分量来探测地下不同深度介质的导电性结构,其方法理论是建立在求

解麦克斯韦方程组的基础上的(陈乐寿等,1990)。大地电磁测深所观测的电磁场中,频率小于1 Hz的电磁场信号主要是由太阳风和地球磁场相互作用产生的,而频率大于1 Hz的电磁场信号则主要来源于世界范围内的雷电活动。这些电磁波在传播到地球表面时,大部分被反射回空气中,但也有很小比例的电磁波传播到地球内部。电磁波在地球内部能够传播的距离用穿透深度(m)来定义:

$$\delta = \frac{503}{\sqrt{\sigma f}}$$

式中 σ 是电导率(S/m), f 是频率(Hz)。地下介质的电阻率越高,电磁波的频率越低,穿透深度就越大。大地电磁探测就是通过在地表观测电磁场各个分量的场值,并经过数据处理获得地下介质的视电阻率以及电场与磁场之间的相位差,进而通过反演计算获得地下介质的电性结构。

上世纪80年代以后,随着数字电子技术的飞速发展和新的资料处理和解释手段的研究开发,大地电磁法进入了快速发展的新阶段。数据采集的质量和效率不断提高;资料处理方法不断改进,使用Robust估计方法取代传统最小二乘处理方法(Egbert et al., 1986)处理时间序列资料,能最大程度地压制不相关噪声的影响,获得高质量的阻抗张量元素;阻抗张量分解技术(Groom et al., 1995; Gary et al., 2001)能有效分析地下地电构造的复杂程度和提供丰富的构造信息;实用化的二维反演算法(DeGroot et al., 1990)多种多样;三维反演正在逐步实用化。可以说,大地电磁探测方法已经成为深部地球物理探测不可替代的地球物理方法之一。

国际上,大地电磁测深已被广泛应用于岩石圈尺度的探测工作。上世纪90年代加拿大进行的岩石圈三维结构研究中,在主要构造区域布设了大量大地电磁测深工作。美国等其他欧美国家也进行了很多这方面的研究工作,对圣安德烈斯活动断裂带的电性结构研究结合地震数据,大体确定了圣安德烈斯断裂带附近地震多发的原因;对美国西北部岩石圈导电性结构的研究,揭示了西北盆山的成因、海洋地幔的俯冲以及火山活动中心的迁移。中国台湾国立中央大学也与加拿大阿尔伯塔大学合作布设3条近东西向大地电磁测深剖面,进行了台湾岛的电性结构探测,并结合地震目录数据探讨了宝岛台湾地震频发的深部原因,进而分析了欧亚板块与太平洋板块、菲律宾海板块的深部接触关系。法国、美国等国家近几年来已经开展了岩石圈导电性结构的三

维探测。以美国的USArray计划为例,作为EarthScope的组成部分的USArray是一个大陆尺度的地球物理观测计划,将为北美大陆的构造与演化提供新的约束。

我国的大地电磁探测工作主要是为石油天然气勘探及地球深部结构研究服务。其中用于石油天然气勘探的大地电磁探测频率范围较窄,目标是探测地下几十千米以内的电性结构特征及构造特征。而在地球深部结构探测领域,大地电磁的观测频率范围很宽,探测深度大,最低频率可以达到上万秒,探测深度可以达到几百千米。正是由于大地电磁有较深的探测深度,所以在地球深部构造研究领域发挥着重要的作用。自上世纪80年代以来,我国完成了大量的大地电磁剖面探测工作。其中具有代表性的有以下大地电磁探测工作:1980年~1981年中法合作最早在青藏高原开展的亚东—格尔木和格尔木—额济纳旗两条大地电磁测深剖面测量,完成了整个青藏高原的跨越,揭示了高原的电性结构特征(郭新峰等,1990;朱仁学等,1995)。自1995年起,中国地质大学(北京)在青藏高原共完成大地电磁探测剖面13条,几乎覆盖整个青藏高原。获得的青藏高原电性结构模型为研究高原的壳幔结构以及高原隆升、演化机制提供了重要的地球物理证据(魏文博等,1997; Wei et al., 2001; 谭捍东等, 2004; 金胜等, 2007; 叶高峰等, 2007)。同时,中国地质大学(北京)还在华北完成了两条大地电磁长剖面探测,为研究大华北地区的岩石圈结构特征提供了电性结构依据,也为研究华北岩石圈减薄、克拉通解体提供了有价值的地球物理证据。中国科学院、中国地震局等单位也分别在青藏高原、三江地区、四川盆地等关键地区完成了多条大地电磁探测剖面(孔祥儒等, 1996; 孙洁等, 2003)。在石油勘探领域,中石化与中石油在华南、新疆、青藏高原等地区也开展了大量的大地电磁剖面探测工作。通过这些大地电磁探测工作的开展,以及与国外研究机构与学者的合作与交流,极大地推动了我国的大地电磁探测水平。目前,在大地电磁仪器设备、野外数据采集技术、数据处理技术以及反演成像技术等方面,我国已经处于国际先进行列,得到国际大地电磁同行的认可与赞许。

但我国的大地电磁探测工作与国际发达国家比较,还存在较大差距,主要表现在以下几个方面:一是工作程度低,虽然我们已经进行了大量的大地电磁探测工作,但是与我国的国土面积比较,完成的工作还是远远不够的。在刚刚结束的国际电磁会议

上,有报告表明,美国等发达国家的大地电磁探测工作已经做到了覆盖全国,而且有的国家还建立了长期的大地电磁观测台站;二是完成的大地电磁探测工作多是为独立的局部科研项目设计的,造成了剖面位置分散,系统性较差,缺乏贯穿中国大陆不同地质单元的完整的探测长剖面,探测精度与深度也有差异。三是缺乏与其他地球物理方法特别是地震勘探的有效配合。在已经完成的大地电磁探测剖面中,只有少部分剖面同时进行了地震勘探,可以将大地电磁探测结果与地震观测结果进行综合解释,但大部分剖面上没有地震观测结果,给解释工作带来了一定的困难,也影响了解释精度及可靠性。因此,可以说我国的大地电磁探测已经具备了必要的软、硬件条件,有必要进行面积性探测以及关键区域精细测量,并且与地震观测密切配合,为研究地球深部壳幔结构以及矿产资源勘探提供地球物理依据,使深部探测能够带动我国国民经济建设、造福人类和适应地球科学发展的需要。

2 中国大陆深探测的大地电磁测深研究

“大地电磁测深大剖面观测实验与壳/幔三维电性研究”课题隶属于“深部探测技术实验与集成”项目,该课题将针对中国大陆青藏高原、西部造山带与华南山区结晶岩等复杂地质条件和深部物性特点,与地震探测密切配合,进行大地电磁野外观测技术、数据精细处理技术、二维反演与成像方法、电磁数据与地震数据约束反演技术试验研究,并根据实验剖面的探测结果,研究试验区域的壳幔电性结构特征。通过实验研究,建立适用于不同地区的大地电磁数据采集技术、数据精细处理与反演成像技术,与地震探测相结合,研究约束反演技术及联合解释方法,提高大地电磁探测结果的解释精度,为深部精细地球物理探测组合技术集成奠定基础,为资源勘查以及深部地球物理探测提供地球物理依据。根据获得的电性结构模型,结合其他地质与地球物理资料,探讨青藏高原东北缘、西秦岭造山带的深部结构与构造特征以及华南花岗岩的分布特征。

主要研究内容为:

(1)大地电磁野外数据采集技术研究:选择跨越青藏高原东缘、西秦岭造山带及华南结晶岩区等具有代表性的复杂地质条件地区,布置与地震剖面重合的大地电磁探测剖面,采用先进的大地电磁观测系统,采集高质量的大地电磁数据。通过野外数据

采集实验,建立适用于不同条件下的大地电磁野外数据采集方案,为地壳探测工程的实施提供可行的大地电磁数据采集技术体系及标准。同时获得实验区域高精度的大地电磁数据,为完成项目的科学目标提供基础资料支持。

(2)大地电磁数据精细处理及二维反演计算:大地电磁的数据处理技术与二维反演技术虽然已经很成熟,但对于在强干扰地区采集的信噪比较低的数据,仍然没有有效的数据处理方法。选择华南地区以及矿集区等强干扰地区作为实验区,对获得的数据进行处理过程中,在系统利用目前国际通用的大地电磁场分量时间序列的 Robust 处理、Rhoplus 分析、复阻抗张量分解、远参考处理等先进的大地电磁数据处理技术,对获得的数据进行精细处理的同时,将针对干扰严重的测点数据进行滤波、远参考处理、功率谱挑选等方法进行精细处理,改善数据处理质量。对所获得的大地电磁响应数据进行快速松弛反演(RRI)、Occam 反演、非线性共轭梯度反演、REBOCC 反演等不同反演算法的比较,最终选取相同反演方法和相同的反演参数对所有数据进行不同模式的二维反演计算,获得可靠的实验区域地下二维电阻率分布模型。

(3)大地电磁数据与地震数据约束反演技术及联合解释方法研究:大地电磁数据的反演计算存在多解性,特别是对电性异常体的底界面深度反应应得不是很准确,而且随着深度的增加,大地电磁的纵向分辨率也在不断降低。如何提高大地电磁探测结果的反演精度及解释精度,直接影响大地电磁探测方法的应用效果。本课题所设计的大地电磁剖面均与地震剖面相重合,在反演计算中,将利用同一剖面上地震观测获得的速度结构模型,结合测区的地质构造与岩性特征,研究大地电磁与地震数据的约束反演方法。通过约束反演,争取减小大地电磁数据反演的多解性,获得更接近实际电性结构的电阻率模型。同时将约束反演的结果与大地电磁单独反演的结果进行比较,研究约束反演的实际效果,最终建立能够实际应用的大地电磁与地震数据约束反演方法技术,提高深部地球物理探测的精度,实现深部地球物理探测技术的集成。研究大地电磁探测结果与地震探测结果的联合解释方法,根据获得的电性结构模型和速度结构模型进行互动解释,提高地球物理的解释精度与效果,获得更真实的壳幔结构与构造特征。

(4)实验区壳幔电性结构研究:通过大地电磁野

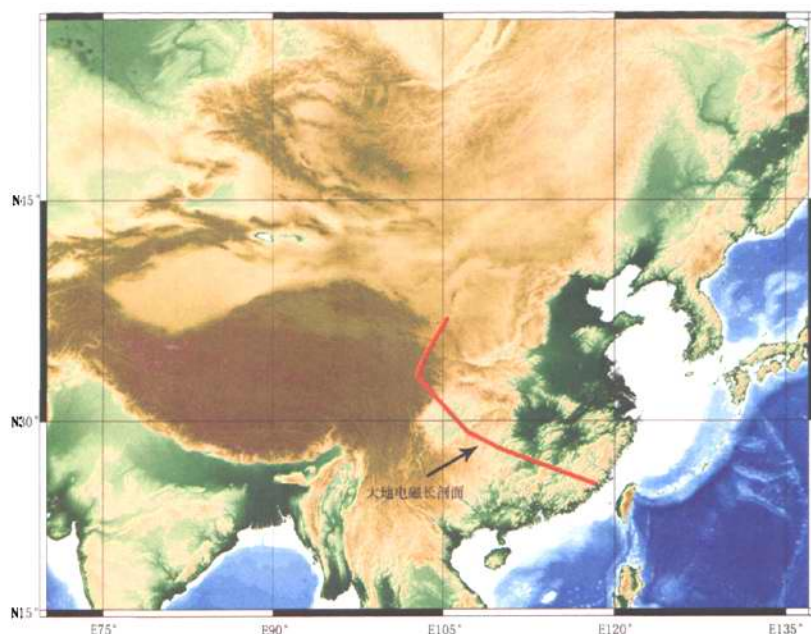


图 2 大地电磁长剖面位置示意图

Fig. 2 Location of long magnetotelluric sounding profile

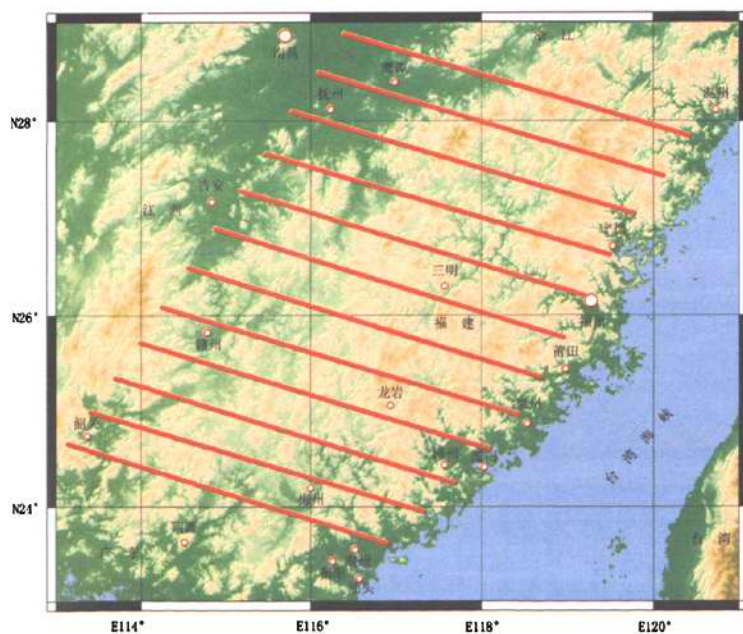


图 3 华南大地电磁剖面位置示意图

Fig. 3 Locations of magnetotelluric sounding profiles in South China

外数据采集、处理、约束反演等工作并获得研究区域可靠的二维地下电阻率分布模型后,将结合地震观测结果以及研究区域已有的区域地质、构造等资料,

研究实验区的地下电性结构特征,并且对电性分布进行地质解译。重点针对西秦岭造山带以及华南花岗岩地区的电性结构特征及其地质意义进行研究,

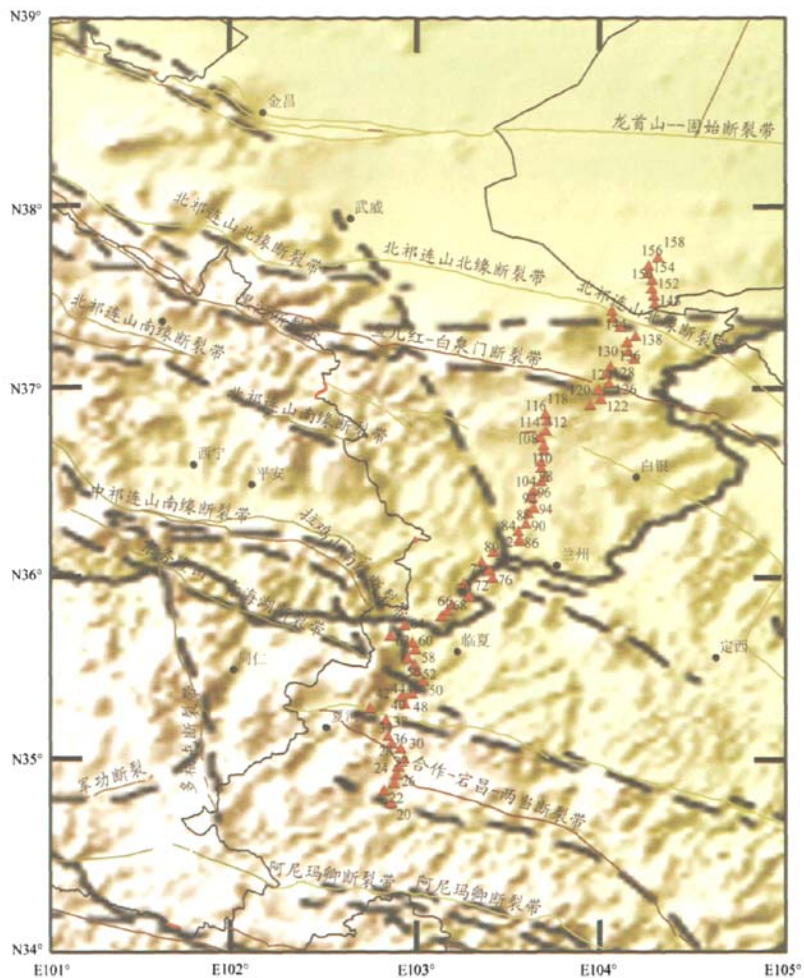


图 4 西秦岭造山带大地电磁剖面位置示意图(红色三角形为大地电磁测点)

Fig. 4 Location of magnetotelluric sounding profile in western Qinling orogen belt (red triangles denote MT sites location)

为研究西秦岭造山带的深部构造特征、板块运动模式以及华南花岗岩的分布范围、底界面深度等提供电性结构依据。

根据上述研究任务,将布置一条区域长剖面贯穿青藏高原东北缘的西秦岭造山带与两侧盆地并延深到华南结晶岩区(图 2),剖面长度约 2000 km,平均点距 5 km,测点总数约 390 个,在构造边界等重要地区适当加密测点,剖面位置将与地震剖面重合。在华南花岗岩地区,将布置若干条大地电磁探测短剖面(图 3),布置测点 390 个,平均点距 10 km,对该地区进行精细面积性探测。华南大地电磁剖面的位置将与宽频带地震的位置重合,便于进行约束反演及联合解译。

3 西秦岭及华南实验区初步试验结果

根据课题的研究任务与试验剖面位置,2008 年至 2009 年,在青藏高原东北缘的西秦岭造山带与华南福建省分别进行了大地电磁深探测的试验研究,共完成了 111 个大地电磁测深点的数据采集任务。在完成数据采集的基础上,总结了在高原、花岗岩地区以及强干扰地区进行大地电磁数据采集的方法技术,对获得的数据进行了精细处理和初步反演计算,获得了初步的电性结构模型。

在西秦岭造山带所完成的大地电磁探测剖面南起青海省甘南藏族自治州合作市,途经临夏、永靖、兰州、景泰,北至内蒙古境内的腾格里沙漠南缘大井镇,

剖面全长约 400 km,共布置大地电磁测点 70 个(其中长周期测点 18 个),平均点距 5 km。测线方向为北北东向,大致垂直于该地区的构造走向(图 4)。

所完成的大地电磁测深点分为宽频测点与长周期测点,每隔 3 个宽频测点布置一个长周期测点,以保证足够的探测深度。宽频测点的数据采集时间不低于 20 h,采集频段范围为 320~1/3000 Hz 的宽频大地电磁信号,长周期测点的数据采集时间不低于 70 h,采集 320~1/10000 Hz 的大地电磁信号。两套采集宽频数据的系统之间与两套长周期数据采集系统之间分别使用 GPS 进行同步采集,保证在数据处理时能够互为远参考处理。在进行数据采集时,所有测点均采用统一的采集参数,其中电道增益和磁道增益根据野外实际情况设定,要根据具体情况来设置合适的增益,保证数据不会溢出。

野外采集的数据,由于途经不同区域,所以数据质量受到采集环境的影响,在合作—临夏区间所布置的点位于地处偏远地区,点位选择良好,受到干扰较小,所以数据质量良好。永靖—兰州区间由于离工业区较近,并且剖面经过刘家峡水电站附近,所以点位选择比较困难,很难摆脱高压线、光缆的干扰,为了保证野外采集的数据质量,我们尽量选取侧线沿线的村庄远离干扰源的地方布站,或者适当缩小电极距以适应点位需要。

图 5 是一个宽频测点与一个长周期测点的视电阻率与相位曲线,可以看出,曲线形态良好,证明野

外数据采集是成功的。但是,在人文干扰严重地区,部分测点的数据 10~0.1 Hz 频带范围内受到强烈干扰,视电阻率与相位曲线出现跳跃甚至畸变。尤其是在永靖—兰州区间测点的数据受到工业区高压线、光缆等强干扰源的影响,数据质量不是很好,但室内处理过程中,综合使用功率谱挑选、远参考处理等方法,使得数据质量明显改善。图 6 是 70 号测点的原始曲线和经过功率谱挑选以及远参考处理后的曲线,可以明显看出,通过功率谱挑选以及远参考处理,曲线的连续性明显变好,数据质量有了很大改善。

根据阻抗张量分解的结果以及区域地质构造特征,剖面所在区域地下的地质构造可以近似看成二维构造,因而地壳导电性结构也近似满足二维条件。所以,在对地电磁响应资料进行反演时,可以采用 MT 二维反演算法。采用二维非线性共轭梯度反演算法(NLCG)对获得的大地电磁响应参数进行了反演计算。获得了沿剖面的电阻率分布模型(图 7)。

在华南地区湖南桂东—福建厦门布置了一条大地电磁观测实验剖面,完成了 41 个大地电磁测深点的数据采集,剖面长 430 km。通过试验,获得了一些在复杂山地条件下进行大地电磁观测的经验,并获得了初步的地下电阻率分布模型(图 8)。

通过上述试验工作,积累了在高原、造山带以及华南结晶岩地区等典型地质构造单元进行野外数据采集的经验,探索了如何在强干扰地区以及特殊地

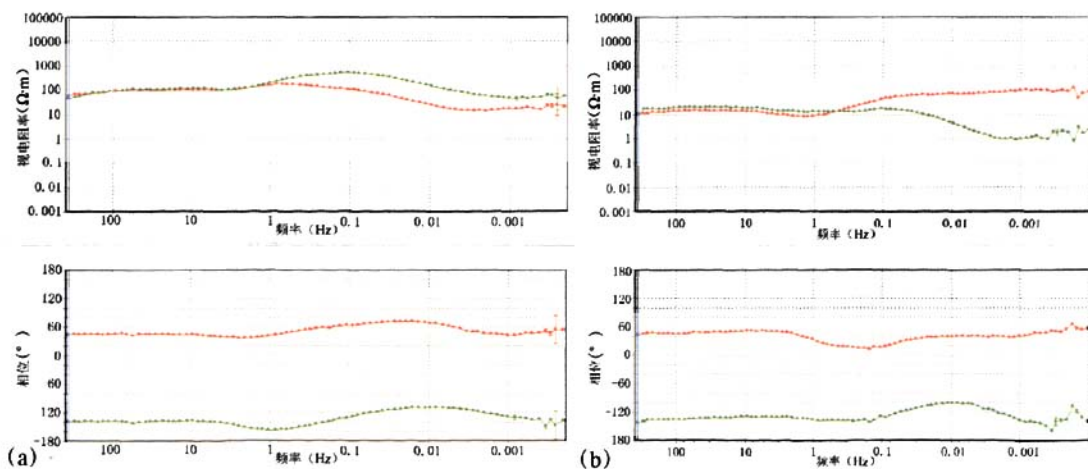


图 5 宽频测点(a)与长周期测点(b)大地电磁测深曲线

Fig. 5 Magnetotelluric sounding curves with wide-frequency (a) and long period band (b)

红色曲线: TE 模式; 绿色曲线: TM 模式

Red curve: TE mode; green curve: TM mode

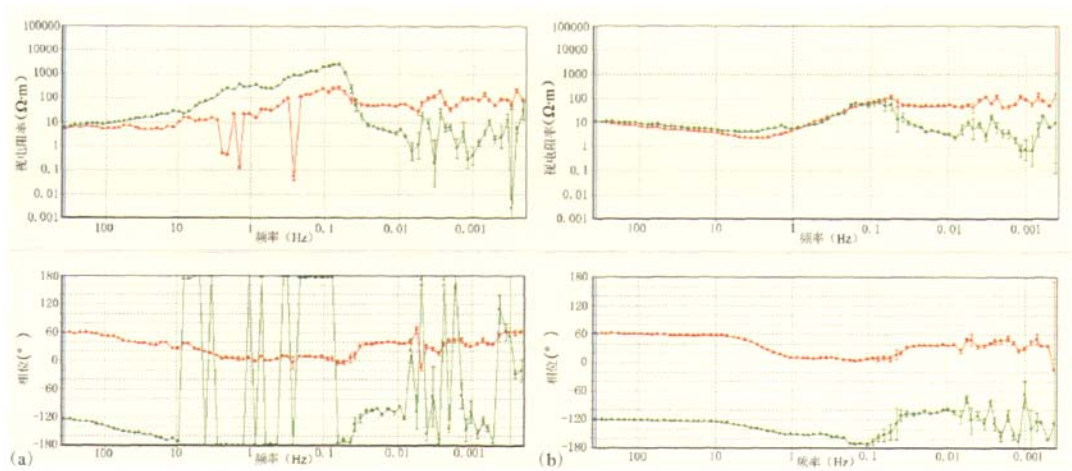


图 6 70 号测点的原始视电阻率和相位曲线(a)与功率谱挑选及远参考处理后的视电阻率与相位曲线(b)

Fig. 6 Apparent resistivity and phase curves of site 70 (a) and apparent resistivity and phase curves by power spectral selected and romate reference process (b)

红色曲线：TE 模式；绿色曲线：TM 模式
Red curve: TE mode; green curve: TM mode

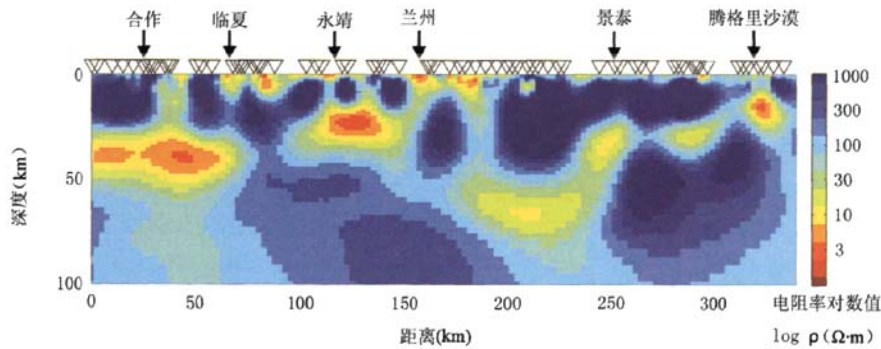


图 7 西秦岭合作至大井大地电磁剖面二维反演电阻率模型

Fig. 7 Resistivity model of 2D inversion of magnetotelluric sounding profile from Hezuo to Dajing in western Qinling

形、地貌地区采集高质量的大地电磁数据。通过室内数据处理研究，总结出了处理受到干扰的大地电磁数据的方法技术，并取得了较好效果。试验剖面所取得的研究成果，将为完成项目的研究任务与科学目标提供宝贵的经验。

4 结束语

中国大陆壳幔结构复杂，地质构造单元类型多。对地球深部结构进行精细探测，获得壳幔尺度的地球物理场数据，将为解决地球科学领域许多重大科学命题提供科学依据，同时为寻找深部大型矿床提供基础数据。地壳与上地幔电性结构探测是研究壳

幔结构的重要组成部分与主要研究手段。进行中国大陆大地电磁深探测试验研究，将进一步提高我国大地电磁探测技术的水平以及应用效果，形成适用于不同地质条件地区的大地电磁数据采集、处理与反演成像技术，为今后在类似区域开展大地电磁探测工作提供成功范例。通过试验研究，建立大地电磁数据与地震数据约束反演的的方法技术，为提高大地电磁应用水平和深部地球物理探测技术的集成与组合奠定基础。

通过对实验区域的大地电磁探测研究，建立针对不同地区有效、可行的大地电磁探测方案，为地壳探测和对地观测提供技术准备，推动大地电磁探测

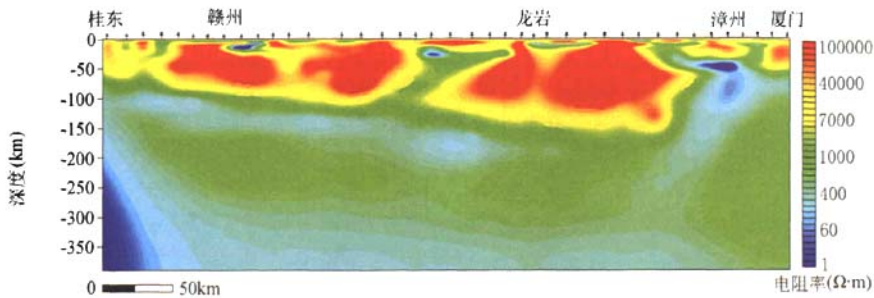


图 8 湖南桂东至福建厦门大地电磁剖面二维反演电阻率模型

Fig. 8 Resistivity model of 2D inversion of magnetotelluric sounding profile from Guidong, Hunan to Xiameng, Fujian

的技术进步。研究大地电磁与地震方法的联合探测以及约束反演,将为集成深部地球物理探测技术提供依据、奠定基础,提高深部地球物理探测水平与应用效果。所获得的实验区壳幔电性结构模型,将为基础研究、资源开发、灾害环境背景与预测等提供新的深部地球物理依据。

参 考 文 献

- 陈乐寿,王光得. 1990. 大地电磁测深法. 北京:地质出版社.
- 董树文,李廷栋. 2009. Sinoprobe——中国深部探测实验. 地质学报, 83(7): 895~909.
- 郭新峰,张元丑,程庆云,等. 1990. 青藏高原亚东—格尔木地学断面岩石圈电性研究. 中国地质科学院院报, 21: 191~202.
- 黄怀曾,吴功建,朱英,等. 1994. 岩石圈动力学研究. 北京:地质出版社, 3~5.
- 金胜,叶高峰,魏文博,邓明,景建恩. 2007. 青藏高原西缘壳幔电性结构与断裂构造: 札达—泉水湖剖面大地电磁探测提供的依据. 地球科学, 32(4): 474~480.
- 孔祥儒,王谦身,熊绍柏. 1996. 青藏高原西部综合地球物理与岩石圈结构研究. 中国科学(D辑), 26(4): 308~315.
- 孙洁,晋文光,白登海,等. 2003. 青藏高原东缘地壳、上地幔电性结构探测及其构造意义. 中国科学(D辑), 33: 173~181.
- 谭捍东,魏文博,Unsworth M,等. 2004. 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, 47(4): 685~691.
- 魏文博,陈乐寿,谭捍东,等. 1997. 西藏高原大地电磁深探测——亚东—巴木措沿线地区壳幔电性结构. 现代地质, 11(3): 366~374.
- 魏文博,金胜,叶高峰,等. 2006. 青藏高原中、北部断裂构造特征: INDEPTH(Ⅲ)——MT观测提供的依据. 地球科学 中国地质大学学报, 31(2): 257~265.
- 叶高峰,金胜,魏文博,等. 2007. 西藏高原中南部地壳与上地幔导电性结构. 地球科学, 32(4): 491~499.
- 朱仁学,胡祥云. 1995. 格尔木—额济纳旗地学断面岩石圈电性结构研究. 地球物理学报, 38(增刊 II): 46~57.
- DeGroot H C, Constable S C. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. Geophysics, 55: 1613~1624.
- Egbert G, Booker J R. 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. Geophys. J. R. Astr. Soc., 87: 173~194.
- Frost B R, Fyfe W S, Tazaki K, Chan T. 1989. Grain-boundary graphite in rocks and implications for high electrical conductivity in the lower crust. Nature, 340: 134~136.
- Gary W M, Jones A G. 2001. Multisite multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data. Geophysics, 66(1): 158~173.
- Groom R W, Bailey R C. 1995. Analytic investigations of the effects of near-surface three-dimension galvanic scatterers on MT tensor decompositions. Geophysics, 56(4): 496~518.
- Jones A G, Ferguson I J. 2001. The electric Moho. Nature, 409: 331~333.
- Marquis G, Hyndman R D. 1992. Geophysical support for aqueous fluids in the deep crust: seismic and electrical relationships. Geophysical Journal International, 110: 91.
- Nover G, Heikamp S, Meurer H J, Freund D. 1998. In-situ electrocal conductivity and permeability of mid-crustal rocks from the KTB drilling: consequences for high conductive layers in the Earth crust. Surv. Geophys., 19: 73~85.
- Wei W, Unsworth M, Jones A, et al. 2001. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies. Science, 292: 716~718.
- Yardley B, Valley J. 1997. The petrologic case for a dry lower crust. J. Geophys. Res., 102: 12173.

Magnetotelluric Method for Deep Detection of Chinese Continent

JIN Sheng^{1,2)}, ZHANG Letian^{1,2)}, WEI Wenbo^{1,2)}, YE Gaofeng^{1,2)}, LIU Guoxing³⁾,
DENG Ming^{1,2)}, JING Jian'en^{1,2)}

1) *Key Laboratory of Geo-detection of Ministry of Education, Beijing, 100083;*

2) *School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing, 100083;*

3) *Jilin University, Changchun, 130026*

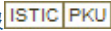
Abstract

By the observation of geophysical field parameters such as seismic velocity, density, magnetism, and electrical conductivity, we have obtained the physical properties and structure features of the earth's crust and upper mantle. Thus scientific evidence further facilitates the understanding of the earth's interior status, the process and mechanism of the movement of crust, and other scientific subjects. Furthermore, such useful information can also lead to the exploration of large-scale mineral deposits. As a primary geophysical method for the detection of the electrical structure of the earth's crust and mantle, magnetotelluric exploration has been widely adopted both in China and foreign countries, and numerous significant research results have been acquired. The seismic and magnetotelluric methods are recognized as two of the dominant methods on the study of the structure of the earth's crust and mantle. They have been proved to be very effective in solving worldwide continent dynamic problems by numerous application cases. However, because the natural electromagnetic field tend to be affected by noises, it is difficult for the MT method to acquire ideal data with high signal-to-noise ratio in the mineral-enriched areas with strong noises. At the same time, the technique of constraining inversion and joint interpretation for seismic and MT data is still not ready for utilization. All the reasons mentioned above limit the accuracy of the process and interpretation of MT data. The project of "experiment and integration of deep detection technology" belongs to the "SinoProbe" project. It takes different areas with both complicated geological conditions and different situation of man-made noises, like the Tibet plateau, the western orogen, and the mountain areas with crystallized rocks in the south china, as target area to study the integration of geophysical techniques for detailed deep detection by utilizing the seismic and MT methods. The electrical structures of these areas are given from the results of the experimental profiles. The subject, which is named "the MT observation experiments and the study of electrical structure of the earth's crust and mantle", will focus on the study of suitable MT acquisition and computation techniques for different noise environment and geological conditions. The constraining inversion and joint interpretation of seismic and MT data will also be discussed. This study aims to enhance the accuracy of deep geophysical detections, and provide examples for the integration of deep geophysical detection techniques and regional geophysical detection with high accuracy. The MT observation experiments located in the northeast edge of Tibet Plateau, the west Qinling Orogen, and the mountain areas with crystallized rocks in Fujian province has accomplished. The result shows that, in these areas with typical geological structures, though difficulties exist during the acquisition, and the noise is very strong in some areas, it is still possible to acquire the MT data with high quality and consequently get a reliable model of the underground electrical resistivity by choosing proper technique for field observation and taking discreet computation. The results from this experimental project will become important technical support and insurance for the realization of the scientific objectives of the "experiment and integration of deep detection technology" project.

Key words: electrical structure of the Earth's crust and mantle; magnetotelluric; data acquisition and processing; observation experiment

作者: [金胜](#), [张乐天](#), [魏文博](#), [叶高峰](#), [刘国兴](#), [邓明](#), [景建恩](#), [JIN Sheng](#), [ZHANG Letian](#), [WEI Wenbo](#), [YE Gaofeng](#), [LIU Guoxing](#), [DENG Ming](#), [JING Jian'en](#)

作者单位: [金胜](#), [张乐天](#), [魏文博](#), [叶高峰](#), [邓明](#), [景建恩](#), [JIN Sheng](#), [ZHANG Letian](#), [WEI Wenbo](#), [YE Gaofeng](#), [DENG Ming](#), [JING Jian'en](#)([地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室](#), [北京](#), [100083](#); [中国地质大学\(北京\)地球物理与信息技术学院](#), [北京](#), [100083](#)), [刘国兴](#), [LIU Guoxing](#)([吉林大学](#), [长春](#), [130026](#))

刊名: [地质学报](#) 

英文刊名: [ACTA GEOLOGICA SINICA](#)

年, 卷(期): 2010, 84(6)

被引用次数: 0次

参考文献(22条)

1. [谭捍东](#); [魏文博](#); [Unsworth M](#) [西藏高原南部雅鲁藏布江缝合带地区地壳电性结构研究](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2004(04)
2. [董树文](#); [李廷栋](#) [Sinoprobe—中国深部探测实验](#)[期刊论文]-[地质学报](#) 2009(07)
3. [Yardley B](#); [Valley J](#) [The petrologic case for a dry lower crust](#) 1997
4. [Wei W](#); [Unsworth M](#); [Jones A](#) [Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies](#) 2001
5. [Nover G](#); [Heikamp S](#); [Meurer H J](#); [Freund D](#) [In-situ electrocal conductivity and permeability of mid-crustal rocks from the KTB drilling: consequences for high conductive layers in the Earth crust](#) 1998
6. [孙洁](#); [晋文光](#); [白登海](#) [青藏高原东缘地壳、上地幔电性结构探测及其构造意义](#)[期刊论文]-[中国科学d辑](#) 2003(z1)
7. [孔祥儒](#); [王谦身](#); [熊绍柏](#) [西藏高原西部综合地球物理与岩石圈结构研究](#) 1996(04)
8. [金胜](#); [叶高峰](#); [魏文博](#); [邓明](#) [景建恩](#) [青藏高原西缘壳幔电性结构与断裂构造: 札达-泉水湖剖面大地电磁探测提供的依据](#)[期刊论文]-[地球科学-中国地质大学学报](#) 2007(04)
9. [黄怀曾](#); [吴功建](#); [朱英](#) [岩石圈动力学研究](#) 1994
10. [郭新峰](#); [张元丑](#); [程庆云](#) [青藏高原亚东-格尔木地学断面岩石圈电性研究](#) 1990
11. [Egbert G](#); [Booker J R](#) [Robust estimation of geomagnetic transfer functions](#) 1986
12. [DeGroot H C](#); [Constable S C](#) [Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data](#) 1990
13. [朱仁学](#); [胡祥云](#) [格尔木-额济纳旗地学断面岩石圈电性结构研究](#) 1995(增刊II)
14. [叶高峰](#); [金胜](#); [魏文博](#) [西藏高原中南部地壳与上地幔导电性结构](#)[期刊论文]-[地球科学-中国地质大学学报](#) 2007(04)
15. [魏文博](#); [陈乐寿](#); [谭捍东](#) [西藏高原大地电磁深探测—亚东-巴木措沿线地区壳幔电性结构](#) 1997(03)
16. [魏文博](#); [金胜](#); [叶高峰](#) [青藏高原中、北部断裂构造特征: INDEPTH\(III\)—MT观测提供的依据](#)[期刊论文]-[地球科学-中国地质大学学报](#) 2006(02)
17. [陈乐寿](#); [王光镠](#) [大地电磁测深法](#) 1990
18. [Marquis G](#); [Hyndman R D](#) [Geophysical support for aqueous fluids in the deep crust: seismic and electrical relationships](#) 1992
19. [Jones A G](#); [Ferguson I J](#) [The electric Moho](#) 2001(6818)
20. [Groom R W](#); [Bailey R C](#) [Analytic investigations of the effects of near-surface three-dimension](#)

21. [Gary W M; Jones A G](#) Mutisite mutifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data 2001(01)

22. [Frost B R; Fyfe W S; Tazaki K; Chan T](#) Grain-boundary graphite in rocks and implications for high electrical conductivity in the lower crust 1989

相似文献(4条)

1. 期刊论文 [金胜. 叶高峰. 魏文博. 邓明. 景建恩. JIN Sheng. YE Gao-feng. WEI Wen-bo. DENG Ming. JING Jian-en](#) 青藏高原西缘壳幔电性结构与断裂构造: 札达-泉水湖剖面大地电磁探测提供的依据 -地球科学-中国地质大学学报 2007, 32(4)

青藏高原西缘札达至泉水湖剖面大地电磁探测结果表明, 研究区被雅江缝合带、班公-怒江缝合带划分为3个构造区域, 由南至北分别为喜马拉雅地体、冈底斯地体和羌塘地体. 研究区内普遍存在中下地壳高导层, 高导层的顶面埋深起伏较大, 冈底斯内的高导层埋深大, 羌塘和喜马拉雅地体内的高导层埋深较浅. 在班公-怒江缝合带南侧高导层埋深最大, 班公-怒江缝合带南北两侧高导层埋深存在一个约20 km的错动. 冈底斯地体内的地壳高导层呈北倾形态, 南羌塘的地壳具有双高导层. 沿剖面的上地壳存在多组规模不等、产状不同的电性梯度带或畸变带, 反映了沿剖面地区的缝合带与断裂带分布情况. 根据电性结构特征, 推断了雅江缝合带、班公-怒江缝合带以及龙木措、噶尔藏布等主要断裂的构造特征与空间分布.

2. 期刊论文 [魏文博. 金胜. 叶高峰. 邓明. 谭捍东. Martyn Unsworth. Alan G. Jones. John Booker. Shenghui Li. WEI Wen-Bo. JIN Sheng. YE Gao-Feng. DENG Ming. TAN Han-Dong. Martyn Unsworth. Alan G. Jones. John Booker.](#)

[Shenghui Li](#) 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)

为了研究西藏中、北部壳、幔导电性结构, 讨论高原中、北部岩石圈热状态, 1998年和1999年(INDEPTH(III)-MT)在西藏中、北部完成了德庆-龙尾错(500线)和那曲-格尔木(600线)超宽频带大地电磁测深剖面研究. 研究结果表明, 西藏中、北部以昆仑山断裂为界, 其南北壳、幔电性结构有很大差异. 昆仑山断裂以北地壳和上地幔为高阻区. 而昆仑山以南, 地壳和上地幔的导电性有明显的分层结构: 地壳上部以不连续的高阻体为主, 夹有局部低阻异常体, 沿南北方向上地壳的电性结构复杂, 具有不连续、分块的特点; 但中、下地壳为大范围的高导异常区, 区内发育有大规模、不连续、产状各异的高导体, 其电阻率均小于 $4\ \Omega\cdot\text{m}$; 在班公-怒江和金沙江缝合带之下, 壳内高导体都具有向上地幔延伸的趋势, 存在连通壳、幔的低阻通道. 根据青藏高原中、北部壳、幔电性结构的研究推断: 如同藏南一样, 这里也普遍存在部分熔融体和热流体, 它们的成因主要与班公-怒江和金沙江缝合带的壳-幔热交换、热活动有关, 这是两期形成的壳-幔热交换通道. 其中, 班公-怒江缝合带的壳-幔热交换通道形成时间比金沙江缝合带早. 因此, 研究区壳、幔的热活动是从南边和西边开始, 向北、向东扩展, 导致现今西藏中、北部地壳和上地幔的热流分布由西向东、由南向北增大.

3. 期刊论文 [魏文博. 叶高峰. 金胜. 邓明. 景建恩. 彭志强. 林听. 宋石磊. 唐宝山. 屈栓柱. 陈凯. 杨宏伟. 李国强. Wei Wenbo. Ye Gaofeng. Jin Sheng. Deng Ming. Jing Jian'en. Peng Zhiqiang. Lin Xin. Song Shilei. Tang Baoshan. Qu Shuanzhu. Chen Kai. Yang Hongwei. Li Guoqiang](#) 华北地区东部岩石圈导电性结构研究——减薄的华北岩石圈特点 -地质前缘2008, 15(4)

华北古大陆克拉通解体、岩石圈减薄的深部过程, 对于建立中国大陆中生代演化动力学模型是亟待深入研究的重要科学问题, 因而“华北克拉通破坏”也就成了当前学术界的热门话题. 为了研究“华北克拉通破坏”首先需要给出较准确的华北岩石圈结构, 这必须依靠包括超宽频带高精度大地电磁测深在内的现代深部地球物理探测技术. 2001和2005年在华北地区东部布置了应县-商河(HB-MT01)、文水-日照(HB-MT02)大地电磁测深剖面进行研究. 研究结果表明, 在华北地区东部沿地壳-上地幔探测剖面可划分为4个电性区, 区内发现存在下地壳高导带和上地幔高导层存在. 文中依据研究区壳-幔电性结构特征, 推断华北地区东部地壳和上地幔之间发生过大规模构造运动, 导致壳-幔之间存在解耦现象. 研究结果还发现, 华北东部确实存在岩石圈减薄区, 其岩石圈厚度约50~80 km厚. 岩石圈明显减薄的区域包括北太行山隆起、华北裂谷带北部和鲁西断隆, 其范围比原先认识到的要复杂, 并非以太行山重力梯度带为界划分东、西两区, 简单地认为东区即是减薄区. 此外, 在华北地区东部的现代高精度大地电磁探测结果也进一步证明了地球物理观测对于大陆动力学研究的重要性, 这使人们更加认识到在今后的研究中必须强调地球物理-地质-地球化学之间的有机结合.

4. 学位论文 [金永吉](#) 大地电磁精细反演及其在壳幔电性结构研究中的应用 2010

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_dizhixb201006005.aspx

授权使用: 青岛海洋地质研究所(wfhyqdh), 授权号: d8d73b03-9e01-4710-8e95-9ed200d6472f

下载时间: 2011年4月27日