

杨歧焱, 李大虎, 吴锋波, 梁明剑. 2019. 利用远震 P 波层析成像研究巴颜喀拉地块东缘及邻区的深部结构. 地震学报, 41(6): 695–708. doi: 10.11939/jass.20190080.
Yang Q Y, Li D H, Wu F B, Liang M J. 2019. Deep structure of eastern margin of Bayan Har block and its adjacent areas by using teleseismic P-wave tomography. Acta Seismologica Sinica, 41(6): 695–708. doi: 10.11939/jass.20190080.

利用远震 P 波层析成像研究巴颜喀拉地块东缘及邻区的深部结构*

杨歧焱^{1), †} 李大虎²⁾ 吴锋波¹⁾ 梁明剑²⁾

1) 中国石家庄 050031 河北地质大学勘查技术与工程学院
2) 中国成都 610041 四川省地震局

摘要 为了揭示巴颜喀拉地块东缘及邻区的壳幔速度结构差异, 获取 2017 年九寨沟 $M_s 7.0$ 地震的深部构造背景, 本文收集了 2009 年 5 月至 2016 年 8 月期间四川及邻区数字测震台网的 203 个地震台站所记录到的远震 P 波走时数据, 应用有限频体波走时层析成像方法, 反演得到了巴颜喀拉地块东缘及邻区 50—600 km 深度范围内的三维壳幔 P 波速度结构. 反演结果表明: 巴颜喀拉地块东缘及邻区的壳幔速度结构具有明显的横向不均匀性和分区特征, 松潘—甘孜地槽褶皱系、西秦岭和祁连山褶皱系的整体速度异常较低, 研究区东部具有克拉通性质的四川盆地西北缘和鄂尔多斯地块南缘则明显的高速异常. 上地幔 P 波速度结构特征差异表明松潘—甘孜地块的抬升可能与地幔上涌有关, 巴颜喀拉地块东缘九寨沟震区及周边 50—250 km 深度范围内的上地幔存在低速异常, 在 400—600 km 地幔过渡带深度范围内表现为明显的高速异常特征. 巴颜喀拉地块向东南方向运移受到东部高速、高强度的扬子克拉通地块对青藏高原物质东向挤出的强烈阻挡, 而九寨沟震区处于松潘—甘孜地块重要的北东边界断裂交会处附近, 应力容易在此集中, 这些因素均可能是东昆仑断裂塔藏段与岷江断裂北段交会处附近发生九寨沟 $M_s 7.0$ 地震的深部动力学背景.

关键词 有限频走时层析成像 巴颜喀拉地块 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震 P 波速度结构 松潘—甘孜地槽褶皱系

doi: 10.11939/jass.20190080 中图分类号: P315.2 文献标识码: A

Deep structure of eastern margin of Bayan Har block and its adjacent areas by using teleseismic P-wave tomography

Yang Qiyan^{1), †} Li Dahu²⁾ Wu Fengbo¹⁾ Liang Mingjian²⁾

1) Exploration Technology and Engineering College, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China
2) Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China

Abstract: This paper collected the teleseismic P-wave travel data recorded by 203 broadband stations in digital seismic network of Sichuan and its neighboring areas from May 2009 to

* 基金项目 国家自然科学基金(41974066)、中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH20051, XH15040Y)和河北省青年拔尖人才项目共同资助.

收稿日期 2019-04-28 收到初稿, 2019-09-04 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: yangqiyan413@163.com



August 2016. And by using the finite-frequency tomography this paper carried out the inversion for P-wave velocity structure of the crust and upper mantle in the depth of 50–600 km in the eastern margin of Bayan Har block and its surrounding areas. The results show that the velocity structure of the Bayan Har block in the eastern part of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and the surrounding crustal-mantle is characterized by obviously lateral inhomogeneity and zoning. Specifically, the Songpan-Garze trough fold system, the western Qinling and Qilianshan fold systems in the eastern margin of the Tibetan Plateau displayed low velocity, whereas the north-western margin of the Sichuan basin and the southern edge of the Ordos block in the eastern part of the studied area showed obvious high velocity anomalies. P wave velocity structure characteristics of upper mantle suggested that the uplift of Songpan-Garze block is related to upper mantle upwelling. There are low velocity anomalies in the depth range of 50–250 km in Jiuzhaigou earthquake area and the surrounding upper mantle in the east margin of Bayan Har block. The three-dimensional P-wave velocity structure also reveals that the source region of Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake shows a high-velocity anomaly at the mantle transition zone with depth range of 400–600 km. Therefore, it was deduced that this anomaly may be caused by upwelling of hot asthenosphere material. With the crustal thickening and strong uplift of the Tibetan Plateau, the Sichuan-Qinghai block in the west of Longmenshan fault zone slipped and was pushed to the SE direction, which was influenced by the blocking of high velocity and high strength craton blocks to the eastern Qinghai-Tibet Plateau extrusion, its hard upper crust should form a huge stress accumulation, and Jiuzhaigou is located in the vicinity of the north-east boundary fault intersection at the Songpan-Garze block, where the stress is likely to be concentrated. These factors may result in the occurrence of the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake near the East Kunlun fault zone and the northern section of Minjiang fault.

Key words: finite frequency travel-time tomography; Bayan Har block; $M_s7.0$ Jiuzhaigou earthquake; P-wave velocity structure; Songpan-Garze trough fold system

引言

巴颜喀拉地块位于青藏高原中北部,该地块呈西部狭长、东侧张开的倒三角形,北侧、西南侧、东南侧分别为柴达木—西秦岭褶皱带、羌塘地块和四川盆地(张培震等, 2003; 徐锡伟等, 2008; 闻学泽等, 2011; 嘉世旭等, 2017). 巴颜喀拉地块运动模式受控于南、北边界的大型走滑断裂带,其北边界为昆仑断裂带(Meyer *et al.*, 1998; Kirby *et al.*, 2000; van der Woerd *et al.*, 2002),东边界为兼右旋走滑分量的龙门山逆冲断裂(杜方等, 2013). 作为南北地震带中段的重要组成部分,巴颜喀拉地块东缘现今的地震活动强烈,区内已经发生过多次数强震(徐锡伟等, 2002, 2008; Densmore *et al.*, 2007; 邓起东等, 2010; 闻学泽等, 2011; 杜方等, 2018). 自2000年以来,青藏高原东缘巴颜喀拉地块边界又相继发生了多次强震,如2001年 $M_s8.1$ 昆仑山口西地震、2008年 $M_s8.0$ 汶川地震、2010年 $M_s7.1$ 玉树地震和2013年 $M_s7.0$ 芦山地震. 2017年8月8日巴颜喀拉地块东缘发生九寨沟 $M_s7.0$ 地震,该地震震中位于东昆仑断裂带的分支,断层走向为NW-SE(图1). 因此,针对巴颜喀拉地块东缘及邻区的深部结构、孕震环境及地震危险背景开展研究,对深入认识地块间的接触耦合、褶皱造山机制及其与强震构造环境关系等问题具有重要意义.

近年来,针对巴颜喀拉地块东缘及邻区的深部结构先后开展过大量的地球物理测深和

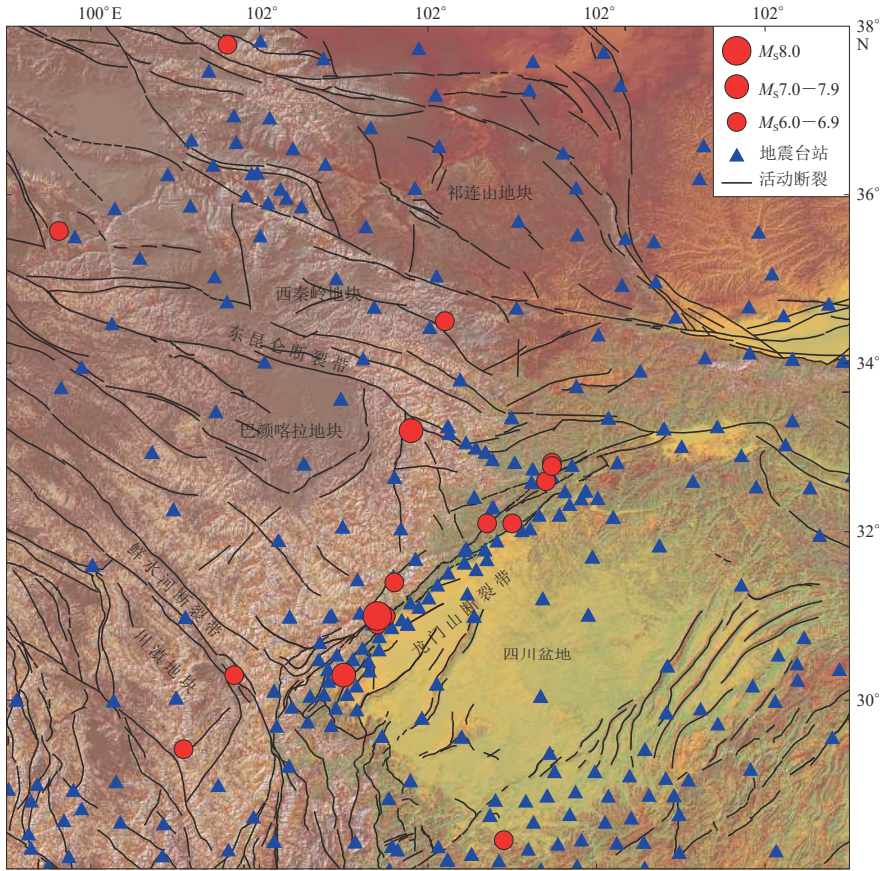


图 1 巴颜喀拉地块及邻区的构造背景及地震分布

Fig. 1 Tectonic settings and distribution of earthquakes around the Bayan Har block and its surroundings

研究, 经由该区域内布设的多条人工深地震剖面(Wang *et al*, 2003; 李永华等, 2006a; 嘉世旭, 张先康, 2008; Huang *et al*, 2015; 嘉世旭等, 2017)和大地电磁探测剖面(汤吉等, 2005)获取了研究区介质的深部结构特征, 例如: 两条跨过西秦岭造山带的玛沁—兰州—靖边(李松林等, 2002)和马尔康—兰州—武威(嘉世旭, 张先康, 2008)人工地震宽角折/反射探测剖面揭示了西秦岭造山带存在显著的横向不均匀性; 玛沁—兰州—靖边大地电磁探测剖面揭示了巴颜喀拉地块与秦祁地块深部介质的电性特征具有一定的相似性, 且巴颜喀拉地块、鄂尔多斯地块和秦祁地块的下地壳均存在低阻层(汤吉等, 2005; 詹艳, 2008). 跨过西秦岭造山带东部的两条大地电磁测深剖面的地壳上地幔深部结构的研究结果则表明西秦岭造山带东部地壳的深部结构呈现高阻与低阻相互组合的异常特征(詹艳等, 2014). 与此同时, 通过天然地震的波形记录, 采用地震层析成像方法获取的速度结构结果对巴颜喀拉地块及其周缘的壳幔深部结构的研究也取得了一些有意义的认识(丁志峰等, 1999; 李永华等, 2006b; Shen *et al*, 2011; Lei, Zhao, 2016; Liu *et al*, 2017; 杨歧焱等, 2018; Li *et al*, 2018). 这些探测和成像研究结果对于认识巴颜喀拉地块东缘及其周围各地块的运动方式、深部过程均具有重要的意义, 然而, 该地区强烈的地震活动性和深部孕震背景仍需进一步研究. 为此, 本文主要收集 2009 年 5 月至 2016 年 8 月期间四川省及邻区的数字测震台网共计 203 个地震台站记录

到的远震 P 波走时数据, 拟应用体波有限频走时层析成像方法, 反演获取巴颜喀拉地块东缘 50—600 km 深度范围内的三维 P 波速度结构特征, 以期揭示巴颜喀拉地块东缘、秦祁褶皱系和东部克拉通地块的深部结构差异, 并对 2017 年九寨沟 $M_S 7.0$ 地震的深部构造背景予以深入分析.

1 数据与方法

本文重点收集了 2009 年 5 月至 2016 年 8 月四川及邻区的数字测震台网共计 203 个地震台站记录到的远震 P 波走时资料, 研究区地震台站的位置分布见图 1. 首先, 按照以下原则来筛选远震事件: ① 震中距位于 30° — 90° ; ② 震级 $M_S \geq 5.5$; ③ 每个地震事件至少被 10 个台站记录到. 然后, 对波形数据进行去倾斜、去均值、去仪器响应以及带通滤波等一系列预处理, 滤波采用 0.02—0.1 Hz 频段; 最后, 利用波形互相关方法 (Rawlinson, Kennett, 2004) 拾取走时残差, 共计获取 28 944 个 P 波走时数据, 990 个有效远震事件 (图 2). 从图 2 中可以看

出, 所选用的远震事件具有较好的后方位角覆盖.

国内外很多研究人员基于有限频理论的远震走时层析成像方法反演三维 P 波速度结构, 以此来研究地球内部的结构特征, 并取得了很多有意义的成果 (Dahlen *et al.*, 2000; Hung *et al.*, 2000, 2004, 2011; 杨峰等, 2010; 张风雪等, 2013, 2018; 张风雪, 吴庆举, 2019). 有限频理论认为地震波在传播过程中, 其走时不受射线路径上速度结构的影响, 而对射线路径周边区域三维空间内的速度特征最为敏感. 因此, 本文将基于 Crust1.0 模型 (Laske *et al.*, 2013) 来反演三维 P 波速度结构特征 (Paige, Saunders, 1982a, b).

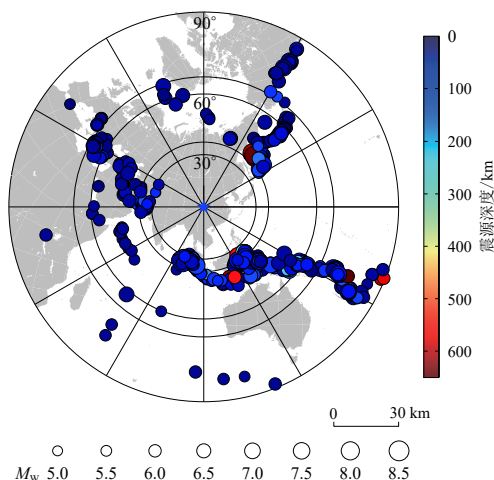


图 2 远震事件分布

Fig. 2 Teleseismic events used in this study

2 分辨率分析

考虑到反演问题存在非唯一性, 对反演结果进行分辨率测试成为一个必要环节. 常规做法是: 首先在模型空间内设置一定量变化的速度异常, 计算理论走时, 然后进行反演计算, 最后将反演计算得到的结果与初始合成模型进行对比, 以检查对构建初始模型的还原程度, 进而评价地震层析成像分辨率的高低. 本文中, 我们在模型格点处输入 $\pm 3\%$ 的速度扰动值, 然后计算合成走时数据, 再对该数据进行反演. 图 3a 给出了不同深度层位上的水平向分辨率的检测结果, 图 3b 给出了沿不同经纬度的垂向分辨率的检测结果. 可见: 不同深度层位上的分辨率效果较好, 成像结果的水平向分辨率为 1.0° , 垂直向分辨率为 100 km. 基于此, 本文以水平向 (东西向和南北向) 间距 0.5° 、垂直向间距 50 km 的标准来划分地块.

在反演过程中, 若阻尼系数选取过大, 会使最终走时残差结果偏高, 反之走时残差则会减小, 但模型会变得粗糙, 速度异常值出现尖锐突变 (丁志峰等, 1999; Hung *et al.*, 2004; 张

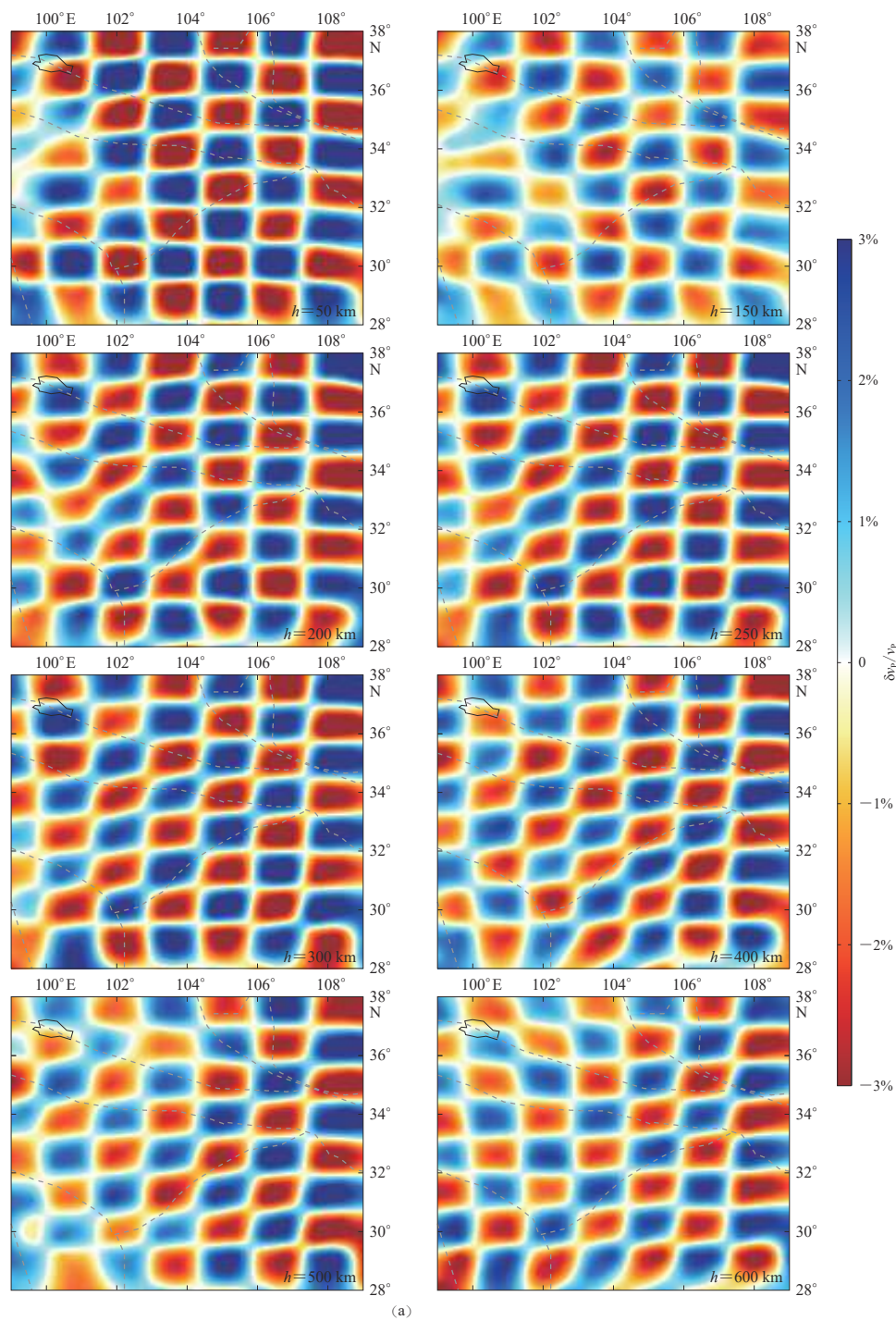


图 3 检测板测试结果

(a) 不同深度 h 上的水平向分辨率; (b) 沿不同经纬度的垂向分辨率

Fig. 3 Test results of checkboard test

(a) Resolution in the horizontal direction at different depths h ; (b) Resolution in the vertical direction along different longitudes and latitudes

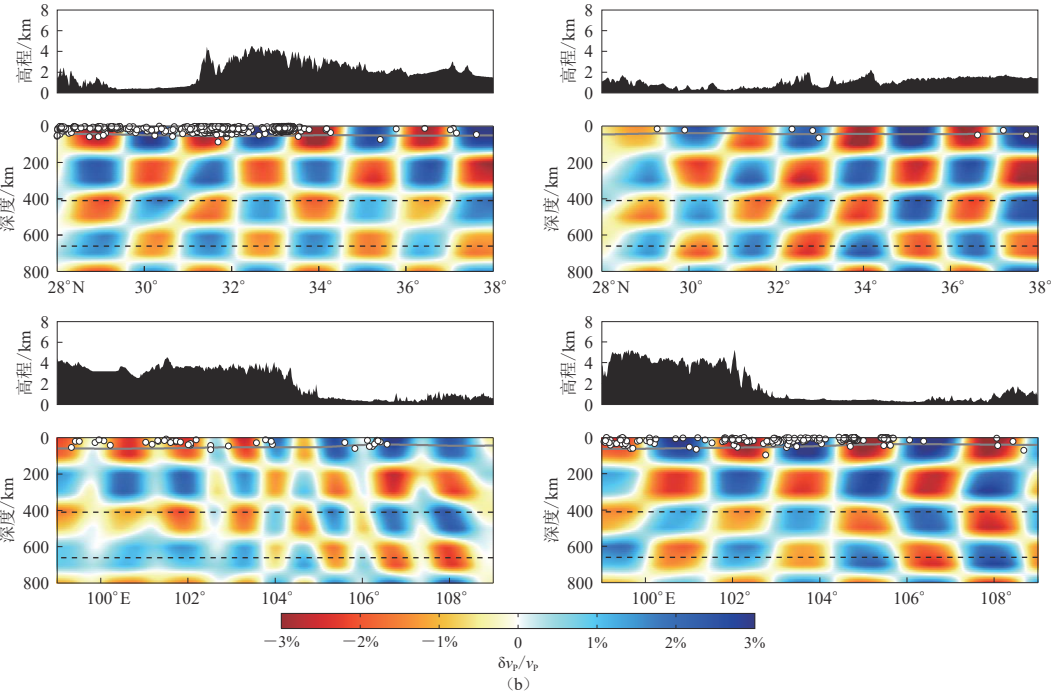


图 3 检测板测试结果
(a) 不同深度 h 上的水平向分辨率; (b) 沿不同经纬度的垂向分辨率

Fig. 3 Test results of checkboard test

(a) Resolution in the horizontal direction at different depths h ; (b) Resolution in the vertical direction along different longitudes and latitudes

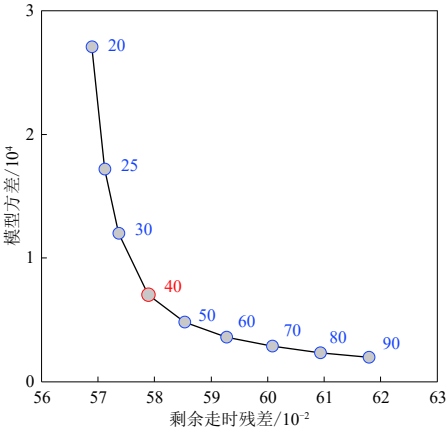


图 4 剩余走时残差与速度模型间的权衡曲线
图中数字为反演过程中采用的阻尼值

Fig. 4 The trade-off curve between traveltime residual variances and velocity anomaly

The figures denote the damping values used in inversion

风雪等, 2013)。因此, 为了确定阻尼因子的最佳取值点, 一般通过绘制由不同阻尼因子产生的数据方差与模型方差的权衡曲线来评价, 本文的权衡曲线如图 4 所示, 选取反演所用的阻尼系数为 40。

图 5 为阻尼值为 40 时反演前后获得的相对走时残差分布。可以看出: 反演之前, 走时残差主要集中分布在 $-2.0\text{--}2.0\text{ s}$ 范围内; 反演之后, 残差逐渐向中间收敛, 主要集中于 $-1.0\text{--}1.0\text{ s}$ 范围内, 这说明所用速度模型与观测到的相对走时残差基本能拟合, 反演结果收敛。

3 速度结构特征

图 6 给出了研究区 50—600 km 深度上的水平速度扰动剖面。从 50 km 和 150 km 深度的水平速度扰动剖面(图 6a, b)可以看出: 巴颜喀拉地块东缘及其邻区的壳幔结构具有明显的横向非均匀性和分区特征, 这与该区东西方向

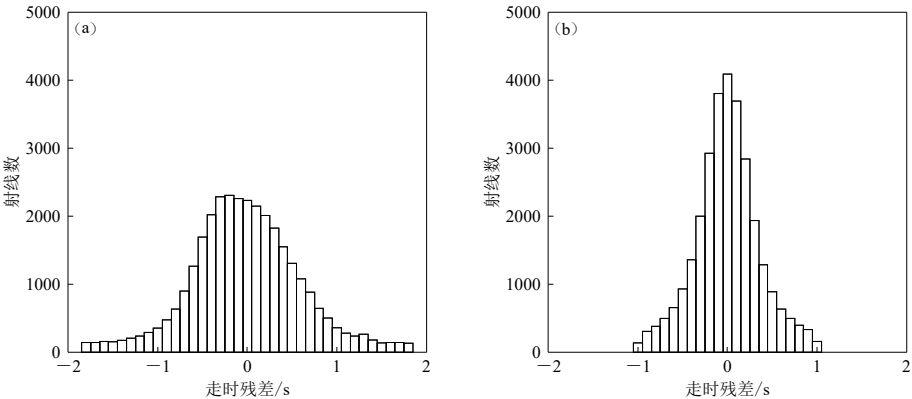


图 5 反演前(a)、后(b)走时残差对比图

Fig. 5 Distribution of the travel-time residuals before (a) and after (b) inversion

显著的地质构造和地形地貌等特征相对应，其中松潘—甘孜造山带、西秦岭和祁连山褶皱系的整体速度较低，而研究区东部的四川盆地西北缘和鄂尔多斯盆地南缘则呈现明显的高速异常，该结果与徐果明等(2007)和 Yao 等(2008)的结果相一致。还可以看到，在鄂尔多斯地块西缘与四川盆地西北缘之间存在近东西向的低速异常带，该低速异常向西延伸至祁连地块下方的低速异常，并自西向东进入摩天岭地块下方，终止于平武—青川断裂附近。平武—青川断裂是摩天岭微地块与扬子陆块北缘的分界断裂，属于中深层次的构造，区域上称为青川—略阳大断裂。该断裂形成于印支晚期秦岭造山带由北西向南东的推移作用所导致的摩天岭地块向扬子陆块北缘发生的逆冲推覆运动，下地壳低速层的存在构成了本区重要的深部动力来源。从大地构造演化的角度而言，四川盆地强烈阻挡了东向流动的低速层，地壳产生塑性变形，应力进而传递给上覆的脆性地壳，随着应力的不断积累，上地壳的断块沿着壳内低速层产生滑动形成了秦岭中升区及其周缘的一系列推覆构造。从新构造的角度分析，该区域属于东部弱隆区到西部强升区的过渡地带，夹持于秦岭北缘断裂与龙门山构造带之间，具有由北向南掀斜抬升的特点，第四纪以来的抬升幅值约为 1 000—2 000 m，呈现出与周边祁连山强断隆和四川盆地微弱抬升具有显著差异的地形地貌特征(嘉世旭等, 2017)。

从图 6c 和图 6d 可以看出：200 km 深度上的速度扰动剖面与 250 km 深度剖面图中的速度异常特征分布大体一致，即巴颜喀拉地块东缘的松潘—甘孜褶皱系和秦祁褶皱系仍表现为大范围的低速异常特征，其中九寨沟震区在上地幔深度范围内呈较为显著的低速异常，四川盆地西北缘和鄂尔多斯盆地南缘的高速异常特征明显，两地块之间夹持的秦岭中升区内低速异常特征弱化。汤吉等(2005)对青藏高原东北缘玛沁—兰州—靖边大地电磁测深剖面的深部电性研究表明，在松潘—甘孜地块、秦祁地块和鄂尔多斯地块下地壳均存在低阻层，祁连地块与西秦岭地块的深部电性结构相似，西秦岭北缘断裂上地壳的高阻层之下出现低阻异常，下地壳低阻的电阻率值仅为几 $\Omega \cdot \text{m}$ 到几十 $\Omega \cdot \text{m}$ ，且低阻异常几乎贯穿该区，其深度可达 200 km 左右。本文的 P 波层析成像所揭示的低速异常分布特征与汤吉等(2005)所给出的该低阻层展布范围和分布深度相一致。

由图 6e 可见，巴颜喀拉地块东缘及其邻区在 300 km 深度上主要表现为低速异常特征，但在鲜水河断裂带和西秦岭北缘断裂部分区段仍存在较大的速度差异，地块内部也出现了局部圈闭状的高速异常结构，而四川盆地西北缘呈现局部低速异常，高速异常体内部的结构相对

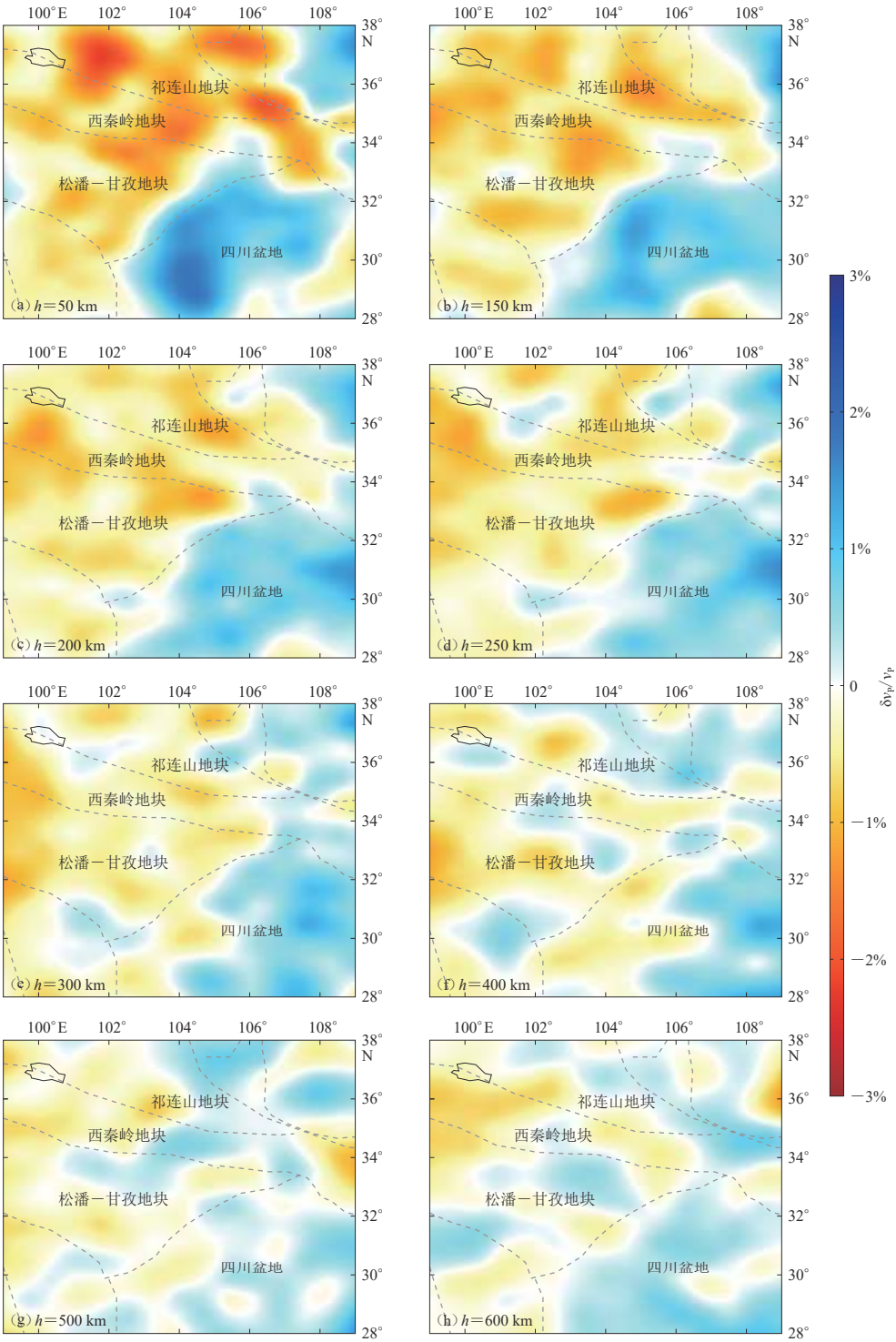


图 6 不同深度 h 上的 P 波速度扰动结果

Fig. 6 P wave velocity disturbance results at different depth h

(a) $h=50$ km; (b) $h=150$ km; (c) $h=200$ km; (d) $h=250$ km; (e) $h=300$ km; (f) $h=400$ km; (g) $h=500$ km; (h) $h=600$ km

较为均匀. 郭飏等(2009)对川西台阵的远震数据的成像结果也证实了这一点, 并指出 P 波速度的特征差异在一定程度上表明了松潘—甘孜地块与四川盆地之间深部动力学关系的差异.

400—600 km 深度属于地幔过渡带范围, 该深度上的 P 波速度结构(图 6f–6h)显示位于巴颜喀拉地块东缘的松潘—甘孜地块、西秦岭和祁连山地块表现出高、低速异常相间的特征, 其中 400 km 深度范围内的鄂尔多斯盆地南缘整体连续性的高速异常依然存在, 表明鄂尔多斯盆地巨厚的岩石层根, 与 Tian 等(2009)关于大范围体波成像结果相一致.

分别沿九寨沟震区的不同方向做 4 个垂向速度切片, 其层析成像结果如图 7 所示. 可

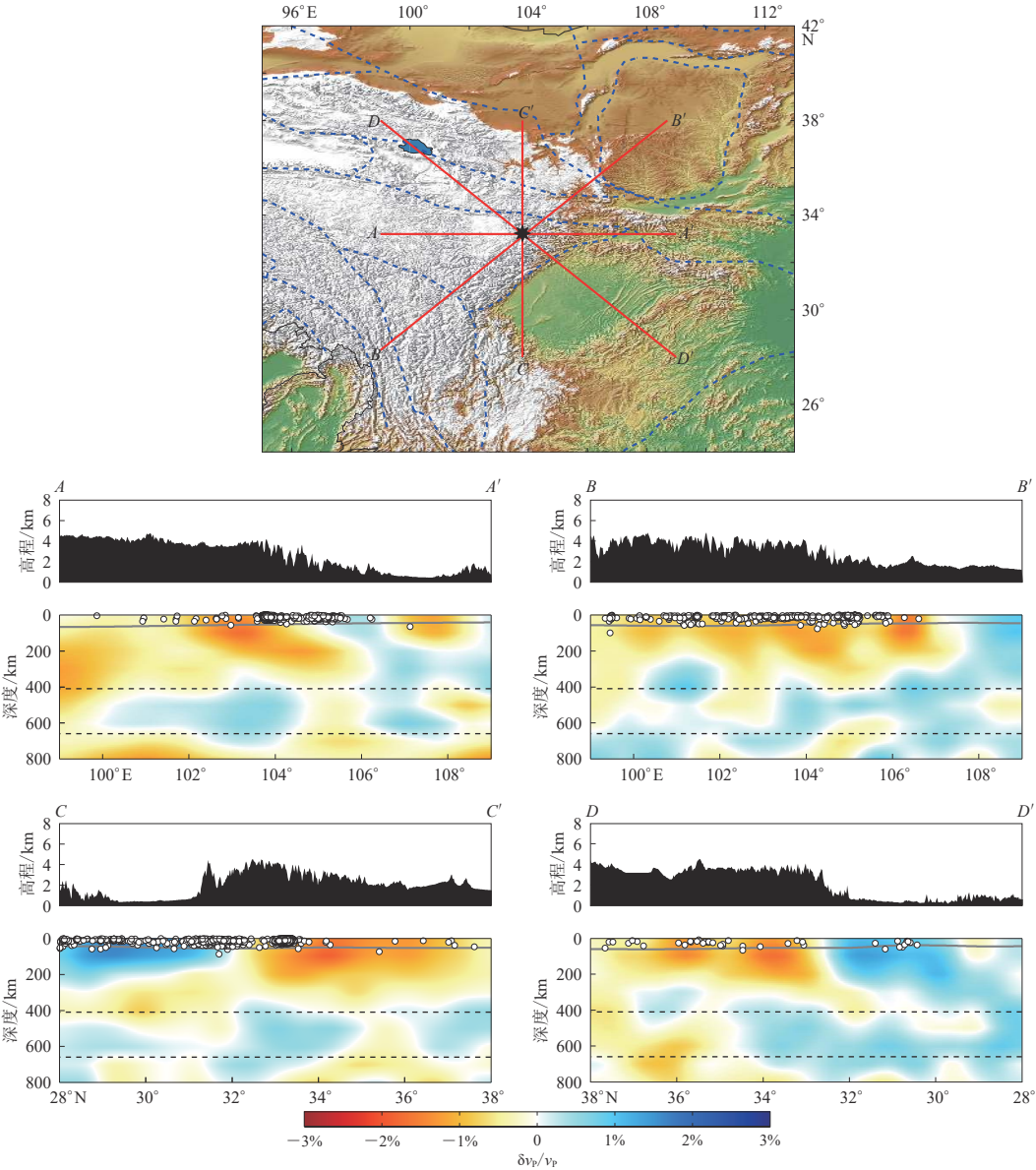


图 7 各剖面分布以及 P 波速度纵剖面的层析成像图
Fig. 7 Location of vertical sections and their tomographic results

见,四川盆地西北缘和鄂尔多斯地块南缘的高速异常特征明显,巴颜喀拉地块东缘的松潘—甘孜地槽褶皱系和秦祁褶皱系表现出大范围的低速异常特征,其中:九寨沟震区及周边 50—250 km 上地幔深度范围内存在低速层,该低速异常自下而上一直连通至松潘—甘孜地块下地壳;400 km 深度范围内的鄂尔多斯盆地南缘呈现整体连续性的高速异常,九寨沟 $M_s7.0$ 震区在地幔过渡带深度范围内存在大范围的高速异常分布。

4 讨论与结论

本文 P 波成像研究结果表明,巴颜喀拉地块东缘及其邻区的三维 P 波速度结构具有较明显的分区特征,即:四川盆地西北缘和鄂尔多斯地块南缘的高速异常特征明显,松潘—甘孜地槽褶皱系和秦祁褶皱系表现出大范围的低速异常特征,其中九寨沟震区及周边 50—250 km 上地幔深度范围存在低速层,该低速异常自下而上一直连通至松潘—甘孜地块的下地壳(图 7),据此我们推测其可能是地幔物质上涌的证据,且松潘—甘孜地块的抬升应与地幔物质的上涌有关.由于受到青藏高原强烈隆升和高原地壳物质向东运移的影响,下地壳低速层的存在有利于应力在其上方的脆性地壳内集中(李大虎等, 2015),这正是松潘—甘孜褶皱带的重要边界断裂——岷江断裂和巴颜喀拉地块的边界断裂发生强烈地震的深部地球物理条件.加之巴颜喀拉地块向东运移时受到高速、高强度的扬子克拉通地块对青藏高原物质东向挤出的强烈阻挡,在东昆仑断裂塔藏段与岷江断裂北段交会处附近所积累的应力突然释放,从而发生了九寨沟 $M_s7.0$ 地震。

巴颜喀拉地块东缘及其邻区上地幔中的低速异常在前人基于不同资料的地球物理研究结果中多有揭示,例如:徐果明等(2007)采用瑞雷面波双台法得到的成像结果表明青藏高原东缘下地壳和上地幔顶部的速度结果普遍较低;Shen 等(2011)利用共转换点相位加权叠加偏移技术对上地幔间断面进行成像的研究结果表明,青藏高原东北缘岩石层发生变形的过程中有热物质被挤出,部分热物质上涌,从而形成了该区丰富的地热、温泉和岩浆岩分布等现象.研究区东部的鄂尔多斯地块南缘和四川盆地西北缘均表现出克拉通地块所具备的高速和高力学强度等特征,鄂尔多斯地块内部至今尚未发现有火山、岩浆的侵入活动,属于保存比较完好的克拉通地块.位于扬子准地台西缘的四川盆地表现出明显的大范围高速异常,表明作为晋宁旋回固化的稳定克拉通的扬子陆块处于相对稳定的状态,四川台坳为龙门山构造带前渊的一个中新生代前陆盆地,具有稳定的结晶基底和沉积盖层二元结构(嘉世旭,张先康, 2008; 嘉世旭等, 2017).研究区东部特有的高速异常结构特征也表明这些地质上稳定的构造地块具有巨厚的岩石层根,由于青藏高原东北缘秦祁褶皱系和松潘—甘孜褶皱系下方 50—250 km 深度上具有的显著低速异常可能是由热的软流层物质上涌引起,这些高速、高力学强度的地块对青藏高原物质东向挤出会起到强烈的阻挡作用,其逃逸阻挡作用可深达整个上地幔。

三维 P 波速度结构还揭示了九寨沟 $M_s7.0$ 地震震区在 400—600 km 地幔过渡带深度范围内表现为明显的高速异常特征,已有研究结果也表明了此点,例如:Lei 和 Zhao (2016)通过对青藏高原东缘的体波层析成像研究揭示了地幔过渡带深度范围内高速异常体的存在;郭慧丽等(2017)的成像结果显示在青藏东北缘地幔过渡带深度范围内存在近 SN 向的条带状高速异常,该异常向南延伸至松潘—甘孜地槽褶皱系、向北一直延伸至祁连地块和阿拉善地块以西,内蒙西部也出现了明显高速异常,有可能是拆沉的岩石层地幔所致.吴福元等(2008)

从火山岩角度分析认为, 青藏高原北部大量的新生代火山岩主体富硅, 且不存在低Sr同位素的岩石层地幔端元, 故推测岩石层地幔发生了拆沉作用, 而原先的空间被软流层所取代。

本文三维P波速度结构研究表明巴颜喀拉地块东缘及邻区的壳幔速度结构具有明显的横向不均匀性和分区特征, 其中松潘—甘孜地槽褶皱系、西秦岭和祁连山褶皱系整体呈现出低速异常特征, 而研究区东部的四川盆地西北缘和鄂尔多斯地块南缘则显示出明显的高速异常。成像研究结果表明了九寨沟震区及周边上地幔存在低速层, 该低速异常自下而上一直连通至松潘—甘孜地块的下地壳, 据此我们推测该异常可能是热的软流层物质上涌引起, 松潘—甘孜地块的抬升应与地幔物质的上涌有关。三维P波速度结构还揭示了九寨沟 $M_s7.0$ 地震震区在400—600 km地幔过渡带深度范围内表现为明显的高速异常特征。

研究区上地幔P波速度结构差异还表明松潘—甘孜地块的抬升可能与地幔物质的上涌有关, 而龙门山构造带的形成机制与松潘—甘孜地块明显不同, 巴颜喀拉地块向东南方向运移受到东部高速、高强度的克拉通地块对青藏高原物质的东向挤出强烈的阻挡, 而九寨沟震区处于松潘—甘孜地块重要的北东边界断裂交会处附近, 易于应力集中, 这些因素可能是巴颜喀拉地块东缘地块边界断裂交会处附近发生九寨沟 $M_s7.0$ 地震的基本动力学背景。

参 考 文 献

- 邓起东, 高翔, 陈桂华, 杨虎. 2010. 青藏高原昆仑—汶川地震系列与巴颜喀喇断块的最新活动[J]. 地学前缘, 17(5): 163–178.
- Deng Q D, Gao X, Chen G H, Yang H. 2010. Recent tectonic activity of Bayankala fault-block and the Kunlun-Wenchuan earthquake series of the Tibetan Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(5): 163–178 (in Chinese).
- 丁志峰, 何正勤, 孙为国, 孙宏川. 1999. 青藏高原东部及其边缘地区的地壳上地幔三维速度结构[J]. 地球物理学报, 42(2): 197–205.
- Ding Z F, He Z Q, Sun W G, Sun H C. 1999. 3-D crust and upper mantle velocity structure in eastern Tibetan Plateau and its surrounding areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(2): 197–205 (in Chinese).
- 杜方, 龙锋, 阮祥, 易桂喜, 宫悦, 赵敏, 张致伟, 乔慧珍, 汪智, 吴江. 2013. 四川芦山7.0级地震及其与汶川8.0级地震的关系[J]. 地球物理学报, 56(5): 1772–1783.
- Du F, Long F, Ruan X, Yi G X, Gong Y, Zhao M, Zhang Z W, Qiao H Z, Wang Z, Wu J. 2013. The $M7.0$ Lushan earthquake and the relationship with the $M8.0$ Wenchuan earthquake in Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(5): 1772–1783 (in Chinese).
- 杜方, 闻学泽, 冯建刚, 梁明剑, 龙锋, 吴江. 2018. 六盘山断裂带的地震构造特征与强震危险背景[J]. 地球物理学报, 61(2): 545–559.
- Du F, Wen X Z, Feng J G, Liang M J, Long F, Wu J. 2018. Seismo-tectonics and seismic potential of the Liupanshan fault zone (LPSFZ), China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(2): 545–559 (in Chinese).
- 郭飏, 刘启元, 陈九辉, 刘立申, 李顺成, 李昱, 王峻, 齐少华. 2009. 川西龙门山及邻区地壳上地幔远震P波层析成像[J]. 地球物理学报, 52(2): 346–355.
- Guo B, Liu Q Y, Chen J H, Liu L S, Li S C, Li Y, Wang J, Qi S H. 2009. Teleseismic P-wave tomography of the crust and upper mantle in Longmenshan area, west Sichuan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(2): 346–355 (in Chinese).
- 郭慧丽, 丁志峰, 徐小明. 2017. 南北地震带北段的远震P波层析成像研究[J]. 地球物理学报, 60(1): 86–97.
- Guo H L, Ding Z F, Xu X M. 2017. Upper mantle structure beneath the northern South-North Seismic Zone from teleseismic traveltime data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(1): 86–97 (in Chinese).
- 嘉世旭, 张先康. 2008. 青藏高原东缘深地震测深震相研究与地壳细结构[J]. 地球物理学报, 51(5): 1431–1443.
- Jia S X, Zhang X K. 2008. Study on the crust phases of deep seismic sounding experiments and fine crust structures in the north-east margin of Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(5): 1431–1443 (in Chinese).

- 嘉世旭, 林吉焱, 郭文斌, 赵楠, 邱勇. 2017. 巴颜喀拉块体地壳结构多样性探测 [J]. *地球物理学报*, **60**(6): 2226–2238.
- Jia S X, Lin J Y, Guo W B, Zhao N, Qiu Y. 2017. Investigation on diversity of crustal structures beneath the Bayan Har block[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **60**(6): 2226–2238 (in Chinese).
- 李松林, 张先康, 张成科, 赵金仁, 成双喜. 2002. 玛沁—兰州—靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究 [J]. *地球物理学报*, **45**(2): 210–217.
- Li S L, Zhang X K, Zhang C K, Zhao J R, Cheng S X. 2002. A preliminary study on the crustal velocity structure of Maqin-Lanzhou-Jingbian by means of deep seismic sounding profile[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **45**(2): 210–217 (in Chinese).
- 李永华, 田小波, 吴庆举, 曾融生, 张瑞青. 2006a. 青藏高原 INDEPTH-III 剖面地壳厚度与泊松比: 地质与地球物理含义 [J]. *地球物理学报*, **49**(4): 1037–1044.
- Li Y H, Tian X B, Wu Q J, Zeng R S, Zhang R Q. 2006a. The Poisson ratio and crustal structure of the central Qinghai-Xizang inferred from INDEPTH-III teleseismic waveforms: Geological and geophysical implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **49**(4): 1037–1044 (in Chinese).
- 李永华, 吴庆举, 安张辉, 田小波, 曾融生, 张瑞青, 李红光. 2006b. 青藏高原东北缘地壳 S 波速度结构与泊松比及其意义 [J]. *地球物理学报*, **49**(5): 1359–1368.
- Li Y H, Wu Q J, An Z H, Tian X B, Zeng R S, Zhang R Q, Li H G. 2006b. The Poisson ratio and crustal structure across the NE Tibetan Plateau determined from receiver functions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **49**(5): 1359–1368 (in Chinese).
- 李大虎, 丁志峰, 吴萍萍, 郑晨, 叶庆东, 梁明剑. 2015. 鲜水河断裂带南东段的深部孕震环境与 2014 年康定 $M_s 6.3$ 地震 [J]. *地球物理学报*, **58**(6): 1941–1953.
- Li D H, Ding Z F, Wu P P, Zheng C, Ye Q D, Liang M J. 2015. The deep seismogenic environment of the southeastern section of the Xianshuihe fault zone and the 2014 Kangding $M_s 6.3$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(6): 1941–1953 (in Chinese).
- 汤吉, 詹艳, 赵国泽, 邓前辉, 王继军, 陈小斌, 赵俊猛, 宣飞. 2005. 青藏高原东北缘玛沁—兰州—靖边剖面地壳上地幔电性结构研究 [J]. *地球物理学报*, **48**(5): 1205–1216.
- Tang J, Zhan Y, Zhao G Z, Deng Q H, Wang J J, Chen X B, Zhao J M, Xuan F. 2005. Electrical conductivity structure of the crust and upper mantle in the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau along the profile Maqin-Lanzhou-Jingbian[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **48**(5): 1205–1216 (in Chinese).
- 闻学泽, 杜方, 张培震, 龙锋. 2011. 巴颜喀拉块体北和东边界大地震序列的关联性与 2008 年汶川地震 [J]. *地球物理学报*, **54**(3): 706–716.
- Wen X Z, Du F, Zhang P Z, Long F. 2011. Correlation of major earthquake sequences on the northern and eastern boundaries of the Bayan Har block, and its relation to the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(3): 706–716 (in Chinese).
- 吴福元, 黄宝春, 叶凯, 方爱民. 2008. 青藏高原造山带的垮塌与高原隆升 [J]. *岩石学报*, **24**(1): 1–30.
- Wu F Y, Huang B C, Ye K, Fang A M. 2008. Collapsed Himalayan-Tibetan orogen and the rising Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, **24**(1): 1–30 (in Chinese).
- 徐果明, 姚华建, 朱良保, 沈玉松. 2007. 中国西部及其邻域地壳上地幔横波速度结构 [J]. *地球物理学报*, **50**(1): 193–208.
- Xu G M, Yao H J, Zhu L B, Shen Y S. 2007. Shear wave velocity structure of the crust and upper mantle in western China and its adjacent area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **50**(1): 193–208 (in Chinese).
- 徐锡伟, 陈文彬, 于贵华, 马文涛, 戴华光, 张志坚, 陈永明, 何文贵, 王赞军, 党光明. 2002. 2001 年 11 月 14 日昆仑山库赛湖地震 ($M_s 8.1$) 地表破裂带的基本特征 [J]. *地震地质*, **24**(1): 1–13.
- Xu X W, Chen W B, Yu G H, Ma W T, Dai H G, Zhang Z J, Chen Y M, He W G, Wang Z J, Dang G M. 2002. Characteristic features of the Hoh Sai Hu (Kunlunshan) earthquake ($M_s 8.1$), northern Tibetan Plateau, China[J]. *Seismology and Geology*, **24**(1): 1–13 (in Chinese).
- 徐锡伟, 闻学泽, 陈桂华, 于贵华. 2008. 巴颜喀拉地块东部龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义 [J]. *中国科学: D 辑*,

38(5): 529–542.

- Xu X W, Wen X Z, Chen G H, Yu G H. 2008. Discovery of the Longriba fault zone in eastern Bayan Har block, China and its tectonic implication[J]. *Science in China: Series D*, **51**(9): 1209–1223.
- 杨峰, 黄金莉, 杨挺. 2010. 应用远震有限频率层析成像反演首都圈上地幔速度结构[J]. *地球物理学报*, **53**(8): 1806–1816.
- Yang F, Huang J L, Yang T. 2010. Upper mantle structure beneath the Chinese capital region from teleseismic finite-frequency tomography[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(8): 1806–1816 (in Chinese).
- 杨歧焱, 吴庆举, 盛艳蕊, 高家乙, 宋键, 邸龙. 2018. 张渤地震带及邻区近震体波成像及孕震环境分析[J]. *地球物理学报*, **61**(8): 3251–3262.
- Yang Q Y, Wu Q J, Sheng Y R, Gao J Y, Song J, Di L. 2018. Regional seismic body wave tomography and deep seismogenic environment beneath Zhangbo seismic belt and its adjacent area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **61**(8): 3251–3262 (in Chinese).
- 詹艳. 2008. 青藏高原东北缘地区深部电性结构及构造涵义[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 59–70.
- Zhan Y. 2008. *Deep Electric Structures Beneath the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau and Its Tectonic Implications*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 59–70 (in Chinese).
- 詹艳, 赵国泽, 王立凤, 王继军, 陈小斌, 赵凌强, 肖骑彬. 2014. 西秦岭与南北地震构造带交汇区深部电性结构特征[J]. *地球物理学报*, **57**(8): 2594–2607.
- Zhan Y, Zhao G Z, Wang L F, Wang J J, Chen X B, Zhao L Q, Xiao Q B. 2014. Deep electric structure beneath the intersection area of West Qinling orogenic zone with North-South Seismic tectonic zone in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(8): 2594–2607 (in Chinese).
- 张风雪, 吴庆举, 李永华. 2013. 中国东北地区远震P波走时层析成像研究[J]. *地球物理学报*, **56**(8): 2690–2700.
- Zhang F X, Wu Q J, Li Y H. 2013. The traveltimes tomography study by teleseismic P wave data in the Northeast China area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(8): 2690–2700 (in Chinese).
- 张风雪, 吴庆举, 丁志峰. 2018. 青藏高原东部P波速度结构及其对高原隆升的启示[J]. *科学通报*, **63**(19): 1949–1961.
- Zhang F X, Wu Q J, Ding Z F. 2018. A P-wave velocity study beneath the eastern area of Tibetan Plateau and its implication for plateau growth[J]. *Chinese Science Bulletin*, **63**(19): 1949–1961 (in Chinese).
- 张风雪, 吴庆举. 2019. 松辽盆地北缘的上地幔速度结构及该区火山成因探讨[J]. *地球物理学报*, **62**(8): 2918–2929.
- Zhang F X, Wu Q J. 2019. Velocity structure in upper mantle and its implications for the volcanism nearby the north edge of Songliao Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **62**(8): 2918–2929 (in Chinese).
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. *中国科学: D辑*, **33**(增刊1): 12–20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, Ma J, Gan W J, Min W, Mao F Y, Wang Q. 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. *Science in China: Series D*, **46**(S2): 13–24.
- Dahlen F A, Hung S H, Nolet G. 2000. Fréchet kernels for finite-frequency traveltimes: I. Theory[J]. *Geophys J Int*, **141**(1): 157–174.
- Densmore A L, Ellis M A, Li Y, Zhou R J, Hancock G S, Richardson N. 2007. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, **26**(4): TC4005.
- Huang Z C, Wang P, Xu M J, Wang L S, Ding Z F, Wu Y, Xu M J, Mi N, Yu D Y, Li H. 2015. Mantle structure and dynamics beneath SE Tibet revealed by new seismic images[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **411**: 100–111.
- Hung S H, Dahlen F A, Nolet G. 2000. Fréchet kernels for finite-frequency traveltimes: II. Examples[J]. *Geophys J Int*, **141**(1): 175–203.
- Hung S H, Shen Y, Chiao L Y. 2004. Imaging seismic velocity structure beneath the Iceland hot spot: A finite frequency approach[J]. *J Geophys Res*, **109**(B8): B08305.
- Hung S H, Chen W P, Chiao I Y. 2011. A data-adaptive, multiscale approach of finite-frequency, traveltimes tomography with special reference to P and S wave data from central Tibet[J]. *J Geophys Res*, **116**(B6): B06307.
- Kirby E, Whipple K X, Burchfiel B C, Tang W Q, Berger G, Sun Z M, Chen Z L. 2000. Neotectonics of the Min Shan,

- China: Implications for mechanisms driving Quaternary deformation along the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Geol Soc Am Bull*, **112**(3): 375–393.
- Laske G, Masters G, Ma Z T, Pasyanos M. 2013. Update on CRUST1.0: A 1-degree global model of Earth's crust[J]. *Geophys Res Abstr*, **15**: EGU2013-2658.
- Lei J S, Zhao D P. 2016. Teleseismic P-wave tomography and mantle dynamics beneath eastern Tibet[J]. *Geochem Geophys Geosyst*, **17**(5): 1861–1884.
- Li D H, Liao H, Ding Z F, Zhan Y, Wu P P, Xu X M, Zheng C. 2018. Joint inversion of the 3D P wave velocity structure of the crust and upper mantle under the southeastern margin of the Tibetan Plateau using regional earthquake and teleseismic data[J]. *Acta Geologica Sinica*, **92**(1): 16–33.
- Liu Z, Tian X B, Gao R, Wang G C, Wu Z B, Zhou B B, Tan P, Nie S T, Yu G P, Zhu G H, Xu X. 2017. New images of the crustal structure beneath eastern Tibet from a high-density seismic array[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **480**: 33–41.
- Meyer B, Tapponnier P, Bourjot L, Métivier F, Gaudemer Y, Peltzer G, Guo S M, Chen Z T. 1998. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet Plateau[J]. *Geophys J Int*, **135**(1): 1–47.
- Paige C C, Saunders M A. 1982a. Algorithm 583: LSQR: Sparse linear equations and least squares problems[J]. *ACM Trans Math Softw*, **8**(2): 195–209.
- Paige C C, Saunders M A. 1982b. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares[J]. *ACM Trans Math Softw*, **8**(1): 43–71.
- Rawlinson N, Kennett B L N. 2004. Rapid estimation of relative and absolute delay times across a network by adaptive stacking[J]. *Geophys J Int*, **157**(1): 332–340.
- Shen X Z, Mei X P, Zhang Y S. 2011. The crustal and upper-mantle structures beneath the northeastern margin of Tibet[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **101**(6): 2782–2795.
- Tian Y, Zhao D P, Sun R M, Teng J W. 2009. Seismic imaging of the crust and upper mantle beneath the North China Craton[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **172**(3/4): 169–182.
- van der Woerd J, Tapponnier P, Ryerson F J, Meriaux A S, Meyer B, Gaudemer Y, Finkel R C, Caffee M W, Zhao G G, Xu Z Q. 2002. Uniform postglacial slip-rate along the central 600 km of the Kunlun fault (Tibet), from ²⁶Al, ¹⁰Be, and ¹⁴C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology[J]. *Geophys J Int*, **148**(3): 356–388.
- Wang C Y, Wu J, Lou H, Lü Z Y. 2003. P-wave crustal velocity structure in the western Sichuan and eastern Tibetan region[J]. *Science in China: Series D*, **46**(Suppl): 254–265.
- 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[J]. *Geophys J Int*, **173**(1): 205–219.