

王刚, 方慧, 裴发根, 肖都, 张小博, 张耀阳, 彭炎, 白大为, 乔汉青, 张翔, 常小鹏, 葛欣旺, 野柳帅. 2025. 墨脱断裂带背崩乡段深部电性结构研究[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 56(6): 699-709. doi: 10.19975/j.dqyxx.2025-030.

Wang G, Fang H, Pei F G, Xiao D, Zhang X B, Zhang Y Y, Peng Y, Bai D W, Qiao H Q, Zhang X, Chang X P, Ge X W, Ye L S. 2025. The deep electrical structure of Motuo fault zone in Beibeng area[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(6): 699-709 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2025-030.

墨脱断裂带背崩乡段深部电性结构研究

王 刚^{1,3}, 方 慧^{2,3*}, 裴发根^{2,3}, 肖 都^{1,3}, 张小博³, 张耀阳^{1,3}, 彭 炎³, 白大为^{1,3},
乔汉青³, 张 翔⁴, 常小鹏⁴, 葛欣旺⁴, 野柳帅⁴

1 深部探测与成像全国重点实验室 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 天津 300300

2 深地探测与矿产勘查全国重点实验室 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 天津 300300

3 自然资源部地球物理电磁法探测技术重点实验室, 天津 300300

4 中国地质调查局地球物理调查中心, 天津 300300

摘要: 为探究印度—欧亚大陆沿雅鲁藏布江缝合带 (Yarlung-Zangbo suture zone, IYS) 的接触关系及深部地球动力学过程, 本研究在西藏墨脱县背崩乡附近横跨墨脱断裂带布设了一条长约 20 km 的高分辨率大地电磁测深 (magnetotelluric, MT) 剖面。背崩 MT 剖面精细揭示了主碰撞带的内部结构: (1) 墨脱断裂带浅部 (<5 km) 表现为向深部收敛的负花状构造, 指示其具有显著的走滑断裂特征; (2) 断裂带内仍保存着印度板块沿 IYS 向拉萨地块之下俯冲的痕迹, 且喜马拉雅东构造结附近可能发育印度上地壳的后展式顶板逆冲推覆构造; (3) 与拉萨地体平均约 30 km 厚的上地壳 (高阻) 相比, 墨脱地区上地壳显著减薄, 暗示该区可能未经历藏南区域完整的碰撞演化过程, 从而保留了大陆早期碰撞阶段的地质特征; (4) 断裂带中地壳存在高导电异常体, 推测系拉萨地体部分熔融物质向南运移并沿缝合带抬升所致。本研究为理解喜马拉雅东构造结的深部构造格局提供了新证据。

关键词: 雅鲁藏布江缝合带; 墨脱断裂带; 大地电磁测深; 内部结构

doi: 10.19975/j.dqyxx.2025-030

中图分类号: P319

文献标识码: A

The deep electrical structure of Motuo fault zone in Beibeng area

Wang Gang^{1,3}, Fang Hui^{2,3*}, Pei Fagen^{2,3}, Xiao Du^{1,3}, Zhang Xiaobo³, Zhang Yaoyang^{1,3}, Peng Yan³, Bai Dawei^{1,3},
Qiao Hanqing³, Zhang Xiang⁴, Chang Xiaopeng⁴, Ge Xinwang⁴, Ye Liushuai⁴

1 State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, Institute of Geophysical and
Geochemical Exploration, CAGS, Tianjin 300300, China

2 State Key Laboratory for Deep Earth and Mineral Exploration, Institute of Geophysical and
Geochemical Exploration, CAGS, Tianjin 300300, China

3 Key Laboratory of Geophysical Electromagnetic Probing Technologies of Ministry of Natural Resources, Tianjin 300300, China

4 Geophysical Survey Center of China Geological Survey, Tianjin 300300, China

Abstract: To elucidate the contact relationship between Indian and Eurasian plates along the Yarlung-Zangbo suture zone (IYS) and associated geodynamic processes, we acquired a high-resolution magnetotelluric (MT) profile extending 20 km across the Motuo fault zone near Beibeng Township, Motuo County, eastern Xizang. This NW-

收稿日期: 2025-06-19; 录用日期: 2025-07-30

基金项目: 中国地质调查局地质调查资助项目 (DD20250102801, DD20240101902); 华北—东北大地电磁子网一期 (2024ZD1000203-06); 国家自然科学基金资助项目 (41804075)

Supported by the China Geological Survey (Grant Nos. DD20250102801, DD20240101902), China Magnetotelluric Array (Grant No. 2024ZD1000203-06) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41804075)

第一作者: 王刚 (1990-), 男, 博士, 主要从事大地电磁测深法及其应用研究. E-mail: jiaowulou214@163.com

*通信作者: 方慧 (1964-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事大地电磁测深方法技术、岩石圈电性结构及其动力学过程、陆域冻土区天然气水合物勘探技术、油气地球物理勘探等研究. E-mail: fanghui@mail.cgs.gov.cn



SE oriented transect employed 30 MT stations with approximately 300-m spacing, covering frequency bands of 10000–0.0001 Hz to resolve crustal structure down to 30 km depth. Key findings from the electrical resistivity model reveal: (1) At shallow crustal levels (<5 km depth), the Motuo fault system exhibits a negative flower structure characterized by downward-converging conductive shear zones, diagnostic of dominant strike-slip deformation. (2) Preservation of Indian slab subduction traces beneath the Lhasa Block along the IYS, with possible development of a pop-up structure in the Indian upper crust near the eastern Himalayan syntaxis. (3) The resistive Lhasa Terrane upper crust is ~20 km thick –33% thinner than the 30-km average in southern Xizang. This disparity implies either: (i) incomplete syn-collisional crustal shortening due to strain partitioning into strike-slip faults, or (ii) absence of crustal growth episodes that thickened the Lhasa Terrane. (4) A mid-crustal conductor at 15–30 km depth aligns with the suture zone. Its upward-flaring geometry indicates southward migration of melts from the Lhasa lower crust, which is facilitated by transpressional uplift along the IYS. These results demonstrate that the Motuo fault system operates as a crustal-scale transfer zone, where strike-slip kinematics preserve early collisional features while enabling melt migration through reactivated suture structures. The integrated model provides new constraints on strain accommodation mechanisms during continental indentation.

Keywords: Yarlung-Zangbo suture zone; Motuo fault zone; magnetotelluric; structural framework

0 引言

印度与欧亚大陆持续碰撞形成的喜马拉雅造山带 (陈平光等, 2023; Ding et al., 2005; Yin and Harrison, 2003), 是理解大陆俯冲及其产生影响的关键区域, 对于认识气候、地表过程和构造之间的响应至关重要. 目前, 对于印度—欧亚大陆之间的雅鲁藏布缝合带, 尚缺乏高分辨率的地球物理信息, 阻碍了对主碰撞带深部地球动力学过程的了解, 特别是喜马拉雅东构造结地区, 尚缺乏详细的壳内几何

形态和构造信息. 喜马拉雅东构造结是喜马拉雅山脉在最东端的地质界限 (图 1), 为喜马拉雅造山带构造应力最强、隆升和剥蚀速率最快的地区 (董汉文等, 2018; Xu et al., 2011). 向北移动的印度特角在 54–40 Ma 时首先与拉萨地体发生碰撞, 自 40 Ma 以来快速向北移动并以高角度插入拉萨地体之下, 使雅鲁藏布缝合带弯曲, 其西段和东段分别演变成左旋的东久—米林走滑剪切带和右旋的阿尼桥—墨脱走滑剪切带 (Xu et al., 2011).

在喜马拉雅造山带中部地区 (88°E~92°E), 大地电磁测深、反射地震和地震接收函数成像研究

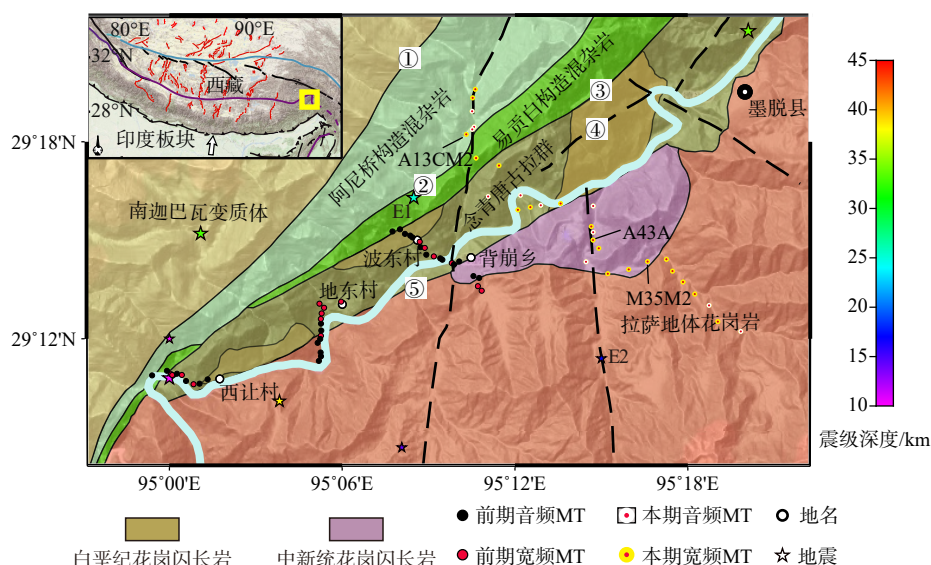


图 1 地质构造图及大地电磁测深点分布. ①: 雅江缝合带北边界断裂; ②: 阿根日断裂; ③: 巴登则断裂; ④: 月尔东断裂; ⑤: 墨脱断裂. 图中虚线表示可能存在的断裂

Fig. 1 Geological map and MT sites distribution. ①: Northern boundary of the Yarlung-Zangbo Suture; ②: Agenri fault; ③: Badengze fault; ④: Yuedong fault; ⑤: Motuo fault. The dashed lines denote the possible faults

(Dong et al., 2020; 郭晓玉等, 2023; Shi et al., 2016; Wang et al., 2023, 2024) 刻画了印度板块在青藏高原之下的俯冲结构, 揭示了印度地壳逆冲叠置、主碰撞带的后展式顶板逆冲推覆构造以及拉萨地体幕式岩浆作用的热量向南运移等现象. 在喜马拉雅造山带西部地区以及西构造结地区 ($74^{\circ}\text{E}\sim 81^{\circ}\text{E}$) 开展的地球物理工作 (Gao et al., 2016; Park et al., 2000) 也发现了印度地壳尺度的逆冲叠置现象, 西喜马拉雅构造结下地壳局部熔融以及位于地下 13~16 km 深度的脆-韧性界面. 而东喜马拉雅构造结地区的主碰撞带, 还缺乏详细的几何形态和构造信息约束, 印度地壳的俯冲性质以及相关的构造特征仍不清楚. 喜马拉雅东构造结, 特别是墨脱地区山势险峻、交通不便, 导致对墨脱断裂带内部结构的地球物理研究程度还比较低. 大地电磁测深方法以频谱丰富的天然电磁场为源, 具有勘探深度大、对断裂带空间分辨能力强等优点. 墨脱断裂带南段的背崩乡附近各断裂分布较为集中, 为了深入了解此前未知的缝合带结构及其与俯冲系统的关系, 我们在该地区开展了 MT 剖面工作 (图 1), 首次展示了一幅横穿墨脱断裂带长达 20 km 的高分辨率电性结构模型, 进一步揭示了主碰撞带的内部结构特征.

1 地质及地球物理背景

阿尼桥—墨脱剪切带主要由南迦巴瓦变质体、阿尼桥—易贡白构造混杂岩带、念青唐古拉群和拉萨地体四个部分组成, 从北西到南东分别被雅江缝合带北边界断裂、巴登则断裂和墨脱断裂隔开 (图 1). 其中, 南迦巴瓦变质体的构造格架总体为呈北东走向的背形构造; 阿尼桥—易贡白构造混杂岩带宽度约 10 km; 念青唐古拉群的结晶基底为变质杂岩, 主要为角闪岩相和麻粒岩相; 拉萨地体的白垩世花岗岩为一套钙碱性深源岛弧系列, 其形成可能与雅鲁藏布洋盆向北俯冲消减有关 (许志琴等, 2008). 对墨脱断裂带的运动学、构造年代学研究表明, 伴随印度板块与欧亚板块的碰撞 (65.5—62 Ma)、持续俯冲-折返 (55.8—40 Ma)、主变形期 (32.7—23.2 Ma) 及后期垮塌、隆升等多期的构造演化过程, 墨脱断裂带的运动学特征具有明显的分段性 (董汉文等, 2018), 北段的南迦巴瓦变质体俯冲于拉萨地体之下, 中段南迦巴瓦变质体相对剪切带外侧的拉萨地体向北运动, 而南段的

南迦巴瓦变质体相对剪切带外侧的拉萨地体向北斜上方向运动, 整体上表现出南迦巴瓦变质体以高角度插入拉萨地体之下的特点. 也有学者认为东构造结经历了前后两期构造运动 (张进江等, 2003), 早期为韧性挤压、走滑变形体系 (18—23 Ma), 表现为东构造结内部的近南北向缩短; 晚期为以南迦巴瓦峰为中心的外倾同心状高角度脆、脆性正断层体系 (6—7 Ma), 可能反应了快速隆升引起的垮塌构造. 尽管地表的构造学研究 (董汉文等, 2018; 许志琴等, 2008; 张进江等, 2003) 对墨脱断裂带内部结构取得了一系列的认识, 然而目前墨脱断裂带内部和深部的断裂空间展布特征仍没有直观的地球物理依据.

以往的地球物理工作主要是为了研究印度—欧亚板块碰撞的深部结构等问题 (Dong et al., 2016; Hu and Yao, 2018; Peng et al., 2016; She and Fu, 2020), 如 P 波接收函数 (程成等, 2017; Xu et al., 2013) 发现东构造结地区的 Moho 面深度呈现自南西向北东逐渐变深的趋势; S 和 P 波速度结构模型表明东构造结地区 25~50 km 深度的中下地壳存在低速层 (Fu et al., 2010; Zhang et al., 2012); 大地电磁测深研究结果揭示了中、下地壳广泛存在的高导电部分熔融体 (Bai et al., 2010; Dong et al., 2016; Lin et al., 2017), 其中 SinoProbe-MT 阵列数据反演得到的结果提出“伸展挤压”模型来解释中、下地壳物质局部形变与地表伸展之间的关系 (Dong et al., 2016), 而东喜马拉雅构造结的岩石圈电性结构模型 (Lin et al., 2017) 表明构造瘤模型可以解释南迦巴瓦变质体的折返机制. 另外, 构造应力场的观测结果 (丰成君等, 2022; 张斌等, 2023) 表明喜马拉雅东构造结的水平应力相对较大, 最大主应力方向近似为北东—南西方向. 这些已有的地球物理工作主要集中在东构造结西部和北部, 而对东构造结东南部的墨脱断裂带构造格架尚需进一步研究. 我们前期在墨脱断裂带南段的波东—西让村附近分别布设了 3 条 MT 剖面 (图 1), 以平均约 300 m 的点距间隔采集了音频和宽频数据, 共获得了 42 个高质量的 MT 数据. 三条 MT 剖面的结果较为一致, 清晰刻画了墨脱断裂带在波东—西让村附近的浅部构造格架, 揭示出墨脱断裂带呈现为向深部汇聚的负花状构造, 具有走滑断裂的典型特征 (王刚和方慧, 2023), 其张剪性质与董汉文等 (2018) 对墨脱断裂带的变形和组构运动学研究结果一致, 即墨脱断裂带在波东—西让段具有走滑正

断层性质, 这可能与南迦巴瓦变质体向北推移并插入拉萨地体之下的动力过程相关. 然而, 波东—西让段三条剖面的电性结构模型给出的是 3 km 以浅信息, 喜马拉雅东构造结墨脱断裂带内部的构造格架还需要结合更深部的地球物理结果来约束. 因此, 我们通过一条背崩乡附近长达 20 km 的 MT 剖面, 经过二维反演获取了墨脱断裂带中—南段较深的电性结构模型来探索墨脱断裂带的内部结构.

2 数据采集和处理

2.1 数据采集

在墨脱县的背崩乡附近沿着北西—南东方向布设了一条 MT 剖面 (图 1), 数据采集使用的仪器为 MTU-5A 大地电磁采集系统和 MTC-150L 磁传感器, 采集频带范围是 $10^4 \sim 10^{-4}$ Hz, 共采集了 30 个有效数据. 野外采集的所有测点的平均点距约为 200~300 m, 其中音频点的平均采集时间不少于 1.5 h, 宽频点的采集时间不少于 18 h. 整条剖面最长周期超过 100 s 的数据有 19 个, 占剖面测点总数的 63%, 部分测点的最长周期甚至达到 10000 s, 能够对深部的电性结构进行可靠约束. 本项目的数据观测采用五分量张量测量方式, 即测量 EX、EY、HX、HY、HZ 五个分量. 通常, EX、HX 的方向要求沿正北方向布设, EY、HY 要求沿正东西布设, 而在墨脱地区受到地形的影响, 无法采用“+”字形布设, 在多数点位采用的是“L”形或“T”形布设方式. 在不能沿着正北方向布设仪器的测点, 准确记录电道与磁道的方位角, 在后期数据处理过程中再据此将阻抗张量数据统一旋转到正北方向的

坐标系中, 便于数据的反演.

2.2 数据处理和分析

在墨脱地区, 昼夜温差大、海拔变化剧烈, 电极受温度影响会导致电场信号不稳定. 另外, 磁传感器接口由于热胀冷缩也会接触不良, 导致磁场信号出现不稳定的情况. 因此, 除了深埋电极和磁传感器来保温外, 我们还通过延长采集时间的方式, 选取信号稳定的时间段来处理. 将原始时间序列经过快速傅氏变换从时间域转化为频率域, 对参与统计平均的功率谱进行挑选, 删除受干扰严重的功率谱. 经过 Robust 估计等求取阻抗张量元素, 最后通过理论公式由阻抗张量元素求取地下介质的视电阻率和阻抗相位 (图 2).

在陆陆碰撞造山带的典型变形构造区, 由于挤压变形作用强烈, 存在较为复杂的深部结构特征, 如纵向上的立交桥组合和横向上不同走向断裂之间的交叉现象 (陈小斌等, 2014; 陈小斌和郭春玲, 2017). 因此, 在数据反演之前需要对数据进行区域电性主轴分析, 据此将阻抗张量旋转到区域电性主轴的方向上. 本文采用共轭阻抗张量分解方法 (蔡军涛和陈小斌, 2010; 陈小斌和郭春玲, 2017) 来分析不同频段的电性主轴方位, 剖面的电性主轴统计结果 (图 3) 表明, 地下的电性主轴方位角总体上呈现为北东向, 只有 1~10 Hz 频段的统计结果与其他频段差别较大, 这一点与南迦巴瓦变质体的构造格架总体为呈北东走向的背形构造是一致的 (许志琴等, 2008). 本文主要关注北东走向的构造, 所以选取浅部和深部频段统计结果的平均值 63° 为该剖面的电性主轴方位角.

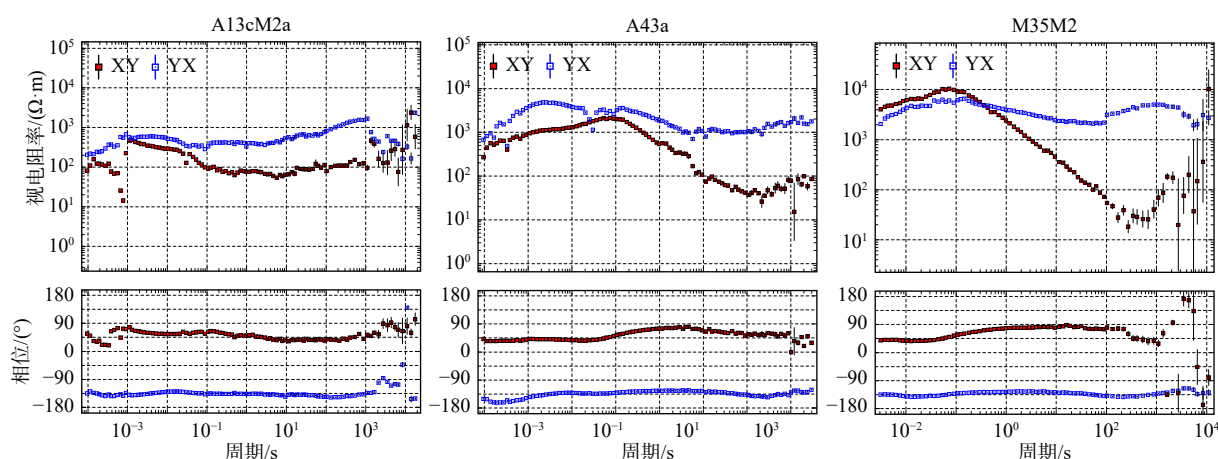


图 2 典型的视电阻率和相位曲线 (测点位置见图 1)

Fig. 2 Typical apparent resistivity and phase curves (location marked in Fig. 1)

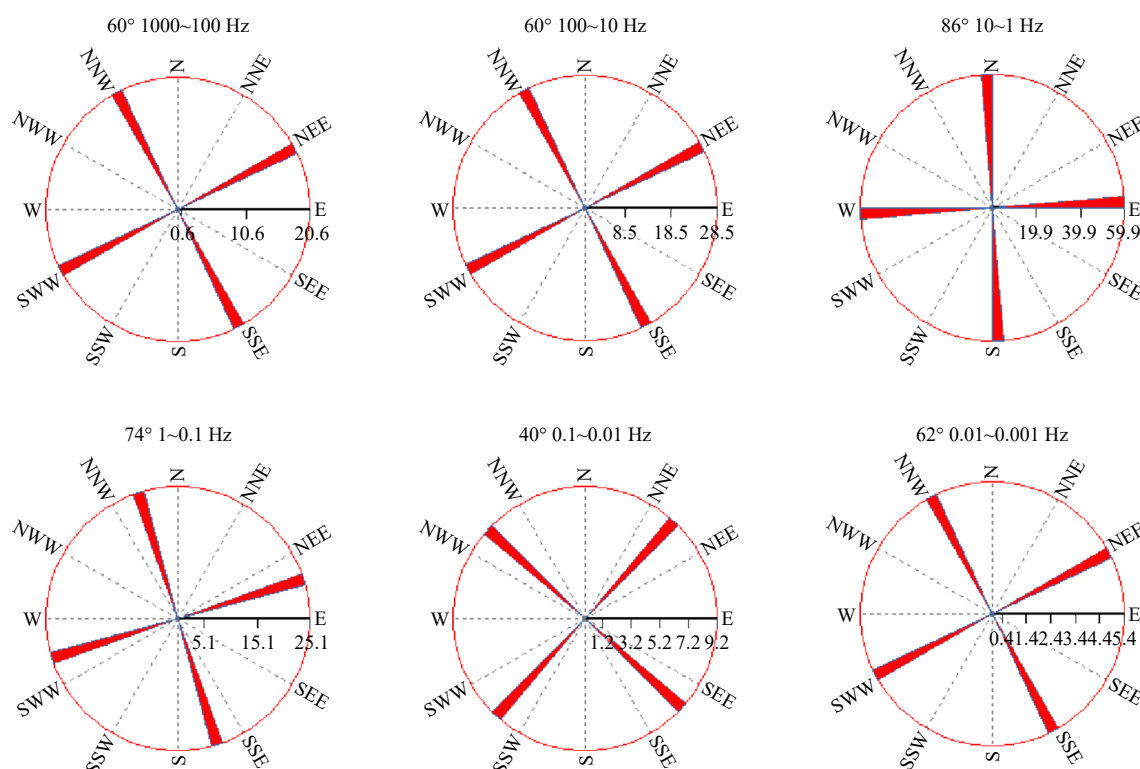


图 3 MT 剖面电性主轴统计结果

Fig. 3 The electrical strike for MT profiles

3 数据反演和结果

3.1 数据反演

受到地形条件的限制, 大部分的数据都不是沿着正南、北方向布设的. 因此, 对阻抗数据进行旋转, 难以保证数据误差和数据质量的改善或降低. 不过, 由于我们的 MT 点位较密, 约为 200~300 m, 因此即使个别数据旋转后质量降低, 相邻测点能够保证反演结果的可靠性. 将阻抗数据旋转到电性主轴方位上后, 对数据进行二维反演. 参与反演的频点范围是 $10^4 \sim 10^{-4}$ Hz, 网格均匀剖分, 并且在每个测点之间至少有一个网格. 通常, TE 模式数据对地下电性结构二维程度要求较为严格, 而 TM 模式数据比较适合反演与区域构造走向平行的三维结构, 并且不容易受到三维畸变效应的影响, 在 MT 数据三维特征较强的情况下, TM 模式数据的反演结果中假异常更少 (蔡军涛和陈小斌, 2010; 张乐天等, 2012). 为了确定不同模式数据对反演结果的影响, 在这里我们通过设置不同的视电阻率和相位误差级数来控制 TE 模式与 TM 模式数据在反演过程中所占的比重. 从单一模式数据参与反演, 到调节 TE 模式与 TM 模式数据在反演过程中所占

的比重, 以及试验正则化因子 τ , 每次反演的初始模型都是在上一次反演结果的基础之上进行, 通过这样的方式提高了反演工作的效率. 对于背崩 MT 剖面的反演 (图 4), 单独使用 TE 模式数据的反演结果能较好反映出浅部结构, 但反映深部信息的效果较弱. 随着 TM 模式数据的加入, 断裂的轮廓更加清晰, 对深部低阻体反应更加明显. TE+TM 模式结合了两种模式的优点, 能最大程度反应地下信息. 从拟合差的情况来说, ‘tmr10p5ter60p30tau5’参数组反演拟合差 1.77 最小 (其中 ter、p 表示 TE 模式视电阻率和相位误差; tmr、p 表示 TM 模式视电阻率和相位误差; tau 表示正则化因子), 电性结构模型较为合理 (图 4e), TM 模式视电阻率误差设为 10%, 相位误差设为 5%; TE 模式视电阻率误差设为 60%, 相位误差设为 30%. 除了数据模式的选择, 反演过程中的其他参数也会对反演结果产生影响 (图 5), 本工作还对正则化因子 τ 进行了对比试验 (分别试验了 1、3、5、7、10). 通过对比拟合差和反演效果, 选择 τ 值为 5 的反演结果, 即 ‘tmr10p5ter60p30tau5’组反演结果作为最终的模型.

3.2 反演结果

背崩 MT 剖面的结果 (图 6a) 揭示了墨脱断

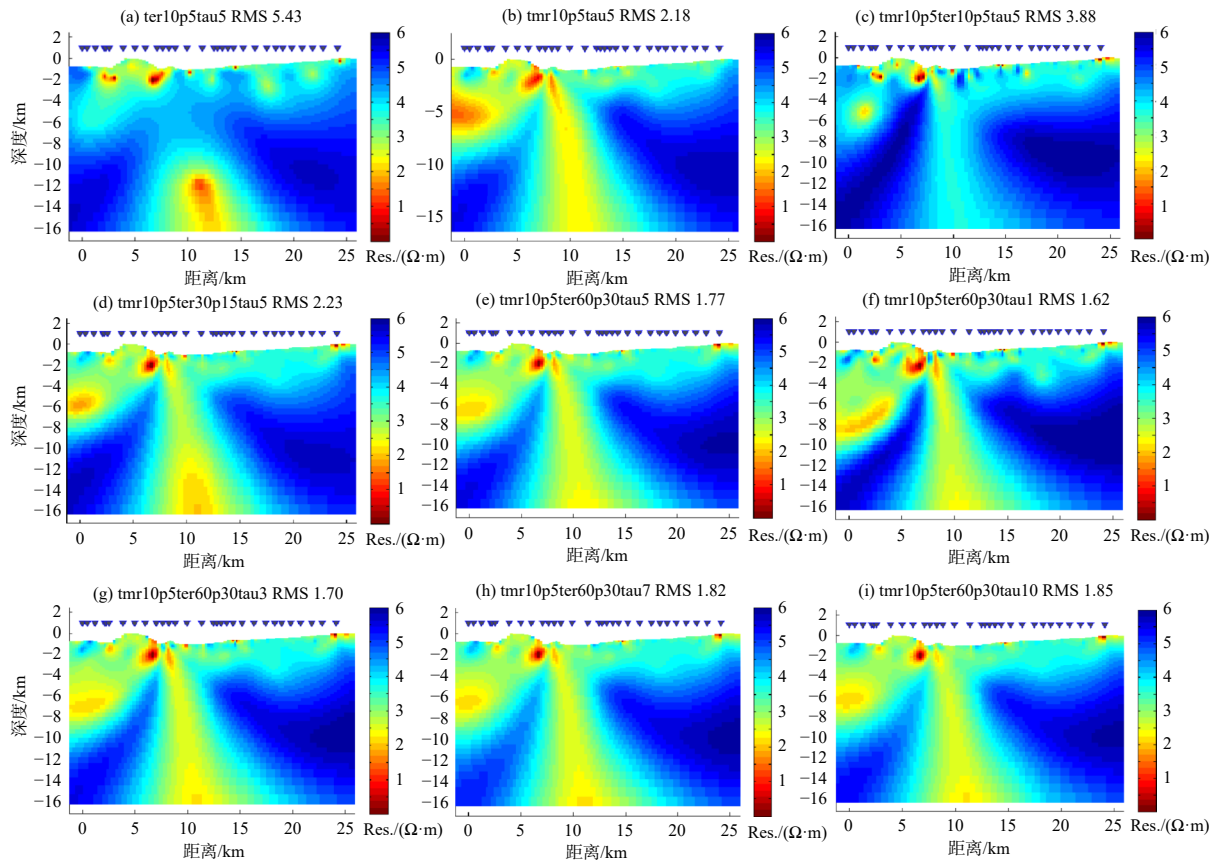


图 4 背崩乡 MT 剖面二维反演试验对比图. ter、p: TE 模式视电阻率和相位误差; tmr、p: TM 模式视电阻率和相位误差; tau: 正则化因子

Fig. 4 The inversion results with different parameters for Beibeng MT profile. ter, p: error floors of apparent resistivity and phase for the TE mode data; tmr, p: error floors of apparent resistivity and phase for the TM mode data; tau: regularization parameter

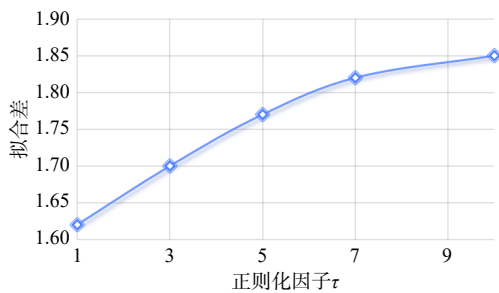


图 5 正则化因子 τ 反演试验对比

Fig. 5 Inversion experiments on the regularization factor τ

裂带的展布形态, 电性结构从北西到南东分别为高阻的构造混杂岩体 R1、念青唐古拉群下方的高阻体 R2 和 R3、以及拉萨地体的高阻花岗岩体 R4. 背崩剖面与波东剖面结果 (图 6b) 在整体上类似, 北侧的巴登则断裂倾向南东, 延伸深度超过 2 km; 另外, 两条剖面都发现巴登则断裂也有可能存在北西倾向的特征 (虚线标出), 向深部延伸到高导体 C1 的深度. 位于剖面中间的月尔东断裂和雅江断裂倾向南东, 且向下在 2 km 深度汇聚到一起. 剖面南侧的墨脱断裂在波东剖面 (图 6b) 近于直立, 而在本次的背崩剖面中则没有表现出近于直立的形

态, 这可能是由于背崩剖面的走向并不是垂直穿过墨脱断裂导致的形态差异. 同样, 两条剖面的反演结果也用虚线标出墨脱断裂可能存在倾向南东的特征. 两条剖面中部的断裂逐渐变陡, 并在深度 2.5 km 处汇聚到一起.

结合地表构造的空间位置和震中分布, 从北西到南东的深部结构具有如下的分布特征: 首先, 雅江缝合带北边界断裂可能倾向南东 (图 6a), 直到拉萨地块之下约 20 km 的深度, 整体上该断裂的空间展布表现出印度板片俯冲在拉萨地块之下的特点. 念青唐古拉群地层承担了印度板块与拉萨地体碰撞变形之间的过渡区域. 雅江断裂向下延伸超过 30 km, 并且趋向与雅江缝合带北边界断裂在约 20 km 深度汇合到一起. 继续往东是拉萨地块的冈底斯岩浆岩带, 拉萨地体在深度上可以分为三层, 浅部 5 km 范围表现出 1000 $\Omega \cdot m$ 左右的电阻率. 再往下, 拉萨地块的高阻体 ($>10000 \Omega \cdot m$) 从 5 km 深度到一直延伸到 25 km 的深度, 这可能代表了冷硬的冈底斯岩基, 该岩基下方是底界面深度超过 30 km 的高导体 C3.

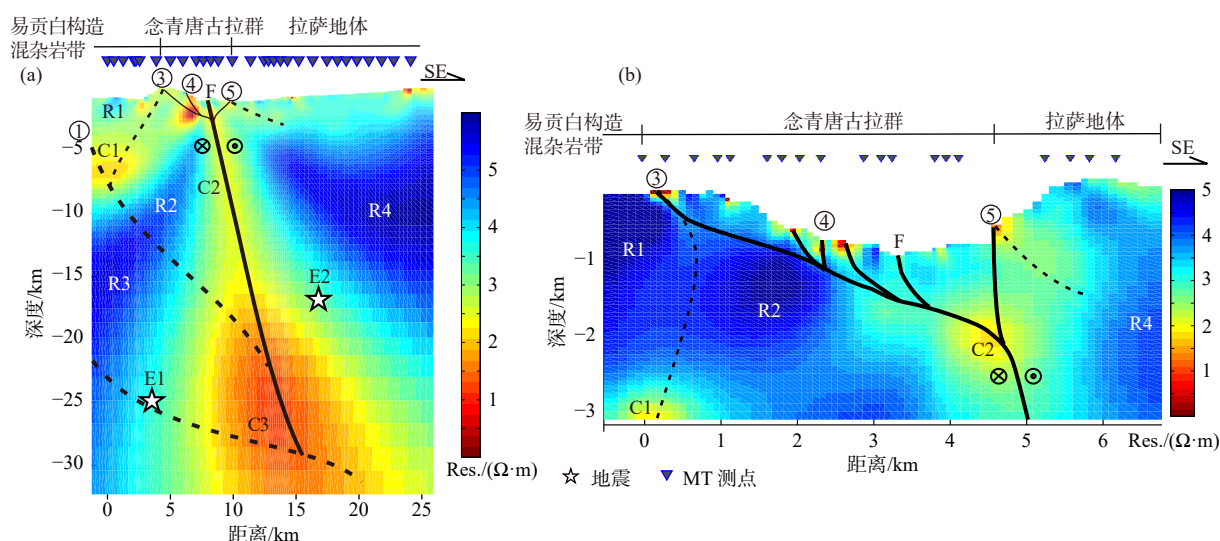


图 6 (a) 背崩和 (b) 波东 MT 剖面的电性结构模型 (图 b 改自王刚和方慧, 2023)。其中①: 雅江缝合带北边界断裂; ③: 巴登则断裂; ④: 月尔东断裂; ⑤: 墨脱断裂; F: 雅江断裂

Fig. 6 The electrical models for (a) Beibeng and (b) Bodong MT profiles (Fig. b is modified from Wang and Fang, 2023). ①: Northern boundary of the YZS; ③: Badengze fault; ④: Yuedong fault; ⑤: Motuo fault; F: Yajiang fault

4 讨论

4.1 基本构造格架特征

目前对于东构造结缝合带在横向上的接触关系和垂向上的深浅相互作用等问题的 MT 研究相对较少, 主要集中在西北侧的林芝—鲁朗地区 (Lin et al., 2017) 以及东北侧的嘉黎断裂带 (Qi et al., 2025), 而对东南侧墨脱断裂带还缺乏高分辨率的地球物理信息, 阻碍了对主碰撞带深部地球动力学过程的了解。本次研究, 基于横穿墨脱断裂带长达 20 km 的高分辨率 MT 电性结构模型, 进一步揭示了主碰撞带的内部结构特征。本次背崩 MT 剖面与波东的 MT 剖面结果 (王刚和方慧, 2023) 颇为契合, 清晰地刻画了雅江缝合带在墨脱附近的内部格架。背崩和波东两条 MT 剖面显示 (图 6), 墨脱断裂在浅部 (<5 km) 呈现为向深部汇聚的负花状构造, 具备走滑断裂的典型特征, 其张剪性质与董汉文等 (2018) 对墨脱断裂带的变形和构造运动学研究结果一致, 这可能与南迦巴瓦变质体向北推移并插入拉萨地体之下的动力过程相关。整体而言, 印度板块沿着雅江缝合带俯冲至拉萨地体之下的痕迹, 依然留存于墨脱断裂带内, 该断裂带的构造格架与南迦巴瓦变质体的背形构造特征相符 (董汉文等, 2018; Xu et al., 2011)。依据从 IRIS 数据库下载的 1970—2013 年地震目录, 东构造结内强震 ($M>5.0$) 的发生频率较低。在墨脱县背崩乡 MT 剖

面附近共有两处中级地震 (图 6a), 位于南迦巴瓦变质体内的 E1 震中深度约为 25 km, 位于拉萨地体内的 E2 震中深度约为 17 km。总体来看, 这两处地震均分布在高导体 C3 的两侧, 这表明以雅江断裂为核心的高导区域 C3, 可能反应了深部构造格架和区域构造应力的核心。背崩乡附近的两处地震 E1 和 E2 二者深度差异显著, 这或许是由不同的成因机制所致。墨脱县附近的震源机制解分析呈现出正断层和走滑的性质 (白玲等, 2017; 李国辉等, 2020), 就 E1 而言, 根据高阻体 R3 东侧边界的变化形态判断, 它可能位于一个更深的断裂附近; 而对于 E2, 它如同藏南拉萨地体的壳内地震一样 (Xie et al., 2021), 主要孕育在脆、韧分界面的深度附近。高导体 C3 的核心区域, 可能因高温、低压或者流体的作用, 则少有地震发生。

藏南反射地震结果 (郭晓玉等, 2023) 指出主碰撞带上地壳顶部的后展式顶板逆冲推覆构造从南拉萨地体延伸至北喜马拉雅穹窿背斜北翼, 通过与藏南 89°E 附近反射地震 (郭晓玉等, 2023) 及 MT 剖面结果 (Wang et al., 2024) 的对比, 发现印度上地壳的后展式顶板逆冲推覆构造特征在喜马拉雅东构造结的墨脱断裂带附近可能同样存在 (图 6a)。根据背崩乡的电性结构模型, 拉萨地体的高阻上地壳厚度超过 20 km, 震中的深度表明拉萨地体的地壳脆、韧性分界面大约在 17 km 深度左右, 远没有达到藏南地区拉萨地体上地壳的 30 km 平均厚度 (郭晓玉等, 2023; Wang et al., 2017, 2024)。

在青藏高原, 印度—亚洲大陆在 65 Ma 发生初始碰撞, 之后相继经历晚碰撞 (40—26 Ma) 和后碰撞 (25—0 Ma) 过程 (侯增谦等, 2020); 大约始于 25 Ma 的后碰撞过程, 以印度大陆板片的持续俯冲、撕裂断离为特征, 在正向碰撞带的冈底斯地区形成近 EW 向展布的中新世钾质-超钾质岩浆岩带. 正是这些不同期次的构造-岩浆活动造成了藏南地区拉萨地体巨厚的地壳. 我们推测在喜马拉雅东构造结墨脱地区较薄的上地壳, 可能是因为还没有经历藏南地区那样强烈的或者较长历史的碰撞-缩短过程. 藏南的反射地震结果 (郭晓玉等, 2023) 表明, 南拉萨地体巨厚地壳主要是由新特提斯构造域幕式岩浆作用所形成的新生地壳物质挤压变形所致, 藏南地区巨厚上地壳与东构造结墨脱地区较薄上地壳之间的厚度差异, 可能是缺乏后碰撞阶段岩浆作用导致的. 沿着墨脱断裂带的走滑作用调整吸收了大量的汇聚缩短量, 从而在墨脱地区保留了大陆碰撞早期阶段的一些地质痕迹.

4.2 中地壳高导体

关于中地壳高导体 C3 的成因机制, 岩石的高导电成因在从地壳浅部至岩石圈深部的范围内存在不同机制, 且在不同构造单元也有所差异. 地壳浅部的导电机理主要为离子导电, 例如多孔隙沉积岩中相互连通的含盐流体 (Tournier and Chouteau, 2005)、中上地壳剪切带中填充的水 (Becken and Ritter, 2012)、脱水反应释放的流体 (Bertrand et al., 2009) 以及相互连通的部分熔融体等 (Brasse et al., 2002). 中下地壳的导电机理可能与岩石的矿物组成、温度及含水量相关, 中地壳通常处于角闪岩相 (变质作用温度为 450~700°C, 压力大于 300 MPa), 主要矿物为斜长石、石英和角闪石 (Christensen and Mooney, 1995; Rudnick and Fountain, 1995). 此外, 存在富碳沉积物的区域或有石墨出露的构造缝合带附近, 颗粒边界相互连通的石墨薄膜在特定的温度、压力和还原条件下, 也能够形成高导电异常体 (Yang et al., 2015). 硫化物也具有较高的电导率, 但在地球物质组成中含量极少 (约为 0.7 wt.%), 且硫化物引起的高导电异常体一般尺度较小、分布零散 (Allègre et al., 1995). 另外, 被束缚在含水矿物内的水, 会在俯冲过程中, 在适当的温度和压力条件下发生脱水并释放出来, 例如蛇纹岩在稳定状态下电导率并不高, 在深部转化为橄榄石、斜方辉石后, 会释放约 13 wt.% 的水,

这显著提高了围岩中名义无水矿物的水含量 (Selway, 2014). 综上所述, 岩石圈的高导电异常体从深部到浅部, 其成因可能源于不同机制 (如水含量、矿物组成、温度、石墨薄膜等), 亦可能是多种机制协同作用的结果.

喜马拉雅东构造结处于复杂的碰撞造山环境, 历经多期次的构造-岩浆活动, 对于中地壳高导体 C3 的成因机制, 石墨薄膜和硫化物可能不会在大范围相互连通. 通常情况下, 自由的含盐流体仅存在于脆性的上地壳中, 不会向下延伸至岩石空隙较少的延展性中地壳区域 (Connolly and Podladchikov, 2004). 中地壳的岩石通常处于角闪岩相, 可能会随着温度或压力的升高而发生相变并脱水, 而形成高导电异常体. 断裂带通常表现出高导电性质, 根据背崩电性剖面的结果, 高导体 C3 可能是各级断裂交汇区的体现. 背崩附近震中的分布表明高导体 C3 的核心区可能是韧性的或部分熔融的, 从而缺少地震的发生. 实验表明, 干花岗岩在常压下的熔化温度约为 1200°C, 而在有水存在的情况下, 熔化温度可能降低至 650°C (Holland and Powell, 2001). Chen 等 (2018) 指出, 在水含量较高的情况下, 产生部分熔融所需的温度约为 760°C, 藏南地区平均 90 mW/m² 的热流 (Hu et al., 2000) 表明 20 km 深度处能够发生部分熔融的现象 (Xie et al., 2021). 目前尚无专门针对墨脱地区的公开地表热流值数据, 但墨脱地区位于青藏高原的东南部, 处于喜马拉雅碰撞造山带的东构造结部位, 其热流值可能相对较高. 通常认为有三种加热机制可解释部分熔融现象 (Xie et al., 2021): 放射性热、应变加热和地幔热输入. 由于墨脱地区的地壳厚度较薄, 因此, 仅地壳的放射性生热本身无法解释热源问题. Nabelek 和 Nabelek (2014) 指出, 厚度约为 10~20 km 的脆性上地壳应变加热能够提高地壳中的局部温度, 这一厚度与背崩电性模型高阻上地壳的厚度一致. 若地壳圈层的变形之间存在强烈耦合, 基底加热可能是一个重要过程, 沿着墨脱断裂带的俯冲可能为中地壳的部分熔融提供了较多热能. 对于软流圈热物质的上涌, 如果东构造结深部的印度板片存在断裂或撕裂等现象 (Peng et al., 2016), 那么该深部大尺度的构造活动会在空间上引起较大范围的部分熔融, 而不是仅仅在局部地区形成高导电异常体 C3. 位于缝合带下方从浅部延伸至拉萨地体下方的高导体 C3, 与藏南地区 (88°E~92°E) MT 结果所揭示的现象一样, 从拉萨地体下方存在

一个向雅江缝合带抬升的流体通道 (Wang et al., 2024; Wei et al., 2001; Xie et al., 2021)。拉萨地体的中下地壳通常分布着大量高导电的部分熔融体 (Dong et al., 2016; Wang et al., 2017, 2023), 高导体 C3 可能代表了拉萨地体地壳部分熔融物质沿着缝合带向浅部抬升运移的过程。

5 结 论

本次研究在墨脱县背崩乡附近通过横穿墨脱断裂带长达 20 km 的高分辨率 MT 剖面, 采用张量方式观测和优选反演参数提高了对主碰撞带的内部结构特征的识别。剖面的电性结构模型揭示了墨脱断裂带的空间展布特征, 发现墨脱断裂带在浅部 (<5 km) 呈现为向深部汇聚的负花状构造, 具备走滑断裂的特征。我们推测喜马拉雅东构造结墨脱地区拉萨地体较薄的上地壳, 可能是因为还没有经历藏南地区大陆碰撞的后碰撞阶段, 沿着墨脱断裂带的走滑作用调整吸收了大量的汇聚缩短量, 从而在墨脱地区保留了大陆碰撞早期阶段的一些俯冲痕迹。墨脱断裂带中地壳存在高导电异常体, 推测系拉萨地体部分熔融物质向南运移并沿缝合带抬升所致。

致谢

感谢三位审稿人的宝贵意见。感谢西藏自治区自然资源厅、西藏自治区地质矿产勘查开发局以及中国华能在野外工作中给予的大力支持, 感谢中国地质调查局地球物理调查中心技术人员和其他所有野外工作人员的辛勤付出。

References

- Allègre C J, Poirier J P, Humler E, et al. 1995. The chemical composition of the Earth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 134: 515-526.
- Bai D H, Unsworth M J, Meju M A, et al. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan Plateau revealed by magnetotelluric imaging[J]. *Nature Geoscience*, 3: 358-362.
- Bai L, Li G H, Song B W. 2017. The source parameters of the M6.9 Mainling, Tibet earthquake and its tectonic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(12): 4956-4963 (in Chinese).
- Becken M, Ritter O. 2012. Magnetotelluric studies at the San Andreas fault zone: Implications for the role of fluids[J]. *Surveys in Geophysics*, 33: 65-105.
- Bertrand E, Unsworth M, Chiang C W, et al. 2009. Magnetotelluric evidence for thick-skinned tectonics in central Taiwan[J]. *Geology*, 37: 711-714.
- Brasse H, Lezaeta P, Rath V, et al. 2002. The Bolivian Altiplano conductivity anomaly[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B5): 2096.
- Cai J T, Chen X B. 2010. 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).
- Chen J, Gaillard F, Villaros A, et al. 2018. Melting conditions in the modern Tibetan crust since the Miocene[J]. *Nature Communications*, 9(1): 3515.
- Chen P G, He X H, Xu S F, et al. 2023. Earthquake relocation and regional stress field around the eastern Himalayan syntaxis[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 54(6): 667-683 (in Chinese).
- Chen X B, Cai J T, Wang L F, et al. 2014. Refined techniques for magnetotelluric data processing and two-dimensional inversion (IV): Statistical image method based on multi-site, multi-frequency tensor decomposition[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(6): 1946-1957 (in Chinese).
- Chen X B, Guo C L. 2017. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric (V): Detecting the linear structures of the Earth by impedance tensor imaging[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(2): 766-777 (in Chinese).
- Cheng C, Bai L, Ding L, et al. 2017. Crustal structure of eastern Himalayan syntaxis revealed by receiver function method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(8): 2969-2979 (in Chinese).
- Christensen N, Mooney W. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust—a global view[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100: 9761-9788.
- Connolly J, Podladchikov Y. 2004. Fluid flow in compressional tectonic settings: Implications for midcrustal seismic reflectors and downward fluid migration[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B4): B04201.
- Ding L, Kapp P, Wan X W. 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet[J]. *Tectonics*, 24(3): TC3001.
- Dong H, Wei W B, Jin S, et al. 2016. Extensional extrusion: Insights into south-eastward expansion of Tibetan Plateau from magnetotelluric array data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 454: 78-85.
- Dong H W, Xu Z Q, Cao H, et al. 2018. Comparison of eastern and western boundary faults of Eastern Himalayan Syntaxis, and its tectonic evolution[J]. *Earth Science*, 43(4): 933-951 (in Chinese).
- Dong X, Li W, Lu Z, et al. 2020. Seismic reflection imaging of crustal deformation within the eastern Yarlung-Zangbo suture zone[J]. *Tectonophysics*, 780: 228395.
- Feng C J, Li B, Li H, et al. 2022. Estimation of in-situ stress field surrounding the Namcha Barwa region and discussion on the tectonic stability[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(6): 919-937 (in Chinese).
- Fu Y V, Li A, Chen Y J. 2010. Crustal and upper mantle structure of southeast Tibet from Rayleigh wave tomography[J]. *Journal of Geophysical Research*, 115: B12323.
- Gao R, Lu Z, Klemperer S L, et al. 2016. Crustal-scale duplexing beneath the Yarlung Zangbo suture in the western Himalaya[J]. *Nature Geoscience*, 9: 555-560.
- Guo X Y, Luo X C, Gao R, et al. 2023. Crustal-scale plate interactions beneath the dominant domain in the India-Eurasia collision zone—a tectonophysical study[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(2): 20220001.

- 001-017 (in Chinese).
- Holland T, Powell R. 2001. Calculation of phase relations involving haplogranitic melts using an internally consistent thermodynamic dataset[J]. *Journal of Petrology*, 42(4): 673-683.
- Hou Z Q, Yang Z M, Wang R, et al. 2020. Further discussion on porphyry Cu-Mo-Au deposit formation in mainland China[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 020-044 (in Chinese).
- Hu S B, He L J, Wang J Y. 2000. Heat flow in the continental area of China: A new data set[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 179(2): 407-419.
- Hu S Q, Yao H J. 2018. Crustal velocity structure around the eastern Himalayan syntaxis: Implications for the nucleation mechanism of the 2017 M_s 6.9 Mainling earthquake and regional tectonics[J]. *Tectonophysics*, 744: 1-9.
- Li G H, Bai L, Ding L, et al. 2020. Source parameters of the 2019 M_s 6.3 Medog earthquake and its tectonic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(3): 1214-1223 (in Chinese).
- Lin C H, Peng M, Tan H D, et al. 2017. Crustal structure beneath Namche Barwa, eastern Himalayan syntaxis: New insights from three-dimensional magnetotelluric imaging[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122: 5082-5100.
- Nabelek P I, Nabelek J L. 2014. Thermal characteristics of the Main Himalaya Thrust and the Indian lower crust with implications for crustal rheology and partial melting in the Himalaya orogeny[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 395: 116-123.
- Park S K, Mackie R L. 2000. Resistive (dry?) lower crust in an active orogen, Nanga Parbat, northern Pakistan[J]. *Tectonophysics*, 316: 359-380.
- Peng M, Jiang M, Li Z H, et al. 2016. Complex Indian subduction style with slab fragmentation beneath the Eastern Himalayan Syntaxis revealed by teleseismic P-wave tomography[J]. *Tectonophysics*, 667: 77-86.
- Qi J L, Dong H, Ji L Z, et al. 2025. The deep electrical structure characteristics and regional seismicity of the southeastern Jiali Fault Zone[J]. *Tectonophysics*, 895: 230559.
- Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 33: 267-309.
- Selway K. 2014. On the causes of electrical conductivity anomalies in tectonically stable lithosphere[J]. *Surveys in Geophysics*, 35: 219-257.
- She Y W, Fu G Y. 2020. Uplift mechanism of the highest mountains at Eastern Himalayan Syntaxis revealed by in situ dense gravimetry[J]. *Geophysical Research Letters*, 47: 1-9.
- Shi D N, Zhao W J, Klemperer S L, et al. 2016. West-east transition from underplating to steep subduction in the India-Tibet collision zone revealed by receiver-function profiles[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 452: 171-177.
- Tournerie B, Chouteau M. 2005. Three-dimensional magnetotelluric survey to image structure and stratigraphy of a sedimentary basin in Hungary[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150: 197-212.
- Wang G, Wei W B, Ye G F, et al. 2017. 3-D electrical structure across the Yadong-Gulu rift revealed by magnetotelluric data: New insights on the extension of the upper crust and the geometry of the underthrusting Indian lithospheric slab in southern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 474: 172-179.
- Wang G, Fang H. 2023. Electrical structure and seismic implication of Motuo fault zone in Bodong-Xirang area[J]. *Progress in Geophysics*, 38(6): 2430-2439.
- Wang G, Lv Q Y, Wei W B, et al. 2023. The formation mechanism of the Cona Woka rift in Eastern Himalaya and its influence on the Tethyan Himalayan polymetallic deposits revealed by magnetotelluric imaging[J]. *Tectonophysics*, 860: 229918.
- Wang G, Fang H, Lei Q, et al. 2024. Magnetotelluric imaging of the central Himalayan crust away from rift zones[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 25(3): e2023GC011132.
- Wei W B, Unsworth M, Jones A G, et al. 2001. Detection of wide-spread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies[J]. *Science*, 292: 716-718.
- Xie C L, Jin S, Wei W B, et al. 2021. Middle crustal partial melting triggered since the Mid-Miocene in southern Tibet: Insights from magnetotelluric data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 126(9): 1-18.
- Xu Q, Zhao J M, Pei S P, et al. 2013. Imaging lithospheric structure of the Eastern Himalayan Syntaxis: New insights from receiver function analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118: 2323-2332.
- Xu Z Q, Cai Z H, Zhang Z M, et al. 2008. Tectonics and fabric kinematics of the Namche Barwa terrane, Eastern Himalayan Syntaxis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1463-1476.
- Xu Z Q, Ji S C, Cai Z H, et al. 2011. Kinematics and dynamics of the Namche Barwa Syntaxis, eastern Himalaya: Constraints from deformation, fabrics and geochronology[J]. *Gondwana Research*, 21: 19-36.
- Yang B, Egbert G D, Kelbert A, et al. 2015. Three-dimensional electrical resistivity of the north-central USA from Earth Scope long period magnetotelluric data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 422: 87-93.
- Yin A, Harrison T M. 2003. Geological evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211-280.
- Zhang B, Sun Y, Ma X M, et al. 2023. Analysis of in-situ stress field characteristics and tectonic stability in the Motuo key area of the Eastern Himalayan Syntaxis[J]. *Journal of Geomechanics*, 29(3): 388-401.
- Zhang H, Zhao D P, Zhao J M, et al. 2012. Convergence of the Indian and Eurasian plates under eastern Tibet revealed by seismic tomography[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 13: Q06w14.
- Zhang J J, Ji J Q, Zhong D L, et al. 2003. Structural pattern and formation process of the eastern Himalayan Namche Barwa syntaxis[J]. *Science in China (Series D)*, 33: 373-383 (in Chinese).
- Zhang L T, Jin S, Wei W B, et al. 2012. Electrical structure of crust and upper mantle beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau and the Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(12): 4126-4137 (in Chinese).

附中文参考文献

白玲, 李国辉, 宋博文. 2017. 2017 年西藏米林 6.9 级地震震源参

- 数及其构造意义[J]. [地球物理学报](#), 60(12): 4956-4963.
- 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[J]. [地球物理学报](#), 53(11): 2703-2714.
- 陈平光, 何晓慧, 徐树峰, 等. 2023. 喜马拉雅东构造结地震精定位及其区域应力场研究[J]. [地球与行星物理论评\(中英文\)](#), 54(6): 667-683.
- 陈小斌, 蔡军涛, 王立凤, 等. 2014. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(四)——阻抗张量分解的多测点-多频点统计成像分析[J]. [地球物理学报](#), 57(6): 1946-1957.
- 陈小斌, 郭春玲. 2017. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(五)——利用阻抗张量成像识别大地线性构造[J]. [地球物理学报](#), 60(2): 766-777.
- 程成, 白玲, 丁林, 等. 2017. 利用接收函数方法研究喜马拉雅东构造结地区地壳结构[J]. [地球物理学报](#), 60(8): 2969-2979.
- 董汉文, 许志琴, 曹汇, 等. 2018. 东喜马拉雅构造结东、西边界断裂对比及其构造演化过程[J]. [地球科学](#), 43(4): 933-951.
- 丰成君, 李滨, 李惠, 等. 2022. 南迦巴瓦地区地应力场估算与构造稳定性探讨[J]. [地质力学学报](#), 28(6): 919-937.
- 郭晓玉, 罗旭聪, 高锐, 等. 2023. 印度-欧亚板块主碰撞带全地壳尺度相互作用关系研究[J]. [地学前缘](#), 30(2): 001-017.
- 侯增谦, 杨志明, 王瑞, 等. 2020. 再论中国大陆斑岩 Cu-Mo-Au 矿床成矿作用[J]. [地学前缘](#), 27(2): 020-044.
- 李国辉, 白玲, 丁林, 等. 2020. 2019 年西藏 M_s 6.3 地震震源参数及其构造意义[J]. [地球物理学报](#), 63(3): 1214-1223.
- 王刚, 方慧. 2023. 墨脱断裂带波东—西让段电性结构及其地震意义[J]. [地球物理学进展](#), 38(6): 2430-2439.
- 许志琴, 蔡志慧, 张泽明, 等. 2008. 喜马拉雅东构造结——南迦巴瓦构造及组构运动学[J]. [岩石学报](#), 24(7): 1463-1476.
- 张斌, 孙尧, 马秀敏, 等. 2023. 东构造结墨脱关键区域地应力场特征及其构造稳定性分析[J]. [地质力学学报](#), 29(3): 388-401.
- 张进江, 季建清, 钟大赉, 等. 2003. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨[J]. [中国科学\(D辑\)](#), 33: 373-383.
- 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[J]. [地球物理学报](#), 55(12): 4126-4137.