

李大虎, 丁志峰, 吴萍萍等. 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 $M_s6.4$ 地震震区地壳结构特征与孕震背景. 地球物理学报, 64(9):3083-3100, doi:10.6038/cjg2021P0405.

Li D H, Ding Z F, Wu P P, et al. 2021. The characteristics of crustal structure and seismogenic background of Yangbi $M_s6.4$ earthquake on May 21, 2021 in Yunnan Province, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 64(9):3083-3100, doi:10.6038/cjg2021P0405.

2021 年 5 月 21 日云南漾濞 $M_s6.4$ 地震 震区地壳结构特征与孕震背景

李大虎^{1,2}, 丁志峰³, 吴萍萍³, 刘韶², 邓菲³, 张旭³, 赵航^{1,2}

1 中国地震局成都青藏高原地震研究所(中国地震科学实验场成都基地), 成都 610039

2 四川省地震局, 成都 610039

3 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 本文基于“中国地震科学台阵探测——南北地震带南段”密集布设的流动地震台阵和川滇区域数字测震台网等共计 634 个台站所记录的观测资料, 先采用地震体波层析成像(TOMO3D)方法反演获得川滇区域的地壳速度结构特征, 在此基础上, 重点剖析云南漾濞 $M_s6.4$ 地震震区及周边的三维 P 波速度结构; 再采用三维视密度反演方法, 获得漾濞震区壳内视密度的横向变化特征, 最后综合分析漾濞 $M_s6.4$ 地震震区地壳结构特征与地震活动关系、深部孕震背景等科学问题. 研究表明: 漾濞震区 P 波速度结构与视密度展布特征在深度和分区特征上均具有较好的联系和可比性, 震区三维速度结构和视密度反演结果均表现出明显的横向不均匀分布特征, 漾濞 $M_s6.4$ 地震位于高低异常值的过渡带附近, 震区南、北两侧速度结构和视密度分布特征各异, 综合说明了震区地壳物质存在显著的横向差异. 漾濞 $M_s6.4$ 地震序列集中分布在主震的 SE 侧, 并沿着 NW-SE 向呈条带状与维西—乔后断裂近似平行展布, 长约 20 km, 主震震源深度为 8.6 km, 序列震源深度优势分布层位在 5~15 km, 漾濞 $M_s6.4$ 地震序列处于高低速异常过渡带附近, 震区壳内介质结构的非均匀分布是控制漾濞地震及其序列展布形态的深部构造因素. 我们的研究结果还揭示了漾濞 $M_s6.4$ 地震震区北侧洱源附近存在地壳尺度的低速、低密度异常这一最显著特征, 该结果与该部位地表温泉较发育、大地热流值显著偏高等地热分布高度一致, 这些均暗示着漾濞地震机制除了与青藏高原东缘深部物质 SE 向逃逸有关外, 可能还与来自上地幔的热异常和深部过程密切相关.

关键词 漾濞 $M_s6.4$ 地震; 地壳速度结构; 地震活动; 深部孕震背景

doi:10.6038/cjg2021P0405

中图分类号 P315

收稿日期 2021-06-11, 2021-08-01 收修定稿

The characteristics of crustal structure and seismogenic background of Yangbi $M_s6.4$ earthquake on May 21, 2021 in Yunnan Province, China

LI DaHu^{1,2}, DING ZhiFeng³, WU PingPing³, LIU Shao², DENG Fei³, ZHANG Xu³, ZHAO Hang^{1,2}

1 Chengdu Institute of the Tibetan Plateau Earthquake Research, China Earthquake Administration
(Chengdu Base of China Seismic Experimental Site), Chengdu 610039, China

2 Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610039, China

3 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract We have fully collected the observational data of 634 stations (arrays) including Sichuan-

基金项目 国家自然科学基金(41974066), 国家重点研发计划(2020YFA0710600), 中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH20051)和四川省地震局地震科技创新团队专项(201804)共同资助.

第一作者简介 李大虎, 安徽灵璧人, 博士, 副研究员, 主要从事地震学和深部构造研究等工作. E-mail: lixiang2006@sina.com

Yunnan Regional Digital Seismic Network and “ChinArray Exploration-Southern Segment of the South-North Seismic Belt”, and obtained the crustal velocity structure characteristics in Sichuan-Yunnan region by using body wave tomography method. On this basis, the 3D P-wave velocity structure in and around Yangbi $M_s6.4$ earthquake region is analyzed and studied. Then, the 3D apparent density inversion of gravity data in Yangbi earthquake region and its surrounding area is carried out, and the lateral variation characteristics of apparent density in different depths of the crust are obtained. Finally, the relationship between crustal structure and seismicity, and the background of deep seismogenesis in Yangbi $M_s6.4$ earthquake region are analyzed. The results show that: the P-wave velocity structure and apparent density distribution characteristics of Yangbi earthquake region have good relationship and comparability in depth and zoning characteristics, and the inversion results of 3D velocity structure and apparent density show obvious lateral uneven distribution characteristics. The Yangbi $M_s6.4$ earthquake is located near the transition zone with high and low abnormal values. The distribution characteristics of velocity structure and apparent density are different on the north and south sides of the earthquake region, which indicates that there are significant lateral differences in the crust medium in the earthquake region. The Yangbi $M_s6.4$ earthquake sequence is mainly distributed in the southeast direction of the mainshock, it is a strip distribution in northwest-southeast direction along the Weixi-Qiaohou fault, with a length of about 20 km, and the dominant distribution layer of focal depth is 5~15 km. The Yangbi $M_s6.4$ earthquake and its sequence are located near the transition zone of high and low velocity anomalies. The inhomogeneous distribution of medium structure in the crust of the earthquake region is the deep structural factor controlling the distribution of Yangbi earthquake and its sequence. Our results also reveal the most significant feature of low velocity and low density anomalies near Eryuan, the north side of the Yangbi $M_s6.4$ earthquake region. The results are consistent with the geothermal distribution of the hot springs developed on the surface and the high geothermal flow value of the earth. These suggest that the mechanism of Yangbi earthquake is closely related to the thermal anomaly and deep process from the upper mantle, besides the southeast escape of the material in the eastern margin of the Tibetan Plateau.

Keywords Yangbi $M_s6.4$ earthquake; Crustal velocity structure; Seismicity; Deep seismogenic environment

0 引言

北京时间 2021 年 5 月 21 日 21:48:35.40, 云南省大理白族自治州漾濞彝族自治县发生了 $M_s6.4$ 地震(99.87°E, 25.67°N), 本次漾濞地震序列相对较为活跃, 截至 2021 年 5 月 22 日 08 时, 云南测震台网共记录到 $M_L \geq 0.0$ 地震 2368 次. 其中, $M_L < 2.0$ 的 2303 次, $M_L 2.0 \sim 2.9$ 的 34 次, $M_L 3.0 \sim 3.9$ 的 18 次, $M_L 4.0 \sim 4.9$ 的 9 次, $M_s 5.0 \sim 5.9$ 的 3 次, $M_s 6.0 \sim 6.9$ 的 1 次, 序列最大地震为 5 月 21 日 6.4 级主震. 据初步统计, 截至 22 日 06 时, 云南漾濞 6.4 级地震致死伤 30 人. 在漾濞 6.4 级地震发生的当晚, 云南省地震局地震应急响应现场工作队即奔赴灾

区, 根据《地震现场工作 第 3 部分: 调查规范》(GB/T18208.3-2011) 开展烈度调查工作, 通过对漾濞震区及周边 218 个调查点的灾损调查, 参照震区断裂构造展布、震源机制反演和地震序列并结合其他地震应急科技产品, 结合地表强震动仪器观测记录, 确定并编制完成了云南漾濞 6.4 级地震烈度分布图(yndzj.gov.cn/yndzj/_300559/_300651/629959/index.html)(云南省地震局, 2021), 漾濞 $M_s6.4$ 震区最高地震烈度为Ⅷ度, 大理州 6 县市均位于地震烈度为Ⅵ度区内.

漾濞 $M_s6.4$ 地震震区位于滇西地区, 从区域构造位置来看, 滇西地区地处青藏高原东南缘(图1), 是扬子地块、松潘—甘孜褶皱系、兰坪—思茅褶皱系的交汇区域, 使得该区具备了复杂的地震构造环境

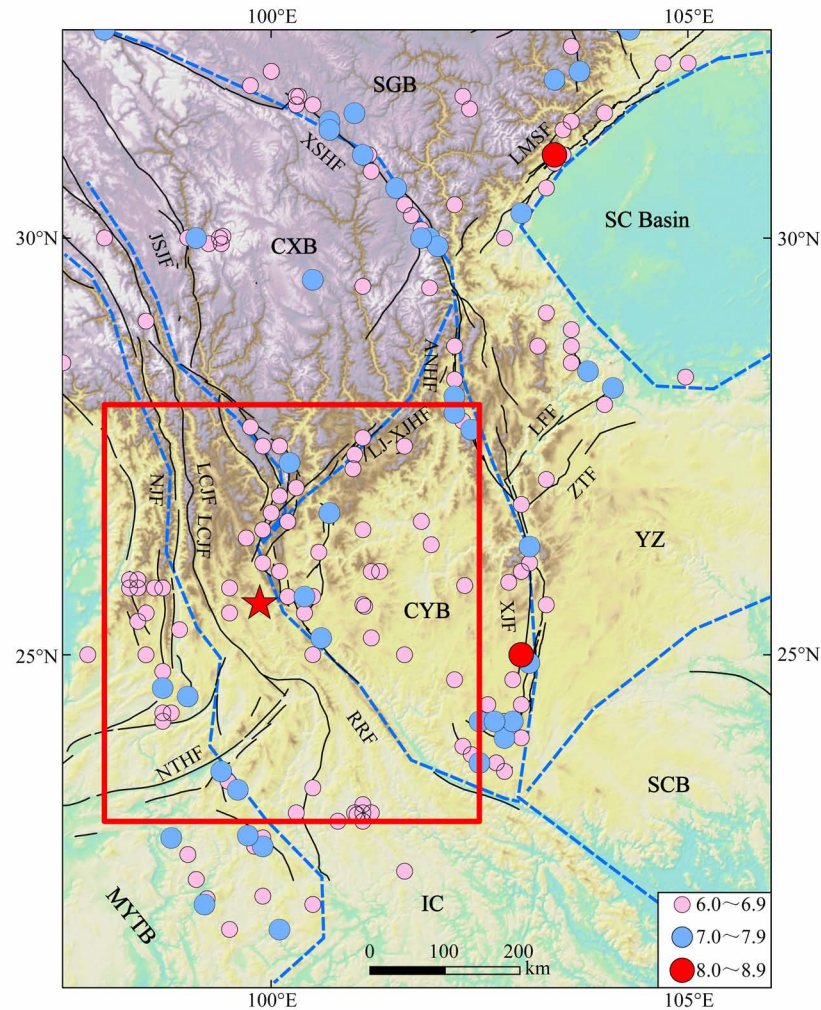


图1 青藏高原东南缘地形和构造概略图

红色五角星代表漾濞 $M_s6.4$ 主震位置。LMSF: 龙门山断裂; XSHF: 鲜水河断裂; ANHF: 安宁河断裂; NJF: 怒江断裂; LCJF: 澜沧江断裂; JSJF: 金沙江断裂; RRF: 红河断裂; NTHF: 南汀河断裂; LJ-XJHF: 丽江—小金河断裂; XJF: 小江断裂; LFF: 莲峰断裂; ZTF: 昭通断裂; YZ: 扬子克拉通; SCB: 华南地块; CXB: 川西北次级块体; CYB: 滇中次级块体; IC: 印支块体; MYTB: 滇缅泰块体; SC Basin: 四川盆地; SGB: 松潘—甘孜地块。

Fig. 1 Topography and tectonics of the southeastern Tibetan plateau

The red star denotes the location of the $M_s6.4$ Yangbi mainshock. The abbreviations are; LMSF: Longmenshan Fault; XSHF: Xianshuihe Fault; ANHF: Anninghe Fault; NJF: Nujiang Fault; LCJF: Lancangjiang Fault; JSJF: Jinshajiang Fault; RRF: Red River Fault; NTHF: Nantinghe Fault; LJ-XJHF: Lijiang-Xiaojinhe Fault; XJF: Xiaojiang Fault; LFF: Lianfeng Fault; ZTF: Zhaotong Fault; YZ: Yangtze Craton; SCB: South China Block; CXB: Chuanxibei Sub-block; CYB: Central Yunnan Sub-block; IC: Indochina Block; MYTB: Myanmar-Yunnan-Thailand Block; SC Basin: Sichuan Basin; SGB: Songpan-Garzê Block.

和频发的地震活动特征(白志明和王椿镛, 2003, 2004)。漾濞震区深大断裂带纵横交错, 地形与深部构造十分复杂, 震区主体由一系列褶皱带彼此交错、连接, 反映出错综复杂的构造特征, 发育众多规模不等的断陷盆地(图2)。漾濞震区及周边区域断裂主要呈近SN向或NE、NW向展布, 包括SN向的怒江断裂、澜沧江断裂、程海断裂, NE向的小金河—丽江断裂和南汀河断裂以及NW向的金沙江断裂和红河断裂等, 滇西地区被纵横交错的边界断裂划

分为若干块体, 如保山块体、腾冲块体、兰坪—思茅块体和滇中次级块体等构造单元(苏有锦等, 1999; 徐涛等, 2015)。近些年来, 滇西地区的地震活动性较强, 中强地震时有发生, 此次漾濞 $M_s6.4$ 地震的发生, 使得滇西地区内部及边界断裂带的深部孕震环境和潜在地震危险背景再次引起国内外地学工作者的关注。

近些年来, 国内外众多地学科研工作者利用多种地球物理手段, 围绕着滇西地区深部结构和孕震

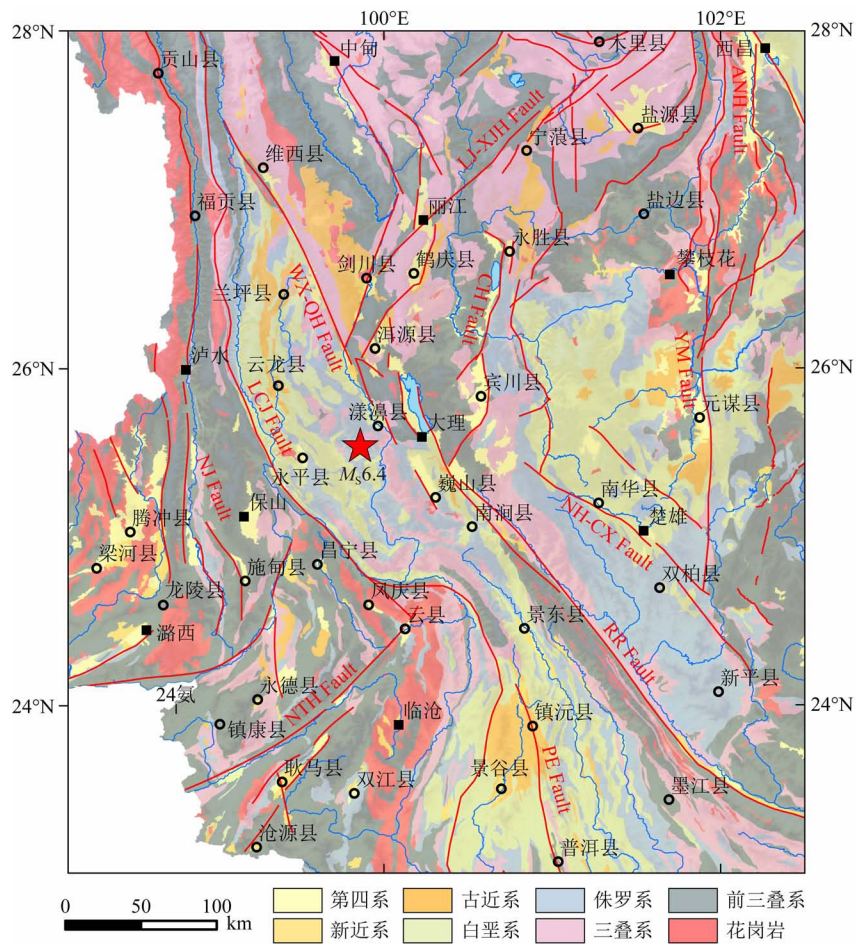


图 2 滇西漾濞 $M_s6.4$ 震区地构造背景图

LJ-XJH Fault: 丽江—小金河断裂; WX-QH Fault: 维西—乔后断裂; CH Fault: 程海断裂; NH-CX Fault: 南华—楚雄断裂; YM Fault: 元谋断裂; PE Fault: 普洱断裂; RR Fault: 红河断裂; NTH Fault: 南汀河断裂; NJ Fault: 怒江断裂; LCJ Fault: 澜沧江断裂; ANH Fault: 安宁河断裂.

Fig. 2 Seismotectonic setting of the Yangbi $M_s6.4$ earthquake region in western Yunnan

LJ-XJH Fault: Lijiang-Xiaojinhe Fault; WX-QH Fault: Weixi-Qiaohou Fault; CH Fault: Chenghai Fault; NH-CX Fault: Nanhua-Chuxiong Fault; YM Fault: Yuanmou Fault; PE Fault: Puer Fault; RR Fault: Red River Fault; NTH Fault: Nantinghe Fault; NJ Fault: Nuijiang Fault; LCJ Fault: Lancangjiang Fault; ANH Fault: Anninghe Fault.

背景开展了大量的研究工作,先后取得了一系列有意义的成果,包括深地震测深(王椿镛等, 2003; Wang et al., 2007; 徐涛等, 2014)、三维密度结构(杨文采等, 2015)、大地电磁 MT 测深(孙洁等, 1989; Bai et al., 2010; 于常青等, 2017)、地震层析成像(吴建平等, 2001; 王椿镛等, 2002; Huang and Zhao, 2006; Lei et al., 2009a; Wang et al., 2010; Yang et al., 2014; Huang et al., 2015; 高家乙等, 2016)、噪声成像(Yao et al., 2006, 2008; Yang et al., 2010; Li et al., 2014)以及接收函数研究(胡家富等, 2005; 李永华等, 2009; Liu et al., 2014; Bao et al., 2015)等.

徐涛等(2015)利用丽江—攀枝花—清镇剖面的人工源宽角地震数据重建该地区地壳速度结构,结

果表明攀枝花构造带 Moho 面呈局部上隆特征. Lei 等(Lei and Zhao, 2016; Lei et al., 2019)基于地震层析成像结果解释了滇西地区腾冲火山的深部动力起源和强震的孕育机制. 南华—腾冲剖面一维反演结果表明滇西地区上部地壳内普遍存在低阻层(孙洁等, 1989); Bai 等(2010)基于大地电磁探测结果揭示了两条巨大的中、下地壳低阻异常带,并认为青藏高原东南缘可能有两处下地壳流通道,沿着两个块体边界往 SE 方向延伸进入云南地区;盈江—姚安长周期大地电磁剖面也揭示了滇西三江地区普遍存在壳内低阻层,但沿剖面方向的埋深和厚度不一(于常青等, 2017). 然而,也有学者提出来自青藏高原东缘的下地壳流被小金河—丽江断裂阻隔,仅到达云南北部地区(Chen et al., 2013). 因此,青藏高

原东南缘滇西地区是否存在下地壳管道流以及深部物质运移等科学问题仍尚无定论,加之此次漾濞 $M_s6.4$ 地震震区地处高山峡谷,且震后科学考察也没有发现明显的地震地表破裂带,这就给直接探讨发震机理和破裂过程的深部成因带来了困难,漾濞地震复杂的发震构造背景和频繁的地震活动原因仍不清楚。

强震的孕育和发生是在地球深部发生的动力过程或构造运动,并与壳幔深部物性结构及动力学环境有着密切的关系(丁志峰,2011)。因此,本文分别采用地震体波层析成像(TOMO3D)和三维视密度反演方法,先后反演获得云南漾濞 $M_s6.4$ 地震震区及周边的三维 P 波速度结构和视密度横向展布信息,综合分析漾濞 $M_s6.4$ 地震震区地壳结构特征与地震活动关系、深部孕震环境等科学问题。该研究成果对于理解滇西地区地震孕育的深部动力机制、科学研判该区域地震活动趋势和潜在的地震危险性,为尽可能减轻地震灾害风险提供指导和依据。

1 地震数据与成像

本文收集了由科技部公益性行业科研专项资助,布设在青藏高原东南缘、川滇区域的 356 个中国地震科学台阵探测 I 期(又称“喜马拉雅计划项目”)的观测数据(ChinArray DMC, doi:10.12001/ChinArray.Data)和四川、云南等区域测震台网以及四川芦山地震科考台站和西昌流动观测台站等所记录的波形数据,台站的位置分布如图 3 中的所示(红色三角形表示四川、云南等数字测震台,蓝色正方形为中国地震科学流动台阵探测项目 I 期台站)。高密度的台站(阵)覆盖,面状铺设以及密集的地震射线分布为使用体波层析成像方法研究该地区的地壳结构提供了绝佳的条件。反演用到的观测数据源于四川、云南及其周边区域地震台网,还有中国地震科学探测流动台阵等共计 634 个台站,经筛选后共计近震事件 18530 个和远震事件 754 个(图 3)。首先,为了保证区域震 P 波数据的准确性和可靠性,我们按照震中距-走时关系曲线筛选 P 波数据。其次,为了确保地震资料具有较高的信噪比,我们选取震级均 ≥ 5.0 且震中距 $30^\circ \leq \Delta \leq 90^\circ$ 的远震事件,所选取的这些远震事件均被 20 个以上的地震台站(阵)记录到。

本文采用了 Zhao 等(1994)提出的体波层析成

像方法(TOMO3D)来反演三维 P 波速度结构,分析和探讨云南漾濞 $M_s6.4$ 地震震区及其周边的地壳速度结构特征。该成像方法即在三维空间范围内,速度值是可以任意变化的,待求解的是三维空间网格节点上速度扰动未知量。在射线追踪过程中对 Um 和 Thurber (1987)提出的近似弯曲算法进行了改进,迭代地应用伪弯曲技术和斯奈尔定律进行三维射线跟踪,使之适用于复杂的速度间断面存在的情况,在反演过程中,采用带阻尼因子的最小二乘反演方法(least squares QR factorization, 简称为 LSQR)(Paige and Saunders,1982)求解大型稀疏的观测方程组,且阻尼满足了模型和数据方差均为最小。

2 反演结果可靠性分析

2.1 检测板测试

为了测试速度结构的可靠性,我们对反演结果进行了检测板测试。先建立三维网格节点,将 $\pm 3\%$ 的扰动值加在一维初始速度模型之上,然后,根据网格划分大小、 $\pm 3\%$ 速度扰动值的棋盘模型正演计算,最后,再结合选择的初始速度模型进行反演计算(Zhao et al.,1994;丁志峰,1999)。图 4 是此种组合方式下不同深度上的水平检测板测试结果,结果表明漾濞 $M_6.4$ 地震震区及周边不同深度层的扰动幅度恢复较好。

2.2 射线密度分布

射线密度分布情况同样可以作为衡量反演结果可靠性的一种手段。地震射线密度分布情况对最终反演结果的可靠性影响较大,地震射线较为密集的地区,其反演结果的可靠性相应地就会较高。从图 5 中可以看出,漾濞 $M_s6.4$ 地震震区及周边绝大部分区域中上地壳范围内射线密度在 6000~10000 条之间,下地壳范围穿过震区周边的射线密度也在 1500~4500 条之间,密集的射线分布也说明了我们的成像结果在该区具有较高的可靠性。

3 P 波速度结构特征

2021 年 5 月 21 日漾濞 $M_s6.4$ 地震及其序列主要发生在维西-乔后-巍山断裂西南侧,由于震区构造较为复杂且震后的地震现场科考资料并未发现同震地表破裂现象,鉴于此,我们重点剖析和研究云南漾濞 $M_s6.4$ 地震震区及其周边区域的三维 P 波速度结构。图 6 给出了漾濞震区及周边地壳 1~50 km

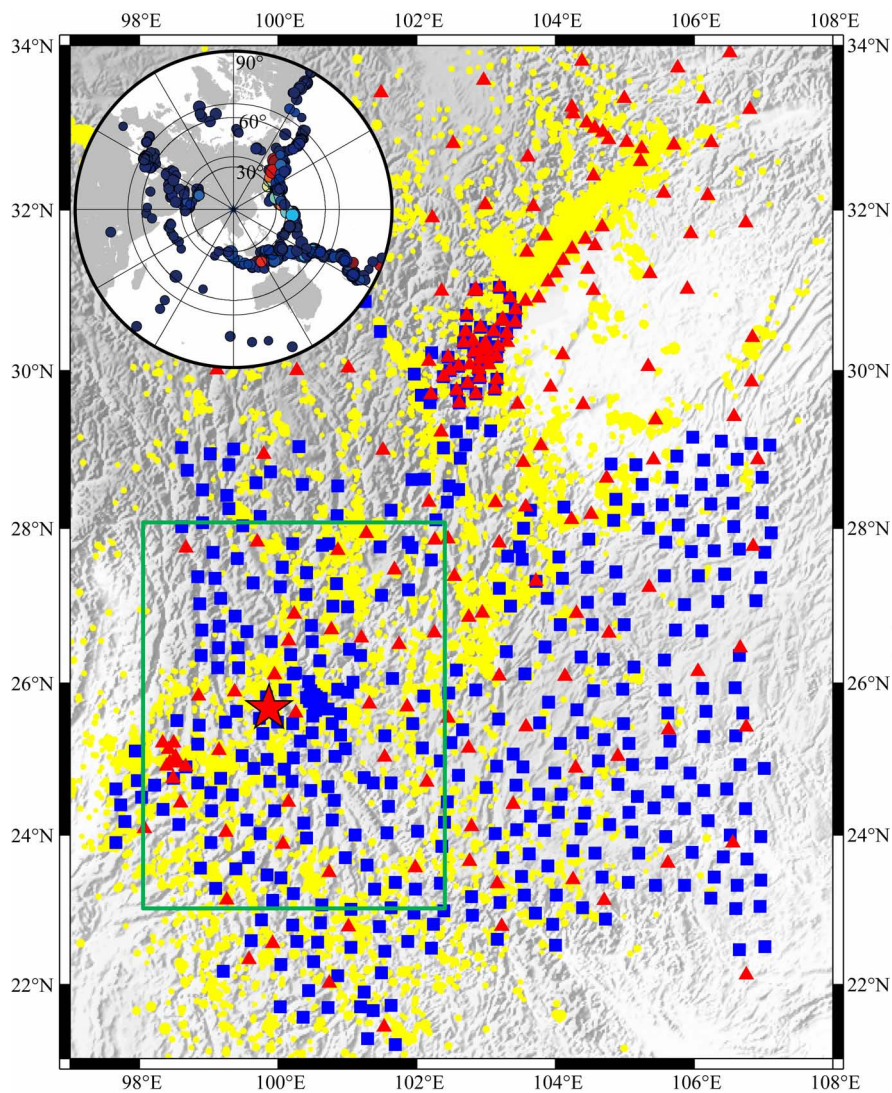


图3 区域数字测震台站、密集流动地震台(阵)分布和地震事件位置
 红色三角形代表区域固定台站,蓝色正方形代表流动地震台阵,黄色圆圈代表事件分布,
 红色五角星代表漾濞 $M_s6.4$ 主震位置,绿色边框代表研究区范围。

Fig. 3 Distribution of regional digital seismic stations, dense mobile seismic stations (arrays) and location of seismic events

The red triangle denotes the regional fixed station, the blue square denotes the mobile seismic array, the yellow circle denotes the distribution of seismic events, the red star denotes the location of the $M_s6.4$ Yangbi mainshock, and the green frame denotes the scope of the study area.

范围内的三维 P 波速度异常分布图,可以看出漾濞震区及其周边三维壳内 P 波结构横向不均匀展布,说明了震区地壳物质存在显著的横向差异。

其中,1 km 速度结构分布图可以看出, $M_s6.4$ 漾濞震区及周边表现为不同规模的高低速相间的分区特征,其中低速异常主要分布震区以南的维西、剑川、洱源等第四纪盆地,腾冲地区也表现为低速异常分布特征,以往研究结果也表明腾冲地区浅层的地壳结构低速特征明显(曹令敏等,2013)。漾濞震区北侧的兰坪—云龙地区,区域地质资料显示兰坪盆地

沉积地层主要为三叠系、白垩系和侏罗系等海相地层,故高速异常与这些地层岩性关系密切,位于滇中块体内部的攀枝花构造带高速异常较为显著。漾濞 $M_s6.4$ 震区西南侧的保山—施甸区域表现为高速异常分布,根据区域地质资料显示,该区域内广泛出露前海西期、海西—印支期、燕山期和喜马拉雅期花岗岩类岩石(陈福坤等,2006;董美玲,2016),推测这些中高阻体可能与花岗岩类存在有关,我们的反演结果也得到了盈江—姚安宽频大地电磁反演结果的证实(于常青等,2017),且该高速异常向下延展深度

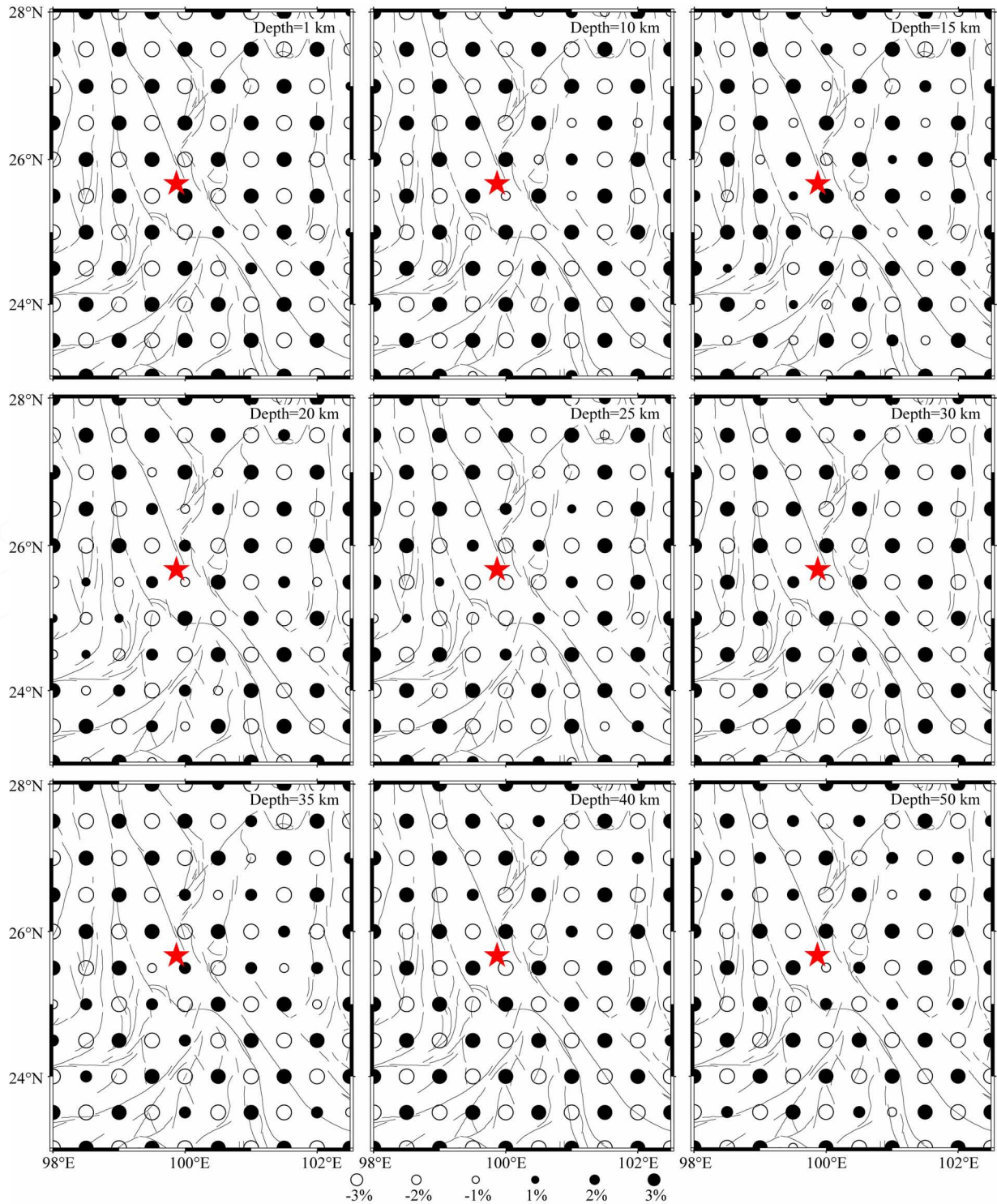


图 4 不同深度分辨率测试结果

红色五角星代表漾濞 $M_s6.4$ 主震位置.

Fig. 4 The checkerboard resolution test at different depths

The red star denotes the location of the Yangbi $M_s6.4$ mainshock.

可达 15 km.

10 km 深度处, $M_s6.4$ 漾濞震区及其周边上地壳速度结构依然呈现出明显的横向不均匀分布特征,震区南、北两侧速度结构特征各异.其中,低速异

常主要分布在震区北侧的维西—乔后断裂和中甸—龙蟠—乔后断裂之间,而高速异常则分布在震区以南.2021年漾濞 $M_s6.4$ 地震位于高低速异常的过渡带附近,这种震区特有的速度结构特征也在以往四

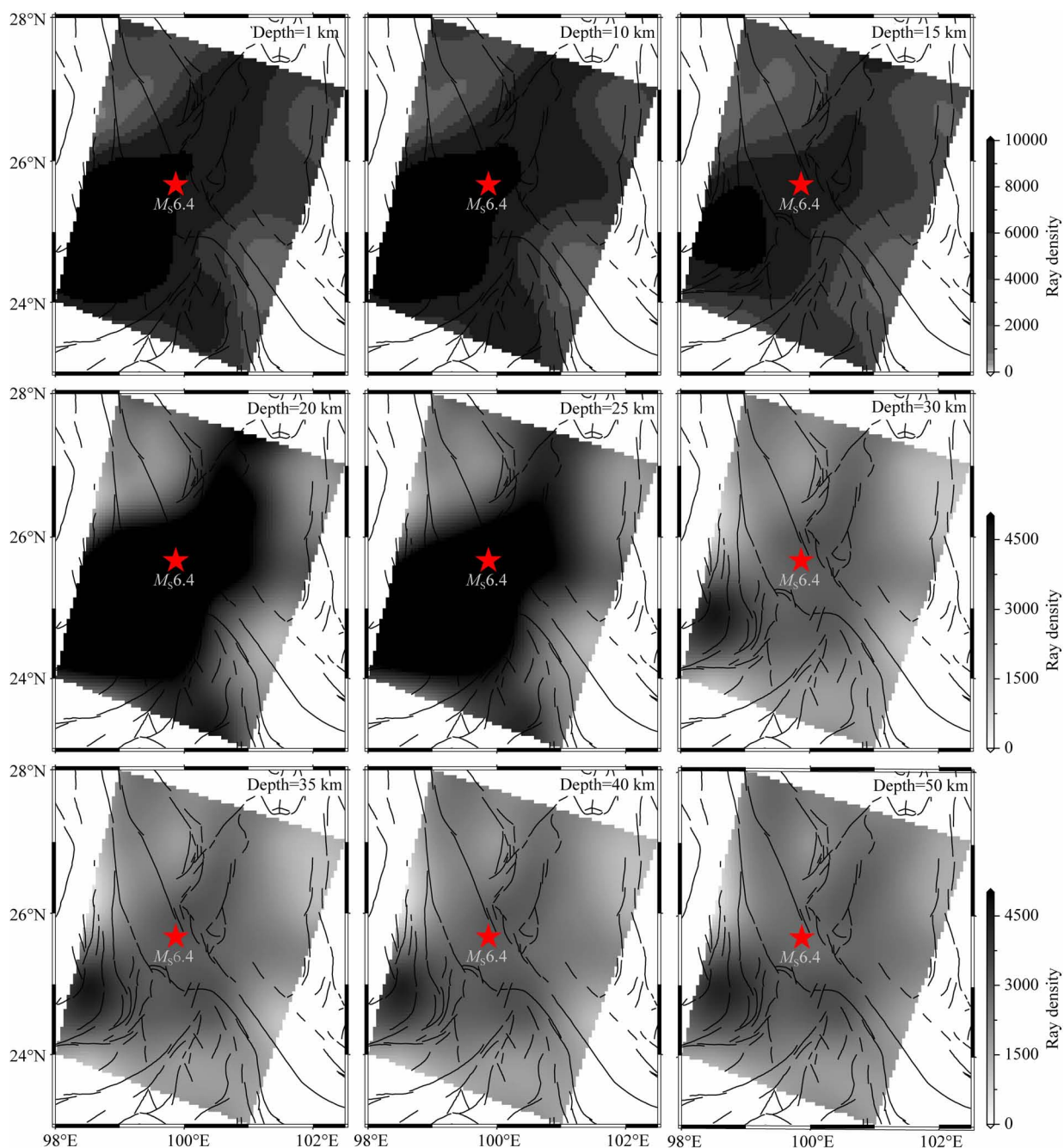


图 5 研究区域 P 波射线分布图

红色五角星代表漾濞 $M_s6.4$ 主震位置.

Fig. 5 Distribution of P-wave ray paths in the study area

The red star denotes the location of the Yangbi $M_s6.4$ mainshock.

川芦山 $M_s7.0$ 地震、云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震等多次强震的研究中得到体现(李大虎等, 2015, 2019). 15 km 深度处的漾濞震区及周边速度异常分布形态和展布范围均有所改变, 位于川滇菱形块体西北部的中甸构造带表现出大规模的低速异常分布特征, 腾冲地区存在大范围低速异常分布. 杨文采等(2015)基于小波变换多尺度分析和密度反演方法获得的滇西区域上地壳密度扰动图像结果也表明中甸构造

带、维西—乔后断裂和腾冲地区存在低密度异常展布. 华雨淋和吕彦(2019)速度成像结果显示腾冲火山地区地壳内存在明显的地震波低速区, P 波速度比整个区域地壳速度平均值低超过 15%, 并推测腾冲火山地区存在较大规模的地幔热物质上涌以及向地壳的侵入. 我们的结果还揭示了金河—箐河断裂带以西、丽江断裂带以东的永胜—宁蒗构造带低速异常分布也逐渐明显, 已有重力异常和大地电磁测

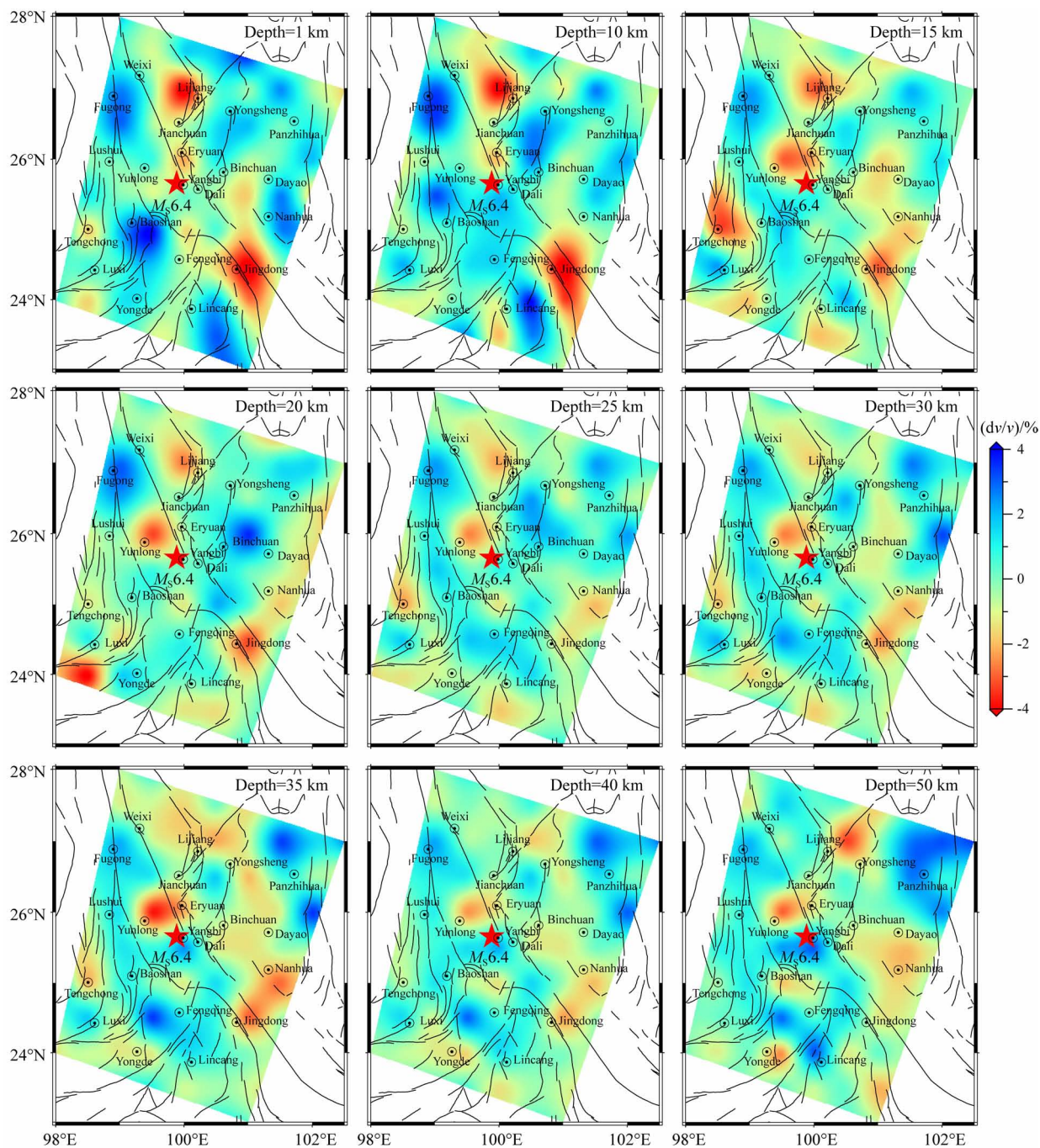


图6 不同深度层的 P 波速度扰动

图中黑线为区内主要断裂,红色星号代表漾濞 $M_s6.4$ 主震.

Fig. 6 The images of P wave velocity disturbance at different depths

Black lines denote main faults in the study region, red star denotes the Yangbi $M_s6.4$ mainshock.

深结果表明永胜—宁蒗构造带内密度和电阻率变化明显,在横向上表现出分块特性,地壳内主要以低值异常为主,这一介质特性与我们速度结构所揭示的低速异常展布特征相一致(杨文采等,2015;罗愫等,2020).

随着反演深度的增加,漾濞震区及周边地壳速度结构分布特征呈现一定的趋势性变化,20 km 和

25 km 深度图均显示了震区北侧、来自川滇菱形块体西北部的低速异常向西南扩展并越过维西—乔后断裂到达玉龙附近,该低速异常也得到了以往地震学成像研究结果的支持(王椿镛等,2002;徐涛等,2014; Bao et al., 2015),同时大地电磁测深结果也表明该区深部发育有大范围且近水平状赋存的低阻层(孙洁等,1989;李文军等,2016).震区以南的兰

坪—思茅地块永平—巍山的高速异常特征依旧存在,并随着反演深度的增加愈发明显,30~50 km 深度处的 P 波速度结构反映漾濞震区以南下地壳的速度结构特征,于常青等(2017)电性结果揭示该区内下地壳上地幔未发现明显的低阻异常,电阻率最高达到上千欧姆米,为兰坪—思茅块体内部的永平—巍山等区域存在的壳幔高阻异常块体。

4 三维视密度反演

为了揭示云南 $M_s6.4$ 漾濞震区地壳不同深度处视密度的横向展布特征,分析漾濞地震震区的介质特性和孕震背景,我们采用一种基于场分离和延拓的三维视密度反演方法.该反演方法不但在很多非震区的重力数据处理和地壳结构研究中均取得较好效果(Pawłowski, 1995; Fedi and Florio, 2002; Cooper, 2004; 徐世浙等,2007,2009;杨金玉等,2008),而且在研究一些强震区(如鲁甸 $M_s6.5$

地震、康定 $M_s6.3$ 地震)的深部孕震背景和动力机制方面也逐渐得到了广泛的应用(李大虎等,2015, 2019)。

图 7 显示了 $M_s6.4$ 漾濞震区不同深度层的视密度反演结果,可以看出,P 波速度结构与视密度展布特征在深度和分区特征上均具有较好的联系和可比性,如 5 km 深度图可知滇中块体内部攀西构造带近似 NS 向的轴部地区相对视密度高值异常特征显著,而川滇菱形块体西北部的中甸构造带和维西—乔后断裂则出现了明显的条带状视密度低异常区,盐源、宁蒗盆地则显示出低密度异常分布特征,腾冲地区也存在低速异常分布,已有研究结果也表明了这一点(楼海等, 2002; Lei et al., 2009a; 杨晓涛等, 2011; 胥颐等, 2012, 2013).从 10 km 深度图上可以看出,攀西构造带高密度异常依然存在,本次漾濞 $M_s6.4$ 地震位于高低视密度异常的过渡带附近,漾濞震区以北的维西—乔后断裂和中甸构造带区域依旧表现出条带状圈闭的低值异常,杨文

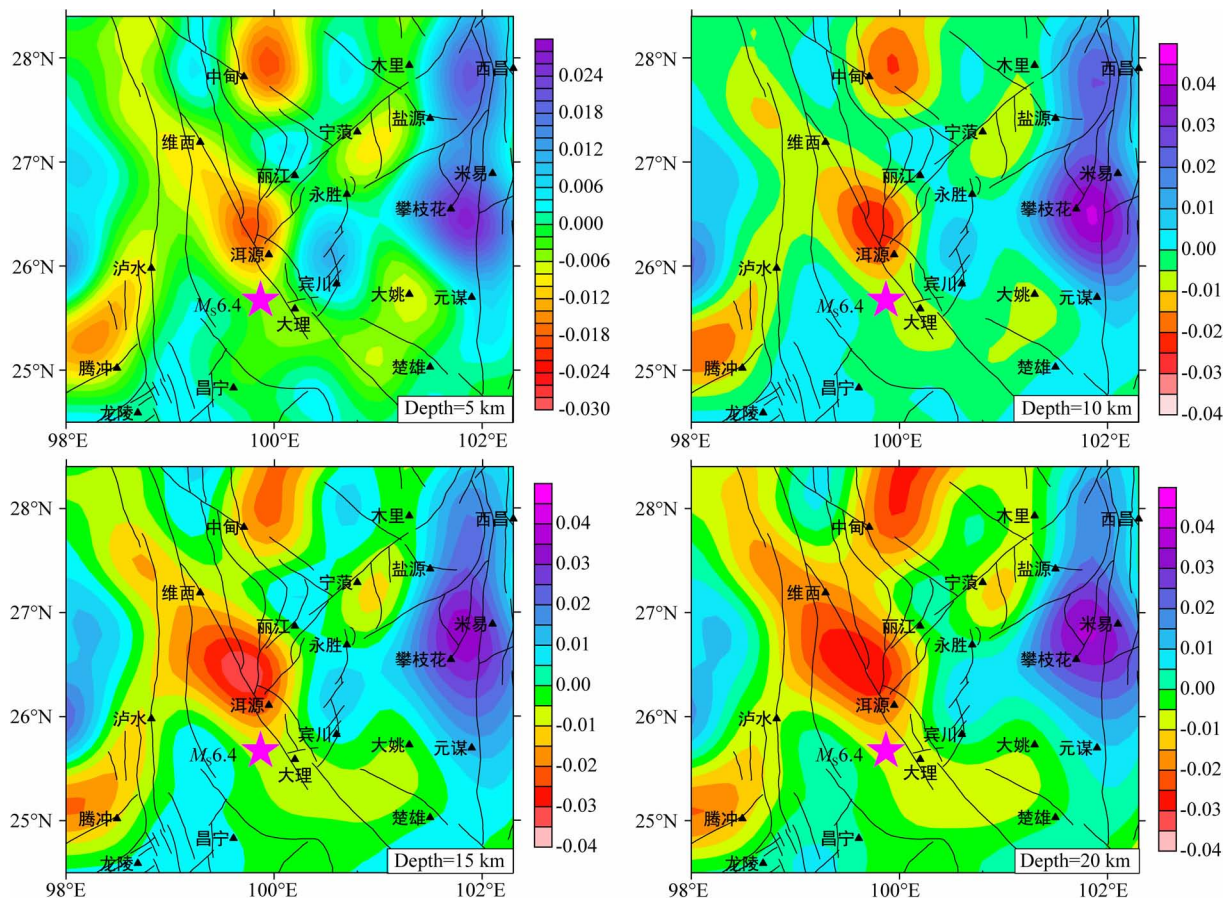


图 7 震区不同深度的三维视密度反演图

图中星号代表漾濞 $M_s6.4$ 主震。

Fig. 7 The figures of 3D apparent density inversion at different depths

The star denotes the Yangbi $M_s6.4$ mainshock.

采等(2015)认为该低密度扰动带沿着扬子克拉通西外缘和红河断裂带展布,反映了扬子克拉通与印支地块碰撞带地壳的碎裂,导致上地壳结晶基底密度的降低(程裕祺,1994;滕吉文等,2004).

随着反演深度的增加,漾濞震区壳内视密度异常分布特征呈现出趋势性变化,15 km 水平层的视密度信息切片图表明了震区北侧及南侧腾冲地区低密度异常分布范围扩大,这与我们反演获得的漾濞 $M_s6.4$ 地震震区三维 P 波速度结构所揭示的低速异常展布相一致. 总体呈 NS 向展布排列的相对高密度异常代表了攀西构造带的地壳内部存在着高密度的坚硬岩体,这点同样已得到高波速结构和高磁化强度等物性特征的支持(李大虎,2016). 20 km 深度处,漾濞震区北侧整体上表现出低值异常分布特征,并形成了明显的维西—乔后—洱源低密度中心带,震区壳内块体介质强度的横向变化导致了震源区应力积累的不均一性,

在构造应力作用下易于破裂,为此次 $M_s6.4$ 地震的发生提供了深部孕震条件. 本文的三维 P 波速度结构和视密度反演结果均揭示了震区以北存在低速、低密度的异常分布,漾濞 $M_s6.4$ 地震震源体处于相对较为脆硬的上地壳范围内.

5 讨论

5.1 速度结构特征与地震序列分布

为了进一步揭示漾濞 $M_s6.4$ 地震震区速度结构特征与地震序列分布之间存在的关系,我们基于云南数字测震台网记录的震后 3 天的地震观测数据,完成了 2021 年 5 月 21 日漾濞 $M_s6.4$ 地震序列的重定位工作,获得了 415 个 $M_L \geq 1.0$ 余震的精确位置,并绘制了定位后的漾濞地震序列分布图(图 8). 从图中可以看出该地震序列集中分布在主震的 SE 侧,并沿着维西—乔后断裂呈 NW 向条带状分

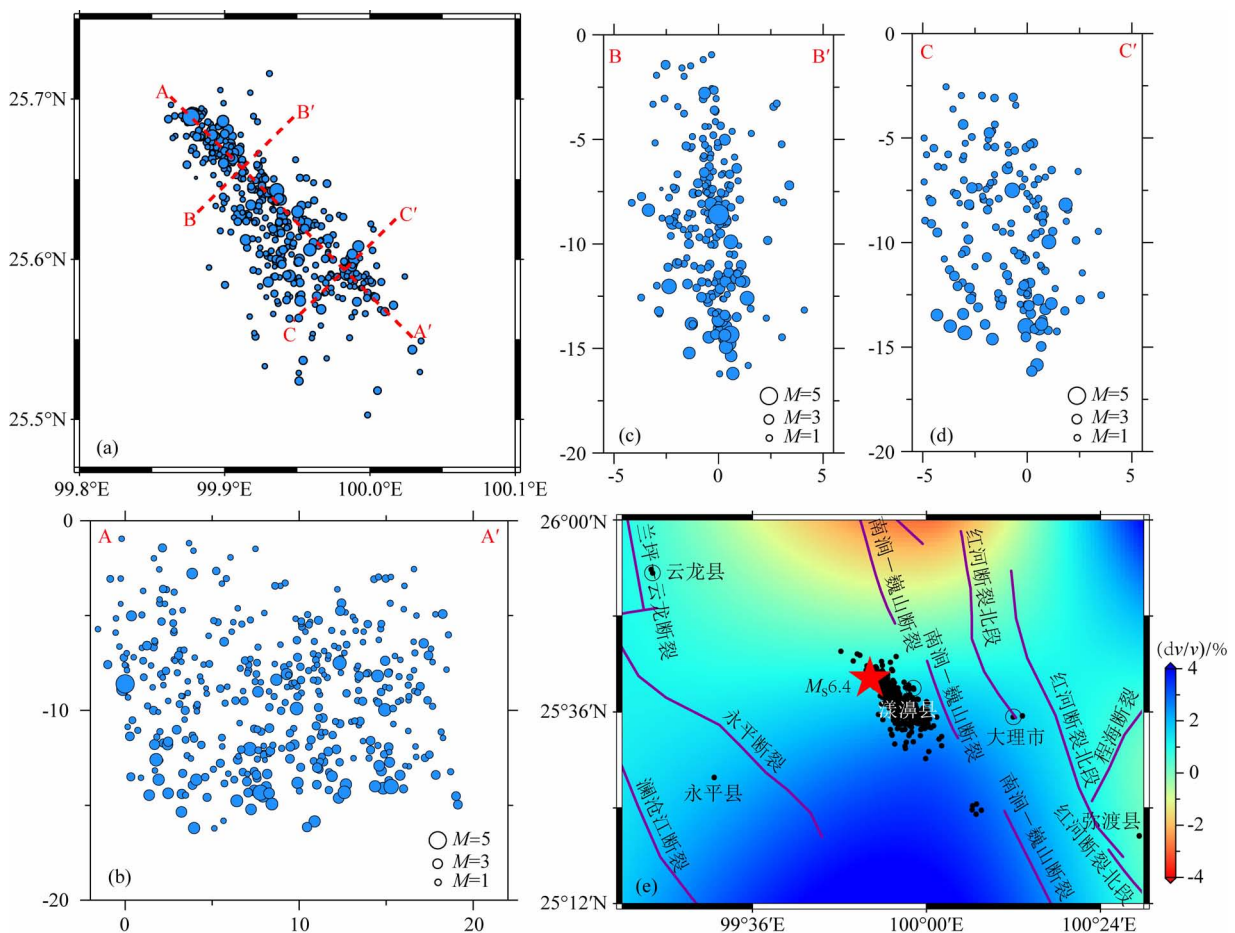


图 8 地震序列平面图、剖面图以及震区速度结构与序列分布关系

(a) 定位后震中分布图; (b) A—A' 剖面; (c) B—B' 剖面; (d) C—C' 剖面; (e) 震区速度结构与序列分布关系.

Fig. 8 (a) Distributions of epicenter after precise relocation and the (b) A—A', (c) B—B', (d) C—C' profile, and (e) the relationship between velocity structure and sequence distribution in earthquake region

布,长约 20 km,主震震源深度为 8.607 km,与龙锋等(2021)获得的主震重新定位结果基本一致.且序列震源深度优势分布层位在 5~15 km,地震事件主要发生在上地壳范围内.再综合地震矩张量反演和震源机制解等地震应急科技支撑结果(<http://www.cea-igp.ac.cn/kydt/278248.html>),表明此次地震的断层面走向为 320° 左右,倾向 SW,维西—乔后—巍山断裂北端自巴迪以北,向南东经维西、马登、乔后至平坡,后分为两支,东支经大麦地与红河断裂带相接,西支延伸至巍山一带,区内长 220 km,总体走向 NNW,SW 倾为主,陡倾角.已有震源机制解研究表明,2017 年 3 月 27 日漾濞 $M_s5.1$ 及 $M_s4.8$ 地震的发震构造为维西—乔后断裂(潘睿等,2019),古地震研究结果表明了维西—乔后断裂自晚更新世以来发生过多处破裂至地表的强震事件(Chang et al.,2018),尤其是近些年来,维西—乔后断裂及周边区域的断层上接连发生过多处 $M_s5.0$ 以上的中强地震,如 2013 年洱源 $M_s5.5$ 、 $M_s5.0$ 地震(赵小艳和付虹,2014)和 2016 年云龙 $M_s5.0$ 地震(Jiang et al.,2019).漾濞 $M_s6.4$ 地震发生后的震后应急科考工作并未发现地震地表破裂带,震区地震序列展布与壳内断裂深部介质结构及构造背景关系如何,仍是一个值得研究的科学问题.

综合三维 P 波速度结构和地震序列展布研究结果可以看出,漾濞 $M_s6.4$ 地震序列的空间分布特征与震区上地壳介质速度结构存在密切关系.漾濞 $M_s6.4$ 地震震区及其周边上地壳速度结构依然呈现出明显的横向不均匀分布特征,震区南、北两侧速度结构特征各异.其中,低速异常主要分布在震区北侧,而高速异常则分布在震区以南.我们又截取了 10 km 深度处漾濞震源区局部速度结构图,该图显示漾濞 $M_s6.4$ 地震发生在高、低速异常过渡带附近(图 8e),这种介质物性发生变化的边界带可能是中强地震孕育和发生的有利部位.漾濞地震序列总体上也位于高、低速异常过渡带附近,因此,漾濞 $M_s6.4$ 地震震区壳内介质结构的非均匀分布是控制漾濞地震及其序列展布形态的深部构造因素.

5.2 漾濞震区的深部孕震背景

漾濞 $M_s6.4$ 地震震区位于青藏高原东南缘滇西三江构造带,属于喜马拉雅造山带的一部分(陈炳蔚等,1987),国内外许多学者通过地质和不同地球物理方法研究该区地壳深部结构,并推测出了青藏高原东南缘滇西三江地区存在壳内物质流(Royden et al.,1997; Clark and Royden,2000; Beaumont et al.,

2004; Unsworth et al.,2005; Schoenbohm et al.,2006).滇西地区的宁蒗、腾冲、龙陵、盈江和洱源等地接连发生多次 5.0 级以上地震,表明该地区确实是一个构造活动强烈、地震活动频繁且变形复杂的区域,对该区地壳结构特征的研究可为地震构造环境评价和地震活动趋势分析提供科学的深部资料.

漾濞 $M_s6.4$ 地震震区的三维 P 波速度结构显示震区地壳物质存在显著的横向差异,且震区北侧中甸构造带区域在 15~20 km 深度范围存在低速异常展布,维西—乔后断裂是红河断裂 NW 向的延伸,再往北与金沙江大断裂相接,共同构成川滇菱形块体的南西边界(汤沛和常祖峰,2013),而中甸—龙蟠断裂北起中甸以北,向南经小中甸、龙蟠、剑川,止于乔后.基于本文所获得的速度结构结果,我们认为中地壳低速层的存在,为川西北次级块体内部青藏高原弱物质向南运移的通道,低速物质在该处穿过维西—乔后断裂并散布于断裂下方地壳深度范围内.我们的三维视密度反演结果还表明,漾濞 $M_s6.4$ 地震位于高低视密度异常的过渡带附近,漾濞震区以北的维西—乔后断裂和中甸构造带表现出条带状圈闭的低值异常,也说明了该区中地壳物质相对较为软弱.由于该区中上地壳存在三条低密度的扰动带已成普遍认识,如对滇西地区的重力数据进行小波多尺度分解和反演获得的地壳三维密度结构也揭示了这一点(杨文采等,2015), $M_s6.0$ 以上的强震常常位于密度较低的异常区或异常区域边界,上地壳的破裂与具备低密度异常的中下地壳物质蠕动能有关联.由于造成地壳内部低密度异常的原因存在多种可能性,如温度变化、压力变化、岩性变化及流体物质增加等,温度的变化或流体物质增加,不但会造成岩石密度的降低,而且也会刺激地壳内部物质产生蠕动,因此地壳内部存在的低密度异常可能与物质蠕动有一定的关联性,下地壳的软弱物质运移有可能会引起中强地震发生,中下地壳的密度扰动结果图揭示物质流变蠕动上方对应地震活动区带,据此推测 6 级以上地震震中都位于地壳低密度的新生代活动带,也可能与青藏高原下地壳管道流的位置相吻合(杨文采等,2015).由于大地电磁测深(MT)方法对深部介质电导率变化反映最灵敏、分辨力较高(徐常芳,1997),目前已被广泛应用于地震构造区的孕震背景、断裂带介质属性的探测研究(赵国泽等,1998; Ogawa et al.,2001; Chen et al.,2002; Unsworth et al.,2004; 詹艳等,2008,2013; Becken et al.,2011),如果地壳低密度异常区反映

中生代地壳物质蠕变有关的区段,那么这里也应该是地壳低电阻率的异常区(杨文采等,2015).据已有的大地电磁测深结果表明,位于川西北次级块体内部的中甸构造带存在大范围分布的低阻层(孙洁等,1989;李文军等,2016),这与本文所揭示的中甸地区展布的低速、低密度异常范围基本一致.当来自于川西北次级块体内部的低速、低密度物质向 SW 运移过程中,会影响到维西—乔后断裂及其伴生构造的结构组成和属性并降低其断层本身强度,区域应力场的改变导致维西—乔后断裂及其伴生构造应力出现集中、破裂,这可能是漾濞 $M_s6.4$ 地震孕育和发生的深部构造背景和动力学成因.

除此之外,考虑到漾濞震区北侧洱源—下关等地的地表温泉较发育、大地热流值显著偏高等地热分布以及上地幔 P 波速度结构等研究结果(王云等,2018;赵慈平等,2014;李其林等,2019;Nie et al., 2021),我们又沿着维西—乔后断裂(140°)和斜交维西—乔后断裂(40°)分别绘制了两条穿过漾濞主震的速度结构和视密度结构剖面图(图 9),NW-SE 剖面显示出漾濞 $M_s6.4$ 地震震区 NW 侧存在地壳尺度的低速、低密度异常这一最显著特征,漾濞主震位于高低速、高低视密度过渡带附近;SW-NE 剖面同样揭示了漾濞 $M_s6.4$ 地震震区 NE 侧存在地壳尺度的低速、低密度异常分布,且低值异常在 15 km 深度附近尤为明显,据已有的云南思茅—中甸地震剖面的地壳结构结果表明,剖面右所—中甸地区存在的强反射同相轴是低速异常区底部的强反射,该低速异常区可能是深部上涌的岩浆囊(张智等,2006).上地幔局部熔融引起软流圈上涌可使大量的幔源流体运移到中下地壳,同时伴随有热量的运输,形成富含流体的中下地壳高温异常区或高导低速层(Gold and Soter, 1984; Italiano et al., 2000).

上地壳中活动断裂和火山通道等构造的存在,为深部热和流体向地表运移起通道作用,造成上地壳浅层地热异常呈带状或区域性分布.赵慈平等(2014)认为这是地热异常区内岩浆的存在导致上部地壳与下覆壳幔充分解耦,在区域应力场的作用下引起上部地壳应力集中,同时地热流体活动使断层更容易错动而发生地震.王云等(2018)通过 He 同位素的时空变化特征研究青藏高原东南缘地热与地震活动,认为由深部流体活动导致震源区热状态的改变是触发大地震的关键因素.Nie 等(2021)研究结果表明震区及周边的上地幔 Pn 波速度较低,暗示着该区的岩石圈地幔相对较薄.雷兴林等(2021)基于震源机制和应力场反演等资料认为地震活动的触发作用及其深部的流体运移推进或驱动了北西向主要断层的活动从而发生了主震,并提出寻找漾濞地震条带地震活动背后直接和间接的流体作用或者断层预滑的证据,将是深入研究的重点.我们的结果揭示了漾濞震区北侧低速、低密度异常可能与壳内流体的存在有关,流体存在有助于减小断裂强度和增强地震活动性.国内外强震区已有的研究成果也均表明了这一点(Sibson, 1992; Hickman et al., 1995; Zhao et al., 2002),如黄金莉和赵大鹏(2005)对首都圈地区强震发生的深部环境研究表明,多数大地震都发生在高速块体的边侧,而在震源区的下方存在明显的低速体分布,并认为这些低速异常与流体有关,下地壳中的流体容易引起中上地壳发震层的弱化和应力集中,使孕震断层易于破裂,从而发生大地震.Lei 和 Zhao (2009b)研究发现汶川主震震源区下方存在明显的低波速异常体,且这种低波速异常体散布于龙门山断裂带整个地壳深度范围内,暗示着流体作用于整个断裂带,并据此认为汶川地震的发生可能与沿龙门山断裂带上浸的下地壳流密切

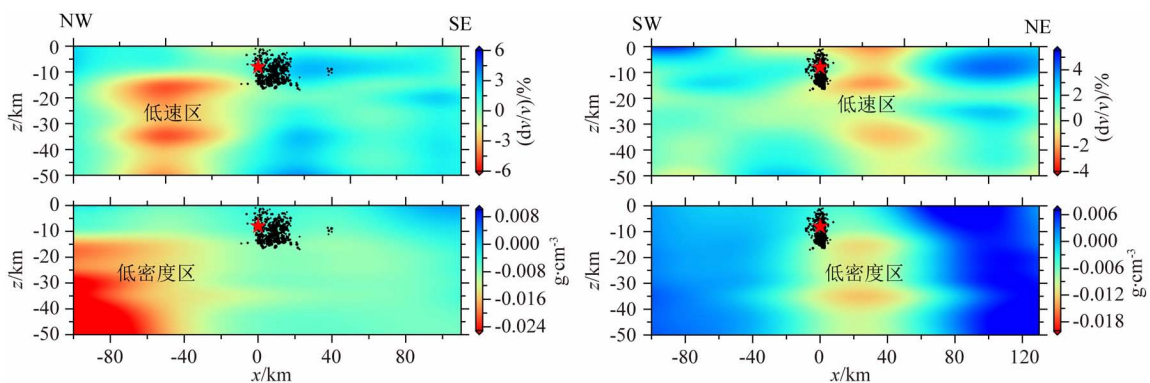


图 9 穿过漾濞震区的 NW-SE 剖面(140°)及 SW-NE 剖面(40°)

Fig. 9 The NW-SE profile (140°) and SW-NE profile (40°) that cross Yangbi earthquake region

相关。

综上,我们的研究结果揭示了漾濞 $M_s6.4$ 地震震区北侧洱源附近存在地壳尺度的低速、低密度异常这一最显著特征,该结果与该部位地表温泉较发育、大地热流值显著偏高等地热分布高度一致,这些均暗示着漾濞地震机制除了与青藏高原东缘深部物质 SE 向逃逸有关外,可能还与来自上地幔的热异常和深部过程密切相关。

6 结论

基于“中国地震科学台阵探测(ChinArray)南北地震带南段项目”(“喜马拉雅”项目 I 期)和四川、云南等区域数字测震台网所记录的波形数据,反演得到了 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 $M_s6.4$ 地震震区及周边三维 P 波速度结构,再结合壳内不同深度层的视密度横向展布特征,综合分析本次漾濞 $M_s6.4$ 地震震区地壳结构特征与地震活动关系、深部孕震环境等科学问题,具体结论如下:

(1)反演结果表明漾濞震区 P 波速度结构与视密度展布特征在深度和分区特征上均具有较好的联系和可比性,震区三维速度结构和视密度反演结果均表现出明显的横向不均匀分布特征,震区南北两侧速度结构和视密度分布特征各异,综合说明了漾濞震区地壳物质存在显著的横向差异。

(2)漾濞 $M_s6.4$ 地震序列集中分布在主震的 SE 侧,并沿着 NW-SE 向呈条带状与维西一乔后断裂近似平行展布,长约 20 km,震源深度优势分布层位在 5~15 km,漾濞 $M_s6.4$ 地震及其序列处于高低速异常过渡带附近,震区壳内介质结构的非均匀分布是控制漾濞地震及其序列展布形态的深部构造因素。

(3)研究结果还揭示了云南漾濞 $M_s6.4$ 地震震区北侧洱源附近存在地壳尺度的低速、低密度异常这一最显著特征,该结果与该部位地表温泉较发育、大地热流值显著偏高等地热分布高度一致,这些均暗示着漾濞地震机制除了与青藏高原东缘深部物质 SE 向逃逸有关外,可能还与来自上地幔的热异常和深部过程密切相关。

致谢 感谢日本东北大学赵大鹏教授提供的地震体波层析成像程序,感谢应急管理部国家自然灾害防治研究院刘耀炜研究员和中国地震局地质研究所詹艳研究员对文章给予的指导和帮助,三位审稿专家对本文提出了非常宝贵的修改建议,作者在此表示最衷

心的感谢。

References

- Bai D H, Unsworth M J, Meju M A, et al. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nature Geoscience*, 3(5): 358-362.
- Bai Z M, Wang C Y. 2003. Tomographic investigation of the upper crustal structure and seismotectonic environments in Yunnan province. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 25(2): 117-127.
- Bai Z M, Wang C Y. 2004. Tomography research of the Zhefang-Binchuan and Menglian-Malong wide-angle seismic profiles in Yunnan province. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 47(2): 257-267.
- 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.
- Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M H, et al. 2004. Crustal channel flows: 1. Numerical models with applications to the tectonics of the Himalayan-Tibetan orogen. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B6): B06406, doi: 10.1029/2003JB002809.
- Becken M, Ritter O, Bedrosian P A, et al. 2011. Correlation between deep fluids, tremor and creep along the central San Andreas fault. *Nature*, 480(7375): 87-90.
- Cao L M, Xu Y, Wu S G. 2013. Finite difference tomography of the crustal velocity structure in Tengchong, Yunnan province. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(4): 1159-1167, doi: 10.6038/cjg20130411.
- Chang Z F, Zhang Y, Chang H. 2018. New discovery of Holocene activity along the Weixi-Qiaohou fault in southeastern margin of the Tibetan Plateau and its Neotectonic significance. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(6): 2464-2465.
- Chen B W, Wang K Y, Liu W X, et al. 1987. Geotectonics of Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang Area (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House.
- Chen C C, Chen C S, Shieh C F. 2002. Crustal electrical conductors, crustal fluids and 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. *TAO*, 13(3): 367-374.
- Chen F K, Li Q L, Wang X L, et al. 2006. Zircon age and Sr-Nd-Hf isotopic composition of migmatite in the eastern Tengchong block, western Yunnan. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 22(2): 439-448.
- Chen Y, Zhang Z J, Sun C Q, et al. 2013. Crustal anisotropy from Moho converted Ps wave splitting analysis and geodynamic implications beneath the eastern margin of Tibet and surrounding regions. *Gondwana Research*, 24(3-4): 946-957.
- Chen Y Q. 1994. Regional Geology of China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House.
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 28(8): 703-706.

- Cooper G. 2004. The stable downward continuation of potential field data. *Exploration Geophysics*, 35(4): 260-265.
- Ding Z F. 1999. The theory and application of local earthquake tomography [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration.
- Ding Z F. 2011. China seismic science array exploration-South section of the North South seismic belt. *Seismic Science and Technology and International Exchange* (in Chinese), (2): 36-39.
- Dong M L. 2016. Study of magmatism in Tengchong-Baoshan block, western Yunnan and its tectonic implications [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Fedi M, Florio G. 2002. A stable downward continuation by using the ISVD method. *Geophysical Journal International*, 151(1): 146-156.
- Gao J Y, Li Y H, Xu X M, et al. 2016. P-wave crustal velocity structure and seismicity in Yunnan area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 31(2): 508-516, doi: 10.6038/pg20160202.
- Gold T, Soter S. 1984. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 122(2-4): 492-530.
- Hickman S, Sibson R, Bruhn R. 1995. Introduction to special section: Mechanical involvement of fluids in faulting. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B7): 12831-12840.
- Hu J F, Zhu X G, Xia J Y, et al. 2005. Using surface wave and receiver function to jointly inverse the crust-mantle velocity structure in the West Yunnan area. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 48(5): 1069-1076.
- Hua Y L, Lü Y. 2019. Double differential tomography of the Tengchong volcano and adjacent areas. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 62(8): 2982-2990, doi: 10.6038/cjg2019M0269.
- Huang J L, Zhao D P. 2005. The 3D P-wave velocity structure and strong earthquake pregnant deep tectonic environment of crust in the capital area fine. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 50(4): 348-355.
- Huang J L, Zhao D P. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B9): B09305, doi: 10.1029/2005JB004066.
- Huang Z C, Wang P, Xu M J, et al. 2015. Mantle structure and dynamics beneath SE Tibet revealed by new seismic images. *Earth and Planetary Science Letters*, 411: 100-111.
- Italiano F, Martelli M, Martinelli G, et al. 2000. Geochemical evidence of melt intrusions along Lithospheric faults of the Southern Apennines, Italy: Geodynamic and seismogenic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B6): 13569-13578.
- Jiang J Z, Li J, Fu H. 2019. Seismicity analysis of the 2016 $M_s5.0$ Yunlong earthquake, Yunnan, China and its tectonic implications. *Pure and Applied Geophysics*, 176(3): 1225-1241, doi: 10.1007/s00024-018-2067-7.
- Lei J S, Zhao D P, Su Y J. 2009a. Insight into the origin of the Tengchong intraplate volcano and seismotectonics in southwest China from local and teleseismic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B5): B05302, doi: 10.1029/2008JB005881.
- Lei J S, Zhao D P. 2009b. Structural heterogeneity of the Longmenshan fault zone and the mechanism of the 2008 Wenchuan earthquake ($M_s8.0$). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(10): 10010, doi: 10.1029/2009GC002590.
- Lei J S, Zhao D P. 2016. Teleseismic P-wave tomography and mantle dynamics beneath Eastern Tibet. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(5): 1861-1884.
- Lei J S, Zhao D P, Xu X W, et al. 2019. Is there a big mantle wedge under eastern Tibet?. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 292: 100-113.
- Lei X L, Wang Z W, Ma S L, et al. 2021. A preliminary study on the characteristics and mechanism of the May 2021 $M_s6.4$, Yangbi earthquake sequence, Yunnan, China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 43(3): 261-286, doi: 10.11939/jass.20210100.
- Li D H, Ding Z F, Wu P P, et al. 2015. The deep seismogenic environment of the southeastern section of the Xianshuihe fault zone and the 2014 Kangding $M_s6.3$ earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(6): 1941-1953, doi: 10.6038/cjg20150610.
- Li D H. 2016. The deep structure and seismogenic environment of potential risk areas of strong earthquakes in Sichuan-Yunnan border area [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration.
- Li D H, Ding Z F, Wu P P, et al. 2019. Deep structure of the Zhaotong and Lianfeng fault zones in the eastern segment of the Sichuan-Yunnan border and the 2014 Ludian $M_s6.5$ earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 62(12): 4571-4587, doi: 10.6038/cjg2019M0450.
- Li Q L, Wang Y, Zhou Y Y, et al. 2019. Geothermal anomalies in the Jianchuan-Deqin region: Constraints on the northwest boundary of Sichuan-Yunnan rhombic block and seismic activity. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry* (in Chinese), 38(1): 90-102.
- Li W J, Shao Z G, Wen X Z, et al. 2016. Deep structure derived from the Mouding-Shangri-La magnetotelluric profile in western Yunnan Province. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(1): 229-239, doi: 10.6038/cjg20160119.
- Li Y H, Wu Q J, Tian X B, et al. 2009. Crustal structure in the Yunnan region determined by modeling receiver functions. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(1): 67-80.
- Li Y H, Pan J T, Wu Q J, et al. 2014. Crustal and uppermost mantle structure of SE Tibetan plateau from Rayleigh-wave group-velocity measurements. *Earthquake Science*, 27(4): 411-419.
- Liu Q Y, Van Der Hilst R D, Li Y, et al. 2014. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults. *Nature Geoscience*, 7(5): 361-365.
- 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, doi: 10.6038/cjg2021O0526.

- Lou H, Wang C Y, Huangfu G, et al. 2002. Three-dimensional seismic velocity tomography of the upper crust in Tengchong volcanic area, Yunnan province. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 24(3): 243-251.
- Luo S, Yu C Q, Zhang G, et al. 2020. Deep electrical resistivity structure of the Sanjiang Area, western Yunnan: An example of the Fugong-Qiaojia profile. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 63(3): 1026-1042, doi: 10.6038/cjg2020N0195.
- Nie S T, Tian X B, Li J T, et al. 2021. Lithospheric mantle underneath the Tibetan Plateau does not escape southeastward. *Journal of Asian Earth Sciences*, 206: 104629.
- Ogawa Y, Mishina M, Goto T, et al. 2001. Magnetotelluric imaging of fluids in intraplate earthquake zones, NE Japan back arc. *Geophysical Research Letters*, 28(19): 3741-3744.
- Paige C C, Saunders M A. 1982. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 8(1): 43-71.
- Pan R, Jiang J Z, Fu H, et al. 2019. Focal mechanism and focal depth determination of Yunnan Yangbi M_s 5.1 and M_s 4.8 earthquakes in 2017. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 42(3): 338-348, doi: 10.3969/j.issn.1000-0666.2019.03.005.
- Pawłowski R S. 1995. Preferential continuation for potential-field anomaly enhancement. *Geophysics*, 60(2): 390-398.
- 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.
- Schoenbohm L M, Burchfiel B C, Chen L Z. 2006. Propagation of surface uplift, lower crustal flow, and Cenozoic tectonics of the southeast margin of the Tibetan Plateau. *Geology*, 34(10): 813-816, doi: 10.1130/G22679.1.
- Sibson R H. 1992. Implications of fault-valve behaviour for rupture nucleation and recurrence. *Tectonophysics*, 211(1-4): 283-293.
- Su Y J, Liu Z Y, Cai M J, et al. 1999. Deep medium environment of strong earthquakes occurrence in Yunnan region. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 21(3): 313-322.
- Sun J, Xu C F, Jiang Z, et al. 1989. The electrical structure of the crust and upper mantle in the west part of Yunnan province and its relation to crustal tectonics. *Seismology and Geology* (in Chinese), 11(1): 35-45.
- Tang P, Chang Z F. 2013. Study on activity of Weishan basin section of Weixi Qiaohou fault. *Geological Review* (in Chinese), 59(S1): 108-109.
- Teng J W. 2004. *Lithospheric Physics* (in Chinese). Beijing: Science Press.
- 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.
- Unsworth M, Bedrosian P A. 2004. On the geoelectric structure of major strike-slip faults and shear zones. *Earth, Planets and Space*, 56(12): 1177-1184.
- Unsworth M J, Jones A G, Wei W, et al. 2005. Crustal rheology of the Himalaya and Southern Tibet inferred from magnetotelluric data. *Nature*, 438(7064): 78-81.
- Wang C Y, Mooney W D, Wang X L. 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 Y, Wu J P, Lou H, et al. 2003. P-wave crustal velocity structure in western Sichuan and eastern Tibetan region. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(2): 254-265.
- Wang C Y, Han W B, Wu J P, et al. 2007. Crustal structure beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau and its tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7): B07307, doi: 10.1029/2005JB003873.
- Wang Y, Li Q L, Ran H, et al. 2018. Geothermal and seismic activities in the southeastern Tibetan Plateau: constraints from helium isotopes. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry* (in Chinese), 37(4): 652-662.
- Wang Z, Zhao D P, Wang J. 2010. Deep structure and seismogenesis of the north-south seismic zone in southwest China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B12): B12334, doi: 10.1029/2010JB007797.
- Wu J P, Ming Y H, Wang C Y. 2001. The S wave velocity structure beneath digital seismic stations of Yunnan province inferred from teleseismic receiver function modelling. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 44(2): 228-237.
- Xu C F. 1997. Fluid evolution in crust and earthquake Genesis (III). *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 19(2): 139-144.
- Xu S Z. 2007. A comparison of effects between the iteration method and FFT for downward continuation of potential fields. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 50(1): 285-289.
- Xu S Z, Yu H L, Li H X, et al. 2009. The inversion of apparent density based on the separation and continuation of potential field. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(6): 1592-1598, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.06.021.
- Xu T, Zhang M H, Tian X B, et al. 2014. Upper crustal velocity of Lijiang-Qingzhen profile and its relationship with the seismogenic environment of the M_s 6.5 Ludian earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3069-3079, doi: 10.6038/cjg20140932.
- Xu T, Zhang Z J, Liu B F, et al. 2015. Crustal velocity structure in the Emeishan Large Igneous Province and evidence of the Permian mantle plume activity. *Science China: Earth Sciences* (in Chinese), 58(7): 1133-1147.
- Xu Y, Zhong D L, Liu J H. 2012. Constraints of deep structures on the crust-mantle decoupling in the western Yunnan and the magma activity in the Tengchong volcanic area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 27(3): 846-855, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.03.003.
- 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, doi: 10.6038/cjg20130613.
- Yang J Y, Xu S Z, Yu H L, et al. 2008. Application of apparent density inversion method in the East China Sea and its adjacent

- area. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 51(6): 1909-1916.
- Yang T, Wu J, Fang L, et al. 2014. Complex structure beneath the southeastern Tibetan Plateau from teleseismic P-wave tomography. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(3): 1056-1069.
- Yang W C, Hou Z Z, Yu C Q. 2015. 3D crustal density structure of West Yunnan and its tectonic implications. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(11): 3902-3916, doi: 10.6038/cjg20151102.
- Yang X T, Xu Y, Liu J H, et al. 2011. Seismic tomography in the Tengchong volcanic area and its tectonic implication. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(8): 2050-2059, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.08.012.
- Yang Y J, Zheng Y, Chen J, et al. 2010. Rayleigh wave phase velocity maps of Tibet and the surrounding regions from ambient seismic noise tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(8): Q08010, doi: 10.1029/2010GC003119.
- Yao H J, Van Der Hilst R D, De Hoop M V. 2006. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis-I. Phase velocity maps. *Geophysical Journal International*, 166(2): 732-744.
- Yao H J, Beghein C, Van Der Hilst R D. 2008. Surface wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis-II. Crustal and upper-mantle structure. *Geophysical Journal International*, 173(1): 205-219.
- Yu C Q, Zhang G, Wang X B, et al. 2017. Deep electrical resistivity structure of Sanjiang Area of west Yunnan and its significance. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(6): 2385-2396, doi: 10.6038/cjg20170628.
- Yunnan Earthquake Agency. 2021. The official release of the intensity map of the Yangbi $M_s6.4$ earthquake, Yunnan. http://www.yndzj.gov.cn/yndzj/_300559/_300651/629959/index.html. [2021-05-25].
- Zhan Y, Zhao G Z, Wang J J, et al. 2008. Deep electric structure beneath the epicentre of the 1927 Gulang M_8 earthquake and its adjacent areas from magnetotelluric sounding. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 51(2): 511-520.
- Zhan Y, Zhao G Z, Unsworth M, et al. 2013. Deep structure beneath the southwestern section of the Longmenshan fault zone and seismogenic context of the 4.20 Lushan $M_s7.0$ earthquake. *Chinese Science Bulletin*, 58(28): 3467-3474.
- Zhang Z, Zhao B, Zhang X, et al. 2006. Crustal structure beneath the wide angle seismic profile between Simao and Zhongdian in Yunnan. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 49(5): 1377-1384.
- Zhao C P, Chen Y L, Wang Y, et al. 2014. Geothermal field in the uppermost crust in the Ning'er-Tongguan volcanic zone, Southwest China; Implications for tectonics and magmatism. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 30(12): 3645-3656.
- Zhao D P, Hasegawa A, Kanamori H. 1994. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B11): 22313-22329.
- Zhao D P, Mishra O P, Sanda R. 2002. Influence of fluids and magma on earthquakes: seismological evidence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 132(4): 249-267.
- Zhao G Z, Liu G D, Zhan Y, et al. 1998. The structure of the crust and upper mantle for the Zhangbei-Shangyi seismic area and its neighbouring region. *Seismology and Geology* (in Chinese), 20(2): 155-163.
- Zhao X Y, Fu H. 2014. Seismogenic structure identification of the 2013 Eryuan $M_s5.5$ and $M_s5.0$ earthquake sequence. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 36(4): 640-650, doi: 10.3969/j.issn.0253-3782.2014.04.010.

附中文参考文献

- 白志明, 王椿镛. 2003. 云南地区上部地壳结构和地震构造环境的层析成像研究. *地震学报*, 25(2): 117-127.
- 白志明, 王椿镛. 2004. 云南遮放—宾川和孟连—马龙宽角地震剖面的层析成像研究. *地球物理学报*, 47(2): 257-267.
- 曹令敏, 胥颐, 吴时国. 2013. 腾冲地区地壳速度结构的有限差分成像. *地球物理学报*, 56(4): 1159-1167, doi: 10.6038/cjg20130411.
- 陈炳蔚, 王铠元, 刘万熹等. 1987. 怒江—澜沧江—金沙江地区大地构造. 北京: 地质出版社.
- 陈福坤, 李秋立, 王秀丽等. 2006. 滇西地区腾冲地块东侧混合岩锆石年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素组成. *岩石学报*, 22(2): 439-448.
- 程裕祺. 1994. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社.
- 丁志峰. 1999. 近震层析成像的理论及应用[博士论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 丁志峰. 2011. 中国地震科学台阵探测——南北地震带南段. *地震科技与国际交流*, (2): 36-39.
- 董美玲. 2016. 滇西腾冲—保山地块岩浆作用研究及其构造意义[博士论文]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 高家乙, 李永华, 徐小明等. 2016. 云南地区地壳速度结构和地震活动性研究. *地球物理学进展*, 31(2): 508-516, doi: 10.6038/pg20160202.
- 胡家富, 朱雄关, 夏静瑜等. 2005. 利用面波和接收函数联合反演滇西地区壳幔速度结构. *地球物理学报*, 48(5): 1069-1076.
- 华雨淋, 吕彦. 2019. 腾冲火山及周边地区双差层析成像. *地球物理学报*, 62(8): 2982-2990, doi: 10.6038/cjg2019M0269.
- 黄金莉, 赵大鹏. 2005. 首都圈地区地壳三维 P 波速度细结构与强震孕育的深部构造环境. *科学通报*, 50(4): 348-355.
- 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, doi: 10.11939/jass.20210100.
- 李大虎, 丁志峰, 吴萍萍等. 2015. 鲜水河断裂带南东段的深部孕震环境与 2014 年康定 $M_s6.3$ 地震. *地球物理学报*, 58(6): 1941-1953, doi: 10.6038/cjg20150610.
- 李大虎. 2016. 川滇交界地段强震潜在危险区深部结构和孕震环境研究[博士论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 李大虎, 丁志峰, 吴萍萍等. 2019. 川滇交界东段昭通—莲峰断裂带

- 的深部结构特征与2014年鲁甸 $M_s6.5$ 地震. 地球物理学报, 62(12): 4571-4587, doi: 10.6038/cjg2019M0450.
- 李其林, 王云, 周艺颖等. 2019. 剑川—德钦一带的地热异常: 对川滇菱块西北边界和地震活动性的意义. 矿物岩石地球化学通报, 38(1): 90-102.
- 李文军, 邵志刚, 闻学泽等. 2016. 滇西牟定—香格里拉电性剖面及深部构造. 地球物理学报, 59(1): 229-239, doi: 10.6038/cjg20160119.
- 李永华, 吴庆举, 田小波等. 2009. 用接收函数方法研究云南及其邻区地壳上地幔结构. 地球物理学报, 52(1): 67-80.
- 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, doi: 10.6038/cjg2021O0526.
- 楼海, 王椿镛, 皇甫岗等. 2002. 云南腾冲火山区上部地壳三维地震速度层析成像. 地震学报, 24(3): 243-251.
- 罗豫, 于常青, 张刚等. 2020. 滇西三江构造带电性结构特征——以福贡—巧家剖面为例. 地球物理学报, 63(3): 1026-1042, doi: 10.6038/cjg2020N0195.
- 潘睿, 姜金钟, 付虹等. 2019. 2017年云南漾濞 $M_s5.1$ 及 $M_s4.8$ 地震震源机制解和震源深度测定. 地震研究, 42(3): 338-348, doi: 10.3969/j.issn.1000-0666.2019.03.005.
- 苏有锦, 刘祖荫, 蔡民军等. 1999. 云南地区强震分布的深部地球介质背景. 地震学报, 21(3): 313-322.
- 孙洁, 徐常芳, 江钊等. 1989. 滇西地区地壳上地幔电性结构与地壳构造活动的关系. 地震地质, 11(1): 35-45.
- 汤沛, 常祖峰. 2013. 维西—乔后断裂巍山盆地活动性研究. 地质论评, 59(S1): 108-109.
- 滕吉文. 2004. 岩石圈物理学. 北京: 科学出版社.
- 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.
- 王椿镛, 吴建平, 楼海等. 2003. 川西藏东地区的地壳P波速度结构. 中国科学(D辑), 33(S1): 181-189.
- 王云, 李其林, 冉华等. 2018. 青藏高原东南缘地热与地震活动: 来自氦同位素的约束. 矿物岩石地球化学通报, 37(4): 652-662.
- 吴建平, 明跃红, 王椿镛. 2001. 云南数字地震台站下方的S波速度结构研究. 地球物理学报, 44(2): 228-237.
- 徐常芳. 1997. 壳内流体演化及地震成因(三). 地震学报, 19(2): 139-144.
- 徐世浙. 2007. 迭代法与FFT法位场向下延拓效果的比较. 地球物理学报, 50(1): 285-289.
- 徐世浙, 余海龙, 李海侠等. 2009. 基于位场分离与延拓的视密度反演. 地球物理学报, 52(6): 1592-1598, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.06.021.
- 徐涛, 张明辉, 田小波等. 2014. 丽江—清镇剖面上地壳速度结构及其与鲁甸 $M_s6.5$ 级地震孕震环境的关系. 地球物理学报, 57(9): 3069-3079, doi: 10.6038/cjg20140932.
- 徐涛, 张忠杰, 刘宝峰等. 2015. 峨眉山大火成岩省地壳速度结构与古地幔柱活动遗迹: 来自丽江—清镇宽角地震资料的约束. 中国科学: 地球科学, 45(5): 561-576.
- 胥颐, 钟大赉, 刘建华. 2012. 滇西地区壳幔解耦与腾冲火山区岩浆活动的深部构造研究. 地球物理学进展, 27(3): 846-855, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.03.003.
- 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, doi: 10.6038/cjg20130613.
- 杨金玉, 徐世浙, 余海龙等. 2008. 视密度反演在东海及邻区重力异常解释中的应用. 地球物理学报, 51(6): 1909-1916.
- 杨文采, 侯遵泽, 于常青. 2015. 滇西地壳三维密度结构及其大地构造含义. 地球物理学报, 58(11): 3902-3916, doi: 10.6038/cjg20151102.
- 杨晓涛, 胥颐, 刘建华等. 2011. 腾冲火山区的地震层析成像及其构造意义. 地球物理学报, 54(8): 2050-2059, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.08.012.
- 于常青, 张刚, 王绪本等. 2017. 滇西三江地区深部电性结构特征及其意义. 地球物理学报, 60(6): 2385-2396, doi: 10.6038/cjg20170628.
- 云南省地震局. 2021. 云南漾濞 6.4 级地震烈度图发布. http://www.yndzj.gov.cn/yndzj/_300559/_300651/629959/index.html. [2021-05-25].
- 詹艳, 赵国泽, 王继军等. 2008. 1927年古浪8级大地震区及其周边地块的深部电性结构. 地球物理学报, 51(2): 220-229.
- 詹艳, 赵国泽, Unsworth M等. 2013. 龙门山断裂带西南段4.20芦山7.0级地震区的深部结构和孕震环境. 科学通报, 58(20): 1917-1924.
- 张智, 赵兵, 张晰等. 2006. 云南思茅—中甸地震剖面的地壳结构. 地球物理学报, 49(5): 1377-1384.
- 赵慈平, 陈有丽, 王云等. 2014. 云南宁洱—通关火山区最上地壳地热场: 构造和岩浆活动意义. 岩石学报, 30(12): 3645-3656.
- 赵国泽, 刘国栋, 詹艳等. 1998. 张北—尚义地震区及其邻区地壳上地幔结构. 地震地质, 20(2): 155-163.
- 赵小艳, 付虹. 2014. 2013年洱源 $M_s5.5$ 和 $M_s5.0$ 地震发震构造识别. 地震学报, 36(4): 640-650, doi: 10.3969/j.issn.0253-3782.2014.04.010.

(本文编辑 何燕)