

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2018.03.004

1954年甘肃民勤7级地震区深部电性结构特征及地震构造环境研究

赵凌强^{1,2)} 詹艳^{1)*} 王庆良²⁾ 孙翔宇¹⁾ 杨皓¹⁾ 陈小斌¹⁾

1) 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

2) 中国地震局第二监测中心, 西安 710043

摘要 1954年7月31日, 在甘肃省民勤县东南部发生了1次7级地震, 震中处于青藏高原NE向挤压阿拉善地块的前缘部位, 构造活动强烈。由于此次地震的记录、地表地质调查和其他研究资料都较少, 关于此次地震的发震断裂以及孕震环境还有诸多不确定。为研究这一地区的深部构造, 在古浪8级地震区的大地电磁剖面北段的基础上进行了加密测量, 共获得了28个测点数据。文中利用先进的处理与解释技术对这些数据做了反演, 得到了研究区的深部电性结构。参考前人的研究结果, 地质解释认为1954年民勤7级地震的发生可能与红崖山-四道山断裂(F_1)有关, 此断裂表现为高角度逆冲为主兼具左旋走滑特性的逆冲走滑断裂带, 是在青藏高原地块与阿拉善地块之间形成的巨大的地块边缘碰撞断裂带, 在青藏高原NE向的扩展过程中积累了大量的应变能量, 成为构造应力集中之处, 导致此地区有历史记录以来发生多次5级以上地震。青藏高原地块以单侧北向“花状”向NE向扩展, 阿拉善地块呈“铲状”向SW侧俯冲挤压, 它们的相互作用控制了青藏高原的NE向生长, 扩展最前缘位于红崖山-四道山断裂(F_1)附近, 表明青藏高原向N向扩展的活动前缘可能已经延伸至河西走廊北部的阿拉善南缘区域。红崖山-四道山断裂(F_1)附近的构造变形代表着欧亚大陆碰撞的远程效应, 表明青藏高原正在向更远的阿拉善地块南部继续扩展。

关键词 大地电磁 民勤7.0级地震 青藏高原 NE向扩展 红崖山-四道山断裂

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2018)03-552-14

0 引言

有关青藏高原NE向扩展挤压阿拉善地块作用的研究在近年来成为地球科学领域研究的热点问题(Molnar *et al.*, 1975; Tapponnier *et al.*, 1982; Yuan *et al.*, 2013; 郑文俊等, 2013; Shen *et al.*, 2015; Ye *et al.*, 2015; Yu *et al.*, 2016; 苏琦等, 2017), 甘肃民勤地震区处于青藏高原NE向扩展挤压阿拉善地块的前缘部位, 构造活动极为强烈, 雷中生等(2010)通过野外实地调查以及查阅史籍《镇番遗事厉鉴》得知此地历史上曾发生过多次中强地震, 包括1682年民勤小坝口6级地震、1449年民勤东北5.5级地震、1471年民勤5级地震、1806年民勤南栅子沟5级地震、1820年民勤6级地震、1926年冬民勤5级地震等, 属于典型的具有“地震窝”特征的历史地震区, 该地震区紧邻西北地区人口密集区河西走廊, 周边分布有武威、金昌等重要城镇。

[收稿日期] 2017-02-14 收稿, 2017-06-30 改回。

[基金项目] 国家自然科学基金(41474057)与中国地震局地震三结合课题(CEA-JC/3JH-163801)共同资助。

* 通讯作者: 詹艳, 女, 研究员, E-mail: zhanyan66@vip.sina.com。

中华人民共和国成立后的 1954 年 7 月 31 日, 在甘肃省民勤县东南部又发生了 1 次 7 级地震, 震中烈度为 IX, 此次地震发生在阿拉善地块南部边缘地带, 是其南侧的青藏地块、东侧鄂尔多斯地块与阿拉善地块相互作用的结果; 地震发生之后, 谢毓寿(1955)、郭增建等(1963)对该次地震的 VIII 度区烈度和可能的宏观震中进行过一些研究, 认为此次发震构造可能为腾格里沙漠下沿 104°E 的 1 条 SN 向展布的断裂。刘洪春等(2000)研究了该次地震的宏观震中、震区烈度分布及地质构造背景等问题, 认为地震区存在着近 EW 走向的红崖山-四道山断裂(F_1), 该次地震是由于红崖山-四道山断裂(F_1)在 NE 向或 NNE 向主压应力作用下发生左旋斜冲向东端扩张破裂的结果。刘白云等(2014)通过分析小震定位反演结果, 认为该次地震的震源断层为 1 条近 EW 走向, 长约 52km, 由西向东从民勤县王家圈(38.31°N , 103.49°E)延伸至内蒙古自治区阿拉善左旗茨湖(38.40°N , 104.07°E)的高倾角左旋走滑断层, 表明此区域可能存在近 EW 走向的逆冲左旋断裂。此次地震属于典型的西北地区荒漠地震, 且发生在 50 多年前的中华人民共和国建立初期, 地震的记录、地表地质调查和研究资料都较少, 地震发生之后, 风、雨等动力因素极大地破坏了地震时形成的地裂缝等地震遗迹, 同时该区沙漠大片掩盖, 露头较少, 给观察研究工作带来了极大的困难, 所以对于此次地震的震中位置、发震断裂以及孕震环境还有诸多不确定。

詹艳等(2008)完成了 1 条横跨 1927 年古浪 8 级地震区的大地电磁剖面, 表明古浪地震震源区位于电性结构陡变带, 是发生在深部“断坡”的地震。剖面向 N 穿过了 1954 年民勤 7 级地震区, 结果揭示民勤南部存在着明显的高、低阻边界带, 但剖面大地电磁测点在该地区较为稀疏, 其精确的电性结构还需要进一步的深入研究, 在此基础上, 我们于 2015 年 6—7 月对该剖面在民勤地震区及其两侧地块进行了加密测量。本文通过对野外数据精细化处理分析和反演得到民勤地震区和沿剖面各地块的深部电性结构图像等资料, 从电性结构角度理解民勤地震区的深部结构特征和青藏高原东北缘与阿拉善地块的深部接触关系, 更加合理地探讨 1954 年民勤 7 级地震的发震断裂, 断裂带空间展布、延伸位置和该地区的地震构造背景以及青藏高原 NE 向拓展方式等问题。

1 野外观测与资料处理

1.1 大地电磁剖面和数据采集

此次野外数据采集在 2015 年 6—7 月间进行, 采用加拿大凤凰公司的 MTU-5A 设备进行数据采集(频带范围 $320\sim 0.0005\text{Hz}$), 在地震区进行数据采集的同时, 在陕西乾县布置了远参考站进行同步观测, 与测区进行同步记录, 以便对测区数据进行远参考处理。大地电磁剖面西南起于甘肃古浪县南部, 向东北经武威至民勤北部, 剖面沿线主要断裂有皇城-双塔断裂(F_5)、武威-天祝断裂(F_4)、香山-天景山断裂(F_6)、海原-祁连断裂(F_7)以及可能存在的红崖山-四道山断裂(F_1)(图 1 中的蓝色虚线)等, 沿线跨过祁连地块、冷龙岭隆起、武威盆地、民勤盆地等, 沿剖面共获得 28 个测点, 剖面长约 240km。对野外测量中获得的全部测点数据使用远参考和“Robust”技术(Egbert *et al.*, 1986; Chave *et al.*, 1987)进行了处理, 获得了各测点的谱数据。

1.2 数据处理和定性分析

在数据处理中, 运用中国地震局地质研究所陈小斌(2004)开发的大地电磁资料处理系统对各测点的谱数据进行处理计算, 获得了视电阻率和阻抗相位数据。

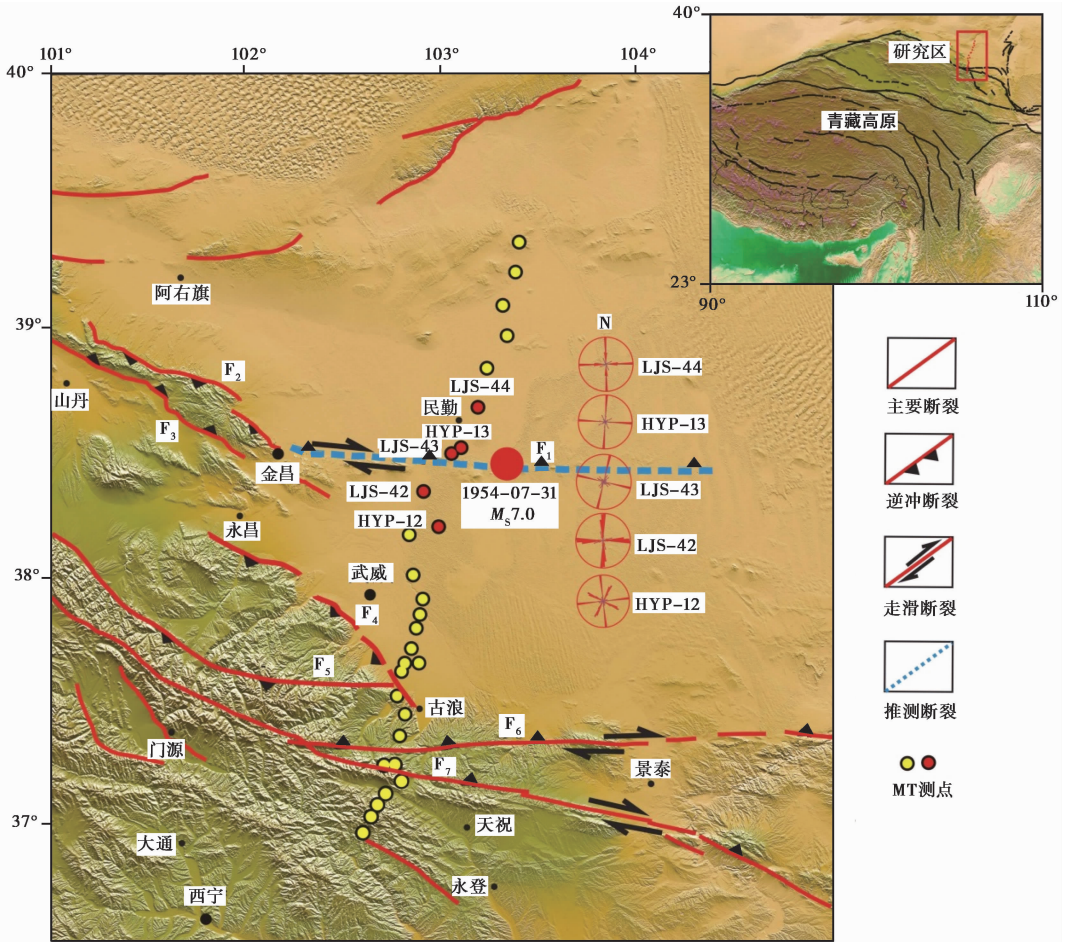


图 1 研究区主要构造特征(邓起东等, 2003)和大地电磁测点位置图
 Fig. 1 Map showing tectonic setting of study area(Deng Qi-dong *et al.*, 2003)
 and location of magnetotelluric(MT) sites.

F₁ 红崖山-四道山断裂; F₂ 龙首山北缘断裂; F₃ 龙首山南缘断裂; F₄ 武威-天祝断裂;
 F₅ 皇城-双塔断裂; F₆ 香山-天景山断裂; F₇ 海原-祁连断裂

视电阻率曲线特征: 图 2 给出了沿剖面全部 28 个测点的视电阻率和阻抗相位曲线形态和数值, 分析沿剖面各测点的视电阻率曲线数值和形态特征, 可以初步了解祁连地块、冷龙岭隆起、武威盆地、民勤盆地等几个构造单元具有明显不同的深部电性结构特征。依图所示: HYP-04、LJS-35、LJS-36 视电阻率曲线形态呈现出较为相似的特征, 表现为由高到低的特点, 且电阻率曲线数值整体较低, 此地区对应祁连地块, 反映出祁连地块在此地区呈低阻结构特征, 相邻测点 LJS-36 与 HYP-05 曲线形态差异较大, 表明此处可能存在着电性间断面; HYP-05、LJS-37、HYP-06、HYP-07、HYP-08、HYP-09、HYP-10、LJS-39 视电阻率曲线形态在低频部分呈现出上扬的趋势; 此地区对应祁连山北段的冷龙岭隆起区, 表明冷龙岭隆起区中深部可能为高阻特征, 且高阻区延伸较深, 相邻 LJS-39、HYP-11、HYP-12 三个测点间曲线形态差异较大, 此处对应皇城-双塔断裂, 表明此处可能存在着与断裂对应的电性间断面;

LJS-41、HYP-12、LJS-42 视电阻率曲线形态在低频部分呈现出上扬的趋势；此地区对应武威盆地，表明武威盆地电性结构特征可能为高阻，相邻测点 LJS-42 与 LJS-43 视电阻率曲线形态差异较大，表明 2 个测点之间存在着明显的电性间断面，此处恰好位于 1954 年地震区，可能存在着隐伏断裂。自 LJS-43 测点开始往北，视电阻率曲线形态均表现为较为平缓的低阻构造，此处对应于民勤盆地，表明民勤盆地可能自上而下呈现出中低阻构造。

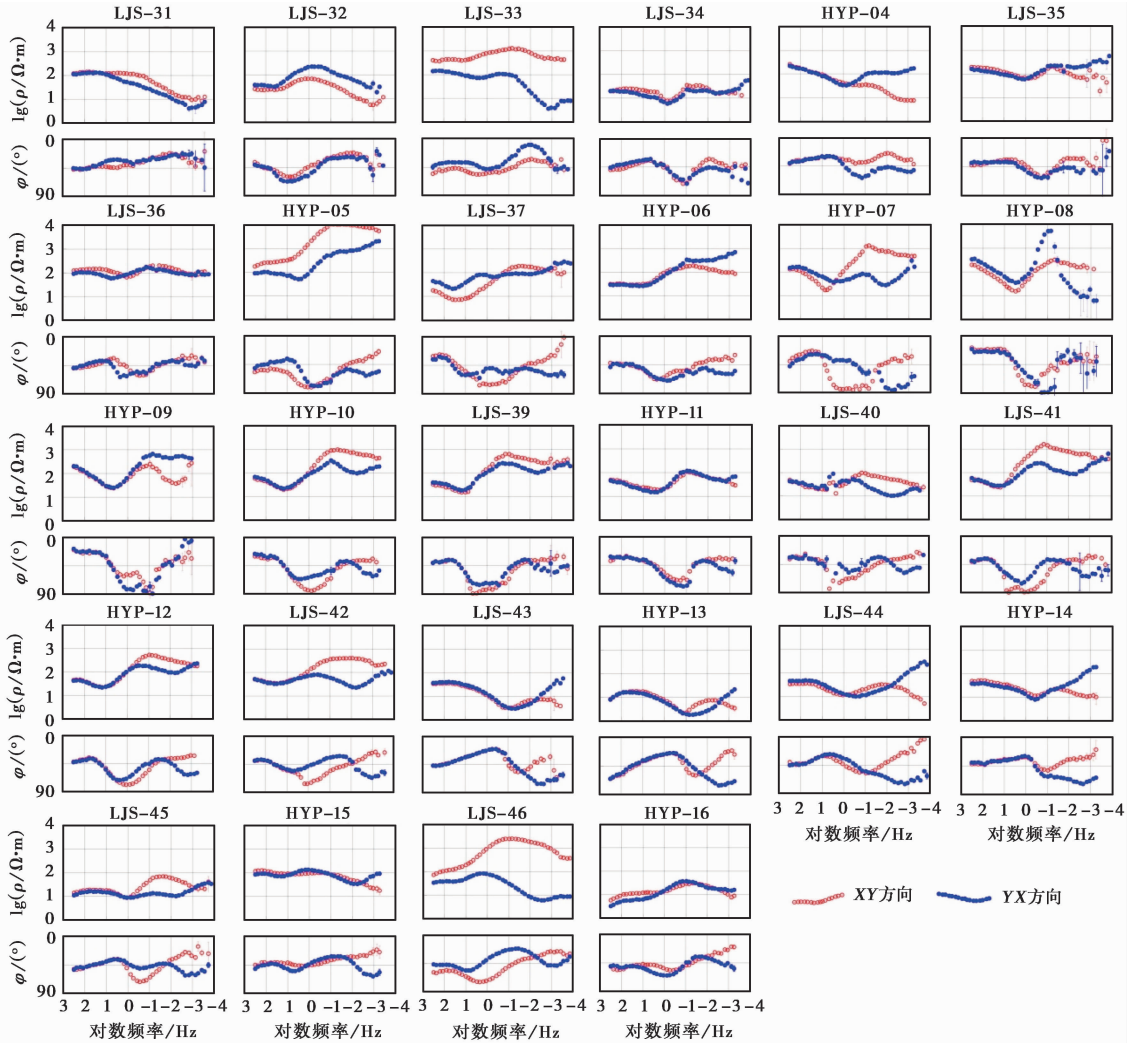


图 2 全部测点测量方向视电阻率和阻抗相位曲线图

Fig. 2 Typical apparent resistivity and phase curves of all MT sites.

区域电性走向和维性特征分析：大地电磁方法目前主要的反演技术还是基于二维反演，需要详细地分析沿剖面的二维性和电性构造走向。相位张量 (Caldwel *et al.*, 2004; 蔡军涛等, 2010a) 是用来分析构造维性特征的 1 种非常有用的工具，无需对地下介质的电性维性特征作先验性假设，而且不受局部电场畸变影响；阻抗张量实部矩阵的逆矩阵与虚部矩阵的乘积定义相位张量，一般用椭圆来表示，张量椭圆的主轴表示感应电流的方向，所以椭圆主轴方向可类

比于电性主轴方向,椭圆长轴与短轴越接近,表明研究区一维性越好,椭圆长轴与短轴差距越大,表明研究区方向性越强。每个相位张量椭圆还对应着二维偏离度角 $|\beta|$, $|\beta| < 3$ 时地下介质可近似为二维情况; $|\beta| > 3$ 时,区域电性结构视为三维情况, $|\beta|$ 值越大表明MT数据的三维性越强。图3给出了各个测点在320Hz、10Hz、1.26Hz、0.75Hz、0.17Hz、0.032Hz、0.01Hz和0.003Hz 8个周期下相位张量椭圆的情况,其中用不同颜色来表示各个椭圆的二维偏离角 $|\beta|$ 的值。如图所示,在320Hz和10Hz周期,绝大多数测点的 $|\beta|$ 值 < 2 ,张量椭圆短轴与长轴接近,几乎退化为圆,表示浅部构造较为简单,近似为一维层状结构,主要为沉积层;在

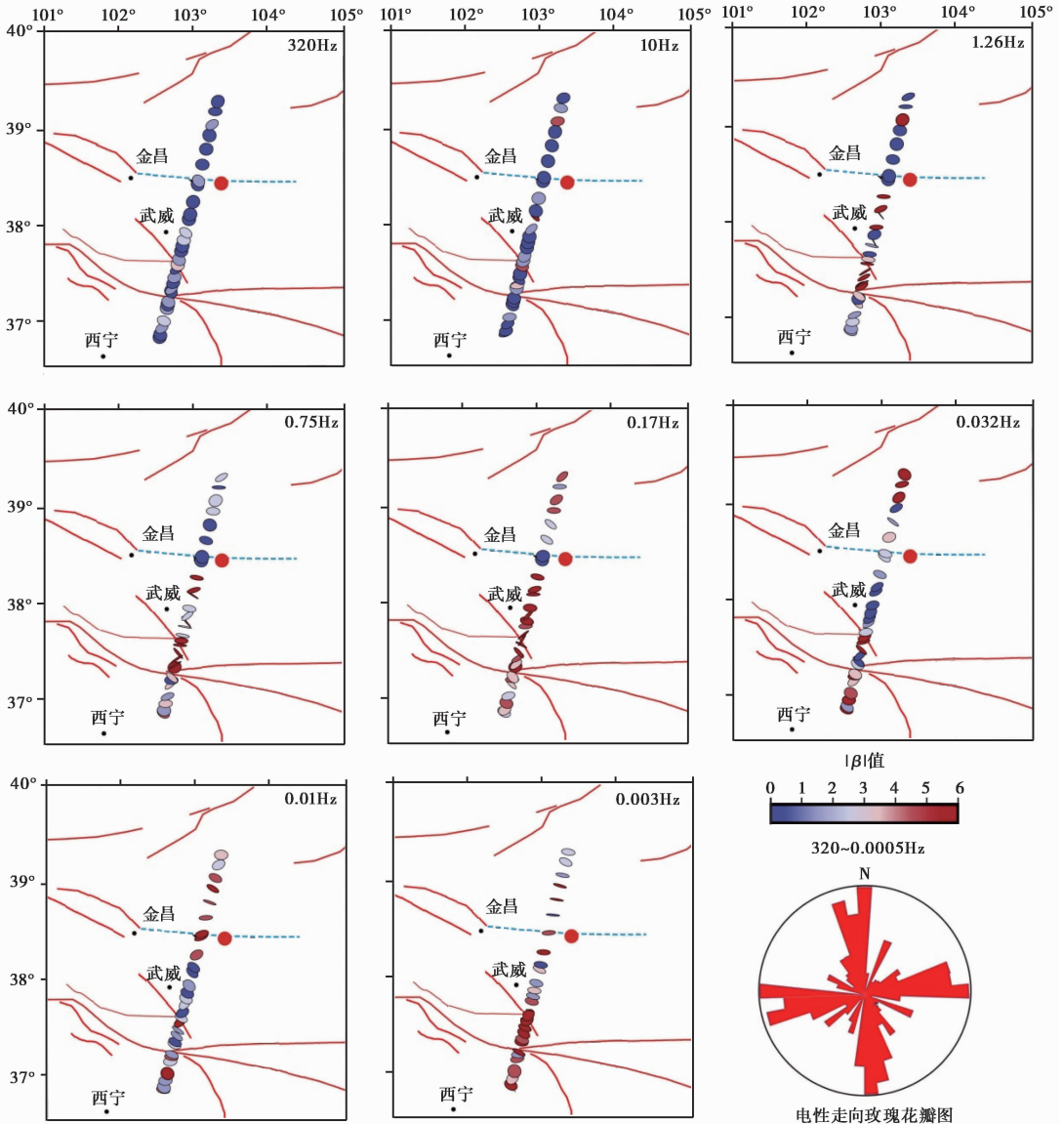


图3 沿剖面不同周期相位张量分析图与电性走向玫瑰花瓣图

Fig. 3 Tensor analysis of different periods along profile and rose diagrams of geoelectric strike directions from phase tensor decomposition.

1. 26Hz 和 0.75Hz 周期, 大部分测点的 $|\beta|$ 值 < 3 , 表明数据的二维特性较好, 位于断裂带附近测点的张量椭圆的主轴与构造走向几乎平行, 方位角集中在 NWW 向或者近 EW 向; 在 0.17Hz 周期, 处于武威盆地的大部分测点的 $|\beta|$ 值出现 > 3 的情况, 而在 0.032Hz 周期, 武威盆地的大部分测点的 $|\beta|$ 值又恢复到 < 3 , 表明在该地区在一定深度下三维性较强, 可能存在着垂直向的电性间断面; 0.17Hz 和 0.032Hz 周期大部分测点张量椭圆的主轴与构造走向平行, 部分测点出现了比较紊乱的现象, 表明在沿剖面的一定深度下, 电性结构特征表现出较为复杂的特性; 0.01Hz 周期祁连山带地区大部分测点的 $|\beta|$ 值 < 3 , 而在 0.003Hz 周期祁连山带地区大部分测点的 $|\beta|$ 值普遍 > 3 , 表明在该地区较深位置也存在着垂直向电性间断面。相位张量椭圆图自高频到低频整体来看具有一维或二维特性, 只是在部分地区较深部的地下电性结构呈现三维特性, 张量椭圆的主轴与构造走向几乎平行, 方位角集中在 NWW 向或者近 EW 向。使用大地电磁资料处理系统(陈小斌等, 2004)里的频段和分点的相位张量分解方法计算统计了沿剖面全部测点全频段 320~0.000 5Hz 的电性走向角, 图 3 右下角为全频段的相位张量电性走向玫瑰花瓣图。电性走向玫瑰花瓣图(320~0.000 5Hz)表明沿剖面全部测点全频段电性走向为 $N80^{\circ}W$ 或者 $N10^{\circ}E$, 结合该区地质构造走向为 NWW 和近 EW 方向, 判断此地区电性走向整体上呈现出 $N80^{\circ}W$ 的状态较为合理。此次野外大地电磁剖面布设沿 $N15^{\circ}E$ 方向, 陈小斌等(2008)研究大地电磁二维反演中数据旋转方向的选择问题时发现测线与构造倾向之间的夹角 $< 15^{\circ}$ 时即可以获得可靠的反演结果, 将剖面上 28 个测点上的数据按照测量方位(SN 向)向 W 旋转 80° , 获得的 $N80^{\circ}W$ 方向的视电阻率和阻抗相位数据是平行构造方向的 TE 模式数据, $N10^{\circ}E$ 方向的视电阻率和阻抗相位数据为垂直构造方向的 TM 模式数据(陈乐寿等, 1990)。

2 二维反演

对剖面上旋转之后的 TE 和 TM 模式的视电阻率曲线和阻抗相位数据作为二维反演计算的输入数据, 在反演之前, 需对各测点视电阻率、阻抗相位曲线上偏离的“飞点”采用加大误差的方式, 以减少这些“飞点”在反演计算中的权重。对剖面上每个测点 TE 和 TM 模式的视电阻率曲线和阻抗相位曲线进行了静位移分析和辨别, 首先对本条剖面上位于同一地层区的各测点高频段视电阻率数值进行了统计分析和比较, 辨别发生静位移的测点并进行校正。校正后的视电阻率和阻抗相位数据作为二维反演计算的输入数据, 在反演中还需要多次反复比较反演模型理论响应和实测数据的拟合等, 再对部分测点静位移系数进行适当调整, 最后确定静位移的测点和具体校正因子。民勤地震区的地形较为复杂, 从该剖面上的电性走向方向和二维偏离度参数来看, 沿剖面有些测点较低频率还是存在三维性, 根据蔡军涛等(2010b)对大地电磁二、三维结构的理论反演结果对比可知: 三维结构下, 使用 TM 模式进行二维反演得到的结果更接近实际的三维模型, TE 模式的视电阻率曲线容易受到三维畸变影响。所以在后续的反演过程中, 我们对剖面的数据采用不同误差进行了二维反演, 并对反演模型、数据拟合差、模型粗糙度以及二维理论相应曲线和实测曲线形态和数值拟合程度综合分析后, 最后选择了对 TM 模式视电阻率和阻抗相位皆使用 5% 的门限误差、TE 模式的视电阻率和阻抗相位分别使用 20% 和 5% 的门限误差的反演方式。使 TE 视电阻率在反演过程中权重减小, 主要依靠 TE 相位和 TM 视电阻率和相位进行二维反演。二维反演计算过程在“MTDATABASE”大地电磁数

据处理反演集成系统(肖骑彬, 2005)下进行, 利用 NLCG 二维反演方法(Rodi *et al.*, 2001), 初始模型为 $100\Omega\cdot\text{m}$ 电阻率的均匀半空间, 使用多个正则化因子(Tau)进行多次反演计算。使用 $\text{Tau}=5$ 反演得到的结果综合了数据拟合差和模型光滑程度(Patro *et al.*, 2009), 最后确定使用 $\text{Tau}=5$ 的反演结果, 总体数据拟合差为 1.69。

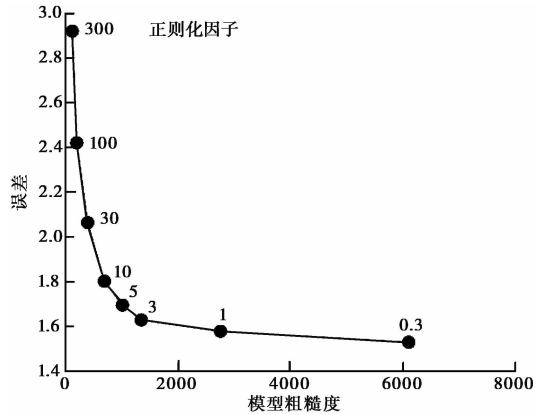


图 4 沿剖面不同正则化因子反演得到的模型粗糙度和数据拟合差的 L 曲线图

Fig. 4 L-curve of RMS values and model roughness along profile from inversion with varied regularization factors.

图 5 给出了沿剖面二维反演得到的理论响应和实测的视电阻率和阻抗相位数据对比, 图中空白部分为不参加反演的“飞点”。可见实测的视电阻率和阻抗相位曲线与二维反演得到的理论响应拟合较好, 沿剖面二维反演得到的电性结构即为可接受的深部电性结构特征。

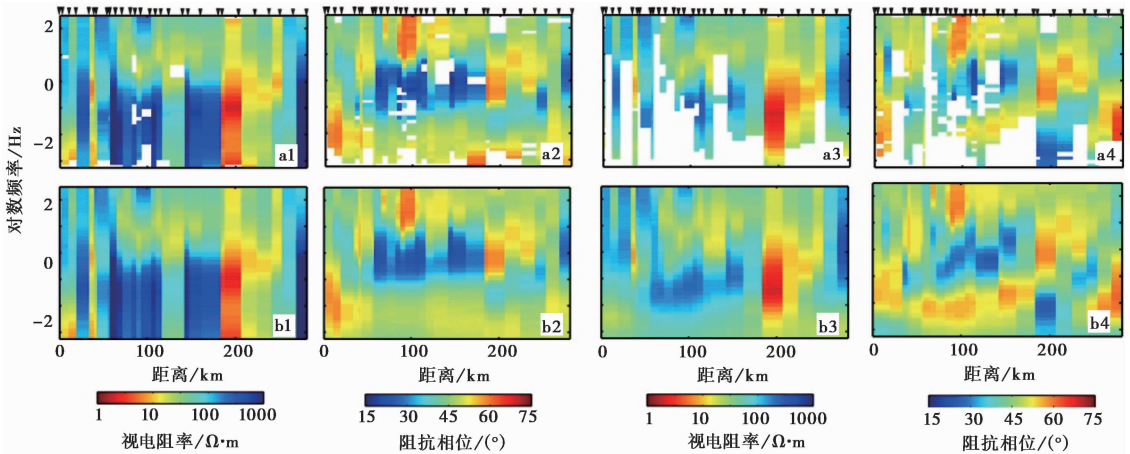


图 5 沿剖面实测 TE 和 TM 模式的视电阻率和阻抗相位与 2-D 模型理论响应值

Fig. 5 Comparison of measured TE and TM apparent resistivities and impedance phases and calculated values from 2-D theoretical response along the profile.

- a1 观测的 TM 视电阻率; a2 观测的 TM 阻抗相位; a3 观测的 TE 视电阻率; a4 观测的 TE 阻抗相位;
- b1 计算的 TM 视电阻率; b2 计算的 TM 阻抗相位; b3 计算的 TE 视电阻率; b4 计算的 TE 阻抗相位

3 深部电性结构特征

图 6 给出了沿剖面二维反演得到的深部电性结构图像。与詹艳等(2008)完成的古浪 8 级地震区的大地电磁剖面二维反演结果对比,发现在沿剖面整体上高、低阻形态分布较为相似,与张先康等(2008)在剖面附近通过地震宽角反射、折射获得的地壳速度结果中高、低速形态分布也较为相似;通过本次加密测量,在 1954 年民勤 7 级地震区附近等位置获得了更加精确的电性结构图。根据断裂平面分布图和测点的相对位置,把沿剖面的皇城-双塔断裂(F_5)、海原-祁连断裂(F_7)等位置标示于电性构造图中,将推测存在的红崖山-四道山断裂(F_1)也标绘出来。深部电性结构图像揭示了沿剖面的各断裂深部延展、构造单元分布以及 1954 年民勤 7 级地震区的深部电性结构特征。

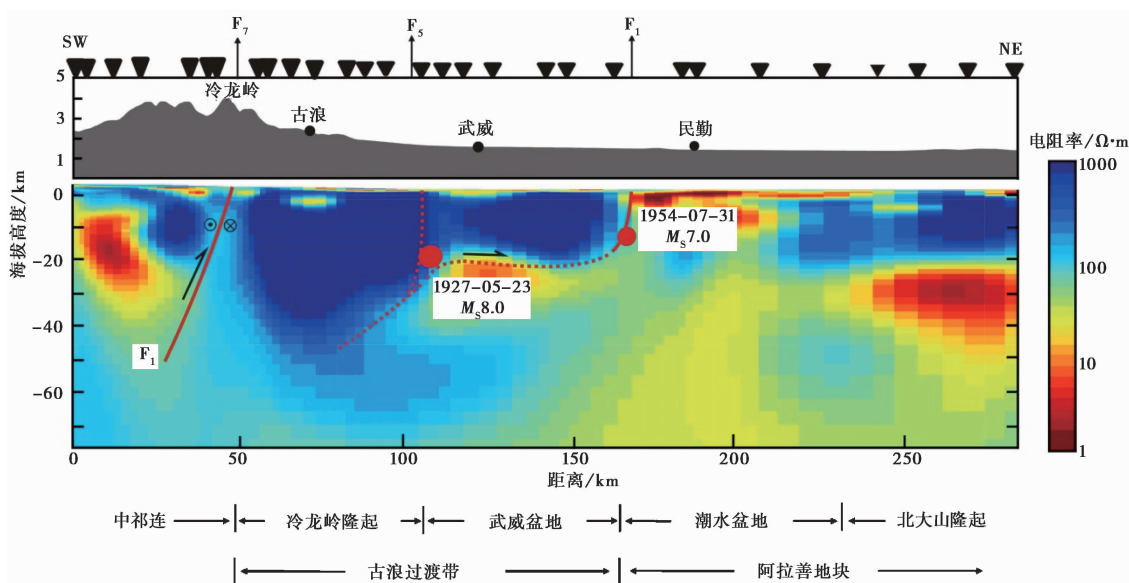


图 6 深部电性结构图与沿剖面主要构造图

Fig. 6 Electrical resistivity models derived from 2-D inversion of the MT data and the main structure along the profile.

F_1 红崖山-四道山断裂; F_5 皇城-双塔断裂; F_7 海原-祁连断裂

3.1 断裂结构与地块深部电性结构分析

沿剖面跨过祁连地块、武威盆地、民勤盆地等,主要断裂有皇城-双塔断裂(F_5)、武威-天祝断裂(F_4)、香山-天景山断裂(F_6)、海原-祁连断裂(F_7)以及可能存在的红崖山-四道山断裂(F_1)等。如图 2 及图 6 所示, LJS-42、LJS-43 测点之间位置出现了强烈的高、低阻电性梯度带,表明此处可能存在着深大断裂,此处恰位于刘洪春等(2000)通过地表地质调查发现的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(F_1),该断裂可能与龙首山北缘断裂(F_2)相接,是其东延部分。电性结构图显示此断裂为陡立的 S 倾高、低阻电性分界带,分割了南侧的武威盆地和北侧的民勤盆地,向下延伸超过 20km;北侧民勤盆地电性结果自地表到地下几 km 范围内表现为低阻

构造,为新生代盆地样式,到十几 km 深处出现次高阻层,呈现出与南侧武威盆地地下截然不同的结构特征;南侧武威盆地以及祁连山地块中上地壳电性结构表现出相互连接的高阻结构,高阻体内发育有皇城-双塔断裂(F_5),此断裂亦为 1927 年古浪 8 级地震发震断裂,剖面最南端的海原-祁连断裂(F_7)电性结构表现为明显的陡立 S 倾高角度电性分界带特征,电性差异从地表延伸至地下 60km 以下,穿过了莫霍面,表明海原-祁连断裂(F_7)为划分构造单元的基底大型断裂带。沿剖面断裂带的分布和规模显示出由西南向东北依次排列,倾向 SW,角度变缓,并收敛于深部低阻层上的特征。电性成层性和复杂性特征可以作为地块划分和研究地块变形程度的依据之一,如图 6 电性结构图所示,武威盆地、祁连山地块中上地壳电性结果均为高阻构造,且规模巨大,表现为西南深、东北浅的形态,中上地壳高阻体连为一体,都属于祁连地块,上、下地壳之间出现比较明显的电性间断面,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,推测其物质来源于北部阿拉善地块,推测阿拉善地块南缘沿着上、下地壳间可能存在的滑脱带呈铲状俯冲进入青藏地块之下,这也与高锐等(1998)、Ye 等(2015)认为的阿拉善块体存在着向南侧俯冲进青藏高原之下的作用的结论相似。

利用大地电磁数据处理中张量分解电性主轴统计方法(陈小斌等,2004)将红崖山-四道山断裂(F_1)附近 5 个测点(HYP-12, LJS-42, LJS-43, PYY-13, LJS-44)单独进行分析,统计出了 5 个测点的电性走向玫瑰花瓣图,如图 1 中标注出的红色测点以及右侧对应的玫瑰花瓣图所示,表明断层附近区域优势电性走向为近 EW 或者近 SN 向,结合此区域地表地质资料以及区域应力场分析红崖山-四道山断裂(F_1)为近 EW 向断裂带,这样的研究结果也与刘洪春等(2000)给出的断层走向近 EW,断面倾角 $60^\circ \sim 80^\circ$ 以及刘白云等(2014)通过小震精定位反演得到的断层走向为 257° 、主断面为高倾角断层的结论相类似。此外,刘白云等(2014)根据局部应力场数据得到的震源断层是以左旋为主的走滑断层。结合此次大地电磁探测结果,综合判定红崖山-四道山断裂(F_1)为高角度逆冲为主兼具左旋走滑特性的逆冲走滑断裂带。

3.2 1954 年民勤 7.0 级地震区深部孕震环境

电性结构图显示红崖山-四道山断裂(F_1)附近为强烈的高、低阻电性梯度带,有关地震区大量的大地电磁探测结果表明,大震易发生在电导率和速度急剧变化的梯度带(詹艳等,1999,2005,2008,2013;Becken *et al.*,2011;Zhao *et al.*,2012;赵凌强等,2015),结合刘洪春等(2000)的地表地质调查和刘白云等(2014)通过小震精定位得到的结论,推测该断裂可能与 1954 年民勤 7 级地震发生有关。大地震的重灾带和破裂带都集中在它们各自的发震断层沿线及其附近地带,其发震位置、震后重灾带和破裂带的空间分布很大程度上取决于发震活动断层本身的几何结构特征(邓起东等,2002;徐锡伟等,2002)。电性结构图显示红崖山-四道山断裂(F_1)为分割了民勤盆地和武威盆地的陡立 S 倾高角度电性分界梯度带,表明红崖山-四道山断裂(F_1)是青藏高原地块与阿拉善地块间形成的巨大的地块边缘基底断裂带,在青藏高原 NE 向的拓展过程中积累了大量的应变能量,成为构造应力集中之处,这样的构造特征正是 1954 年民勤 7 级地震发生的深层次原因,也导致此地区有历史记录以来发生多次 5 级以上地震,形成了具有“地震窝”特征的历史地震区,此地区现今构造运动比较活跃,是今后应该重视的中强地震危险区。

3.3 青藏高原 NE 向拓展方式探讨

近年来青藏高原向 NE 扩展的方式和机制成为地球科学领域争论的焦点之一,其争端主要

涉及的 1 个方面是青藏高原向 NE 扩展的活动最前缘是河西走廊南侧的祁连山山前还是更北边的河西走廊北部的阿拉善地块南缘(郑文俊等, 2013; Zheng *et al.*, 2013), 扩展又是以什么样的方式进行的(Shen *et al.*, 2015; Ye *et al.*, 2015)? 此次大地电磁探测结果表明: 受控于青藏高原 NE 向拓展作用, 红崖山-四道山断裂(F_1)、皇城-双塔断裂(F_5)、海原-祁连断裂(F_7)等共同表现出高角度 S 倾和由南往北逆冲推覆扩展的特征, 断裂带的分布和规模显示出由西南向东北依次排列, 倾向 SW, 角度愈来愈缓, 且均收敛于深部低阻层上的特征, 与郑文俊等(2013)、Zheng 等(2013)认为的青藏高原在北祁连构造带的区域拓展特征为单侧北向“花状”结构较为类似。青藏高原地块以单侧北向“花状”NE 向地向阿拉善地块持续逆冲推覆, 阿拉善地块南缘呈“铲状”俯冲进入青藏地块之下, 这即为青藏高原 NE 向拓展的方式, 也是 1954 年民勤 7 级地震发生的外部动力学因素。而这种拓展作用最前缘正处于红崖山-四道山断裂(F_1)附近, 即表明青藏高原向 N 扩展的活动前缘已经延伸至更北侧的河西走廊北部的阿拉善南缘区域, 这样的结论也与苏琦等(2017)认为的红崖山-四道山断裂是祁连山东段向 N 扩展的最前缘部位并且正经历快速隆升的最新研究成果相似。

4 结论

通过对野外采集到的数据进行精细化处理分析和反演得到了民勤地震区和沿剖面各地块的深部电性结构图像等资料, 揭示了青藏高原地块与阿拉善地块之间的接触关系, 沿剖面各断裂的深部延展特征, 也探讨了 1954 年民勤 7 级地震的深部孕震环境以及青藏高原的 NE 向扩展等问题, 所获初步结论如下:

(1) 红崖山-四道山断裂(F_1)表现为为强烈的高、低阻电性梯度带, 此断裂为近 EW 走向、具有高角度逆冲为主兼具左旋走滑的特性, 是青藏高原地块与阿拉善地块间形成的巨大的地块边缘基底断裂带, 在青藏高原 NE 向拓展过程中积累了大量的应变能量, 成为构造应力集中之处; 推测这样的构造特征可能与 1954 年民勤 7 级地震发生有关, 也导致此地区有历史记录以来发生多次 5 级以上地震, 形成了具有“地震窝”特征的历史地震区。

(2) 青藏高原地块以单侧北向“花状”向 NE 拓展、阿拉善地块呈“铲状”向 SW 侧俯冲挤压的相互作用是青藏高原 NE 向拓展的方式, 拓展作用最前缘处于红崖山-四道山断裂(F_1)附近, 表明青藏高原向 N 扩展的活动前缘可能已经延伸至河西走廊北部的阿拉善南缘区域, 红崖山-四道山断裂(F_1)附近的构造变形代表着欧亚大陆碰撞的远程效应, 预示着青藏高原正在向更远的阿拉善地块南部继续拓展。

致谢 感谢中国地震局地质研究所李新男博士和俞晶星博士在活动断裂绘制过程中提供的帮助; 感谢审稿人提供的宝贵建议, 为本文增色不少。

参 考 文 献

- 蔡军涛, 陈小斌. 2010b. 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 [J]. 地球物理学报, 53(11): 2703—2714.
- CAI Jun-tao, CHEN Xiao-bin. 2010b. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric II: Which data polarization mode should be used in 2D inversion [J]. Chinese Journal of

Geophysics, 53(11): 2703—2714(in Chinese).

- 蔡军涛, 陈小斌, 赵国泽. 2010a. 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 [J]. 地球物理学报, 53(10): 2516—2526.
- CAI Jun-tao, CHEN Xiao-bin, ZHAO Guo-ze. 2010a. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric I: Tensor decomposition and dimensionality analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 53(10): 2516—2526(in Chinese).
- 陈乐寿, 王光镔. 1990. 大地电磁测深法 [M]. 北京: 地质出版社: 10—15.
- CHEN Le-shou, WANG Guang-e. 1990. Magnetotelluric Sounding Method [M]. Geological Publishing House, Beijing: 10—15(in Chinese).
- 陈小斌, 赵国泽, 马霄. 2008. 关于 MT 二维反演中数据旋转方向的选择问题初探 [J]. 石油地球物理勘探, 43(1): 113—118, 128.
- CHEN Xiao-bin, ZHAO Guo-ze, MA Xiao. 2008. Preliminary discussion on selecting rotation direction in 2-D MT inversion [J]. Oil Geophysical Prospecting, 43(1): 113—118, 128(in Chinese).
- 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 [J]. 石油地球物理勘探, 39(S): 11—16.
- CHEN Xiao-bin, ZHAO Guo-ze, ZHAN Yan. 2004. A visual intergrated windows system for MT data process and interpretation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 39(S): 11—16(in Chinese).
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 2002. 中国活动构造基本特征 [J]. 中国科学(D 辑), 32(12): 1020—1030.
- DENG Qi-dong, Zhang Pei-zhen, RAN Yong-kang, *et al.* 2003. Basic characteristics of active tectonics of China [J]. Science in China(Ser D), 46(4): 356—372.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 2003. 中国活动构造与地震活动 [J]. 地学前缘, 10(S): 66—73.
- DENG Qi-dong, Zhang Pei-zhen, RAN Yong-kang, *et al.* 2003. Active tectonics and earthquake activities in China [J]. Earth Science Frontiers, 10(S): 66—73(in Chinese).
- 高锐, 李廷栋, 吴功建. 1998. 青藏高原原岩圈演化与地球动力学过程: 亚东-格尔木-额济纳旗地质断面的启示 [J]. 地质论评, 44(4): 389—395.
- GAO Rui, LI Ting-dong, WU Gong-jian. 1998. Lithospheric evolution and geodynamic process of the Qinghai-Tibet Plateau: An inspiration from the Yadong-Golmud-Ejin geoscience transect [J]. Geological Review, 44(4): 389—395(in Chinese).
- 郭增建, 张诚. 1963. 民勤东侧地震带的初步认识 [J]. 地球物理学报, 12(1): 118—120.
- GUO Zeng-jian, ZHANG Cheng. 1963. A preliminary study on seismic belt of eastern Minqin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 12(1): 118—120(in Chinese).
- 雷中生, 袁道阳, 张俊玲, 等. 2010. 甘肃民勤地区新增加的几次中强历史地震 [J]. 西北地震学报, 32(3): 258—263.
- LEI Zhong-sheng, YUAN Dao-yang, ZHANG Jun-ling, *et al.* 2010. The newly added several moderate-strong historical earthquakes in Minqin region of Gansu Province [J]. Northwestern Seismological Journal, 32(3): 258—263(in Chinese).
- 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 [J]. 地震工程学报, 36(3): 622—627.
- LIU Bai-yun, ZENG Wen-hao, YUAN Dao-yang, *et al.* 2014. Fault parameters and slip properties of the 1954 northern Tengger desert M7.0 earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 36(3): 622—627(in Chinese).
- 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 [J]. 西北地震学报, 22(3): 232—235.

- LIU Hong-chun, DAI Hua-guang, LI Long-hai, *et al.* 2000. A preliminary study on the 1954 Minqin $M_s7.0$ earthquake in Gansu Province [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 22(3): 232—235(in Chinese).
- 苏琦, 袁道阳, 谢虹. 2017. 祁连山东段石羊河流域及邻区地貌特征及其构造意义 [J]. *地质论评*, 63(1): 7—20.
- SU Qi, YUAN Dao-yang, XIE Hong. 2017. Geomorphic features of the Shiyang river drainage basin and adjacent area in eastern Qilian Mountains and its insight into tectonic implications [J]. *Geological Review*, 63(1): 7—20(in Chinese).
- 肖骑彬. 2005. 基于数据库平台的 MT 数据处理可视化方案 [J]. *物探与化探*, 29(3): 269—272.
- XIAO Qi-bin. 2005. A visualization scheme of MT data processing based on database platform [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 29(3): 269—272(in Chinese).
- 谢毓寿. 1955. 地震调查工作中有关烈度鉴定的一些问题 [J]. *地球物理学报*, 4(2): 149—161.
- XIE Yu-shou. 1955. Some problems concerning the estimation of seismic intensities [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 4(2): 149—161(in Chinese).
- 徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 等. 2002. 活断层地震地表破裂“避让带”宽度确定的依据与方法 [J]. *地震地质*, 24(4): 470—483. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2002.04.001.
- XU Xi-wei, YU Gui-hua, MA Wen-tao, *et al.* 2002. Evidence and methods for determining the safety distance from the potential earthquake surface rupture on active fault [J]. *Seismology and Geology*, 24(4): 470—483(in Chinese).
- 詹艳, 赵国泽, 汤吉, 等. 1999. 新疆玛纳斯大震区地壳深部的电性结构 [J]. *地震地质*, 21(2): 159—167.
- ZHAN Yan, ZHAO Guo-ze, TANG Ji, *et al.* 1999. Electric structure of the crust of the Manas earthquake area in Xinjiang Autonomous Region [J]. *Seismology and Geology*, 21(2): 159—167(in Chinese).
- 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 [J]. *科学通报*, 58(20): 1917—1924.
- ZHAN Yan, ZHAO Guo-ze, Unsworth M, *et al.* 2013. Deep structure beneath the southwestern section of the Longmenshan fault zone and seimogenetic context of the 4.20 Lushan $M_s7.0$ earthquake [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(28-29): 3467—3474.
- 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 [J]. *地震学报*, 27(4): 431—440.
- ZHAN Yan, ZHAO Guo-ze, WANG Ji-jun, *et al.* 2005. Crustal electric structure of Haiyuan arcuate tectonic region in the northeastern margin of Qinghai-Xizang plateau, China [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 27(4): 431—440(in Chinese).
- 詹艳, 赵国泽, 王继军, 等. 2008. 1927 年古浪 8 级大震区及其周边地块的深部电性结构 [J]. *地球物理学报*, 51(2): 511—520.
- ZHAN Yan, ZHAO Guo-ze, WANG Ji-jun, *et al.* 2008. Deep electric structure beneath the epicentre of the 1927 Gulang $M8$ earthquake and its adjacent areas from magnetotelluric sounding [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(2): 511—520(in Chinese).
- 张先康, 嘉世旭, 赵金仁, 等. 2008. 西秦岭-东昆仑及邻近地区地壳结构-深地震宽角反射/折射剖面结果 [J]. *地球物理学报*, 51(2): 439—450.
- ZHANG Xian-kang, JIA Shi-xu, ZHAO Jin-ren, *et al.* 2008. Crust structures beneath West Qinling-East Kunlun orogen and its adjacent area—Results of wide-angle seismic reflection and refraction experiment [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(2): 439—450(in Chinese).
- 赵凌强, 詹艳, 陈小斌, 等. 2015. 基于深部电性结构特征的 2013 年甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震孕震环境探讨

[J]. 地震地质, 37(2): 541—554. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2015.02.016.

- ZHAO Ling-qiang, ZHAN Yan, CHEN Xiao-bin, *et al.* 2015. The seismogenic environment of the 2013 Minxian-Zhangxian M_s 6.6 earthquake based on the deep electrical structure [J]. *Seismology and Geology*, 37(2): 541—554(in Chinese).
- 郑文俊, 张竹琪, 张培震, 等. 2015. 1954年山丹7¼级地震的孕震构造和发震机制探讨 [J]. *地球物理学报*, 56(3): 916—928.
- ZHENG Wen-jun, ZHANG Zhu-qi, ZHANG Pei-zhen, *et al.* 2013. Seismogenic structure and mechanism of the 1954 $M7¼$ Shandan earthquake, Gansu Province, Western China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(3): 916—928(in Chinese).
- Becken M, Ritter B, Bedrosian P A, *et al.* 2011. Correlation between deep fluids, tremor and creep along the central San Andreas Fault [J]. *Nature*, 480(7375): 87—90.
- Caldwell T G, Bibby H M, Brown C. 2004. The magnetotelluric phase tensor [J]. *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 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 92(B1): 633—648.
- Egbert G D, Booker J R. 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions [J]. *Geophysical Journal International*, 87(1): 173—194.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia; Effects of a continental collision [J]. *Science*, 189(4201): 419—426.
- Patro P K, Harinarayana T. 2009. Deep geoelectric structure of the Sikkim Himalayas(NE India) using magnetotelluric studies [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 173(1-2): 171—176.
- Rodi W, Mackie R L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2 - D magnetotelluric inversion [J]. *Geophysics*, 66(1): 174—187.
- Shen X Z, Yuan X H, Liu M. 2015. Is the Asian lithosphere underthrusting beneath northeastern Tibetan plateau? Insights from seismic receiver functions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 428:172—180.
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, *et al.* 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia; New insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 10(12): 611—616.
- Ye Z, Gao R, Li Q S, *et al.* 2015. Seismic evidence for the North China plate underthrusting beneath northeastern Tibet and its implications for plateau growth [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 426:109—117.
- Yu J X, Zheng W J, Kirby E, *et al.* 2016. Kinematics of late Quaternary slip along the Yabrai Fault; Implications for Cenozoic tectonics across the Gobi Alashan Block, China [J]. *Lithosphere*, 8(3): 199—218.
- Yuan D Y, Ge W P, Chen Z W, *et al.* 2013. The growth of northeastern Tibet and its relevance to large-scale continental geodynamics: A review of recent studies [J]. *Tectonics*, 32(5): 1358—1370.
- Zhao G Z, Martyn J U, Zhan Y, *et al.* 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan M_w 7.9 earthquake epicentral area from magnetotelluric data [J]. *Geology*, 40(12): 1139—1142.
- 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 [J]. *Tectonics*, 32(2): 271—293.

DEEP ELECTRICAL STRUCTURE BENEATH THE 1954 M_s 7.0 MINQIN, GANSU EARTHQUAKE AND ITS SEISMOTECTONIC ENVIRONMENT

ZHAO Ling-qiang^{1,2)} ZHAN Yan¹⁾ WANG Qing-liang²⁾
SUN Xiang-yu¹⁾ YANG Hao¹⁾ CHEN Xiao-bin¹⁾

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

On 31 July 1954, an M_s 7.0 earthquake occurred southeast of Minqin, Gansu Province, northwestern China. Its epicenter was located at the edge of the Alxa block, subject to northeastward compression of the Tibetan plateau, resulting in active tectonics there. Because of few records and field investigations, the seismogenic fault and tectonic setting of this event remain unclear. To probe the deep structure of this region, magnetotelluric (MT) measurements have been carried out near the epicenter, and new data of 28 sites were collected. Using the methods including the remote reference, “robust” and phase tensor decomposition, these MT data were processed, followed by NLGG two-dimensional inversion of the data to reveal the deep electrical structure of the study area. Combining with previous studies, geologic interpretation of the MT survey suggests that the Minqin earthquake of 1954 may be related to the Hongyashan-Sidaoshan Fault, which is a high-angle thrust with left-slip component. It lies between the Tibetan plateau and the Alxa block, where substantial elastic strain has accumulated due to the northeastward extrusion of the plateau, leading to occurrences of several earthquakes greater than M_s 5.0 in the history. Our electrical structure derived from the MT survey supports the following tectonic interpretations: The Tibetan plateau expands to the northeast in a flower-like style while the Alxa block subducts to southwest in a listric-shaped manner, which forms the northeastward growth pattern of the Tibetan plateau. The forefront of the plateau expansion is around the Hongyashan-Sidaoshan Fault, indicating that the extension of the plateau has surpassed the Hexi Corridor to the southern margin of the Alxa block. The deformation nearby the Hongyashan-Sidaoshan Fault could be linked to the northeastward propagating extrusion of the Tibetan plateau as a far-field dynamic effect of the India-Eurasia collision. The Tibetan plateau is continuing to grow northeastward, resulting in folds and thrusts in the Hexi Corridor, and even farther to the southern margin of the Alxa block.

Key words magnetotelluric, Minqin M_s 6.6 earthquake, Tibetan plateau, northeastward expansion, Hongyashan-Sidaoshan Fault

〔作者简介〕 赵凌强, 男, 1988 年生, 现为 中国地震局地质研究所 在读博士研究生, 研究方向为大地电磁数据处理与解释, E-mail: zhaolingqiang0926@126.com。