

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

金 胜^{1,2}, 叶高峰^{1,2}, 魏文博^{1,2}, 邓 明^{1,2}, 景建恩^{1,2}

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室和地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083

2. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083

摘要: 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。

关键词: 青藏高原西缘; 大地电磁探测; 地壳高导层; 电性结构; 断裂构造特征。

中图分类号: P631.3

文章编号: 1000-2383(2007)04-0474-07

收稿日期: 2007-04-12

The Electrical Structure and Fault Feature of Crust and Mantle of Western Tibet Plateau: Based on Results of Magnetotelluric Survey along Profile Zhada-Quanshuihu

JIN Sheng^{1,2}, YE Gao-feng^{1,2}, WEI Wen-bo^{1,2}, DENG Ming^{1,2}, JING Jian-en^{1,2}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources; Geo-detection Laboratory of the Ministry of Education, Beijing 100083, China

2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: The research of magnetotelluric (MT) on the profile along Zhada-Quanshuihu on the west of the Tibetan plateau shows that the area is divided into three structural parts by Yalung Tsangpo suture and Bangong-Nujiang suture. From south to north they are Himalaya terrane, Gandese terrane and Qiangtang terrane. The area is widely distributed with high conductive layers, with fluctuating tops. The high conductive layer of Gandese terrane is deeper while that of Qiangtang terrane and Himalaya terrane is shallower. And the deepest high conductive layer is along the south of Bangong-Nujiang suture. The top surface of high conductive layer in the south Bangong-Nujiang suture is at the depth of about 20 km, which is lower than that in north of Bangong-Nujiang suture. The high conductive layer inside Gandese terrane extends northward and in the southern Qiangtang there exist double high conductive layers. In the upper crust along the profile there are groups of lateral electrical gradient zones or distortion zones of different scale and attitude, indicating the distribution of faults and sutures along the profile. According to the character of electrical structure, the structural characteristic and spatial distribution of Yalung Tsangpo suture, Bangong-Nujiang suture and the major faults of Longmucuo and Ger-Zangbo were inferred.

Key words: west of the Tibetan plateau; magnetotelluric (MT); high conductive layers of crust; electrical structure; structural characteristic of fault.

青藏高原是世界上海拔最高、面积最大、造山历史最年轻的陆陆碰撞造山带, 一直是地球科学研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 4040406); 北京市重点学科“地球探测与信息技术(XK104910598)”资助。

作者简介: 金胜(1970—), 男, 副教授, 主要从事地球物理电法勘探的教学与研究工作。E-mail: jinsheng@cugb.edu.cn

的热点地区. 为探索青藏高原深部地壳与地幔的结构特征以及高原的形成、演化历史, 中外科学家在青藏高原开展了大量的地球物理探测工作. 其中地震勘探与大地电磁探测是研究高原深部结构特征的主要地球物理方法.

1992 年开始的中美国际合作项目“国际喜马拉雅和青藏高原深剖面探测及综合研究”计划(简称 INDEPTH)(Zhao and Nelson, 1993)采用近垂直深反射地震方法与大地电磁方法探测青藏高原的壳幔结构特征, 取得了一系列令国际地学界瞩目的研究成果. INDEPTH 计划中的大地电磁探测研究从 1995 年开始, 经过十多年的研究, 共获得 12 条大地电磁探测剖面的数据与壳幔电阻率分布模型, 进一步证实高原具有十分特殊的壳幔电性结构, 引起了广泛关注(Leshou *et al.*, 1996; 魏文博和董浩斌, 1997; 魏文博等, 2006; Wei *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2003; Unsworth *et al.*, 2005). 但 INDEPTH 计划布置的大地电磁探测剖面都集中在青藏高原的中部及东部, 贯穿高原南北, 西部的大地电磁探测工作开展得很少. 而西部又是从整体上认识青藏高原壳幔电性结构以及高原形成、演化不可缺少的地区.

为研究高原西部壳幔电性结构特征, 并与高原中、东部的壳幔电性结构进行对比, 从整体上进一步研究高原壳幔的电性结构特征, 在国家自然科学基金委员会的资助下, 中国地质大学(北京)于 2006 年开展了高原西部札达至泉水湖剖面的大地电磁探测工作, 以研究青藏高原西部的壳幔电性结构以及各缝合带、断裂带的构造特征.

1 野外数据采集

1.1 测线布置

如图 1 所示, 测线(0 号线)从高原西南部的札达县达巴乡开始, 向北经过狮泉河、日土, 止于新疆境内的泉水湖, 剖面长度近 400 km, 共布置了 50 个观测点, 其中宽频大地电磁点 38 个, 长周期大地电磁点 12 个. 由于地形以及交通的限制, 测点不可能按等距离布置, 观测点距大多在 6~7 km, 个别点距稍大, 但均小于 10 km. 全部测点采用 GPS 卫星定位, 记录其地理坐标, 点位误差小于 100 m.

1.2 仪器设备

野外数据采集采用美国 EMI 公司的 MT-24 局域网络型大地电磁系统与加拿大 Phoenix 公司的

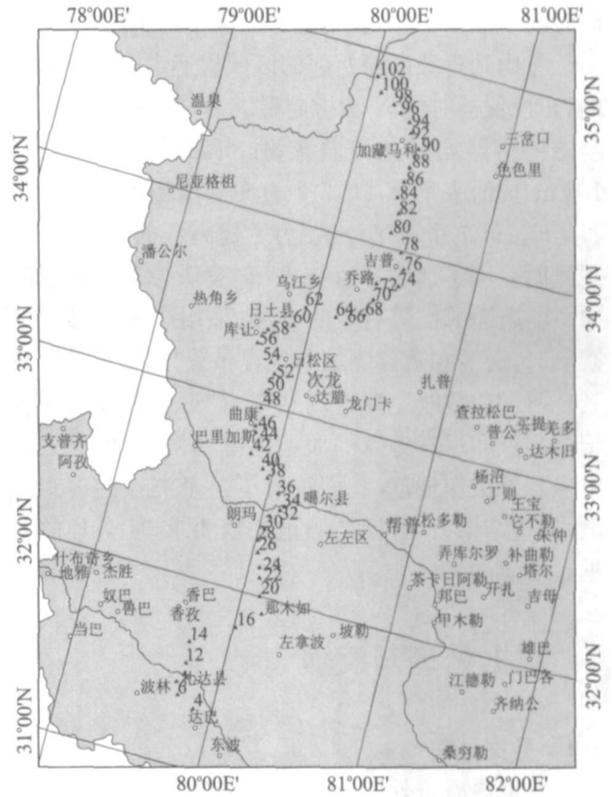


图 1 测线位置

Fig. 1 Sketch map of MT profile(0 Line)

MTU-5 大地电磁系统配合使用. MT-24 大地电磁系统的采集频率范围为 $3.2 \times 10^2 \sim 4.6 \times 10^{-4}$ Hz, MTU-5 大地电磁系统采集频率范围为 1000~0.000 1 Hz. 在数据采集中共使用 2 套 MT-24 大地电磁系统和 2 套 MTU-5 大地电磁系统, 为了保证 4 套仪器所采集的数据一致, 在数据采集前进行了仪器的一致性对比. 对比时将 4 套仪器系统布置在同一个测点上, 所有采集参数与仪器布设方法均一致, 采集时间都为 18 h. 通过对比 4 套仪器采集的数据处理获得的视电阻率与相位曲线可以看出, 野外数据采集使用的 4 套仪器具有很好的一致性.

1.3 数据采集

由于 MTU-5 大地电磁系统能获得比 MT-24 大地电磁系统更低频率的大地电磁场信号, 根据大地电磁趋肤深度原理, MTU-5 大地电磁系统比 MT-24 大地电磁系统能获得更深的电性结构信息. 为了能获得准确的深部地电信息, 野外数据采集时每 3 个宽频大地电磁测点中间布置一个长周期测点. 野外观测时宽频测点使用 MT-24 大地电磁系统, 观测时间不少于 18 h, 获得的最低频率约 2000 S; 长周期测点使用 MTU-5 大地电磁系统, 观

测时间不少于 70 h, 获得的最低频率约 7 000 S.

考虑到青藏高原西部的区域构造走向为近东西向, 布设仪器时使 X 轴指向磁北, Y 轴指向东, 电极与磁传感器均按此方向布设. 布站时电极距均为 100 m, 同时采集 E_x 、 E_y 2 个方向的电场水平分量与 H_x 、 H_y 、 H_z 3 个磁场分量. 为了提高数据质量, 野外观测时采用了远参考道技术, 它被认为是当前压制 MT 场局部干扰最有效的方法. 采用磁场远参考道观测时, 必需在远离测站的位置布置“远参考站”, 或者也可利用测线上邻近测站作为“远参考站”, 同步记录测点和远参考点的大地电磁场信号. 根据大地电磁野外工作规范, 我们进行了 4 个测点的检查观测. 检查结果表明, 误差满足规范要求, 所采集的数据是可靠的.

2 数据处理与反演

2.1 数据处理

大地电磁野外记录的是电磁场各个分量的时间序列, 室内需要对时间序列进行一系列的处理、计算才能得到各个测点的视电阻率和相位等大地电磁响应参数, 并用于反演计算. 在对所获得的高原西部大地电磁测深数据进行处理时, 系统运用时间序列的 Robust 处理 (Egbert and Booker, 1986)、Rhoplus 分析、复阻抗张量分解 (Groom and Bally, 1994; Gary and Alan, 2001) 等 MT 数据处理技术, 以保证得到较精确的 MT 响应. 在进行数据处理时采用了远参考道数据处理方法, 假设远参考点的磁场噪声与测点的磁场噪声不相关, 而磁场信号彼此相关; 因此, 通过相关分析即可消除磁场噪声给计算磁场自功率谱带来的畸变.

采用阻抗张量分解算法对获得的 MT 数据进行电性主轴分析, 判断青藏高原西部的区域构造走向. 根据地下电性主轴分析结果, 结合已有的高原西部区域构造地质情况, 可以判断高原西部主构造走向大约为南东 110° . 图 2 所示即为电性主轴分析的结果.

在确定区域构造走向后, 把坐标系旋转到电性主轴方位上, 并定义构造走向为 X 轴, 进行 MT 数据换算. 此时, 可计算出两个模式的视电阻率和阻抗相位的频率响应. 其中, XY 模式即为 E 极化 (TE) 模式, YX 为 H 极化 (TM) 模式.

2.2 反演计算

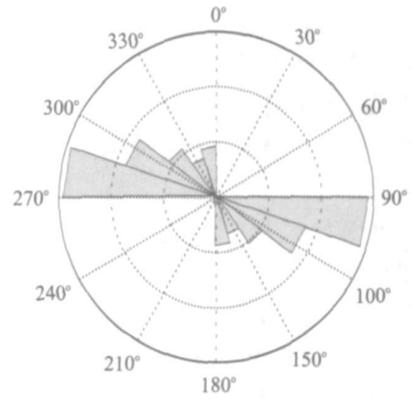


图 2 札达—泉水湖剖面地下介质电性主轴分析结果
Fig2. Geoelectric strike directions of MT profile from Zhada to Quanshuihu

征, 青藏高原西部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. 笔者采用二维非线性共轭梯度反演算法 (NLGG) 对获得的大地电磁响应参数进行了反演计算. 在试验了不同反演参数、不同极化模式反演以及联合反演的基础上, 对获取的剖面的导电性结构模型进行对比、分析, 确定了该剖面的电阻率分布模型. 图 3 即为 TETM 联合反演的结果. 图 4 为剖面二维模型的理论计算响应与实测数据的拟合结果, 可以看出两者基本一致, 表明所获得的电性结构模型能够比较真实地反映地壳介质电性结构.

3 青藏高原西缘电性结构特征

如前所述, 图 3 所示即为札达—泉水湖剖面的壳、幔电性结构模型. 图中横坐标轴表示剖面线, 纵坐标轴表示反演深度, 断面图上的等值线为电阻率等值线, 单位为 $\Omega \cdot m$, 所填充的红色表示低电阻率, 蓝色表示高电阻率.

在对电性结构模型进行深入分析、研究的基础上, 得到了对沿剖面电性结构的以下认识: (1) 沿剖面范围内, 地下存在两个起伏较大的电性分界面: 第 1 个电性分界面在 10~50 km 深度范围内, 第 2 个电性分界面在 50~100 km 深度范围内. 这 2 个电性分界面均表现为南北埋深浅, 中部埋深大的下凹形状, 且北部的电性分界面埋深大于南部. (2) 第 1 个分界面的上部即上地壳表现为高阻特征, 电阻率值大于 $100 \Omega \cdot m$, 最高到 $10\,000 \Omega \cdot m$. 高阻体沿剖

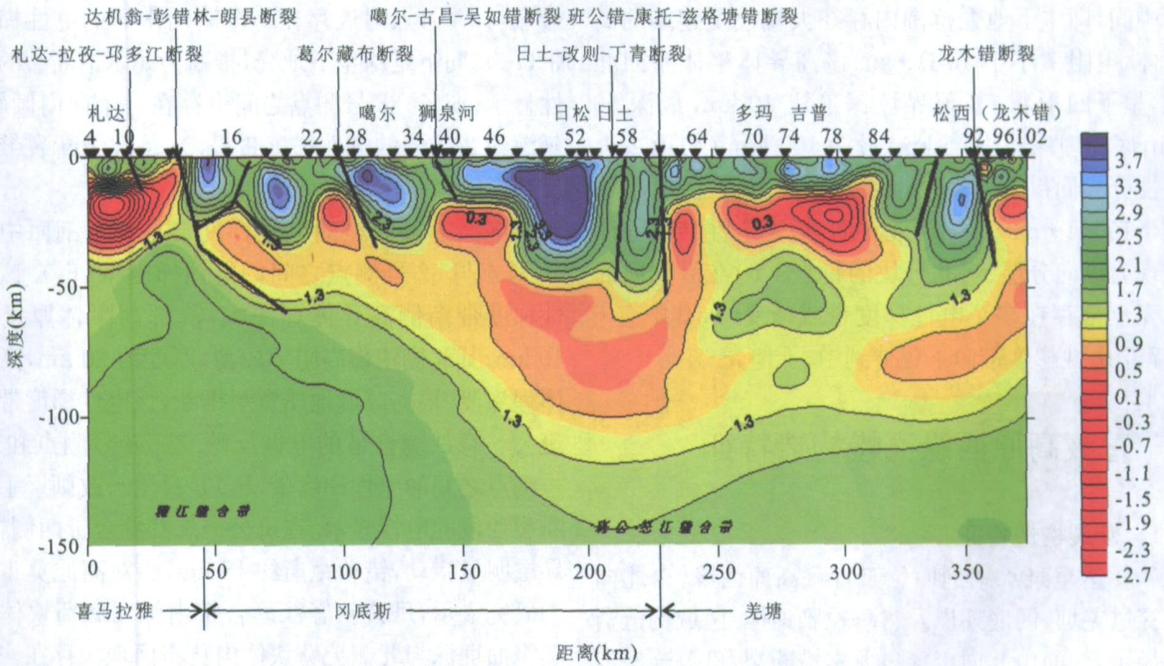


图 3 札达—泉水湖剖面壳幔二维导电性结构模型

Fig. 3 Resistivity model of MT profile from Zhada to Quanshuihu from 2D inversion

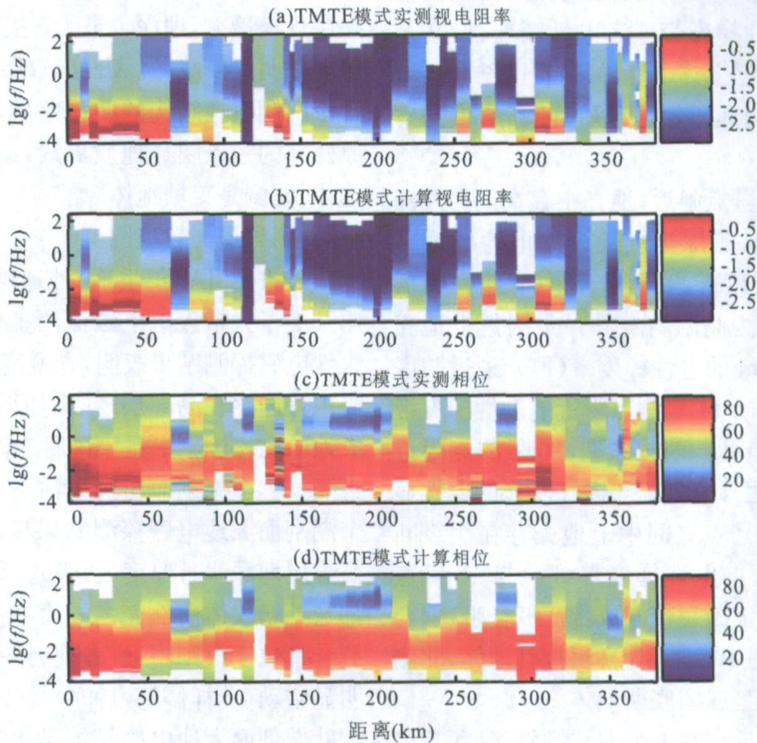


图 4 札达—泉水湖剖面 TMTE 模式二维非线性共轭梯度反演拟合结果

Fig. 4 Fitting results of Zhada-Quanshuihu profile from NLCG 2D inversion

面不连续分布, 规模相差大, 剖面中、南部高阻体规模大, 埋深大, 北部高阻体的规模与埋深都小. 冈底斯上地壳的高阻层最厚, 可能因为介于雅江缝合带

与班公—怒江缝合带之间为冈底斯火山岩浆弧及其弧后盆地, 是相对稳定的高阻块体. 北侧羌塘的上地壳高阻层厚度较冈底斯明显减薄. (3) 两个电性分界

面中间,即中下地壳范围内存在大规模不连续的高导体,电阻率小于 $10 \Omega \cdot \text{m}$. 该高导体整体略向北倾,呈下凹形状,其顶界埋深最浅 10 km,最深 50 km,底界埋深最浅 45 km,最深 100 km. (4) 第 2 个电性分界面以下电性结构表现为高阻特征,电阻率大于 $100 \Omega \cdot \text{m}$. (5) 沿南北方向,地壳电性结构整体表现为纵向分层、南北分块的特点. (6) 在沿剖面的地壳上部存在多个电性梯度带或畸变带,其中有 6~7 个电性梯度带向下延伸到中、下地壳.

4 青藏高原西缘壳幔构造特征

4.1 断裂构造特征

札达至泉水湖剖面位于青藏高原西缘,自北向南穿过羌塘、冈底斯以及喜马拉雅地体. 区域构造资料显示,剖面由北向南穿过龙木措断裂、班公—怒江缝合带、雅江缝合带等大型断裂构造带(图 1). 因此,沿剖面的导电性结构必然与区域构造格局密切相关. 一般说来,断裂带、缝合带在电性结构上往往表现为明显的导电性梯度带或者电性畸变带,甚至伴随高导异常体. 根据上述电性异常特征,结合区域地质以及其他地球物理资料,可以推断断裂带的空间分布规律.

在剖面南端 14 号点附近,地壳中存在一个浅部略向南倾、深部北倾、延深至上地幔的电性梯度带(F_1),以这个电性梯度带为界,南侧中下地壳为低阻,而北侧中下地壳为高阻. 在 10 号点附近上地壳存在一个延深约 5 km 的电性梯度带(F_2). 通过与区域构造资料对比,推断 14 号测点附近的电性梯度带(F_1)是达机翁—彭措林—朗县断裂,10 号测点附近的电性梯度带是札达—拉孜—邛多江断裂的电性显示. 在 16 号点至 18 号点之间中上地壳存在次级断裂带. 14 号测点附近的电性梯度带(F_1)与 16 号点至 18 号点之间的次级断裂带构成雅江缝合带,缝合带南侧中上地壳电阻率较低,为喜马拉雅地体,北侧中上地壳为相对高阻,属冈底斯地体.

在 26 号测点附近存在一个向北倾斜、延深超过 30 km 的电性梯度带(F_3),其北侧上盘为高阻地层,南侧下盘为低阻地层,电性梯度带向下延深至下地壳高导层. 从地理位置推断,该电性梯度带与噶尔藏布断裂吻合. 在 38 号测点附近存在一个略向北倾斜、向下延深至高导层的电性梯度带(F_4),推断是噶尔—古昌—吴如措断裂的电性显示. 剖面北端 92

号点与 94 号点附近存在一个略向南倾的电性梯度带(F_5),向下延深至下地壳,推断为龙木措断裂的电性显示;86 至 88 号测点之间也存在一个向南倾斜、延深约 20 km 的电性梯度带(F_6),是次级断裂带的反映.

剖面上最明显的电性梯度带是位于剖面中间 60 号点与 62 号测点之间的电性梯度带(F_7). 该电性梯度带南侧高导体埋深大,浅部高阻体厚度约 40 km;其北侧浅部高阻体较薄,厚度约 20 km,高导体埋深浅. 根据区域地质资料推断,该电性梯度带是班公—怒江缝合带的电性反映. 在 58 号测点和 60 号测点之间的电性梯度带(F_8)是日土—改则—丁青断裂西段的电性显示. 在班公—怒江缝合带两侧,高导层明显错动,错动距离约 15 km;而对高原莫霍面的研究显示,班公—怒江缝合带南侧冈底斯块体内莫霍面埋深与北侧羌塘块体内莫霍面埋深存在一个落差约 10 km 的台阶(熊绍柏等, 1985;熊绍柏和刘宏兵, 1997),这与本次探测的高导层顶面埋深存在错动是相一致的. 在班公—怒江缝合带及其南侧高导层规模最大,埋深也最大,达 150 km;其北侧高导层埋深明显变浅,且表现出双层特征. 班公—怒江缝合带两侧电性结构的明显差异,说明该缝合带是高原西部的一条明显地质界线,缝合带南侧是冈底斯地体,北侧是羌塘地体.

4.2 高导层与软流圈

过去的几十年里,中外地球物理学家在青藏高原开展了大量大地电磁探测工作,以往的青藏高原大地电磁探测结果表明,青藏高原电性结构复杂,地壳内普遍存在高导层. 在高原西部已经完成的两条大地电磁探测剖面是中国科学院地球物理所完成的吉隆—三个湖剖面与狮泉河—叶城剖面. 吉隆—三个湖剖面大地电磁探测结果显示,雅江缝合带南侧高导层埋深浅且厚度大,呈北倾特征;冈底斯块体南部与羌塘块体南部壳内发育双高导层;班公—怒江缝合带位于改则附近,表现为一低阻带,两侧高导体明显错动(孔祥儒等, 1996;马晓冰等, 1997). 狮泉河—叶城剖面大地电磁探测结果显示,测区内既有双高导层也有单高导层,且高导层的埋深变化大;在班公—怒江缝合带两侧壳内存在双高导层,壳内第一高导层的埋深约 10~35 km,第二高导层的埋深约 30~65 km,羌塘北部壳内有单一高导层,埋深约 35~40 km(马晓冰和孔祥儒, 2001).

本次大地电磁探测结果显示,沿剖面中、下地壳

普遍存在不连续的高导层,其电阻率低于 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 。在雅江缝合带南侧的喜马拉雅地体内,高导层厚度大,埋深浅,顶面埋深约 $5 \sim 10 \text{ km}$,底面埋深约 50 km 。在雅江缝合带以北、班公怒江缝合带以南的冈底斯地体内,高导层顶、底面的埋藏深度向北逐渐加大,呈北倾形态;高导层的顶面埋深从南部的 $20 \sim 30 \text{ km}$ 向北加大到 50 km ,底面埋深从南侧的 $40 \sim 50 \text{ km}$ 向北加大到 $130 \sim 140 \text{ km}$ 。在班公—怒江缝合带南侧高导层的顶面埋深最大,北侧高导层顶面埋深小,高导层存在一个约 15 km 的错动。南羌塘地体内高导体分为两层,第一层埋深约 20 km ,第二层埋深约 65 km ;北羌塘有单一高导层,埋深约 50 km 。上述电性结构与中国科学院 20 世纪 90 年代完成的狮泉河至叶城大地电磁剖面探测结果以及吉隆至 3 个湖剖面大地电磁探测结果基本一致,但在冈底斯块体南侧未发现双高导层。

以往的研究表明,高原西部软流圈埋深在 $100 \sim 170 \text{ km}$ 之间,其中在班公—怒江缝合带南侧的狮泉河地体内软流圈达最深处(郭新峰等, 1990; 秦可卿等, 1994; 张胜业等, 1996)。本次大地电磁探测结果表明,高原西部冈底斯的软流圈呈北倾形态,南部埋深浅,北部埋深大,最深处在班公—怒江缝合带南侧附近,达 150 km 。羌塘地体软流圈起伏不大,底面埋深约 100 km 。冈底斯块体与羌塘块体软流圈厚度与埋深明显不同,高导层的顶面埋深存在约 15 km 的明显阶梯,反映出班公—怒江缝合带是一个巨大的地质界线。

5 结语

青藏高原西缘的大地电磁探测结果表明,高原西缘地壳内存在高导体,高导体的规模和埋深与区域大地构造格局以及断裂构造带密切相关。与高原东部及中部的地壳高导体比较发现,青藏高原地壳普遍存在的高导体在规模、埋深以及导电性等方面有相似之处,但存在明显局部差异。进一步对比、分析青藏高原东西部及中部的高导体,从整体上对高原的地壳导电性进行综合研究,深化对高原壳幔导电性结构的认识,从电性结构特征探讨青藏高原的地壳与上地幔结构特征,将有利于推进印度与亚洲岩石圈碰撞、俯冲模式的研究,为探讨高原演化与隆升机制提供新的电性结构依据。

References

- Egbert, G. D., Booker, J. R., 1986. Robust estimation of geomagnetic functions. *Geophys. Roy. Ast. Soc.*, 87: 175—194.
- Gary, W. M., Alan, G. J., 2001. Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data. *Geophysics*, 66(1): 158—173.
- Groom, R. W., Bally, R. C., 1994. Decomposition of magnetotelluric impedance tensor in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. *Geophys. J. Int.*, 117: 733—748.
- Guo, X. F., Zhang, Y. C., Cheng, Q. Y., et al., 1990. Magnetotelluric studies along Yadong-Golmud geosciences transect in Qinghai-Xizang plateau. *Chinese Academy of Geological Sciences*, 21: 191—202 (in Chinese).
- Kong, X. R., Wang, Q. S., Xiong, S. B., 1996. Comprehensive geophysics and the lithosphere structure of western Tibetan plateau. *Science in China (Series D)*, 26: 308—315 (in Chinese).
- Leshou, C., John, R. B., Jones, A. G., et al., 1996. Electrically conductive crust in southern Tibet from INDEPTH magnetotelluric surveying. *Science*, 274: 1694—1696.
- Li, S. H., Unsworth, M., Booker, J. R., et al., 2003. Partial melt or aqueous fluid in the mid-crust of southern Tibet? Constraints from INDEPTH magnetotelluric data. *Geophys.*, 253: 289—304.
- Ma, X. B., Kong, X. R., 2001. The thermal status of Qinghai-Tibet plateau and the differences between the western and the eastern plateau. *Process in Geophysics*, 16: 12—19 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X. B., Kong, X. R., Yu, S., 1997. Result of magnetotelluric survey in west Tibetan plateau. *Chinese Science Bulletin*, 42: 1185—1187 (in Chinese).
- Qin, K. Q., Chen, J. H., Liu, D. J., 1994. Electrical structure of the crust and upper mantle of Kunlun mountain and Kala-Kunlun mountain area. *Chinese Journal of Geophysics*, 37(2): 193—199 (in Chinese with English abstract).
- Unsworth, M. J., Jones, A. G., Wei, W. B., et al., 2005. Crustal rheology of the Himalaya and southern Tibet inferred from magnetotelluric data. *Nature*, 438: 78—81.
- Wei, W. B., Dong, H. B., 1997. MT sounding on Tibetan plateau—Electrical structure of crust and mantle along profile of Yadong-Bamucuo. *Geoscience* 11(3): 366—374 (in Chinese with English abstract).

- Wei W. B., Jin, S., Ye, G. F., et al., 2006. Features of the faults in center and north Tibetan plateau; Based on results of INDEPTH(III) — MT. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(2): 257—265 (in Chinese with English abstract).
- Wei W. B., Martyn, U., Jones, A., et al., 2001. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies. *Science* 292: 716—718.
- Xiong, S. B., Liu, H. B., 1997. The crustal structure in west Tibetan plateau. *Chinese Science Bulletin*, 42: 1309—1312 (in Chinese).
- Xiong, S. B., Teng, J. W., Yin, Z. X., 1985. The thickness of crust and fluctuating of Moho of Tibetan plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 28 (Suppl.): 16—27 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Y., Wei, S., Wang, J. Y., et al., 1996. Magnetotelluric studies of Qiangtang basin in Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21 (2): 198—202 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. J., Nelson, K. D., 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 366(6455): 557—559.
- 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. *中国科学院院报*, 21: 191—202.
- 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: 308—315.
- 马晓冰, 孔祥儒, 2001. 青藏高原岩石圈热状态及其东西部差异. *地球物理学进展*, 16: 12—19.
- 马晓冰, 孔祥儒, 于晟, 1997. 青藏高原西部大地电磁测深探测结果. *科学通报*, 42: 1185—1187.
- 秦可卿, 陈九辉, 刘大建, 1994. 昆仑山脉和喀喇昆仑山脉地区的地壳上地幔电性结构特征. *地球物理学报*, 37(2): 193—199.
- 魏文博, 董浩斌, 1997. 青藏高原大地电磁深探测——亚东—巴木错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.
- 熊绍柏, 刘宏兵, 1997. 青藏高原西部的地壳结构. *科学通报*, 42: 1309—1312.
- 熊绍柏, 滕吉文, 尹周勋, 1985. 青藏高原地区的地壳厚度和莫霍界面的起伏. *地球物理学报*, 28(增刊): 16—27.
- 张胜业, 魏胜, 王家映, 等, 1996. 西藏羌塘盆地大地电磁研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 21(2): 198—202.

附中文参考文献

郭新峰, 张元丑, 程庆云, 等, 1990. 青藏高原亚东—格尔木地