

基于近震 P 波走时的南加州地区 速度结构层析成像*

周茜茜, 陈强, 张一君, 黄小梅

(西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 采用 2015—2018 年南加州地区密集分布的宽频带地震台站记录的 505 个近震事件, 利用 AIC 准则拾取了 35 600 个初至 P 波到时, 应用 FMTOMO 软件进行走时层析成像, 获得了该地区 0~40 km 深度的三维 P 波地壳速度结构, 其分辨率达 $0.5^\circ \times 0.5^\circ \times 5$ km。不同深度的速度结构表明: 南加州地区 P 波速度不仅随深度的变化而变化, 且该地区地壳具有明显的横向不均匀性。反演结果显示: 中地壳以上的速度结构与地壳岩层和断层系统密切相关, 下地壳以下的速度结构存在大范围低速区, 呈现横向不均匀性。

关键词: 南加州; P 波走时; 三维地壳速度结构模型; 地震层析成像

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2020)04-0674-06

0 引言

美国南加州地区位于太平洋板块和北美板块的交汇地带, 是世界上地震活动最活跃的地区之一。该地区自中生代以来经历了强烈的地质构造活动, 经过多次强烈的挤压和伸展作用, 形成了特殊的地质构造格局, 出现了板块俯冲、岛弧形成、大陆增生等现象(田有, 2008)。历史上南加州地区多次发生中强地震, 如旧金山 1906 年 8.6 级大地震和 1989 年 6.9 级地震、1994 年洛杉矶 6.6 级地震等。2019 年南加州发生 7.1 级强震, 刷新了近 20 年来最强烈地震的记录, 再次引起了社会各界广泛的关注。据统计, 南加州地区大部分中强地震发生于地壳层, 对人类的生命和财产安全危害极大。因此研究南加州地区的地壳速度结构对于认识该地区的地质构造、辅助地震的分析预报等具有十分重要的作用。

地震层析成像技术是近年来获取地球内部非均匀结构的一种重要手段, 可使用的地震资料丰富, 理论方法多样。如利用地震体波、面波资料或者地震接收台站之间的噪声记录都可以重建研究区的速度结构模型(Yang, Forsyth, 2006; Barak, 2015)。相较于地震的其他信息, 地震体波

的走时信息具有更稳健、更可靠、更易提取且数据精度高的优点, 因此地震体波走时层析成像技术的应用最为广泛, 在南加州地区的地下结构研究中取得了大量成果(Lin *et al.*, 2007; Tape *et al.*, 2010; Barak *et al.*, 2015)。如 Hauksson (2000) 利用体波走时资料获得了南加州地区 0~22 km 深度的地壳速度结构, 但该模型对于南加州地区地壳的成像深度不够; Tian 等(2007) 联合近震和远震数据对南加州地区进行体波走时层析成像, 获得了该地区地壳上地幔的三维速度结构, 但垂向分辨率较低。

本文利用南加州地区近震 P 波的初至到时, 采用 FMTOMO 软件进行地震走时层析成像, 得到南加州地区分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ \times 5$ km 的三维地壳 P 波速度结构。

1 数据资料与研究方法

1.1 数据资料

本文研究区位于美国西部的南加州地区 ($121^\circ \sim 114^\circ \text{W}$, $32^\circ \sim 38^\circ \text{N}$), 使用 2015—2018 年研究区内 239 个宽频带地震台站记录的 505 个近震事件的波形数据资料进行研究, 台站和地震分布如图 1 所示。事件挑选原则为: ①首先挑选震中距

* 收稿日期: 2020-01-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472255)资助.

为 0~5°、震级大于 3 级、震源深度为 0~40 km 的近震事件；②对数据进行重采样、去毛刺、去均值、去线性、灭尖、带通滤波等预处理；③使用全球一维速度模型 AK135，计算各地震事件理论到时，并将波形截取为理论到时的前 10 s 至后 20 s；④利用 AIC 法 (Maeda, 1985) 实现实际到时的自动拾取，并进行波形的质量筛选，删除信噪比低的波形数据；⑤保证每个地震事件至少具备 10 个以上的台站到时，剔除不符合此要求的地震事件。由于近震震中距较小，后续震相不便于自动拾取，本文仅使用 P 波的初至到时进行层析成像，最终挑选了 35 600 条初至 P 波和 Pn 波到时。

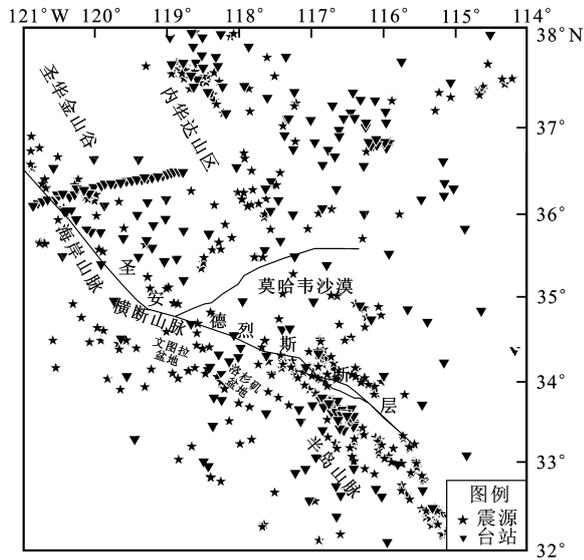


图 1 研究区台站及地震分布图

Fig. 1 Distribution of the stations and earthquakes in the study area

1.2 研究方法

地震层析成像过程主要包括模型参数化、正演、反演以及解的评价 (罗炬等, 2011)。本文采用 Rawlinson 等 (2006) 发展的 FMTOMO 软件进行近震 P 波走时层析成像，该软件具有仅需地震走时信息、追踪多种震相、可联合多种数据集进行反演等优点 (赵启光等, 2011)，是近年来研究地球内部结构较流行的一种方法。

该软件采用网格结点法进行模型参数化，采用的网格结点包括速度网格结点、界面网格结点和传播网格结点。其中传播网格结点代表正演计算得到的走时场，速度网格结点和界面网格结点构成反演初始模型。本文采用的初始速度模型为

Hadley 和 Kanamori (1977) 提出的一维速度模型，如图 2 所示。对于界面网格结点，在深度方向上以 29 km 的平均莫霍面深度为界将研究区分为两层，并在深度方向上以每 2 km 设置速度网格结点，在经度和纬度方向以 15 km × 15 km 设置速度网格结点。本文反演过程中保持震源初始位置不变，仅对 P 波速度进行反演。

FMTOMO 软件正演方法采用多步快速行进法 (Kool *et al*, 2006)，该方法根据给定的初始速度模型，利用迎风有限差分算法求解程函方程，从而得到各传播网格结点的走时值。反演方法采用子空间反演法 (Rawlinson *et al*, 2006)，该反演方法将非线性问题线性化进行迭代求解，通过求解当前模型的走时数据与观测走时数据构建的目标函数的极小值获得速度模型的扰动量，进行速度场的解算。

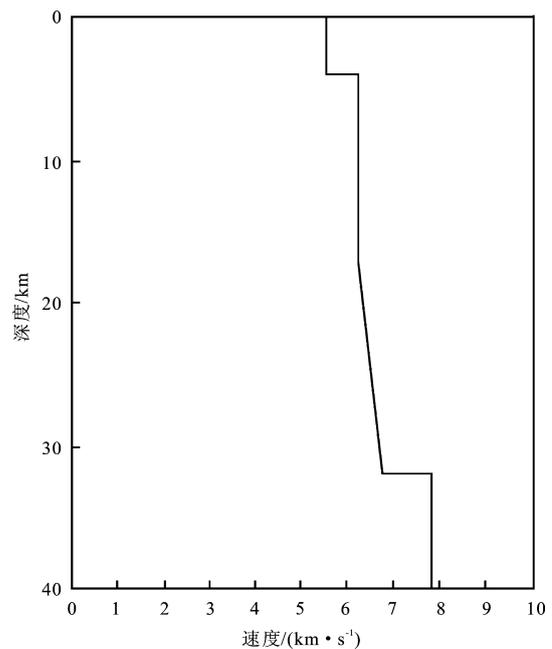


图 2 Hadley 和 Kanamori (1977) 提出的一维速度模型

Fig. 2 One-dimensional velocity model proposed by Hadley and Kanamori (1977)

2 解的评价

2.1 检测板测试

在分析结果之前，为了验证层析成像结果的可靠性，对层析成像结果进行评价，可了解层析成像结果的可靠性、分辨率及误差等信息 (雷栋, 胡祥云, 2006)。本文采用检测板分辨率测试：对

初始模型添加 $\pm 0.4 \text{ km/s}$ 的速度扰动值, 保持地震接收台站和震源的数量以及位置分布不变, 计算出一组走时代替实际观测走时, 进行层析成像, 反演得到的速度结构可直观地分析层析成像结果的可靠性。

本文采用水平网格节点间距约为 0.5° , 垂向网格节点间距约为 5 km 的检测板进行测试, 测试结果如图 3 所示: 1 km 水平切片的检测板结果显示, 边缘地区由于台站和地震稀少, 检测板还原效果较差, 而台站和地震密集分布的区域, 还原效果较好; 11 km 水平切片的检测板还原效果较好, 这是由于地震事件震源深度大部分都位于 20 km 以上, 该深度上射线密集; 22 km 水平切片的

检测板结果显示, 由于所选地震事件大多发生于上地壳, 且本文仅采用了初至的直达 P 波和 Pn 波, 所以该深度射线密度不足, 此处检测板还原效果较差, 但依然可以看出检测板还原出正负相间的速度扰动; 35 km 水平切片的检测板还原效果较好, 因为此处 Pn 波射线能较好地交叉穿过且射线密集。对于垂向剖面的检测板, 在 $0 \sim 15 \text{ km}$ 以及 $30 \sim 40 \text{ km}$ 深度还原效果较好, 而 $15 \sim 30 \text{ km}$ 深度还原效果稍差。

2.2 反演残差分析

本文经过 5 次迭代计算, 速度结构模型的解逐渐收敛。观测走时数据与反演走时数据走时差方差从 2.015 s^2 下降到 1.361 s^2 , 改善了近 32%; 卡方值从 222.259 下降到 119.801, 改善了 46%。

3 层析成像结果与讨论

3.1 层析成像结果

由反演结果 (图 4a) 可以看出, 在 1 km 深度, 研究区内一些低地形区域如圣华金山谷、文图拉盆地和莫哈韦沙漠南部呈现低速分布, 这是由于圣华金山谷堆积着新近纪的沉积物, 文图拉盆地下方堆积着较厚的上新世的沉积物 (Shaw *et al*, 2015), 莫哈韦沙漠南部在 $1 \sim 3 \text{ km}$ 的深度存在沉积盆地 (Tape *et al*, 2010)。一些高山山脉呈现明显高速, 如内华达山脉、横断山脉、半岛山脉、海岸山脉、圣盖博山脉、圣贝纳迪诺山脉。中生代的花岗岩在半岛山脉、横断山脉和内华达山脉南部的基岩中占据主要地位 (Phil, 2013), 圣贝纳迪诺山脉岩层分布以侏罗纪花岗岩侵入性火成岩为主 (宋国政, 2011), 从沉积物到火成岩、花岗岩的过渡, 定义了南加州大部分地区横向速度的不均匀性。圣安德烈斯断层两端速度分布存在明显差异, 其 WS 侧速度较高, EN 侧速度偏低。由图 1 可以看出, 大多数地震分布在圣安德烈斯断层附近, 尤其是其 WS 侧地震活动较多, 该现象与圣安德烈斯断层附近的速度分布情况相符。由此可见, 该地区浅部的 P 波速度分布与地表的地质构造以及断层系统的分布具有较好的一致性。

由图 4b 可见, 在 11 km 深度, 大部分地区呈现高速分布, 但异常幅度较 1 km 深度小。圣安德烈斯断层两端速度分布依旧存在差异, 半岛山脉持续高速, 大陆边缘带、圣华金山谷、恩尔顿凹

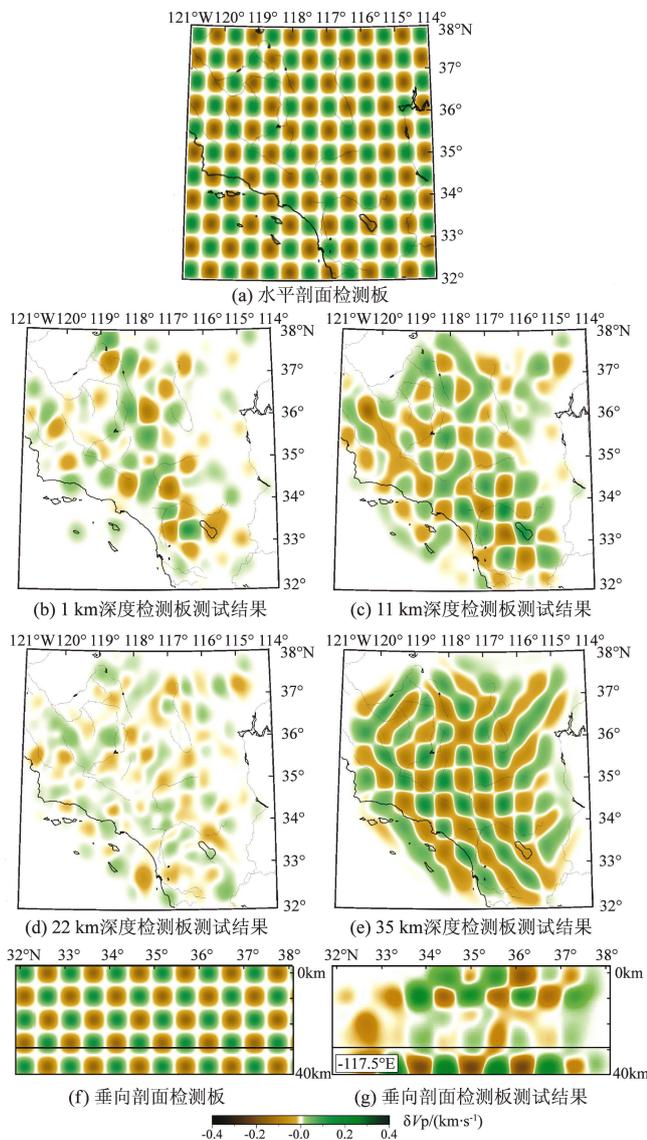


图 3 检测板测试结果

Fig. 3 Checkerboard test results

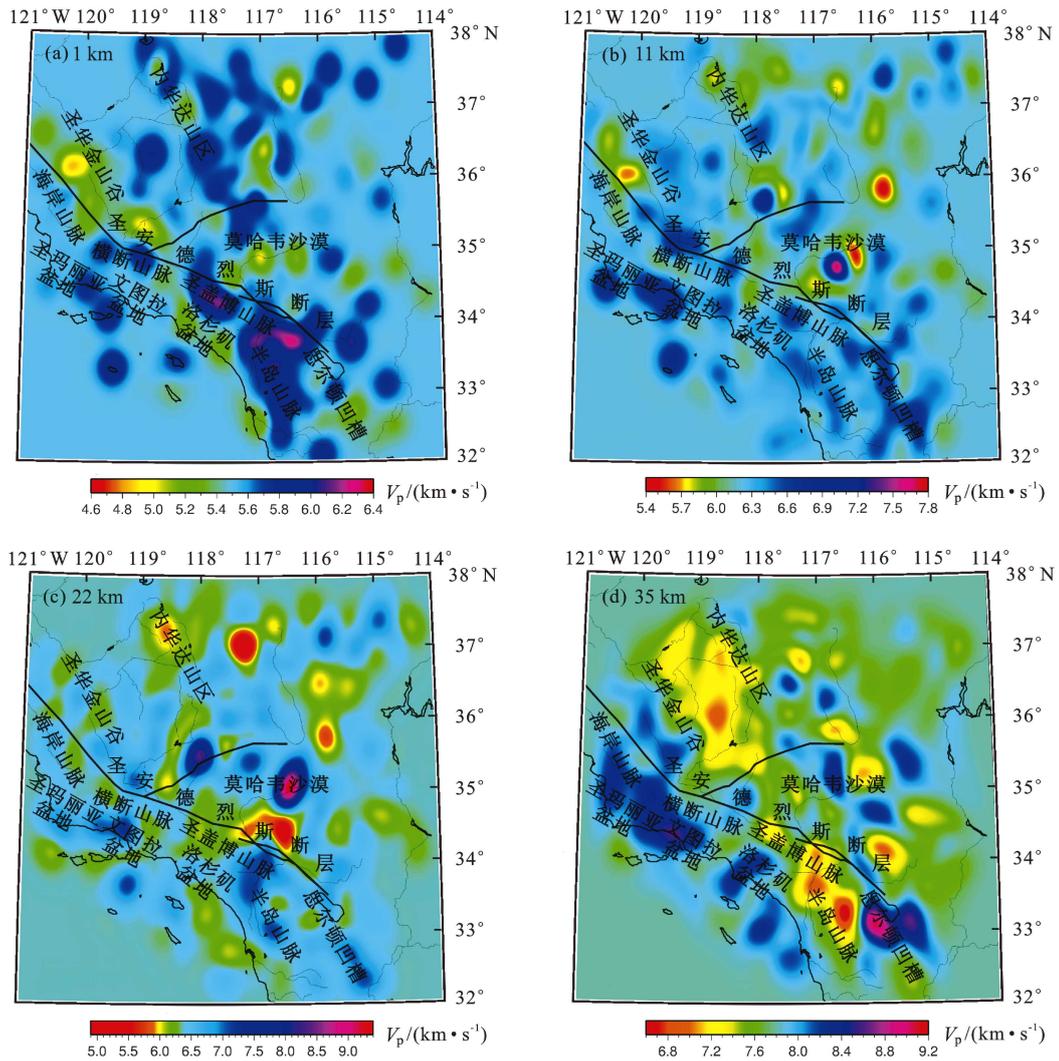


图 4 不同深度 P 波速度分布

Fig. 4 Distribution of P - wave velocity at different depths

槽、圣玛丽亚盆地呈现高速分布，而洛杉矶、文图拉等盆地的低速特征消失，呈现高速分布。在南加州地区的沉积盆地如洛杉矶盆地、文图拉盆地、圣玛丽亚盆地等在地壳中形成了重要的速度结构。这些盆地的基底岩通常被沉积物覆盖，其中洛杉矶盆地的基底岩由火成岩构成 (Wright, 1987)，文图拉盆地和圣玛丽亚盆地的基底岩由早期的第三纪和中生代的变质岩构成 (Yerkes *et al*, 1987)。这种由沉积物到基底岩的分布，反映了南加州盆地地区垂向上速度的不连续性。Fuis 等 (1984) 的研究成果表明，在该深度上，半岛山脉和思尔顿凹槽下方分布着镁铁质岩层，地震波较同深度其他岩层传播速度快。在莫哈韦沙漠东南部的兰德斯地区，有一小范围区域呈现高速异常，并被低速块体截断，这样的速度分布与该地区地

震频发情况相符。前人的研究也表明，地震多发生于高速和低速块体的过渡部位或偏向高速块体 (田有等, 2007)。该地区中地壳的速度结构不仅与地壳岩层构成有关，与以往的地质构造活动也相关。

在 22 km 深度，反演结果 (图 4c) 显示了下地壳速度的横向不均匀性，半岛山脉、思尔顿凹槽、圣玛丽亚盆地、文图拉盆地及兰德斯地区持续高速。圣玛丽亚盆地和文图拉盆地的高速分布受新近纪横断山脉顺时针旋转的影响，为俯冲捕获的法拉隆洋壳所导致 (Tape *et al*, 2010)。内华达山脉呈现低速分布，多学科综合研究揭示内华达山脉岩石圈地幔以及下地壳在 8~3.5 Ma 范围内发生拆沉，而拆沉将导致该深度上 P 波低速 (曾令森等, 2006; Cin-Ty 等, 2001)。圣盖博山脉和

海岸山脉呈现低速分布,该地区下地壳存在早期第三纪的沉积岩和变质沉积岩 (Shaw *et al.*, 2015)。

在 35 km 深度,圣华金山谷、内华达南部、半岛山脉和莫哈韦沙漠呈现明显低速,横断山脉、海岸山脉、思尔顿凹槽、文图拉盆地、圣玛丽亚盆地和洛杉矶盆地呈现明显高速 (图 4d)。该结果与 Zhu 和 Kanamori (2000) 利用远震接收函数得到的南加州莫霍面深度结果相对应,其研究结果显示在圣华金山谷、内华达山脉、半岛山脉和莫哈韦沙漠地区地壳深度较深,在该深度上这些区域显示的是下地壳的速度特性,因而速度较低;而思尔顿凹槽、横断山脉、文图拉盆地、圣玛丽亚盆地和洛杉矶盆地地壳厚度较薄。

3.2 对比分析

为了进一步分析本文层析成像结果的可靠性,将本文结果与 Tian 等 (2007) 联合近震与远震的 P 波走时资料获得的相似区域的层析成像结果进行对比分析。由于所使用的数据集、模型参数化以及从属格网的划分不同,再加上反演问题的多解性,本文层析成像结果虽与其存在一些差异,但仍然具有较好的一致性,具体为:地表层 P 波速度分布与地表的地质构造、地形起伏具有较好的一致性,如半岛山脉、圣盖博山脉以及海岸山脉等高山山脉的高速异常,圣华金山谷和文图拉盆地的低速异常。在中地壳大部分区域都显示高速异常,如半岛山脉和圣华金山谷等。在下地壳,如半岛山脉、文图拉盆地等呈现高速异常,内华达山脉呈现低速异常。在上地幔,大部分区域呈现低速异常,如圣华金山谷、内华达山脉、半岛山脉等,而在研究区的西部,如海岸山脉、沉积盆地等表现为高速异常。与 Tian 等 (2007) 结果相比,本文还揭示了兰德斯地区较清晰的速度异常。

4 结论

本文利用 2015—2018 年南加州台网 239 个地震台站记录的共 505 个近震波形数据,采用 AIC 法提取了 35 600 条 P 波初至到时信息,应用 FMTOMO 软件进行地震走时层析成像,确定了南加州地区分辨率达 $0.5^\circ \times 0.5^\circ \times 5$ km 的 0~40 km 深度的三维 P 波速度结构,得到以下结论:

(1) 本文仅需引入近震波形数据的绝对到时信息参与层析成像,所需数据相较于其它方法具有易获取、精度高、成像方法简单快速的优点。得到的层析成像结果与前人研究成果总体上具有较好的一致性,且垂向分辨率得到了较大改善,有助于准确预测强地面震动,更有助于进一步认识该地区的地壳构造和地质构造活动。因此该方法可用来获取区域高分辨率的地壳速度结构。

(2) 层析成像结果反映了南加州地区 P 波速度随深度发生变化,且地壳存在明显横向不均匀性。浅部的速度结构较好地恢复了该地区地表地形的大致位置,如洛杉矶盆地、文图拉盆地等沉积盆地和半岛山脉、海岸山脉等高山山脉的位置,与地表的地质构造和岩性密切相关,深部的速度结构存在大面积的低速区,呈现横向不均匀性。

由于数据的限制,某些深度上层析成像结果的分辨率稍差,有待进一步改善,在后续的研究中需要搜集更多的数据,如通过提取后续震相的信息来增加地震射线的密度,从而获得更高分辨率的三维速度结构。

感谢审稿专家和编辑部的帮助,感谢 Rawlinson 提供的 FMTOMO 层析成像软件。

参考文献:

- 雷栋,胡祥云. 2006. 地震层析成像方法综述[J]. 地震研究, 29(4): 104-112.
- 罗炬,李志海,王海涛. 2011. 地震层析成像研究方法综述[J]. 内陆地震, 25(4): 27-36.
- 宋国政. 2011. 美国加州圣本那迪诺郡奥德斯地区成矿地质条件[J]. 科技资讯, (29): 122-122.
- 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[J]. 地球物理学报, 50(5): 1488-1496.
- 田有. 2008. 中国华北和美国加州地区地震层析成像研究[D]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所.
- 曾令森,刘静,Jason B S. 2006. 大型花岗岩基形成和演化的深部动力学过程:滴水构造、钾质火山作用与地表地质过程[J]. 地质通报, 25(11): 21-37.
- 赵启光,楼海,王椿镛. 2011. 青藏高原东缘深部速度结构远震层析成像[J]. CT 理论与应用研究, 20(3): 311-320.
- Cin-Ty L, 任向文, 吴福元. 2001. 加利福尼亚州内华达山脉岩石圈地幔中生代移离的俄同位素证据[J]. 世界地质, 20(4): 327-331.
- Barak S, Lawrence J F, Klemperer S L. 2015. San andreas fault dip, peninsular ranges mafic lower crust and partial melt in the Salton Trough, Southern California, from ambient-noise tomography[J]. Ge-

- ochemistry, *Geophysics, Geosystems*, 16(11):3946–3972.
- Kool M D, Rawlinson N, Sambridge M. 2006. A practical grid-based method for tracking multiple refraction and reflection phases in three-dimensional heterogeneous media[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 167(1):253–270.
- Fuis G S, Mooney W D, Healy J H, *et al.* 1984. A seismic refraction survey of the Imperial Valley Region, California[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B2):1165–1189.
- Hadley D M, Kanamori H. 1977. Seismic structure of the transverse ranges, California[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 88(10):1469–1478.
- Hauksson E. 2000. Crustal structure and seismicity distribution adjacent to the Pacific and North America Plate Boundary in Southern California [J]. *Journal of Geophysical Research*, 105(B6):13875–13903.
- Lin G, Shearer P M, Hauksson E, *et al.* 2007. A three-dimensional crustal seismic velocity model for Southern California from a composite event method [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112:B11306.
- Maeda N. 1985. A method for reading and checking phase times in auto-processing system of seismic wave data [J]. *Zisin*, 38(3):365–379.
- Phil S. 2013. *Geologic history of California* [EB/OL]. (2013–09–17) [2020–01–01]. http://www.geologycafe.com/geologic_history/index.html.
- Rawlinson N, Reading A M, Kennett B L N. 2006. Lithospheric structure of Tasmania from a novel form of teleseismic tomography[J]. *Journal of Geophysical Research*, 111:B02301.
- Shaw J H, Plesch A, Tape C, *et al.* 2015. Unified structural representation of the southern California crust and upper mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 415:1–15.
- Tape C, Liu Q, Maggi A, *et al.* 2010. Seismic tomography of the Southern California crust based on spectral-element and adjoint methods[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 180(1):433–462.
- Tian Y, Zhao D, Teng J. 2007. Deep structure of southern California[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 165(1–2):93–113.
- Wright T L. 1987. *Structural geology and tectonic evolution of the Los Angeles Basin* [M]. United States: AAPG Bull.
- Yang Y, Forsyth D W. 2006. Regional tomographic inversion of the amplitude and phase of rayleigh waves with 2-D sensitivity kernels[J]. *Geophysical Journal International*, 166(3):1148–1160.
- Yerkes R F, Sarna-Wojcicki A M, Lajoie K R. 1987. *Geology and quaternary deformation of the ventura area* [J]. U S Geological Survey Professional Paper, 1339:169–178.
- Zhu L, Kanamori H. 2000. Moho Depth variation in Southern California from teleseismic receiver functions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 105(B2):2969–2980.

Velocity Structure Tomography in Southern California Area Based on Local Earthquakes P-wave Travel-time

ZHOU Xixi, CHEN Qiang, ZHANG Yijun, HUANG Xiaomei

(Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract

In this study, basing on 505 local-seismic events recorded by densely distributed broadband seismic stations in Southern California between Jan. , 2015 and Dec. , 2018, we pick up 35 600 first-arrival travel-time of P-waves by adopted the AIC method. Then using the FMTOMO software, we obtained a three-dimensional P-wave crust velocity structure with a depth range of 0 ~40 km in this area through travel-time tomography, and the resolution of the velocity structure can reach $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ} \times 5$ km. The velocity structure at different depth revealed that the P-wave velocity in Southern California changed with the depth, and the crust in this region had obvious lateral heterogeneity. The inversion results show that the velocity structure above the mid-crust is closely related to the rock formations and fault systems, and that below the lower crust has a large area of low-speed, showing lateral heterogeneity.

Keywords: Southern California; P-wave travel-times; three-dimensional crustal velocity structure; seismic tomography