

胡景, 赵韬, 白超英等. 2021. 2021 年 5 月 21 日漾濞 M_s 6.4 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.

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_s 6.4 source region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 64(12):4488-4509, doi:10.6038/cjg2021P0456.

2021 年 5 月 21 日漾濞 M_s 6.4 地震震源区三维 P 和 S 波速度结构与地震重定位研究

胡景¹, 赵韬², 白超英¹, 郭浩³, 王莹², 李兴旺¹, 莘海亮^{4*}

1 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054

2 陕西省地震局, 西安 710068

3 美国威斯康星大学麦迪逊分校地球科学学院, 威斯康星州 麦迪逊 53706-1692

4 中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002

摘要 2021 年 5 月 21 日漾濞 M_s 6.4 地震震源区位于川滇块体西边界的维西—乔后—巍山断裂西侧, 该地区近些年来发生了多次中强地震, 地震活动较为活跃. 对漾濞地震序列重定位和漾濞震源区及邻区的地壳精细结构研究, 有助于深入理解漾濞地震的孕震环境、发震机理和破裂过程. 本文基于 2008 年 1 月 1 日到 2021 年 6 月 3 日区域固定台站接收到的 36938 条 Pg 和 32111 条 Sg 波到时数据, 采用新发展的三重差地震层析成像算法(tomoTD)开展了漾濞 M_s 6.4 地震震源区三维速度结构成像与地震重定位研究. 结果显示: (1) 余震活动主要集中在维西—乔后—巍山断裂的西侧, 整体呈现沿北北西向的条带状分布, 结合已有走滑型震源机制解特征, 揭示了北西向隐伏断裂是发震断层, 其北西段表现为倾角较陡、结构相对简单的走滑断裂, 南东段由两条分支断裂组成. (2) 主震的发生及地震序列分布与地壳速度结构不均匀性有着密切的关系. 主震及 4 级以上的地震发生在高速边界上或高低速过渡区域, 余震主要发生在低速、高 V_p/V_s 区, 主震上方与下方均显示高 V_p/V_s 异常, 推测在区域构造应力场的作用下, 应力在孕震区的刚性介质中积累, 中下地壳流体(或者部分熔融地壳物质)侵入发震断层区, 弱化了漾濞 6.4 级地震的主震区. 另外, 余震东南侧的低 V_p/V_s 区可能代表介质刚性强, 可能阻碍了余震向南东方向继续扩展. (3) 结合 2013 洱源 5.5 级地震研究结果, 推测维西—乔后—巍山断裂西侧可能存在着较大的北北西向隐伏断层.

关键词 漾濞地震; 地震重定位; 三重差层析成像; 发震机制

doi:10.6038/cjg2021P0456

中图分类号 P315

收稿日期 2021-06-30, 2021-09-18 收修定稿

Three-dimensional P and S wave velocity structure and earthquake relocation of the May 21, 2021 Yangbi M_s 6.4 source region

HU Jing¹, ZHAO Tao², BAI ChaoYing¹, GUO Hao³, WANG Ying²,
LI XingWang¹, XIN HaiLiang^{4*}

1 School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, China

3 Department of Geoscience, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, 53706-1692, USA

4 Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China

Abstract The May 21, 2021 M_s 6.4 Yangbi earthquake source area is located west side of Weixi-Qiaohou-Weishan fault, belonging to Chuandian block west boundary. In recent years, there

基金项目 中国地震局地震科技星火计划项目(XH21050), 国家自然科学基金项目(41774070、41704058)和陕西省自然科学基金项目(2021JQ-245)联合资助.

第一作者简介 胡景,男,1992年生,博士,讲师,主要从事地震层析成像研究. E-mail:hujing@chd.edu.cn

*** 通讯作者** 莘海亮,男,1982年生,博士,高级工程师,主要从事地壳深部结构探测研究. E-mail:hliia_0223@gcc.ac.cn

have been some moderate and strong earthquakes in this area, and the seismic activity is relatively active. Studying on relocation of the Yangbi earthquake sequence and imaging fine velocity structure of the Yangbi $M_s6.4$ earthquake source region and its adjacent area is important to understand the characterization of the seismogenic zone, the mechanism and rupture process of the Yangbi $M_s6.4$ earthquake. In this paper, we collected 36938 Pg and 32111 Sg arrival times received by permanent stations from January 1, 2008 to June 3, 2021 and conducted a study of 3-D seismic velocity structure of source region and relocation of the Yangbi earthquake sequence with a new triple-difference tomography method (tomoTD). The result shows that: (1) The aftershock activity mainly occurred in the west side of Weixi-Qiaohou-Weishan fault and the distribution of the aftershocks exhibit a strip along the NNW direction. Combining with focal mechanism solutions of strike-slip faults suggests that the NNW direction potential fault is the main seismogenic structure. The north-western section of the NNW direction fault is a strike-slip fault with a steep dip and a relatively single structure, and the south-eastern section is composed of two branch faults. (2) The occurrence of mainshock and the distribution of the Yangbi earthquake sequence are coincided well with the crustal structure of velocity heterogeneity. The mainshock and aftershocks with a magnitude larger than 4 seem to occur at the transition areas between high and low velocity anomalies or at the boundary of the high velocity zone and the aftershocks mainly occurred in the low velocity and high V_P/V_S zones and some high V_P/V_S anomalies are below and above the mainshock, which suggests that regional stress field is accumulated in the rigid medium of the seismogenic zones, and fluids from middle-lower crust (or the partial melting of crust materials) intrude into the seismogenic zones, which weakens Yangbi $M_s6.4$ mainshock zone. In addition, the low V_P/V_S zone, located southeastern side of aftershocks, may have strong rigidity and prevent aftershocks spreading towards the southeast. (3) Combined with the study result of 2013 $M_s5.5$ Eryuan, it is speculated that there may be a large NNW potential fault on the west side of Weixi-Qiaohou-Weishan fault.

Keywords Yangbi earthquake; Earthquake relocation; Triple-difference seismic tomography; Seismogenic mechanism

0 引言

2021年5月21日云南大理州漾濞县(25.67°N, 99.87°E)发生了6.4级地震,震源深度8 km。此次强震发生前,震中附近前震活动频繁,最大前震震级5.6级;地震发生后,又相继发生了5.0、5.2级两次5级余震,以及多次3、4级余震,地震序列丰富(<http://www.csi.ac.cn/>)。主震发生后多家科研机构及科研人员迅速给出了此次地震的震源机制、余震精确定位结果、震源破裂过程以及地表形变观测等结果(<http://www.cea-igp.ac.cn/kydt/278248.html>; <https://www.eq-igl.ac.cn/zhxw/info/2021/33882.html>; Yang et al., 2021; 叶涛等, 2021)。已有结果初步显示此次地震发生于维西—乔后—巍山断裂西南侧(图1),震源机制解为右旋走滑型,余震序

列呈北西向分布;主震及余震序列均发生在高低阻电性过渡区附近且靠近高阻一侧;发震断层向西南倾斜,地表没有明显的破裂,但存在一条NW-SE走向的地表裂缝带,推测发震构造是维西—乔后—巍山断裂西南侧的北西向右旋走滑型隐伏断裂,存在复杂的多分支断层破裂。

震源区地壳速度结构可以反映关于地震深部孕育环境及发震机理等重要信息,同时经过精定位后的序列空间展布则可以提供发震断层的深部特征及震源破裂过程的基本信息(王未来等, 2014; 易桂喜等, 2017)。为了更好地开展漾濞地震深部孕育环境研究,本文采用三重差地震层析成像方法(Guo and Zhang, 2017; Guo et al., 2021),利用区域地震台网多年震前与震后观测的地震初至数据,联合反演获得了漾濞地震震源区高分辨的三维速度结构和漾濞余震序列重新定位结果,讨论分析了此次地震的

发震构造特征,为深入研究该区强震发生机理提供参考.

1 区域地质概况

漾濞 6.4 级地震发生在维西—乔后—巍山断裂(F1)以及红河断裂带(F3)连线的西侧(图 1). 维西—乔后—巍山断裂、红河断裂带属于川滇菱形块体的西边界. 川滇菱形块体是青藏高原向东挤出的产物,是青藏高原东缘侧最具代表性的活动块体(邓启东等, 2002). 川滇菱形块体总体呈北西走向,东侧以小江断裂、鲜水河断裂、安宁断裂、则木断裂为界;西侧主要以红河断裂、维西—乔后—巍山断裂、金沙江断裂带为界(常祖峰等, 2016). 川滇菱形块体东边地震频繁、构造简单,研究程度较高;而西边结构样式复杂,除红河断裂外,西边界构造研究程度相对较低(常祖峰等, 2016;徐晓雪等, 2020).

2 方法和数据

2.1 方法

双差地震层析成像被广泛应用于不同尺度的结构成像(Zhang and Thurber, 2003, 2006; Guo et al., 2018; Zhang et al., 2019; Zuo et al., 2020; 邓山泉等, 2020; 莘海亮等, 2020; 孙权等, 2021). 该方法通过联合使用地震到台站的初至波绝对走时数据和地震对到同一台站的初至波走时差数据,可以同时反演得到高精度的地震位置和三维速度结构. 在双差层析成像算法的基础上,Guo 等(2021)进一步发展了最新的三重差层析成像算法和程序(tomoTD). tomoTD 可以同时使用绝对到站数据以及多种类型的到站差数据,包括事件对、台站对、和双对到站差数据. 这里,我们使用了绝对到站数据、事件对到站差、台站对到站差数据进行漾濞地震震源区的地震定位和速度成像研究. 相比传统的双差成像算法,tomoTD 中的台站对到站差数据可以得到更准确的地震绝对位置以及源区外的速度结构. 下面简单介绍该方法的原理.

事件 i 到台站 k 的观测到站和预测到站的残差可用震源位置、发震时刻、速度结构以及台站校正项的扰动量来线性表示:

$$r_k^i = T_{\text{obs}}^i - T_{\text{cal}}^i = \sum_{m=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_m^i} \Delta x_m^i + \int_{i^{\text{th}} \text{ source}}^{k^{\text{th}} \text{ receiver}} \delta u dl + \Delta \tau^i + s_k, \quad (1)$$

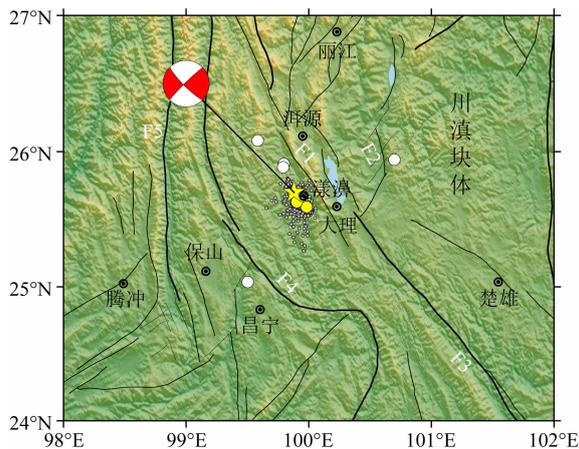


图 1 研究区域构造背景及中强震震中分布. 黄色五角星为漾濞 6.4 级主震,沙滩球表示主震的震源机制(王莹等, 2021),白色圆圈为自 2008 年以来发生的 5 级以上的地震的震中,黄色圆圈为此次漾濞地震序列 5 级以上的地震,灰色圆圈为漾濞 6.4 级地震序列震中分布. 黑色线为断层迹, F1: 维西—乔后—巍山断裂, F2: 程海断裂, F3: 红河断裂, F4: 澜沧江断裂, F5: 怒江断裂. 黑色圆圈表示地名.

Fig. 1 Tectonic background of the study region and epicenter distribution of moderate and strong earthquakes

The yellow star denotes the epicenter of the Yangbi mainshock with a magnitude of 6.4. The beach ball represents the mainshock focal mechanism (Wang et al., 2021). White circles are earthquakes (magnitude >5) occurred since 2008. Yellow circles are earthquakes of the Yangbi earthquake sequence with magnitude larger than 5. Gray circles are epicenter distributions of the Yangbi earthquake sequence. Black lines are fault traces. F1: Weixi-Qiaohou-Weishan fault; F2: Chenghai fault; F3: Red-river fault; F4: Lancang-river fault; F5: Nu-river fault. Black circles denote place names.

其中 r_k^i 为观测到站与预测到站的残差数据(称为绝对走时差数据); T_{obs}^i 和 T_{cal}^i 分别为观测到站和预测到站; T_k^i 为地震到台站的走时; x_m^i 和 Δx_m^i 分别为地震坐标及相应的扰动量; $\Delta \tau^i$ 和 δu 分别为发震时刻和慢度(速度的倒数)的扰动量; dl 为射线路径离散化后的一个单元; s_k 为台站 k 的台站校正量,其主要为了吸收台站下方近地表模型不准确带来的影响. 式(1)使用伪弯曲方法进行射线追踪(Um and Thurber, 1987),获得理论走时和射线路径. 对于不同的事件 j 到台站 k 的绝对走时差数据 r_k^j 和事件 i 到不同台站 l 的绝对走时差数据 r_l^i 分别表示如下:

$$r_k^j = \sum_{m=1}^3 \frac{\partial T_k^j}{\partial x_m^j} \Delta x_m^j + \int_{j^{\text{th}} \text{ source}}^{k^{\text{th}} \text{ receiver}} \delta u dl + \Delta \tau^j + s_k, \quad (2)$$

和

$$r_l^i = \sum_{m=1}^3 \frac{\partial T_l^i}{\partial x_m^i} \Delta x_m^i + \int_{i^{\text{th}} \text{ source}}^{l^{\text{th}} \text{ receiver}} \delta u dl + \Delta \tau^i + s_l, \quad (3)$$

将式(2)和式(3)分别减去式(1)可分别得到

$$d_k^{j,i} = r_k^j - r_k^i = \sum_{m=1}^3 \left(\frac{\partial T_k^j}{\partial x_m^j} \Delta x_m^j - \frac{\partial T_k^i}{\partial x_m^i} \Delta x_m^i \right) + \left(\int_{j^{\text{th}}_{\text{source}}}^{k^{\text{th}}_{\text{receiver}}} \delta u \, dl - \int_{i^{\text{th}}_{\text{source}}}^{k^{\text{th}}_{\text{receiver}}} \delta u \, dl \right) + (\Delta \tau^j - \Delta \tau^i), \quad (4)$$

和

$$d_{l,k}^i = r_l^i - r_k^i = \sum_{m=1}^3 \left(\frac{\partial T_l^i}{\partial x_m^i} - \frac{\partial T_k^i}{\partial x_m^i} \right) \Delta x_m^i + \left(\int_{i^{\text{th}}_{\text{source}}}^{l^{\text{th}}_{\text{receiver}}} \delta u \, dl - \int_{i^{\text{th}}_{\text{source}}}^{k^{\text{th}}_{\text{receiver}}} \delta u \, dl \right) + (s_l - s_k), \quad (5)$$

其中 $d_k^{j,i}$ 和 $d_{l,k}^i$ 分别称为地震对双差数据 (Waldhauser and Ellsworth, 2000; Zhang and Thurber, 2003) 和台站对双差数据 (Guo and Zhang, 2017; Zhang et al., 2017; Guo et al., 2021). 从上述的公式可看出地震对双差数据和台站对双差数据能够分别消除台站校正项以及发震时刻的影响. 对于绝对到时数据, 可构建绝对到时差数据如式(1)以及地震对双差数据如式(4)和台站对双差数据如式(5). 因此, 联合三种数据, 并对不同质量、不同种类的数据进行加权, 进而构建成像系统可以求解地震位置和速度模型. 另外, 由于噪声以及射线覆盖缺少的情况下使得反演系统较为病态, 为保证反演系统稳定, 在反演系统中加入阻尼因子和模型光滑因子, 最后采用 LSQR 算法 (Paige and Saunders, 1982) 迭代求解发震时刻、震源位置以及慢度参数.

地震对双差数据对地震相对位置 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) 以及震源区的速度模型 (Zhang and Thurber, 2003) 比较敏感, 而台站对双差数据可以更好地得到地震的绝对位置以及源区外的速度结构 (Guo and Zhang, 2017; Guo et al., 2021). 因此, 联合使用这两种走时差数据可以同时获得高精度的地震绝对位置和地震之间的相对位置以及高分辨率的震源区和震源区外的速度结构 (Guo et al., 2021).

2.2 数据

本文从中国地震台网中心收集到地理范围 (97°E—103°E, 23°N—28°N) 以及 2008 年 1 月 1 日到 2021 年 6 月 3 日的震相目录. 根据漾濞 6.4 级地震序列 (2021-05-18—2021-06-03) 的地理位置, 选出离地震序列震中中心距离范围为 200 km 以内的地震 (图 2a). 最终, 获得了共 32 个地震台站记录到的 6286 个地震的初至数据. 图 2b 显示了区域台网初始定位的深度值分布 (红色柱状图和蓝色柱状图分别表示全部地震和漾濞地震序列), 大部分地震深度在 15 km 以上, 且集中于 5~10 km. 高质量的地震波到时数据对走时成像是非常重要的, 本文采用如下策略挑选地震波到时数据: (1) 震中距在 10~130 km 范围内, 避免将小震中距的非 Pg 和 Sg 震相以及大震中

距的 Pn 和 Sn 波纳入成像数据之中 (Pei et al., 2019; 刘毅, 2020), 这是因为伪弯曲算法 (Um and Thurber, 1987) 不适用于近地表复杂结构介质中的射线追踪, 同时追踪沿莫霍间断面传播的 Pn 以及 Sn 波射线会产生较大的误差 (Zhao et al., 1992); (2) Pg 和 Sg 波初至拾取误差分别小于 0.2 s 与 0.5 s; (3) 记录台站数不少于 3 个; (4) 剔除走时偏离曲线 ± 1.5 s 的数据. 其中时距曲线是由初至走时和震中距线性回归得到, 其斜率一般对应着地壳的平均慢度. 如图 2c 所示, 走时与震中距成线性关系, 可看到到时数据整体质量较高. 经过上述条件筛选后, 本文获得了 36938 条 Pg 波到时和 32111 条 Sg 波到时. 然后基于 Pg 波绝对到时数据和 Sg 波绝对到时数据构建地震对数据和台站对数据: 对于地震对数据, 要求地震对最大间距不超过 20 km, 共获得了 343075 条地震对 Pg 波到时差数据和 288797 条地震对 Sg 波到时差数据, 其中地震对最小间距为 4.1 km. 对于台站对数据, 要求最小台台间距不小于 2 km, 最大台间距为 200 km, 最终获得 108131 条台站对 Pg 波到时差数据和 80229 条台站对 Sg 波到时差数据.

3 成像细节

3.1 模型参数化

本文成像区域如图 2a 所示, 成像原点的地理坐标为 (99.931°E, 25.625°N), X 轴相对于正北方向顺时针旋转 45°, 平行于漾濞初始地震序列, 大致与该地区的主要断裂平行. X 轴方向网格点坐标为 -500, -150, -100, -50, -30, -20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100, 150 和 500 km; Y 方向的网格点坐标与 X 方向相同; 深度方向的网格点坐标为 -4, 0, 4, 7, 10, 13, 16, 20, 25, 30, 50 和 70 km. 在 XY 平面上, 漾濞地震序列区域的横向网格点间距为 5 km.

3.2 初始模型及反演参数的选取

好的初始模型对于成像结果非常重要. Liu 等 (2020) 利用多种数据 (体波走时和面波频散数据) 对川滇地区进行联合成像, 获得了川滇地区地壳和上

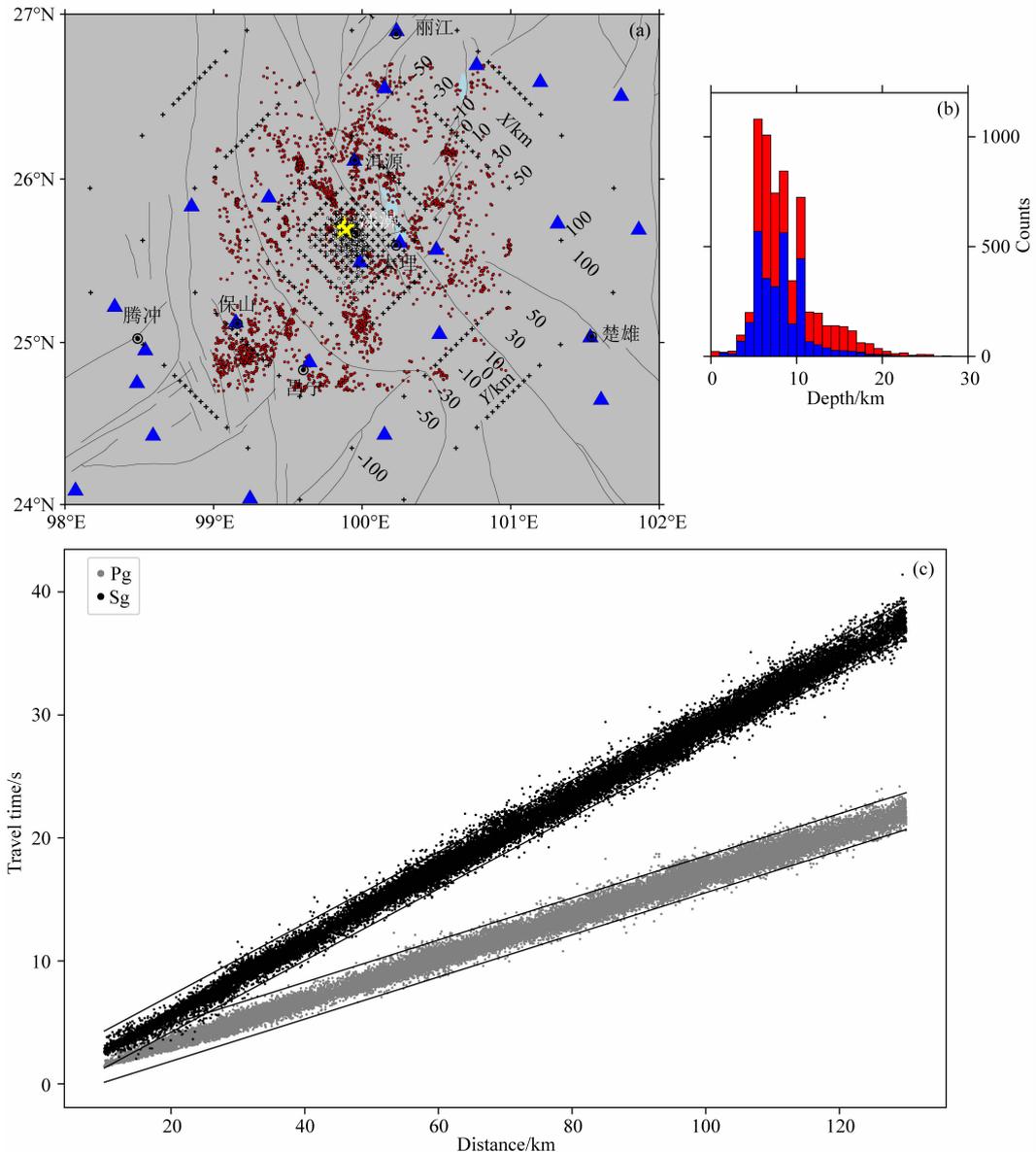


图 2 研究区域地震、台站以及成像网格点分布(a)、地震深度分布(b)与 Pg 波和 Sg 波走时与震中距的关系(c)图
图 a 中红色圆圈为 2008 年 1 月 1 日到 2021 年 6 月 3 日期间的历史地震; 蓝色三角形表示台站; 黑色十字架表示水平方向的成像网格点分布; X 轴绕正北方向顺时针旋转 45° , 与研究区域的漾濞地震序列以及主要断裂平行(维西—乔后—巍山断裂). 图 b 中红色直方图和蓝色直方图分别所有地震和漾濞地震序列的深度分布. 图 c 中横坐标和纵坐标分别是震中距和 Pg(或 Sg)走时. 黑色线包围的区域以外的散点被作为异常点剔除.

Fig. 2 (a) Distributions of earthquakes, stations and tomographic grid nodes in the study area, (b) statistical histogram of focal depths for earthquakes, and (c) travel-time as a function of epicentral distance for Pg wave and Sg wave
(a) Red circles are historical earthquakes during January 1, 2008 to June 3, 2021. Blue triangles denote stations. The black crosses represent the distribution of imaging grid nodes on the horizontal plane. X axis is rotated by 45 degree clockwise from North to be parallel to the Yangbi earthquake sequence and the main fault (Weixi-Qiaohou-Weishan fault) in the study area. (b) Red and blue histograms represent distributions of focal depths for all earthquakes and the Yangbi earthquake sequence, respectively. (c) X and Y axes denote epicentral distance and Pg (or Sg) travel-time, respectively. Scatters outside the region outlined by black lines are removed as outliers.

地幔的 P 波和 S 波三维速度模型 SWChinaCVM-1.0 (<https://github.com/liuyingustc/SWChinaCVM>), 其横向分辨率达到 0.5° , 垂向分辨率达到 10 km. 为

此本文根据成像的地理范围以及网格点分布从 SWChinaCVM-1.0 中提取出三维 V_P 和 V_S 模型作为本文成像的初始 V_P 和 V_S 模型, 另外, 震相报告

提供的地震发震时刻以及震源位置分别为本次成像中地震的初始发震时刻以及初始位置。

为保证反演系统的稳定性以及模型的泛化能力,本文采用 L-curve 方法(Hansen and O'Leary, 1993)获得实际反演中的最佳阻尼因子以及模型光滑因子,并考虑到条件数范围为 150~200(Share et al., 2019)。如图 3(a,b)所示,即对于不同的阻尼因子,进行一次迭代,同时反演地震参数(发震时刻和位置)和慢度模型,获得模型范数和加权残差范数的关系曲线。同样地,对于不同的光滑因子,也采用上述策略,并获得慢度模型范数与加权残差范数的关

系曲线,最终选择曲线拐点处所对应的最佳阻尼因子以及最佳平滑因子。

本文采用分级加权迭代的策略(Guo et al., 2021)进行反演,在前期迭代中,给予绝对走时数据较大的权重以获得背景速度模型,其中速度和震源参数同时反演以及震源参数单独反演交替进行。在后期迭代中,增大地震对数据以及台站对数据的权重,以获得更高精度的地震绝对位置和相对位置以及更高分辨率的速度模型结构。最终加权均方根走时残差从初始的 1.64 s 收敛到 0.21 s,加权均方根残差下降约 86%。图 3(c,d)显示了 Pg 波和 Sg 波

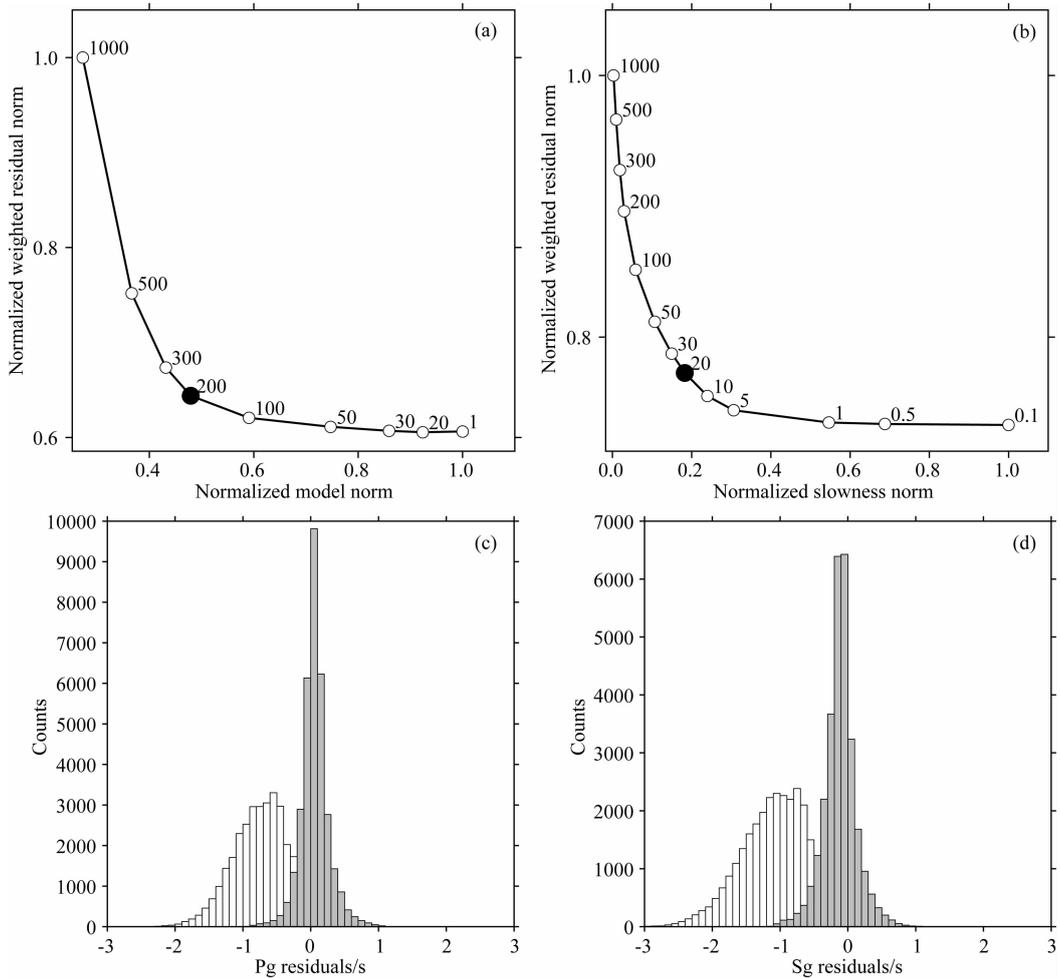


图 3 最佳阻尼(a)和光滑因子(b)的选取与反演前后的 Pg 波(c)和 Sg 波(d)绝对走时残差对比

图(a)中黑色圆圈为实际反演中所用的最优阻尼参数 200,横坐标表示归一化的模型二范数。图(b)中黑色圆圈表示实际反演中使用的最佳光滑因子 20,横坐标表示归一化的慢度模型二范数。图(c)和(d)中的白色和灰色柱状图分别表示反演 Pg 和 Sg 波前后的绝对走时残差分布。

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

(a) The black circle represents the optimal damping factor of 200 used during the real inversion. X axis represents normalized L_2 -norm of the model. (b) The black circle represents the optimal smoothing factor of 20 used during the real inversion. X axis represents normalized L_2 -norm of the slowness model. White histograms (before inversion) and gray histograms (after inversion) represent distribution of absolute travel-time residuals for Pg wave (c) and Sg wave (d), respectively.

反演前后的绝对走时残差的分布. 在反演之前, 残差分布在 $-3\sim 1$ s 之间, 表明初始模型与真实速度之间存在整体偏差; 反演之后, Pg 和 Sg 波走时残差分布在 -1.1 s 到 1.0 s 范围内. Pg 波绝对走时残差的均方根值反演前后分别为 0.79 s 和 0.21 s, 下降约 73% ; Sg 波的绝对走时残差的均方根值反演前后分别为 1.12 s 和 0.26 s, 下降约 76% . 可以看出, 结果模型相比初始模型能更好地拟合观测到时.

3.3 模型分辨率测试

对于速度反演结果的评价, 本文采用检测板恢复性测试(Humphreys and Clayton, 1988)进行模型分辨率分析, 其做法如下: 首先对于反演网格点, 在初始模型的基础上加入 $\pm 5\%$ 的速度扰动构建棋盘模型, 并利用实际的观测系统合成理论的 Pg 和 Sg 绝对走时数据, 然后基于合成的绝对走时数据并根据实际的地震对以及台站对关系构建理论的地震对和台站对双差数据; 最后, 采用与实际反演大致相当的参数以及相同的初始模型进行反演, 得到恢复的棋盘.

由于地震分布基本在 20 km 以上, 深部(>20 km)缺乏射线覆盖, 几乎没有分辨率. 因此, 图 4 展示了 $0\sim 16$ km 深度范围内 V_P 和 V_S 在不同深度切片上的棋盘恢复结果. 整体来看, V_P 和 V_S 的棋盘在 $4\sim 16$ km 具有较好的分辨率, 其中 7 km、 10 km 和 13 km 切片的棋盘恢复结果相对较好, V_P 的棋盘恢复结果整体要好于 V_S 的棋盘恢复结果; 浅层(<4 km)由于缺乏交叉的地震射线, 因此分辨较低. 图 5 显示了穿过漾濞地震序列的不同剖面的棋盘恢复结果, 可以看出漾濞震源区具有较高的分辨率, 横向分辨率达到 5 km. 网格点上的 DWS(Derivative Weight Sum)值代表着射线在该网格点的采样密度(Thurber and Eberhart-Phillips, 1999). 当 $DWS > 100$ 时, 得到的结果具有较高的可靠性(Thurber et al., 2007; Scarfi et al., 2007). 附图 1 和附图 2 分别显示了 Pg 波和 Sg 波的 DWS 值在不同深度的分布. 整体上看漾濞震区 $0\sim 16$ km 深度范围的 DWS 值大于 150 , 与漾濞震区棋盘恢复度较好区域相对应.

为了定量地刻画棋盘恢复程度, 本文采用 Zelt(1998)提出的策略, 即对于第 i 个网格点上的恢复

$$\text{度可定义为 } R_i = \frac{\sum_{j=1}^M (Dnt_j + Dnr_j)^2}{2 \sum_{j=1}^M (Dnt_j^2 + Dnr_j^2)}, \text{ 其中 } Dnt_j \text{ 和 } Dnr_j \text{ 分别是位于网格点 } i \text{ 附近的网格点 } j \text{ 上的真实}$$

的速度异常和恢复的速度异常, M 为网格点 i 的邻近网格点的个数. Zelt(1998)选取位于水平面上以网格点 i 为中心的指定半径的圆内的网格点用于计算网格点 i 的恢复度值. Guo 等(2021)将该方法延伸到三维, 选取网格点 i 附近沿着正负 X 、 Y 、和 Z 的 6 个方向的相邻网格点. 本文选取距离 i 网格点 5 km 范围内的网格点来计算该网格点的恢复度, 并将恢复度值为 0.85 的等值线投影到检测板恢复测试结果的剖面上(图 4 和图 5), 整体上看余震区均处于恢复度值大于 0.85 的区域.

3.4 重定位误差分析

由于 tomoTD 采用了 LSQR 迭代类算法(不是奇异值分解算法)求解成像方程组, 因此是无法直接给出地震重定位的误差估计, 其结果尽管采用了双差定位程序(HypoDD)的重定位输出格式, 但其输出的重定位误差是没有参考意义的(Waldhauser and Ellsworth, 2000). 为了评估地震重定位误差, 本文采用自助法(Efron and Gong, 1983; Efron and Tibshirani, 1991; 王乐洋和李志强, 2021)进行分析. 本文随机挑选了全部绝对走时数据 90% 的 Pg 波和 Sg 波作为观测数据, 根据该观测数据产生相应地震对数据和台站对数据, 同时采用与先前相同的反演策略重新进行定位和成像. 重复进行 120 次, 最后统计重定位后的地震在 X 、 Y 和深度方向 1 倍的标准偏差, 并将其作为地震重定位在三个方向的误差. 如图 6 所示, 整体上看在 X 和 Y 方向上的定位误差较深度方向上的误差小. 漾濞地震序列重定位误差(图 6a 和 b 的灰色方柱)在水平方向较深度方向小, 其中约 61% 的地震重定位误差(三个方向误差的二范数)小于 2 km.

4 结果

本文利用三重差层析成像算法(Guo et al., 2021)获得了研究区域 5704 个(其中 2795 个地震为漾濞地震序列)地震精定位结果(附图 3)和漾濞震源区高分辨率的三维 V_P 、 V_S 与 V_P/V_S 结构, 棋盘测试结果显示在漾濞区域横向分辨率高达 5 km(图 4 和图 5). 在成像过程中, 部分地震会被舍去, 主要原因包括由于部分地震的到时数据台站覆盖不理想导致的定位误差较大, 被定位到了地表以上, 即空震; 以及反演迭代过程中依据标准偏差的倍数作为截断值, 要剔除残差大于截断值的台站数据(Zhang and Thurber, 2003).

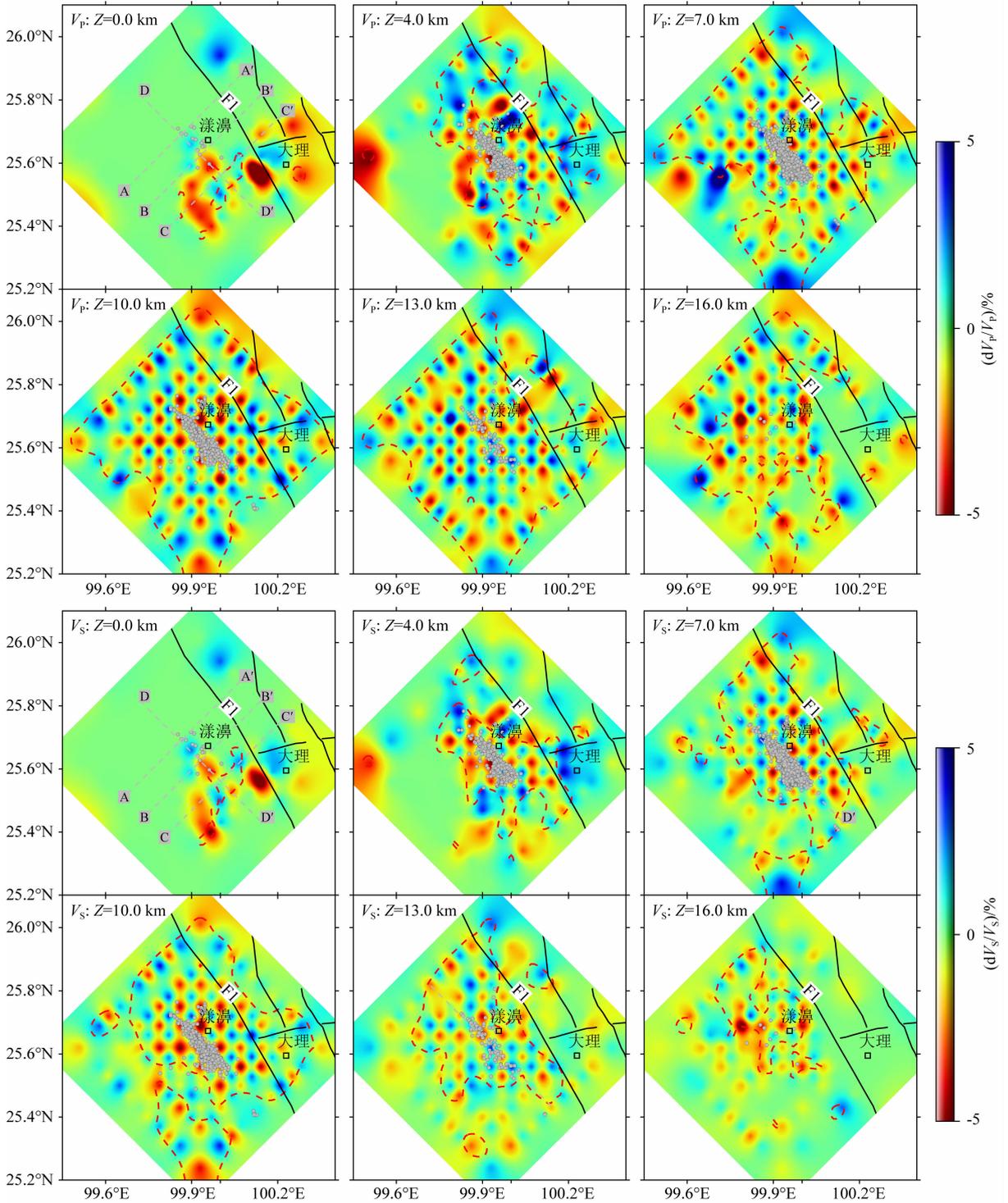


图 4 检测板实验在不同深度的 V_p 和 V_s 恢复结果

黑色线为断层迹；灰色点为距离剖面 2 km 范围内的漾濞地震序列；红色虚线表示恢复度值为 0.85 的等值线。

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

Black lines mark fault traces. Gray circles represent earthquakes of the Yangbi earthquake sequence within ± 2 km of depth slices.

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

4.1 重定位后的漾濞地震序列分布特征

整体上重定位后的所有地震相比初始定位在深度上更为集中(附图 3). 重定位后的漾濞地震序列

地震数目为 2795 个, 占地震总数的 49%. 对于所有地震, 在 X、Y 和深度方向上误差的中位数分别为 0.25 km、0.27 km 和 1.1 km (图 6 白色方柱). 漾

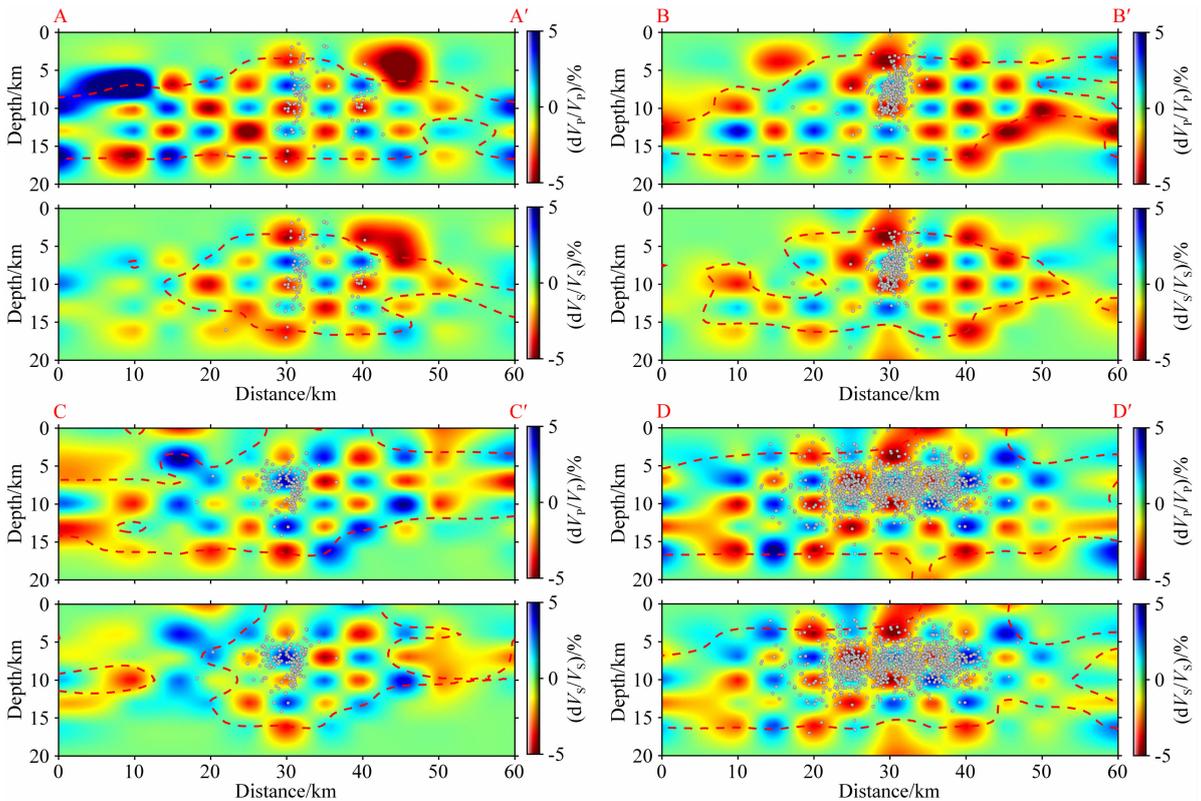


图 5 检测板实验在不同剖面的 V_p 和 V_s 恢复结果

剖面位置见图 4 $Z=0.0$ km 切片. 图中符号与图 4 相同.

Fig. 5 V_p and V_s recovered results of the checkerboard test at various depths

Symbols are the same as those of Fig. 4. Profile locations are shown on the slices of $Z=0.0$ km in Fig. 4.

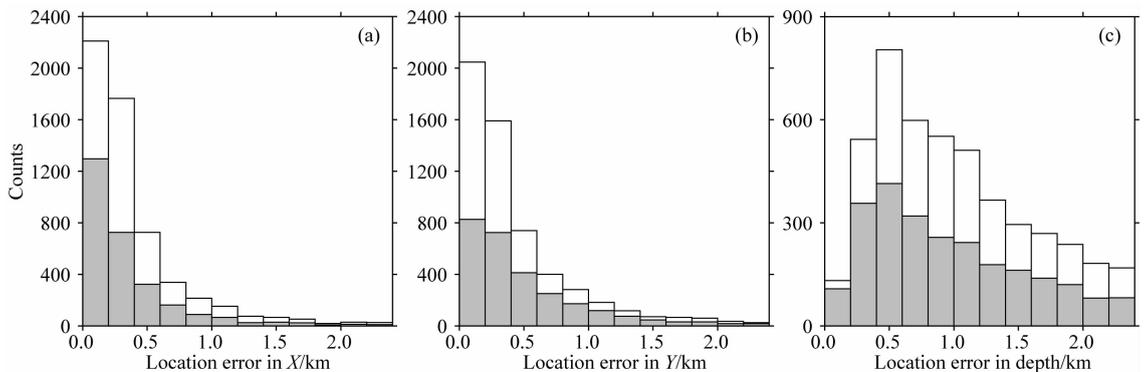


图 6 重定位后的地震在 X(a)、Y(b)和深度(c)方向的误差直方图

白色和灰色柱状图分别表示所有地震和漾濞地震序列.

Fig. 6 Error histograms of relocated earthquakes for X (a), Y (b) and depth direction (c)

White and gray histograms represent all earthquakes and the Yangbi earthquake sequence, respectively.

漾地震序列(图 6 的灰色方柱)在 X、Y 和深度方向上误差的中位数分别为 0.21 km、0.34 km 和 0.95 km. 重定位后的主震震中位置为北纬 25.682° , 东经 99.874° , 震源深度为 9.5 km, 其在 X、Y 以及深度方向的定位误差中位数分别为 0.19 km、0.24 km 和 1.29 km. 主震重定位后的深度相比中国台网中心给出的初始定位深度 8 km 以及龙锋等(2021)重新定位的主震震源深度 7.8 km 略深, 这可能是由

于定位所用的不同初始速度模型所导致.

重定位误差小于 2 km 的漾濞地震序列分布如图 7 所示. 重定位后漾濞地震序列震中主要位于维西—乔后—巍山断裂(F1)西侧, 呈北西北向条带状分布, 长度约 25~30 km, 宽度约 3~8 km (图 7a); 震源深度的分布范围为 0~20 km, 优势分布范围为 3~13 km. 从不同位置的三条平行垂直切片(AA'-CC')地震分布可以看出, 余震分布由北西北向东南方

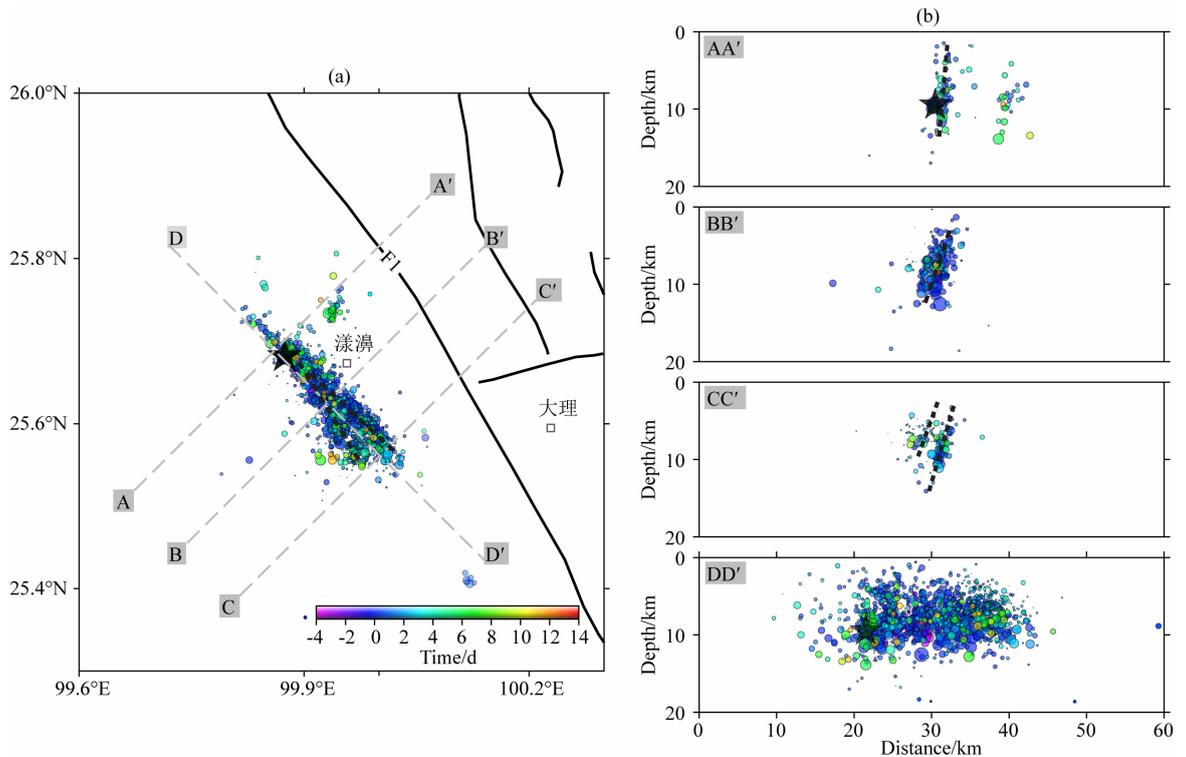


图 7 重定位误差 2 km 以内的漾濞地震序列的分布图

(a) 重定位的地震震中(彩色圆圈)分布. 黑色五角星表示主震, 灰色虚线表示剖面(AA'、BB'、CC'和 DD')位置, 与图 4 $Z=0.0$ km 切片中的位置相同; (b) 距离剖面 2 km 以内的地震分布. 彩色圆圈大小正比于地震震级大小. 黑色虚线为勾勒的断层. 不同颜色表示主震发生前与后的时间.

Fig. 7 Distribution of earthquakes with relocation error within 2 km

(a) Epicenter distribution of relocated earthquakes (colored circles). Black star marks the mainshock and gray dashed lines are positions of profiles (AA', BB', CC' and DD'). Profile locations are the same as shown in $Z=0.0$ km slice of Fig. 4; (b) Distributions of earthquakes within 2 km of profiles. The magnitude scaled by circles. The size of colored circle is proportional to the magnitude of earthquake. Black dashed lines outline faults. Different colors denote the number of days before and after main shock.

向逐渐散开,同时倾角由陡略微变缓,表明了发震断层北西段表现为倾角较陡、结构相对单一的走滑断裂,南东段由两条分支断裂组成.另外,从平行穿过余震序列的 DD'垂直切片可看出随着时间变化余震大多发生在主震的南东侧,而主震的北西侧余震较少,反映了主震呈现单侧破裂的行为.

4.2 漾濞地区水平切片波速结构

图 8 和图 9 分别展示了 0~16 km 不同深度水平切片的 V_P 和 V_S 分布.漾濞地区的地壳厚度在 30~45 km(Zhang and Gao, 2019),由于地震大部分发生在深度 15 km 以上,本研究的成像结果在中下地壳(深度 > 16 km)分辨率较弱,因此主要反映了上地壳 V_P 和 V_S 的分布.

漾濞地区附近的 V_P 和 V_S 在 0~10 km 深度范围呈现为高速异常,而在深度 13~16 km 范围内呈现出低速异常(图 8 和图 9).整体上,发震断层的北段 0~10 km 深度范围, V_P 相比发震断层的南段要

高.在 10 km 深处,主震区附近的 V_P 结构呈现出高低速相间的特征.在 13 km 深处,发震断层的西侧 V_P 值整体上要高于东侧的 V_P .如图 8 和图 9 所示,在浅层(深度 ≤ 4 km),大理附近的区域表现为低 V_P 和低 V_S 异常,这可能反映了大理盆地相对较厚的沉积,而漾濞区域则表现为高 V_P 和高 V_S 异常,可能与该区域的地表岩性有关;不同深度处的 V_P 和 V_S 在横向上表现出较强的不均匀性,推测与该区域的复杂地质相对应.本文在漾濞以及大理地区速度特征相比前人的区域尺度成像结果(Huang et al., 2002; 邓山泉, 2020; Liu et al., 2020; 刘毅, 2020)更加精细.

4.3 垂直切片速度与波速比结构

为了更好地显示震区的速度结构,我们给出了三条近乎垂直于余震区的速度与波速比结构剖面(AA', BB'和 CC')以及一条沿着余震分布且穿过主震的 DD'剖面(图 10),并将距离剖面 2 km 以内定位误差小于 2 km 的地震投影到相应的剖面上.由

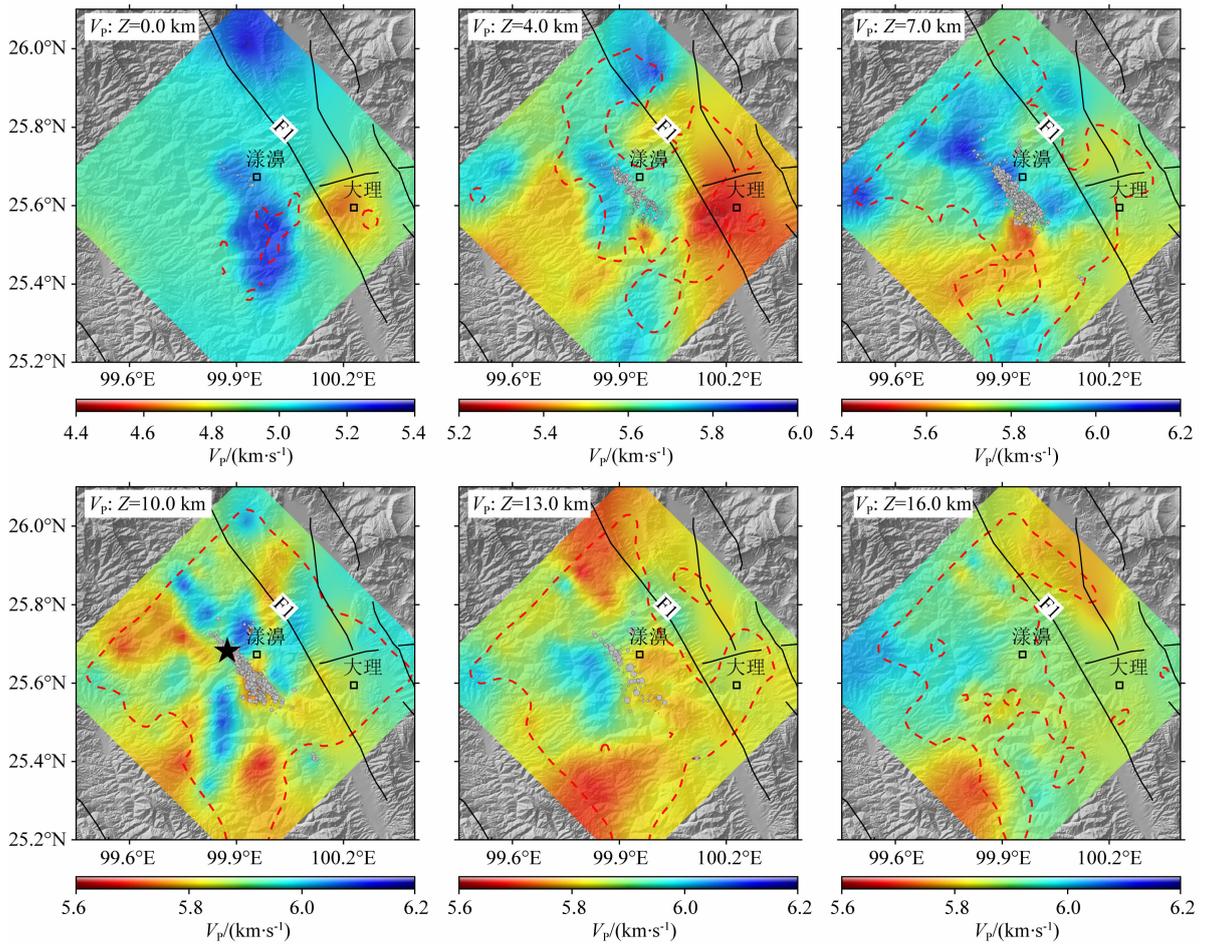


图 8 不同深度切片上 V_P 分布

灰色圆圈表示距离切片 2 km 以内以及误差小于 2 km 的漾濞地震序列；黑色五角星表示漾濞主震；

黑色线为断层迹；红色虚线表示恢复度值为 0.85 的等值线。

Fig. 8 V_P distributions at various depth slices

Gray circles mark the Yangbi earthquake sequence, having relocation errors less than 2 km, within 2 km of depth slices. The black star marks the Yangbi mainshock. Black lines denote fault traces. Red dash lines are contours with restoration values of 0.85.

于波速比(V_P/V_S)是表征地壳介质组分和力学强度性质的重要参数(Barton, 2006),因此本文给出了相应的波速比结构. 本文的波速比由 V_P 直接除以 V_S 得到,其可靠度可由 V_P 和 V_S 的可靠度共同来约束. 尽管对于 P 波和 S 波由于数据数量及质量不同,直接将二者模型相除得到 V_P/V_S 模型通常含有较多的假异常(Allam et al., 2012),但是在二者数据量较为接近的情况下,也能得到符合地质的 V_P/V_S 模型(Allam et al., 2014). 为此,本文用 V_P 和 V_S 的恢复度共同约束 V_P/V_S 的恢复度,即在分别计算 V_P 和 V_S 的恢复度后,将 V_P 和 V_S 恢复度大于 0.85 的区域定为反演可信度较高的区域,取 V_P 和 V_S 两者恢复度均大于 0.85 的交集区域作为 V_P/V_S 较可信的区域. 图 10 中 V_P/V_S 剖面的黑色虚线包围的区域表示其对应的 V_P 和 V_S 恢复度值都大于 0.85.

对于所有的剖面,其 V_P 、 V_S 以及 V_P/V_S 都呈现出横向不均匀性(图 10). 图中显示漾濞主震发生在高 V_P ($\sim 5.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)和高 V_S ($\sim 3.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)以及低波速比(~ 1.65)的边界上(AA' 以及 DD' 剖面),而主震上方及下方的波速比相比其附近的略高(DD' 剖面). 余震主要聚集在高低速过渡区(BB'、CC' 以及 DD' 剖面),靠近低速的区域;在余震分布的东南侧存在高 V_S 异常以及低波速比异常(图 10 DD' 剖面的 Hvs 和 Lvr). 三条北东向剖面均显示剖面投影地震的南西、北东两侧均有较大范围的高速体存在.

5 讨论

5.1 主余震分布及发震断层展布特征

本文结果显示主震(图 8 和图 9 黑色五角星)位

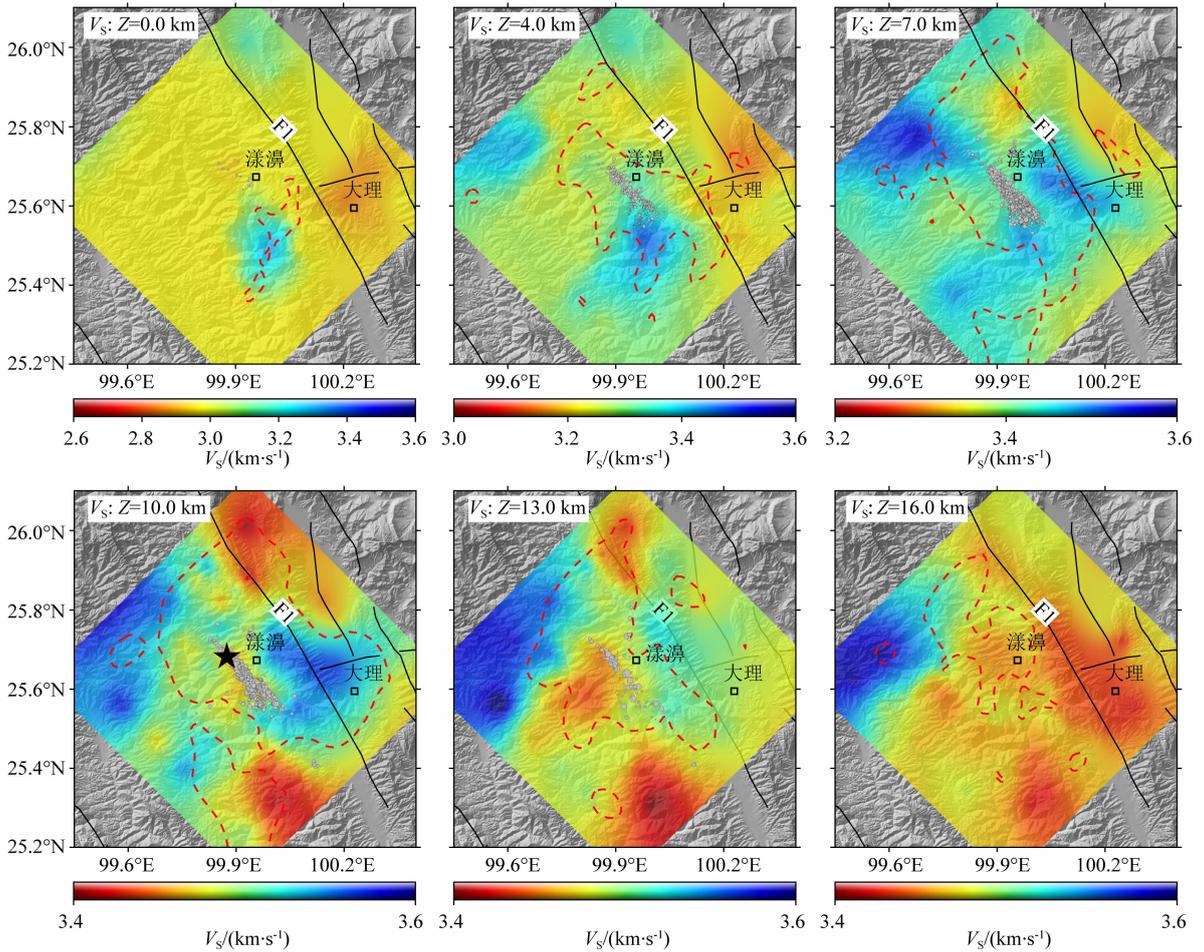


图 9 不同深度切片上 V_s 值分布(图中符号意义与图 8 中的符号相同)

Fig. 9 V_s distributions at various depth slices (Symbols are the same as those of Fig. 8)

于高低速过渡区,靠近高 V_p 的边界区(图 10 的 AA'、DD' 速度剖面),波速比相对较低;大于 4 级以上的地震分布(图 10 黑色五角星)也具有类似的分布特征. Huang 等(2002)以及王椿镛等(2002)对云南地区的 P 波速度层析成像同样发现地壳中的中强震发生在高低速的过渡区或者高速的边界区.

漾濞地震序列重定位后误差小于 2 km 的地震震中分布于维西—乔后—巍山断裂的西侧,呈北北西-南南东走向. 余震主要发生在主震的南南东方向,北北西方向余震数量较少(图 7),表明该次地震为单侧破裂,破裂优势方向为南南东向,与已有研究结果相一致(雷兴林等,2021;龙峰等,2021;云南漾濞 6.4 级地震科考取得阶段性进展—中国地震局地质研究所(<https://www.eq-igl.ac.cn/kydt/info/2021/33884.html>)). 研究区及邻区震源机制解与构造应力场结果以及 GPS 测量(Wang and Shen, 2020)显示区域主应力场方向为北北西-南南东,主震为右旋走滑断层,大部分地震的震源机制呈现为

走滑特征(吴鹏等,2020;王莹等,2021;Xu et al., 2020). 同震变形场及破裂滑动分布结果显示该次地震最大滑动量位于主震震源附近东南侧区域(张克亮等,2021),SW 倾向断层面上的滑动分布主要沿着南东方向扩展(王绍俊等,2021),这与本研究观测到的余震主要分布在发震断层的南南东方向一致,同时也对应了余震主要分布在主震南东侧的相对 P 波速度较高、波速比也较高的区域(图 10). 类似的高滑移量与高速异常相对应的研究在多个不同地区的地震研究中(Thurber et al., 2006;Pei et al., 2010)中都有发现,可能揭示了发震断层面上地震凹凸体的存在(Li et al., 2013;张欣,2015).

从速度和波速比结构(图 8—10)来看,主震区域西北侧有高速体存在,高速体对应着强力学性质,因此不容易发生破裂,而要使其发生破裂需要更大的应力积累,这可能是该次地震在西北侧没有发生较大破裂而呈现出明显的向东南方向单向破裂特征的原因. 前人关于主震破裂方向与断层两侧速度差

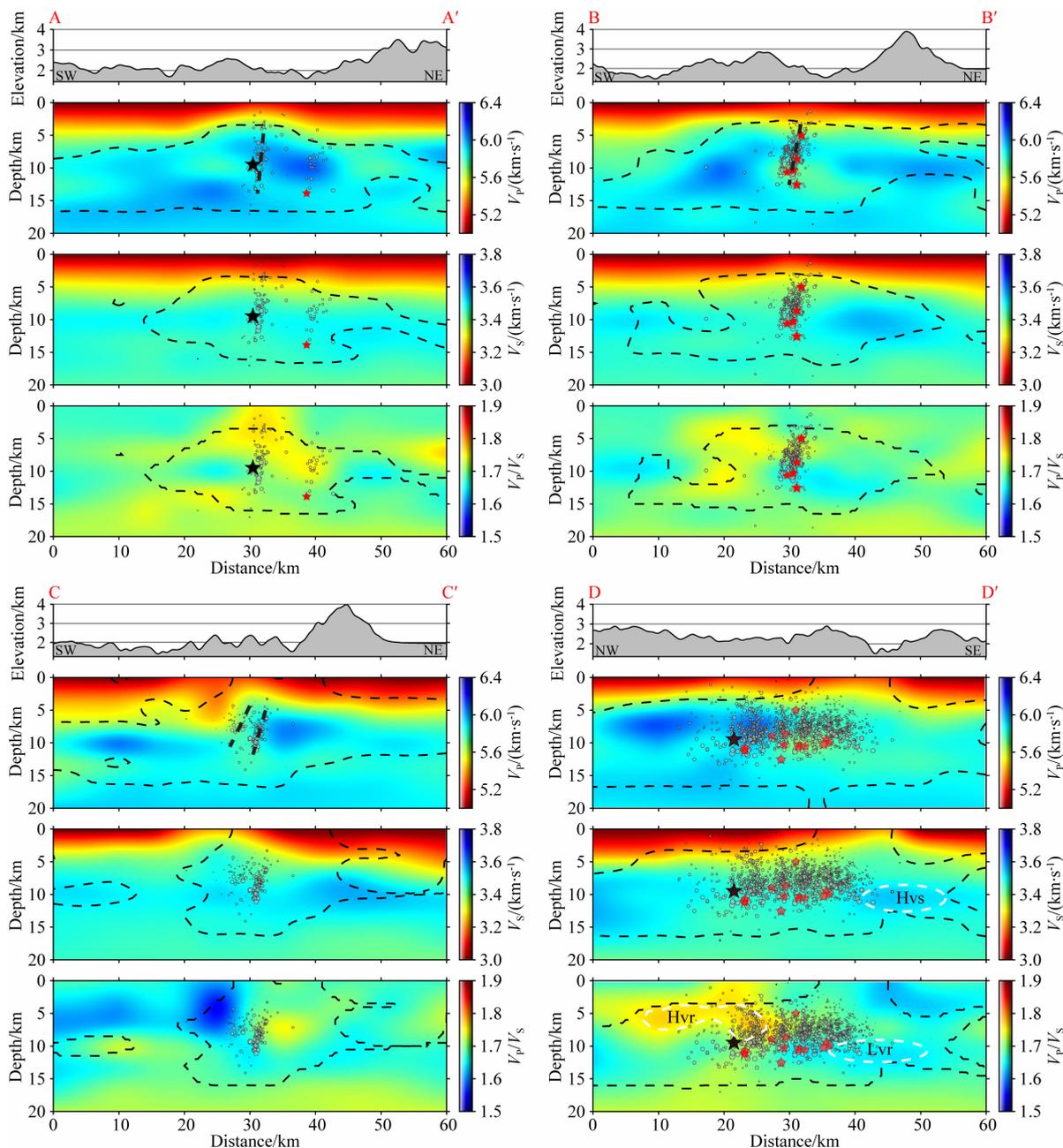


图 10 V_p 、 V_s 以及 V_p/V_s 在不同垂直剖面上的分布

黑色和红色五角星分别代表漾漾主震和漾漾地震序列中震级大于 4 的地震。灰色圆圈表示漾漾地震序列。这些投影的地震距离剖面 2 km 以内且定位误差小于 2 km。黑色细虚线表示恢复度值为 0.85 的等值线。粗黑虚线为预测的断层。Hvr 和 Lvr 分别表示高 V_p/V_s 和低 V_p/V_s 区域。Hvs 表示高 V_s 区域。剖面位置见图 7。

Fig. 10 V_p , V_s and V_p/V_s distributions at various vertical profiles

Black and red stars denote the Yangbi mainschock and earthquakes of the Yangbi earthquake sequence with magnitude value larger than 4, respectively. Gray circles mark the Yangbi earthquake sequence. Those projected earthquakes are within 2 km of vertical profiles, having relocation errors less than 2 km. Thin black lines are contours with restoration values of 0.85. Thick black dash lines outline predicted faults. Hvr and Lvr denote high and low V_p/V_s areas, respectively. Hvs denotes high V_s area. Profile locations are shown in Fig. 7.

异相关的研究结果显示对于具有速度对比差异的断层,力学性质较为柔软的介质中的滑动方向是首选的传播方向 (Brietzke and Ben-Zion, 2006; Ampuero and Ben-Zion, 2008),本文结果显示余震主要沿着断

裂向东南方向高波速比速区域(图 10 中 DD' 剖面)扩展约 25~30 km,后停止于高 V_s /低波速比区域(图 10 中 DD' 剖面 Hvs/Lvr),高 V_s /低波速比可能也表征了较小的岩石孔隙比,意味着介质力学性质

较强,不易破碎(李洪丽等,2021).主震、余震的分布差异可能反映了发震断层的北段与南段物性结构差异较大(Guo et al., 2018;叶涛等,2021).

地震在空间上的分布可以大致约束发震断层的形态,垂直于地震序列的 AA'、BB' 和 CC' 中纵剖面中的震源深度分布(图 10)反映了沿断层倾向的震源深度分布特征.整体上这三个剖面(AA'、BB' 和 CC')的地震在深度方向上近乎直立状,表明发震断层的倾角较陡,整体倾向以南西为主,且从北西到南东方向(AA' 到 CC'),倾角略微变缓,这与王莹等(2021)从余震序列震源机制得到的倾角($70^\circ \sim 90^\circ$)特征一致. AA' 剖面穿过主震区,地震深度呈线性分布,在主震的北东侧(AA' 剖面横轴 40 km 处),也有少数的地震在深度上呈线性分布(龙锋等,2021),断层面倾角较陡,似乎是独立于发震断层外的次级断层.同样地,远离主震震中的 BB',地震分布也比较集中,在深度上呈线性分布.震源区南西段 CC' 剖面的地震深度分布显示了 2 个分开的地震丛集,且在深度上也近乎呈线性分布,且分叉为倾角近乎垂直的两支次级断层(图 10 中的 CC' 速度剖面).横穿地震序列的 DD' 剖面显示了漾濞地震序列在发震断层面的深度展布以及地震序列的整体破裂范围,整个地震序列破裂长度约 25~30 km,地震深度主要分布在 3~13 km 范围内,大部分余震深度较主

震浅,浅层(深度小于 1 km)几乎没有地震分布,与此次强震野外考察没有发现地表破裂相一致.前人关于该区地震活动性研究结果(吴建平等,2004;王未来等,2014;房立华等,2014)表明川滇地区地震多属于浅源地震,其震源深度大多分布于 20 km 以浅的中、上地壳,本文结果也显示相同的特征.

2013 年 3 月 3 日,漾濞北边的洱源县发生了 $M_s5.5$ 地震,杨军等(2015)根据洱源 $M_s5.5$ 地震序列获得的震源机制解和地震后的现场科学考察资料,综合分析认为洱源 $M_s5.5$ 主震发生的断裂为通甸(乔后)—巍山断裂西侧的炼铁盆地东缘主边界断裂带;刘毅(2020)对该次地震震源区速度结构和震源位置进行了联合反演研究,速度模型横向分辨为 0.1° ,结果表明洱源两次主震与其东侧维西—乔后—巍山断裂距离约 10 km,重定位后的 3 个月内的余震序列(图 11 白色圆圈)呈 NNW 方向分布,同样认为该次地震发震断裂为炼铁盆地东缘主边界断裂带.贾佳(2020)采用双差层析成像方法获得了洱源震源区地壳三维 P 波速度结构和地震位置,地震重定位结果显示洱源地震主要沿着通甸(乔后)—巍山断裂西侧北西向分布,震源区速度异常过渡带同样呈现 NNW 向展布,速度结果横向分辨为 0.15° . Liu 等(2020)综合利用体波走时和面波频散数据给出了川滇地区成像结果,横向分辨率为 0.5° . 本文

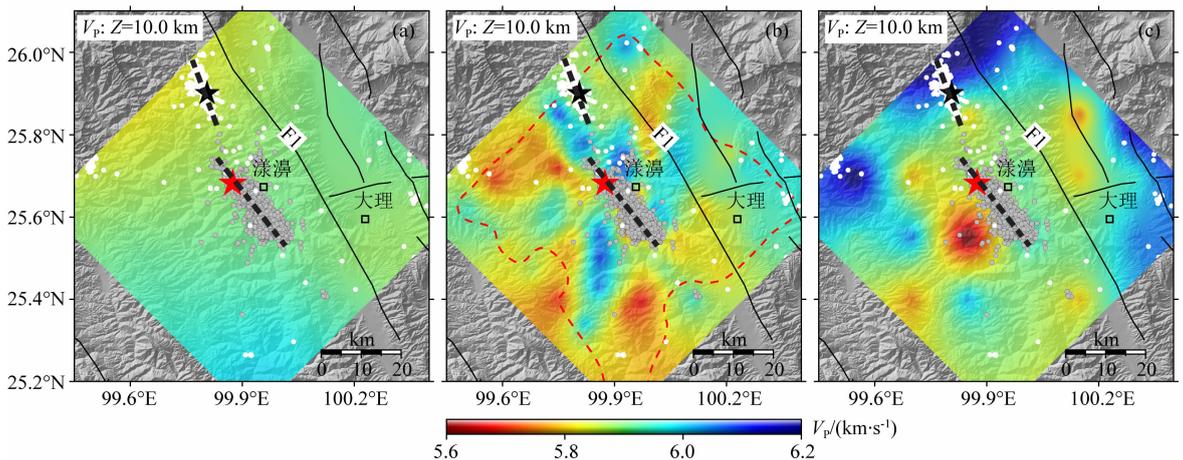


图 11 本文结果 V_p 与前人相关研究结果对比

(a) SWChinaCVM-1.0 10 km 深度水平 V_p 分布(Liu et al., 2020); (b) 本文 10 km 深度水平 V_p 分布; (c) 10 km 深度水平 V_p 分布(刘毅, 2020). 黑色五角为 2013-03-03 洱源 $M_s5.5$ 地震, 白色圆点为洱源余震序列(2013-03-03—2013-06-03), 红色五角星为漾濞主震, 灰色圆点为本研究的漾濞余震序列, 黑色粗虚线表示推测的隐伏断层.

Fig. 11 Comparison of V_p distributions

(a) V_p distributions at depth of 10 km extracted from SWChinaCVM-1.0 (Liu et al., 2020); (b) V_p distributions at depth of 10 km in our study; (c) V_p distributions at depth of 10 km from Liu (2020). The black star denotes an earthquake with magnitude of $M_s5.5$ occurred on March 3, 2013 in Eryuan. White dots denote Eryuan aftershocks occurred from March 3, 2013 to June 3, 2013. The red star represents the Yangbi mainshock. Gray dots denote Yangbi aftershocks in this study. The thick black dashed line indicates the inferred hidden fault.

结果显示漾濞地震序列同样呈现为 NNW 向展布, 10 km 深度层震源区速度异常过渡带也表现为 NNW 向异常分布; 且本次漾濞 $M_S 6.4$ 地震与洱源 $M_S 5.5$ 地震相距仅约 28 km, 结合已有的速度及余震序列分布结果(刘毅, 2020; 贾佳, 2020), 我们刻画了这两次强震在深度 10 km 速度切片上的的发震断层位置(图 11). 速度切片对比结果显示在中上地壳深度范围这两次强震中间区域存在较小尺度的“地震空区”, 推测维西—乔后—巍山断裂西侧可能同样存在着较大的北北西向隐伏断层, 与王光明等(2021)显示的草坪断裂走向大体一致. 另外, 图 11 整体显示本文和刘毅(2020)结果(图 11b 和 11c)的分辨率高于 Liu 等(2020)(图 11a), 但是二者(图 11b 和 11c)在发震断裂西南侧, 主震西北端等存在较大差异, 这可能主要与反演所使用的不同数据有关.

5.2 发震机制探讨

本次地震及余震序列分布于维西—乔后—巍山断裂带的西南侧, 维西—乔后—巍山断裂带位于川滇菱形地块和兰坪—思茅地块的分界带上. 川滇地块是欧亚板块与印度板块相互作用以及印度板块向青藏块体北北东向挤压运动引起强烈地壳变形的前沿地带, 同时川滇地区也是软弱物质运移(Royden et al., 1997, 2008; Bao et al., 2015)的关键位置, 持续向南南东方向运动(徐锡伟等, 2003). 维西—乔后—巍山断裂带不断受到川滇块体 SSE 向的挤出

运动, 表现出以右旋走滑为主, 兼挤压逆冲的运动特征(常祖峰等, 2016), 使得本次漾濞地震序列的发生具备了应力不断积累的来源.

众多的速度结构成像研究表明低速层广泛存在于川滇地区的中地壳之中(王椿镛, 2002; 胥颐等, 2013; 陈思文等, 2016; Bao et al., 2015; 邓山泉等, 2020; Liu et al., 2020; Yang et al., 2020; 高天扬等, 2021). 特别是 Bao 等(2015)给出的川滇地区的 V_S 速度结构显示在 20~40 km 深度也即中下地壳由北向南围绕峨眉山大火成岩省内带分布有东、西两条呈管道状的明显的低速带, 与 GPS 测量揭示的地壳物质的顺时针运动相一致, 而本文研究区正好位于上述的西低速带内(图 12a). 研究区已有大地电磁测深结果显示在中下地壳深度范围存在明显的低阻、高导层(王绪本等, 2017; 叶涛等, 2021), 意味着研究区中下地壳存在流体或温度异常导致局部熔融. 此外, 代艳娟(2016)研究结果显示漾濞西北邻近的洱源地区岩浆活动频繁, 变形变质作用强烈, 分布有较大面积的双峰式火山岩, 形成于早—中三叠世, 经喜马拉雅期的挤压构造和伸展, 具强烈的糜棱岩化作用和热液叠加, 研究区流纹岩被认为可能是幔源岩浆与壳源熔体混合作用的结果. 哀牢山—金沙江新生代碱性钾质岩浆岩带研究表明该地区碱性岩来源于含碱度较高的软流圈地幔(张玉泉和谢应雯, 1997). 云南地热结构研究结果显示昆明、大理—丽江地区地幔热流 $Q > 40 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 具有典型活

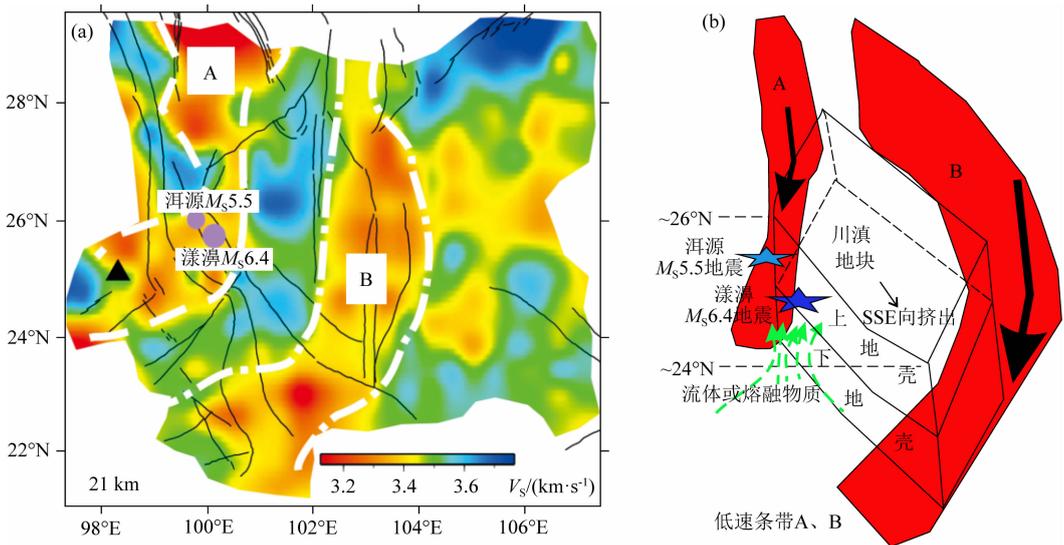


图 12 发震机制示意图

(a) 21 km 深度 V_S 分布(修自 Bao et al., 2015); (b) 发震机制三维示意图.

Fig. 12 Sketch map of seismogenic mechanism

(a) V_S distributions at depth of 21 km (adapted from Bao et al., 2015); (b) 3-D sketch map of seismogenic mechanism of $M_S 6.4$ Yangbi earthquake.

动区的热结构特征,是典型的高地幔热流(向才英和周真恒,2000)。

前人研究结果表明大部分强震多发生在高速区域边界上或低速到高速的过渡区里(于湘伟,2003;田有等,2007;王长在等,2013;Lees and Malin, 1990;Huang et al., 2002;Huang and Zhao, 2004; Hua et al., 2020;Wang et al., 2021)。一般情况,上地壳介质表现为脆性,受区域构造水平应力挤压,容易积累应力,导致岩石破裂;此外速度对比强烈的部位既是应力集中的地方,又是介质相对比较脆弱的地方。这样的环境具备了积累大量应变能的介质条件,又是容易发生破裂、易于释放应力的场所,因而容易引发大的地震(Huang et al., 2002;王椿镛等,2002);同时下地壳中的流体(或局部熔融)容易引起中上地壳发震层的弱化和应力集中,进而导致大地震的发生(田有等,2007;Wang et al., 2021)。雷兴林等(2021)通过综合分析认为漾濞地震受深部流体作用影响明显,主震得以发生主要受深部流体作用。本文及前人结果综合显示漾濞主震位于高低速过渡区且靠近高速区域边界上、震源区周围波速结构差异较大、以及震源区下方具有高波速比和低电阻特征(Sun et al., 2014;王绪本等,2017;叶涛等,2021),并且研究区附近存在有双峰式火山岩(或新生代碱性钾质岩浆岩带)以及具有高地幔热流值特征,因此我们推测漾濞主震在构造应力南南东向挤压的作用下,在震源区应力积累,并且中下地壳的流体(或者部分熔融物质)从下地壳深度范围进入发震断层,导致断层弱化最终共同作用引发了该次强震(图 12b)。

6 结论

本文基于区域地震台网记录的高质量 P_g 和 S_g 震相到时数据,反演了 2021 年漾濞 6.4 级地震震源区的三维 P 波和 S 波速度结构和余震序列震源参数,同时基于可靠的 P 波和 S 波速度结构给

出了穿过以及垂直于余震的四条剖面 V_p/V_s 分布,对该次强震的孕育、发生机理初步得到以下认识:

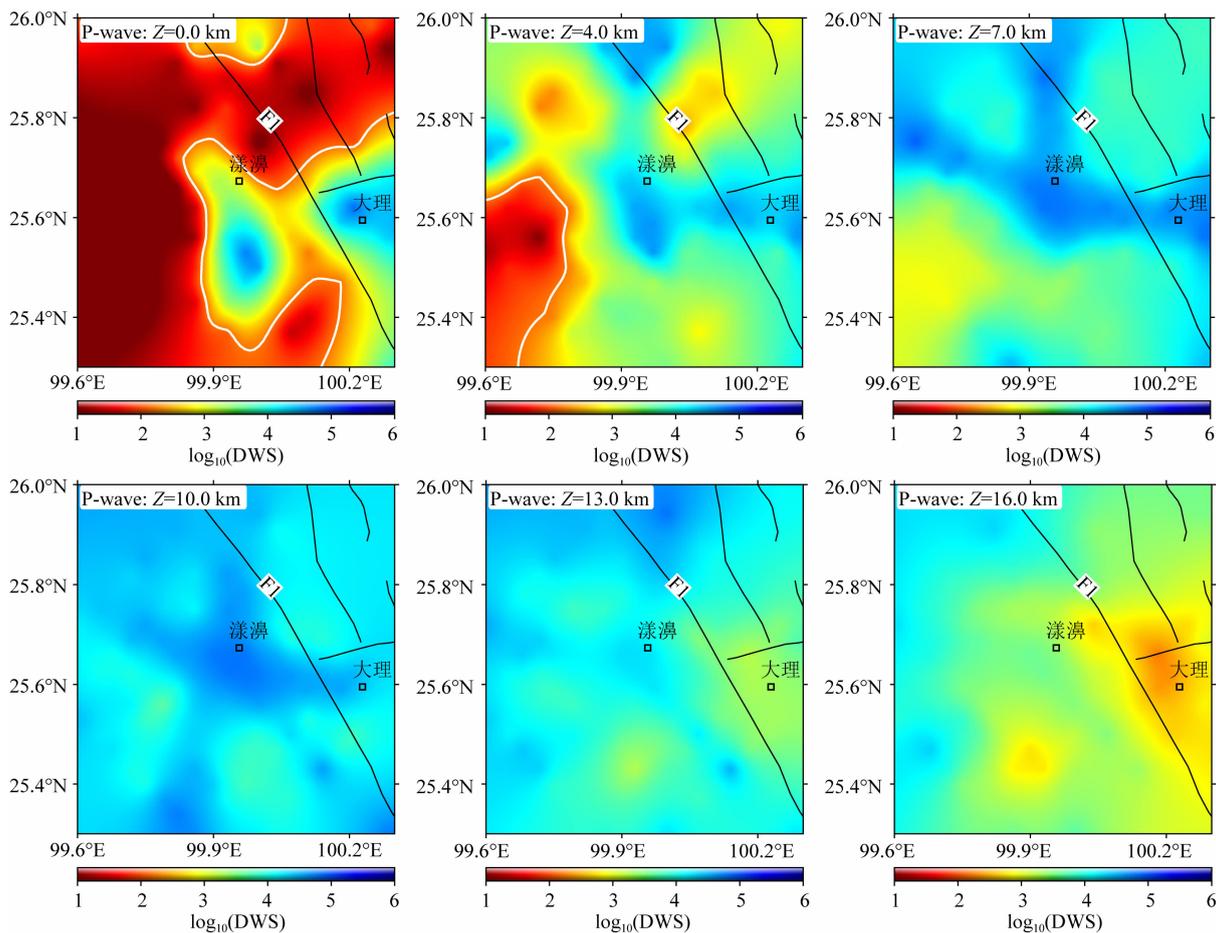
(1)地震重定位结果显示漾濞 6.4 级地震序列震中主要位于维西—乔后—巍山断裂的西侧,呈北北西-南南东向条带状分布,长度约 25~30 km,宽度为 3~8 km;震源深度的分布范围为 0~20 km,优势分布范围为 3~13 km;余震主要发生在主震的南南东方向,少部分在其北西侧。根据地震分布特征以及前人研究结果总体推测发震断层为维西—乔后—巍山断裂西侧的隐伏断层,走向为 NNW 向, NW 段表现为倾角较陡、结构相对简单的走滑断裂, SE 段由两条隐伏的次级断层组成,且倾角略缓;该次强震为单侧破裂,破裂长度约 25~30 km。

(2)漾濞地震的发生及余震序列的分布与地壳速度结构(V_p 、 V_s 以及 V_p/V_s)不均匀性有着密切的关系。漾濞主震位于高低速过渡区且靠近高速区域边界上、震源区波速比较低且周围波速结构差异较大、以及震源区下方具有高波速比和低电阻特征;4 级以上地震也大致分布在高低速过渡区或高速区的边界上;余震主要分布在速度相对较低区域。因此我们推测漾濞主震受区域构造应力的作用下,在震源区应力积累,并且流体(或者部分熔融物质)从中下地壳深度范围进入发震断层区,导致断层弱化最终共同作用引发了该次强震。

(3)结合 2013 洱源 $M_s 5.5$ 地震研究结果(刘毅,2020;贾佳,2020)综合显示洱源、漾濞两次强震在中上地壳深度范围中间区域存在较小尺度的“地震空区”,推测维西—乔后—巍山断裂西侧可能存在着较大的北北西向隐伏断层,该区域的地震危险性依然很高。

致谢 两位审稿专家对本文的修改和完善提出了宝贵意见;本次研究中使用了中国地震台网中心的震相报告数据,文中图件采用了 GMT(Wessel et al., 2013)以及 Matplotlib (Hunter and John, 2007)软件包绘制,在此表示衷心感谢。

附图



附图 1 Pg 波 DWS 值在不同深度切片的分布

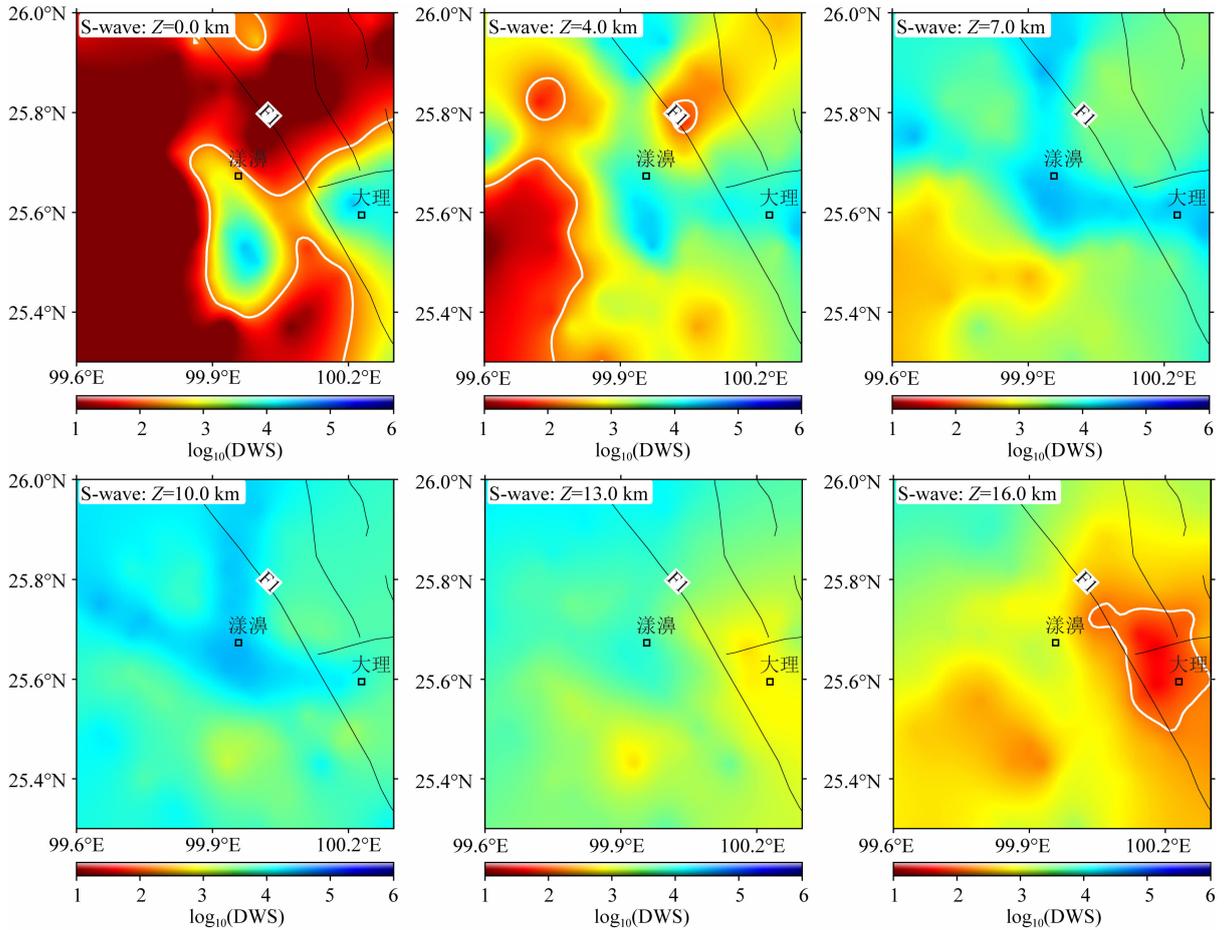
Appendix Fig. 1 DWS value distributions at different depth slices for Pg wave

References

- Allam A A, Ben-Zion Y. 2012. Seismic velocity structures in the southern California plate-boundary environment from double-difference tomography. *Geophysical Journal International*, 190 (2): 1181-1196.
- Allam A A, Ben-Zion Y, Kurzon I, et al. 2014. Seismic velocity structure in the Hot Springs and Trifurcation areas of the San Jacinto fault zone, California, from double-difference tomography. *Geophysical Journal International*, 198(2): 978-999.
- Ampuero J P, Ben-Zion Y. 2008. Cracks, pulses and macroscopic asymmetry of dynamic rupture on a bimaterial interface with velocity-weakening friction. *Geophysical Journal International*, 173(2): 674-692.
- Bao X W, Sun X X, Xu M J, et al. 2015. Two crustal low-velocity channels beneath SE Tibet revealed by joint inversion of Rayleigh wave dispersion and receiver functions. *Earth and Planetary Science Letters*, 415: 16-24.
- Barton N. 2006. Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and

Anisotropy. London: CRC Press.

- Brietzke G B, Ben-Zion Y. 2006. Examining tendencies of in-plane rupture to migrate to material interfaces. *Geophysical Journal International*, 167(2): 807-819.
- Chang Z F, Chang H, Zang Y, et al. 2016. Recent active features of Weixi-Qiaohou fault and its relationship with the Honghe fault. *Journal of Geomechanics (in Chinese)*, 22(3): 517-530.
- Chen S W, Wang B S, Tian X F, et al. 2016. Crustal structure from Yunxian-Ninglang wide-angle seismic reflection and refraction profile in Northwestern Yunnan, China. *Seismology and Geology (in Chinese)*, 38(1): 91-106.
- Dai Y J. 2016. The study of the early tomiddle Triassic bimodal volcanic rocks of Eryuan in western Yunnan, SW China [Master's thesis] (in Chinese). Kunming: Kunming University of Science and Technology.
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. 2002. Basic characteristics of active tectonics of China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(4): 356-372.
- Deng S Q, Zhang W B, Yu X W, et al. 2020. Analysis on crustal structure characteristics of southern Sichuan-Yunnan by regional



附图 2 Sg 波 DWS 值在不同深度切片的分布

Appendix Fig. 2 DWS value distributions at different depth slices for Sg wave

double-difference seismic tomography. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 63(10): 3653-3668.

Efron B, Gong G. 1983. A leisurely look at the bootstrap, the jackknife, and cross-validation. *The American Statistician*, 37(1): 36-48.

Efron B, Tibshirani R. 1991. Statistical data analysis in the computer age. *Science*, 253(5018): 390-395.

Fang L H, Wu J P, Wang W L, et al. 2014. Relocation of the aftershock sequence of the $M_s6.5$ Ludian earthquake and its seismogenic structure. *Seismology and Geology (in Chinese)*, 36(4): 1173-1185.

Gao T Y, Ding Z F, Wang X C, et al. 2021. Joint inversion of receiver functions, Rayleigh wave dispersion and ZH ratio for crustal structure in Southeast Tibetan Plateau and its implications for dynamics. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 64(6): 1885-1906.

Guo H, Zhang H J. 2017. Development of double-pair double difference earthquake location algorithm for improving earthquake locations. *Geophysical Journal International*, 208(1): 333-348.

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 transform fault, East Pacific Rise. *Earth and Planetary Science Letters*, 499: 243-255.

Guo H, McGuire J J, Zhang H J. 2021. Correlation of porosity variations and rheological transitions on the southern Cascadia megathrust. *Nature Geoscience*, 14(5): 341-348.

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.

Hua Y Y, Zhao D P, Toyokuni G, et al. 2020. Tomography of the source zone of the great 2011 Tohoku earthquake. *Nature Communications*, 11(1): 1163.

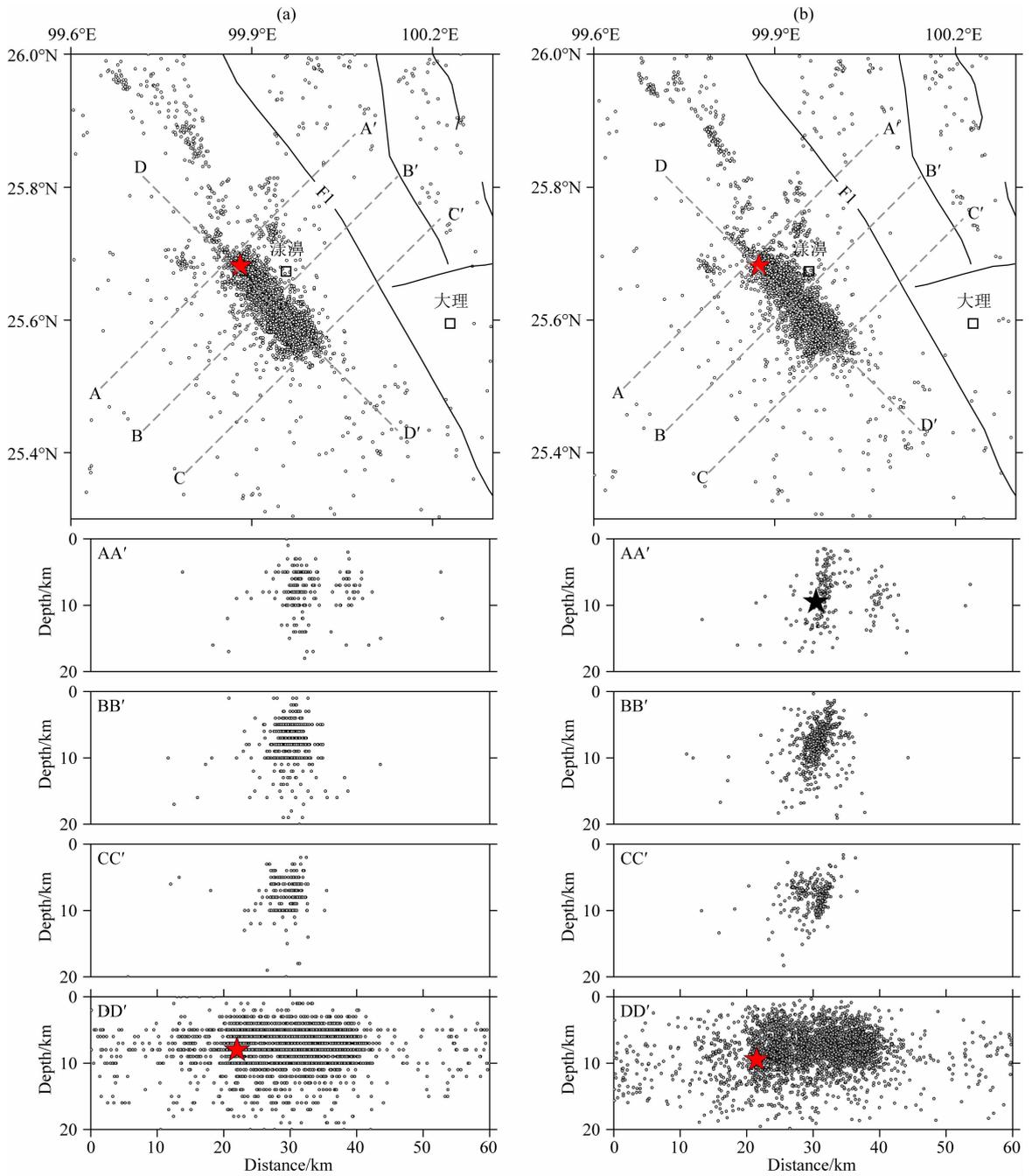
Huang J L, Zhao D P, Zheng S H. 2002. Lithospheric structure and its relationship to seismic and volcanic activity in southwest China. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 107(B10): ESE 13-1-ESE 13-14.

Huang J L, Zhao D P. 2004. Crustal heterogeneity and seismotectonics of the region around Beijing, China. *Tectonophysics*, 385(1-4): 159-180.

Humphreys E, Clayton R W. 1988. Adaptation of back projection tomography to seismic travel time problems. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 93(B2): 1073-1085.

Hunter J D. 2007. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3): 90-95.

Jia J. 2020. 3D P-wave velocity structure of crust in the Eryuan area [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics, China



附图 3 重定位前后的地震分布对比

(a) 重定位前的地震分布; (b) 重定位后的地震分布. 红色五角星表示主震; 黑色圆圈表示地震.

投影的地震距离剖面(AA'、BB'、CC'和DD') 2 km 以内.

Appendix Fig. 3 Comparisons of earthquake distributions before and after relocation

(a) Earthquake distributions before relocation; (b) Earthquake distributions after relocation. Red star denotes the Yangbi mainshock.

Black circles denote earthquakes. Projected earthquakes are within ± 2 km of profiles (AA', BB', CC' and DD').

Earthquake Administration.

Lees J M, Malin P E. 1990. Tomographic images of P wave velocity variation at Parkfield, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B13): 21793-21804.

Lei X L, Wang Z W, Ma S L, et al. 2021. A preliminary study on the characteristics and mechanism of the May 2021 $M_s 6.4$, Yangbi earthquake sequence, Yunnan, China. *Acta Seismologica*

Sinica (in Chinese), 43(3): 261-286.

Li H L, Liu C, Tian Y, et al. 2021. Seismic tomography of the Songyuan area, Northeast China; constraints on seismogenic structure. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 64(5): 1597-1607.

Li Z W, Tian B F, Liu S, et al. 2013. Asperity of the 2013 Lushan earthquake in the eastern margin of Tibetan Plateau from seismic

- tomography and aftershock relocation. *Geophysical Journal International*, 195(3): 2016-2022.
- Liu Y, Yao H J, Zhang H J, et al. 2020. The community velocity model V. 1.0 of Southwest China, constructed from joint body- and surface- wave travel-time tomography. *Seismological Research Letters*, 92(5): 2972-2987.
- Liu Y. 2020. Fine velocity structure and earthquake relocation in source and peripheral area of Eryuan earthquake [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geoscience (Beijing).
- Long F, Qi Y P, Yi G X, et al. 2021. Relocation of the $M_s6.4$ Yangbi earthquake sequence on May 21, 2021 in Yunnan Province and its seismogenic structure analysis. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 64(8): 2631-2646.
- Paige C C, Saunders M A. 1982. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 8(1): 43-71.
- Pei S P, Su J R, Zhang H J, et al. 2010. Three-dimensional seismic velocity structure across the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake, Sichuan, China. *Tectonophysics*, 491(1-4): 211-217.
- Pei S P, Niu F L, Ben-Zion Y, et al. 2019. Seismic velocity reduction and accelerated recovery due to earthquakes on the Longmenshan fault. *Nature Geoscience*, 12(5): 387-392.
- Royden L, Burchfiel B, Robert D. 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 321(1054): 1054-1058.
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 276(5313): 788-790.
- Scarfi L, Giampiccolo E, Musumeci C, et al. 2007. New insights on 3D crustal structure in southeastern Sicily (Italy) and tectonic implications from an adaptive mesh seismic tomography. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 161(1-2): 74-85.
- Share P E, Guo H, Thurber C H, et al. 2019. Seismic imaging of the southern California plate boundary around the south-central transverse ranges using double-difference tomography. *Pure and Applied Geophysics*, 176(3): 1117-1143.
- Sun Q, Pei S P, Su J R, et al. 2021. Three-dimensional seismic velocity structure across the 17 June 2019 Changning $M_s6.0$ earthquake, Sichuan, China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 64(1): 36-53.
- Sun X X, Bao X W, Xu M J, et al. 2014. Crustal structure beneath SE Tibet from joint analysis of receiver functions and Rayleigh wave dispersion. *Geophysical Research Letters*, 41(5): 1479-1484.
- Thurber C, Eberhart-Phillips D. 1999. Local earthquake tomography with flexible gridding. *Computers & Geosciences*, 25(7): 809-818.
- Thurber C H, Zhang H J, Waldhauser F, et al. 2006. Three-dimensional compressional wavespeed model, earthquake relocations, and focal mechanisms for the Parkfield, California, region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4B): S38-S49.
- Thurber C H, Brocher T M, Zhang H J, et al. 2007. Three-dimensional P wave velocity model for the San Francisco Bay region, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7): B07313.
- Tian Y, Zhao D P, Sun R M, et al. 2007. The 1992 Landers earthquake: Effect of crustal heterogeneity on earthquake generation. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 50(5): 1488-1496.
- Um J, Thurber C. 1987. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(3): 972-986.
- 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 Y, Mooney W D, Wang X L, et al. 2002. Study on 3-D velocity structure of crust and upper mantle in Sichuan-Yunnan region, China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 24(1): 1-16.
- 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 Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(12): 4072-4083.
- Wang G M, Wu Z H, Peng G L, et al. 2021. Seismogenic fault and its rupture characteristics of the 21 May, 2021 Yangbi $M_s6.4$ earthquake: Analysis results from the relocation of the earthquake sequence. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 27(4): 662-678.
- Wang L Y, Li Z Q. 2021. Bootstrap method for inversion and precision estimation of earthquake source parameters. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 64(6): 2001-2016.
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present-Day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2): e2019JB018774.
- Wang S J, Liu Y H, Shan X J, et al. 2021. Coseismic surface deformation and slip models of the 2021 $M_s6.4$ Yangbi (Yunnan, China) earthquake. *Seismology and Geology* (in Chinese), 43(3): 692-705.
- Wang W L, Wu J P, Fang L H, et al. 2014. Double difference location of the Ludian $M_s6.5$ earthquake sequences in Yunnan province in 2014. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3042-3051.
- Wang X B, Yu N, Gao S, et al. 2017. Research progress in research on electrical structure of crust and upper mantle beneath the eastern margin of the Tibetan plateau. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(6): 2350-2370.
- Wang Y, Zhao T, Hu J, et al. 2021. Relocation and focal mechanism solutions of the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ earthquake sequence. *Seismology and Geology* (in Chinese), 43(4): 847-863.
- Wang Z, Wang J, Yang X Q. 2021. The Role of Fluids in the 2008 $M_s8.0$ Wenchuan Earthquake, China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(2): e2020JB019959.
- 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 P, Ming Y H, Wang C Y. 2004. Source mechanism of small-to-moderate earthquakes and tectonic stress field in Yunnan

- province. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 26(5): 457-465.
- Wu P, Gao Y, Chen A G, et al. 2020. Preliminary study on the anisotropy of the upper crust in the Sanjiang area, southeastern margin of the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 63(3): 1104-1116.
- Xiang C Y, Zhou Z H. 2000. Relationship between seismicity and geothermal structure of the lithosphere in Yunnan province, China. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 16(3): 263-272.
- 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 Journal of Geophysics* (in Chinese), 63(3): 897-914.
- Xu X W, Wen X Z, Zheng R Z, et al. 2003. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region, China. *Science in China Series D: Earth Sciences* (in Chinese), 46(S2): 210-226.
- Xu X X, Ji L Y, Jiang F Y, et al. 2020. Study on current activity features of Jinshajiang Fault Zone based on GPS and small earthquakes. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 40(10): 1062-1067.
- Xu Y, Yang X T, Liu J H. 2013. Tomographic study of crustal velocity structures in the Yunnan region southwest China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(6): 1904-1914.
- Xu Y, Koper K D, Burlacu R, et al. 2020. A new uniform moment tensor catalog for Yunnan, China, from January 2000 through December 2014. *Seismological Research Letters*, 91(2A): 891-900.
- Yang J, Su Y J, Li X B, et al. 2015. Research on focal mechanism solutions of $M_L \geq 3.4$ earthquakes of Eryuan $M_S 5.5$ earthquake sequence in 2013. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 38(2): 196-202.
- Yang Y, Yao H J, Wu H X, et al. 2020. A new crustal shear-velocity model in Southwest China from joint seismological inversion and its implications for regional crustal dynamics. *Geophysical Journal International*, 220(2): 1379-1393.
- Yang Z G, Liu J, Zhang X M, et al. 2021. A preliminary report of the Yangbi, Yunnan, $M_S 6.4$ earthquake of May 21. *Earth and Planetary Physics*, 5(4): 362-364, <http://doi.org/10.26464/epp2021036>.
- Ye T, Chen X B, Huang Q H, et al. 2021. Three-dimensional electrical resistivity structure in focal area of the 2021 Yangbi $M_S 6.4$ earthquake and its implication seismogenic mechanism. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 64(7): 2267-2276.
- Yi G X, Long F, Liang M J, et al. 2017. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 8 August 2017 $M 7.0$ Jiuzhaigou earthquake and its aftershocks, northern Sichuan. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(10): 4083-4097.
- Yu X W, Chen Y T, Wang P D. 2003. Three-dimensional P wave velocity structure in Beijing-Tianjin-Tangshan area. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 25(1): 1-14.
- Zelt C A. 1998. Lateral velocity resolution from three-dimensional seismic refraction data. *Geophysical Journal International*, 135(3): 1101-1112.
- Zhang H J, Nadeau R M, Guo H. 2017. Imaging the nonvolcanic tremor zone beneath the San Andreas fault at Cholame, California using station-pair double-difference tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 460: 76-85.
- 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.
- Zhang K L, Gan W J, Liang S M, et al. 2021. Coseismic displacement and slip distribution of the 2021 May 21, $M_S 6.4$, Yangbi Earthquake derived from GNSS observations. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 64(7): 2253-2266.
- Zhang X. 2015. Advanced seismic velocity and attenuation tomography and its applications [Master's thesis] (in Chinese). Hefei: University of Science and Technology of China.
- Zhang Y Q, Xie Y W. 1997. Geochronology of Ailaoshan-Jinshajiang alkalirich intrusive rocks and their Sr and Nd isotopic characteristics. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 40(5): 524-529.
- Zhang Z Q, Gao Y. 2019. Crustal thicknesses and Poisson's ratios beneath the Chuxiong-Simao Basin in the Southeast Margin of the Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Physics*, 3(1): 69-84.
- Zhao D P, Hasegawa A, Horiuchi S. 1992. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B13): 19909-19928.
- 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

- 常祖峰, 常昊, 臧阳等. 2016. 维西—乔后断裂新活动特征及其与红河断裂的关系. *地质力学学报*, 22(3): 517-530.
- 陈思文, 王宝善, 田晓峰等. 2016. 滇西北地区云县—宁蒍宽角反射/折射剖面结果. *地震地质*, 38(1): 91-106.
- 代艳娟. 2016. 滇西洱源地区早三叠世双峰式火山岩研究[硕士论文]. 昆明: 昆明理工大学.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康等. 2002. 中国活动构造基本特征. *中国科学(D辑)*, 32(12): 1020-1030.
- 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): 3653-3668.

- 房立华, 吴建平, 王未来等. 2014. 云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震余震重定位及其发震构造. 地震地质, 36(4): 1173-1185.
- 高天扬, 丁志峰, 王兴臣等. 2021. 利用接收函数、面波频散和 ZH 振幅比联合反演青藏高原东南缘地壳结构及其动力学意义. 地球物理学报, 64(6): 1885-1906.
- 贾佳. 2020. 洱源地区地壳三维 P 波速度精细结构研究[硕士论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 雷兴林, 王志伟, 马胜利等. 2021. 关于 2021 年 5 月滇西漾濞 $M_s6.4$ 地震序列特征及成因的初步研究. 地震学报, 43(3): 261-286.
- 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.
- 刘毅. 2020. 洱源地震震源区及周边精细速度结构和地震重定位研究[硕士论文]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 龙锋, 祁玉萍, 易桂喜等. 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 $M_s6.4$ 地震序列重新定位与发震构造分析. 地球物理学报, 64(8): 2631-2646.
- 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.
- 田有, 赵大鹏, 孙若味等. 2007. 1992 年美国加州兰德斯地震——地壳结构不均匀性对地震发生的影响. 地球物理学报, 50(5): 1488-1496.
- 王椿镛, Mooney W D, 王溪莉等. 2002. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究. 地震学报, 24(1): 1-16.
- 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.
- 王光明, 吴中海, 彭关灵等. 2021. 2021 年 5 月 21 日漾濞 $M_s6.4$ 地震的发震断层及其破裂特征: 地震序列的重定位分析结果. 地质力学学报, 27(4): 662-678.
- 王乐洋, 李志强. 2021. 震源参数反演及精度评定的 Bootstrap 方法. 地球物理学报, 64(6): 2001-2016.
- 王绍俊, 刘云华, 单新建等. 2021. 2021 年云南漾濞 $M_s6.4$ 地震同震地表形变与断层滑动分布. 地震地质, 43(3): 692-705.
- 王未来, 吴建平, 房立华等. 2014. 2014 年云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列的双差定位. 地球物理学报, 57(9): 3042-3051.
- 王绪本, 余年, 高嵩等. 2017. 青藏高原东缘地壳上地幔电性结构研究进展. 地球物理学报, 60(6): 2350-2370.
- 王莹, 赵韬, 胡景等. 2021. 2021 年云南漾濞 6.4 级地震序列重定位及震源机制解特征分析. 地震地质, 43(4): 847-863.
- 吴建平, 明跃红, 王椿镛. 2004. 云南地区中小地震震源机制及构造应力场研究. 地震学报, 26(5): 457-465.
- 吴鹏, 高原, 陈安国等. 2020. 青藏高原东南缘三江地区上地壳各向异性初步研究. 地球物理学报, 63(3): 1104-1116.
- 向才英, 周真恒. 2000. 云南地震活动与岩石圈热结构的关系. 中国地震, 16(3): 263-272.
- 莘海亮, 曾宪伟, 康敬等. 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.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章等. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. 中国科学(D辑), 33(S1): 151-162.
- 徐晓雪, 季灵运, 蒋锋云等. 2020. 基于 GPS 和小震研究金沙江断裂带现今活动特征. 大地测量与地球动力学, 40(10): 1062-1067.
- 胥颐, 杨晓涛, 刘建华. 2013. 云南地区地壳速度结构的层析成像研究. 地球物理学报, 56(6): 1904-1914.
- 杨军, 苏有锦, 李孝宾等. 2015. 2013 年洱源 $M_s5.5$ 地震序列 $M_L \geq 3.4$ 地震的震源机制解研究. 地震研究, 38(2): 196-202.
- 叶涛, 陈小斌, 黄清华等. 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞地震 ($M_s6.4$) 震源区三维电性结构及发震机制讨论. 地球物理学报, 64(7): 2267-2276.
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑等. 2017. 2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M7.0$ 地震及余震震源机制解与发震构造分析. 地球物理学报, 60(10): 4083-4097.
- 于湘伟, 陈运泰, 王培德. 2003. 京津唐地区中上地壳三维 P 波速度结构. 地震学报, 25(1): 1-14.
- 张克亮, 甘卫军, 梁诗明等. 2021. 2021 年 5 月 21 日 $M_s6.4$ 漾濞地震 GNSS 同震变形场及其约束反演的破裂滑动分布. 地球物理学报, 64(7): 2253-2266.
- 张欣. 2015. 地震速度与衰减层析成像新方法及其应用[硕士论文]. 合肥: 中国科学技术大学.
- 张玉泉, 谢应雯. 1997. 哀牢山—金沙江富碱侵入岩年代学和 Nd, Sr 同位素特征. 中国科学(D辑), 27(4): 289-293.

(本文编辑 胡素芳)