

西藏高原中、北部断裂构造特征： INDEPTH(Ⅲ)-MT 观测提供的依据

魏文博^{1,2}, 金 胜¹, 叶高峰¹, 邓 明¹, 谭捍东¹, Martyn Unsworth³,
John Booker⁴, Alan G. Jones⁵, LI Sheng-hui⁴

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(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083

3. Department of Physics, University of Alberta, Edmonton, Alberta, T6G3PS, Canada

4. Geophysics Program, University of Washington, Seattle, WA98, USA

5. Dublin Institute of Advanced Studies, 5 Merrion Squar Dublin, Ireland

摘要: 根据 1998 年和 1999 年 INDEPTH(Ⅲ)-MT 在西藏中、北部所完成的德庆—龙尾错(500 线)和那曲—格尔木(600 线)超宽频带大地电磁深探测剖面数据研究西藏高原中北部断裂构造特征, 有助于推进印度板块与亚洲板块碰撞、俯冲构造模式的研究。研究结果表明, 区内发育有 F1~F10 一系列深断裂。其中, F2 向北倾斜是早期的主断裂, F1 则是后期主逆冲断裂, 它们共同构成空间结构复杂的嘉黎深断裂带。班公—怒江缝合带的主断裂系由略微向南陡倾的 F3、F4 和 F5 三组超壳深断裂构成; 由于受后期构造运动强烈的改造, 缝合带内发育多条延深不大的上地壳断层。唐古拉断裂带由 F6、F7 两组主断裂和一系列次级断裂构成; 主断裂产状上陡、下缓, 总体向南倾斜, 向下延深达下地壳。而金沙江缝合带是由 F8(金沙江断裂)和 F9(可可西里断裂), 以及它们之间存在的一系列上地壳次级断层共同组成的, 是一组很宽的地块碰撞缝合带。F10 即昆中断裂是产状陡立的超壳深断裂, 是昆仑山断裂带的主体构造, 它构成松潘—甘孜—可可西里地块的北部边界。从剖面电性结构特征分析, 昆中断裂以南属于西藏高原主体; 而以北地区是否还归属西藏高原? 这有待更深入的讨论。值得特别关注的事实是, 研究区内 2 组缝合带之下都存在向上地幔延伸的壳内高导体, 它们可能反映区内壳幔热交换过程的痕迹。

关键词: INDEPTH-MT; 大地电磁测深; 断裂特征; 壳幔热交换。

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2006)02-0257-09

收稿日期: 2006-01-15

Features of the Faults in Center and North Tibetan Plateau: Based on Results of INDEPTH (Ⅲ)-MT

WEI Wen-bo^{1,2}, JIN Sheng¹, YE Gao-feng¹, DENG Ming¹, TAN Han-dong¹,
Martyn Unsworth³, John Booker⁴, Alan G. Jones⁵, LI Sheng-hui⁴

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

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

3. Department of Physics, University of Alberta, Edmonton, Alberta, T6G3PS, Canada

4. Geophysics Program, University of Washington, Seattle, WA98, USA

5. Dublin Institute of Advanced Studies, 5 merrion square Dublin, Ireland

Abstract: The features of the faults in the center and north of the Tibetan plateau are discussed, based on two super-wide band magnetotulleric (MT) sounding profiles which belong to INDEPTH (Ⅲ)-MT and were finished between 1998 and 1999; one is from Deqing to Longweicuo (named line 500), the other is from Naqu to Golmud (named line 600). This work

基金项目: 教育部重大项目(重大 0211); 国土资源部“十五”青藏专项研究计划项目(No. 2001010202)。

作者简介: 魏文博(1945—), 男, 教授、博士生导师, 长期从事地球物理学教学与研究。E-mail: wwb5130@cugb.edu.cn

assists research on the collision and subduction mode between the India and Asia plates. The MT result shows that there are series of deep faults, F1 to F10, in the center and north Tibetan plateau. Of these faults, F2 is an earlier main fault which leans to the north, and F1 is a later main overriding fault. Jiali deep fault zone, which has a very complex space structure, is composed of these two faults. F3, F4 and F5 are super-deep faults. They are high angle faults and lean a little to the south. The main fault zone of Bangong-Nujiang suture is composed of these three faults. Because of later activity in the structure, several shallow faults formed in the upper crust within the Bangong-Nujiang suture. Tanggula fault zone is composed of two main faults, F6 and F7, and a series of sub-faults. The shallow segments of the main faults are in high angle and the deep segments of main faults are in low angle. These two faults lean to the south generally and extend into the lower crust. Jinshajiang suture is composed of Jinshajiang fault (F8) and Kekexili fault (F9), and there is a series of sub-faults in the upper crust between these two faults. Jinshajiang suture is a very wide suture caused by continent-continent collision. The Middle-Kunlun fault (F10), which is the main structure of Kunlun fault zone, is a high angle, super-deep fault. It is the north boundary of Songpan-Ganzi-Kekexili block. Based on the conductive structure of the profile, the south of the Middle-Kunlun fault belongs to the Tibetan plateau, but it is not certain whether the north of Middle-Kunlun fault also belongs to the Tibetan plateau. There are conductive bodies stretched from the crust into the upper mantle below Bangong-Nujiang suture and Jinshajiang suture. This may suggest heat exchange between crust and mantle.

Key words: INDEPTH-MT; magnetotelluric sounding; fault features; heat exchange between crust and mantle.

0 引言

1992 年,中国和美国的地质和地球物理学家开始一项合作计划,在西藏用地震勘探方法的近垂直深反射技术,从地震特征的角度获取反映地壳精细结构的信息,这即是“国际喜马拉雅和西藏高原深剖面探测及综合研究”计划(简称 INDEPTH)(Zhao and Nelson, 1993).

为了进一步从导电性的角度研究西藏地壳的结构、构造、热结构与深部物质状态,中美双方经过磋商,决定自 1995 年起,在 INDEPTH 计划中增加大地电磁深探测研究,即 INDEPTH-MT. 这项合作研究至今已延续 10 年,并仍在继续进行. 至今,它已取得一系列令国际地学界瞩目的科学成果(魏文博等, 1997; Leshou *et al.*, 1996; Wei *et al.*, 2001).

在 1998 年开始的 INDEPTH(Ⅲ)-MT 项目中,开展的西藏高原中、北部地壳和上地幔导电性研究,进一步证实了高原具有十分特殊的壳幔电性结构,并对深入研究中、北部地区断裂构造格局提供了新的依据.

1 野外实验

INDEPTH(Ⅲ)-MT 是 INDEPTH 第 3 阶段研究计划的一部分,是 INDEPTH-MT 的后续研究项目;它由中国地质大学、美国华盛顿大学(西雅图)和加拿大地质调查所 3 方合作进行. 其野外实验分 2

年进行.

1.1 测线布置

如图 1 所示,1998 年从纳木错西岸的德庆沿北北西向延伸到北羌塘的龙尾错,完成 500 线的野外数据采集;1999 年则从那曲向北北东方向,沿青藏公路延伸到青海省的格尔木,完成 600 线的数据采集. 由于地形恶劣,交通极不便利,使剖面上的 MT 测点不可能按等距离布置;但一般来说,点距均小于 15 km.

德庆—龙尾错剖面(500 线)直线长度约 380 km,沿剖面布置 58 个测点(含 26 个长周期测站,即 LIMS 测站),平均点距约 6~7 km. 那曲—格尔木剖面(600 线)直线长度约 600 km,沿剖面共布置 43 个测点(含 20 个 LIMS 测站),平均点距约 13~14 km.

为了准确定位,全部测点均使用 GPS 在实地测定其地理坐标,点位误差均小于 100 m.

1.2 仪器

以往,国内开展的大地电磁探测(MT),观测信号的最低频率只达到 0.000 5 Hz. 显然,对于研究西藏巨厚的地壳来说,它能达到的探测深度远远不够,因此需要采集周期长达数万秒的大地电磁场信号;此外,为了较详细地研究浅表构造,又需要采集频率高达数百 Hz 的大地电磁场信号. 然而,目前并没有任何型号的大地电磁数据采集系统有如此宽的频带范围. 因此,笔者在西藏的大地电磁深探测研究,选用美国 EMI 公司的 MT-24NS 局域网络型大地电磁系统和长周期智能化大地电磁系统(LIMS)配套使用. MT-24NS 采集频率范围为 $3.2 \times 10^2 \sim$

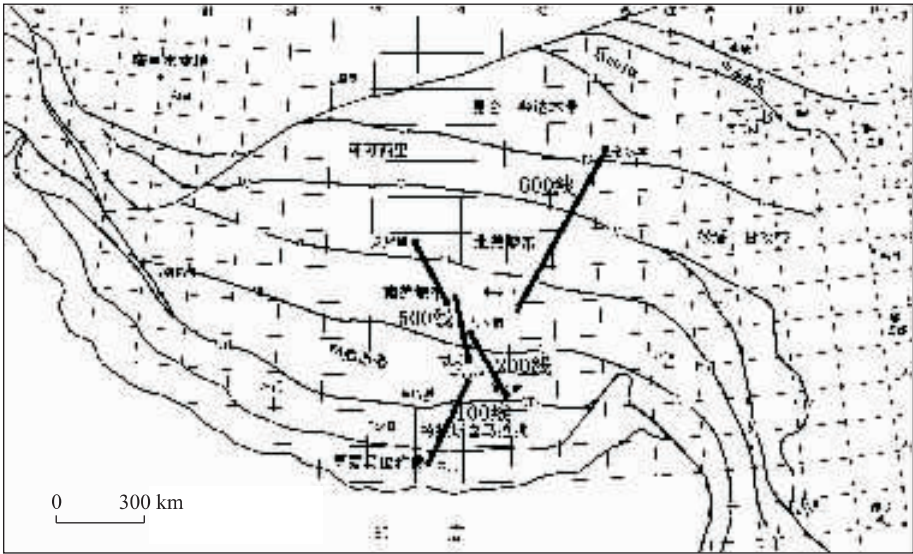


图 1 INDEPTH-MT 测线布置(底图引自尹安,2001)
Fig. 1 INDEPTH-MT profile position

I. 北祁连缝合带; II. 木里—拉脊山缝合带; III. 柴达木北缘缝合带; IV. 玛沁缝合带; V. 金沙江—哀劳山缝合带; VI. 龙木错—双湖—澜沧江缝合带; VII. 班公错—怒江缝合带; VIII. 印度河—雅鲁藏布江缝合带; IX. 甘孜—理塘缝合带

4. 6×10^{-4} Hz 的宽频信号, LIMS 则采集频率范围为 $0.1 \sim 3 \times 10^{-5}$ Hz 的长周期信号; 在同一测点上, 使用这 2 种仪器进行观测, 然后把数据拼接起来, 即得到超宽频带 ($3.2 \times 10^2 \sim 3 \times 10^{-5}$ Hz) 的大地电磁场数据。

在 1998 年和 1999 年的野外数据采集时, 笔者都使用 2 套 MT-24NS 局域网络型大地电磁系统, 而超长周期信号的采集则由美、加提供所需要的 LIMS 系统。1998 年投入使用的 LIMS 系统共 15 套, 而 1999 年投入使用的共有 14 套。

1.3 观测方法、技术

如前所述, 实现超宽频带采集, 必须把宽频带的 MT-24NS 和长周期的 LIMS 系统结合使用。在同一测点上, 用 2 套系统观测, 把它们的数据拼接起来, 即得到频带很宽的 MT 数据。但采用这种观测方法要求 2 套系统在相同频点的观测结果是可以对比的; 这当然需要很高的数据质量, 必须有严格的技术措施加以保证。所以, 笔者在选点、布站和数据采集各个环节都严格按相关技术规范执行。

考虑到西藏区域构造方向的趋势为近东西向, 布站时使 X 轴指向磁北, Y 轴指向东。一般来说, 在同一测点上既使用 MT-24NS, 又用 LIMS 观测时, 尽可能使 2 套系统共用同一组电极系; 不仅保持电极和极距不变, 而且保持埋设电极的位置不变。

布设 LIMS 测站时, 主机直接安放在测站中心,

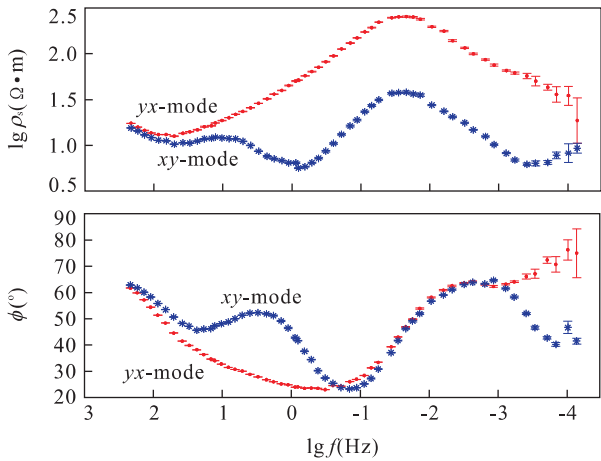


图 2 Tbt-628 号点超宽频带大地电磁测深曲线(MT-24&LIMS)
Fig. 2 Super wide-band MT sounding curve of site Tbt-628

在其侧方 3~5 m 处, 埋置三分量磁探头, 埋深 0.5 m 以上。布设磁探头时, 同样使 X 轴指向磁北, Y 轴指向东。

数据采集时, 笔者在每个测点上都用 MT-24NS 采集宽频带 MT 数据; 而每隔一个宽频带 MT 测点, 布置一个 LIMS 测站, 采集超长周期 MT 数据, 并运用 Rhoplus 分析方法把这些测点上的宽频数据和超长周期数据拼接起来, 构成如图 2 所示的超宽频带 MT 数据, 其频率范围为 ($320 \sim 1/20\,000$ Hz)。为了保证数据观测质量, 所有测点均采

用了“远参考道”观测技术。

2 数据处理与反演结果

在对所获取的青藏高原中、北部大地电磁测深资料(包括 MT-24 数据和 LIMS 数据)进行处理和反演时,笔者系统运用了大地电磁场时间序列的 Robust 处理、Rhoplus 分析、复阻抗张量分解等 MT 数据处理技术和多种二维反演方法(如二维快速松弛反演(RRI)、二维 Occam 反演和二维共轭梯度反演等),以保证得到较准确的 MT 响应及可靠的反演模型。图 3 所示即获得的 500 线和 600 线壳、幔导电性结构模型。图 3 中,横坐标轴表示剖面线,纵坐标轴则表示反演深度,断面上的等值线为电阻率等

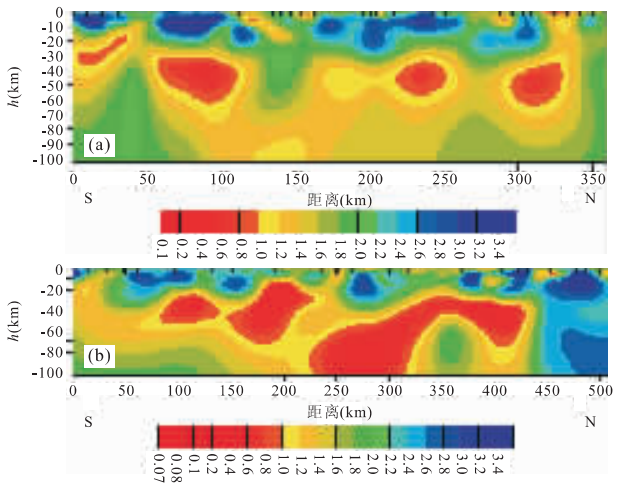
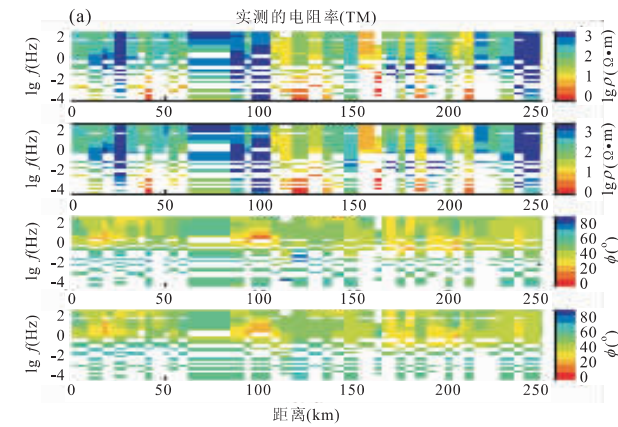


图 3 500 线(a)和 600 线(b)大地电磁测深二维反演模型
Fig. 3 Line 500 (a) and line 600 (b) resistivity model from 2D MT inversion



值线,单位为 $\Omega \cdot m$,所充填的颜色,红色表示高导无异常体,蓝色表示高阻体。

这电性结构模型是采用共轭梯度法对 TM 模式的数据进行二维反演所获得的(Martyn, 2002)。如图 4 所示,500 线和 600 线二维反演模型的 MT 理论与实测响应基本一致,它表明所获得的 2 条测线的电性结构模型能够比较真实地反映地壳介质导电性分布的特点。因此,在对它们进行深入分析、研究的基础上,得到以下的认识:(1)地下 10~40 km、50~70 km 深处存在 2 组略向北倾的电性分界面。(2)昆中断裂以北,从地壳到上地幔都表现出高电阻率的性状;以南,地壳上部的电性结构复杂,以高阻体为主,夹有局部低阻异常体,高阻体的底界起伏较大,厚度也大。(3)沿南北方向,地壳电性具有纵向分层、横向分块的特点。(4)中、下地壳,以不连续的高导体为主,表现出区域性良导电特点。(5)在缝合带的位置,发现存在向上地幔延伸的低阻通道。(6)地壳上部存在许多延深不大、多数向南倾斜的横向电性梯度带;其中有 5~6 组电性梯度带下延到中、下地壳,与中、下地壳中发育的横向电性梯度带连成一体。根据这些特点,并结合研究区区域地质及其他地球物理资料进行分析,即可以为研究青藏高原中、北部断裂构造特征提供一系列新的依据。

3 青藏高原中、北部断裂构造特征

3.1 区域地质构造背景

如图 1 所示,西藏中、北部包括冈底斯—拉萨地块、羌塘地块、松潘—甘孜—可可西里地块和昆仑—

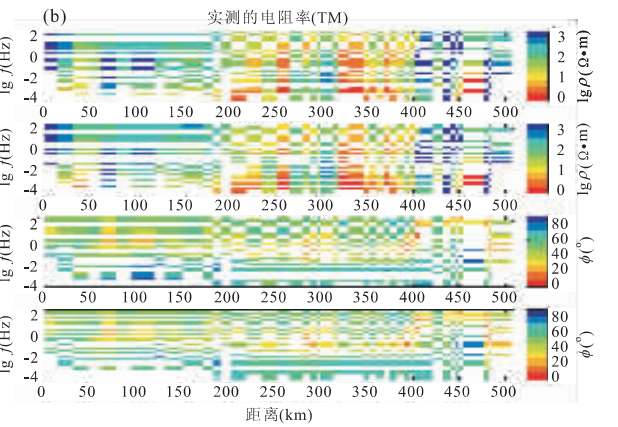


图 4 500 线(a)和 600 线(b)MT 理论与实测 MT 响应拟断面的比较
Fig. 4 Observed and calculated MT pseudo-section of line 500 (a) and line 600 (b)

柴达木地块等构造单元(尹安, 2001; 成都地质矿产研究所, 1986)。

冈底斯—拉萨地块的南、北分别以印度河—雅鲁藏布江和班公—怒江缝合带为界, 与喜马拉雅构造区和羌塘地块相邻。该区构造线以近东西向为主, 断块发育。其南缘出现燕山至喜马拉雅期中酸性侵入岩带。

羌塘地块分别以班公—怒江缝合带和金沙江缝合带区分于南部的冈底斯—拉萨地块和北部的松潘—甘孜—可可西里地块(图 1)。其西部为喀喇昆仑—羌塘断褶带, 东南部为唐古拉—三江断褶带。区内构造线呈近东西向, 走向断层发育, 褶皱平缓, 被北东及北西向断裂切割。

松潘—甘孜—可可西里地块位于东昆仑—柴达木地块和羌塘地块之间, 其西部延伸是个狭长的地质构造带, 西端被北行的阿尔金断裂带截断。在阿尔金断裂带的东侧, 地块南边以金沙江缝合带为界, 北边以阿尼玛卿—昆仑—木孜塔格缝合带为界(图 1)。构造线为近东西向, 向东南转为北北西向。东昆仑—柴达木地块南边以阿尼玛卿—昆仑—木孜塔格缝合带为界, 北边以南祁连缝合带为界。

如图 1 所示, 500 线南起冈底斯—拉萨地块中部的德庆, 沿北西方向穿过班戈岩体和班公—怒江缝合带, 进入羌塘地块; 测线在羌塘地块, 横跨南羌塘盆地, 越过羌塘复背斜轴, 抵达北羌塘盆地的龙尾错。位于 500 线东侧的 600 线, 南端自冈底斯—拉萨地块北部的那曲附近起, 向北西穿过班公—怒江缝合带进入羌塘地块南缘的安多, 转而沿北东向越过唐古拉山, 穿过金沙江缝合带和昆仑断裂, 横跨羌塘地块、松潘—甘孜—可可西里地块, 进入昆仑—柴达木地块, 抵达格尔木。

显然, 这 2 条测线大致控制了德庆—格尔木沿线的构造变形区。该区是研究西藏高原中、北部构造格局、探讨高原构造演化模式的关键区域之一。因此, 深入了解区内断裂构造特征对于进一步讨论印度与亚洲岩石圈之间, 碰撞、俯冲的深部过程和浅表耦合效应具有重要意义。

3.2 德庆—格尔木沿线地区主要断裂带

图 5 等值线的分布规律反映了剖面沿线地区地壳和上地幔盖层的断面结构。事实上, 地下任何地层都具有导电性。虽然由于影响地层导电性的因素很多, 使得地层的电性特征格外复杂, 但不管是什么因素导致的电性变化, 不同电性体之间的界线都与电

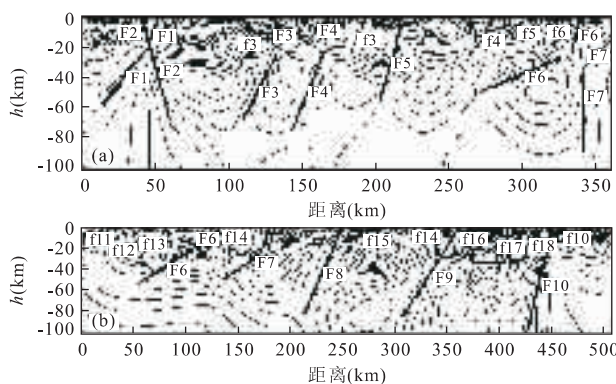


图 5 500 线(a)和 600 线(b)电阻率断面等值线

Fig. 5 Resistivity contour of line 500 (a) and line 600 (b)

阻率等值线的梯度带(或畸变带)相对应。因此, 可以根据电阻率断面等值线的分布规律推断沿剖面线地区地下不同导电性介质的断面结构, 进而推断该区的构造格局。

从物性分析的角度考虑, 当地下断裂构造发育, 断裂带上结构松散、破碎, 往往充填大量的地下水溶液或其他低阻介质, 形成与周围地层有明显电性差异的低阻异常带。另一方面, 断裂发育, 也往往使正常的地层层序破坏, 地层结构发生异常变化; 而由于各种地层都有各自的电性特征, 地层结构的变化将引起地电结构产生相应的畸变。所以, 在断裂带发育的地方, 必然存在明显的电性梯度带(或畸变带)。通常, 电阻率断面等值线密集的梯度带(或等值线扭曲的畸变带)的延伸方向, 即指示断裂带总体的倾向; 其下延深度即断裂带切割深度。按照这样的认识, 根据地球物理解释的结果发现, 在德庆—格尔木沿线地区, 上地壳发育的许多断裂中多数是向南倾斜的, 其切割深度不超过 20 km(图 5)。但是, 在 500 线上 512、514、540、550、565、595 和 599 号点的位置, 以及 600 线上 435、605、619、643 和 668 号点的位置, 地壳介质导电性结构的特征表明, 这些位置发育着一系列深断裂带, 它们的编号依次为 F1~F10(图 5)。

在与西藏及邻区区域地质资料进行对比分析时不难看出, 这些深断裂基本与西藏中、北部一系列重要的深断裂带相吻合。其中, F1、F2 即为构成嘉黎断裂带; F3、F4 和 F5 属于班公—怒江缝合带的主干断裂系; F6 与唐古拉山前断裂对应, 而 F7 为唐古拉山北沿断裂; F8 即与金沙江缝合带吻合, F9 即可可西里断裂, 而 F10 则与昆中断裂一致(图 5)。

3.2.1 嘉黎断裂带(F1、F2) 1980—1982 年中法青藏高原合作项目对喀喇昆仑—嘉黎断裂带内的部

分断裂进行过研究,发现该断裂带内的崩错断裂和格林错断裂为雁列状排列,它们在第四纪时期有非常清楚的右旋走滑现象,而且多发育有最新形成的历史地震和古地震形变带,可以确定的最大水系位移达到 5~7.5 km. 这些雁列状排列的右旋走滑断裂似乎可以证明 Taponnier 等人所认为的喀喇昆仑—嘉黎断裂带是青藏高原整体向东挤出的南部边界的认识是正确的;但是,到目前为止对喀喇昆仑—嘉黎断裂带的空间展布和第四纪运动特征的研究程度仍然很低(沈军等,2001).

500 线的壳、幔导电性结构模型表明,在剖面上嘉黎断裂带通过的地方,其断面电性结构特征较复杂. 从电阻率的断面等值线分布可以看出,在 510~516 号点之间存在 2 组相互交叉,向下延伸达下地壳的导电性梯度带,即 F1 和 F2 深断裂的断面痕迹. 其左右两翼存在 2 个规模不小的壳内高导体,沿断面呈“八”字型展布;其中,南倾的高导体向北逆冲,伴随的梯度带(F1)切割了北倾的电性梯度带(F2)(图 3a,5a). 这似乎说明,嘉黎断裂带早期的主断裂应是向北倾斜的 F2 断裂,而 F1 断裂则是在印度板块俯冲的作用下,向北运动的西藏地壳受阻挡而逆冲形成的后期主逆冲断裂. 它们共同构成了空间结构复杂的嘉黎深断裂带.

3.2.2 班公—怒江缝合带(F3~F5) 位于西藏中部的班公—怒江缝合带是羌塘地块和冈底斯—拉萨地块的分界线,是青藏高原 3 条主要缝合线之一,在高原形成演化机理研究中占有重要地位.

据陈炳蔚等研究,在缝合带东段,其两侧上泥盆、石炭、二叠及三叠系的沉积建造和古生物群都具有截然不同的特点,而上侏罗统至第三系则基本相同(成都地质矿产研究所,1986). 这似乎表明班公—怒江缝合带应是形成于上侏罗时期,因而在缝合带区内广泛覆盖有上侏罗统至第三系地层,致使班公—怒江缝合带的具体位置难于肯定,对于探讨缝合带的深部结构则更加困难.

至今,在青藏高原运用地球物理方法对班公—怒江缝合带的空间结构进行研究并不多. 1988 年的亚东—格尔木地学大断面沿青藏公路穿过班公—怒江缝合带(吴功建等,1989),但由于受当时条件的限制对班公—怒江缝合带的空间结构能提供的信息极为有限.

另一次重要的研究是 1994 年中国科学院地球物理研究所在阿里地区的吉隆—三个湖进行的综合

地球物理探测与研究(潘裕生和孔祥儒,1998). 研究表明,在探测剖面的位置班公—怒江缝合带位于改则附近. 剖面上浅层速度结构资料反映出缝合带是一个较宽的、略微北倾的冲断层,基底错断达 6~8 km. 并且,在缝合带南侧的洞错一带形成一个宽约 80 km、深约 11 km 的中生代沉积盆地;其北界即班公—怒江缝合带,南界为达瓦错以北 40 km 处的一条深达基底的隐伏逆断层.

从班公—怒江缝合带两侧 P_m 反射波组的断面分布特征看出,在班公—怒江缝合带附近莫霍面突然错断,向北抬升约 10 km,但抬升的过程体现出几个小台阶. 缝合带北缘的莫霍面向北倾伏,穿过班公—怒江缝合带下插到羌塘地体之下.

最新的人工地震探测是 1998 年夏季 INDEPTH-III 沿德庆—龙尾错剖面进行的折射/广角反射(Zhao *et al.*, 2001). 这剖面的位置在措勤—三个湖剖面的东边,大约相距 450 km,与 MT500 线的位置大致相同.

从德庆—龙尾错地震剖面的 P 波速度模型看出,在班公—怒江缝合带上莫霍面有一定起伏,两侧深度不同,南深、北浅,这与措勤—三个湖地震剖面的趋势一致;但深度大约只有 4 km 的变化,也没见有冈底斯—拉萨地块的莫霍面向北倾伏,并穿过缝合带进入羌塘地块的痕迹.

实际上,无论是措勤—三个湖,或是德庆—龙尾错地震剖面的探测结果,都在一定程度上证明了班公—怒江缝合带是一组超壳深断裂带. 在它的两侧莫霍面错断,地壳厚度不同;由南向北,地壳的厚度呈减薄的趋势. 但是我们也看到,根据现有的折射/广角反射的探测结果,对班公—怒江缝合带的空间结构仍达不到一致的认识. 因此,500 线的断面电性结构模型便具有明显的科学意义,它可以从导电性的角度为进一步研究班公—怒江缝合带的空间结构提供新的依据.

如图 3a,5a 所示,在 530~565 号点之间,地壳中存在 7 组横向电性梯度带或畸变带,它们在空间位置上与区域地质资料所确定的班公—怒江缝合带构造区相吻合.

根据断裂构造电性特征的分析认为,这些电性梯度带应该是缝合带断裂系内断层的断面痕迹. 因此,根据梯度带的延深不同,可以把它们大致划分为切割上地壳的深断裂和切穿整个地壳的超壳深断裂,即位于 540、550 和 565 号点附近的横向电性梯

度带反映了3组超壳深断裂,依次是F3、F4和F5,它们构成了班公—怒江缝合带的主断裂系。从梯度带在剖面断面上的展布特征推断,这3组超壳深断裂的产状都略微向南陡倾。其中,F3、F4在上地壳部分均有明显向南错动的痕迹(图5a),这表明班公—怒江缝合带受后期构造运动的改造十分剧烈,而F3、F4、F9和F10这些发育于上地壳内的深断裂可能是后期形成的断裂构造。

在中、下地壳,F3和F4之间的介质表现出中等导电性的特点,呈柱状,略微南倾。其两翼均为产状平缓、规模宏大的中、下地壳高导体;这2组高导体的顶面深度相差不大,但底面深度变化较大;位于缝合带南边的高导体,底面的最大深度约74 km,而位于缝合带北边的高导体,底面的最大深度则约为65 km。

当沿着缝合带主断裂之间的柱状导体向上地幔追溯时,可以看到电阻率是降低的,这里存在着向上地幔延伸的低阻通道。它可能证明,班公—怒江缝合带是个壳幔热交换通道,值得特别关注。

3.2.3 唐古拉断裂(F6、F7) 唐古拉断裂包括唐古拉山南麓(F6)和北麓(温泉)断裂(F7),位于羌塘地块中南部。从文献资料看,前人对该断裂的研究程度不高,只有1988年完成的亚东—格尔木地学大断面穿过唐古拉断裂。其研究结果表明,在唐古拉地区沿剖面通过的地方存在宽缓、对称的重力低,以及垂直的电性分界面,因而推断有深断裂发育即唐古拉断裂;其产状陡立,但规模不大(孟令顺等,1990;郭新峰等,1990)。虽然,亚东—格尔木地学大断面的研究结果证实了唐古拉断裂的存在,但对断裂结构特征还缺乏深入的了解。

根据青藏及邻区区域地质资料知道,500线和600线都穿过唐古拉断裂带。因此,这2条剖面的二维电性结构模型上,在唐古拉山地区都发现有反映深断裂的导电性结构特征。如图3a、5a所示,在500线上580~599号点之间,即地质所推断的唐古拉断裂带的位置,中、下地壳存在规模宏大、电导率小于 $10\Omega\cdot\text{m}$ 的高导体,其顶面深度约35 km、底面深度约66 km,产状南倾;高导体向上延伸到地壳浅部,因而在588~595号点之间形成上地壳低阻通道和多组电性梯度带。其中,位于588号点附近的电性梯度带上部略微北倾,下部转为向南倾斜;而595号点附近的电性梯度带,产状陡立。由此推断,在500线控制的区段唐古拉断裂带可能向南倾斜,切割深度达下地壳。

图3b、5b即是600线的二维电性结构模型,在425~445号点之间,同样存在中、下地壳高导体。其电阻率小于 $10\Omega\cdot\text{m}$,但规模比500线上相应的高导体小;此高导体的顶面深度约25 km、底面深度约55 km,产状近于水平,略微南倾。在435~440号点之间,上地壳也存在一组延续到中、下地壳高导体、相对低阻的通道,但它的电阻率比500线类似的低阻通道略高。在这剖面上,位于425、435、450号点的导电性梯度带也基本与唐古拉断裂带的位置相吻合,它们的产状南倾、上陡、下缓,与500线电性结构剖面所展现的唐古拉断裂带的电性结构特征相似。

所以,根据500线和600线电性结构特征推断,唐古拉断裂带由F6、F7两组主断裂和一系列次级断裂构成;主断裂产状上陡、下缓,总体向南倾斜,向下延深达下地壳。在唐古拉地区,F6和F7之间的中、下地壳存在大规模的高导体。高导体呈椭圆柱状体沿北西方向延伸,由东向西倾伏、规模增大。

3.2.4 金沙江缝合带(F8、F9) 从构造域的划分看,金沙江缝合带是羌塘地块与松潘—甘孜—可可西里地块的分界线,也是青藏高原最重要的断裂构造之一。青藏及邻区的区域地质资料表明,该断裂带至少自加里东旋回以来曾多次活动,断裂东侧岩浆活动主要为印支期,而西侧除印支期以外,还有华力西期。沿断裂带在得荣、德钦和歇武等地发现有蛇绿岩;它们通常与围岩呈构造接触,围岩为古生界及三叠系碎屑岩及泥质岩(成都地质矿产研究所,1986)。这些资料可以在一定程度上反映金沙江断裂带属于超壳深断裂的性状;但更进一步的证据则来源于地球物理探测结果。1996年以来,中国地质科学院地质研究所与法国宇宙科学院在藏北高原合作进行的唐古拉山口—格尔木及玉树—共和剖面的天然地震探测结果都从速度结构的角度证明了金沙江缝合带的确是一组深达上地幔、向南倾斜的深断裂带(许志琴等,2001)。

1999年夏季,INDEPTH(Ⅲ)-MT项目获得了那曲—格尔木剖面(600线)的壳、幔二维电性结构模型(图3b、5b)。从剖面位置看,600线与亚东—格尔木地学断面的相应区段以及唐古拉山口—格尔木天然地震探测剖面完全一致。

在600线中部,温泉到五道梁之间,上地壳也存在7组横向电性梯度带(图5b),它们正落在区内地面地质发现的断裂位置上。其中,多数属延深不大(小于10 km)、产状南倾的上地壳断层(如F2~

F5);而位于 619~622 号点(沱沱河附近)的电性梯度带(F8)与地质推断的金沙江断裂带相对应,它的断面电性结构特征显示,该断裂带呈上窄、下宽,向南倾斜,深达下地壳的相对低阻通道,这与天然地震层析成像的结果相类似;位于 643 号点(五道梁附近)的电性梯度带(F9)则与地质推断的可可西里断裂带对应,在电性剖面断面上该断裂带的上地壳部分表现出有一定宽度、结构破碎的相对低阻带,它以南倾的趋势向中、下地壳延伸,切过高导层,在下地壳呈横向急剧变化的电性梯度带,其结构特征也同样与天然地震层析成像的结果相类似。

根据 600 线电性结构模型的深部特征推断,金沙江缝合带是由 F8(金沙江断裂)和 F9(可可西里断裂)深断裂及它们之间存在的一系列上地壳次级断层共同组成的,它实际上是一组很宽的地块碰撞缝合带。

从断面电性结构的整体特征看,在 F8 和 F9 之间上地壳厚度大,中、下地壳存在格外引人注目、规模特别巨大、向上地幔延伸的高导体。高导体的断面形态呈“蘑菇”状,与班公—怒江缝合带伴随的壳、幔高导体结构相似,但其电导率却有明显的差异。仔细比较 500 线和 600 线的电性结构模型(图 3)发现,金沙江缝合带所伴随的壳、幔高导体的电导率远高于班公—怒江缝合带高导体的电导率,但它们的断面结构竟然如此相似,这是值得特别关注的事实。

对于研究壳、幔尺度的电性结构,温度的影响是最主要的;因此,地下介质电导率的高、低可以在某种程度上反映地下热状态的改变,壳幔高导体的空间结构可能是壳幔热交换过程的痕迹。所以,通过对班公—怒江和金沙江缝合带电性结构特征的对比、分析将有助于深入讨论青藏高原的演化过程。

3.2.5 昆仑山断裂带(F10) 昆仑山断裂带包括昆仑山南缘断裂、昆中断裂和昆仑山北缘断裂,是松潘—甘孜—可可西里地块与昆仑—柴达木地块的分界线(成都地质矿产研究所,1986);因此,导电性结构有明显的异常特征。

如图 5b 所示,600 线(那曲—格尔木剖面)的北段,在 653~674 号点之间(即昆仑山脉),上地壳存在 6 组向南陡倾的导电性梯度带(即 f6~f10、F10)。其中,f6~f10 的延深小于 15 km,f6 和 f7,f8 和 F10 之间都存在相对的低阻通道(图 3b、5b),且 f6、f7 在剖面上的位置大致与昆仑南缘断裂相符,f8~f10 的地面位置也大体上与一系列次级断层对应;因此,推断 f6~f10 为上地壳断裂系。此外,在断

面电性结构图上还可以看出,位于 668 号点的 F10 横穿上地壳,陡直下延到上地幔深度,表现出超壳深断裂的特征;以它为界,剖面的南、北 2 侧中、下地壳的导电性截然不同,南侧为高导体,北侧为高阻体,这显然是大陆地块边界的特点。它似乎表明,F10 以南是西藏高原的主体;而以北地区还是否归属西藏高原?这有待更深入的讨论。

当与区域构造资料比较时发现,F10 在地面的出露位置基本上与昆中断裂一致;这说明,昆中断裂是产状陡立的超壳深断裂,是昆仑山断裂带的主体构造;它构成松潘—甘孜—可可西里地块的北部边界。

4 结语

几十年来,国内外许多学者在西藏做了大量地质、地球物理调查,对印度与亚洲岩石圈之间的碰撞、俯冲提出了多种构造演化模式,但至今仍没有定论。研究其原因,还是缺乏准确、可靠的证据;这导致对西藏高原的地壳和上地幔结构、对高原主要断裂构造空间格局的认识存在种种差异。而 INDEPTH(III)-MT 的这项研究成果,从导电性的角度对此提供了新的证据,这将有助于推进印度与亚洲岩石圈碰撞、俯冲构造模式的研究。

References

- Guo, X. F., Zhang, Y. C., Cheng Q. Y., et al., 1990. Magnetotelluric studies along Yadong-Golmud geosciences transect in Qinghai-Xizang plateau. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 21: 191—202 (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.
- Martyn, U., 2003. Studying continental dynamics with magnetotelluric exploration. *Earth Science Frontiers*, 10 (1): 25—38 (in Chinese).
- Meng, L. S., Gao, R., Zhou, F. X., et al., 1990. Interpretation of the crustal structure in Yadong-Golmud area using gravity anomalies. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 21: 149—161 (in Chinese).
- Pan, Y. S., Kong, X. R., 1998. Lithosphere structure, evolution and dynamics of Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau. Guangdong Science and Technology Press, Guang-

- zhou (in Chinese).
- Research Institute of Geology and Mineral Resources Chengdu, 1986. The geological map of Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and near-area. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Shen, J., Ren, J. W., Wang, Y. P., et al., 2001. The Quaternary right lateral strike slipping of the Jiali fault zone in south Tibet, Investigation on present-day crustal motion and geodynamics. Seismological Press, Beijing, 106—122 (in Chinese).
- Wei, W. B., Chen, L. S., Tan, H. D., et al., 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., Martyn, U., Jones, A., et al., 2001. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies. *Science*, 292: 716—718.
- Wu, G. J., Xiao, X. C., Li, T. D., 1989. The Yadong-Golmud geoscience on the Qinghai-Xizang plateau. *Chinese J. Geology*, 63(4): 285—296 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Jiang, M., et al., 2001. Lithosphere structure and its cut faults of eastern Kunlun-Qiangtang north Tibetan plateau. *Science in China (Series D)*, 31(Suppl.), 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., 2001. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3): 195—230 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W., Mechie, J., Brown, L. D., et al., 2001. Crustal structure of central Tibet as derived from project INDEPTH wide-angle seismic data. *Geophys. J. Int.*, 145: 486—498.
- Zhao, W. J., Nelson, K. D., 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 366(6455): 557—559.
- 附中文参考文献**
- 成都地质矿产研究所, 1986. 藏高原及邻区地质图说明书. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 马丁·昂斯沃次, 2003. 用大地电磁勘探方法研究大陆动力学. 地学前缘, 10(1): 25—38.
- 孟令顺, 高锐, 周富祥, 等, 1990. 利用重力异常研究亚东—格尔木地壳构造. 中国地质科学院院报, 21: 149—161.
- 潘裕生, 孔祥儒, 1998. 青藏高原岩石圈结构演化和动力学. 广州: 广东科技出版社.
- 沈军, 任金卫, 汪一鹏, 等, 2001. 西藏南部嘉黎断裂带第四纪右旋走滑运动研究, “现代地壳运动与地球动力学研究”. 北京: 地震出版社, 106—122.
- 魏文博, 陈乐寿, 谭捍东, 等, 1997. 西藏高原大地电磁深探测——亚东—巴木错沿线地区壳幔电性结构. 现代地质, 11(3): 366—374.
- 吴功建, 肖序常, 李廷栋, 1989. 亚东—格尔木地壳及上地幔的构造和演化. 地质学报, 63(4): 285—296.
- 许志琴, 杨经绥, 姜枚, 等, 2001. 青藏高原北部东昆仑—羌塘地区的岩石圈结构及岩石圈剪切断层. 中国科学(D辑)31(增刊), 1—7.
- 尹安, 2001. 喜马拉雅—青藏高原造山带地质演化. 地球学报, 22(3): 195—230.