

赵凌强, 詹艳, 孙翔宇等. 2019. 利用大地电磁技术揭示 2016 年 1 月 21 日青海门源  $M_s6.4$  地震隐伏地震构造和孕震环境. 地球物理学报, 62(6): 2088-2100, doi: 10. 6038/cjg2019M0204.

Zhao L Q, Zhan Y, Sun X Y, et al. 2019. The hidden seismogenic structure and dynamic environment of the 21 January Menyuan, Qinghai,  $M_s6.4$  earthquake derived from magnetotelluric imaging. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 62(6): 2088-2100, doi: 10. 6038/cjg2019M0204.

# 利用大地电磁技术揭示 2016 年 1 月 21 日青海门源 $M_s6.4$ 地震隐伏地震构造和孕震环境

赵凌强<sup>1,2</sup>, 詹艳<sup>1\*</sup>, 孙翔宇<sup>1</sup>, 郝明<sup>2</sup>, 祝意青<sup>2</sup>, 陈小斌<sup>1</sup>, 杨皓<sup>1</sup>

1 地震动力学国家重点实验室(中国地震局地质研究所), 北京 100029

2 中国地震局第二监测中心, 西安 710043

**摘要** 2016 年 1 月 21 日 01 时 13 分在青海省海北州门源县发生了  $M_s6.4$  地震, 震中位置位于青藏高原东北缘地区祁连造山带内的祁连—海原断裂带冷龙岭断裂部分附近, 震源深度约 11.4 km, 震源机制解显示该次地震为一次纯逆冲型地震. 我们于 2015 年 7—8 月期间完成了跨过祁连造山带紧邻穿过 2016 年 1 月 21 日青海门源  $M_s6.4$  地震震中区的大地电磁探测剖面(DKLB-M)和古浪地震大地电磁加密测量剖面(HYFP). 本文对所采集到的数据进行了先进的数据处理和反演工作, 获得了二维电性结构图. 结合青藏高原东北缘地区最新获得的相对于欧亚板块 2009—2015 年 GPS 速度场分布特征, 1 月 21 日门源  $M_s6.4$  地震主震与余震分布特征以及其他地质与地球物理资料等, 探讨了门源  $M_s6.4$  地震的发震断裂, 断裂带空间展布、延伸位置, 分析了门源  $M_s6.4$  地震孕震环境与地震动力学背景等以及祁连山地区深部构造特征等相关问题. 所获结论如下: 2016 年门源  $M_s6.4$  地震震源区下存在较宽的 SW 向低阻体, 推测冷龙岭断裂下方可能形成了明显的力学强度软弱区, 这种力学强度软弱区的存在反映了介质的力学性质并促进了地震蠕动、滑移和发生; 冷龙岭北侧断裂可能对门源  $M_s6.4$  地震主震和余震的发生起控制作用, 而该断裂为冷龙岭断裂在青藏高原北东向拓展过程中产生的伴生断裂, 表现出逆冲特征; 现今水准场、重力场、GPS 速度场分布特征以及大地电磁探测结果均表明祁连—海原断裂带冷龙岭断裂部分为青藏高原东北缘地区最为明显的一条边界断裂, 受控于青藏高原北东向拓展和阿拉善地块的阻挡作用, 冷龙岭断裂附近目前正处于青藏高原北东向拓展作用最强烈、构造转化最剧烈的地区, 这种动力学环境可能是门源  $M_s6.4$  地震发生的最主要原因, 与 1927 年古浪  $M_s8.0$  地震和 1954 年民勤  $M_s7.0$  地震相似, 2016 年门源  $M_s6.4$  地震的发生同样是青藏高原北东向拓展过程中的一次地震事件.

**关键词** 2016 年门源  $M_s6.4$  地震; 大地电磁; 冷龙岭断裂; 冷龙岭北侧断裂; 孕震环境

doi: 10. 6038/cjg2019M0204

中图分类号 P315

收稿日期 2018-04-06, 2018-11-23 收修定稿

## The hidden seismogenic structure and dynamic environment of the 21 January Menyuan, Qinghai, $M_s6.4$ earthquake derived from magnetotelluric imaging

ZHAO LingQiang<sup>1,2</sup>, ZHAN Yan<sup>1\*</sup>, SUN XiangYu<sup>1</sup>, HAO Ming<sup>2</sup>,  
ZHU YiQing<sup>2</sup>, CHEN XiaoBin<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2 The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710043, China

**Abstract** An  $M_s6.4$  earthquake attacked Menyuan County, Qinghai Province on 21 January

基金项目 国家自然科学基金项目(41474057), 地震行业科研专项(20130811)和国家自然科学基金重大项目(41590860)共同资助.

第一作者简介 赵凌强, 男, 1988 年生, 工程师, 博士研究生, 主要从事大地电磁方法在深部结构探测中的应用研究.

E-mail: zhaolingqiang0926@126.com

\* 通讯作者 詹艳, 女, 1969 年生, 研究员, 主要从事电磁方法和深部电性构造探测研究. E-mail: zhanyan66@vip.sina.com

2016. Its epicenter is located near the Lenglongling section of the Qilian-Haiyuan fault zone in the Qilian orogenic belt, northeastern margin of the Tibetan Plateau. The depth of the source is about 11.4 km. The focal mechanism solutions show that this event is a pure thrusting. Before this quake, we carried out an MT surveys along two profiles across the Qilian orogenic belt during July to August, of which one is the epicenter of the 2016 Menyuan event (DKLB-M) and the other crosses the Gulang area (HYFP). The remote reference, "robust", and phase tensor decomposition techniques were used to process the acquired MT data, and the NLCD two-dimensional inversion was made to image the deep electrical structure. In combination with the GPS velocity field from 2009 to 2015 of the northeastern margin of the Tibetan Plateau with respect to stable Eurasia, distributions of main shock and aftershocks of the Menyuan earthquake and relevant geological and geophysical data available, we explored the seismogenic tectonics of the 2016 Menyuan earthquake, including its location and extension of the causative fault, regional tectonic environment and deep structure of the Qilian orogenic belt. The results show that there is a wide SW-dipping low-resistivity body under the epicenter of the Menyuan earthquake, representing a mechanically weak zone below the Lenglongling fault. Its existence might be associated with preparation, slip and occurrence of the Menyuan event. A fault north of Lenglongling might have controlled its main shock and aftershocks, which is an associated fracture of the Lenglongling fault generated during the northward expansion of the Tibetan Plateau, showing an obvious thrusting characteristic. The present day crustal vertical movement, gravity field variations, GPS velocity field and MT surveys all suggest that Lenglongling section of the Qilian-Haiyuan fault is one of the most significant boundary features in the northeastern margin of the Tibetan Plateau. Affected by the Tibetan Plateau's northeastward expansion and compression from the Alax block, the area around the Lenglongling fault currently is situated in the area with most intense northeastern expansion and tectonic transformation of the plateau margin. Such a dynamic environment may be the main reason for the occurrence of the 2016 Menyuan  $M_s6.4$  earthquake, like the 1927 Gulang  $M_s8.0$  and 1954 Minqin  $M_s7.0$  earthquakes.

**Keywords** Menyuan  $M_s6.4$  earthquake in 2016; Magnetotelluric; Lenglongling fault; Northern Lenglongling fault; Seismogenic environment

## 0 引言

2016 年 1 月 21 日 01 时 13 分在青海海北州门源县 ( $37.662^\circ\text{N}, 101.622^\circ\text{E}$ ) 发生  $M_s6.4$  地震, 这是继 2008 年在青藏高原东缘龙门山地区发生的汶川  $M_s8.0$  地震和 2013 年芦山  $M_s7.0$  地震, 青藏高原东北缘西秦岭地区 2013 年岷县漳县  $M_s6.6$  地震之后, 青藏高原周缘地区发生的又一次破坏性中强地震。该次地震发生在青藏高原东北缘地区祁连—海原断裂带冷龙岭断裂部分附近, 震中距离门源县城约 35 km, 震源深度约 11.4 km (中国地震台网中心网站 (CENC), <http://www.csndmc.ac.cn>; 中国地震局地质研究所网站, <http://www.eq-igl.ac.cn>; 中国地震局地球物理研究所网站, [\[www.eq-igl.ac.cn\]\(http://www.eq-igl.ac.cn\); 徐锡伟等, 2017\)。](http://</a></p></div><div data-bbox=)

2016 年 1 月 21 日门源  $M_s6.4$  地震发生之后, 对该地震的发震构造、成因等研究认识不一。梁姗姗等 (2017) 通过余震序列重定位和主震震源机制解揭示的门源  $M_s6.4$  地震为纯逆冲型地震的特征, 这与郑文俊等 (2009) 通过断裂晚第四纪滑动速率及跨断裂 GPS 应变速率的研究认为冷龙岭断裂表现为强烈的走滑趋势的运动特征不一致。胡朝忠等 (2016) 对发震构造初步研究推测发震断裂是冷龙岭北侧一条南盘下降、北盘上升, 并将冲沟左旋错断的北倾活动断裂。郭鹏等 (郭鹏, 2016; 郭鹏等, 2017) 通过探槽开挖、构造地貌分析并结合余震分布等资料对地震构造进行了研究, 认为冷龙岭断裂全新世以来表现为走滑特征, 其西北侧存在着伴生的弧形冷龙岭北侧断裂, 认为该断裂作为门源  $M_s6.4$  地震发震断裂

较为恰当. 中强地震的发生并不一定与地表的活动断裂有直接的关系 (Han et al., 2012), 想要揭示此类地震的发震构造, 需要进行详细的深部地球物理探测工作, Cai 等 (2017) 利用密集电磁三维成像技术揭示了 2014 年鲁甸  $M_s6.4$  地震发震构造, 然而在 2016 年 1 月 21 日门源  $M_s6.4$  地震区及其附近地区没有较详细的深部地球物理探测研究工作. 已有的地球物理探测多集中在祁连—海原断裂带东段, 如詹艳等 (2008) 对 1927 年古浪 8.0 级地震区的深部结构进行过大地电磁探测研究, 结果揭示了古浪地震是一次发生在高低阻间断面上的地震, 地震区附近青藏高原表现出明显的北东向逆冲特征.

门源地震发生的祁连造山带冷龙岭地区历史地震活动强烈, 自 1900 年以来, 仅在门源  $M_s6.4$  地震震中附近 100 km 范围内就发生了 6 级以上地震 5 次, 其中最大的地震是距离该次地震东侧 55 km 外的 1927 年 5 月 23 日古浪 8.0 级地震, 此外该地震西侧约 10 km 附近于 1986 年发生过门源  $M_s6.5$  地震 (邓起东等, 2003; Shen et al., 2017; 徐锡伟等, 2017). 该地震附近的冷龙岭断裂带处于广义的祁连—海原断裂带中西段, 该断裂带是青藏高原向北和向东北扩展的前沿地段, 是正在强烈活动的青藏高原和稳定的阿拉善地块之间的构造转换带, 现今地壳运动场研究结果揭示该区表现为极为明显的左旋剪切和南北向地壳缩短以及强烈的垂直向隆升趋势 (张培震等, 2002; 郑文俊等, 2013; Zheng et al., 2013; Hao et al., 2014). 因此揭示该区此类中强地震及其附近地区的深部构造和孕震环境, 除了对于评价该地区未来地震危险性具有实际意义之外, 还可以更好认识青藏高原隆升和向北扩展的机制 (张培震等, 2002; 郑文俊等, 2013; Zheng et al., 2013).

为了探测研究祁连造山带中东段与阿拉善地块的深部接触关系, 在国家自然科学基金项目资助下, 我们于 2015 年 7—9 月期间跨过祁连造山带中东段实施了两条南南西—北北东方向的大地电磁探测剖面, 其中一条剖面紧邻 2016 年 1 月 21 日青海门源  $M_s6.4$  地震震中区, 利用这两条剖面的探测结果, 再结合该区 GPS 速度场, 重力场以及水准场等分布特征 (Hao et al., 2014; 祝意青等, 2016), 对 2016 门源  $M_s6.4$  地震的发震构造、区域深部孕震环境进行了初步研究.

## 1 区域构造和大地电磁剖面

2016 年门源  $M_s6.4$  地震发生在青藏高原东北缘与阿拉善地块之间隆起区的祁连造山带中东段内 (如图 1a 所示), 地震区附近发育众多断裂, 主要包括西秦岭北缘断裂、大坂山断裂、冷龙岭断裂 (祁连—海原断裂带)、天桥沟—黄羊川断裂、皇城—双塔断裂等. 距离本次地震震中最近的断裂为震中南侧的冷龙岭断裂, 距离约 5~7 km 左右 (邓起东等, 2003; 郭鹏等, 2017; 徐锡伟等, 2017).

图 1b、c 给出了门源地震区及其附近地区的区域构造和地形图, 实施的两条大地电磁剖面 (DKLB-M 和 HYFP) 实测测点也显示在图 1b、c 中. 其中 DKLb-M 剖面紧邻 2016 年 1 月 21 日青海门源  $M_s6.4$  地震震中区, 地震震中就位于该测线上 51、52 号点西北约 20 km 处. DKLb-M 剖面西南起于青海贵德到贵南之间, 向东北经过湟中县、门源县, 东北止于永昌县东南约 30 km 处, 剖面全长约 280 km, 完成了 33 个点测量, 自西南到东北跨过西秦岭北缘断裂、拉脊山断裂、大坂山断裂、冷龙岭断裂、皇城—双塔断裂、丰乐断裂. 另一条剖面 (HYFP) 是在詹艳等 (2008) 的剖面基础上进行的延伸观测, 位于 DKLb-M 剖面东侧 80 km 左右, 沿剖面布置 28 个测点, 剖面长约 240 km, 剖面南段跨过了冷龙岭断裂, 剖面北段延伸进入了阿拉善地块 (赵凌强等, 2018).

## 2 数据采集、处理和反演

### 2.1 数据采集与处理

野外数据采集工作使用了加拿大 Phoenix 公司的 MTU-5A 仪器, 每个测点观测时间在 35 h 以上, 以获得尽量长的周期数据, 增加低频数据的谱叠加次数, 提高数据质量. 为了测量方便, 每个测点布设方式均为“十”字型五分量观测方式, 记录正南北向的磁场分量和电场分量, 东西向的磁分量和电场分量以及垂直地面的磁场分量, 野外数据采集的同时在陕西乾县和湖北潜江分别设置了远参考站. 使用了先进的数据处理技术对全部测点数据进行了处理, 包括远参考和“Robust”技术 (Egbert and Booker, 1986; Chave et al., 1987), 获得了各测点的谱数据, 大部分测点低频数据超过 2000 s. 图 2 给出了沿剖面 10 个典型测点的视电阻率和阻抗相位曲线形态

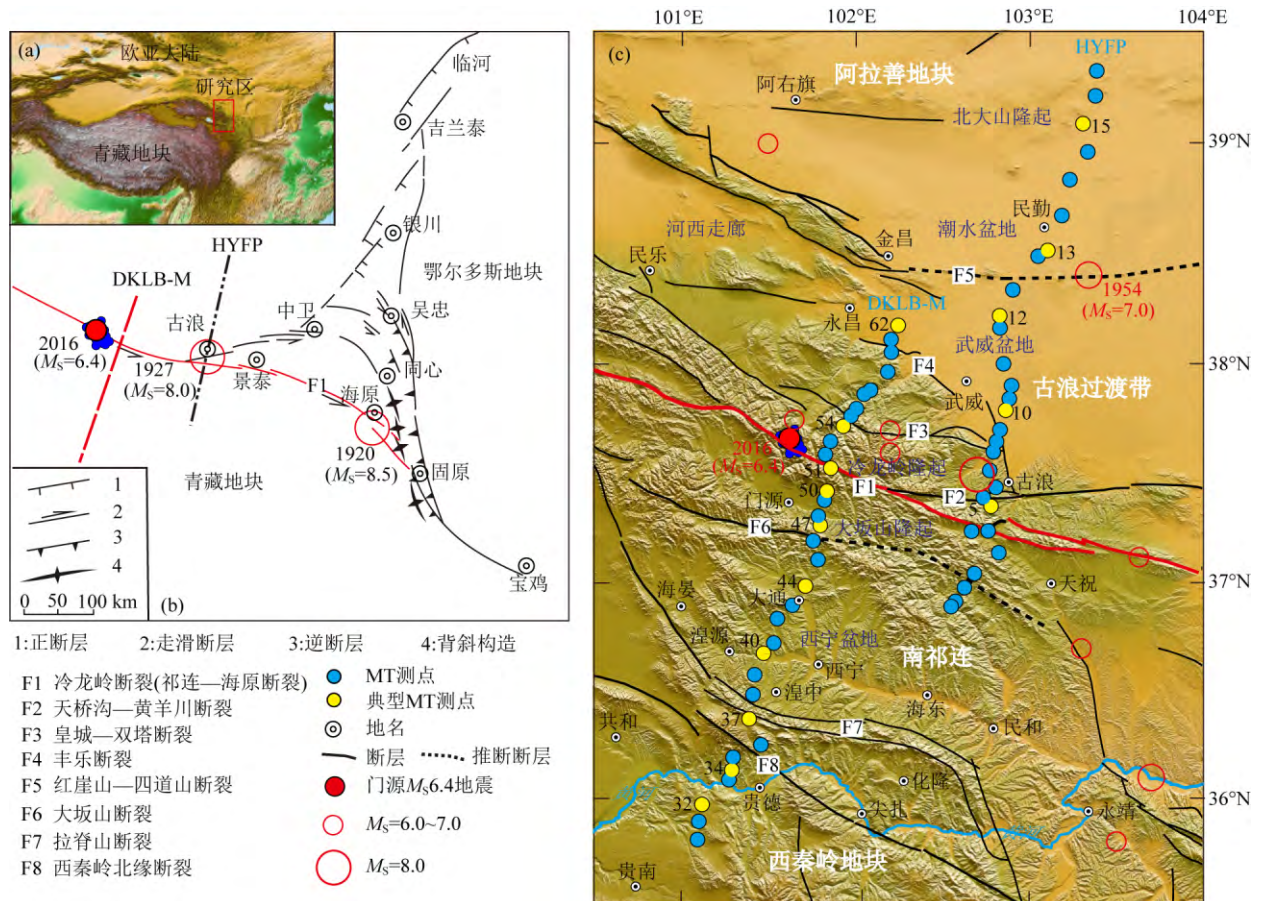


图1 区域构造和大地电磁剖面位置图(断裂引自邓起东等,2003;郭鹏等,2017;徐锡伟等,2017)

Fig. 1 Maps showing tectonics of study area and magnetotelluric survey profiles  
(major faults cited from Deng et al., 2003; Guo et al., 2017; Xu et al., 2017)

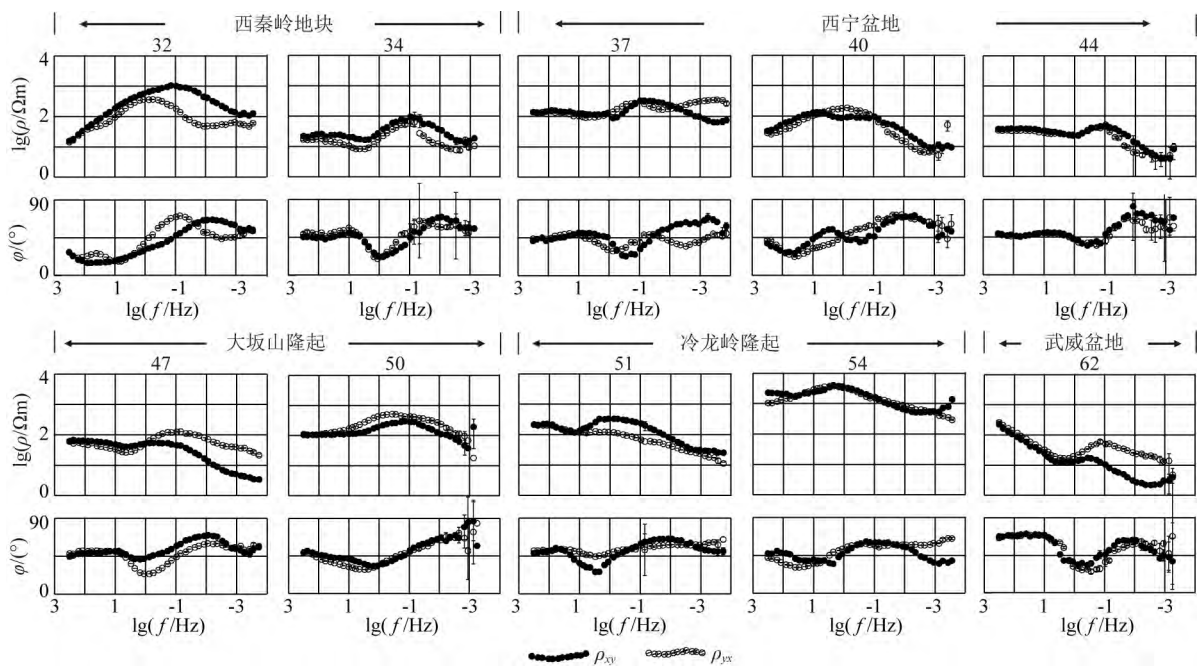


图2 沿DKLB-M剖面10个典型测点的测量方向的视电阻率和阻抗相位曲线

Fig. 2 Apparent resistivity and impedance phase curves of 10 typical measuring sites in profile DKL-B-M



和数值(测点位置见图 1c 中 DKL-B-M 剖面上的黄色圆点). 图中所示沿剖面的西秦岭北缘断裂带、冷龙岭断裂、丰乐断裂两侧测点的视电阻率曲线形态和数值区别较大. 西秦岭北缘断裂带以南为西秦岭地块, 相应测点(32, 34)的视电阻率曲线自高频到低频呈现出低、高、低的变化特点; 西秦岭北缘断裂带、冷龙岭断裂带之间为大坂山隆起和西宁盆地, 相应测点(37, 40, 44, 47, 50)有相似的视电阻率曲线形态, 但是各测点视电阻率曲线的高频段的数值高低不同, 视电阻率数值出现极大值的频段也不尽相同, 反映出大坂山隆起和西宁盆地深部电性结构成层性较差, 并且在深部呈现出低阻趋势; 冷龙岭断裂带到丰乐断裂带之间为冷龙岭隆起, 相应测点(51, 54)视电阻率曲线形态自高频到低频部分数值较高, 表明该地段的深部结构自浅部至一定深度均为高阻特征. 丰乐断裂带东北侧区域为武威盆地, 相应测点(62)视电阻率数值整体较低, 自高频到低频呈现出由高到低再降低特点.

## 2.2 区域电性走向和维性特征分析

在实施二维反演之前, 应通过二维偏离度等参数来判断测线经过区域的地下结构的维数性. 张量分解技术(Caldwell et al., 2004; Bibby et al., 2005; 蔡军涛和陈小斌, 2010; Booker, 2014; Zhang et al., 2017)是近年来常用于定性分析测区地下介质维数性特征的方法. 相位张量  $\varphi$  定义为大地电磁阻抗张量实部矩阵的逆矩阵与虚部矩阵的乘积, 一般用椭圆来表示. 椭圆长短轴分别是  $\varphi_{\max}$  和  $\varphi_{\min}$ , 椭圆主轴方向是  $\alpha\beta$ ,  $\alpha$  是区域电性构造主轴方向与观测坐标系  $X$  轴之间的偏离角,  $\beta$  是相位张量与等效对称张量主轴方向的偏离角, 也称相位张量的二维偏离度.

在理想情况下, 相位张量二维偏离度  $\beta$  绝对值大于 0 就指示地下结构为三维, 但考虑到实际观测数据含有一定的误差, 一般认为  $|\beta|$  大于 5, 可认为地下结构三维性较强(Caldwell et al., 2004; Cai et al., 2017). 另外引用相位响应  $\varphi_2 = \sqrt{\varphi_{\max}\varphi_{\min}}$ ,  $\varphi_2$  也是一个旋转不变量, 不会受局部畸变和静位移的影响. 相位响应只包含电阻率梯度以及变化的信息, 虽然不能用以确定地下结构的具体电阻率数值大小, 但可以用于定性分析地下介质电阻率的变化趋势, 当  $\varphi_2$  的值大于  $45^\circ$  时, 说明电阻率沿深度的增加下降, 当  $\varphi_2$  的值小于  $45^\circ$  时, 说明电阻率沿深度的增加而增加(Heise et al., 2008).

图 3a 中给出了 DKL-B-M 剖面上各测点相位张量二维偏离度  $|\beta|$  随频率的分布, 可见剖面上各测点的  $|\beta|$  值整体小于 5, 仅在在剖面所经区域的祁连造山带南部及西秦岭北缘断裂附近低频部分二维偏离度值大于 5 的情况. 相位张量二维偏离度角  $|\beta|$  分布特征基本上能够说明电性方向总体上沿剖面具有二维特性, 说明我们使用二维反演能获得较合理地下电阻率结构. 图 3b 中给出了各测点分频段的相位不变量  $\varphi_2$  分布, 可见沿在中高频部分, 祁连山及其两侧地块的  $\varphi_2$  值等于或略小于  $45^\circ$ , 说明在研究区的上层, 电阻率结构以不变或者小幅增加为主. 而在低频部分, 特别是 51 号测点以南地区  $\varphi_2$  的值普遍的大于  $45^\circ$  甚至  $65^\circ$ , 这说明在冷龙岭断裂以南地区的深部存在一个广泛的低阻层, 低频部分  $\varphi_2$  值分布表明祁连山地块的深部结构较为复杂.

图 4 给出了沿剖面全部测点分频段和全频段的阻抗张量分解电性走向玫瑰花瓣图(陈小斌等, 2004). 图 4 中分频段和全频段的电性走向玫瑰花瓣

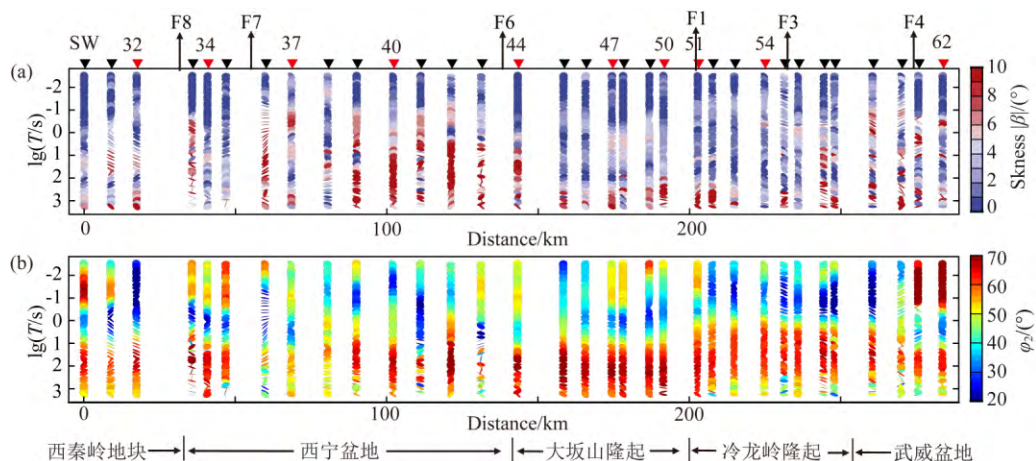


图 3 相位张量分解获得的二维偏离度角  $|\beta|$  (a) 和相位不变量  $\varphi_2$  (b) 随频率分布图

Fig. 3  $|\beta|$  (a),  $\varphi_2$  (b) and phase tensor ellipses of different periods from the phase tensor decomposition in profile

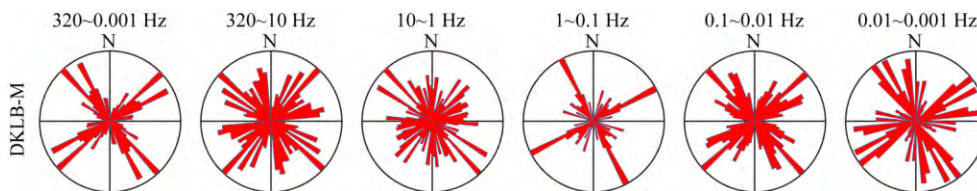


图 4 沿剖面全部测点的分频段和全频段的相位张量分解最佳主轴电性走向玫瑰花瓣图

Fig. 4 Rose diagrams of the geoelectric strikes along the profile from phase tensor decomposition

图显示了沿剖面的优势电性走向为  $NW35^\circ$  或者  $SE55^\circ$ , 结合该区地质构造走向为北西-南东东向, 即可判断该区电性走向为  $NW35^\circ$ . 将剖面上 35 个测点按照最佳主轴方向进行旋转, 获得了 TE 模式和 TM 模式数据(陈乐寿和王光镔, 1990).

### 2.3 二维反演

在“MTDATABASE”大地电磁数据处理反演集成系统(肖骑彬, 2005)下利用 NLG (Rodi and Mackie, 2001) 方法选用初始模型  $100 \Omega m$  均匀半空间进行了二维反演计算, 在反演计算过程中同时进行了剔除“飞点”的操作. 根据前人研究结论(蔡军涛等, 2010; Cherevatova et al., 2015)并结合反演模型、拟合误差、模型粗糙度以及二维理论相应曲线和实测曲线形态、数值拟合程度综合分析后, 我们最后选择了 TM 模式视电阻率和阻抗相位均为 5% 的门限误差、TE 模式的视电阻率和阻抗相位分别为 10% 和 5% 的门限误差的反演结果. 选择处于 L 曲线拐点的  $\tau$  为 3 的反演结果作为最终解释结果(如图 5 所示). 图 6 给出了理论响应和实测的视电阻率和阻抗相位数据对比图(观测数据中空白部分为剔除掉的“飞点”), 其中 a1、a2 分别为观测的 TM 视电阻率和阻抗相位; a3、a4 分别为观测的 TE 视电阻率和阻抗相位; b1、b2 分别为反演得到的 TM 视电阻率和阻抗相位; b3、b4 分别为反演得到的 TE

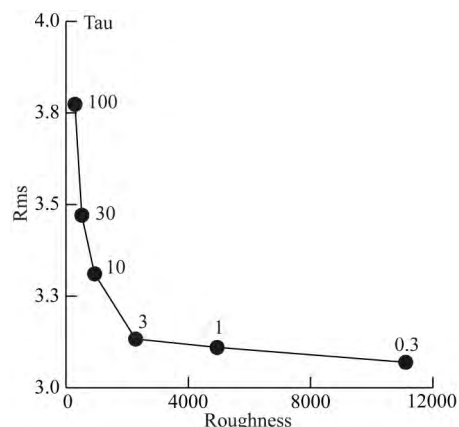


图 5 DKLB-M 剖面不同正则化因子反演得到的模型粗糙度、拟合误差曲线图

Fig. 5 Curve of Rms and roughness for profile DKLB-M from inversion using varied regularization factors

视电阻率和阻抗相位, 结果表明实测数据与理论响应拟合较好, 总体二维反演拟合误差 Rms 为 3.13.

### 3 深部电性结构特征

图 7a 给出了 DKLB-M 剖面深部电性结构图像, 图 7b 给出了 HYFP 剖面的深部电性结构图像(赵凌强等, 2018). 根据该区的地质构造、断裂分布(郑文俊等, 2013; 郭鹏等, 2017; 徐锡伟等, 2017)和

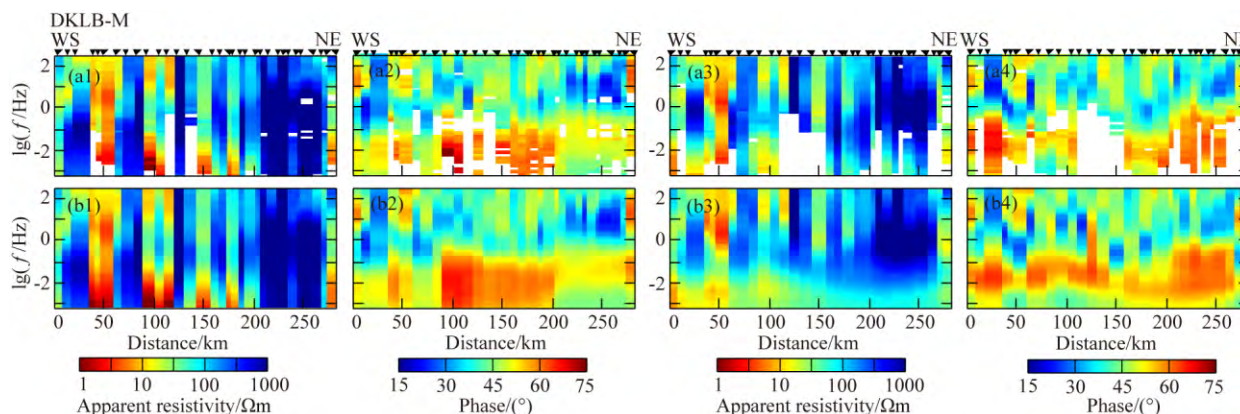


图 6 剖面实测与 2-D 模型理论计算的 TE 和 TM 极化模式的视电阻率和阻抗相位柱状图

Fig. 6 Comparison of TE and TM apparent resistivity and impedance phase along the profile from measurement and calculation on a 2-D theoretical model



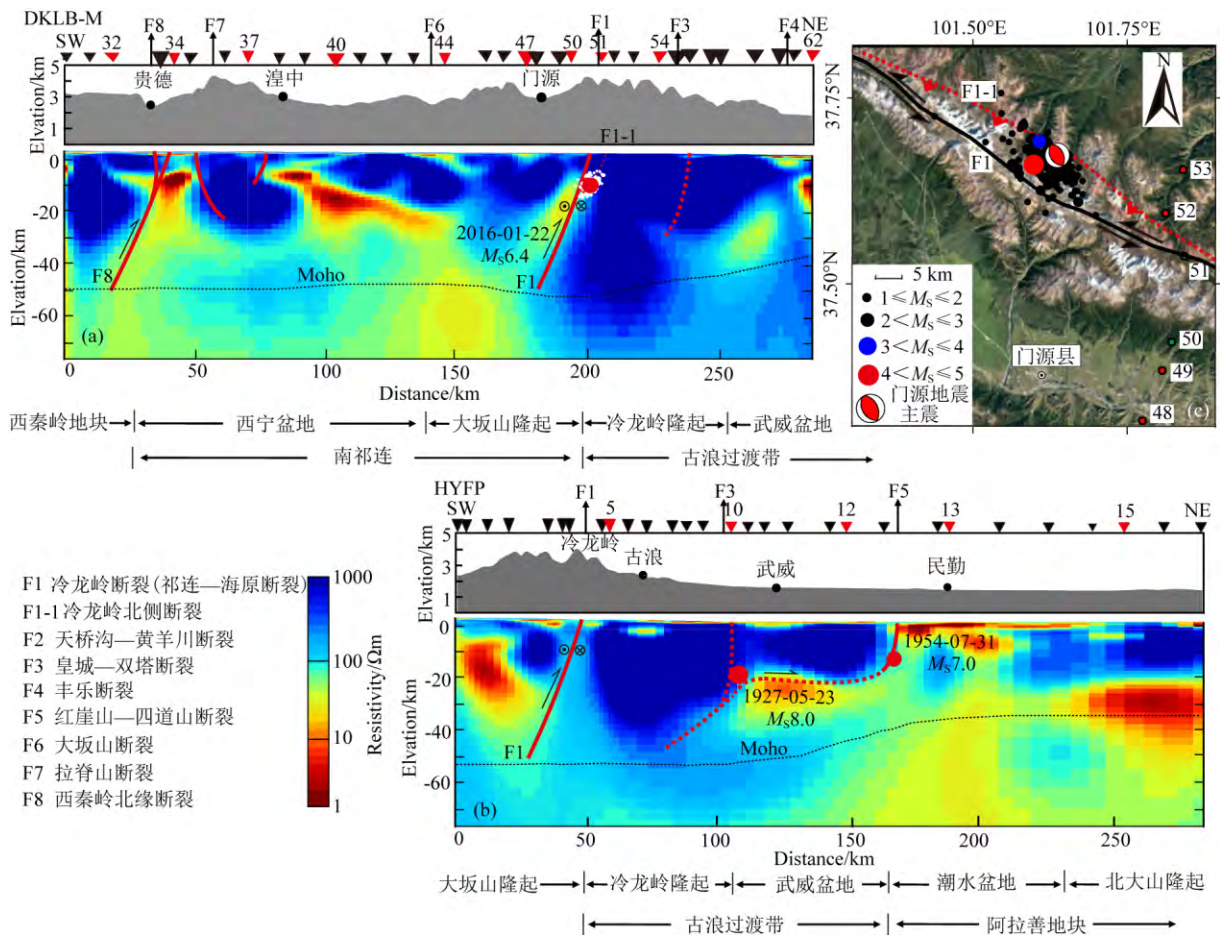


图 7 DKLB-M 和 HYFP 剖面深部电性结构图和门源地震区地表断裂走向与主、余震分布图

Fig. 7 Deep electric structure on profiles DKLB-M and HYFP, surface faults, and main shock and aftershocks of the 2016 Menyuan event

大地电磁测点的相对位置,以及深部电性结构图像所揭示的电性差异带,将研究区地块划分为:西秦岭地块、西宁盆地、大坂山隆起、冷龙岭隆起、武威盆地、潮水盆地、北大山隆起等。其中冷龙岭隆起和武威盆地是青藏高原至阿拉善地块的过渡区,共同组成了古浪过渡带(詹艳等,2008),代表了青藏高原北东向拓展的最前沿位置。对沿剖面的冷龙岭断裂(F1)、可能存在的冷龙岭北侧断裂(F1-1)、皇城—双塔断裂(F3)、丰乐断裂(F4)、红崖山—四道山断裂(F5)、大坂山断裂(F6)、拉脊山断裂(F7)、西秦岭北缘断裂(F8)深部延展特征进行了解译(图 7a,b)。在图 7a,b 中也绘制了 Shen 等(2017)通过地震学方法获得了祁连山东段及其邻近区域的莫霍面(Moho)深度。2016 年门源  $M_s 6.4$  地震主余震分布、1927 年古浪  $M_s 8.0$  地震(詹艳等,2008)、1954 年民勤  $M_s 7.0$  地震(刘白云等,2014;赵凌强等,2018)位置也展示在电性结构图中。除此之外,图 7c 绘制出了门源  $M_s 6.4$  地震主余震的平面分布显示图与震中附近

地貌图以及地表断裂走向分布。

### 3.1 断裂特征分析

冷龙岭断裂带处于广义的祁连—海原断裂带中西段,DKLB-M 和 HYFP 两条剖面电性结构图均显示该断裂为明显的高角度 SW 倾向电性分界带特征,断裂北部为大规模完整的高阻构造,断裂南部为中祁连和南祁连的中低阻混合构造带,电性差异从地表延伸至地下 60 km 以下,穿过了莫霍面,表明该断裂为大型断裂带。DKLB-M 剖面上冷龙岭断裂位于 50 和 51 号测点之间靠近 51 点附近,5 km 深度以下出现了明显的低阻构造,呈 SW 向倾向,一直延伸至莫霍面以下,此区域恰好邻近于 2016 年 1 月 21 日门源  $M_s 6.4$  地震震源区位置(如图 7a 中主余震的分布特征所示),推测该次地震可能是发生在低阻体中,在该低阻体上部可能还伴生存在冷龙岭北侧断裂,共同组成冷龙岭断裂系统,整体表现为走滑为主兼具逆冲运动性质,该地区莫霍面(Shen et al, 2017)分布发生了明显的错变,表明该地区构造极为

复杂,DKLB-M 和 HYFP 两条剖面电性结构图均显示出冷龙岭隆起和武威盆地中上地壳均为高阻构造为主,北部中下地壳出现低阻构造,高阻体形状类似于詹艳等(2008)提出的“烟斗”构造,皇城—双塔断裂即发育在冷龙岭隆起与武威盆地接触部位深度约 20 km 左右电阻率陡坎状变化的“烟斗”与“烟嘴”部位,此断裂亦为 1927 年古浪 8.0 级地震发震断裂。

HYFP 剖面显示在民勤南部出现了强烈的高低阻电性界面,位于可能存在的红崖山—四道山断裂位置,表明此处可能存在着深大断裂,此处也恰位于刘洪春等(2000)通过地表地质调查发现 1954 年民勤  $M_s7.0$  地震地表破裂带和等震线区域以及刘白云等(2014)通过小震精定位统计认为的地震区位置,即为推测存在的红崖山—四道山断裂。电性结构图显示此断裂在上地壳为陡立高角度南倾高低阻电性分界带,分割了南侧的武威盆地和北侧的潮水盆地,向下延伸超过 20 km,北侧民勤盆地电性结构自地表到几公里范围内表现为低阻构造,为新生代盆地样式,到十几公里深处出现次高阻层,呈现出较为稳定的构造特征,南侧武威盆地,与冷龙岭上地壳电性连为一体均为高阻结构。拉脊山山体表现为较为完整的高阻结构,延伸深度超过 20 km,在山体南侧位置呈现出低阻状态且向深部延伸,此低阻体可能破碎含水构造,表明拉脊山南缘断裂可能是拉脊山断裂系统的主控断裂。西秦岭北缘断裂表现为高角度南倾电性边界带,一直延伸至西秦岭地块下地壳穿过莫霍面,表明此断裂带和祁连—海原断裂类似为大型岩石圈边界断裂,在西秦岭地块中段先前完成的两条大地电磁剖面也发现了西秦岭北缘断裂有类似的构造特征(赵凌强等,2015)。

### 3.2 地块特征分析

赵凌强(2018)以及 Zheng 等(2013)认为青藏高原与阿拉善地块的边界带位于龙首山北缘断裂至红崖山—四道山断裂一线,结合 DKL-B 和 HYFP 两条剖面电性结构图分析,我们确定广义的祁连造山带位于西秦岭北缘断裂和红崖山—四道山断裂之间,包括西宁盆地、大坂山隆起、冷龙岭隆起、武威盆地四个次级单元。此地区构造复杂,断裂发育众多,其中祁连—海原断裂带冷龙岭断裂部分出现了明显的电性间断面,间断以北冷龙岭隆起,武威盆地共同组成了古浪过渡带,表现为较为完整的高阻结构,是青藏高原东北向拓展的最前沿位置,其中冷龙岭部分高阻体规模较深,延伸至 60 km 以下。古浪过渡

带高阻结构表现为西南深、东北浅的形态,中上地壳高阻连为一体,形似于早期认为的“鼻烟壶”状(詹艳等,2008)。下地壳表现出和其北侧的民勤盆地相互连接的中低阻构造,推测其为阿拉善地块俯冲物质。祁连—海原断裂带冷龙岭断裂部分以南的南祁连区域,浅部电性结构呈现出破碎状的高阻特征,高阻层之下的中下地壳出现了分布广泛的低阻层。据郑文俊等(2009,2013)的研究表明,祁连山构造带主要形成一个由南向北扩展的发育的“花状构造”,表现出明显的向北扩展特征,其中祁连—海原断裂是该“花状构造”的中心断裂,也是该区域最主要的大型断裂带,与此次大地电磁探测结果相似,说明了青藏高原整体对祁连山构造带的挤压作用。

阿拉善地块位于红崖山—四道山断裂以北区域,该区域电性结构呈现出高低成层特性,中下地壳为相对低阻层,类似于稳定的鄂尔多斯地块(赵国泽等,2004;詹艳等,2005;王鑫等,2010),稳定地块电性结构的这种特点也在其他地方也得到发现(Jones,1992)。

## 4 门源 $M_s6.4$ 地震构造和孕震环境讨论

### 4.1 门源 $M_s6.4$ 地震发震构造与震源区介质特征

2016 年门源  $M_s6.4$  地震发生在青藏高原东北缘地区祁连造山带内的祁连—海原断裂冷龙岭段附近(中国地震局地质研究所网站, <http://www.eq-igl.ac.cn>;徐锡伟等,2017)。冷龙岭断裂处于广义的祁连—海原断裂带中西段,梁姗姗等(2017)通过余震序列重定位和主震震源机制解发现的门源  $M_s6.4$  地震为纯逆冲型地震特征与郑文俊等(2009)研究发现的冷龙岭断裂表现为强烈走滑运动趋势的结果不一致。大地电磁探测结果显示,冷龙岭断裂为 SW 倾向,50、51、52 号测点之下表现为较宽的 SW 向低阻体,这样较宽的低阻体存在为冷龙岭断裂和冷龙岭北侧断裂共同存在提供了地球物理学依据。图 7c 给出了门源  $M_s6.4$  地震主震、余震的空间分布图与震中附近地貌图,根据郭鹏等(郭鹏,2016;郭鹏等,2017)推测位置也绘制出了伴生的冷龙岭北侧断裂的分布。如图 7c 所示,该次地震主震、余震表现为 NW 向密集条带分布,优势方位为  $NW35^\circ$ ,与研究区电性最佳主轴方向较为一致,也与冷龙岭断裂走向相近。大地电磁结果揭示冷龙岭断裂为高角度 SW 倾向,而此次地震的主、余震绝大部分分布于冷



龙岭断裂 NE 侧区域,表明该次地震主,余震主要分布于冷龙岭断裂下盘,这与一般逆冲型地震主,余震主要分布在断层上盘的特征(徐锡伟等,2013)不符.推测冷龙岭北侧断裂可能对门源  $M_s6.4$  地震主震和余震起主要的控制作用,而该断裂为冷龙岭断裂在青藏高原北东向拓展过程中产生的伴生断裂,表现出逆冲特征,此次地震的主,余震绝大部分分布于冷龙岭北侧断裂的上盘.在大的断裂系统中,尤其是构造应力积累演化较快的断裂系统两侧,常常会产生许多小的断层或者破碎带,它们多为主断层错动时产生的撕裂作用引起,多表现为高倾角,在同样的区域构造应力背景下,可能表现出与主断层不同的震源机制.我们推断冷龙岭北侧断裂是冷龙岭断裂在强烈左旋走滑过程中浅部(10 km 以上)地壳撕裂而成并承接了冷龙岭断裂的逆冲分量,其与冷龙岭断裂共同组成冷龙岭断裂系统,在浅部(10 km 以上)形成类似于小的“花状”构造,并在深部收敛于冷龙岭断裂上,断裂系统整体表现为走滑为主兼具逆冲运动性质.

众所周知,中强地震的发生是由于断层整体失稳滑动而致,断层失稳滑动的过程中往往需要一个解耦层为断层的提供整体错动条件, Ma 等(1996)研究发现地壳内中强度相对较低的“弱”的低阻低速流体可以提供这种解耦作用.日本学者在 20 世纪 80 年代利用大地电磁方法曾发现过一个与活动断层结构紧密相关的低阻异常带 (Electromagnetic Research Group for the Active Fault, 1982),此后,在美国加利福尼亚州著名的圣安德列斯断裂带地震区多国科学家也通过大地电磁观测发现了断层西侧存在着上地幔涌出的流体低阻层,引起了断层内部的电阻率显著变化 (Unsworth et al., 1997; Becken et al., 2011).我国科学家在青藏高原周缘地区、天山地区以及华南地块等多个活动地震区的大地电磁探测研究(胥颐和王克元, 1995; 王绪本等, 2009; Bai et al., 2010; Zhao et al., 2012; 詹艳等, 2013; 胡祥云等, 2017)表明在中下地壳断层带内出现的中低阻层是由于介质在高温高压条件下使岩石发生相变脱水或熔融所致,反映了介质的力学性质.此次大地电磁探测结果显示 2016 年门源  $M_s6.4$  地震震源区下向表现为较宽的 SW 向低阻体,与 Shen 等(2017)在该次地震震源区附近发现的地震波低速区较为相似.梁姗姗等(2017)通过余震序列重定位表明门源  $M_s6.4$  地震余震深度集中分布在 4~14 km 范围内,这也与大地电磁揭示的冷龙岭断裂系统下方

5 km 深度开始出现 SW 向低阻体并向下延伸的结果对应,表明门源  $M_s6.4$  地震区冷龙岭断裂系统下方可能形成了明显的力学强度软弱区,这种力学强度软弱区的存在促进了地震蠕动、滑移和发生.

#### 4.2 门源 $M_s6.4$ 地震孕震动力学环境讨论

图 8a 给出了 2016 年门源  $M_s6.4$  地震发生之前青藏高原东北缘地区 2011—2014 年期间我们通过一年两期流动重力测量获得的累计 4 年尺度的重力场变化分布(祝意青等, 2016),结果表明青藏高原东北缘地区重力变化在祁连—海原断裂附近出现了明显正负边界带,在祁连—海原断裂以南区域重力变化以负值为主而祁连—海原断裂北侧重力变化转为正值为主,且重力变化正负梯度带与祁连—海原断裂带走向基本一致;图 8b 给出了青藏高原东北缘地区现今水准场分布特征(Hao et al., 2014),结果表明祁连—海原断裂附近出现了明显的边界带特征,在断裂以南区域最大出现  $5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  左右的隆升趋势,而在断裂以北区域水准场迅速衰减至  $0 \sim 1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  左右;图 9a 给出了 2016 年门源  $M_s6.4$  地震发生之前青藏高原东北缘地区 2009—2015 年 GPS 观测网络最新获得水平向速度场分布(相对于欧亚板块),GPS 速度场显示出祁连山东段是青藏高原至阿拉善地块重要的水平速度转换带且表现出明显的南东向顺时针转弯趋势.我们将包含两条大地电磁剖面范围内宽 220 km,长 430 km 范围内的 GPS 站点分解为垂直于祁连—海原断裂方向速度分量(图 9b,  $\text{NE}20^\circ$ )和平行于祁连—海原断裂方向分量(图 9c,  $\text{NE}110^\circ$ )(定义 GPS 速度场以北和东向为正),图 9b 所示,青藏高原东北缘的地区 GPS 速度分量由高原内部的  $10 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  左右减小到祁连—海原断裂的  $5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  左右,并表现出往北越来越小的趋势,进入阿拉善地块后衰减至  $1 \sim 2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  左右,表明垂直于祁连—海原断裂方向地壳出现了强烈缩短的趋势.图 9c 所示,祁连—海原断裂以南区域 GPS 速度分量分布在  $10 \sim 15 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  左右,而祁连—海原断裂以北区域, GPS 速度分量则快速衰减至  $5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  左右,表明在祁连—海原断裂附近正在遭受着滑动速率至少  $5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  以上的左旋剪切作用.现今水准场、重力场、GPS 速度场分布特征以及结合大地电磁探测结果,表明祁连—海原断裂为青藏高原东北缘地区最为明显的一条边界断裂,受控于青藏高原北东向拓展和阿拉善地块的阻挡作用,祁连—海原断裂附近目前正承受着巨大的 NE 向挤压应力.两条大地电磁剖面揭示出祁连—海原

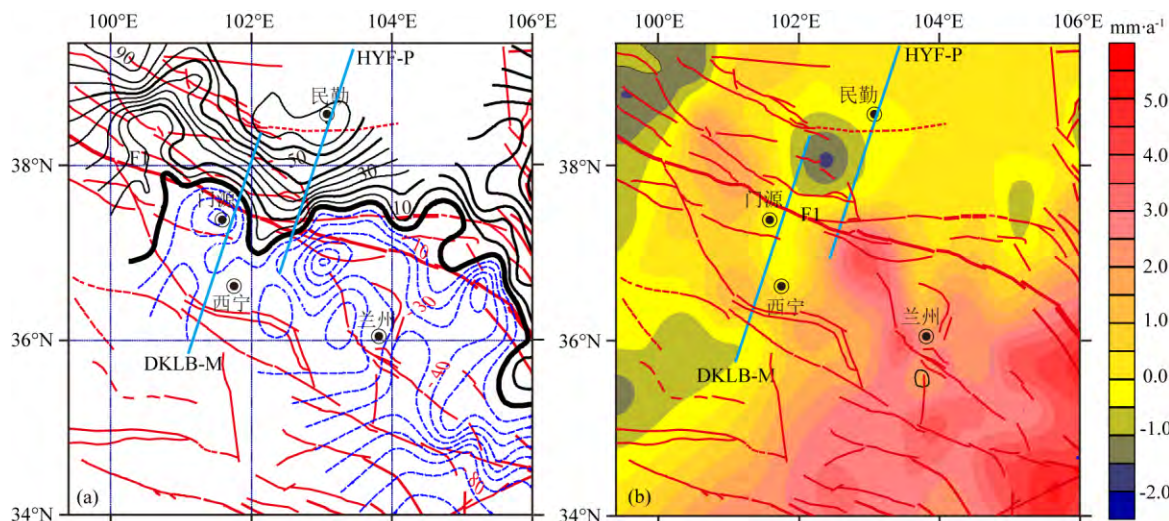


图 8 青藏高原东北缘 2011—2014 年累计重力变化(a)(等值线单位:  $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )与水准场年速率分布图(b)

Fig. 8 Gravity changes from 2011 to 2014 (a) (contours represent, unit:  $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) and vertical deformation rates (b) in northeastern margin of Tibetan plateau

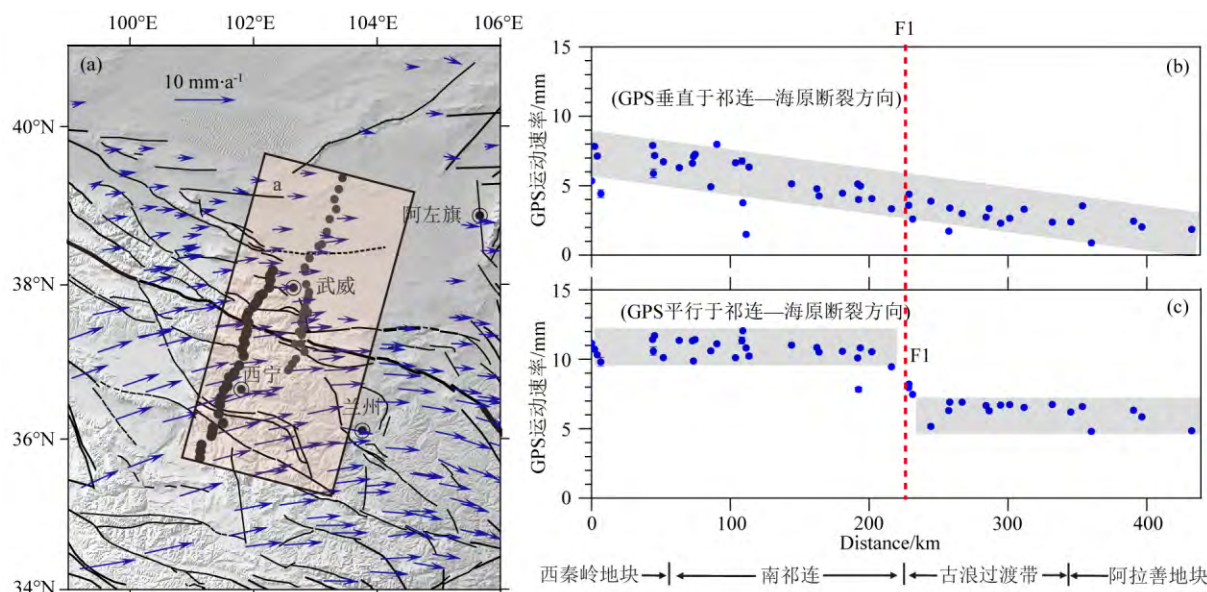


图 9 青藏高原东北缘 2009—2015 年 GPS 速度场(a)与 GPS 垂直冷龙岭断裂分量(b)平行冷龙岭断裂分量(c)

Fig. 9 GPS velocity field in northeastern margin of Tibetan Plateau (a), GPS component perpendicular to Lenglongling fault (b), and GPS component parallel to Lenglongling fault (c)

断裂带冷龙岭断裂部分以北的北部祁连区域均表现为完整的不易变形的高阻结构,这种完整高阻结构的阻挡作用使冷龙岭断裂附近中下地壳软弱低阻物质发生了挤压隆升的造山过程,这导致门源  $M_s6.4$  地震区形成了海拔高达 5254 m 的岗什卡雪山,而这种巨大的 NE 向挤压应力由于受到北部不易变形高阻结构的阻挡在冷龙岭断裂附近又转化为持续、剧烈的侧向逃逸作用。以上分析表明冷龙岭断裂附近正在经历着明显左旋剪切和南北向地壳缩短以及强烈的垂直向隆升,是青藏高原东北向拓展作用最

强烈、构造转化最剧烈的地区,这种动力学环境可能是门源  $M_s6.4$  地震发生的最主要原因,与 1927 年古浪  $M_s8.0$  地震(詹艳等,2008)和 1954 年民勤  $M_s7.0$  地震(赵凌强等,2018)相似,2016 年门源  $M_s6.4$  地震的发生同样是青藏高原东北向拓展过程中的一次地震事件。

## 5 结论

本文对所采集到的数据使用数据处理和反演方

法获得了的二维深部电性结构图,结合青藏高原东北缘地区最新获得的相对于欧亚板块 2009—2015 年 GPS 速度场分布特征,1 月 21 日门源  $M_s6.4$  地震主震,余震分布特征以及其他地质与地球物理资料等,探讨了门源  $M_s6.4$  地震的发震断裂,断裂带空间展布、延伸位置;分析了门源  $M_s6.4$  地震孕震环境与地震动力学背景等以及祁连山地区深部构造特征等相关问题,所获结论如下:

(1)2016 年门源  $M_s6.4$  地震震源区下表现为较宽的 SW 倾向低阻体,低阻体的存在不仅表示应力聚集区,也反映了该地区的构造不稳定性,表明地震震源区附近可能形成了明显的力学强度软弱区,这种力学强度软弱区的存在促进了地震蠕动、滑移和发生,这可能是 2016 年门源  $M_s6.4$  地震发生的原因之一.冷龙岭北侧断裂可能对门源  $M_s6.4$  地震主震和余震的发生起控制作用,而该断裂为冷龙岭断裂在青藏高原北东向拓展过程中产生的伴生断裂,推测冷龙岭断裂和冷龙岭北侧断裂共同组成冷龙岭断裂系统,断裂系统整体表现为走滑为主兼具逆冲运动性质.

(2)现今水准场、重力场、GPS 速度场分布特征以及大地电磁探测结果均表明祁连—海原断裂带冷龙岭断裂部分为青藏高原东北缘地区最为明显的一条边界断裂.受控于青藏高原北东向拓展和阿拉善地块的阻挡作用,冷龙岭断裂附近目前正处于青藏高原北东向拓展作用最强烈、构造转化最剧烈的地区,这种动力学环境可能是门源  $M_s6.4$  地震发生的最主要原因,与 1927 年古浪  $M_s8.0$  地震和 1954 年民勤  $M_s7.0$  地震相似,2016 年门源  $M_s6.4$  地震的发生同样是青藏高原北东向拓展过程中的一次地震事件.

致谢 野外数据采集过程中得到了余文斌、杨涛、杨飞、王伟、张占发等人的大力协助;与中国地震局地质研究所郭鹏博士在活动构造方面进行了有益的讨论;中国地震局台网中心范晔博士提供了地震余震分布数据;中国地震局第二监测中心李煜航博士提供了 GPS 分解算法程序,两名匿名专家为本文的修改和完善提供了宝贵的建议,在此一并表示感谢.

## References

Bai D H, 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, doi: 10.1038/

NGEO830.

- Becken M, Ritter O, Bedrosian P A, et al. 2011. Correlation between deep fluids, tremor and creep along the central San Andreas fault. *Nature*, 480(7375): 87-90.
- Bibby H M, Caldwell T G, Brown C. 2005. Determinable and non-determinable parameters of galvanic distortion in magnetotellurics. *Geophysical Journal International*, 163(3): 915-930.
- Booker J R. 2014. The magnetotelluric phase tensor: A critical review. *Surveys in Geophysics*, 35(1): 7-40.
- Cai J T, Chen X B. 2010. Refined techniques for data processing and 2-dimensional inversion in magnetotelluric II: Which data polarization mode should be used in 2D inversion. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 53(11): 2703-2714, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.018.
- Cai J T, Chen X B, Xu X W, et al. 2017. Rupture mechanism and seismotectonics of the  $M_s6.5$  Ludian earthquake inferred from three-dimensional magnetotelluric imaging. *Geophysical Research Letters*, 44(3): 1275-1285.
- Cai J T, Chen X B, Zhao G Z. 2010. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric I: Tensor decomposition and dimensionality analysis. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 53(10): 2516-2526, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.025.
- Caldwell T G, Bibby H M, Brown C. 2004. The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal international*, 158(2): 457-469.
- Chave A D, Thomson D J, Ander M E. 1987. On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer functions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B1): 633-648.
- Chen L S, Wang G E. 1990. Magnetotelluric Sounding Method (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 10-15.
- Chen X B, Zhao G Z, Zhan Y. 2004. A visual integrated windows system for MT data process and interpretation. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 39(S1): 11-16.
- Cherevatova M, Smirnov M Y, Jones A G, et al. 2015. Magnetotelluric array data analysis from north-west Fennoscandia. *Tectonophysics*, 653: 1-19.
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. 2003. Active tectonics and earthquake activities in China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 10(S1): 66-73.
- Egbert G D, Booker J R. 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 87(1): 173-194.
- Electromagnetic Research Group for the Active Fault. 1982. Low electrical resistivity along an active fault, the Yamasaki Fault. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 34(2): 103-127.
- Guo P. 2016. Holocene slip rate and seismogenic capacity of the Lenglongling fault, Northeastern Margin of the Tibetan Plateau [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Beijing Institute of Geology, China Earthquake Administration, 59-71.
- Guo P, Han Z J, An Y F, et al. 2017. Activity of the Lenglongling fault system and seismotectonics of the 2016  $M_s6.4$  Menyuan



- earthquake. *Science China Earth Sciences*, 60(5): 929-942.
- Han Z J, Lu F S, Ji F G, et al. 2012. Seismotectonics of the 26 November 2005 Jiujiang-Ruichang, Jiangxi,  $M_s5.7$  Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 497-509.
- Hao M, Wang Q L, Shen Z K, et al. 2014. Present day crustal vertical movement inferred from precise leveling data in eastern margin of Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 632: 281-292.
- Heise W, Caldwell T G, Bibby H M, et al. 2008. Three-dimensional modelling of magnetotelluric data from the Rotokawa geothermal field, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geophysical Journal International*, 173(2): 740-750.
- Hu C Z, Yang P X, Li Z M, et al. 2016. Seismogenic mechanism of the 21 January 2016 Menyuan, Qinghai  $M_s6.4$  earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(5): 1637-1646, doi: 10.6038/cjg20160509.
- Hu X Y, Bi B T, Liu G X, et al. 2017. The lithospheric electrical structure of Ji'an-Fuzhou profile in the east part of South China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(7): 2756-2766, doi: 10.6038/cjg20170721.
- Jones A G. 1992. Electrical conductivity of the continental lower crust. // Fountain D M, Arculus R, Kay R W eds. *Continental Lower Crust*. Amsterdam: Elsevier, 81-143.
- Liang S S, Lei J S, Xu Z G, et al. 2017. Relocation of the aftershock sequence and focal mechanism solutions of the 21 January 2016 Menyuan, Qinghai,  $M_s6.4$  earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(6): 2091-2103, doi: 10.6038/cjg20170606.
- Liu B Y, Zeng W H, Yuan D Y, et al. 2014. Fault parameters and slip properties of the 1954 Northern Tengger Desert  $M7.0$  earthquake. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 36(3): 622-627.
- Liu H C, Dai H G, Li L H, et al. 2000. A preliminary study on the 1954 Minqin  $M_s7.0$  Earthquake in Gansu Province. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 22(3): 232-235.
- Ma J, Ma S L, Liu L Q, et al. 1996. Geometrical textures of faults, evolution of physical field and instability characteristics. *Acta Seismologica Sinica*, 9(2): 261-269.
- Rodi W, Mackie R L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66(1): 174-187.
- Shen X Z, Kim Y H, Gan W J. 2017. Lithospheric velocity structure of the northeast margin of the Tibetan Plateau: Relevance to continental geodynamics and seismicity. *Tectonophysics*, 712-713: 482-493.
- Unsworth M J, Malin P, Egbert G D, et al. 1997. Internal structure of the San Andreas fault at Parkfield, California. *Geology*, 25(4): 359-362.
- Wang X, Zhan Y, Zhao G Z, et al. 2010. Deep electric structure beneath the northern section of the western margin of the Ordos basin. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 50(3): 595-604, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.03.013.
- Wang X B, Zhu Y T, Zhao X K, et al. 2009. Deep conductivity characteristics of the Longmen Shan, Eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(2): 564-571.
- Xiao Q B. 2005. A visualization scheme of MT data processing based on database platform. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 29(3): 269-272.
- Xu X W, Wen X Z, Han Z J, et al. 2013. Lushan  $M_s7.0$  earthquake: A blind reverse-fault event. *Chinese Science Bulletin*, 58(28-29): 3437-3443.
- Xu X W, Wu X Y, Yu G H, et al. 2017. Seismo-geological signatures for identifying  $M \geq 7.0$  earthquake risk areas and their preliminary application in mainland China. *Seismology and Geology* (in Chinese), 39(2): 219-275.
- Xu Y, Wang K Y. 1995. Crustal conductivity layer in Tianshan area and hypocenter environment. *Inland Earthquake* (in Chinese), 9(2): 112-117.
- Zhan Y, Zhao G Z, Unsworth M, et al. 2013. Deep structure beneath the southwestern section of the Longmenshan fault zone and seismogenic context of the 4.20  $M_s7.0$  earthquake. *Chinese Science Bulletin*, 58(28-29): 3467-3474.
- Zhan Y, Zhao G Z, Wang J J, et al. 2005. Crustal electric structure of Haiyuan arcuate tectonic region in the northeastern margin of Qinghai-Xizang plateau, China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 27(4): 431-440.
- Zhan Y, Zhao G Z, Wang J J, et al. 2008. Deep electric structure beneath the epicentre of the 1927 Gulang  $M8$  earthquake and its adjacent areas from magnetotelluric sounding. *Chinese Journal of Geophys* (in Chinese), 51(2): 511-520.
- Zhang P Z, Wang Q, Ma Z J. 2002. GPS velocity field and active crustal deformation in and around the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 9(2): 442-450.
- Zhang S, Xu Y X, Li J, et al. 2017. Electrical structures in the northwest margin of the Junggar basin: Implications for its late Paleozoic geodynamics. *Tectonophysics*, 717: 473-483.
- Zhao G Z, Tang J, Zhan Y, et al. 2005. Relation between electricity structure of the crust and deformation of crustal blocks on the northeastern margin of Qinghai-Tibet plateau. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 48(10): 1613-1626.
- Zhao G Z, 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.
- Zhao L Q, Zhan Y, Chen X B, et al. 2015. Deep electrical structure of the central west Qinling orogenic belt and blocks on its either side. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(7): 2460-2472, doi: 10.6038/cjg20150722.
- Zhao L Q, Zhan Y, Wang Q L, et al. 2018. Deep electrical structure beneath the 1954  $M_s7.0$  Minqin, Gansu earthquake and its seismotectonic environment. *Seismology and Geology* (in Chinese), 40(3): 552-565.
- Zheng W J, Zhang P Z, Ge W P, et al. 2013. Late Quaternary slip rate of the South Heli Shan Fault (northern Hexi Corridor, NW China) and its implications for northeastward growth of

the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 32(2): 271-293.

- Zheng W J, Zhang P Z, Yuan D Y, et al. 2009. Deformation on the northern of the Tibetan plateau from GPS measurement and geologic rates of Late Quaternary along the major fault. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(10): 2491-2508, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.008.
- Zheng W J, Zhang Z Q, Zhang P Z, et al. 2013. Seismogenic structure and mechanism of the 1954  $M_s 7.1/4$  Shandan Earthquake, Gansu Province, Western China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(3): 916-928, doi: 10.6038/cjg20130320.
- Zhu Y Q, Li T M, Hao M, et al. 2013. Gravity changes before the Menyuan, Qinghai  $M_s 6.4$  earthquake of 2016. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(10): 3744-3752, doi: 10.6038/cjg20161019.

## 附中文参考文献

- 蔡军涛, 陈小斌. 2010. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(二)—反演数据极化模式选择. *地球物理学报*, 53(11): 2703-2714, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.018.
- 蔡军涛, 陈小斌, 赵国泽. 2010. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(一)—阻抗张量分解与构造维性分析. *地球物理学报*, 53(10): 2516-2526, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.025.
- 陈乐寿, 王光锬. 1990. 大地电磁测深法. 北京: 地质出版社, 10-15.
- 陈小斌, 赵国泽, 詹艳. 2004. MT 资料处理与解释的 Windows 可视化集成系统. *石油地球物理勘探*, 39(S1): 11-16.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康等. 2003. 中国活动构造与地震活动. *地学前缘*, 10(S1): 66-73.
- 郭鹏. 2016. 冷龙岭断裂全新世滑动速率与发震能力研究[博士学位论文]. 北京: 中国地震局地质研究所, 59-71.
- 郭鹏, 韩竹军, 安艳芬等. 2017. 冷龙岭断裂系活动性与 2016 年门源 6.4 级地震构造研究. *中国科学: 地球科学*, 47(5): 617-630.
- 胡朝忠, 杨攀新, 李智敏等. 2016. 2016 年 1 月 21 日青海门源 6.4 级地震的发震机制探讨. *地球物理学报*, 59(5): 1637-1646, doi: 10.6038/cjg20160509.
- 胡祥云, 毕奔腾, 刘国兴等. 2017. 华南东部吉安—福州剖面岩石圈电性结构研究. *地球物理学报*, 60(7): 2756-2766, doi: 10.6038/cjg20170721.
- 梁姗姗, 雷建设, 徐志国等. 2017. 2016 年 1 月 21 日青海门源  $M_s 6.4$  余震序列重定位和主震震源机制解. *地球物理学报*, 60(6): 2091-2103, doi: 10.6038/cjg20170606.
- 刘白云, 曾文浩, 袁道阳等. 2014. 1954 年腾格里沙漠北 7 级地震断层面参数和滑动性质研究. *地震工程学报*, 36(3): 622-627.
- 刘洪春, 戴华光, 李龙海等. 2000. 对 1954 年民勤 7 级地震的初步研究. *西北地震学报*, 22(3): 232-235.
- 王绪本, 朱迎堂, 赵锡奎等. 2009. 青藏高原东缘龙门山逆冲构造深部电性结构特征. *地球物理学报*, 52(2): 564-571.
- 王鑫, 詹艳, 赵国泽等. 2010. 鄂尔多斯盆地西缘构造带北段深部电性结构. *地球物理学报*, 50(3): 595-604, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.03.013.
- 肖骑彬. 2005. 基于数据库平台的 MT 数据处理可视化方案. *物探与化探*, 29(3): 269-272.
- 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军等. 2013. 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.
- 徐锡伟, 吴熙彦, 于贵华等. 2017. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用. *地震地质*, 39(2): 219-275.
- 胥颐, 王克元. 1995. 天山的壳内高导层与震源环境. *内陆地震*, 9(2): 112-117.
- 詹艳, 赵国泽, Unsworth M 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.
- 詹艳, 赵国泽, 王继军等. 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.
- 詹艳, 赵国泽, 王继军等. 2008. 1927 年古浪 8 级大地震区及其周边地块的深部电性结构. *地球物理学报*, 51(2): 511-520.
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场. *地学前缘*, 2002, 9(2): 442-450.
- 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: 地球科学*, 34(10): 908-918.
- 赵凌强, 詹艳, 陈小斌等. 2015. 西秦岭造山带(中段)及其两侧地块深部电性结构特征. *地球物理学报*, 58(7): 2460-2472, doi: 10.6038/cjg20150722.
- 赵凌强, 詹艳, 王庆良等. 2018. 1954 年甘肃民勤 7 级地震区深部电性结构特征及其地震构造环境研究. *地震地质*, 40(3): 552-565.
- 郑文俊, 张培震, 袁道阳等. 2009. GPS 观测及断裂晚第四纪滑动速率所反映的青藏高原北部变形. *地球物理学报*, 52(10): 2491-2508, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.008.
- 郑文俊, 张竹琪, 张培震等. 2013. 1954 年山丹  $7.1/4$  级地震的孕震构造和发震机制探讨. *地球物理学报*, 56(3): 916-928, doi: 10.6038/cjg20130320.
- 祝意青, 李铁明, 郝明等. 2016. 2016 年青海门源  $M_s 6.4$  地震前重力变化. *地球物理学报*, 59(10): 3744-3752, doi: 10.6038/cjg20161019.

(本文编辑 张正峰)