

# 龙门山大地电磁深部结构及汶川地震( $M_s$ 8.0)

朱迎堂<sup>1,2)</sup>, 王绪本<sup>1,2)</sup>, 余年<sup>1,3)</sup>, 高树全<sup>1)</sup>, 李坤<sup>2)</sup>, 石岩峻<sup>1)</sup>

1) 成都理工大学“地球探测与信息技术”教育部重点实验室, 成都, 610059;

2) 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都, 610059;

3) 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都, 610031

**内容提要:**2008年5月12日汶川发生的 $M_s$  8.0地震使四川、甘肃和陕西等省遭受重大人员伤亡及财产损失, 本文通过震前完成的穿过龙门山构造带中段的松潘-中江大地电磁测深剖面的反演解释, 揭示了龙门山构造带及其两侧松潘-甘孜褶皱带、川西前陆盆地地壳内部30 km深处电性结构。龙门山构造带东侧四川盆地为上部较厚低阻沉积盖层之下存在连续稳定高阻的扬子基底特征, 而以西的松潘-甘孜褶皱带分上部和下部两部分, 上部为高阻古生界夹低阻中生界, 下部(中下地壳)呈连续低阻层, 推测可能存在一个连续稳定的壳内高层。而龙门山恰好是青藏高原与扬子地台联合作用的结果, 形成了上部高阻及下部基底高阻, 中间夹西倾低阻带, 低阻带最厚10 km, 其深度从地表10 km连续向西延伸至20 km深处, 与松潘-甘孜褶皱带15~20 km的低阻层相连。这个异常低阻带可能是松潘-甘孜地块向东向上移动的传输带, 北川-映秀断层逆冲分量显然大于右行走滑分量, 因此汶川地震属于右行平移-逆冲断裂型地震。

**关键词:**壳内低阻层; 逆冲构造; 大地电磁; 汶川地震; 龙门山; 青藏高原

龙门山构造带位于青藏高原东缘, 西以茂县-汶川断裂为界与松潘-甘孜褶皱带相依, 东以安县-都江堰断裂与川西前陆盆地相邻, 中间夹北川-映秀断裂。呈北东-南西向展布的断裂体系, 向北东与秦岭造山带相接, 向南与康滇地轴相交, 并被鲜水河走滑断层及小江断层所平移(郭正吾等, 1996; 崔作舟等, 1996; 林茂炳等, 1997a, 1997b)。地表地质研究表明, 该构造带是由一系列大致平行的叠瓦状冲断带构成, 具备典型的逆冲推覆构造特征(林茂炳等, 1996; 金文正等, 2007)。龙门山构造带大体上自西北向东南划分为4个构造带, 分别为松潘-甘孜褶皱带、褶皱冲断带、逆掩推覆带和川西前陆盆地。通过对龙门山断裂带活动构造的地貌标志的分析(李勇等, 2006; Densmore et al., 2007), 认为北川断裂活动性最为明显, 在晚新生代时期具有走滑分量与逆冲分量大体相当的特点。

龙门山大地电磁工作开展的比较早, 但研究程度比较低。李立等(1987)主要在龙门山南部及攀西裂谷带开展过地壳上地幔的大地电磁测深初步研

究, 发现了壳内低阻层及龙门山高阻异常体, 得出了青藏高原东部地区岩石圈的厚度。1999~2000年王绪本等<sup>①</sup>研究了龙门山构造带及邻区地壳结构, 特别是大地电磁测深方面, 反演了地表下20 km电性剖面, 认为纵向上分层性明显、埋深15~20 km存在壳内低阻层, 中高阻块体被一系列倾斜低阻带分割, 呈现高阻体与低阻带相间的分块性(王运生等, 2007)。孙洁等(2003)、马晓冰等(2005)、赵国洋等(2004)、汤吉等(2005)及詹艳等(2005)都先后撰文讨论了青藏高原东北部及东部地区地壳电性结构特征。尽管如此, 龙门山构造带深部地质构造研究仍然较为薄弱, 地质模式的建立主要基于地表地质资料的推断, 有关龙门山形成演化机制、深部结构认识等问题仍然存在着较大分歧。比如, 在龙门山造山带与四川盆地的关系上, 是陆内“C型俯冲模式”(罗志立, 1984; 刘树根等, 1990; 罗志立等, 2002), 还是松潘-甘孜造山带向扬子克拉通逆冲推覆模式(赵友年, 1983; 刘和甫等, 1994; 蔡学林等, 1996; 许志琴等, 2002)等, 还是双向收缩造山, 即西南部特提斯构

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号40674035)和国家“863”计划资源环境项目(编号2006AA06Z110)资助成果。

收稿日期: 2008-11-10; 改回日期: 2008-11-16; 责任编辑: 周健。

作者简介: 朱迎堂, 男, 1964生。博士后, 教授, 主要从事青藏高原地质、沉积盆地分析及资源勘查评价工作。通讯地址: 610059, 成都市二仙桥东三路1号, 成都理工大学“地球探测与信息技术”教育部重点实验室; 电话: 028-84079546; Email: zhuyingtang@163.com。

造域北东缘和北西的秦岭造山带形成的楔形剪刀式剪压和扬子地台硬块的砥柱作用导致龙门山造山带的向上逸出(许志琴等, 1996, 赵锡奎等, 2000)等。为什么高原边缘(包括东缘龙门山构造带)都发生地壳逆冲现象, 并且伴有走滑作用(高锐, 1997)。本文重点研究了龙门山中段大地电磁深部结构, 探讨了高原东缘汶川地震发震的主因、震源深度及主余震展布特点。

## 1 龙门山大地电磁探测

### 1.1 剖面位置

2007年9至11月我们使用加拿大凤凰公司的V8多功能电法仪进行了大地电磁测深(MT)野外测量, 剖面南起中江, 经北川, 至松潘, 全长237 km, 方位为NW30°, 地质构造自西北向东南为横跨青藏高原东缘松潘-甘孜褶皱带、龙门山构造带及川西前陆盆地(图1)。大地电磁测深点共25个, 平均点距约为10 km。

### 1.2 大地电磁资料处理与分析

#### 1.2.1 野外资料处理

V8多功能电法仪是目前较为先进的大地电磁测深仪, 具有仪器灵活, 配置可选择, 工作温度范围广, 并且实现网络化, 站与站或发射机之间无连线, 场源和接收网络均通过GPS同步等特点。其配置的MTC-50大地电磁专用磁棒频率范围为400~0.0002 Hz。

在野外资料采集时记录大地电磁的5个分量的时间序列, 所观测频率范围为0.003125~3636.4 Hz, 为保证视电阻率、阻抗相位资料的周期长度, 所有测点记录时间均超过20 h。资料处理采用由Phoenix公司提供的SSMT2000数据处理软件, 将观测的时间序列数据经过傅立叶变换, 得到电磁场的自、互功率谱, 再采用robust资料处理技术估算大地电磁张量阻抗, 并编辑每一个频率对应的crosspower来去掉结果中的低质量数据。

#### 1.2.2 曲线分析

每个测点的视电阻率曲线既反映该测点地下电性随深度的变化, 又反映该测点及附近地下结构的电性不均匀性。图2给出的分别是测点A2、A5、A12、A14、A20和A24处视电阻率( $\rho$ )曲线, 其中测点A2、A5位于川西前陆盆地, A12、A14位于龙门山构造带, A20、A24位于松潘-甘孜褶皱带构造单元内。纵观该剖面各测点的视电阻率曲线特征, 并结合构造划分方案, 发现沿剖面的曲线形态变化与

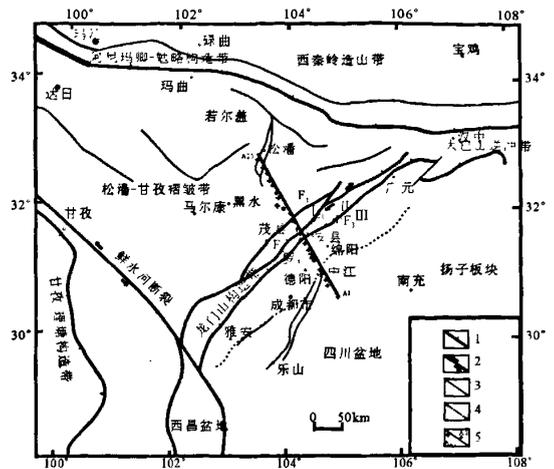


图1 松潘—中江大地电磁测深剖面位置图

Fig. 1 Location map of the magnetotelluric sounding profile of the Songpan-Zhongjiang

F<sub>1</sub>—茂县-汶川断裂; F<sub>2</sub>—北川-映秀断裂; F<sub>3</sub>—安县-都江堰断裂; 龙门山构造带: I—褶皱冲断带; II—逆掩推覆带; III—川西前陆盆地; 1—逆冲断裂; 2—走滑断裂; 3—一般断裂; 4—推测构造边界; 5—测线及测点

F<sub>1</sub>—Maoxian-Wenchuan fault; F<sub>2</sub>—Benchuan-Yingxiu fault; F<sub>3</sub>—Anxian-Duijiangyan fault; Longmenshan tectonic belt: I—fold-thrust belt; II—thrust-nappe belt; III—Chuanxi foreland depression; 1—thrust fault; 2—strike slip fault; 3—general fault; 4—boundary of inference tectonic unit; 5—MT survey profile and sites

构造带的划分有较好的对应关系。另据统计所有测点的视电阻率和相位曲线, 视电阻率和相位的相关性较好, 两个模式的视电阻率曲线高频段基本重合, 曲线形态合理。

位于川西前陆盆地构造单元内的A2、A5曲线类型为HA型, 构造单元内部分点为HKH型, 反映了地下高一低一高的电性结构。其相对于剖面其他构造单元而言, 视电阻率的明显偏低, 视电阻率曲线尾枝的A型说明了川西前陆盆地构造的基底电阻率较高。

位于龙门山逆冲带构造单元内的A12、A14曲线类型为KH型, 反映了地下低—高一低—高的电性结构。地表的低阻本身数值就较大, 且在不断的增大, 这与龙门山构造带地表变质岩、花岗岩等基岩出露相吻合。中间的低阻应为逆冲构造存在的一个反映。

位于松潘-甘孜褶皱带构造单元内的测点A20、A24的曲线类型均为HK型, 反映了地下高一低—高一低的电性结构。上部低阻电性为三叠系为主的

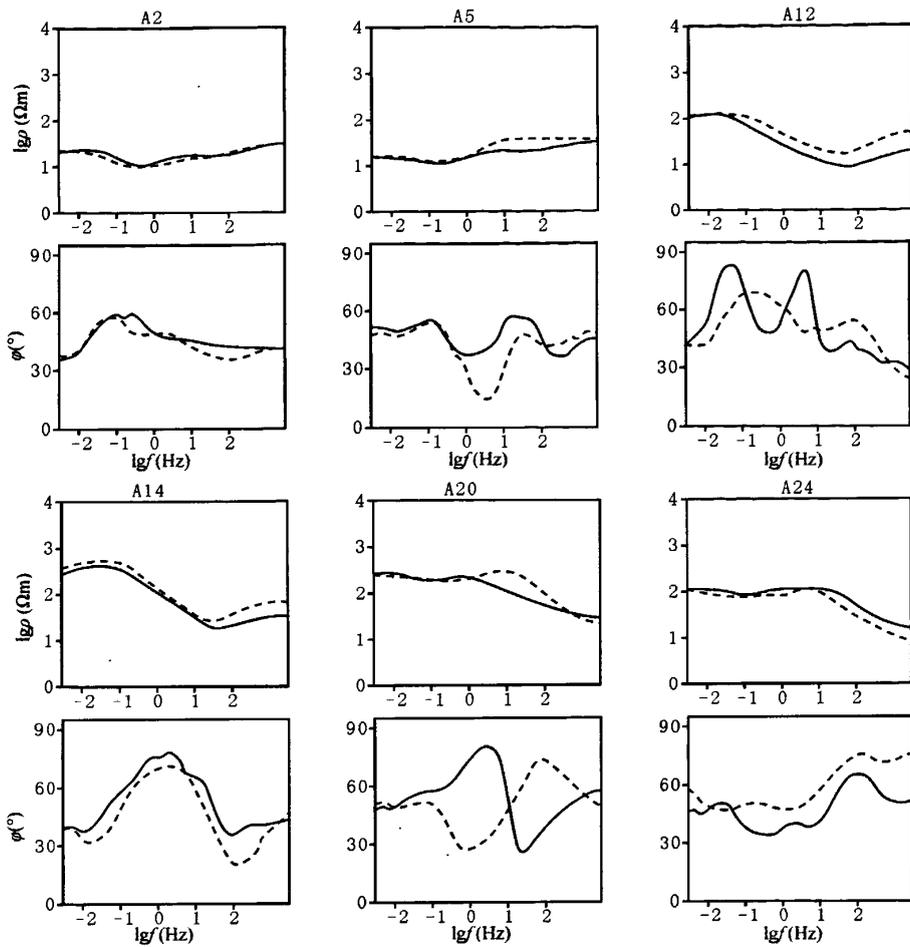


图 2 典型测点的视电阻率和阻抗相位曲线  $\varphi$

Fig. 2 Apparent resistivity and impedance phase curves of typical sites

断线为 TE 模式, 实线为 TM 模式

The broken curve is TE model, the solid for TM model

砂泥岩的反映, 下部低阻电性层埋深较深, 可能是壳内低阻层的反映。

### 1.2.3 区域构造走向分析

对资料进行定量反演之前先对电性构造的走向进行分析。电性构造走向利用最佳主轴方位角和研究区已知的构造、地质资料来判断(陈乐寿等, 1990)。考虑到剖面沿线经过的构造基本为北东向(NE)走向, 可以确定剖面深部电性走向为北西(NW)向。

图 3 是剖面部分测点张量阻抗计算得到的 Swift 主轴方位角, 图中圆半径为周期大小, 其单位为 s, 半径越大表示周期越大, 从图中可以看出, 龙门山前沿和龙门山构造带的主要测点 in 高频段即浅

部, 主轴明显的表现为一定的南北(SN)向, 而后的频率和位于川西前陆盆地一样基本均表现为北西(NW)向。沿剖面的地下深部电性结构维数和电性构造走向表明, 二维反演解释应采用沿剖面布置方向进行。

### 1.2.4 区域维数分析

Mohr 圆分析是大地电磁资料的一种定性解释方法, 它以阻抗的各种旋转不变量及其组合作为基本参数, 可明确地显示电性构造的维数、二维偏离度、各向异性、走向方位和主轴阻抗等特征。对龙门山剖面的全部 25 个测点均进行了 Mohr 圆分析, 发现就各类 Mohr 圆的测点而言, 大 Mohr 圆较少, 中、小 Mohr 圆较多。

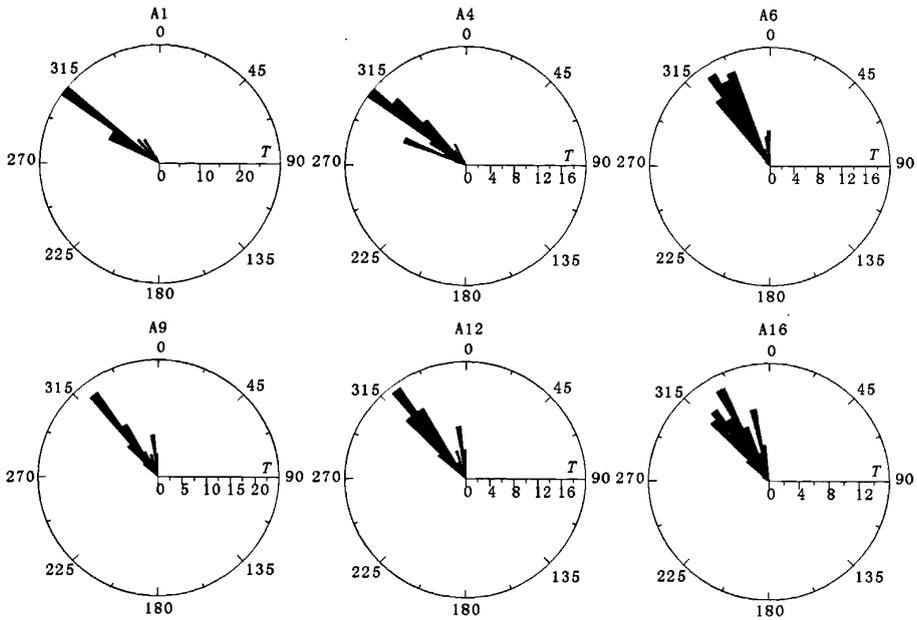


图 3 阻抗张量计算的 Swift 最佳主轴分布图

Fig. 3 Distribution of Swift directions

这里对 3 个测点的不变量实部绘制的 Mohr 圆进行说明, 从上至下分别为: A3、A15 和 A23 号点, 从左至右的周期分别为  $T=0.003125\text{ s}$ 、 $0.017\text{ s}$ 、 $0.1\text{ s}$ 、 $3.56\text{ s}$ 、 $169.5\text{ s}$ 、 $3636.4\text{ s}$  的 Mohr 圆。从图 4 可以总结出如下结论: 剖面的 Mohr 圆均在横轴

及其附近, 表现为明显的二维性, 且浅部的一维性较强; 位于川西前陆盆地的 A3 点, 浅部表现为一定的三维性, 在中深部表现为明显的二维性, 且 Mohr 圆的半径由大变小, 而后再逐渐增大, 因此各向异性表现为浅部略大, 而后中部逐渐变小, 在深部逐渐明显

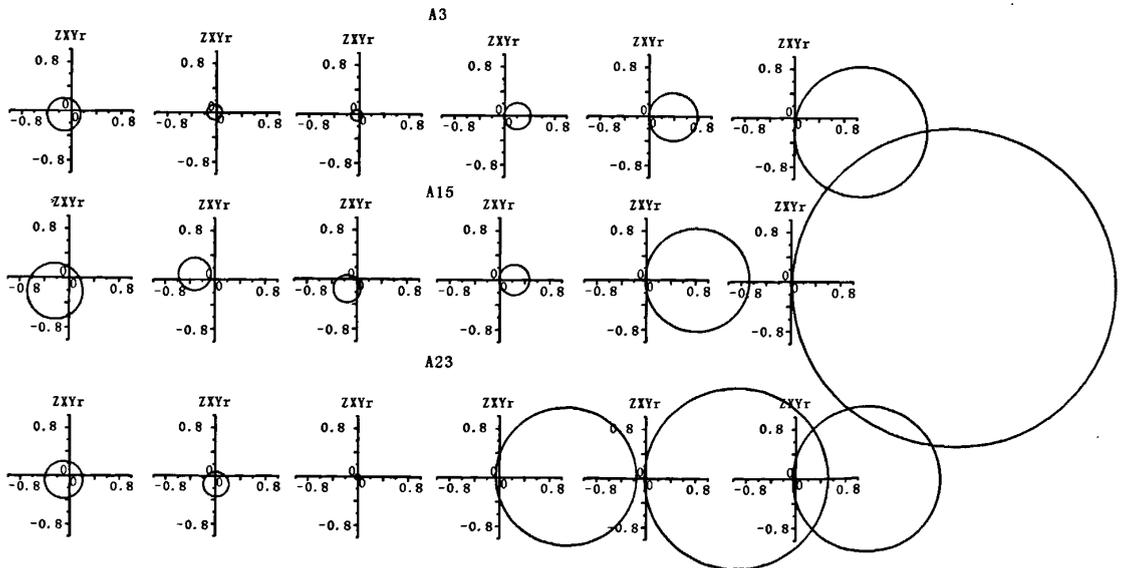


图 4 部分测点 Mohr 圆

Fig. 4 Mohr circle of some survey points

增大;在龙门山构造带的 A15 点,浅部和中部的三维性相对川西前陆盆地明显较大,深部表现为二维性,各向异性的规律与 A3 点相同,但明显比 A3 点要大,且越往深部各向异性越大。位于松潘-甘孜褶皱带的 A25 测点浅部表现为一定的三维性,中部表现为明显的一维性,深部为二维性,各向异性浅部比中部较小,深部各向异性明显,但相对龙门山构造带的相对要小。

### 1.2.5 定性剖面分析

定性分析表明,沿测线多数测点的视电阻率曲线受局部畸变的影响不严重,区域电性结构总体上是二维的,二维反演方法对这种区域构造的解释是一种较为可靠的近似,可以较真实的反应地下电性结构。将所有的测点资料旋转到剖面方向(北西—南东方向),并将沿剖面方向的视电阻率和阻抗相位曲线规定为 TM 曲线,垂直剖面方向的曲线规定为 TE 曲线。

## 2 反演计算

由理论模型的反演研究可以得到,TE 模式得到的反演结果在深度上更准确地反映实际模型, TM 模式的反演结果在横向上更准确地反映实际模型。因此我们采用 TE 模式和 TM 模式联合反演的方式对曲线进行反演(图 5)。

对数据的预处理和反演我们采用自主开发的 MTSOFT 2D 大地电磁处理解释系统,该系统已在矿

产调查、油气勘察、地热资源勘察、工程地质勘察和深部构造研究等领域取得了较好的应用效果。

对预处理后的数据采用 Occam (Constable, 1987)反演或 Bostick 变换对数据进行一维联合反演,然后将其结果作初始模型进行二维非线性共轭梯度(NLCG) (William and Randall,2001)反演,最终得到剖面的二维反演结果(图 6a)。

## 3 大地电磁剖面结构

基于大地电磁二维反演结果(图 6a)和视电阻率(图 2)的特点,并结合地表地质资料和断裂出露的情况以及地块的划分,按照大地电磁测深剖面跨越的 3 个次级构造单元解释,即川西前陆盆地、龙门山构造带及松潘-甘孜褶皱带。

### 3.1 川西前陆拗陷

川西前陆盆地是指四川盆地西部晚三叠世以来形成的盆地,充填了厚度大于 1 万余米的上三叠统以来的陆相沉积物及下伏震旦系—中三叠统海相地层,走向呈北东,其西界为龙门山构造带,东界位于龙泉山一带。罗志立等(2002)认为川西前陆盆地属于“陆内俯冲型前陆盆地”,简称 C-型前陆盆地。并且是单侧盆地型 L(龙门山)-型俯冲动力模式(刘树根等,2003)。根据盆地沉积和构造演化特征,川西前陆盆地的演化可分为 6 个阶段(罗啸泉等,2004)或 6 个构造层序(李勇等,1995,2002),其演化与龙门山的构造活动密切相关。

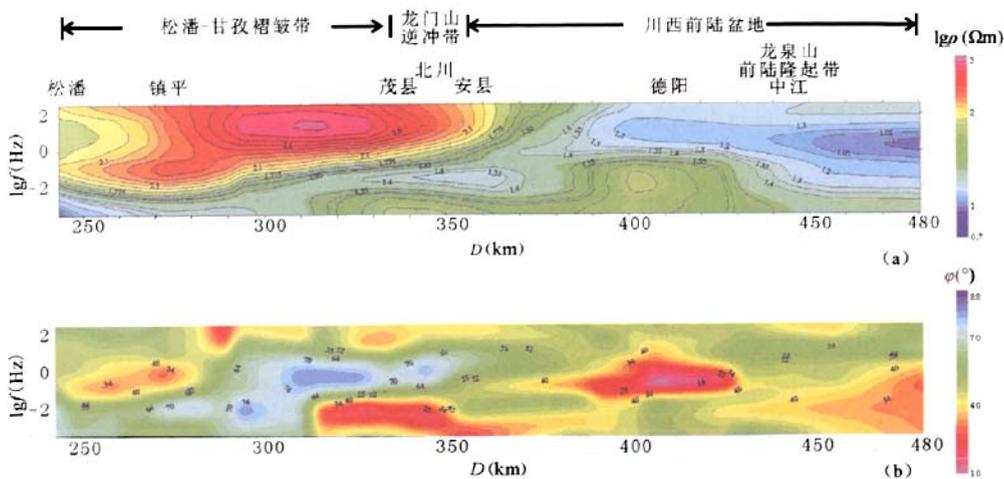


图 5 龙门山 MT 视电阻率和相位断面图

Fig. 5 Cross-sections of apparent resistivity and phase of Longmen Mts. MT survey profile

(a)—TE 模式视电阻率断面图;(b)—TE 模式相位断面图

(a)—Cross-sections of apparent resistivity of TE model;(b)—cross-sections of phase of TE model

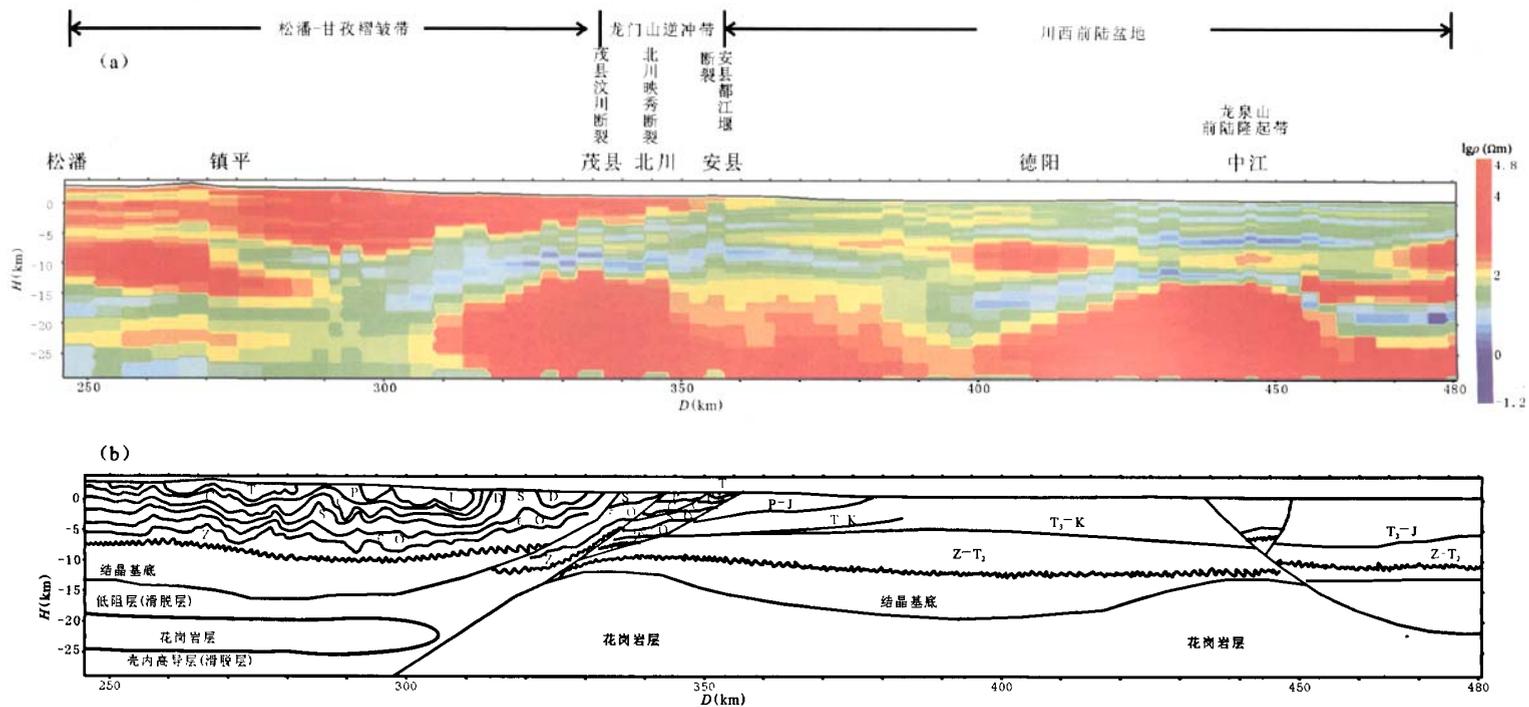


图 6 龙门山大地电磁二维反演结果(a)和地质解释图(b)

Fig. 6 The results MT inversion (a) and geological interpretation map (b) of Longmen Mts.

二维反演结果显示,盆地内深部电性结构相对简单,浅层分层性较好,深部存在高阻基底,电性剖面清晰地反映了盆地结构及基底起伏变化状况。盆地浅部整体电阻率偏低,呈现由南东—北西逐渐增大、纵向上呈现上低下高的二元电性结构。自地表至 6 km 深度的上地壳,电阻率表现为低阻性质,普遍低于 100  $\Omega\text{m}$ 。根据川 35 井、河湾场、中坝气田及区域地质资料显示,该电性层为厚度巨大的陆相中、新生界碎屑岩系。深度从 6 km 至约 10 km,为中低阻交互层,其高电阻率一般在 200  $\Omega\text{m}$  左右,该电性层为震旦系至中三叠统海相地层,以碳酸盐岩为主夹碎屑岩。碳酸盐岩比例大可能是引起电阻率升高的主要因素。

盆地基底为高电阻率层,在龙泉山隆起带和靠近龙门山构造带基底深度约为 12 km,其他位置基底深度约为 12~20 km;盆地整体结构体现为具有一定起伏的高阻基底稳定块体。该基底电性层包括太古宇—南华系,为变质岩及花岗岩。此外,在中江测区下方基底以上地层的不连续性,推断可能为一条东倾的壳内断层。

### 3.2 龙门山构造带

龙门山构造带发育多层次滑脱带与滑脱构造变形(汤良杰等,2008)。从二维大地电磁反演剖面可以看出,龙门山构造带存在向西倾的低阻带,与逆冲推覆构造样式相似。在定性解释的视电阻率断面和相位断面上,都对逆冲推覆构造有较好的反映。

龙门山构造带浅部表现为一系列中高阻块从西向东依次叠置,可能为产状低缓的铲状断层反映。10~14 km 深处存在一条延伸较长的西倾低阻带,对应西倾逆断裂,推测为茂汶断裂、北川断裂及安县断裂构成的龙门山逆冲断裂体系深部分布状态。深度小于 5 km 断裂倾角较陡,深度大于 5 km 断裂倾角逐渐变缓,并向深部延伸有合并趋势。超过 14 km 深度高阻基底向龙门山下连续延伸,超过龙门山构造带有 30 km,表现具有大距离逆冲推覆特点。

总之,剖面反演图同时揭示了龙门山逆冲带与四川盆地的结合关系,以及龙门山内部冲断构造的粗略特征。龙门山构造带是扬子地块与松潘-甘孜褶皱带相互作用的结果,上部松潘-甘孜褶皱带古生界高阻岩系推覆在稳定的四川盆地高阻基底之上,形成一个独特的逆冲叠置构造格局。

### 3.3 松潘-甘孜褶皱带

松潘-甘孜褶皱带是印支期变形形成的(许志琴等,1992; Burchfiel et al., 1995)。松潘-甘孜褶皱

带具有与四川盆地不同的电性结构,表现为上部高阻下部低阻的特征,即深度 15~20 km 以上是高阻块体特征,为古生界高阻岩系和前震旦系结晶基底,深度 15~20 km 以下为连续低阻体,推测为下地壳低阻层,这与以前认为壳内高导层位于 20 km 以下有明显差异。20~28 km 为深部相对高阻层,与盆地高阻块体相呼应,推测为花岗质基底,其下为壳内高导层。15~20 km 的壳内低阻层展布平缓,与龙门山构造带之下的西倾低阻带相连。

本次取得的 MT 资料与前人通过 MT、重力、深部地震、浅部地震、地表地质联合解释的成果宏观上是一致的,在龙门山构造带深部与前人解释成果极近似。但是在松潘-甘孜褶皱带,原来解释 19~27 km 深度范围的壳内高导层出现了分解,明显发育一个 15~20 km 的上部低阻层、20~28 km 的高阻层和大于 28 km 的壳内高导层。因此地表发育的茂汶断裂、北川-映秀断裂、安县断裂在 14 km 深度以下表现为茂汶断裂可能延伸到低阻层,而北川-映秀断裂、安县断裂向下合并为一条断裂,继续下延至大于 28 km 深度的壳内高导层。汶川地震主震震源深度在 14 km 左右,余震主要发生在北川-映秀断裂、安县断裂控制范围内,而茂汶断裂活动较小,也证实了本次取得成果的可信性。

在盆地范围深部高阻块体顶面在德阳附近明显下凹,最薄处不足 5 km,说明盆地深层花岗岩质块体并不规则。结合初步取得的碌曲-松潘 MT 资料显示深部高阻块体低面明显上凸,初步认为松潘-甘孜褶皱带若尔盖地块、川中地块本身在澄江期前都可能不是一个完整的块体,而是由晋宁—澄江期发育的多个岛弧经澄江运动拼贴合并造成的。龙门山构造带与松潘-甘孜褶皱带、四川盆地深部结构的不一致,一方面说明印支运动以来构造动力作用的强烈改造,也说明它们在形成之时就不是统一的地块,可能龙门山构造带在前震旦纪就曾经是川中地块和若尔盖地块之间的洋壳和深海沉积地域。

以龙门山构造带为界,东部四川盆地为上部较厚低阻沉积盖层之下存在连续稳定高阻基岩地块特征。龙门山构造带以西的松潘-甘孜褶皱带为上部古生界高阻岩层夹低阻碎块,下部(中下地壳)呈连续低阻层,推测可能存在一个连续稳定的壳内高导层。而龙门山构造带恰好是由于松潘-甘孜褶皱带逆冲推覆于四川盆地稳定地块西缘之上,形成了上部高阻及下部盆地基底高阻,中间夹西倾低阻逆冲断裂带的独特电性构造框架。

## 4 剖面结构及汶川地震

2008年5月12日汶川发生的 $M_s$  8.0地震使四川、甘肃和陕西等省遭受重大人员伤亡及财产损失,这次地震震级之大、余震之多、破裂之长(>300 km),山地灾害之严重世所罕见,令人震撼(张岳桥等,2008)。根据中国地震局台网中心和美国地质调查局公布资料,汶川地震的震中位于映秀镇西南2~3 km处,滑动面西倾,倾角 $40^\circ\sim 59^\circ$ ,属于逆冲断裂型地震。

印度板块持续向北推挤,青藏高原东缘物质向东运动,龙门山构造带应力长期积累,逆冲释放能量是导致汶川地震的主要原因。从松潘—中江大地电磁剖面龙门山构造带10~15 km深度存在一条延伸较长向西倾斜低阻带,向西该低阻带延伸至松潘—甘孜褶皱带的15~20 km的地下壳高导层,向东向上翘起。这个西倾低阻带与地表地质确定的逆冲断裂相连,是发震的主断裂,这与汶川地震主震的震源深度14 km及余震10~20 km比较吻合。松潘—甘孜褶皱带这个可能含水或地壳增温的低阻层是重要的滑脱界面,加之扬子地台向西强烈阻挡,沿西倾低阻带诱发了早已存在的后展式龙门山逆冲推覆构造带北川—映秀断裂。造成汶川地震主破裂沿北川—映秀断裂带发育,余震也主要沿该带分布,一直延伸到甘肃及陕西南部。由于受青藏区域应力和扬子地台的砥柱作用,松潘—甘孜褶皱带向北东右行错移,汶川地震产生的地表破裂构造和运动性质显示明显的分段特性,映秀—北川段以挤压逆冲为主,而北川以北段则伴有显著的右旋走滑分量。因此,龙门山逆冲断裂带发生的汶川地震具有特殊的大地构造背景和深部构造制约作用,而并不像著名的阿尔卑斯山及莫因逆冲构造一样,即具有大的逆冲推覆,也有显著的右行走滑分量,使得茂县—汶川断裂及北川—映秀断裂弯曲度不大。因此,汶川地震属于右行平移—逆冲断裂型地震。

## 5 结论

松潘—中江大地电磁剖面提供了震前龙门山深部40 km的细结构,对于龙门山北东及南西方向的变化及震后龙门山大地电磁深部结构的变化需要尽快开展研究,相信通过更进一步对龙门山深部细结构探测与研究,既可为研究青藏高原东缘新生代陆内造山的动力过程提供地球物理依据,同时对于汶川地震震源机理研究都具有重要意义。加强青藏高

原潜在的地震构造区带特别是人口密集的城镇地区地震综合研究及防震监测工作十分必要。

### 注 释

① 王绪本,贾进斗,赵锡奎,等.2000.松潘—利川—邵阳地质地球物理大剖面综合研究报告,1999~2000.石油天然气集团公司项目。

### 参 考 文 献

- 蔡学林,魏显贵,刘援朝,等.1996.论楔人造山作用——以龙门山造山带为例.四川地质学报,16(2):97~102.
- 崔作舟,陈纪平,吴琴.1996.花石峡—邵阳深部地壳的结构和构造.北京:地质出版社,7.
- 高锐.1997.青藏高原岩石圈结构与地球动力学的30个为什么.地质论评,43(5):460~464.
- 郭正吾,邓康龄,韩水辉,等.1996.四川盆地形成与演化.北京:地质出版社,90.
- 金文正,汤良杰,杨克明,等.2007.川西龙门山褶皱冲断带分带性变形特征.地质学报,81(8):1072~1080.
- 李立,金国元.1987.攀西裂谷带及龙门山断裂带地壳上地幔的大地电磁测深研究.物探与化探,11(3):161~169.
- 李勇,曾允孚.1995.龙门山逆冲推覆作用的地层标识.成都理工学院学报,22(2):1~10.
- 李勇,侯中健,司光影,等.2002.青藏高原东缘新生代构造层序与构造事件.中国地质,29(1):30~36.
- 李勇,周荣军,Densmore A L,等.2006.青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑—逆冲作用的地貌标志.第四纪研究,26(1):40~51.
- 林茂炳,苟宗海,王国芝,等.1996.龙门山中段地质.成都:成都科技大学出版社,142~177.
- 林茂炳,苟宗海,吴山,等.1997a.龙门山地质考察指南.成都:成都科技大学出版社,1.
- 林茂炳,苟宗海,王国芝,等.1997b.四川龙门山造山带造山模式研究.成都:成都科技大学出版社,133~161.
- 刘和甫,梁慧社,蔡立国.1994.川西龙门山冲断系构造样式前陆盆地演化.地质学报,68(2):101~117.
- 刘树根,罗志立.1990.四川龙门山冲断带中段岩石圈结构研究.石油与天然气地质,11(1):86~95.
- 刘树根,罗志立,赵锡奎,等.2003.中国西部盆山系统的耦合关系及其动力学模式——以龙门山造山带—川西前陆盆地系统为例.地质学报,77(2):177~186.
- 罗志立.1984.试论中国型(C型)冲断带及其油气勘探问题.石油与天然气地质,4(5):315~324.
- 罗志立,刘树根.2002.评述“前陆盆地”名词在中国中西部含油气盆地中的引用——反思中国石油构造学的发展.地质学报,48(4):398~407.
- 马晓冰,孔祥儒,刘宏兵,等.2005.青藏高原东北部地区地壳电性结构特征.地球物理学报,48(3):689~697.
- 孙洁,晋光文,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(增刊):173~180.
- 汤吉,詹艳,赵国泽,等.2005.青藏高原东北部玛沁—兰州—靖边剖面地壳上地幔电性结构研究.地球物理学报,48(5):1206~1216.

- 汤良杰, 杨克明, 金文正, 等. 2008. 龙门山冲断带多层次滑脱带与滑脱构造变形. 中国科学(D辑), 38(增刊): 30~40.
- 王椿镛, 吴建平, 楼海. 2006. 青藏高原东都壳幔速度结构和地幔变形场的研究. 地学前缘, 13(5): 349~359.
- 王运生, 王绪本, 荀量, 等. 2007. 松潘—邵阳大地电磁剖面深、浅部典型构造的解释. 南水北调与水利科技, 5(2): 70~77.
- 许志琴, 侯立玮, 王大可, 等. 1990. 中国西南部松潘—甘孜中生代碰撞型造山带的薄壳构造及前陆逆冲系. 地球学报, 20: 126~129.
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 1992. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社, 73.
- 詹艳, 赵国泽, 王继军, 汤吉, 等. 2005. 青藏高原东北缘海原弧形构造区地壳电性结构探测研究. 地震学报, 27(4): 431~440.
- 张岳桥, 董树文. 2008. 四川汶川  $M_s$  8.0 地震报道——向地震中死难的同胞致哀. 地质学报, 82(7): 1013~1015.
- 赵国泽, 汤吉, 詹艳, 等. 2004. 青藏高原东北缘地壳电性结构和地块变形关系的研究. 中国科学(D辑), 34(10): 908~918.
- 赵友年. 1983. 龙门山及其邻区大地构造若干问题. 天然气工业, 3(4): 50~56.
- Burchfiel B C, Chen Z, Liu Y, et al. 1995. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, Central China. International Geology Review, 37: 661~735.
- Densmore A L, Eillis M A, Li Yong, et al. 2007. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibet Plateau. Tectonics, 26. TC4005, doi: 10. 1029/2006TC001987.

## Deep Structure of Magnetotelluric Profile on Longmen Mts. and Its Relation to the $M_s$ 8.0 Wenchuan Earthquake

ZHU Yingtang<sup>1,2)</sup>, WANG Xuben<sup>1,2)</sup>, YU Nian<sup>1,3)</sup>, GAO Shuquan<sup>1)</sup>, LI Kun<sup>2)</sup>, SHI Yanjun<sup>1)</sup>

1) Key Laboratory of Earth Exploration and Information Techniques of MOE, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059;

2) State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, College of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059;

3) China Railway Eryuan Engineering Group CO. LTD, Chengdu, 610031

### Abstract

The Longmenshan Fault Zone is located in the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. By processing, interpreting and inverting the magnetotelluric observation data which were obtained in 2007 from the Songpan-Zhongjiang profile through the middle of Longmenshan tectonic zone, this paper reveals 30 km deep crust architecture of Songpan-Ganze foldbelt, Longmen Mts and Western Sichuan foreland basin, and finds the west-inclined the high-conductivity layer in the crust of 10~20 km of Longmen Mts. , it is estimated to deep conductivity characteristics of thrustbelt structure in Longmen Mts. . Sichuan basin, the east of Longmen Mts. , which has the characteristics of under the upper thick low resistance sedimentary is the stable high resistance bedrock block. The west of it is Songpan-Ganze foldbelt, which in upper Paleozoic is high resistance rock mingled with low resistance fragments, the lower crust represent continuous low resistance, to speculate there may be a continuous and stable high-conductivity layer shell. Resulting from Songpan-Ganze foldbelt thrust in the Sichuan Basin stability block, Longmen Shan Fault Zone formed opportunely the unique geoelectrical structure which is a high resistance in the upper and lower part of high resistance basin basement, and mingling with low resistance zone in the middle. It is that the Wenchuan earthquake belongs to the dextral-reverse faulting type.

**Key words:** low resistance zone; thrustbelt structure; magnetotelluric sounding; Wenchuan earthquake; Longmen Mts.