



2025年1月7日西藏定日 M_S 6.8地震发震构造及震源区三维体波成像研究

王月, 胡景, 马亚伟, 孟令媛, 韩颜颜, 何骁慧

引用本文:

王月, 胡景, 马亚伟, 等. 2025年1月7日西藏定日 M_S 6.8地震发震构造及震源区三维体波成像研究[J]. 地球物理学报, 2026, 69(3): 1046–1064.

Wang Y, Hu J, Ma Y W, et al. Study of the seismogenic mechanism and three-dimensional velocity structure of the source region of the M_S 6.8 earthquake in Dingri, Xizang on January 7, 2025[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2026, 69(3): 1046-1064.

<https://doi.org/10.6038/cjg2025T0126>

相关论文

2025年1月7日西藏定日县 M_W 6.8地震震源区深部电性结构与孕震环境

薛帅, 卢占武, 梁宏达, 李文辉, 张新彦, 杨欣欣, 蔡蔚

地球物理学报 2025, 68(11): 4273–4287 doi: 10.6038/cjg2025T0095

2025年西藏定日6.8级地震序列特征及发震构造

安艳茹, 刘媛, 鞠慧超, 张莹莹, 于子叶, 唐淋, 杨志高, 高锦瑞, 许亮, 黎博文, 杨宏峰

地球物理学报 2025, 68(10): 3713–3725 doi: 10.6038/cjg2025T0100

2022—2023年四川泸定 M_S 6.8、 M_S 5.0和 M_S 5.6地震序列的发震构造及成因

张建勇, 王新, 陈凌, 刘杰

地球物理学报 2024, 67(4): 1471–1486 doi: 10.6038/cjg2023R0215

2022年9月5日四川泸定 M_S 6.8地震序列发震构造

易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 赵敏, 张会平, 周荣军, 李勇, 刘欢, 吴朋, 王思维, 李俊, 吴微微, 苏金蓉

地球物理学报 2023, 66(4): 1363–1384 doi: 10.6038/cjg2023Q0923

2022年1月2日云南宁蒗 M_S 5.5地震矩张量及发震构造研究

刘俊清, 张宇, 蔡宏雷, 张雪冰, 王光明, 陈兆新

地球物理学报 2025, 68(9): 3433–3445 doi: 10.6038/cjg2024S0468

2023年甘肃积石山 M_S 6.2地震震源区的三维速度结构及其发震构造

蔡光耀, 王未来, 吴建平, 张龙, 包晶晶, 孟繁昌, 刘慧杰

地球物理学报 2024, 67(11): 4148–4159 doi: 10.6038/cjg2024S0094



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王月, 胡景, 马亚伟等. 2026. 2025 年 1 月 7 日西藏定日 M_S 6.8 地震发震构造及震源区三维体波成像研究. 地球物理学报, 69(3): 1046-1064, doi: 10.6038/cjg2025T0126.

Wang Y, Hu J, Ma Y W, et al. 2026. Study of the seismogenic mechanism and three-dimensional velocity structure of the source region of the M_S 6.8 earthquake in Dingri, Xizang on January 7, 2025. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 69(3): 1046-1064, doi: 10.6038/cjg2025T0126.



2025 年 1 月 7 日西藏定日 M_S 6.8 地震发震构造及震源区三维体波成像研究

王月¹, 胡景^{2*}, 马亚伟¹, 孟令媛¹, 韩颜颜¹, 何晓慧^{3,4}

1 中国地震台网中心, 北京 100045

2 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054

3 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广州 510275

4 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东珠海 519082

摘要 本文基于西藏定日 M_S 6.8 地震周边地区地震台网记录的自 2015 年 1 月 1 日至 2025 年 1 月 22 日的观测报告, 利用双差层析成像方法反演了震源区附近 30 km 以上深度的三维精细 P 波和 S 波速度结构, 同时得到重定位后的余震序列. 结果显示, 重定位余震在登么错断裂西侧呈现一条长约 80 km、近 NS 向展布的条带, 且具明显走向分段特征: 北段(28.8°N 以北)、中段(28.6°—28.8°N)和南段(28.6°N 以南). 其中, 中段发育多条分支断裂, 自西向东依次为 NNW、近 NS 和 NNE 走向; 南段整体呈 NNW 向. 主震位于藏南滑脱拆离系(近 EW 向)与登么错断裂(近 NS 向)在南段的交汇区, 震源深度 11.6 km; 余震深度集中分布于 4~20 km, 且沿北段向北逐渐变浅. 震源区速度结构横向非均匀性显著: 西侧整体表现为低速异常, 主震及余震序列主要分布于偏高速区的速度梯度带内, 主震周边存在明显低 V_P/V_S 异常. 综合分析认为, 印度板块向青藏高原的陡俯冲引发板片撕裂, 深部热物质通过撕裂窗口上涌或沿垂向地幔流进入中下地壳, 从而在中上地壳形成应力集中区; 在区域东西向拉张构造应力持续积累背景下, 多条交汇断层的共同作用最终触发了本次定日 M_S 6.8 地震.

关键词 西藏定日 M_S 6.8 地震; 双差层析成像; 速度结构; 重定位

中图分类号 P315

收稿日期 2025-03-08, 2025-12-02 收修定稿

DOI: 10.6038/cjg2025T0126

CSTR: 32084.14.cjg2025T0126

Study of the seismogenic mechanism and three-dimensional velocity structure of the source region of the M_S 6.8 earthquake in Dingri, Xizang on January 7, 2025

WANG Yue¹, HU Jing^{2*}, MA YaWei¹, MENG LingYuan¹, HAN YanYan¹, HE XiaoHui^{3,4}

1 China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2 School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

3 Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

4 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai Guangdong 519082, China

Abstract In this study, we collect seismic P- and S-wave travel time data from January 1, 2015 to January 22,

基金项目 国家自然科学基金项目(42204068, 42104051), 中国地震局科技创新团队“震后趋势研判”, 中央高校基本科研业务费(300102262103, 300102264907) 共同资助.

第一作者简介 王月, 女, 1990 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事地震活动性和地震层析成像方面的研究. E-mail: wangyue@seis.ac.cn

*** 通讯作者** 胡景, 男, 1992 年生, 博士, 副教授, 主要从事地震层析成像研究. E-mail: hujing@chd.edu.cn

2025, recorded by the permanent and temporary stations in the area surrounding the Dingri M_S 6.8 earthquake to invert 3D fine P-wave and S-wave velocity structures above a depth of 30 km and relocate seismic events by applying the double-difference tomography method. The results show that the relocated aftershocks delineate an approximately 80 km-long, nearly north-south-trending belt on the western side of the Dengmecuo Fault, exhibiting clear along-strike segmentation: the northern segment (north of 28.8°N), the central segment (28.6°N — 28.8°N), and the southern segment (south of 28.6°N). The central segment contains multiple branch faults that strike, from west to east, NNW, nearly NS, and NNE, respectively, while the southern segment exhibits an overall NNW orientation. The mainshock is located at the intersection of the nearly east-west-trending South Tibetan Detachment System and the north-south-striking Dengmecuo Fault in the southern segment, with a focal depth of 11.6 km. The aftershocks are concentrated at depths between 4 and 20 km and shallow northward along the northern segment. The velocity structure in the source region shows pronounced lateral heterogeneity: the western part is generally characterized by low-velocity anomalies, whereas the mainshock and most aftershocks are located in a velocity transition zone biased toward the high-velocity domain, with a pronounced low V_p/V_s anomaly observed around the mainshock. Comprehensive analysis suggests that during the steep-angle subduction of the Indian slab beneath the Tibetan Plateau, slab tearing enabled deep hot material to ascend through the tear window or via vertical mantle flow into the mid-lower crust, thereby generating a stress concentration zone in the mid-upper crust. Against the background of ongoing accumulation of regional east-west extensional tectonic stress, the interaction of multiple intersecting faults ultimately triggered the Dingri M_S 6.8 earthquake.

Keywords Dingri M_S 6.8 earthquake; Double-difference tomography; Velocity structure; Earthquake relocation

0 引言

据中国地震台网测定, 2025 年 1 月 7 日 9 时 5 分, 在西藏自治区日喀则市定日县 (28.5°N , 87.45°E) 发生 M_S 6.8 地震, 震源深度 10 km (下文简称定日地震)。定日地震发生后, 多家科研机构迅速给出了定日 M_S 6.8 地震的震源机制, 均为正断型 (国家地震科学数据中心: <https://data.earthquake.cn/gxdt/info/2025/334672994.html>; 美国地质调查局: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000pi9w/moment-tensor>; 德国地学中心: <https://geofon.gfz.de/eqinfo/event.php?id=gfz2025albe>)。定日主震位于藏南裂谷系中申扎-定结断裂系的登么错断裂西侧 (吴佳杰等, 2025), 余震序列呈南北向分布, 登么错湖东侧分布长约 15 km 地表破裂带 (<https://www.ief.ac.cn/kydts/info/2025/92313.html>), 初步推测发震构造是南北向的登么错断裂 (杨婷等, 2025; Yang et al., 2025; Yao et al., 2025)。

此次定日地震位于青藏高原南部的申扎-定结断裂系南段 (图 1a), 由于印度板块持续向欧亚板块碰撞挤压, 在青藏高原内部形成了一系列南北走向的裂谷, 如隆格尔裂谷、尼玛-定日裂谷、申扎-定结裂谷、亚东-谷露裂谷等 (Yin et al., 1999; 张进江等,

2002; Taylor and Yin, 2009; 张佳伟等, 2020)。申扎-定结断裂系分布有多条活动断裂, 登么错断裂为该断裂带南段发育规模较大的断裂, 北端始于格巴错附近, 向南经空摸错、郎阿错、登么错至野江村南 7 km 处, 全长约 60 km, 断裂带宽约 30 ~ 300 m。登么错断裂在 28.6°N 走向出现转折, 28.6°N 以北为近南北走向, 28.6°N 以南为北东走向 (图 1b, F7) (田婷婷和吴中海, 2023; 白玲等, 2025)。2015 年尼泊尔 M_S 8.1 地震发生后, 包括登么错断裂在内的申扎-定结断裂带南段应力处于加载状态 (李琦等, 2024; Yue et al., 2025), 先后发生了 2015 年 4 月 25 日定日 M_S 5.9、2016 年 5 月 22 日定日 M_S 5.3 和定结 M_S 5.3、2020 年 3 月 20 日定日 M_S 5.9 地震。此次定日 M_S 6.8 地震为申扎-定结断裂带上自 2015 年以来发生的最大地震, 为研究该区域精细地壳结构提供了丰富的地震资料。

介质速度结构反演和地震精确定位是研究地下隐伏断裂、获得深部构造的重要方法, 可为进一步探讨孕震环境和发震机理提供依据 (吴建平等, 2009; 王长在等, 2013; 莘海亮等, 2020; 胡景等, 2021; 孙权等, 2021; 陈成锋等, 2022; 曹颖等, 2024; 于悦颖等, 2024)。本文利用双差层析成像方法 (Zhang and Thurber, 2003, 2006), 基于西藏区域地震

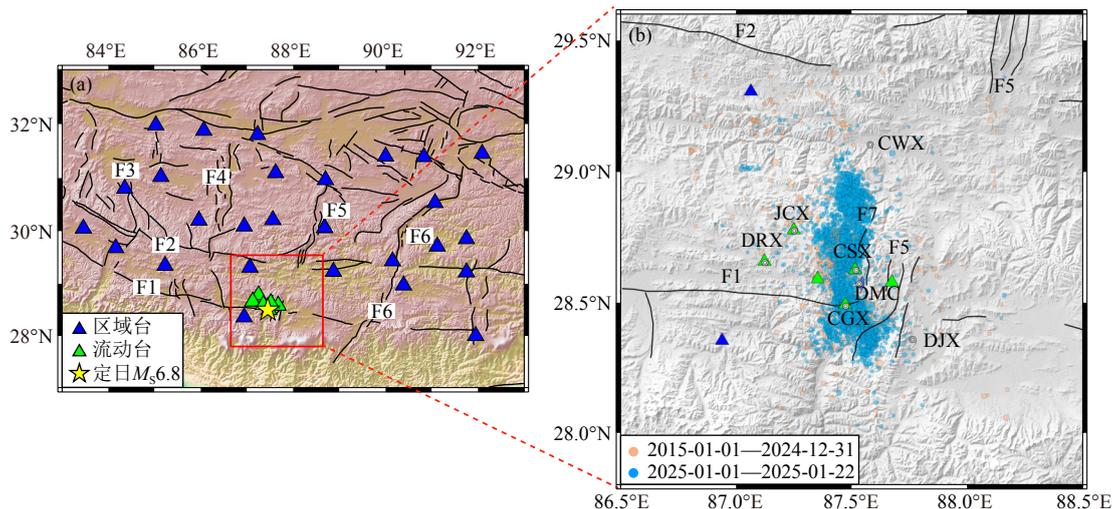


图 1 (a) 研究区域构造背景及台站分布; (b) 研究区域 $M_L \geq 1.0$ 地震 (2015-01-01—2025-01-22) 分布

F1: 藏南滑脱拆离系断裂, F2: 雅鲁藏布江缝合带, F3: 隆格尔断裂带, F4: 尼玛-定日断裂带, F5: 申扎-定结断裂带, F6: 亚东-谷露断裂带, F7: 登么错断裂, DRX: 定日县, DJX: 定结县, CGX: 措果乡, CSX: 长所乡, DMC: 登么错湖, JCX: 加措乡, CWX: 查务乡.

Fig. 1 (a) Tectonic background of the study region and distribution of stations; (b) Distribution of $M_L \geq 1.0$ earthquakes from January 1st, 2015 to January 22nd, 2025

F1: Southern Tibet Detachment System, F2: Indus-Tsangpo Suture, F3: Longger rift, F4: Nima-Dingri rift, F5: Shenza-Dingjie rift, F6: Yadong-Gulu rift, F7: Dengmecuo fault, DRX: Dingri County, DJX: Dingjie County, CGX: Cuoguo Township, CSX: Changsuo Township, DMC: Dengmecuo Lake, JCX: Jiacao Township, CWX: Chawu Township.

台网在 2015 年至 2025 年期间记录的定日地震震中附近的震相报告, 以及定日地震后布设的流动台记录的定日地震序列的震相报告, 获得了定日地震震源区上地壳精细三维速度结构和精定位的余震序列, 初步分析了此次定日地震的发震构造、孕震环境和发震机理.

1 数据和方法

1.1 数据资料筛选

本文从中国地震台网中心收集了地理范围为 (86.8°E—88.2°E, 28°N—29.4°N) 以及时间范围为 2015 年 1 月 1 日至 2025 年 1 月 22 日的震相报告, 并选择距离此次定日 $M_S 6.8$ 地震震中 500 km 以内的台站 (图 1a), 最终获得共 35 个台站记录到的 6828 个地震 P 波初至和 S 波初至到时数据, 进行 P 波速度结构和 S 波速度结构反演. 用于计算的 35 个台站包含 29 个西藏区域测震台站和定日地震后架设的 6 个流动台站 (图 1). 为保证走时数据的可靠性, 剔除了走时偏离走时曲线 3 s 以外的 P 或 S 波初至数据, 其中走时曲线由初至走时和震中距线性回归得到, 其斜率一般对应地壳的平均慢度, 同时, 为避免 Pn 波和 Sn 波的影响, 去除 300 km 以外的台站记录 (图 2). 为保证速度反演和重定位结果的稳定性, 在

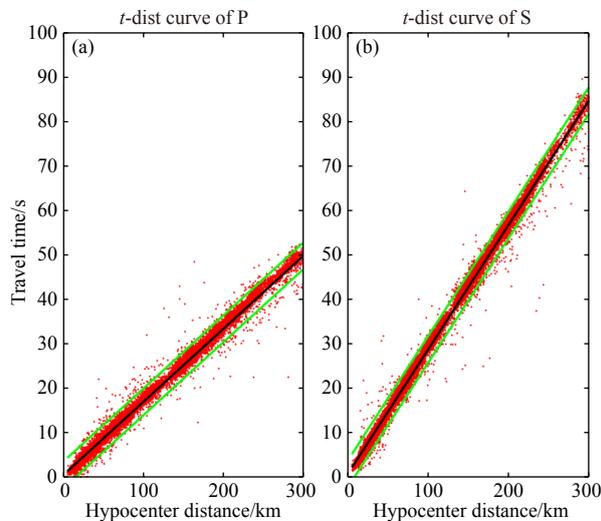


图 2 P 波和 S 波时距曲线

黑线代表拟合线, 绿线代表 3 s 误差.

Fig. 2 Travel-time as a function of epicentral distance for P wave and S wave

The black lines represent the fit lines, the green lines represent the errors within 3 s.

使得地震-台站的方位角覆盖较好的情况下, 保证一定的射线覆盖度, 因此挑选至少有 5 个台站记录的地震事件 (王长在等, 2013; 吴建平等, 2013; 曹颖等, 2024). 最终, 本文获得了 38231 条 P 波到时和 37549 条 S 波到时. 然后, 基于 P 波绝对到时数据和 S 波绝对到时数据构建地震对数据, 其中地震对最大间距

不超过 30 km, 共获得 6604 个地震事件的 533158 条地震对 P 波到时差数据和 526822 条地震对 S 波到时差数据, 用于震源区速度结构反演; 考虑到 P 波和 S 波到时的拾取精度不同, 参考前人研究中的参数选取 (马梦丹和赵爱华, 2021; 王祖东等, 2022; 花茜等, 2024), 本研究在反演过程中设置 P 波震相的权重为 1.0, S 波震相的权重为 0.8.

1.2 方法及参数设置

双差层析成像方法是 Zhang 和 Thurber (2003, 2006) 在双差定位方法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) 基础上发展而来, 由于该方法在利用绝对走时数据的基础上, 引入地震对的走时差数据, 不仅可以反演地下精细的三维速度结构, 而且可以获得精度更高的定位结果, 因此被广泛应用于不同尺度的速度结构成像和地震重定位研究中 (Zhang et al., 2019; Zuo et al., 2020; 王月等, 2020; 吴建平等, 2024). 具体原理参考 Zhang 和 Thurber (2003, 2006).

由于定日地区缺少较为精细的速度结构成像结果 (Liang et al., 2016), 因此本文参考杨婷等 (2025) 基于 Zhang 等 (2010) 和滕吉文等 (1983) 构建的速度模型初步构建了研究区的一维速度模型 (表 1), 波速比参考接收函数研究结果, 即 1.69 (He et al., 2014). 通过比较不同的网格划分, 最终确定水平方向采用 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的网格间距, 深度方向采用 $Z=0$ km, 5 km, 10 km, 15 km, 20 km, 30 km, 46 km, 73 km. 反演采用阻尼最小二乘法求解, 为保证反演结果的稳定性, 本文采用 L-curve 方法对阻尼因子和模型平滑因子进行权衡分析 (Hansen and O'Leary, 1993; 陈成锋, 2022; 邓山泉等, 2020). 通过比较设置不同参数时解的不确定性和拟合残差之间的关系, 最终选择最优阻尼因子为 300、模型平滑因子为 20 (图 3a, b). 反演过程中采用分级加权的方法, 迭代初期, 赋予绝对到时较高的权重, 获得地震绝对位置和大范围的速度结构, 之后增加相对到时权重, 以提高震源区的速度模型的精度和地震相对位置 (Guo et al., 2018; 武振波等, 2024). 经过 10 次迭代反演, 地震走时均方根残差从 1.356 s 降至 0.129 s. 图 3(c, d) 显示了 P 波和 S 波反演前后的绝对走时残差的分布. 反演前, P 波和 S 波走时残差分布大致在 $-2 \sim 2$ s 之间, 反演后, 走时残差分布在 $-1 \sim 1$ s 范围内. P 波走时残差的均方根反演前后分别为 0.73 s 和 0.16 s, 下降约 78%. S 波绝对走时残差的均方根反演前后分别为 0.84 s 和 0.22 s, 下降约 74%.

在进行速度反演结果解释之前, 本文采用棋盘

表 1 定日地震震源区初始速度模型

Table 1 Initial velocity model of the Dingri earthquake region

层顶深度/km	$V_p/(km \cdot s^{-1})$
0.00	5.60
5.00	6.00
10.00	6.10
15.00	6.20
20.00	6.30
30.00	6.50
46.00	6.60
73.00	8.30

测试进行速度模型分辨率分析. 首先在初始速度模型中添加 $\pm 5\%$ 的速度扰动, 然后利用实际观测系统合成理论走时数据, 随后基于合成数据构建地震对双差数据, 最后采用与实际反演一致的参数和模型进行反演, 最终得到棋盘测试结果, 同时将恢复度值为 0.85 的等值线投影到结果上 (图 4 和图 5). 整体来看, 余震区 0 ~ 30 km 深度范围内 P 波速度和 S 波速度均能不同程度恢复出来, 其中 5 ~ 20 km 恢复效果较好, 这与地震的震源深度基本在该深度范围有关 (图 4). 30 km 以深的区域由于缺乏射线覆盖, 几乎得不到较好的反演结果. 图 5 显示了沿不同经度和纬度的剖面结果, 可以看出定日地震震源区在 20 km 以内具有较好的分辨率, 横向分辨率可达 10 km, 纵向分辨率可达 5 km.

2 计算结果分析

2.1 重定位结果

利用双差层析成像方法获得了研究区域 6566 个重定位后的地震, 其中定日地震序列为 5859 个, 占地震总数的 89%. 重定位后的定日地震序列相比初始定位在深度上有明显改善 (图 6). 1月7日至1月8日 (图 6a) 和 1月9日至1月22日 (图 6c) 的定日地震序列初始定位的震源深度以 10 km 居多, 这可能是由于初始定位采用的定位算法精度不高和速度模型不够准确等因素引起的, 较难给出较为准确的震源位置, 因此将多数地震的震源深度设为 10 km. 1月9日至1月22日 (流动台工作之后的时间段) 的地震序列重定位结果 (图 6d) 相较于 1月7日至1月8日的地震序列重定位结果 (图 6b) 更加集中. 增加流动台前, 地震深度在 30 km 以内均有分布,

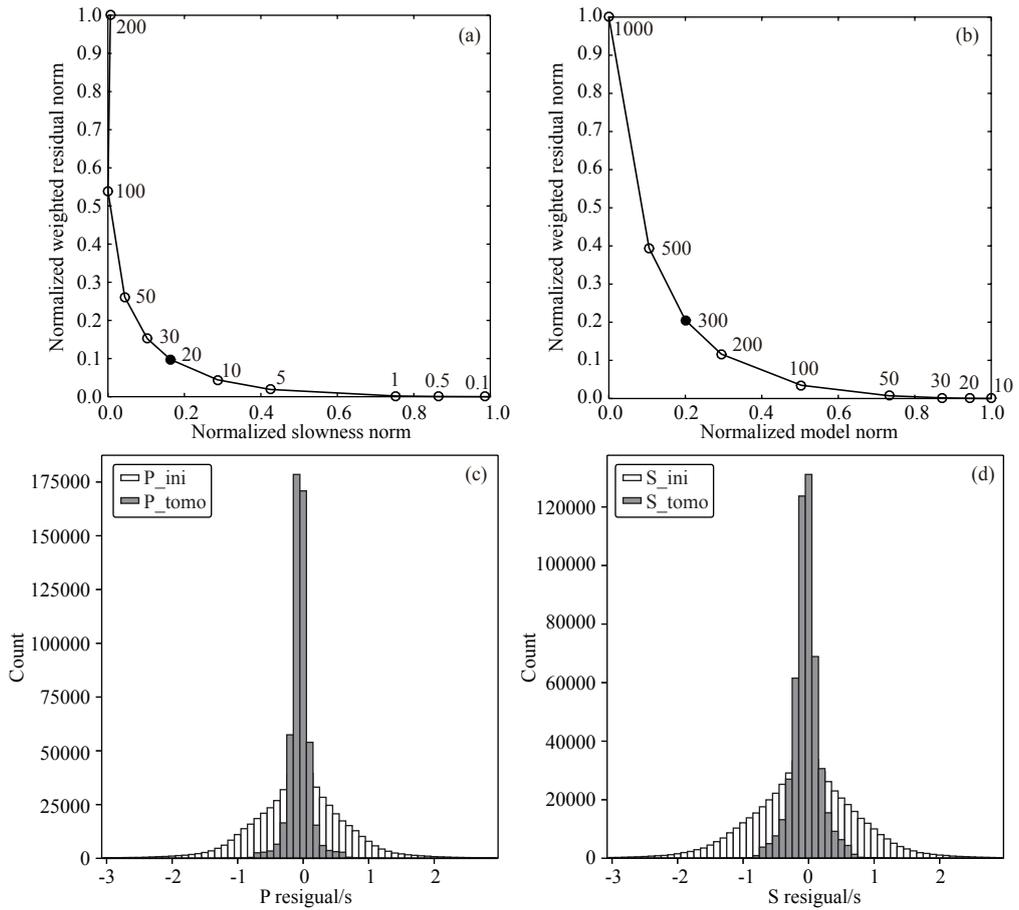


图 3 利用 L-curve 方法选取最优平滑因子 (a) 和阻尼因子 (b) 与反演前后的 P 波 (c) 和 S 波 (d) 绝对走时残差对比

(a) 中黑色圆圈为实际反演中所用的最优平滑因子 20. (b) 中黑色圆圈为实际反演中所用的最优阻尼因子 300.

(c) 和 (d) 中白色和灰色柱状图分别表示反演 P 和 S 波前后的绝对走时残差分布.

Fig. 3 Selection of optimal smoothing factor (a), damping factor (b) and comparison of absolute travel-time residuals before and after inversion for P wave (c) and S wave (d)

(a) The black circle represents the optimal smoothing factor of 20 used during the real inversion. (b) The black circle represents the optimal damping factor of 300 used during the real inversion. White histograms (before inversion) and gray histograms (after inversion) represent distribution of absolute travel-time residuals for P wave (c) and S wave (d), respectively.

除 5 ~ 11 km 范围内分布相对较多之外, 其余深度分布较为均匀. 然而, 增加流动台后, 重定位后序列的震源深度主要分布在 0 ~ 20 km, 其中以 4 ~ 12 km 居多. 重定位后的主震震中位置为北纬 28.488°, 东经 87.519°, 震源深度为 11.6 km, 比中国地震台网中心给出的初始定位深度 (10 km) 略深, 与杨婷等 (2025) 的定位深度 (11.3 km) 基本一致.

重定位后定日地震序列震中主要位于申扎-定结断裂带南段的登么错断裂 (F7, 图 1b) 西侧, 呈近南北向分布, 长度约 80 km. 序列大致可划分为三段, 28.8°N (CC') 以北为北段, 28.6°N—28.8°N 为中段, 28.6°N (EE') 以南为南段, 主震位于南段 (图 7a), 与 Yao 等 (2025) 和杨婷等 (2025) 的结果基本一致. 震源深度上, Yao 等 (2025) 重定位结果显示中段较深、南北两段逐渐变浅, 杨婷等 (2025) 的结果显示

序列震源深度集中分布在 4 ~ 17 km, 南段较浅, 约 3 ~ 12 km, 本文反演结果显示中段震源深度集中在 3 ~ 15 km, 北段向北逐渐变浅, 南段向南逐渐变浅, 但位于主震以南、申扎-定结断裂 (F5) 以东的余震序列震源深度逐渐变深 (图 7b). 重定位获得的 1 月 9 日布设流动台后的地震分布 (附图 1) 显示震源深度变化和图 7 基本一致.

图 7a 显示地震序列北段走向存在转折, 28.9°N (BB') 以北走向为北北东, 以南为北北西; 中段存在多条分支断裂, 自西向东走向依次为北北西、近南北和北北东, 倾向分别为东倾、东倾、西倾 (图 7d 和图 7e 中灰色虚线); 南段穿过近东西向的藏南滑脱拆离系断裂, 整体走向呈北北西, 与已知的登么错断裂走向存在一定夹角, 因此认为南段可能存在一条北北西走向的断裂, 该断裂向西倾 (图 7g 和图 7h).

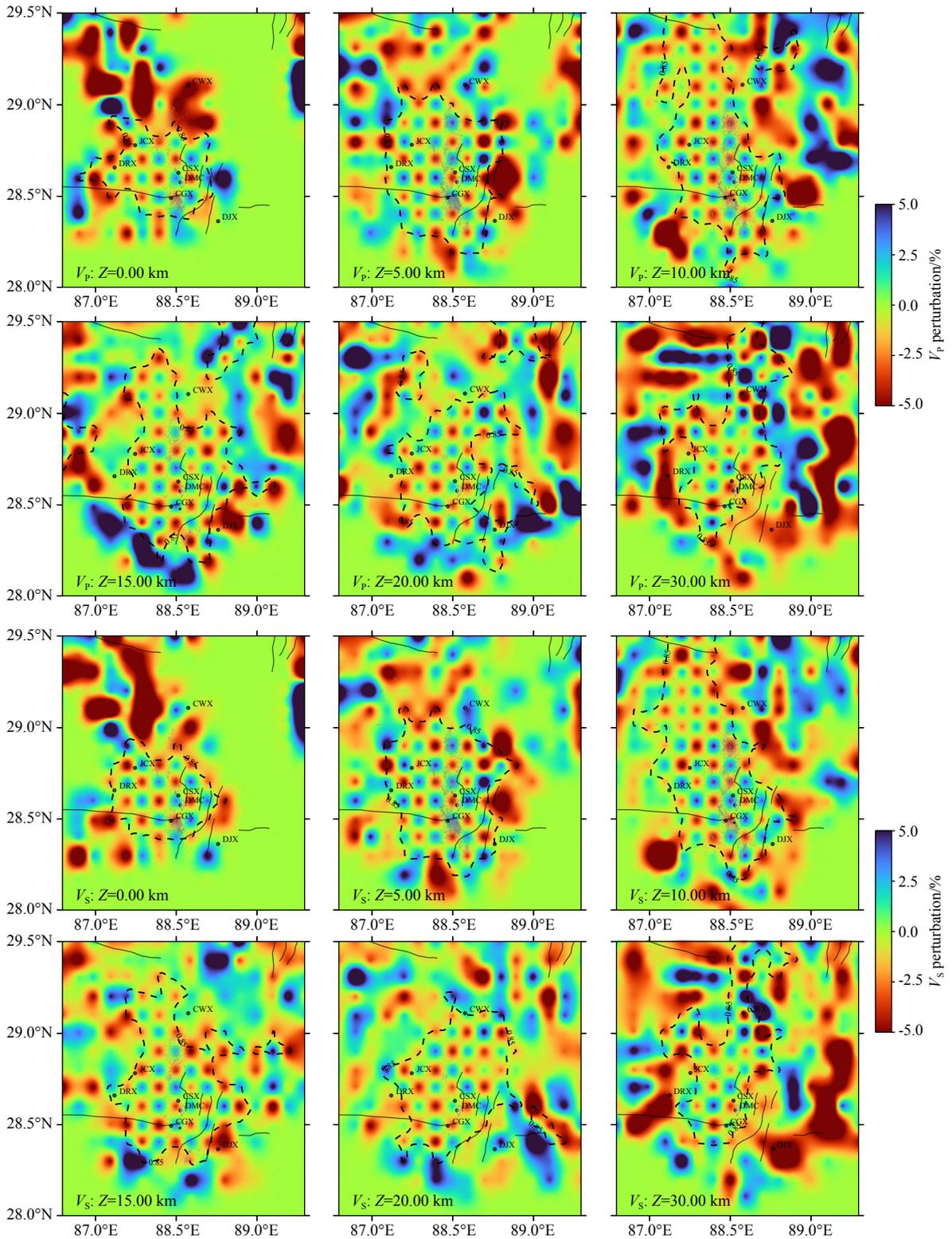


图 4 V_p 和 V_s 在不同深度的检测板恢复结果

黑色虚线代表恢复度值为 0.85.

Fig. 4 The checkerboard test results of V_p and V_s at various depths

Black dashed contours enclose areas with restoration value equal to 0.85.

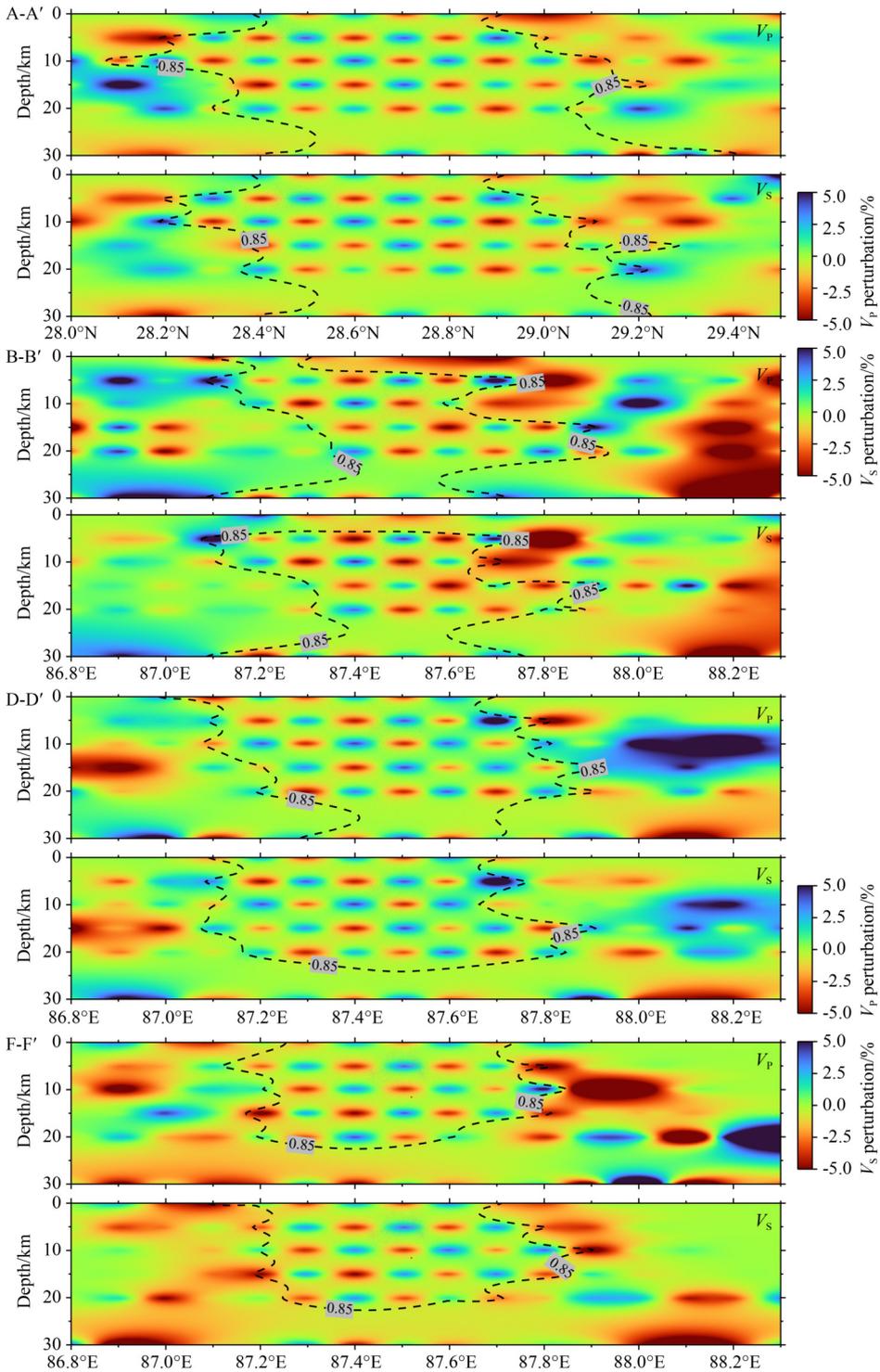


图 5 V_p 和 V_s 在不同剖面的棋盘恢复结果

黑色虚线代表恢复度值为 0.85. 剖面位置位于图 7a.

Fig. 5 The checkerboard test results of V_p and V_s at various slices

Black dashed contours enclose areas with restoration value equal to 0.85. Locations of slices are shown in Fig. 7a.

主震西南侧有少量沿南南西向展布的余震,可能附近存在一条北北东-南南西走向的分支断裂,该断裂位于登么错断裂向南延长线上,定日主震即发生在该分支断裂与南段北北西走向的断裂和东西向藏南

滑脱拆离系断裂交汇区域.

为了评估地震重定位误差,本文利用自助法重采样策略对走时差数据进行有放回的随机采样 (Efron, 1982; Billings, 1994; Shearer, 1997),每次随机采

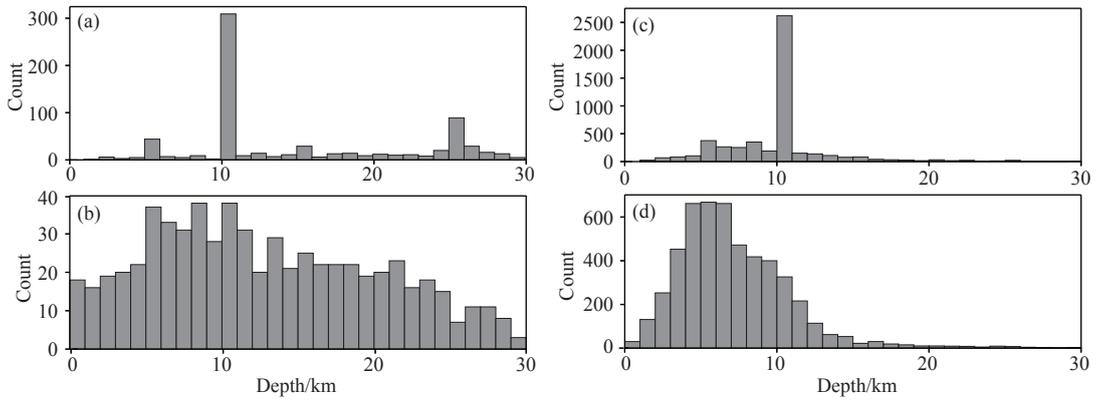


图 6 1 月 7 日-8 日地震序列重定位前后 (a、b) 和 1 月 9 日-22 日地震序列重定位前后 (c、d) 震源深度统计图

Fig. 6 Histograms of focal depths for the Dingri earthquake sequence before and after relocation from Jan. 7th to 8th (a and b) and from Jan. 9th to 22nd (c and d)

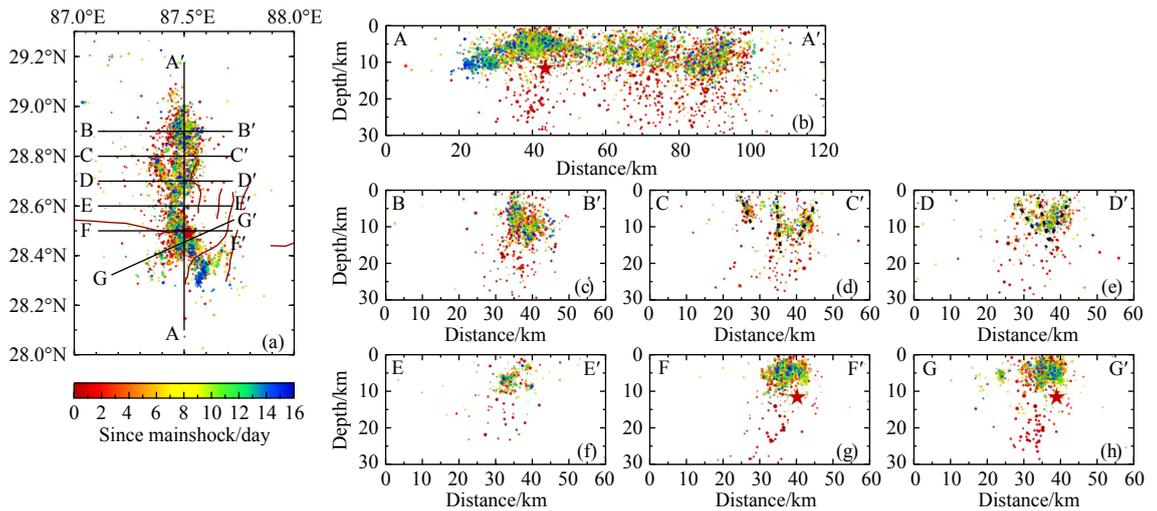


图 7 重定位后 $M_L \geq 1.0$ 地震分布

红色五角星表示主震, 黑色直线表示剖面位置, 红色实线表示已知断层, 黑色虚线表示勾勒的隐伏断裂。

Fig. 7 Distribution of relocated earthquakes with $M_L \geq 1.0$

Red star represents the mainshock, black lines represent positions of profiles, red lines represent faults, and black dashed lines represent predicted faults.

集数据的 90%, 然后对重采样得到的数据进行双差层析成像反演. 重复上述流程 100 次, 最终获得重定位后的地震在三个方向的误差标准差分布直方图 (图 8), 结果显示, E-W 向和 N-S 向的误差相较 U-D 方向更小, 大多数地震的重定位误差在 1.5 km 以内. 三个方向上重定位误差的中位数分别为 0.15 km、0.26 km 和 0.49 km, 表明整体重定位结果具有可靠性.

2.2 速度结构

前人研究结果显示, 定日地区的地壳厚度在 50 km 上下 (滕吉文等, 1983; Schulte-Pelkum et al., 2005; Gong et al., 2023), 由于地震大部分发生在 30 km 以上, 而且检测板反演结果显示 20 km 以上的分辨率较好, 因此本研究仅对 20 km 以上的 P 波速度分布和 S 波速度成像结果进行分析.

反演结果显示, 定日地震震源区的 P 波速度和 S 波速度表现出强烈的横向不均匀性 (图 9—10). 在 0~5 km 深度范围内, 震源区反演的可靠区域较小, 但整体表现中段速度较高, 南段速度较低. 登么错地堑在东侧表现为较高的 V_P 和 V_S , 西侧表现为较低的 V_P 和 V_S . 在 5 km 深度, 登么错地堑东侧区域相对较高的 V_P 现象有所缓解, 而 V_S 则仍维持相对较高的特征, 直至 20 km 深度, 该区域 V_P 表现为相对低速, V_S 仍表现为相对高速. 登么错断裂以东的低 V_P 、高 V_S 异常区对应申扎-定结断裂 (图 1b 中的 F5). 10 km 深度的 V_P (图 9) 和 V_S (图 10) 切片显示, 主震位于 V_P 较低、 V_S 由低向高转换的区域, 南段余震序列整体分布在低 V_P 和低 V_S 异常区, 中段余震序列东侧的申扎-定结断裂 (F5) 表现为低 V_P 和高 V_S 的

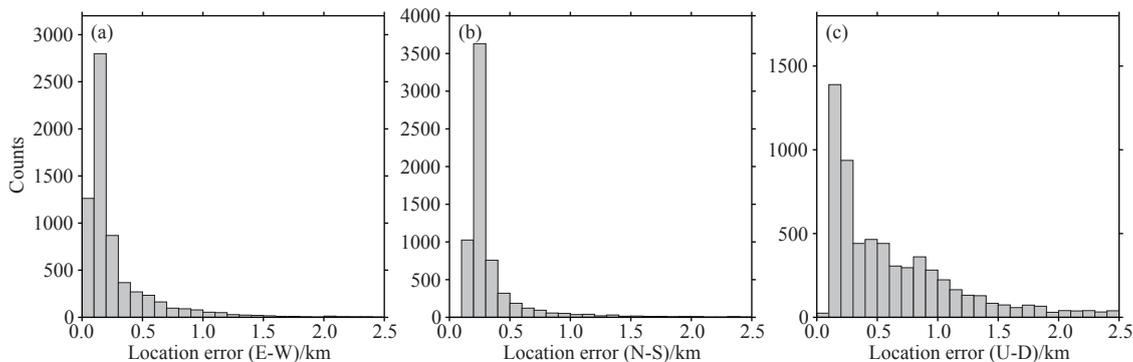


图 8 重定位后的地震在 E-W 向 (a)、N-S 向 (b) 和 U-D 垂向 (c) 三个方向的标准差分布直方图

Fig. 8 Histograms of relocation standard deviations for the East-West (a), North-South (b), and Up-Down (c) components of relocated earthquakes

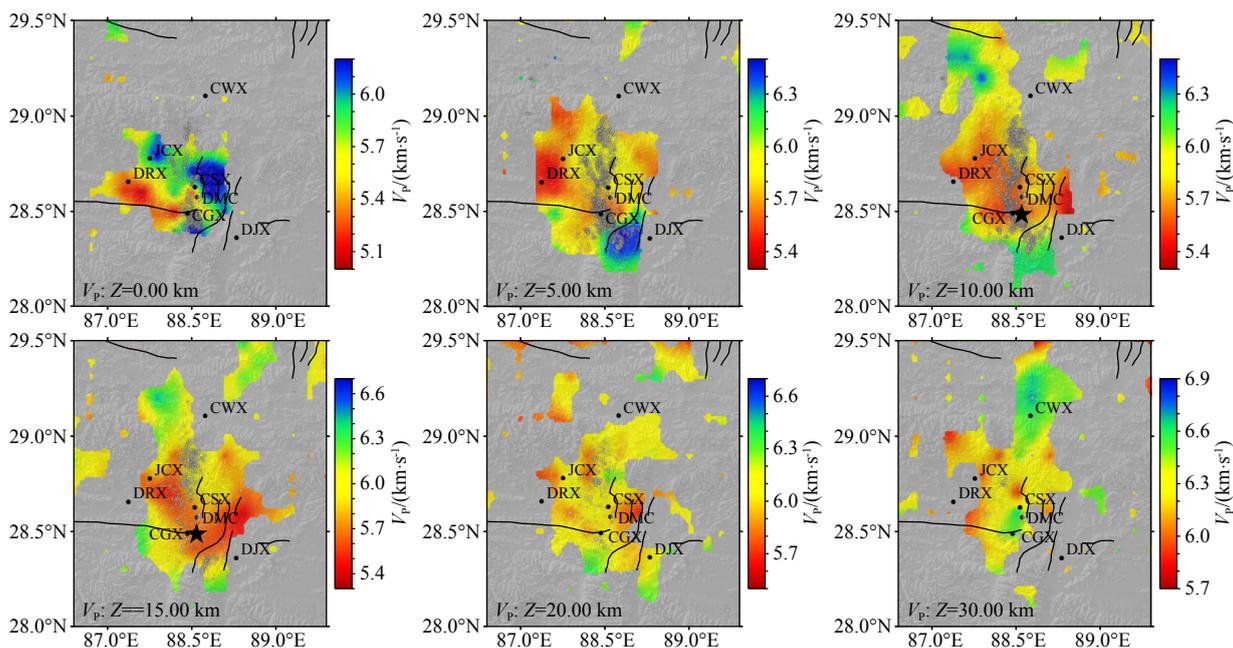


图 9 不同深度切片上 V_p 分布及定日地震序列分布

灰色圆点表示距离切片 5 km 以内的地震, 黑色五角星表示定日地震, 黑色线为断层线, 灰色区域为恢复度低于 0.85 的区域.

Fig. 9 V_p and Dingri earthquake sequence distributions at various depth slices

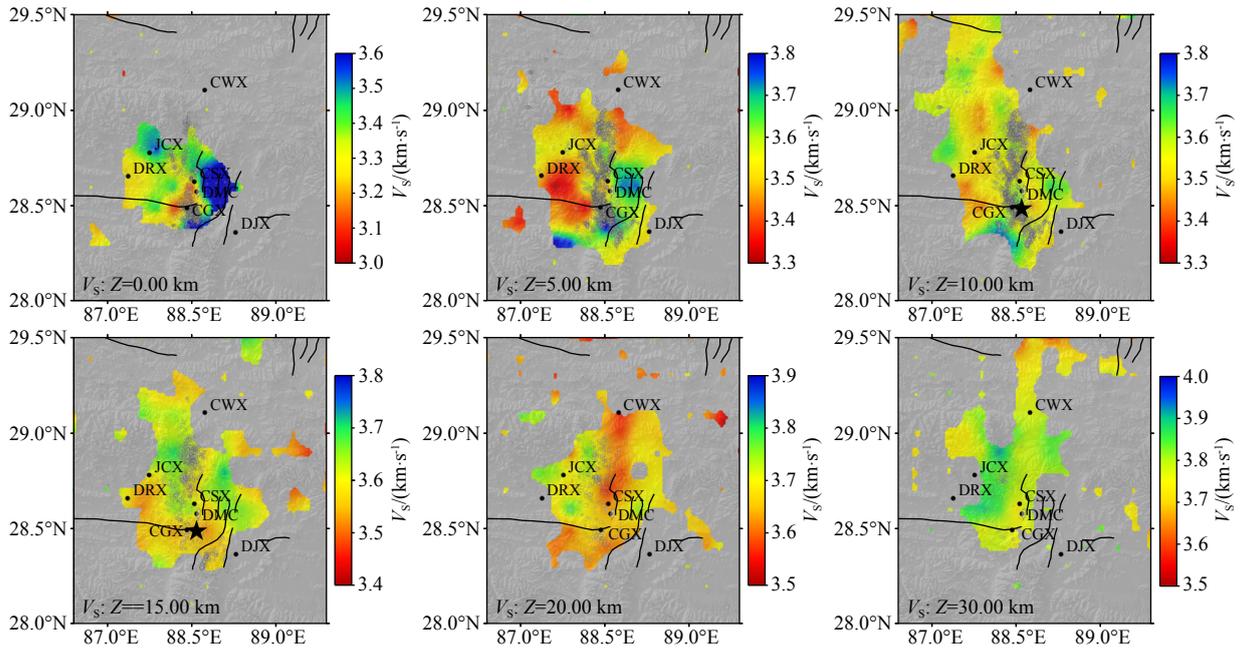
Gray circles mark the earthquakes within 5 km of the slice, the black star marks the Dingri mainshock, the black lines denote fault traces, and gray areas are restoration value lower than 0.85.

特征, 西侧速度结构表现为低 V_p 和低 V_s , 北段余震序列整体位于高低速交界的区域, 东侧表现为相对低 V_s 结构, 西侧表现为相对高 V_s 结构. 15 ~ 20 km 深度切片显示, 序列北段和中段西侧的低 V_p 和高 V_s 较为突出, 序列位于 V_p 相对较高而 V_s 相对较低的区域. 值得一提的是, 藏南滑脱拆离系断裂南北两侧在 15 ~ 20 km 深度表现为明显的速度差异.

为了更好地探究震源区的速度结构以及余震序列的深度展布特征, 本文给出了穿过主震沿着纬度和经度方向的三维波速及波速比剖面图, 同时沿 AA'、BB'、DD' 和 FF' 给出了四条速度及波速比结

构剖面图, 并将距离剖面 5 km 以内的地震投影到相应的剖面上 (图 11), 其中波速比结构由 V_p 和 V_s 直接计算, 且对波速比结构进行了高斯平滑, 并取 V_p 和 V_s 的恢复度都大于 0.85 的区域来圈定可靠的波速比结构范围. 从三维图以及剖面图 (AA' 和 FF') 上可观察到主震发生在 V_p 较低、 V_s 高低交界且 V_p/V_s 偏低 (约 1.58) 的区域.

AA' 剖面的 P 波速度结果显示, 震源区南段 (28.4°N—28.6°N) 在 5 ~ 15 km 深度存在低 V_p 结构, 28.6°N 以北则表现为相对高速. AA' 剖面的 S 波速度结果显示, 在登么错地堑下方 V_s 表现为低速, 在

图 10 不同深度切片上 V_S 分布及定日地震序列分布

图中符号与图 9 一致。

Fig. 10 V_S and earthquake sequence distributions at various depth slices

Symbols are the same as those of Fig.9.

5 km 深度南段 28.4°N 附近分布相对较高的 V_S 异常区, 在 28.5°N—28.7°N 范围内 10 ~ 15 km 深度表现为低速异常. AA' 剖面的 V_P/V_S 结果显示, 主震附近呈现显著的低波速比异常. 位于北段的 BB' 剖面显示, P 波速度存在明显的横向不均匀性, 在 15 km 深度附近自西向东分布多个尺度较小的高 V_P 和低 V_P 异常体, 在 15 km 以浅, 余震区东侧表现出相对较高的波速比. 位于中段的 DD' 剖面显示, 5 km 以浅呈现相对较高的 V_P/V_S , 对应了地表的登么错湖所在区域, 同时该深度范围内余震较少. 位于南段的 FF' 剖面结果除进一步清晰展示了主震附近的低波速比异常之外, 在 5 km 深度 87.7°E 附近存在高 V_P 异常区, 在 10 ~ 15 km 深度则表现为低 V_P 和低 V_P/V_S 异常区, 与申扎-定结断裂系南段的分支断裂所在区域基本一致.

3 讨论

本文基于西藏区域台网以及定日地震发生后布设的流动台站的震相报告, 利用双差层析成像方法反演了定日 $M_{\text{S}}6.8$ 地震震源区精细三维速度结构, 并获得了定日地震序列的重定位结果.

3.1 地震重定位不确定性分析及地震序列特征

本研究区的台站在地震序列南部分布较为稀

疏, 可能会导致地震序列定位出现整体偏移. 本文除了使用 2.1 节自助法来评估地震重定位的不确定性 (图 8) 外, 还利用恢复性测试进一步分析主震后两天内及主震两天后地震重定位分布是否有整体偏移. 恢复性测试步骤如下: 首先使用实际反演的模型 (P 波速度模型和平滑的波速比模型) 和地震位置分别作为真实模型和真实地震位置, 并根据实际的地震与台站几何关系正演理论走时数据, 并在理论走时数据中加入均值为 0, 方差为 0.05 s 的高斯噪声, 构建观测走时数据; 其次, 采用实际反演中用到的参数进行反演. 附图 2 和附图 3 展示了主震后两天内的事件以及主震两天后的事件位置恢复程度. 从图中可以看到两阶段的地震事件位置恢复质量较高, 主震后两天内事件的距离误差大部分都在 3 km 以内, 主震两天后的事件距离误差大部分在 1 km 以内, 整体偏移程度较弱.

针对定日地震序列, 本文获得了 1 月 7 日至 22 日共 5859 个序列目录, Yao 等 (2025) 获得了 1 月 8 日 13 时 24 分至 18 日 16 时 18 分共 30439 个序列目录, 杨婷等 (2025) 获得了 1 月 7 日至 20 日 10 时共 4312 个序列目录. 在地震数量上, 基于密集台阵获得的重定位序列目录明显多于基于区域台网和中国地震局布设的流动台获得的定位结果. 在地震序列空间展布上, 三个结果大体一致, 均能看到序列

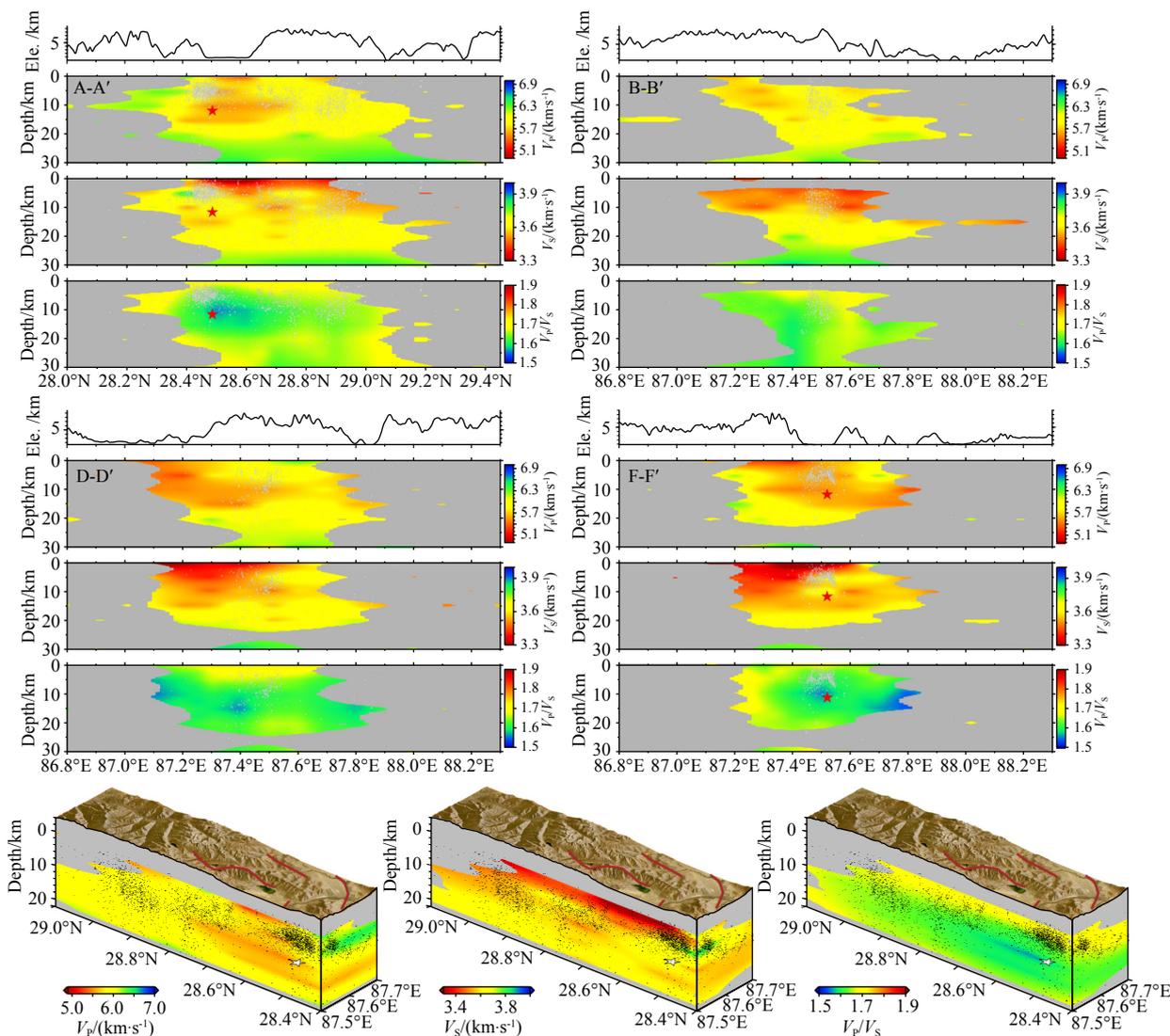


图 11 V_p 、 V_s 和 V_p/V_s 在不同垂直剖面上的分布

圆点代表定日地震序列,五角星代表定日主震,黑色虚线代表恢复度值为 0.85 的等值线。

Fig. 11 V_p , V_s and V_p/V_s distributions at various vertical profiles

Dots denote the Dingri earthquake sequence, stars denote the Dingri mainshock, the black dashed contours enclose areas with restoration value equal to 0.85, red lines denote fault traces.

明显的分段现象,包括北段的余震走向转折、中段的分支断裂、以及南段的走向偏转等。但是,由于中国地震局布设的流动台基本位于主震以北的区域,而 Yao 等 (2025) 布设的台站以主震所在的南段偏多,因此 Yao 等 (2025) 获得的定位结果在震源深度上更为集中,对南段的约束较好。

本文的地震重定位结果显示定日 $M_S 6.8$ 地震发生在申扎-定结断裂带南段,震中附近断裂分布较为复杂,序列东侧最近的断裂为登么错断裂,该断裂走向为东北-近南北方向的正断层 (田婷婷和吴中海, 2023),与定日 $M_S 6.8$ 主震震源机制解结果一致。序列的分段特征较为显著,与 Yao 等 (2025) 和 杨婷

等 (2025) 给出的地震重定位结果基本一致。北段余震主要呈 NNW 和 NNE 两个方向展布,可能存在多组断裂;中段存在多条隐伏断裂,走向从西向东依次呈 NNW 向、近 NS 向和 NNE 向,倾向从西向东分别为东倾、东倾和西倾,从速度剖面也能看到断裂之间较为明显的差异;南段可能存在一条 NNW 走向的断裂,该断裂西南侧存在一条 SSW 走向断裂,位于登么错断裂向南的延伸线上。主震位于南段 NNW 向断裂和登么错断裂延伸线上的分支断裂交汇区域,根据田婷婷和吴中海 (2023) 的研究显示,2015 年尼泊尔 $M_W 7.8$ 地震对登么错断裂的活动性影响加强,而且震后野外调查表明地表破裂主要发

育于登么错东岸, NS 向延伸约 15 km (石峰等, 2025).

3.2 震源区的波速及波速比结构特征

为与区域速度模型进行对比, 进一步绘制了 USTClitho2.0 模型 (Han et al., 2022)、CSRM1.0 模型 (Xiao et al., 2024) 和本文的速度模型在深度 10 km 的分布 (附图 4), 可以看出本文反演得到的震源区附近的 V_P 和 V_S 在横向上的不均匀性程度更强, 其横向分辨率达 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ (图 4), 分辨率相对较高.

余震区速度结构自北向南存在较大的差异性, 这可能是导致余震序列呈现分段特征的缘由. 此次定日地震主震位于上地壳的高低速过渡区, 偏向高 V_S 的边界区, 该区域速度梯度较大, V_P/V_S 较低 (~ 1.58). 尽管本文获取波速比的方式在速度模型分辨率较差的地方会带来一定的虚假异常, 不如直接反演 V_P/V_S (Guo et al., 2018) 精度高, 但在 V_P 和 V_S 分辨率好的区域直接使用 V_P 和 V_S 获取波速比也可获得相对稳定的波速比结果 (Hou et al., 2024).

为检测直接相比获得的波速比的可靠性, 本文首先进行了波速比检测板实验. 与之前的波速检测板测试类似, 在初始 P 波模型的反演网格点间加入正负 5% 的速度扰动, 但在初始 S 波模型的反演网格点间加入与 P 波模型扰动符号相反的 5% 速度扰动, 使得 V_P/V_S 的扰动范围在 10% 左右 (相对于初始 1.69) (Hou et al., 2024). 采用上述的模型进行正演理论走时, 并用于反演 V_P 和 V_S 结构, 并基于反演的 V_P 和反演的 V_S 计算 V_P/V_S . V_P/V_S 恢复的检测板结果显示在震源区附近横向分辨率达 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, 纵向分辨率达 5 km (附图 5). 进一步地, 本文绘制了 3.1 节所采用的恢复性测试中波速比的恢复结果, 来评估 V_P 和 V_S 直接相除得到的波速比结果, 如附图 6 所示, 震源区的低波速比 (< 1.6) 现象仍然能较好地呈现. 定日地震震源区的低波速比异常与 Gong 等 (2023) 基于接收函数数据获取的喜马拉雅块体的中南段呈现的地壳平均波速比较低 (达 1.65) 的特征具有一定的相似性. 该地区岩浆岩分布广泛, 初步推测该地区的低波速比可能是由于富含石英的花岗岩造成的, 因为富含石英则会降低 V_P , 而增大 V_S , 从而导致 V_P/V_S 降低 (Christensen, 1996), 而富含石英的岩石在中上地壳表现为脆性, 容易积累应力, 使得岩石在应力积累到一定的时候破裂而产生地震.

3.3 震源区应力场反演

为了进一步了解定日地震余震区的应力场分布, 本文基于西藏区域台网的宽频带台站波形记录, 运用 W 震相反演方法 (Yang et al., 2024) 获取了

主震震源机制解为拉张型破裂. 对于余震, 考虑到台站接收的中小地震的波形资料受信噪比影响较大 (江敏等, 2018), 因此利用基于 P 波初动和 S/P 振幅比联合反演的 HASH 方法 (Hardebeck and Shearer, 2002, 2003), 得到 18 次 3.5 级以上余震的震源机制解 (图 12). 基于以上震源机制解, 对目标区域进行了 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ 网格划分, 在确保最小网格重叠的前提下搜索获取每个网格内的震源机制解样本. 采用阻尼应力反演方法 (Hardebeck and Michael, 2006) 进行区域应力场反演, 通过 L-curve 分析确定最优阻尼因子为 0.7, 并经过自助法 1000 次重采样计算获得 95% 置信区间的应力参数估计. 反演结果 (图 12) 显示最大主压应力轴 (σ_1) 方向呈近南北向展布, 且具有较好的空间连续性, 自北向南存在约 10° 的顺时针旋转, 同时应力比 (R 值) 呈现由 ~ 0.6 递减至 ~ 0.1 的明显趋势, 反映应力机制从走滑型向拉张型的过渡.

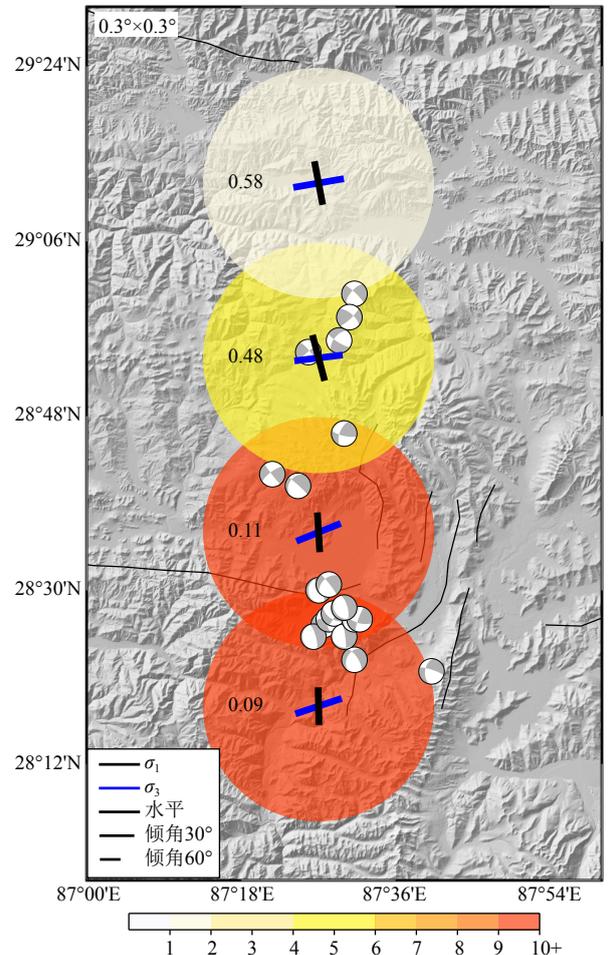


图 12 反演的主震和余震 ($M_S \geq 3.5$) 的震源机制解以及震源区附近应力场分布

Fig. 12 Distribution of focal mechanism solutions of the $M_S \geq 3.5$ events and inverted regional stress field

3.4 定日地震发生机制探讨

前人研究结果显示, 西藏巨厚地壳中存在部分熔融体和热流体, 此次定日地震震源区附近的电性结构表现为高电阻率 (魏文博等, 2009; Sheng et al., 2023; 盛跃等, 2025). 这种低波速比和高阻的特征通常表示较小的岩石孔隙比、较强的力学性质, 介质发生破碎需要较强的应力积累 (Tenthorey et al., 2003; 李洪丽等, 2021; Liu et al., 2025). 主震位于藏南滑脱拆离系断裂东端, 而藏南滑脱拆离系断裂南北两侧的速度在 15 km 以浅呈现出显著的变化, 与吴云龙等 (2025) 获得的该断裂南北两侧的布格重力异常呈现相似的状态, 可能反映了其下方深部区域可

能存在活跃的壳幔物质运移. 除此之外, 印度板块向北俯冲到欧亚大陆下方, 印度大陆岩石圈板片发生南北向撕裂 (Yin, 2000; Li and Song, 2018), 形成板片撕裂窗口, 给深部热物质向上运移提供了通道. 拉萨块体南部剪切波分裂的研究结果 (Nie et al., 2025) 显示, 印度大陆岩石圈板片在朋曲申扎裂谷附近区域以陡角度俯冲, 软流圈物质从板片撕裂窗上涌或由陡峭俯冲的印度岩石圈板片引起垂直地幔流动. 因此, 针对此次定日地震, 推测由于深部物质上涌, 使得中上地壳低波速比异常体附近应力集中, 在积累到一定程度后, 导致力学性质较强 (低 V_p/V_s 、高阻) 的岩石区域破裂而引发了大的地震 (图 13).

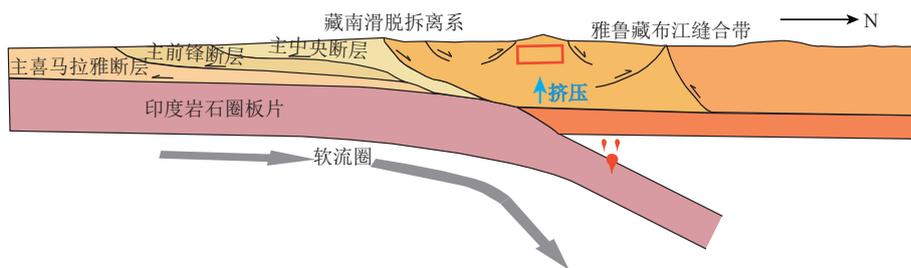


图 13 孕震机制示意图 (修改自 Chen et al., 2015)

红色方框: 低波速比区.

Fig. 13 Seismogenic mechanism cartoon (modified from Chen et al., 2015)

Red square: low V_p/V_s area.

4 结论

本文基于 2015 年 1 月 1 日至 2025 年 1 月 22 日期间 2025 年定日 $M_s 6.8$ 地震震源区的区域地震台网和流动台站记录的 P 波和 S 波的到时数据, 反演了定日地震震源区三维 P 波和 S 波精细速度结构, 并获得了余震序列重定位以及震源区的应力场结果. 基于不同剖面的 V_p 和 V_s 分布, 对此次定日地震的孕震环境和发震机理初步得到以下认识:

(1) 重定位后的定日地震序列主要沿登么错断裂呈南北向展布, 长度约 80 km, 宽度约 10~20 km, 具有明显的分段特征, 多条分支断裂和次级断裂并存; 震源深度的分布范围为 0~20 km, 优势分布范围为 4~12 km, 呈现中段较深、南段和北段逐渐变浅的现象; 主震震源深度为 11.6 km, 位于南段南北向的登么错断裂、东西向的藏南滑脱拆离系断裂, 以及北北西向的隐伏断裂交汇区, 初步分析认为此次定日地震是多条断裂共同作用的结果.

(2) 结合前人的电阻率结构、本文反演的速度及波速比结构对比分析, 定日主震位于高阻和低波

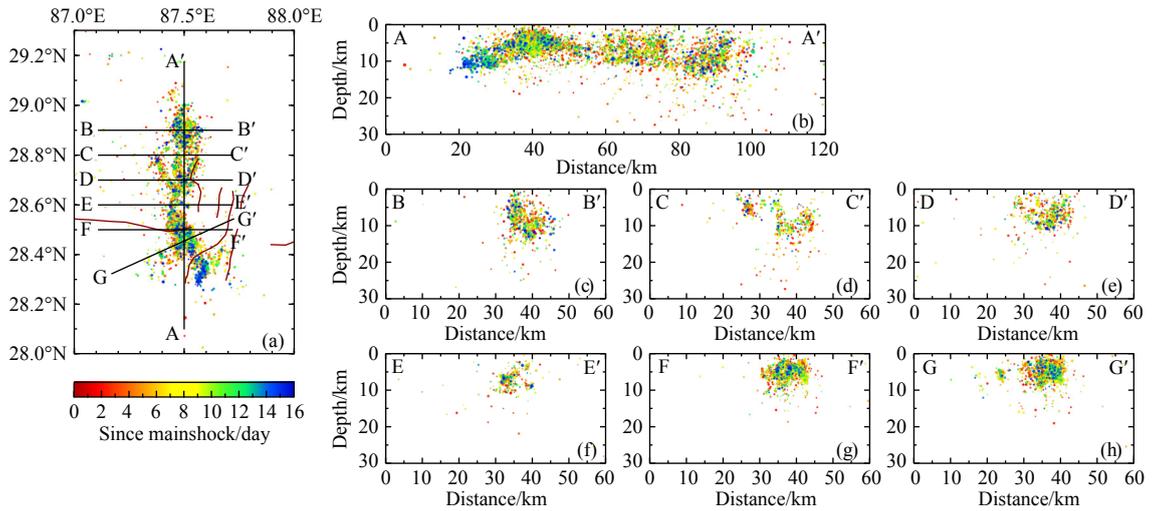
速比区域, 该区域可能由于深部物质通过板片撕裂窗上涌引起中上地壳应力集中, 为定日主震的发生提供了孕震环境, 同时, 区域的速度结构和应力场差异性对余震序列的发生具有一定控制作用.

致谢 本研究中使用的震相报告数据来源于中国地震台网中心, 文中图件采用了 GMT (Wessel et al., 2013) 软件包绘制, 在此表示感谢. 同时, 衷心感谢三位审稿人的意见和建议. 西藏定日地区的三维速度模型可在 <http://github.com/jhsa26/Dingri3D-Seismic-Velocity-Model> 下载.

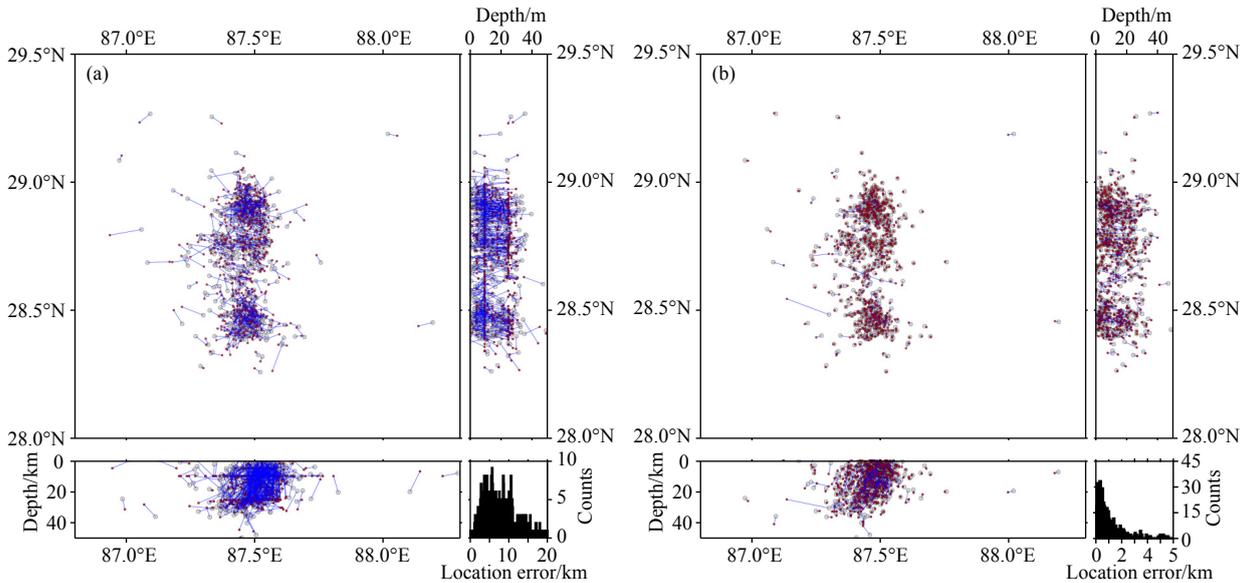
附图

References

- Bai L, Chen Z W, Wang S J. 2025. The 2025 Dingri $M_s 6.8$ earthquake in Xizang: Analysis of tectonic background and discussion of source characteristics. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics* (in Chinese), 56(3): 258-263.
- Billings S D. 1994. Simulated annealing for earthquake location. *Geophysical Journal International*, 118(3): 680-692.
- Cao Y, Qian J W, Huang J P, et al. 2024. Crustal fine velocity structure in the



附图 1 时间段 1 月 9-22 日重定位结果

Appendix Fig. 1 Distribution of relocated events from Jan. 9th to Jan. 22nd

附图 2 时间段 1 月 7-8 日 (主震后两天内) 的地震定位恢复图

(a) 灰色圆圈为真实位置, 红色圆圈为初始地震位置, 蓝色线条连接真实位置以及初始的位置; (b) 灰色圆圈为真实位置, 红色圆圈为恢复的地震位置, 蓝色线条连接真实位置以及恢复的位置.

Appendix Fig. 2 Seismic relocation recovery map for events from Jan. 7th to 8th

(a) Gray circles present the real location, red circles represent the initial location, blue lines link the real location and the initial location;
(b) Gray circles present the real location, red circles represent the recovered location, blue lines link the real location and the recovered location.

Eryuan area, Yunnan from double-different tomography. *Seismology and Geology* (in Chinese), 46(1): 162-183.

Chen C F, Zhang R Q, Qiang Z Y, et al. 2022. Seismicity and three-dimensional crustal structure of the Luzhou region in the southern Sichuan Basin, China. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 65(12): 4672-4684, doi: 10.6038/cjg2022P0905.

Chen Y, Li W, Yuan X H, et al. 2015. Tearing of the Indian lithospheric slab beneath southern Tibet revealed by SKS-wave splitting measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, 413: 13-24.

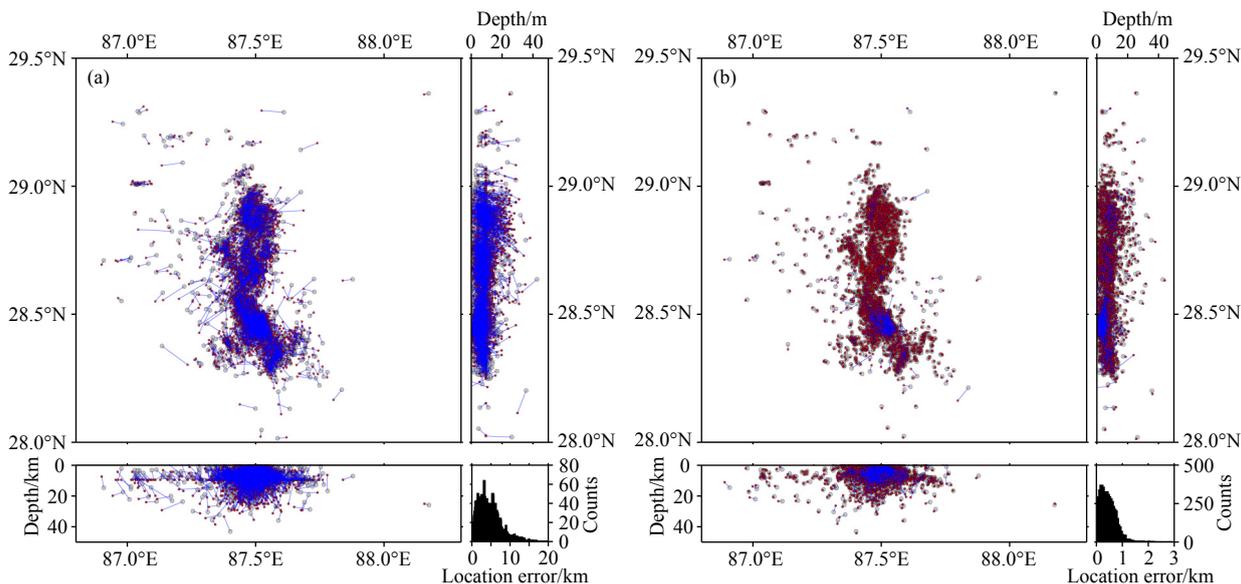
Christensen N I. 1996. Poisson's ratio and crustal seismology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B2): 3139-3156.

Deng S Q, Zhang W B, Yu X W, et al. 2020. Analysis on crustal structure characteristics of southern Sichuan-Yunnan by regional double-difference seismic tomography. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 63(10): 3653-3668, doi: 10.6038/cjg2020N0383.

Efron B. 1982. *The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans*. Philadelphia, PA: SIAM, 92.

Gong J Y, Li J T, Li M K. 2023. Isolated crustal partial melting in the southern Tibetan Plateau from $H\text{-}\kappa\text{-}c$ method. *Geophysical Research Letters*, 50(21): e2023GL106363, doi: 10.1029/2023gl106363.

Guo H, Zhang H J, Froment B. 2018. Structural control on earthquake behaviors revealed by high-resolution V_p/V_s imaging along the Gofar

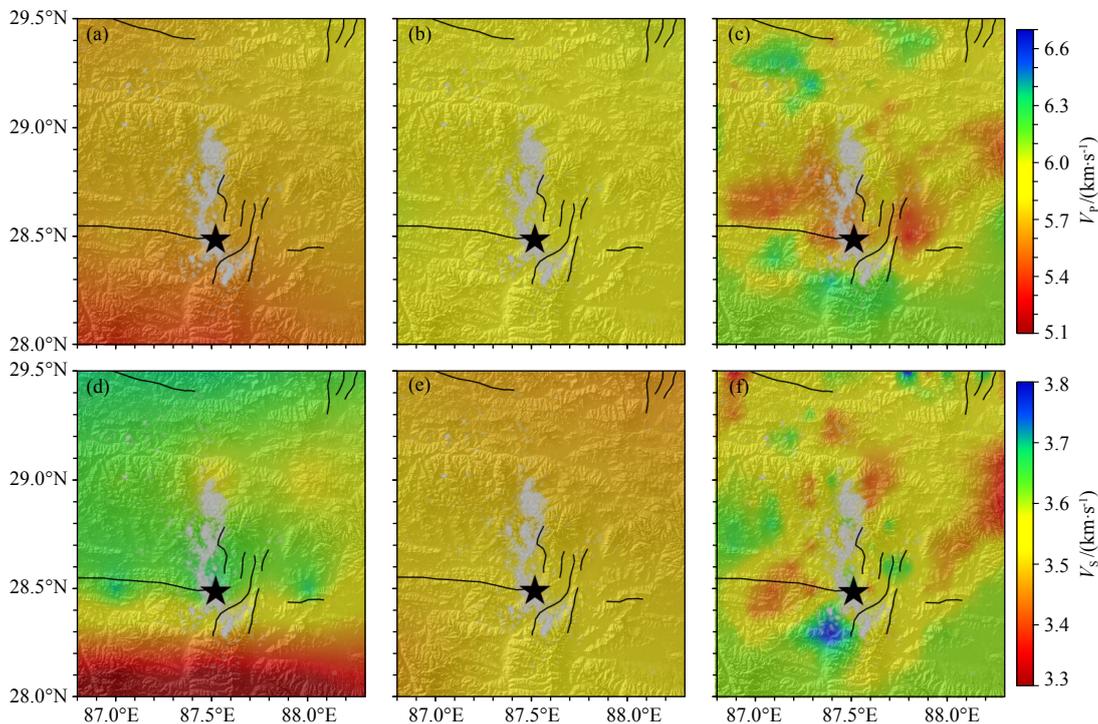


附图 3 时间段 1 月 9-22 日 (主震两天后) 的地震定位恢复图

(a) 灰色圆圈为真实位置, 红色圆圈为初始地震位置, 蓝色线条连接真实位置以及初始的位置; (b) 灰色圆圈为真实位置, 红色圆圈为恢复的地震位置, 蓝色线条连接真实位置以及恢复的位置.

Appendix Fig. 3 Seismic relocation recovery map from Jan. 9th to 22nd

(a) Gray circles present the real location, red circles represent the initial location, blue lines link the real location and the initial location;
 (b) Gray circles present the real location, red circles represent the recovered location, blue lines link the real location and the recovered location.

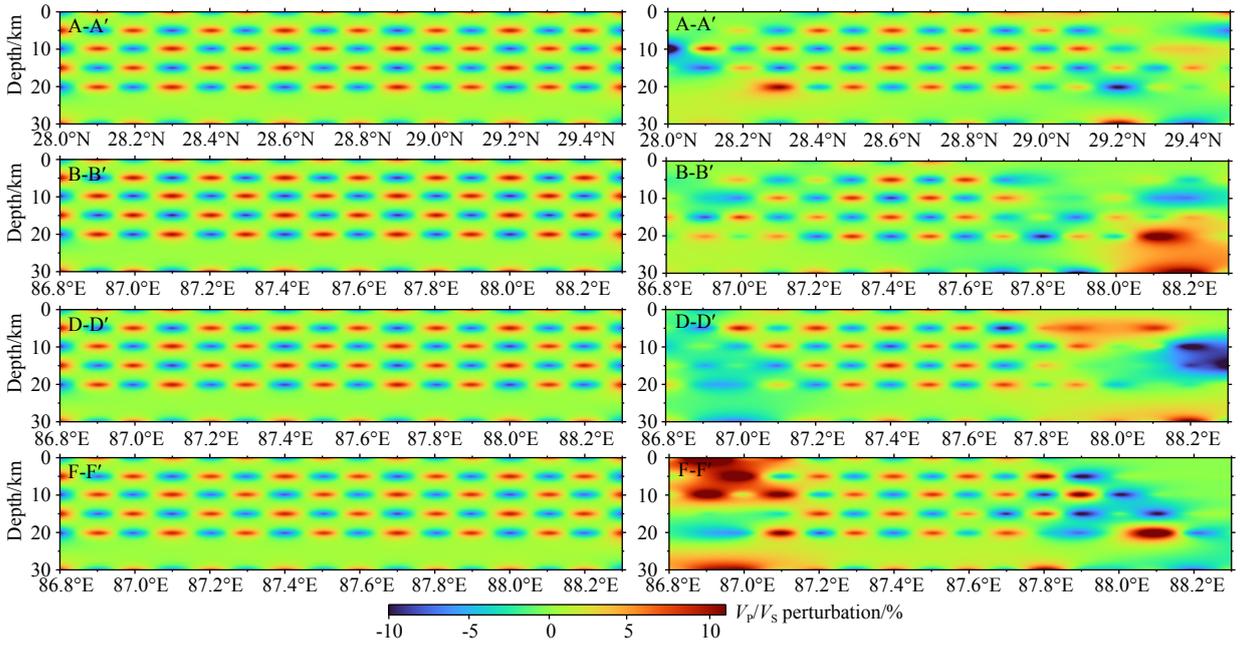


附图 4 不同模型在 10 km 深度的速度对比

(a) USTClitho2.0 V_p 模型; (b) CSR1.0 V_p 模型; (c) 本文 V_p 模型; (d) USTClitho2.0 V_s 模型; (e) CSR1.0 V_s 模型; (f) 本文 V_s 模型.

Appendix Fig. 4 Comparison of velocity models from different inversion results at 10 km depth

(a) USTClitho2.0 V_p model; (b) CSR1.0 V_p model; (c) V_p of this study; (d) USTClitho2.0 V_s model; (e) CSR1.0 V_s model; (f) V_s of this study.

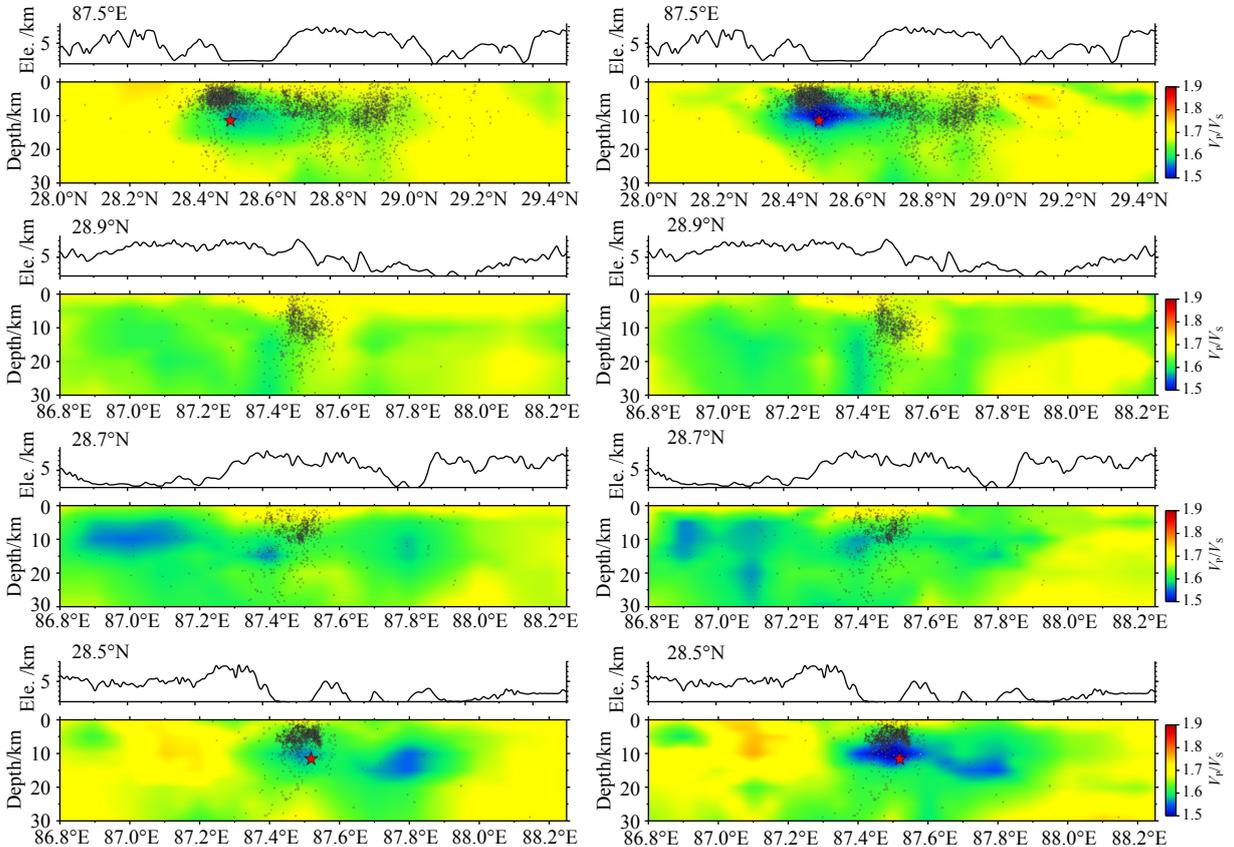


附图5 四个剖面的 V_p/V_s 检测板结果

左列为真实模型, 右列为恢复的模型.

Appendix Fig. 5 Checkerboard test results of four slices of V_p/V_s

Left panel denotes true checkerboard models of four slices, and right panel denotes restored checkerboard models of four slices.



附图6 四个剖面的 V_p/V_s 恢复性测试结果

左列为真实模型, 右列为恢复的模型.

Appendix Fig. 6 Recovery test results of four slices of V_p/V_s

Left panel denotes true checkerboard models of four slices, and right panel denotes restored checkerboard models of four slices.

- transform fault, East Pacific Rise. *Earth and Planetary Science Letters*, 499: 243-255.
- Han S C, Zhang H J, Xin H L, et al. 2022. USTClitho2.0: Updated unified seismic tomography models for continental China lithosphere from joint inversion of body-wave arrival times and surface-wave dispersion data. *Seismological Research Letters*, 93(1): 201-215.
- Hansen P C, O'Leary D P. 1993. The use of the L-curve in the regularization of discrete ill-posed problems. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 14(6): 1487-1503.
- Hardebeck J L, Shearer P M. 2002. A new method for determining first-motion focal mechanisms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6): 2264-2276.
- Hardebeck J L, Shearer P M. 2003. Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(6): 2434-2444.
- Hardebeck J L, Michael A J. 2006. Damped regional-scale stress inversions: methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B11): B11310, doi: 10.1029/2005JB004144.
- He R, Shang X, Yu C, et al. 2014. A unified map of moho depth and V_p/V_s ratio of continental China by receiver function analysis. *Geophysical Journal International*, 199(3): 1910-1918, doi: 10.1093/gji/ggu365.
- Hou Z Q, Liu L J, Zhang H J, et al. 2024. Cenozoic eastward growth of the Tibetan Plateau controlled by tearing of the Indian slab. *Nature Geoscience*, 17(3): 255-263.
- Hu J, Zhao T, Bai C Y, et al. 2021. Three-dimensional P and S wave velocity structure and earthquake relocation of the May 21, 2021 Yangbi $M_{5.6}$ source region. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 64(12): 4488-4509, doi: 10.6038/cjg2021P0456.
- Hua Q, Pei S P, Yang Y H, et al. 2024. The seismogenic mechanism of the Luding $M_{5.6}$ earthquake revealed from preseismic S-wave velocity structure and b -value distribution of the epicenter area. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 67(5): 1767-1780, doi: 10.6038/cjg2023R0700.
- Jiang M, Chen J H, Kuwahara Y, et al. 2018. Spatio-temporal stress field variation in the central longmenshan fault zone after the 2008 Wenchuan earthquake from focal mechanism solutions of small earthquakes. *Seismology and Geology (in Chinese)*, 40(2): 310-322.
- Li H L, Liu C, Tian Y, et al. 2021. Seismic tomography of the Songyuan area, Northeast China: constraints on seismogenic structure. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 64(5): 1597-1607, doi: 10.6038/cjg2021O0288.
- Li J T, Song X D. 2018. Tearing of Indian mantle lithosphere from high-resolution seismic images and its implications for lithosphere coupling in southern Tibet. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(33): 8296-8300.
- Li Q, Li C T, Zhao B, et al. 2024. Estimated seismic source parameters for 2020 Dingri $M_{5.6}$ earthquake in Xizang and study on the stress triggering. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 67(1): 172-188, doi: 10.6038/cjg2022Q0234.
- Liang X F, Chen Y, Tian X B, et al. 2016. 3D imaging of subducting and fragmenting Indian continental lithosphere beneath southern and central Tibet using body-wave finite-frequency tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 443: 162-175.
- Liu M, Tan Y J, Guo H, et al. 2025. Fluids and fault structures underlying the complex foreshock sequence of the 2021 $M_{6.1}$ Yangbi earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 651: 119173, doi: 10.1016/j.epsl.2024.119173.
- Ma M D, Zhao A H. 2021. Double-difference tomography of crustal P- and S-wave velocity structures beneath North China. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 43(1): 13-33, doi: 10.11939/jass.20200062.
- Nie S T, Tian X B, Chen Y, et al. 2025. Shear wave splitting reveals east-west variations in Subducted Indian plate morphology beneath Southern Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 665: 119468, doi: 10.1016/j.epsl.2025.119468.
- Schulte-Pelkum V, Monsalve G, Sheehan A, et al. 2005. Imaging the Indian subcontinent beneath the Himalaya. *Nature*, 435(7046): 1222-1225.
- Shearer P M. 1997. Improving local earthquake locations using the L1 norm and waveform cross correlation: application to the Whittier Narrows, California, aftershock sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B4): 8269-8283.
- Sheng Y, Jin S, Comeau M J, et al. 2023. Relationship between the migration of crustal material, normal faulting, and gneiss domes in the vicinity of the Dinggye region, Central part of the Tethys-Himalaya terrane: Insights from the 3-D electrical structure. *Tectonophysics*, 869(1): 230100, doi: 10.1016/j.tecto.2023.230100.
- Sheng Y, Jin S, Hou Z Q, et al. 2025. Characterizing the migration of deep materials beneath the Xainza-Dinggye rift and the seismogenic environment in the southern Tibetan Plateau: Insights from a 3-D electrical resistivity model. *Science China Earth Sciences*, 68(8): 2591-2614.
- Shi F, Liang M J, Luo Q X, et al. 2025. Seismogenic fault and coseismic surface deformation of the Dingri $M_{5.6}$ earthquake in Xizang, China. *Seismology and Geology (in Chinese)*, 47(1): 1-15.
- Sun Q, Pei S P, Su J R, et al. 2021. Three-dimensional seismic velocity structure across the 17 June 2019 Changning $M_{5.6}$ earthquake, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 64(1): 36-53, doi: 10.6038/cjg2021O0246.
- Taylor M, Yin A. 2009. Active structures of the Himalayan-Tibetan orogen and their relationships to earthquake distribution, contemporary strain field, and Cenozoic volcanism. *Geosphere*, 5(3): 199-214.
- Teng J W, Xiong S B, Yin Z X, et al. 1983. Structure of the crust and upper mantle pattern and velocity distributional characteristics at northern region of the Himalayan mountains. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica) (in Chinese)*, 26(6): 525-540.
- Tenthorey E, Cox S F, Todd H F. 2003. Evolution of strength recovery and permeability during fluid-rock reaction in experimental fault zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 206(1-2): 161-172.
- Tian T T, Wu Z H. 2023. Recent prehistoric major earthquake event of Dingmucuo normal fault in the southern segment of Shenzha-Dingjie rift and its seismic geological significance. *Geological Review (in Chinese)*, 69(S1): 53-55.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6): 1353-

- 1368.
- Wang C Z, Wu J P, Fang L H, et al. 2013. The relationship between wave velocity structure around Yushu earthquake source region and the distribution of aftershocks. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(12): 4072-4083, doi: [10.6038/cjg20131212](https://doi.org/10.6038/cjg20131212).
- Wang Y, Meng L Y, Han Y Y, et al. 2020. Relocation of the 2018 Tonghai $M_S5.0$ earthquakes swarm, Yunnan and velocity imaging of the source region. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 43(2): 331-339.
- Wang Z D, Yin X X, Liang K, et al. 2022. Relocation and geological structure exploration of the 2020 Qiaojia $M5.0$ earthquake. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 37(4): 1500-1511, doi: [10.6038/pg2022FF0046](https://doi.org/10.6038/pg2022FF0046).
- Wei W B, Jin S, Ye G F, et al. 2010. Conductivity structure and rheological property of lithosphere in Southern Tibet inferred from super-broadband magnetotelluric sounding. *Science China Earth Sciences*, 53(2): 189-202.
- Wessel P, Smith W H F, Scharroo R, et al. 2013. Generic mapping tools: improved version released. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 94(45): 409-410.
- Wu J J, Chen W K, Jia Y J, et al. 2025. Rapid seismic intensity and disaster assessment based on dense seismic array: a case of the 2025 Rikaze $M_S6.8$ earthquake in Xizang. *Earth Science* (in Chinese), 50(5): 1770-1781.
- Wu J P, Huang Y, Zhang T Z, et al. 2009. Aftershock distribution of the $M_S8.0$ Wenchuan earthquake and three dimensional P-wave velocity structure in and around source region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(2): 320-328.
- Wu J P, Yang T, Wang W L, et al. 2013. Three dimensional P-wave velocity structure around Xiaojiang fault system and its tectonic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(7): 2257-2267, doi: [10.6038/cjg20130713](https://doi.org/10.6038/cjg20130713).
- Wu J P, Cai Y, Wang W, et al. 2024. Three dimensional velocity model and its tectonic implications at China Seismic Experimental Site, eastern margin of the Tibetan Plateau. *Science China Earth Sciences*, 67(7): 2268-2290.
- Wu Y L, Li H, Zhang F, et al. 2025. Analysis of deep tectonic characteristics and seismogenic environment of the $M_S6.8$ earthquake in Dingri, Xizang, China. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 50(11): 2163-2175, 2186.
- Wu Z B, Zou K, Su J R, et al. 2024. Crustal velocity structure beneath the eastern Tibetan Plateau derived from double-difference travel-time tomography. *Journal of Geophysics* (in Chinese), 67(3): 871-888, doi: [10.6038/cjg2024R0746](https://doi.org/10.6038/cjg2024R0746).
- Xiao X, Cheng S H, Wu J P, et al. 2024. CSR1.0: A China seismological reference model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(9): e2024JB029520, doi: [10.1029/2024JB029520](https://doi.org/10.1029/2024JB029520).
- Xin H L, Zeng X W, Kang M, et al. 2020. Crustal fine velocity structure of the Haiyuan arcuate tectonic zone from double-difference tomography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 63(3): 897-914, doi: [10.6038/cjg2020N0067](https://doi.org/10.6038/cjg2020N0067).
- Yang W, Liu J, Yang Z G, et al. 2025. Rapid report of source characteristics of 2025 $M_S6.8$ Dingri, Xizang earthquake sequence. *Earth Planet. Phys.*, 9(2): 467-473, doi: [10.26464/ep2025028](https://doi.org/10.26464/ep2025028).
- Yang T, Wang S G, Fang L H, et al. 2025. Analysis of earthquake sequence and seismogenic structure of the 2025 $M_S6.8$ Dingri earthquake in Tibetan Plateau. *Earth Science* (in Chinese), 50(5): 1721-1732.
- Yang Z G, Xu T R, Liang J H. 2024. Towards fast focal mechanism inversion of shallow crustal earthquakes in the Chinese mainland. *Earthquake Research Advances*, 4(2): 100273, doi: [10.1016/j.eqrea.2023.100273](https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2023.100273).
- Yao J Y, Yao D D, Chen F, et al. 2025. A preliminary catalog of early aftershocks following the 7 January 2025 $M_S6.8$ Dingri, Xizang Earthquake. *Journal of Earth Science*, 36(2): 856-860, doi: [10.1007/s12583-025-0210-9](https://doi.org/10.1007/s12583-025-0210-9).
- Yin A, Kapp P A, Murphy M A, et al. 1999. Significant late Neogene east-west extension in northern Tibet. *Geology*, 27(9): 787-790.
- Yin A. 2000. Mode of Cenozoic east-west extension in Tibet suggesting a common origin of rifts in Asia during the Indo-Asian collision. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B9): 21745-21759.
- Yu Y Y, Li Z K, Yang Y, et al. 2024. Regional velocity structure and relocation of the 2022 Dongtai earthquake sequence. *Seismology and Geology* (in Chinese), 46(3): 627-644.
- Yue C, Qu C Y, Li X F, et al. 2025. Co- and postseismic stress transfer on different types of faults in Southern Tibet by the 2015 $M_W7.8$ Gorkha earthquake. *Journal of Structural Geology*, 191: 105336, doi: [10.1016/j.jsg.2024.105336](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2024.105336).
- Zhang H J, Thurber C H. 2003. Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(5): 1875-1889.
- Zhang H J, Thurber C H. 2006. Development and applications of double-difference seismic tomography. *Pure and Applied Geophysics*, 163(2): 373-403.
- Zhang H J, Wang F, Myhill R, et al. 2019. Slab morphology and deformation beneath Izu-Bonin. *Nature Communications*, 10(1): 1310, doi: [10.1038/s41467-019-09279-7](https://doi.org/10.1038/s41467-019-09279-7).
- Zhang J J, Guo L, Ding L. 2002. Structural characteristics of middle and southern Xainza-Dinggye Normal Fault System and its relationship to Southern Tibetan detachment system. *Chinese Science Bulletin*, 47(13): 1063-1069.
- Zhang J W, Li H A, Zhang H P, et al. 2020. Research progress in Cenozoic N-S striking rifts in Tibetan Plateau. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 35(8): 848-862.
- Zhang Z, Klemperer S. 2010. Crustal structure of the Tethyan Himalaya, Southern Tibet: new constraints from old wide-angle seismic data. *Geophysical Journal International*, 181: 1247-1260, doi: [10.1111/j.1365-246X.2010.04578.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04578.x).
- Zuo K Z, Zhao C P, Zhang H J. 2020. 3D crustal structure and seismicity characteristics of Changning-Xingwen area in the southwestern Sichuan Basin, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(5): 2154-2167.

附中文参考文献

白玲, 陈治文, 王绍俊. 2025. 2025 年西藏定日 6.8 级地震: 构造背景分

- 析与震源特征探讨. 地球与行星物理论评(中英文), 56(3): 258-263.
- 曹颖, 钱佳威, 黄江培等. 2024. 云南洱源地区地壳三维精细速度结构成像. 地震地质, 46(1): 162-183.
- 陈成锋, 张瑞青, 强正阳等. 2022. 川南泸州地区地震重定位与地壳三维速度结构研究. 地球物理学报, 65(12): 4672-4684, doi: 10.6038/cjg2022P0905.
- 邓山泉, 章文波, 于湘伟等. 2020. 利用区域双差层析成像方法研究川滇南部地壳结构特征. 地球物理学报, 63(10): 3653-3688, doi: 10.6038/cjg2020N0383.
- 胡景, 赵韬, 白超英等. 2021. 2021年5月21日漾濞 $M_S6.4$ 地震震源区三维 P 和 S 波速度结构与地震重定位研究. 地球物理学报, 64(12): 4488-4509, doi: 10.6038/cjg2021P0456.
- 花茜, 裴顺平, 杨宜海等. 2024. 泸定 $M_S6.8$ 地震发震机制研究——来自震前噪声成像和 b 值分布的共同约束. 地球物理学报, 67(5): 1767-1780, doi: 10.6038/cjg2023R0700.
- 江敏, 陈九辉, Kuwahara Y 等. 2018. 利用小震震源机制解研究汶川地震后龙门山断裂带中段应力场时空演化. 地震地质, 40(2): 310-322.
- 李洪丽, 刘财, 田有等. 2021. 松原前郭地震区孕震构造的地震层析成像研究. 地球物理学报, 64(5): 1597-1607, doi: 10.6038/cjg2021O0288.
- 李琦, 李承涛, 赵斌等. 2024. 2020年西藏定日 $M_W5.6$ 地震震源参数估计和应力触发研究. 地球物理学报, 67(1): 172-188, doi: 10.6038/cjg2022Q0234.
- 马梦丹, 赵爱华. 2021. 华北地区地壳 P 波和 S 波速度结构的双差层析成像. 地震学报, 43(1): 13-33, doi: 10.11939/jass.20200062.
- 盛跃, 金胜, 侯增谦等. 2025. 青藏高原南部申扎-定结裂谷深部物质运移特征及孕震环境: 来自三维电阻率模型提供的证据. 中国科学: 地球科学, 55(8): 2703-2727.
- 石峰, 梁明剑, 罗金星等. 2025. 2025年1月7日西藏定日 6.8 级地震发震构造与同震地表破裂特征. 地震地质, 47(1): 1-15.
- 孙权, 裴顺平, 苏金蓉等. 2021. 2019年6月17日四川长宁 $M_S6.0$ 地震震源区三维速度结构. 地球物理学报, 64(1): 36-53, doi: 10.6038/cjg2021O0246.
- 滕吉文, 熊绍柏, 尹周勋等. 1983. 喜马拉雅山北部地区的地壳结构模型和速度分布特征. 地球物理学报, 26(6): 525-540.
- 田婷婷, 吴中海. 2023. 西藏申扎一定结裂谷南段丁木错正断层的最新史前大地震事件及其地震地质意义. 地质论评, 69(S1): 53-55.
- 王长在, 吴建平, 房立华等. 2013. 玉树地震震源区速度结构与余震分布的关系. 地球物理学报, 56(12): 4072-4083, doi: 10.6038/cjg20131212.
- 王月, 孟令媛, 韩颜颜等. 2020. 2018年云南通海 $M_S5.0$ 震群序列重定位及震源区速度结构成像. 地震研究, 43(2): 331-339.
- 王祖东, 尹欣欣, 梁坤等. 2022. 2020年云南巧家 $M5.0$ 地震重定位及地质构造探索. 地球物理学进展, 37(4): 1500-1511, doi: 10.6038/pg2022FF0046.
- 魏文博, 金胜, 叶高峰等. 2009. 藏南岩石圈导电结构与流变性——超宽频带大地电磁测深研究结果. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(11): 1591-1606.
- 吴佳杰, 陈文凯, 贾艺娇等. 2025. 基于密集台阵的地震烈度及灾情快速评估: 以 2025 年西藏日喀则 $M_S6.8$ 地震为例. 地球科学, 50(5): 1770-1781.
- 吴建平, 黄媛, 张天中等. 2009. 汶川 $M_S8.0$ 级地震余震分布及周边区域 P 波三维速度结构研究. 地球物理学报, 52(2): 320-328.
- 吴建平, 杨婷, 王未来等. 2013. 小江断裂带周边地区三维 P 波速度结构及其构造意义. 地球物理学报, 56(7): 2257-2267, doi: 10.6038/cjg20130713.
- 吴建平, 蔡妍, 王薇等. 2024. 青藏高原东缘中国地震科学实验场三维速度模型及其构造意义. 中国科学: 地球科学, 54(7): 2304-2326.
- 吴云龙, 李好, 张帆等. 2025. 西藏定日县 $M_S6.8$ 级地震深部构造特征与孕震环境分析. 武汉大学学报(信息科学版), 50(11): 2163-2175, 2186.
- 武振波, 邹昆, 苏金蓉等. 2024. 利用双差走时成像研究青藏高原东缘地壳速度结构. 地球物理学报, 67(3): 871-888, doi: 10.6038/cjg2024R0746.
- 莘海亮, 曾宪伟, 康敏等. 2020. 海原弧形构造区地壳三维精细速度结构成像. 地球物理学报, 63(3): 897-914, doi: 10.6038/cjg2020N0067.
- 杨婷, 王世广, 房立华等. 2025. 2025年1月7日西藏定日 $M_S6.8$ 地震余震序列特征与发震构造. 地球科学, 50(5): 1721-1732.
- 于悦颖, 李正楷, 杨云等. 2024. 2022年东台地震序列区域速度结构和精确定位. 地震地质, 46(3): 627-644.
- 张进江, 郭磊, 丁林. 2002. 申扎-定结正断层体系中、南段构造特征及其与藏南拆离系的关系. 科学通报, 47(10): 738-743.
- 张佳伟, 李汉敖, 张会平等. 2020. 青藏高原新生代南北走向裂谷研究进展. 地球科学进展, 35(8): 848-862.

(本文编辑 胡素芳)