

王绪本, 张刚, 周军等. 2018. 龙门山构造带壳幔电性结构特征及其与汶川、芦山强震关系. 地球物理学报, 61(5):1984-1995, doi:10.6038/cjg2018M0233.

Wang X B, Zhang G, Zhou J, et al. 2018. Crust and upper mantle electrical resistivity structure in the Longmenshan tectonic belt and its relationship with Wenchuan and Lushan earthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 61(5):1984-1995, doi:10.6038/cjg2018M0233.

## 龙门山构造带壳幔电性结构特征及其 与汶川、芦山强震关系

王绪本<sup>1</sup>, 张刚<sup>2\*</sup>, 周军<sup>3</sup>, 李德伟<sup>1</sup>, 罗威<sup>1</sup>, 胡元邦<sup>4</sup>, 蔡学林<sup>4</sup>, 郭紫明<sup>1</sup>

1 地球勘探与信息技术教育部重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

2 西南科技大学环境与资源学院, 四川绵阳 621010

3 电子科技大学资源与环境学院, 成都 610041

4 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

**摘要** 青藏高原东缘龙门山构造带是研究青藏高原地壳物质向东侧向挤出的焦点地区. 为探索龙门山构造带活动构造特征及其与发震构造的关系, 本文通过布置垂直龙门山构造带南段芦山地震震源区的大地电磁测深剖面, 运用多种数据处理手段, 得到研究区可靠的电性结构, 并通过与已有龙门山中段和北段剖面进行对比分析. 研究表明: (1) 青藏高原东缘岩石圈存在明显的低阻异常带——松潘岩石圈低阻带, 该低阻异常带沿龙日坝断裂—岷山断裂—龙门山后山断裂分布, 形成松潘—甘孜地块向扬子地块俯冲的深部动力学模式, 通过统计研究区的历史强震, 发现震源主要沿低阻异常带东侧分布, 同时, 低阻异常带也是低速度、低密度异常带, 松潘岩石圈低阻带可能是扬子地块的西缘边界; (2) 青藏高原物质东移过程中, 受到克拉通型四川盆地的强烈阻挡, 龙门山构造带表层块体和物质发生仰冲推覆, 表现为逆冲推覆特征的薄皮构造, 中下地壳和上地幔顶部物质向龙门山构造带岩石圈深部俯冲, 印支运动晚期, 扬子古板块持续向华北板块俯冲, 在上述构造运动作用下, 呈现出刚性的上扬子地块西缘高阻楔形体向西插入柔性青藏块体的楔状构造; (3) 根据电性结构推断, 芦山地震受到深部上里隐伏壳幔韧性剪切带向上扩展的影响, 构成芦山地震的深部主要动力来源; 汶川地震的发生, 在龙门山南段形成应力加载区, 是触发或加快芦山地震孕育发生的另一个动力来源.

**关键词** 龙门山构造带; 汶川地震; 芦山地震; 大地电磁; 电性结构

doi:10.6038/cjg2018M0233

中图分类号 P319

收稿日期 2018-04-10, 2018-04-30 收修定稿

### Crust and upper mantle electrical resistivity structure in the Longmenshan tectonic belt and its relationship with Wenchuan and Lushan earthquakes

WANG XuBen<sup>1</sup>, ZHANG Gang<sup>2\*</sup>, ZHOU Jun<sup>3</sup>, LI DeWei<sup>1</sup>, LUO Wei<sup>1</sup>,  
HU YuanBang<sup>4</sup>, CAI XueLin<sup>4</sup>, GUO ZiMing<sup>1</sup>

1 Key Lab of Earth Exploration & Information Techniques of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Sichuan Mianyang 621010, China

3 University of Electric Science and Technology, Chengdu 610041, China

4 College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract** Longmenshan tectonic belt, located at the eastern border of Qinghai-Tibet Plateau, is

**基金项目** 国家自然科学基金(91755215, 41674078, 41704105)资助.

**第一作者简介** 王绪本, 男, 1956年生, 教授, 博士生导师, 主要从事大地电磁测深科研教学工作. E-mail: wxb@cdut.edu.cn

\* **通讯作者** 张刚, 男, 1987年生, 讲师, 主要从事电磁法科研教学工作. E-mail: zg@swust.edu.cn

an important area for studying the eastward lateral extrusion of crustal matter in Qinghai-Tibet Plateau. In order to explore the active tectonic features of Longmenshan tectonic belt and its relation with seismogenic structure, we arrange a magnetotelluric sounding profile at the focal area of Lushan Earthquake in the southern section of the vertical Longmenshan tectonic belt, gains a reliable electric structure of the research area by using various data processing methods and makes a comparison of the magnetotelluric sounding profile of the middle section and north section of Longmenshan. The research shows: (1) A clear low-resistivity abnormal zone exists in the eastern Qinghai-Tibet Plateau, which distribute along Longriba fault-Minshan fault-back range faults at longmenshan fault. This low-resistivity abnormal zone forms a deep dynamics mode which features the subduction of Songpan-Garzê block to Yangtze block. Through statistics analysis of strong earthquakes in the research area in history, it is found that the earthquake focus is mainly distributed along eastern of the low-resistivity zone. Meanwhile, low-resistivity abnormal zone is also a low-seismic velocity and low-density abnormal zone. The lithosphere at the western border of Yangtze Block is bounded by the low-resistivity abnormal zone; (2) During the eastward movement of substances in the Qinghai-Tibet Plateau, the mantle rock and substances, blocked by the Sichuan Basin, get obducted and thrust. The thin-skinned structure, featuring over-thrust, and substances from the middle-lower crust and the top of the upper mantle subduction deeply to the lithosphere of the Longmenshan tectonic belt. At the later stage of the Indosinian movement, Yangtze ancient block continues to subduct to the Northern China block, and, under the impact of the above-mentioned structure movement, forms wedge structure brought about by the westward breaking of high-resistivity wedge in the western border of rigid upper Yangtze block into the soft Qinghai-Tibet Plateau block; (3) According to the electrical resistivity structure, the affect of expansion of concealed crust-mantle ductile shear zone in the deep part may be one of the major power sources in the deep part of Lushan earthquake. The occurrence of Wenchuan earthquake, caused a stress loading area in south of Longmenshan structure zone, may be another power source to trigger or accelerate the Lushan earthquake gestation and occurrence.

**Keywords** Longmenshan tectonic zone;  $M_w7.9$  Wenchuan earthquake;  $M_w6.6$  Lushan earthquake; Magnetotelluric sounding; Electrical resistivity structure

## 0 引言

龙门山断裂带处于扬子地块和松潘—甘孜褶皱带的分界线上,既是青藏高原的东界又是四川盆地的西缘,属于松潘—甘孜造山带的前缘冲断带(Burchfiel et al., 2008; Toda et al., 2008). 龙门山构造带是世界最陡峭的大陆断崖陡坡带之一(Tapponnier et al., 2001),同时也是莫霍界面的陡降带(楼海等, 2010; 朱介寿, 2008). 2008年,  $M_w7.9$ 汶川地震(简称汶川地震)发生在龙门山断裂带中段,仅仅不到5年时间,与汶川地震相距约85 km的龙门山断裂带南段于2013年4月20日又发生了  $M_w6.6$ 芦山地震(简称芦山地震). 地震发生后,国内外学者相继从地表地质、地球物理、应力场等方面对两次地震进行

了系统深入的研究(Burchfiel et al., 2008; Toda et al., 2008; Xu et al., 2009; 王卫民等, 2013; 徐锡伟等, 2013a, 2013b; 杨宜海等, 2015),得到了诸多重要研究成果. 野外地质调查表明,汶川地震的发震断裂为北川—映秀主中央断裂带,并使北川—映秀和彭灌断裂发生地表破裂(Xu et al., 2009);芦山地震并没有发现明显的地表破裂带(徐锡伟等, 2013b),关于芦山地震的发震断裂是山前断裂还是盲断裂还有待进一步探讨. 基于深反射地震(郭晓玉等, 2014)、地震层析成像(Wang Z et al., 2014)和电性结构特征(Wang X B et al., 2014; 王绪本等, 2013)已证实龙门山中北段岩石圈存在楔状构造,但是南段是否也具有类似的楔状构造还有待讨论. 电性结构研究方面,横跨地震震源区的宽频大地电磁测深结果得到了两次地震的孕震构造环境(詹艳等, 2014;

Wang X B et al., 2014; 詹艳等, 2013; 王绪本等, 2013; Zhao et al., 2012),受制于宽频大地电磁的低频响应局限,其勘探深度有限,而长周期大地电磁测深有着更低的响应频率,其勘探深度可以达到上地幔。

地壳深部物质组成、地壳结构是地震孕育的母体(徐锡伟等,2013a),大地电磁测深法是探测活动构造和地震深部地质构造的有效手段(Bai et al., 2010; Wang X B et al., 2014; Zhao et al., 2012; 魏文博等, 2010; 詹艳等, 2013). 为此,我们运用大地电磁测深法来探测震源区的深部电性结构,并结合邻区大地电磁剖面,研究震源区及相邻区域的深部构造环境并探讨其与强震震源的关系。

### 1 资料采集及数据处理

芦山地震发生后,项目组在龙门山构造带南段布设了垂直断裂带并跨过震源区的 NW—SE 向大地电磁剖面,剖面由 NW 至 SE 始于若尔盖地块,横

跨龙门山构造带、川西前陆拗陷带,止于川中地块,全长 250 km,沿剖面共布设 63 个宽频大地电磁(MT)测点,以及 17 个长周期大地电磁测点(LMT),MT 和 LMT 在断裂带等复杂构造附近进行了加密(图 1)。野外工作严格按照相关行业技术规程执行,获得了质量可靠的数据。

在 MT 数据处理中,使用 SSMT-2000 软件将原始时间序列进行处理,运用 Robust 稳健估计方法(Egbert and Booker, 1986)将多组功率谱进行筛选计算得到初始张量阻抗,再经 MT-Editor 软件初步编辑,得到 MT 测深曲线.LMT 资料采用国内外通用的 PRC\_MTMV 软件(Smirnov, 2003; Varentsov et al., 2003)进行数据处理,得到 LMT 测深曲线. 利用上述方法得到的 MT 频段为 320 Hz~2941 s,LMT 频段为 10 s~16384 s. 利用自主研发的软件,将两段资料进行拼接合成,得到 320 Hz~16384 s 全频段的张量阻抗数据。

图2为相位张量分解(Caldwell et al., 2004)得

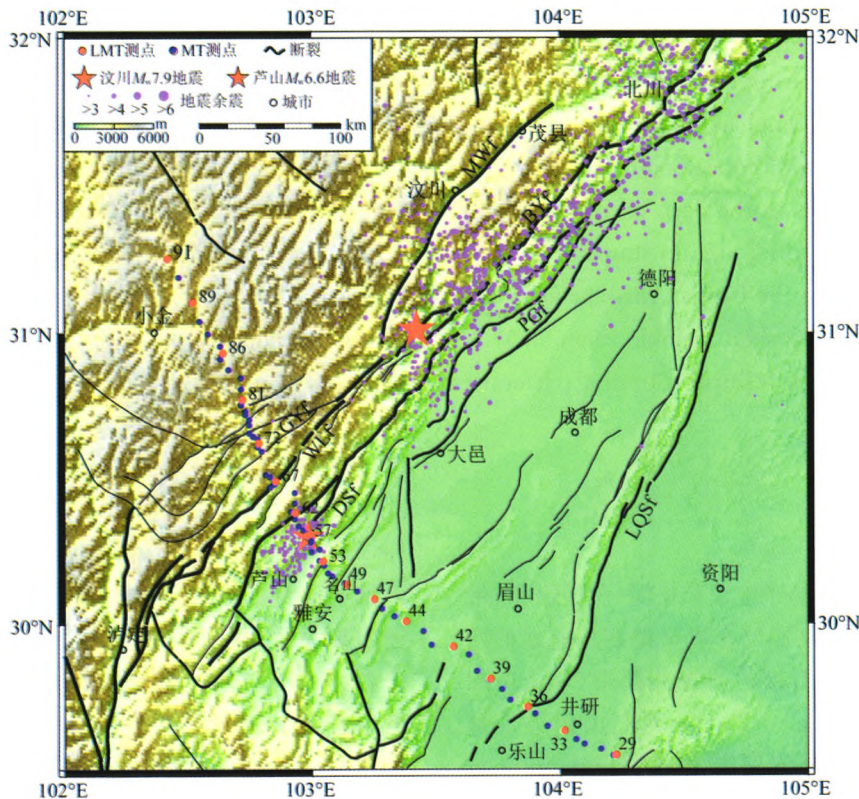


图 1 大地电磁测点布置图

MWf: 茂汶断裂带, BYf: 北川—映秀断裂带, PGf: 彭灌断裂带, LQSf: 龙泉山断裂带, GYf: 耿达—永福断裂, WLf: 五龙断裂, DSf: 大川—双石断裂。

Fig. 1 Locations of the LMT and MT sounding sites

MWf: Maoxian-Wenchuan fault, BYf: Beichuan-Yingxiu fault, PGf: Penxian-Duijiangyan fault, LQSf: Longquanshan fault, GLf: Gengda-Yongfu fault, WLf: Wulong fault, DSf: Dachuan-Shuangshi fault.

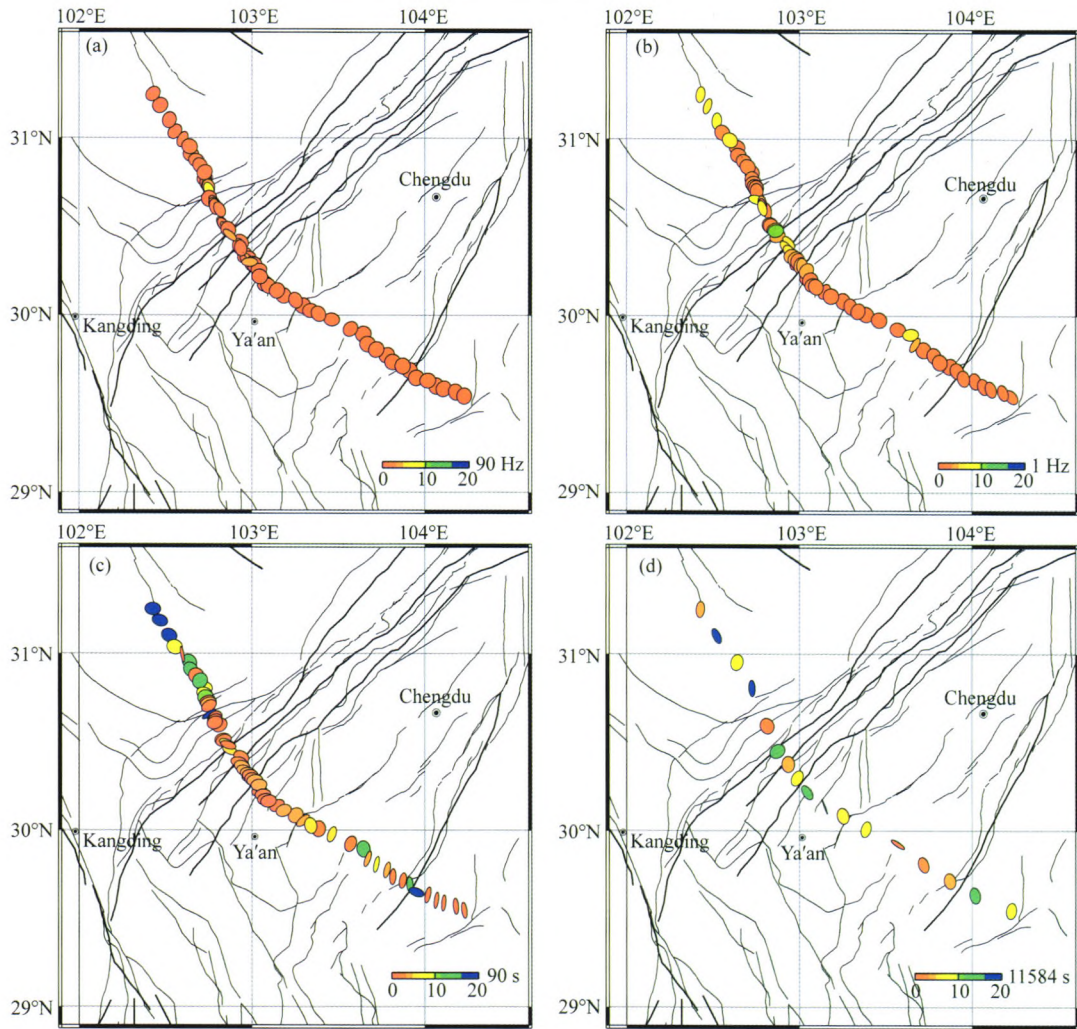


图 2 相位张量分解得到的沿测线椭圆分布特征及二维偏离度(90 Hz、1 Hz、90 s、11584 s)

Fig. 2 The elliptical characteristics and skewness along the profile calculated by the phase tensor decomposition (90 Hz, 1 Hz, 90 s, 11584 s).

到沿测线各测点的相位张量椭圆分布特征及其二维偏离度,由图可知,在高频段(90 Hz、1 Hz)大部分测点的二维偏离角都小于 $5^\circ$ ,仅在测线的北西向松潘—甘孜地块少数几个测点的二维偏离度在 $5^\circ \sim 10^\circ$ 之间;在中频(90 s)发现大部分测点的二维偏离角在 $5^\circ$ 以内,沿测线少部分测点的二维偏离角较大,这些二维偏离度较大的测点主要分布于测线北西端位于松潘—甘孜地块,以及南东向位于盆地内的几个测点;通过高频和中频的二维偏离角分析可知,沿测线中-浅部地下结构具有明显的二维性质。低频段(11584 s)展示了所布置 17 个 LMT 测点的椭圆分布特征和二维偏离度,发现沿测线部分测点的二维偏离角大于 $5^\circ$ ,在松潘—甘孜地块的两个测点甚至大于 $20^\circ$ ,相比浅部,沿测线深部结构具有较强的三维特征,说明深浅构造具有差异性。

利用玫瑰花图对全部测点经相位张量分解得到的主轴方位角进行统计(图 3),得到其优势方向约

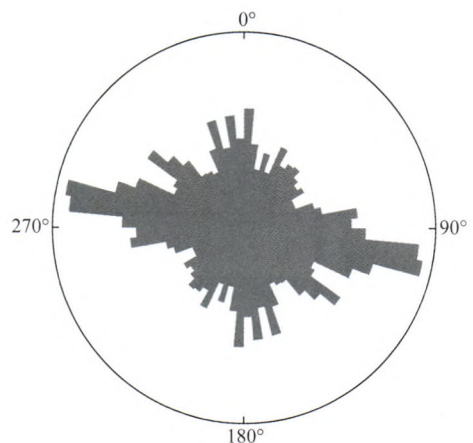


图 3 沿剖面全部测点的主轴方位角

Fig. 3 The Rose diagram shows the electrical strike by phase tensor decomposition

为 $100^\circ$ ,并将阻抗张量按照优势方位角方向进行旋转,得到旋转后的测深曲线.使用 Winglink 软件所含非线性共轭梯度(NLCG)(Rodi and Mackie, 2001)

模块进行二维反演,通过对比 TE、TM 和 TE+TM 模式的反演结果,结合理论模型的模拟分析表明, TM 模式反演对深部电性结构更符合地质构造特征,本文采用以 TM 模式反演为主的方案建立深部壳幔电性结构模型.反演采用电阻率为 100 Ωm 的均匀半空间为初始模型,设置视电阻率的本底误差为 10%、阻抗相位的本底误差为 5%,使用多个正则化因子进行多次反演试算,利用 L 曲线图法(Hansen, 1992; 詹艳等, 2014)得到正则化因子 $\tau=30$ 作为最终反演结果.图 4 为大地电磁剖面测深曲线测量值与响应值的对比图,左图为视电阻率,右图为阻抗相位断面图,上图为实际资料测量值,下图为响应值,大部分数据拟合较好,反演误差 RMS 为 4.23.小金—乐山剖面的壳幔电性结构模型见图 5.

## 2 深部电性结构特征

跨芦山地震震源区 NW—SE 向电性结构如图 5 所示,根据测线二维电性结构特征划分主要构造块体的界线与区域构造单元界线基本重合.

### (1) 若尔盖地块

沿剖面耿达—永福断裂带( $F_2$ , 龙门山后山断裂带)以北为若尔盖地块,地表主要为二叠纪—三叠纪海相沉积.电性结构上,北面 0~20 km 为高阻体,电阻率大于 1000 Ωm,往南高阻体深度逐渐减小,至碛碛附近趋向地表.高阻体下方为一明显的连通壳

幔的低阻带,低阻带中央电阻率小于 10 Ωm,边缘为几十欧姆米,将其称为小金—丹巴壳幔低阻带,小金—丹巴壳幔低阻带在剖面深部北侧介于 20~90 km 之间,往南逐渐抬升,低阻带范围逐渐减小,至碛碛附近逐渐连通至地表,形成楔入地表的一低阻楔形体.小金—丹巴壳幔低阻带及其楔入地表楔形结构与上部地壳高阻体在碛碛附近形成高低阻分界,分别对应夹金山断裂带( $F_1$ )与耿达—永福断裂带( $F_2$ ).小金—丹巴壳幔低阻带以下为一高阻体,电阻率为几百至几千欧姆米,小金—丹巴壳幔低阻带与其下高阻块体之间形成切割莫霍面并使莫霍面错位的达维壳幔韧性剪切带( $F_{12}$ ).

### (2) 龙门山构造带

剖面耿达—永福断裂带( $F_2$ , 龙门山后山断裂带)与大川—双石断裂带( $F_5$ , 龙门山前山断裂带)之间为龙门山构造带,龙门山构造带为一逆冲推覆断裂,地层复杂,褶皱发育,以古生代地层为主.电性结构上,0~45 km 为一尖端指向北西端的楔状高阻块体,电阻率大于 1000 Ωm,40~60 km 为一中低阻过渡带,与莫霍面深度一致,中低阻过渡带以下为高阻块体,几百至几千欧姆米,与若尔盖地块下部高阻块体连通.从整体来看,龙门山构造带为一高阻结构,将其称为龙门山南段壳幔高阻块体.与龙门山构造带已有的其他大地电磁剖面对比研究(Wang X B et al., 2014; Zhao et al., 2012; 郭紫明, 2015; 王绪本等, 2013; 詹艳等, 2014; 张乐天等, 2012),结果

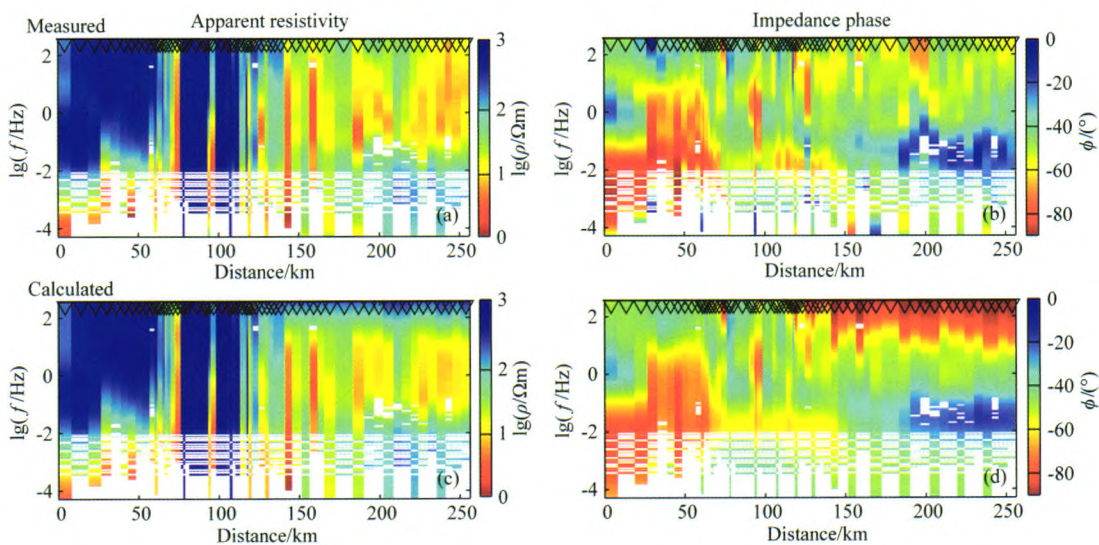


图 4 视电阻率和阻抗相位实测断面图与响应断面图对比

上图:测量值断面图,下图:响应值断面图,左列:视电阻率断面图,右列:阻抗相位断面图.

Fig. 4 Fitness of the 2D calculated and measured responses

Top row shows the pseudo-sections for measured data, and bottom row shows the response of the 2D inversion model.

Left column and right column show the pseudo-sections for apparent resistivity and impedance phase, respectively.

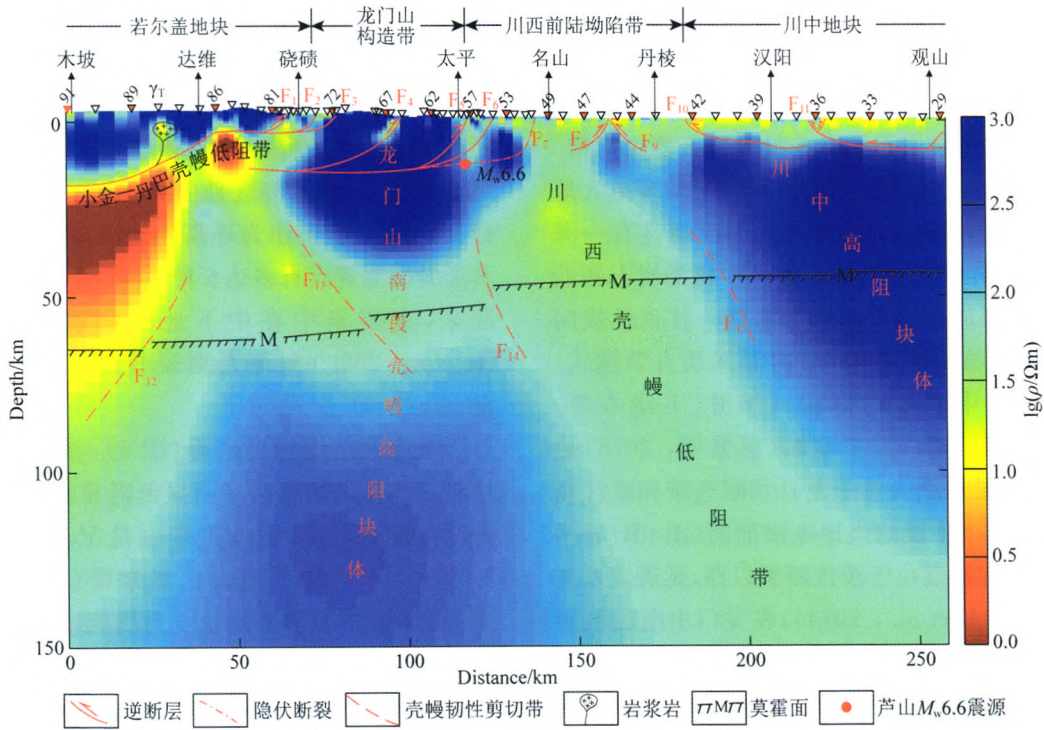


图 5 跨芦山地震震源区壳幔二维电性结构

F<sub>1</sub>: 夹金山断裂带; F<sub>2</sub>: 耿达—永福断裂带(后山断裂带); F<sub>3</sub>: 陇东—锅巴岩断裂带; F<sub>4</sub>: 五龙断裂带(中央断裂带); F<sub>5</sub>: 大川—双石断裂带(前山断裂带); F<sub>6</sub>: 碧峰峡断裂带; F<sub>7</sub>: 名山隐伏断裂带; F<sub>8</sub>: 汉王场断裂带; F<sub>9</sub>: 蒲江—新津断裂带; F<sub>10</sub>: 三苏场断裂带; F<sub>11</sub>: 龙泉山断裂带; F<sub>12</sub>: 达维壳幔韧性剪切带; F<sub>13</sub>: 硃碛壳幔韧性剪切带; F<sub>14</sub>: 上里壳幔韧性剪切带; F<sub>15</sub>: 汉阳壳幔韧性剪切带. 莫霍面数据由深反射地震获得(王帅军等, 2015), 壳幔韧性剪切带源于蔡学林等(2008b).

Fig. 5 2D crust and upper mantle resistivity electrical structure along the profile

F<sub>1</sub>: Jiajinshan fault, F<sub>2</sub>: Gengda-Yongfu fault; F<sub>3</sub>: Longdong-Guobayan fault; F<sub>4</sub>: Wulong fault; F<sub>5</sub>: Dachuan-Shuangshi fault; F<sub>6</sub>: Bifengxia fault; F<sub>7</sub>: Minshan blind fault; F<sub>8</sub>: Hanwangchang fault; F<sub>9</sub>: Pujiang-Xinjin fault; F<sub>10</sub>: Sansuchang fault; F<sub>11</sub>: Longquanshan fault; F<sub>12</sub>: Dawei crust-mantle ductile shear zone; F<sub>13</sub>: Qiaoqi crust-mantle ductile shear zone; F<sub>14</sub>: Shangli crust-mantle ductile shear zone; F<sub>15</sub>: Hanyang crust-mantle ductile shear zone. Moho data from deep seismic reflection (Wang et al., 2015), lithosphere ductile shear zone data after Cai et al. (2008b).

表明, 龙门山构造带中段及南段整体表现为一壳幔高阻块体结构. 若尔盖地块小金—丹巴壳幔低阻带物质在龙门山南段壳幔高阻块体的阻挡作用下, 一方面发生仰冲并在硃碛附近出露地表, 对应龙门山构造带一系列由北向南的逆冲推覆断裂带, 另一方面发生俯冲作用并切割莫霍面形成硃碛壳幔韧性剪切带(F<sub>13</sub>)和上里壳幔韧性剪切带(F<sub>14</sub>).

(3) 川西前陆拗陷带

剖面大川—双石断裂带(F<sub>5</sub>)与三苏场断裂带(F<sub>10</sub>)之间为川西前陆拗陷带, 该区地表地层为中生界-新生界. 电性结构整体表现为一低阻带, 电阻率为 10~100 Ωm, 将其称为川西壳幔低阻带. 川西前陆拗陷带东南一带, 电阻率为 100~1000 Ωm, 高阻块体以上地表 0~10 km 为低阻沉积层, 电阻率为几至几十欧姆米. 2013 年芦山 M<sub>w</sub>6.6 地震震源区位于龙门山西南端壳幔高阻块体与川西壳幔低阻带

结合带靠近壳幔高阻块体一侧(图 5). 根据电性结构推断震源区位于大川—双石断裂与名山隐伏断裂带之间的深部延伸的端点, 受到深部上里隐伏的壳幔韧性剪切带(图 5, F<sub>14</sub>)向上扩展的影响, 是芦山地震的动力来源之一.

(4) 川中地块

剖面三苏场断裂带(F<sub>10</sub>)东南为川中地块, 地表为中生界-新生界地层. 电性结构上, 地表 0~10 km 为低阻沉积层, 电阻率为几至几十欧姆米, 与川西前陆拗陷带上部低阻沉积层相连, 对应地表的中生界-新生界沉积地层, 并在沉积层下部形成三苏场断裂带(F<sub>10</sub>)、龙泉山断裂带(F<sub>11</sub>)等延伸至地下近平缓的滑脱面. 低阻沉积层以下整体为高阻块体, 电阻率为几百至几千欧姆米, 将其称为川中高阻块体. 川中高阻块体与川西壳幔低阻带相接部位存在一切穿莫霍面的韧性剪切带——汉阳壳幔韧性剪切带(F<sub>15</sub>).

### 3 讨论

#### 3.1 青藏高原东缘岩石圈存在松潘岩石圈低阻带

通过对已完成的横跨龙门山构造带的多条大地电磁测深剖面进行对比,发现这些剖面都具有一深切岩石圈的较明显的低阻异常带——松潘岩石圈低阻带(图 6a),形成青藏高原东缘松潘—甘孜地块向扬子地块俯冲(岩石圈低阻带)的深部动力学模式.其中跨龙门山中北段的碌曲—合川(王绪本等, 2013,图 6A)和松潘—汉中剖面(郭紫明, 2015)显示该低阻异常带在地表位于龙日坝断裂带和岷江断裂带之间,龙门山中段的大地电磁剖面(图 6B)显示该低阻异常带在地表位于茂汶断裂以西,延展宽度约 60 km(Wang X B et al., 2014),在龙门山南段该异常带对应于图 5 中的碛磧壳幔韧性剪切带( $F_{13}$ ),在地表对应于夹金山断裂带( $F_1$ )以东,延展宽度约 30 km(图 5,图 6C).国内其他研究团队相邻大地电磁剖面(孙洁等, 2003,图 6D)也发现了该低阻异常.剩余重力异常表明龙门山北段深部的重力异常梯度带不是沿龙门山断裂带,而是沿岷山—龙门山分布(李军等, 2017),深反射地震表明扬子地块结晶基底西段跨过了龙门山断裂延伸至龙日坝断裂带(郭晓玉等, 2014),P 波和 S 波速度结构在北段的分界带位于龙门山以西(Wang et al., 2015).若将上述岩石圈低阻异常带相连,可以得到低阻异常带的平面展布情况(图 6a),在龙门山中段和南段,松潘岩石圈低阻带位于后山断裂带以西,与龙门山呈近乎平行关系,而在龙门山中北段,松潘岩石圈低阻带与龙门山构造带呈斜交而非平行关系(图 6a),松潘岩石圈低阻带由北至南总体沿龙日坝断裂—岷江断裂—龙门山后山断裂分布.将研究区历史强震进行平面投影,可以发现大部分震源正好位于岩石圈低阻异常带东侧,由于区域性的深大断裂往往是大多构造单元的划分界线,不同的构造单元往往具有不同的电性结构特征(王绪本等, 2013; 詹艳等, 2013; 张乐天等, 2012),而强震与大地震受区域内活动断裂带的控制(易桂喜等, 2008),说明上述深切岩石圈的低阻异常带可能正是松潘—甘孜地块和扬子地块的深部分界带.

#### 3.2 青藏高原东缘岩石圈普遍存在楔状构造

青藏高原的物质东移是高原在隆升过程中保持重力均衡的主要原因这一说法得到了大多数学者们的广泛支持,但对物质的运移方式上有不同看法(白

登海等, 2011),目前主要观点有侧向挤出模式(Tapponnier et al., 1982)和下地壳流模式(Royden et al., 1997)两种,这两种物质运移模式从 20 世纪 80 年代开始学术论战,逐渐使学者们将关注的重点从高原内部转向构造独特的东缘.而青藏高原东缘龙门山构造带作为环高原周缘最为陡峭的地形,其隆升机制观点有多达 6 种(Guo et al., 2013),归纳起来,主要集中在中下地壳物质流(Clark and Royden, 2000)和地壳缩短变形机制(Judith and Shaw, 2009).

从电性结构特征来看(图 5),测线所经过区域松潘—甘孜地块存在一明显低阻异常带——小金—丹巴壳幔低阻带,该低阻带也是  $V_s$  异常带( $2.8 \sim 3.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )和高泊松比异常带( $0.3 \sim 0.35$ )(朱介寿等, 2017),表明小金—丹巴壳幔低阻带物质存在部分熔融.熔融物质使上下地壳发生解耦并作为动力学边界,在青藏高原物质东移过程中,地壳表层岩块和物质沿壳内高导层做水平运动(吕江宁等, 2003),当运移至现今的龙门山构造带时,受到高阻龙门山和四川盆地的强烈阻挡,表层岩块和物质发生仰冲推覆,表现为逆冲推覆特征的薄皮构造,并在浅地表形成了不同规模的小型次级推覆构造单元,中下地壳和上地幔顶部物质向龙门山构造带岩石圈深部俯冲,印支运动晚期,东部扬子板块持续以水平形式,由南东向北西逐渐楔入到龙门山造山带深部(鲁人齐等, 2010),在上述构造运动作用下,呈现出刚性的上扬子地块西缘高阻楔形体向西插入柔性青藏块体的楔状构造(图 5),从而引起龙门山造山带的形成和隆升.并相应出现地壳均衡调整,引起龙门山造山带上地壳物质沿壳内软层及主滑脱拆离带,向川西前陆盆地边缘呈脉动式伸展拆离—逆冲推覆,造成深部岩石剥露,以后展式扩展型式,逐渐形成中央逆冲—推覆体带,以及川西前陆沉积盆地和前展式扩展变形(蔡学林等, 1996).跨龙门山构造带的其他地球物理资料和剖面与本文测线所得到的电性结构模型可以类比(李军等, 2017; Wang et al., 2015; 詹艳等, 2013).电性结构研究表明,不只是在龙门山南段岩石圈存在楔状构造,龙门山中段(Wang X B et al., 2014; Zhao et al., 2012)、北段(王绪本等, 2013; 张乐天等, 2012)岩石圈也都存在楔状构造,岩石圈楔状构造或鳄鱼构造是碰撞造山带岩石圈中上部最基本的结构样式(蔡学林等, 2008a).总的说来,汶川  $M_w 7.9$  地震和芦山  $M_w 6.6$  地震的发生直接展示了龙门山断裂带晚新生代以来的

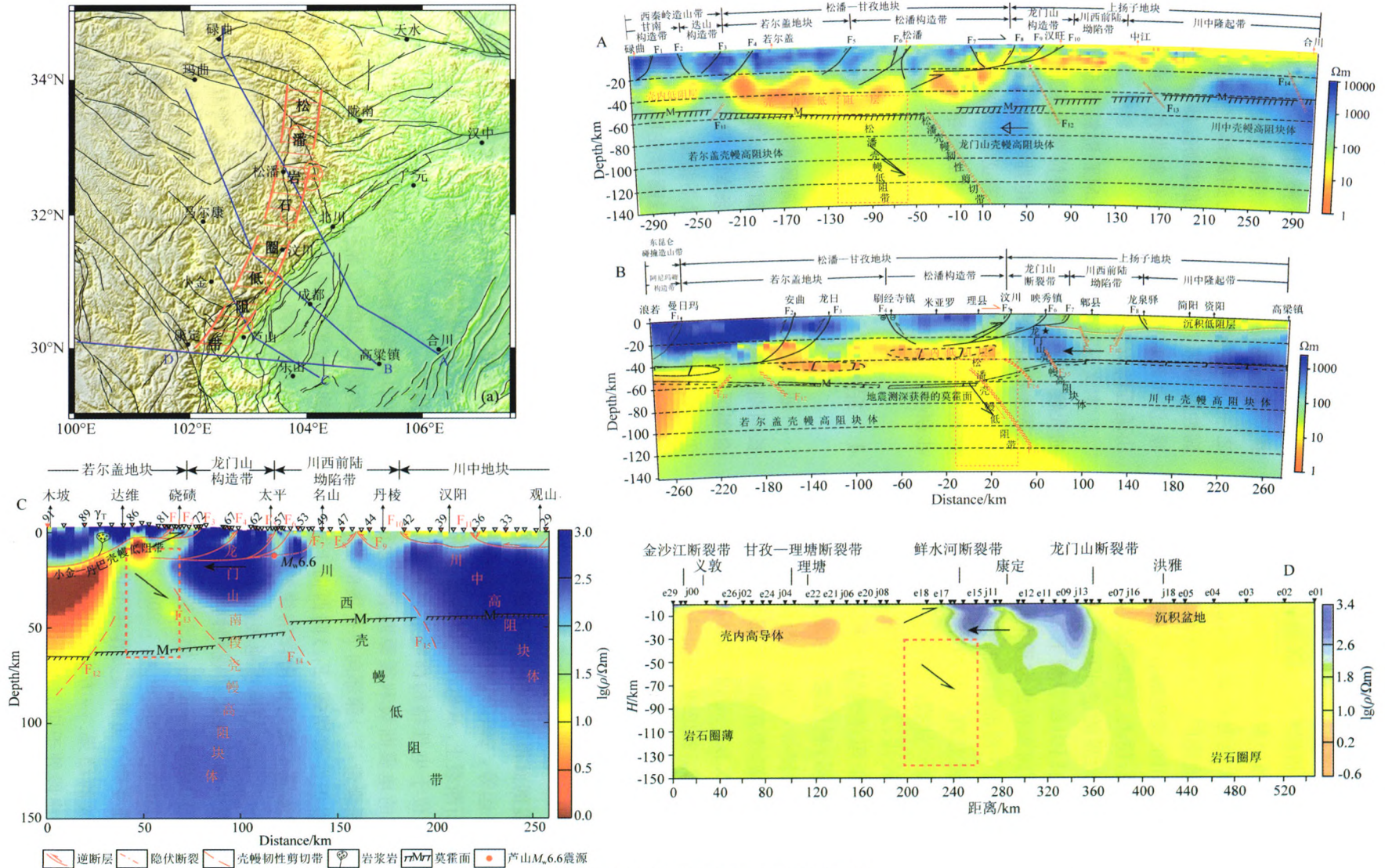


图6 青藏高原东缘松潘岩石圈低阻带示意图

(a) 大地电磁剖面及岩石圈低阻异常带位置，其中红色栅栏部分为岩石圈低阻异常带位置，A 碌曲—合川(王绪本等, 2013)、B 玛曲—高梁镇(Wang X B et al., 2014)、C 小金—乐山(本文图5)、D 塘坝—资中(孙洁等, 2003)中红色虚线表示沿测线的低阻带位置。

Fig.6 Songpan lithosphere low resistivity zone at eastern Qinghai-Tibet Plateau

构造缩短过程.

### 3.3 汶川 $M_w 7.9$ 与芦山 $M_w 6.6$ 地震孕震构造探讨

根据龙门山构造带南段电性结构特征分析(图 5), 与龙门山构造带中段相似(Wang X B et al., 2014; Zhao et al., 2012), 松潘—甘孜地块为高-低-高的三层电性结构, 而四川盆地为低-高的两层电性结构; 松潘—甘孜地块中下地壳广泛发育的低阻层是中下地壳物质在压力的作用下发生部分熔融塑性的结果, 它可能形成滑脱层, 使上、下地壳发生解耦, 上地壳沿壳内低阻层顶部边界的逆冲推覆, 使龙门山叠置于扬子板块之上; 龙门山断裂带下方存在高阻刚性体, 在青藏高原物质向东挤出过程中, 由于受四川盆地的强烈阻挡, 有利于深部能量的积累, 对汶川地震和芦山地震破裂过程具有明显的控制作用. 不同的是, 龙门山南段松潘—甘孜地块地表高阻体埋深比龙门山中段的埋深较浅; 芦山地震发生在龙门山构造带的高阻块体与低阻体的结合部位, 而汶川地震发生在高阻块体内部, 利用宽频大地电磁探测的结果也与本文相似(詹艳等, 2013); 相对而言, 南段剖面显示川西前陆拗陷带存在一明显的壳幔低阻带, 而中段剖面(Wang X B et al., 2014)与北段剖面(王绪本等, 2013; 张乐天等, 2012)川西前陆拗陷带的壳幔低阻带不明显, 速度结构也显示在南段的盆地西部岩石圈存在明显的低速异常(Wang et al., 2015).

基于芦山地震主震重新定位显示  $M_w 6.6$  芦山地震震源位于大川—双石断裂的东侧(房立华等, 2013); 深反射地震剖面得到大川—双石断裂为西倾的逆冲断层(王夫运等, 2015), 也表明芦山地震震源不在大川—双石断裂上. 从电性结构特征分析(图 5), 芦山地震震源位于电性结构梯级带上并靠近高阻一侧, 芦山地震的地震断裂和震源断裂可能位于西倾的名山隐伏断裂带( $F_7$ )深部向下扩展的端点以及东倾的上里壳幔韧性剪切带( $F_{14}$ )向西向上扩展的端点. 汶川地震造成了龙门山南段前缘的雅安和邛崃等地发生 16~28 mm 的同震地表沉降(项目组国家重大科学工程中国地壳运动观测网络, 2008), 库仑应力显示龙门山断裂带南段处于应力加载区(Parsons et al., 2008; Toda et al., 2008). 因此, 推断芦山地震可能受两个方面应力作用下的能量堆积到一定程度释放的结果. 一方面, 汶川地震发生时, 龙门山断裂带南段处于应力加载区, 由于龙门山构造带的南段低阻和低速的塑性带的作用, 使其能量积累而没有发生破裂, 但是汶川地震能量的堆积和应力通过高阻(刚性)块体传递, 触发了芦山地震

在高阻(刚性)块体与低阻(塑性)块体结合部发生. 另一方面, 根据本文的电性结构推断震源区在大川—双石断裂与名山隐伏断裂带之间的深部延伸的端点, 受到深部上里隐伏壳幔韧性剪切带( $F_{14}$ )向上扩展的影响, 可能是芦山地震的主要深部动力来源之一. 可以推断芦山地震受到深部上里隐伏的壳幔韧性剪切带( $F_{14}$ )向上扩展的影响, 具有深部动力来源; 汶川地震对芦山地震存在触发作用或加快了芦山地震的发生.

本文通过利用 MT+LMT 资料得到了沿剖面的壳幔二维电性结构特征, 相位张量阻抗分解计算结果表明, 沿测线浅部二维电性结构较强, 但深部具有较明显的三维特征, 后续有必要开展研究区三维数据采集和反演, 以对两次地震的孕震环境做进一步研究.

## 4 结论

通过穿过芦山地震震源区的大地电磁 MT 和长周期大地电磁 LMT 剖面的联合反演解释, 并结合邻区前期已经完成的几条 MT 和 LMT 联合解释剖面成果综合分析, 得到以下结论:

(1) 青藏高原东缘岩石圈存在明显的低阻异常带——松潘岩石圈低阻带, 该低阻异常带沿龙日坝断裂—岷山断裂—龙门山后山断裂分布, 形成松潘—甘孜地块向扬子地块俯冲的深部动力学模式, 通过统计研究区的历史强震, 发现震源主要沿低阻异常带东侧分布; 同时, 低阻异常带也是低速度、低密度异常带, 松潘岩石圈低阻带可能是扬子地块的西缘边界.

(2) 青藏高原物质东移过程中, 受到克拉通型四川盆地的强烈阻挡, 龙门山构造带表层块体和物质发生仰冲推覆, 形成逆冲推覆特征的薄皮构造, 中下地壳和上地幔顶部物质向龙门山构造带岩石圈深部俯冲, 印支运动晚期, 扬子古板块持续向华北板块俯冲, 呈现出刚性的上扬子地块西缘高阻楔形体向西插入低阻塑性青藏块体的楔状构造.

(3) 根据电性结构推断, 芦山地震受到深部岩石圈低阻带上里隐伏壳幔韧性剪切带向上扩展的影响, 构成芦山地震的深部主要动力来源; 同时, 汶川地震的发生, 在龙门山南段形成应力加载区, 可能是触发或加快芦山地震孕育发生的另一个动力来源.

致谢 感谢中国地震局地质研究所赵国泽研究员和汤吉研究员对论文提出的宝贵修改意见.

## References

- Bai D H, Teng J W, Ma X B, et al. 2011. Crustal flow beneath eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric measurements. *China Basic Science* (in Chinese), 13(1): 7-10.
- Bai D, Unsworth M J, Meju M A, et al. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan Plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nature Geoscience*, 3(5): 358-362.
- Burchfiel B C, Royden L H, Hilst R D V D, et al. 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *GSA Today*, 18(18): 4-11.
- Cai X L, Cao J M, Zhu J S. 2008a. Lithospheric and asthenospheric structures of the Koktokay of Xinjiang to Jianyang of Sichuan geoscience transect. *Geology in China* (in Chinese), 35(3): 375-391.
- Cai X L, Cao J M, Zhu J S, et al. 2008b. The system of crust mantle ductile shear zones in China continental lithosphere. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 15(3): 36-54.
- Cai X L, Wei X G, Liu Y C, et al. 1996. ON WEDGE-IN OPOGENY—On the example of the Longmenshan orogenic belt. *Acta Geologica SiChuan* (in Chinese), 16(2): 97-102.
- Caldwell T G, Bibby H M, Brown C. 2004. The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 158(2): 457-469.
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 28(8): 703-706.
- Egbert G D, Booker J R. 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. *Geophysical Journal International*, 87(1): 173-194.
- Fang L H, Wu J P, Wang W L, et al. 2013. Relocation of mainshock and aftershock sequences of  $M_{s}7.0$  Sichuan Lushan earthquake. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 58(20): 1901-1909.
- Guo X Y, Gao R, Randy G. 2014. Integrated geophysical study on the tectonic feature of the Longriba fault zone, eastern Tibetan Plateau, and the tectonic implications. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 29(5): 2004-2012.
- Guo X, Gao R, Keller G R, et al. 2013. Imaging the crustal structure beneath the eastern Tibetan Plateau and implications for the uplift of the Longmen Shan range. *Earth & Planetary Science Letters*, 379(5): 72-80.
- Guo Z L. 2015. Deep electric structure and the distribution of minerals in Motianling and its adjacent areas [Master's thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology.
- Hansen P C. 1992. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve. *SIAM review*, 34(4): 561-580.
- Judith H, Shaw J H. 2009. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan Plateau and the 2008 Wenchuan ( $M=7.9$ ) earthquake. *Nature*, 458(7235): 194.
- Li J, Wang X B, Li D H, et al. 2017. Characteristics of the lithosphere physical structure in eastern margin of the Qinghai-Tibet plateau and their deep tectonic implications. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(6): 2500-2511, doi: 10.6038/cjg20170637.
- Lou H, Wang C Y, Yao Z X, et al. 2010. Subsection feature of the deep structure and material properties of Longmenshan fault zone. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 17(5): 128-141.
- Lü J N, Shen Z K, Wang M. 2003. Contemporary crustal deformation and active tectonic block model of the Sichuan-Yunnan region, China. *Seismology and Geology* (in Chinese), 25(4): 543-554.
- Lu R Q, He D F, Suppe J, et al. 2010. The discovery of structural wedges in the central Longmen Mountains front belt and its geometric and kinematic characteristics; Constraints on the dynamical mechanism of uplifting in the southeast margin of Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 17(5): 93-105.
- Parsons T, Ji C, Kirby E. 2008. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin. *Translated World Seismology*, 454(7203): 509-510.
- Rodi W, Mackie R L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66(1): 174.
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 276(5313): 788.
- Smirnov M Y. 2003. Magnetotelluric data processing with a robust statistical procedure having a high breakdown point. *Geophysical Journal International*, 152(1): 1-7.
- Tapponnier P, Peltzer G, Dain A Y L, et al. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10(10): 611.
- The Team of the China Crustal Movement Observation Network. 2008. Coseismic displacement field for the 2008 Wenchuan  $M_{s}8.0$  earthquake measured by GPS. *Scientia Sinica Terrae*, 38(10): 1195-1206.
- Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 2008. 12 May 2008  $M=7.9$  Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems. *Geophysical Research Letters*, 4(17): 814-819.
- Varentsov I M, Sokolova E Y, Martanov E R, et al. 2003. System of electromagnetic field transfer operators for the BEAR array of simultaneous soundings: Methods and results. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 39(2): 118-148.
- Wang F Y, Zhao C B, Feng S Y, et al. 2015. Seismogenic structure of the 2013 Lushan  $M_{s}7.0$  earthquake revealed by a deep seismic reflection profile. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(9): 3183-3192, doi: 10.6038/cjg20150914.
- Wang S J, Wang F Y, Zhang J S, et al. 2015. The deep seismogenic environment of Lushan  $M_{s}7.0$  earthquake zone revealed by a wide-angle reflection/refraction seismic profile. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(9): 3193-3204, doi: 10.6038/cjg20150915.

- Wang W M, Hao J L, Yao Z X. 2013. Preliminary result for rupture process of Apr. 20, 2013, Lushan Earthquake, Sichuan China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(4): 1412-1417, doi: 10.6038/cjg20130436.
- Wang X B, Luo W, Zhang G, et al. 2013. Electrical structure of Longmenshan crust-mantle under sector boundary. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(8): 2718-2727, doi: 10.6038/cjg20130820.
- Wang X B, Zhang G, Fang H, et al. 2014. Crust and upper mantle resistivity structure at middle section of Longmenshan, eastern Tibetan plateau. *Tectonophysics*, 619-620(5): 143-148.
- Wang Z, Huang R, Pei S. 2014. Crustal deformation along the Longmen Shan fault zone and its implications for seismogenesis. *Tectonophysics*, 610(1): 128-137.
- Wang Z, Su J, Liu C, et al. 2015. New insights into the generation of the 2013 Lushan Earthquake ( $M_s7.0$ ), China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(5): 3507-3526.
- Wei W B, Jin S, Ye G F, et al. 2010. On the conductive structure of Chinese continental lithosphere—Experiment on “Standard Monitoring Network” of continental EM parameters (SinoProbe-01). *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 84(6): 788-800.
- Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. 2009. Co-seismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008  $M_w7.9$  Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 37(6): 515-518.
- Xu X W, Chen G H, Yu G H, et al. 2013a. Seismogenic structure of Lushan earthquake and its relationship with Wenchuan earthquake. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 20(3): 11-20.
- Xu X W, Wen X Z, Han Z J, et al. 2013b. Lushan  $M_s7.0$  earthquake: A blind reverse-fault earthquake. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 58(20): 1887-1893.
- Yang Y H, Liang C T, Su J R. 2015. Focal mechanism inversion based on regional model inverted from receiver function and its application to the Lushan earthquake sequence. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(10): 3583-3600, doi: 10.6038/cjg20151013.
- Yi G X, Wen X Z, Su Y J. 2008. Study on the potential strong-earthquake risk for the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan active faulted-block, China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 51(6): 1719-1725.
- Zhan Y, Chen X B, Unsworth M J, et al. 2014. Study on the electromagnetic field of seismogenic environment in the deep part of Lushan 7.0 and 5.12 Wenchuan. Chinese Earth Science United Academic Conference. Beijing, 771-774.
- Zhan Y, Zhao G Z, Unsworth M J, et al. 2013. Deep structure beneath the southwestern section of the Longmenshan fault zone and seismogenetic context of the 4.20 Lushan  $M_s7.0$  earthquake. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 58(20): 1917-1924.
- Zhang L T, Jin S, Wei W B, et al. 2012. Electrical structure of crust and upper mantle beneath the eastern margin of Tibetan plateau and Sichuan Basin. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(12): 4126-4137, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.025.
- Zhao G, Unsworth M J, Zhan Y, et al. 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan  $M_w7.9$  earthquake epicentral area from magnetotelluric data. *Geology*, 40(12): 1139-1142.
- Zhu J S, Wang X B, Yang Y H, et al. 2017. The crustal flow beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau and its process of dynamics. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(6): 2038-2057, doi: 10.6038/cjg20170602.
- Zhu J S. 2008. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 35(4): 348-356.

### 附中文参考文献

- 白登海, 腾吉文, 马晓冰等. 2011. 大地电磁观测揭示青藏高原东部存在两条地壳物质流. *中国基础科学*, 13(1): 7-10.
- 蔡学林, 曹家敏, 朱介寿. 2008a. 新疆可可托海—四川简阳地学断面岩石圈与软流圈结构. *中国地质*, 35(3): 375-391.
- 蔡学林, 曹家敏, 朱介寿等. 2008b. 中国大陆岩石圈壳幔韧性剪切带系统. *地学前缘*, 15(3): 36-54.
- 蔡学林, 魏显贵, 刘援朝等. 1996. 论楔入造山作用——以龙门山造山带为例. *四川地质学报*, 16(2): 97-102.
- 房立华, 吴建平, 王未来等. 2013. 四川芦山  $M_s7.0$  级地震及其余震序列重定位. *科学通报*, 58(20): 1901-1909.
- 郭晓玉, 高锐, Randy G 等. 2014. 综合地球物理资料揭示青藏高原东缘龙日坝断裂带构造属性和大地构造意义. *地球物理学进展*, 29(5): 2004-2012.
- 郭紫明. 2015. 摩天岭地块及邻区深部电性结构与矿产分布[硕士论文]. 成都: 成都理工大学.
- 李军, 王绪本, 李大虎等. 2017. 青藏高原东缘岩石圈物性结构特征及深部构造涵义. *地球物理学报*, 60(6): 2500-2511, doi: 10.6038/cjg20170637.
- 楼海, 王椿镛, 姚志祥等. 2010. 龙门山断裂带深部构造和物性分布的分段特征. *地学前缘*, 17(5): 128-141.
- 鲁人齐, 何登发, Suppe John 等. 2010. 龙门山中段山前带构造楔的发现及其几何学、运动学特征; 对青藏高原东南缘隆升动力学机制的约束. *地学前缘*, 17(5): 93-105.
- 吕江宁, 沈正康, 王敏. 2003. 川滇地区现代地壳运动速度场和活动块体模型研究. *地震地质*, 25(4): 543-554.
- 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*, 33(B04): 173-180.
- 王卫民, 郝金来, 姚振兴. 2013. 2013年4月20日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果. *地球物理学报*, 56(4): 1412-1417, doi: 10.6038/cjg20130436.
- 王帅军, 王夫运, 张建狮等. 2015. 利用宽角反射/折射地震剖面揭示芦山  $M_s7.0$  地震震区深部孕震环境. *地球物理学报*, 58(9): 3193-3204, doi: 10.6038/cjg20150915.
- 王绪本, 罗威, 张刚等. 2013. 扇形边界条件下的龙门山壳幔电性结构特征. *地球物理学报*, 56(8): 2718-2727, doi: 10.6038/cjg20130820.

- 王夫运,赵成彬,鄞少英等. 2015. 深反射剖面揭示的芦山 7.0 级地震发震构造. 地球物理学报, 58(9): 3183-3192, doi: 10.6038/cjg20150914.
- 魏文博,金胜,叶高峰等. 2010. 中国大陆岩石圈导电性结构研究——大陆电磁参数“标准网”实验(SinoProbe-01). 地质学报, 84(6): 788-800.
- 国家重大科学工程中国地壳运动观测网络项目组. 2008. GPS 测定的 2008 年汶川  $M_s$ 8.0 级地震的同震位移场. 中国科学:地球科学, 38(10): 1195-1206.
- 徐锡伟,陈桂华,于贵华等. 2013a. 芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论. 地学前缘, 20(3): 11-20.
- 徐锡伟,闻学泽,韩竹军等. 2013b. 四川芦山 7.0 级强震:一次典型的盲逆断层型地震. 科学通报, 58(20): 1887-1893.
- 杨宜海,梁春涛,苏金蓉. 2015. 用接收函数建立区域模型的震源机制反演及其在芦山地震序列研究中的应用. 地球物理学报, 58(10): 3583-3600, doi: 10.6038/cjg20151013.
- 易桂喜,闻学泽,苏有锦. 2008. 川滇活动地块东边界强震危险性研究. 地球物理学报, 51(6): 1719-1725.
- 詹艳,陈小斌,Unsworth M J 等. 2014. 青藏高原东缘 4·20 芦山 7.0 级和 5·12 汶川 7.9 级地震深部孕震环境大地电磁探测研究. 2014 年中国地球科学联合学术年会. 北京. 771-774.
- 詹艳,赵国泽,Unsworth M J 等. 2013. 龙门山断裂带西南段 4·20 芦山 7.0 级地震区的深部结构和孕震环境. 科学通报, 58(20): 1917-1924.
- 张乐天,金胜,魏文博等. 2012. 青藏高原东缘及四川盆地的壳幔导电性结构研究. 地球物理学报, 55(12): 4126-4137, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.025.
- 朱介寿. 2008. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4): 348-356.
- 朱介寿,王绪本,杨宜海等. 2017. 青藏高原东缘的地壳流及动力过程. 地球物理学报, 60(6): 2038-2057, doi: 10.6038/cjg20170602.

(本文编辑 何燕)