龙门山断裂带精细速度结构的双差层析成像研究[1]

邓文泽，陈九辉*，郭飚，刘启元，李顺成，李昱，尹昕忠，齐少华

中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室，北京 100029

摘要：利用川西流动地震台阵、汶川地震震后应急台网记录到的 P 波到时资料，对 2008 年 5 月至 2008 年 10 月期间发生的汶川地震余震序列应用双差层析成像方法进行了地震震源和三维 P 波速度结构的联合反演．结果显示，联合反演获得的地震重定位结果与基于一维地壳参考模型的双差定位方法结果相近；研究区 15km 以上速度结构与地表断裂分布密切相关，20km 以下深度呈现北东向和北西向交错结构．汶川地震破裂带南段龙门山断裂带之间上地壳呈现高速异常，速度结构的非均匀变化是控制余震分布和主震破裂传播的主要因素；联合反演结果给出了小鱼洞-理县方向存在隐伏断裂的速度结构证据，同时发现，破裂带北东段可能沿新发断裂扩展；结果确认了汶川地震起始段的高角度逆冲断裂特征，也确认了前山断裂和中央断裂在约 20km 深度合并到脆韧转换带的特征．

关键词 汶川地震，龙门山断裂带，川西台阵，双差层析成像

Fine velocity structure of the Longmenshan fault zone by double-difference tomography

DENG Wen-Ze，CHEN Jiu-Hui*，GUO Biao，LIU Qi-Yuan，
LI Shun-Cheng，LI Yu，YIN Xin-Zhong，QI Shao-Hua

State Key Laboratory of Earthquake Dynamic, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract Using P-wave travel time data recorded by the Western Sichuan movable seismic array and the earthquake emergency response stations during May 2008 and October 2008, We obained accurate relocation of Wenchuan earthquake sequence and 3D P-wave seismic velocity structure by double-difference tomography. The results show that aftershock relocation by joint-inversion is similar to that based on 1-D velocity model by double-difference relocation; the P-wave velocity of Longmenshan fault zone region in 0~15km is closely correlated with local geology, and region in 20~30km shows NE-NW cross structure. The sourth segment of Longmenshan fault zone is imaged as high P-wave velocity region in upper crust, the structure heterogeneous controls the distribution of aftershocks and the direction of propagation. The joint-inversion result also proves the exising Xiaoyudong –Lixian buried fault, we also found that NE segment of rupture zone may extend in new fault; The results confirm the Wenchuan earthquake as a high-angle listric thrust, and also confirm that the Yingxiu-Beichuan fault and Guanxian-Jiangyou fault merge into a shear belt at the depth of 20km.

---

[1]基金项目 国家自然科学基金项目（41274060）、地震动力学国家重点实验室自主课题（LED2010A01）和国家重点基础研究发展计划项目（2004CB418402）联合资助

作者简介 邓文泽，男，１９８９年生，硕士研究生，主要从事宽频带地震学研究．Email: wenzedeng@163.com

*通讯作者 陈九辉，男，１９６９年生，研究员，主要从事宽频带地震学和深部探测研究．Email: chenjh@ies.ac.cn

Keywords Wenchuan earthquake, Longmenshan fault zone, Western Sichuan seimic array, Double difference tomography

1 引言

2008 年 5 月 12 日在我国四川省汶川县发生了 M_w7.9 级地震，地震造成了巨大的人员伤亡、经济损失和地质灾害[1,2]. 地震发生之后，许多学者对此次地震的地质背景、发震构造、发震机理等方面进行了研究并取得了许多重要的成果. 地表地质考察[3]和地表破裂过程反演[4-6]发现汶川地震起始于龙门山断裂带的南段，沿龙门山断裂带向北东向单向传播，在映秀北川断裂和灌县-江油断裂上形成了长约 300km 的破裂,其中有 240km 出露在地表. 余震定位结果[7,8]发现龙门山中央断裂在近地表倾角达到 70° ～80° ，随深度逐渐变缓，三条断裂在接近地震起始破裂的约 20km 深度收敛合并. GPS 和 InSAR 反演[9]得到的汶川地震震源过程也证实了这一观测结果. 基于以上观测研究结果推测，汶川地震是发生在高角度铲形断裂上的逆冲型地震[10,11]. 但是，尽管有相当多的结果支持这一结论，关于汶川地震破裂带断层形态和地震破裂机理仍然存在很多争论[12-14]. 这些争论的焦点则在于汶川地震破裂断层的深部展布和形态，以及龙门山断裂带下方和周边地区的构造环境.

深部地球物理探测研究是获得地震区深部构造环境和孕震环境的根本手段. 川西龙门山地区作为青藏高原东部边界，历来备受关注，并对其结构和变形进行了众多研究[15-20]. 汶川地震之后，许多国内外地球物理学者在龙门山断裂带和周边地区开展了大量深部探测研究工作，取得了众多研究成果. Li 等[21]和李昱等[22]利用地震环境噪声成像方法获得了震区的面波相速度结构、刘启元等[23]利用接收函数反演方法获得了穿过汶川地震震源区的 S 波速度结构，结果给出了四川盆地与松潘—甘孜地块之间的碰撞变形关系和速度结构差异. Zhang 等[24] 和 Robert 等[25]分别利用接收函数偏移叠加方法获得了横跨龙门山的地壳厚度变化和壳内间断面的横向变化特征. 郭飚等，吴建平等，雷建设等以及胥颐等[26-29]利用地震层析成像方法研究了震区 P 波和 S 波三维速度结构，给出了横向分辨率为 30-50km 的地壳速度结构，结果显示龙门山断裂带上盘下方中上地壳具有高波速异常. 但是，这些深部探测研究的水平分辨率仍然难以对宽度仅 20-30km 的龙门山断裂带的深部精细结构给出满意的探测结果.

伴随着汶川地震的发生，在龙门山断裂带发生了大量的余震，利用这些密集分布的余震走时资料可以获得龙门山断裂带更高分辨率的速度结构探测结果. 双差层析成像方法[30,31]

是将双差地震定位方法[32]和传统走时层析成像方法相结合，利用邻近地震之间相对走时差和地震到台站之间的绝对走时进行震源位置和速度结构联合反演的方法. 双差层析成像方法被广泛应用于地震区精细速度结构研究[33-35]，获得了从区域尺度到几百米尺度的高分辨率成像和地震定位结果. Pei 等 [36]利用汶川地震余震序列和双差层析成像方法对龙门山地区地壳结构进行了相关研究，但是由于他们并未对地震震源和速度结构进行联合反演，仅仅给出了基于粗糙的初始震源位置得到的速度结构，其结果仍需要进一步确认.

本文将综合利用川西流动地震台阵[37]和汶川地震震后应急流动台网记录到的汶川地震余震序列的走时资料，对龙门山断裂带中上地壳速度结构进行双差层析成像研究，以便更好的了解龙门山断裂带中上地壳速度结构和断裂构造，为研究汶川地震发生机理和建立地震动力学模型提供新的证据.

2 数据与方法

2.1 双差层析成像方法与台阵分布

所谓双差层析成像方法是指利用两射线路径相似的地震到时差反演地下速度结构的层析成像方法, Zhang 等[30]研究表明利用到时差数据能提高速度结构反演的精度，但同时要求更丰富的数据，近年来地震台网分布越来越广，近震层析成像有了更好的发展前景，双差层析成像方法拥有了应用基础.

Zhang 等[30]在双差定位方法的基础上提出了双差层析成像方法，假设有两个相邻的地震，他们到同一个台站的路径相似，对这两个地震的走时残差做差得到双差，利用该数据进行速度结构的反演. 地震 i 到地震台站 k 的体波到时可以表示成积分形式

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k u\,ds \tag{1}$$

τ^i 是地震 i 的发震时刻，u 是慢度矢量，ds 是路径积分元.

对于近震层析成像，震源坐标（x1,x2,x3）、发震时刻、射线路径、慢度矢量都是未知的. 地震到时和地震定位的关系是非线性的，为了方便计算，采用 Taylor 展开的方法使其线性化，同时用三维网格速度模型，就可以把上式方程写成一个线性的等式

$$r_k^i = \sum_{l=1}^{3} \frac{\partial T_k^i}{\partial_l^i x} \Delta x_l^i + \Delta\tau^i + \sum_{m=1}^{M_{ik}} \sum_{n=1}^{N} w_{mn} \Delta u_n \Delta s_m \tag{2}$$

r_k^i是观测到时和理论到时差，M_{ik}是地震 i 到台站 k 的射线路径的分段数，w_{mn}是以第 m 个节点为中心的第 n 网格个节点插值权系数. 同样的道理对于地震 j 到台站 k 的走时残差也可以写成（2）式，因此：

$$r_k^i - r_k^j = \sum_{l=1}^{3} \frac{\partial T_k^i}{\partial_l^i x} \Delta x_l^i + \Delta\tau^i + \sum_{m=1}^{M_{ik}} \sum_{n=1}^{N} w_{mn} \Delta u_n \Delta s_m - \sum_{l=1}^{3} \frac{\partial T_k^j}{\partial_l^j x} \Delta x_l^j - \Delta\tau^j - \sum_{m=1}^{M_{jk}} \sum_{n=1}^{N} w_{mn} \Delta u_n \Delta s_m$$

（3）

该方法通过利用绝对到时以及相对到时实现三维速度结构的反演和地震重定位，因为震源位置和速度结构存在耦合效应, 并且真实的速度结构未知，利用绝对走时数据确定震源区域以外区域的速度结构，利用到时差数据确定震源区的精细速度结构, 双差层析成像可以通过适当调整速度结构来提高地震定位的精度, 地震定位的相对精确可以降低由于射线路径的不同造成的速度结构反演的误差，从而提高速度结构反演的精度. 因此相比于标准的层析成像方法（仅采用绝对到时）双差层析成像方法可以得到更精确的速度结构和地震定位结果[30,31].

图 1 给出了本文的研究区域内(102° ～106° E, 30° ～34° N)的主要地表破裂带以及联合反演使用的台站的分布，观测台站包括了川西流动台阵 51 个台站、汶川地震震后应急台网台站和四川省区域台网台站 76 个. 观测台站跨越了松潘—甘孜地块和华南地块的四川盆地，覆盖了包括汶川地震主震区在内的龙门山断裂带主要区域，台间距约为 10—40km. 联合反演所用资料为 2008 年 5 月至 10 月的记录到的 4000 多个余震，其中，余震序列的初始震源位置利用了陈九辉等[8]利用双差地震定位方法获得的结果.

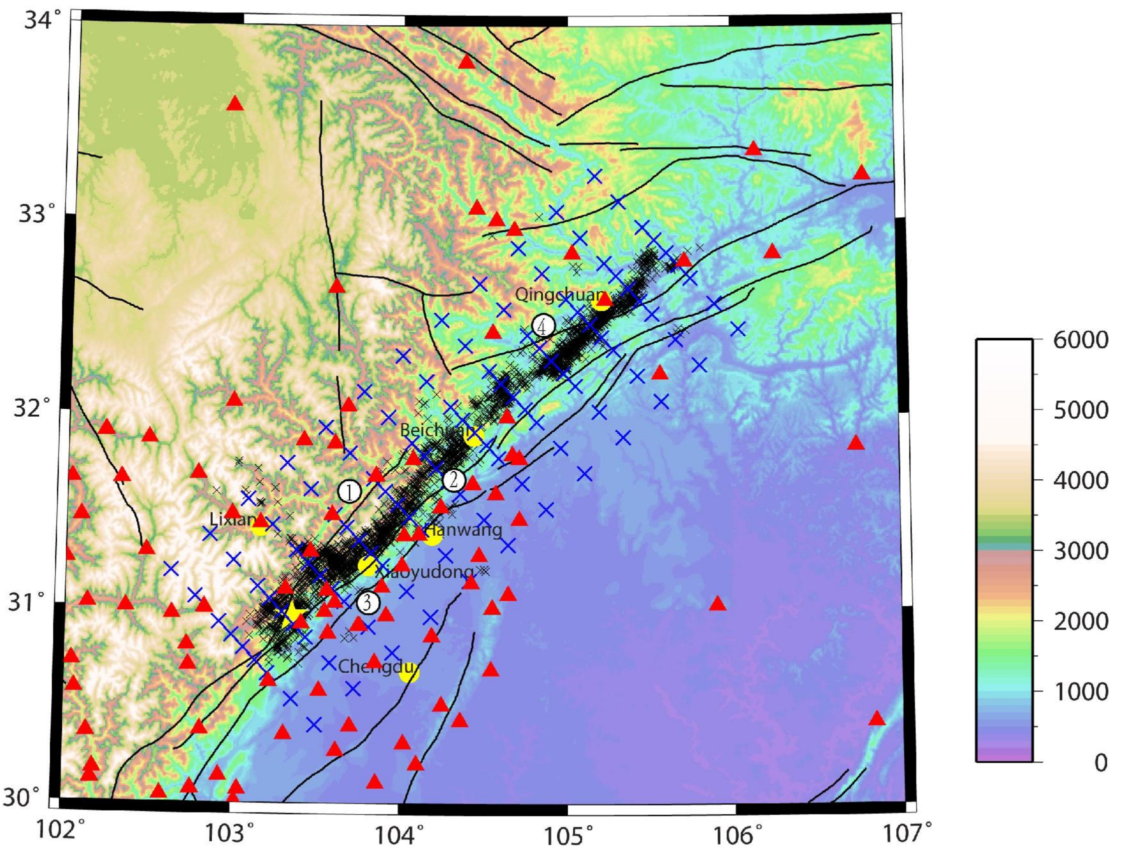

图 1 川西台站分布以及地震余震的分布

红色三角表示地震台站，黄色的五星表示汶川地震主震，黑色的十字表示重定位的余震分布，黑色的实线表示断层，蓝色的十字表示反演的网格节点，其中 X 轴垂直断裂带，Y 轴平行于断裂带.黄色的圆圈表示主要地名．主要的断层有：①汶川—茂县断裂、②映秀—北川断裂、③灌县—江油断裂、④青川断裂.

Fig.1 Station map of western Sichuan seismic array and Spatial distribution of Wenchuan earthquake sequence after relocation

Red triangles represent the station, yellow star is the main shock of the Wenchuan earthquake, the black line represent faults, the black cross represent aftershocks and the blue cross represent inversion grid, the yellow circle represent main place name. Main fault including: ①Wenchuan-Maixian fault, ②Yingxiu-Beichuan fault, ③ Guanxian-Jiangyou fault, ④Qingchuan fault.

2.2 余震数据和反演模型

本文选取的数据是川西流动台站和四川固定地震台网共 127 个台站于 2008 年 5 月至 2008 年 10 月期间记录到的 4184 个地震，为了提高双差层析成像方法的反演精度，我们限制震中距小于 100km，每个地震对之间间距小于 20km，并且每个地震最少记录台站数为 6 个，最终用于反演的台站数为 96 个，地震事件 2973 个，其中 P 波绝对到时 41665 个，P 波双差数据 630343 个．在研究区域建立直角坐标系并设置好反演网格点，其中 X 轴垂直于龙门山断裂带（约 NW45°），Y 轴平行于龙门山断裂带(图 1)，坐标原点为东经 104.2105°、北纬 31.7217°．Y 轴的网格节点间距为 30km,从 SW 到 NE 方向分别为 -150.0km, -120.0km, -90.0km, -60.0km, -30.0km, 0.0km, 30.0km, 60.0km, 90.0km, 120.0km, 150.0km, 180.0km．X 轴的网格节点为不等间距，从 NW 到 SE 方向分别为 -60.0km, -40.0km, -20.0km, -10.0km, 0.0km, 10.0km, 20.0km, 40.0km, 60.0km．Z 方向垂直向下，网格节点分别为 -5km, 0km, 5km, 10km, 15km, 20km, 25km, 30km．本文反演采用的初始模型参考了该地区前人的研究结果（赵珠等）[38]见表 1，该方法采用了带阻尼的 LSQR 算法，该算法中不同阻尼系数控制的收敛速度和约束模型结果的平滑程度，通过分析不同的阻尼系数对模型平滑程度和相对走时残差的关系，可以看到选择阻尼为 200 时，模型相对平滑，走时残差也相对较小（图 2）．通过 16 次迭代数据的均方根残差从 0.843s 降低到 0.156s．

表 1 龙门山断裂带初始速度模型

Table.1 Initial P wave velocity structure of Wenchuan

P 波速度（km/s）	界面深度(km)
4.88	0.00
5.80	5.00
5.96	10.00
6.14	15.00
6.32	20.00
6.50	25.00
6.82	30.00

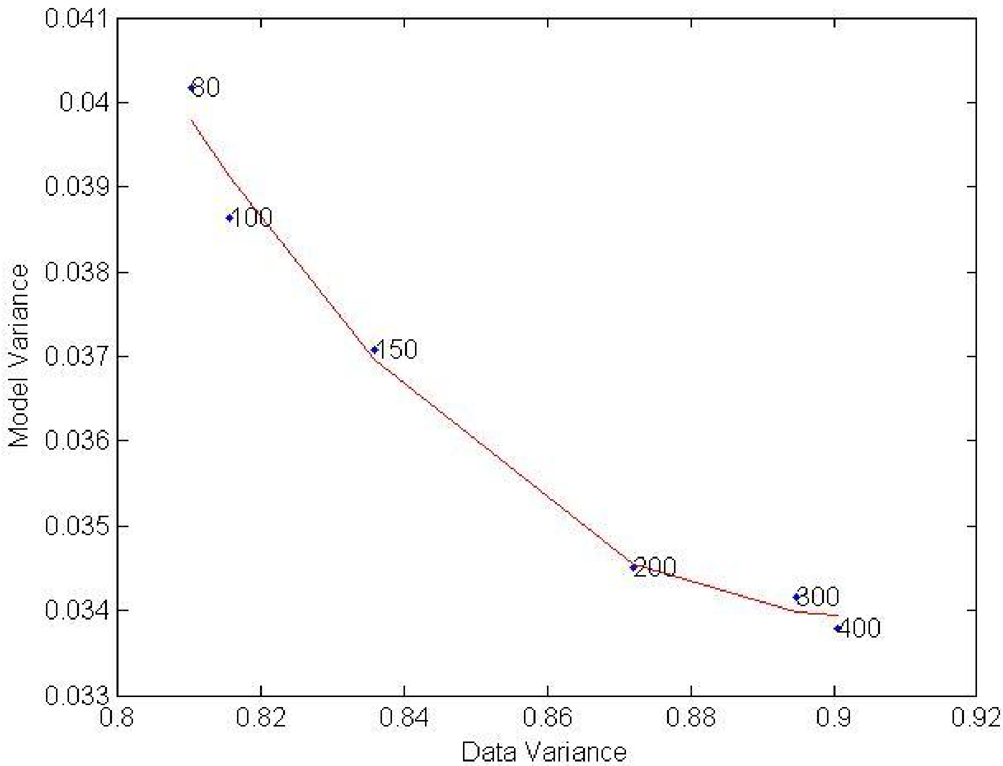

图 2 折衷曲线

图中数字表示阻尼因子

Fig.2 The tradeoff curve

The number represent damping factor

3 结果

速度结构反演的可靠性主要通过 DWS（Derivative Weight Sum）值来判定，Thurber 等[39]1999 年研究表明 DWS 值由于对每一段射线路径进行了距离加权，因此反映的模型周围的相对射线密度比仅用射线总和更具可靠性，Scarfi 等[40]研究表明当 DWS 大于 100 时，反演的结果具有较高的可靠性．图 3 首先给出了双差层析成像反演得到的龙门山断裂带附近不同深度 P 波速度结构的水平剖面图，图 3 中的白线包围的部分为 DWS 大于 100 的区域．从图 3a 可以看出，在 10km 深度上，四川盆地和松潘高原的速度差异十分明显，四川盆地表现出明显的低速特征，四川盆地上地壳沿龙门山断裂带在各个不同段落上偏向松潘高原的距离存在明显差异，这可能是断层倾斜角度差异在速度结构上的体现．在图 3b 给出的 15km 深度剖面上，从映秀以南到汉旺以北，也就是彭灌杂岩所在区域和汶川地震地表双破裂带[3,11]，断层上盘一侧 P 波速度明显高于断裂带两侧和断裂带上其它部分．这一结果与前期层析成像所得的结果[27-29]基本一致．在 20km 深度上（图 3c），整个区域的平均速度接近中地壳的正常速度，汶川地震破裂起始段下方表现出了和 15km 深度剖面一致的强高速异常，这说明汶川地震起始于地壳介质强度较大的区域，同时也在深部构造环境上解释了汶川地震复杂的时空破裂过程[5]．在松潘高原一侧，沿着岷江断裂和虎牙断裂之间的区域从西北方向延伸到龙门山下方的区域呈现低速异常，这可能是松潘高原中地壳低速体的体现．但是，在汶川地震起始破裂发生的区域，双差层析成像方法并未发现中下地壳低速体的迹象，这表明，在本研究涉及的 0-30km 深度和向断层上盘方向延伸 50km 范围内，松潘地块中下地壳低速体并未表现出明显的直接作用．从整体中上地壳速度结构来看，在浅部 15km 以上的速度结构呈现与龙门山断裂带基本一致的北东向构造，而 20km 以下深度的深部构造则呈现北东向和北西向交错构造特征．

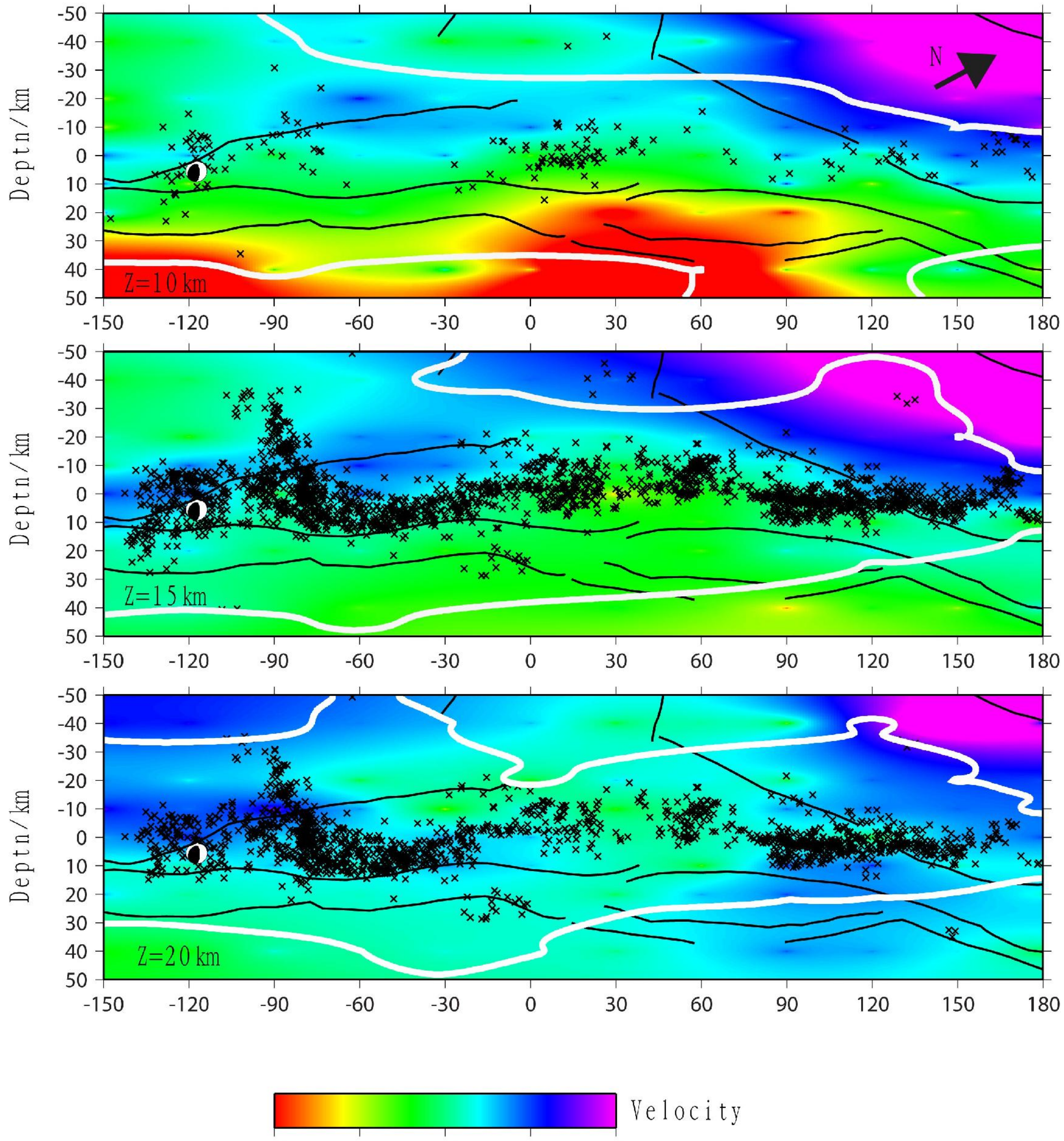

图 3 a=10km、b=15km 和 c=20km 深度的水平切片图

黑色的实线表示断层，黑色的十字表示重定位的地震余震，震源球表示汶川主震的位置，白色的线表示 DWS 值大于 100 的区域.

Fig.3 Map-view slice at 10km,15km and 20km depth

The black lines are fault traces shown in Fig.1 and the black cross represent relocated aftershocks, focal mechanism represent the main shock of Wenchuan earthquake, the white line represent the region of DWS value(>100).

图 3 同时给出了各个深度上±5km 深度范围内的余震分布．由图 3 可见，深度 15km 左右是余震分布最为密集的区域.速度结构与地震震源联合定位获得了与双差地震定位方法类似的余震空间和深度分布特征[7,8]．在汶川地震破裂带南段映秀到汉旺段，余震分布形态与中央断裂形态基本一致，且绝大多数余震分布于断裂上盘方向．而在破裂带中北段，地震破裂过程[5]由以逆冲位移为主向以走滑位移为主转换的段落，余震并未完全沿北川断裂和青川断裂的地表断层分布，余震分布带正处于地震波速度差异明显的区域分布，这说明速度结构

和物性结构差异是控制地震破裂分布的主要因素．从 10km 和 15km 深度剖面图上看，小鱼洞到理县方向的北西向余震分布带两侧存在速度差异，这表明从小鱼洞到理县方向存在隐伏断层．

图 4 给出了 NE—SW（X=0km）地震重定位的垂直剖面图．结合图 1 的地震重定位的水平剖面图和图 4 的地震重定位的垂直剖面图可以看出，速度结构与地震震源联合反演获得的地震分布与单纯采用双差定位方法获得的余震分布[8]相当一致，但是地震在深度上分布范围更大一些．地震分布与速度结构具有较强的相关性，这说明采用三维速度结构进行地震重新定位取得了更加合理的结果．

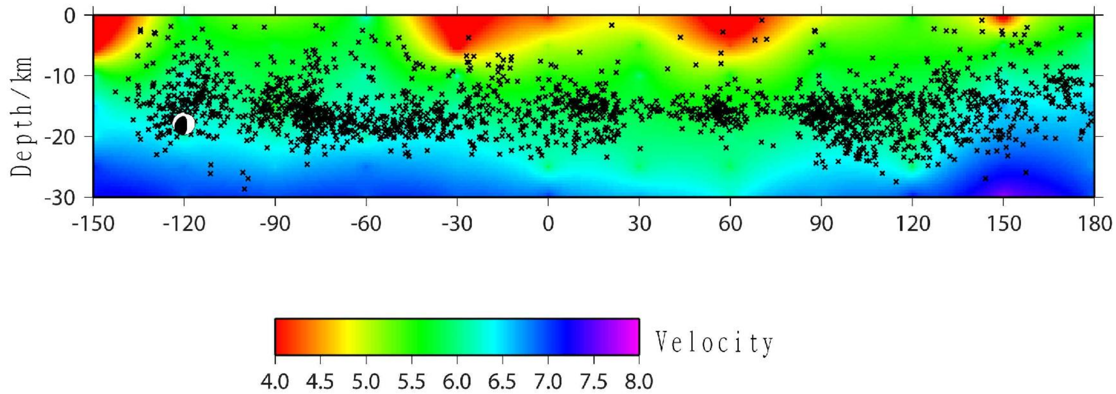

图 4 穿过汶川主震震源区的 SW-NE 向（X=0km）速度剖面示意图和地震重定位 SW—NE 向垂直剖面图

黑色的十字表示重定位的地震余震，震源球表示汶川主震的位置.

Fig.4 P-wave tomographic image along SW-NE vertical cross-section orthogonally Through the source area of the Wenchuan main shock and Cross-section of relocated aftershocks.

black cross represent relocated aftershocks, focal mechanism represent the main shock of Wenchuan earthquake.

图 5 给出了垂直龙门山断裂带通过主震起始破裂位置的北西向垂直剖面图（Y=-120km），同时给出了联合反演获得的剖面两侧 10km 范围内的余震分布．这条纵剖面所取位置与 Pei 等同类研究的剖面位置基本一致[36]，尽管两个研究所用数据有很大差异，Pei 等也并未对地震震源和速度结构进行联合反演，但是对比两个研究结果我们发现，反演得到的沿剖面 P 波速度结构特征一致性相当高．本文反演得到的剖面附近震源深度和范围分布与 Pei 等使用的总体上相近，与此相应地，地震到台站的地震射线分布也基本相当，由此获得相似的反演结果，这证明了双差层析成像方法在反演地壳速度结构方面的稳定性．

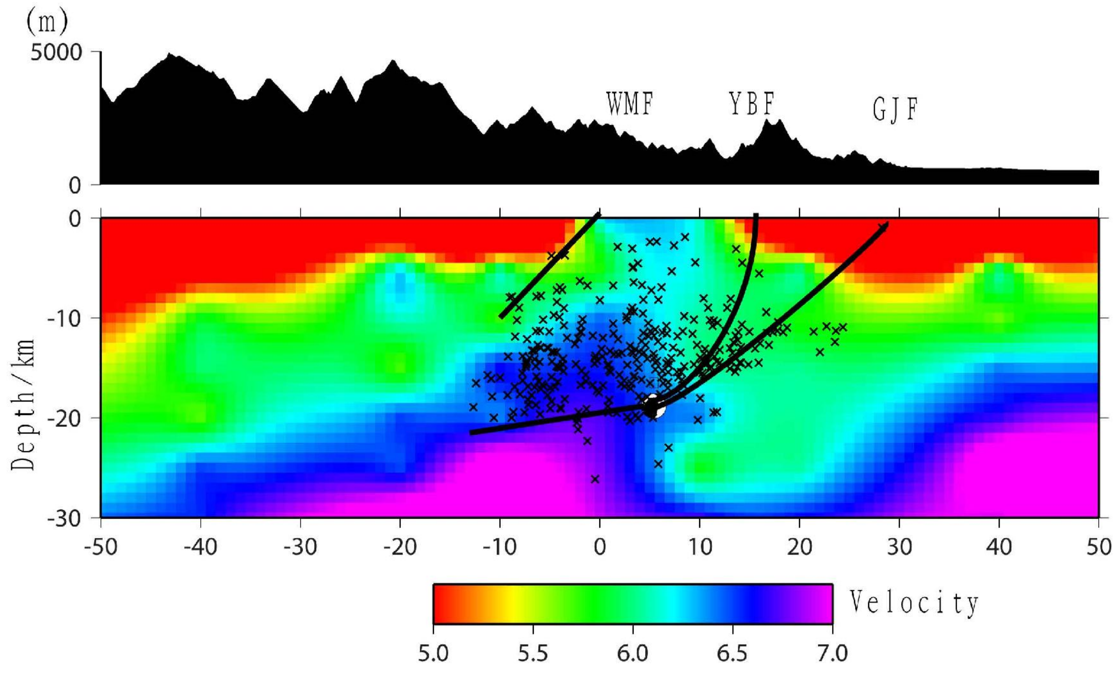

图 5 穿过汶川主震震源区的 NW-SE 向(Y=-120km)速度剖面示意图.

黑色的十字表示重定位的地震余震, 震源球表示汶川主震的位置，WMF 表示汶川-茂县断裂带，YBF 表示映秀-北川断裂带，GJF 表示灌县-江油断裂带.

Fig .5 P-wave tomographic image along NW-SE vertical cross-section orthogonally Through the source area of the Wenchuan main shock.

Black cross represent relocated aftershocks, focal mechanism represent the main shock of Wenchuan earthquake, WMF represent Wenchuan-Maoxian fault, YBF represent Yingxiu-Beichuan fault, GJF represent Guanxian-jiangyou fault.

由图 5 可见，在龙门山断裂带下方，中央断裂和后山断裂之间包夹着显著的高速体，该高速体在 10km 以下深度 P 波速度已经达到或接近中下地壳的速度. 这一结果与现有 P 波速度层析成像结果在总体特征上是一致的[26-28]. 高速体的东部边界位于龙门山断裂带中央断裂下方，以近似垂直的角度向下延伸，这可能是龙门山的原始东部边界，也是四川盆地与松潘高原地壳厚度出现陡变的位置[23]. 上地壳高速体在深度 15-20km 处存在缺口，汶川地震主震正发生于这个速度缺口下方. 如果将缺口位置看做断裂向下延伸的底部端点，则可以估计中央断裂向北西方向倾斜的平均倾角约为 56-63°，而灌县—江油断裂的倾角则约为 31-38°. 高速体西侧边界则向西缓慢变深，进入到松潘高原下方. 根据速度结构和沿剖面的余震分布可以大致画出龙门山断裂前山断裂、中央断裂和后山断裂的深部展布形态. 在 20-22km 深度，前山断裂与中央断裂在余震分布区底部汇聚，显示出明显的脆韧转换带特征. 同时，余震分布显示汶川地震造成了龙门山下方 20km 深度以上的高速体整体发生破裂. 这一结果在 20km 以上深度与 Burchfiel 等给出的龙门山断裂带浅部模型[1]相当一致，但是双差层析成像结果得到的龙门山断裂带下方的高速异常延伸到了 30km 以下深度，并未发现从松潘地块中下地壳发展而来的低速体侵入的迹象，雷建设等[28]的结果表明在中下地壳

45km 龙门山断裂带下方仍然表现为高速，二者具有一定的相似性.

图 6 给出了位于研究区东北部青川断裂下方（Y=150km）的速度结构剖面和余震分布，与龙门山中南部地区相比，这里速度结构虽然相对简单，但也显示出明显的横向变化，余震分布和速度结构均显示出明显的走滑断裂特征.

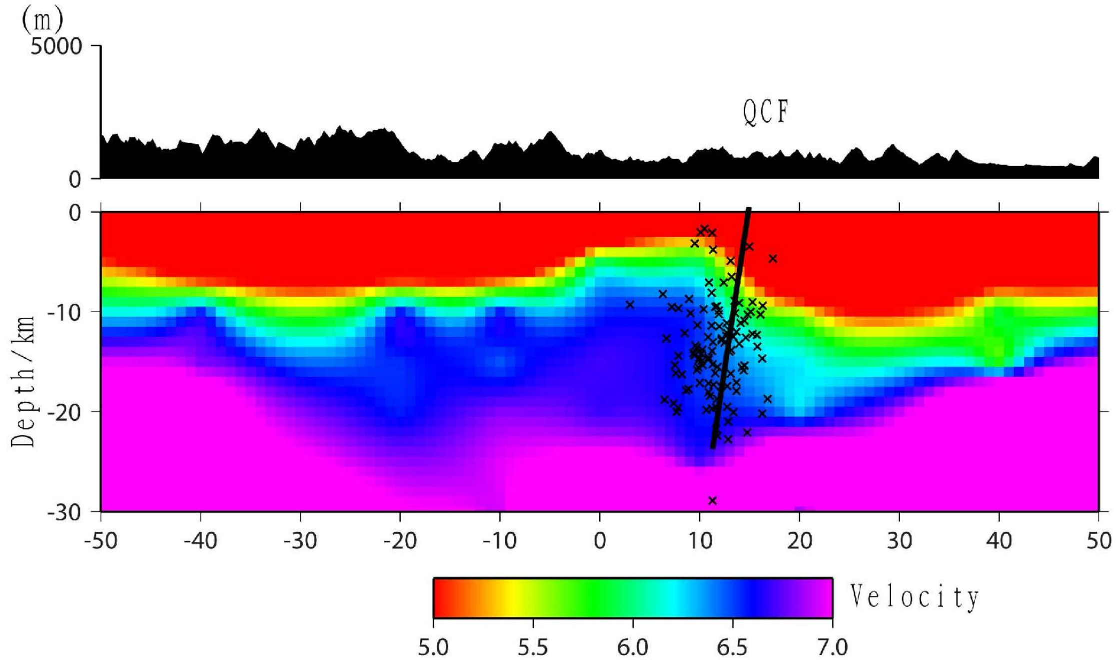

图 6 穿过青川断裂区域的 NW-SE 向（Y=150）速度剖面示意图

黑色的十字表示重定位的地震余震，QCF 表示青川断裂带.

Fig .6 P-wave tomographic image along NW-SE vertical cross-section orthogonally Through the source area of the Wenchuan main shock

Black cross represent relocated aftershocks, QCF represent Qingchuan fault.

4 结论与讨论

本文利用川西流动地震台阵和震后应急流动台网记录到的汶川地震后约 5 个月内的余震 P 波走时数据，利用双差层析成像方法对龙门山断裂带地壳 0-30km 深度的 P 波速度结构和余震震源位置进行了联合反演，结果显示：

（1）速度结构与震源联合反演获得了与基于一维地壳参考模型相近的余震震中和震源深度分布结果. 破裂带南段地震分布与地表断层形态密切相关，北段则主要受速度结构控制。余震最大深度呈现南段略浅北段略深的分布，余震主要分布在 22~24km 深度以上，整个余震带平均震源深度为 15~18km.

（2）反演获得了龙门山断裂带下方 0~30km 深度的 P 波速度结构. 15km 以上速度结构

与地表断裂分布密切相关，20km 以下深度呈现北东向和北西向交错结构．汶川地震破裂带南段龙门山断裂带之间上地壳呈现高速异常，反演结果并未探测到高速体底面边界．各个不同深度上速度变化显示出明显的龙门山断裂向北西方向倾斜的特征．对比速度结构与余震分布可以看出，速度结构的非均匀变化是控制余震分布的主要因素．破裂带南部的高速异常区对应以逆冲破裂为主的区域，同时高速异常也是影响破裂传播速度的主要因素之一．

（3）速度结构和余震联合定位结果发现，小鱼洞-理县方向的余震带下方存在明显的横向速度变化，我们可以据此推测，小鱼洞-理县方向存在一条隐伏断裂，并且在汶川地震过程中其东南段产生了地表破裂[3]．余震分布结果发现，破裂带北东段并未沿现有的青川断裂发育，速度结构反演结果发现余震带地下速度的横向变化也与断层走向存在差异．据此，我们推测在破裂北东段上地震沿着一条新发破裂发育．汶川地震的晚期余震主要发生在破裂的这一段落．

（4）联合反演结果给出了横跨主震起始区域、垂直龙门山断裂带更加精细的速度结构和地震定位结果．结果显示龙门山断裂带中央断裂和后山断裂下方包夹着显著的高速异常体，其深度从近地表一直延伸到约 30km 深度．汶川地震造成高速体上部约 20km 深度范围发生脆性破裂。结果确认了汶川地震起始段的高角度逆冲断裂特征，也确认了前山断裂和中央断裂在 20km 左右深度合并到脆韧转换带的特征。速度结构反演结果证实了前人推测的龙门山断裂带构造模型[1,10]．但是本文结果并未发现 20~30km 以下存在低速异常[28]的证据，本文速度结构反演只利用了汶川地震的余震序列走时数据，地震震源深度主要分布在 24km 以上，对 30km 以下的速度结构尚难以给出可靠的约束，该区域中上地壳高速体的底部边界和深部精细速度结构尚需要进行进一步研究．

致 谢：作者感谢张海江博士无私地提供双差层析成像程序，感谢国家数字测震台网数据备份中心郑秀芬[41]和四川省地震局监测研究所苏金蓉提供四川数字地震台网和汶川地震震后应急台网的数据．

参考文献（References）

[1] Burchfiel, B. C., L. H. Royden, R. D. van der Hilst, et al. (2008), A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 may 2008, Sichuan, People's Republic of China, GSA Today, 18(7), doi:10.1038/ngeo104.

[2] 张培震，徐锡伟，闻学泽等(2008), 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因. 地球物理学报，51(4)：1066～1073

Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. Slip rates and recurrence intervals of Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2008, 51(4)：1006～1073

[3] Xu X W, Wen X Z, Yu G H, Chen G H, Y. Klinger, J. Hubbard and J. Shaw(2009), Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China, Geology, 37(6): 515～518, doi:10.1130/G25462A.1.

[4] Ji C, and G. Hayes (2008), Preliminary result of the May 12,2008 Mw 7.9 eastern Sichuan, China earthquake, US Geol.Surv. http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2008/us2008ryan/finitefault.php.

[5] 王卫民，赵连锋，李娟等．四川汶 JII 8．0 级地震震源过程．地球物理学报，2008，51(5)：1403～1410

Wang W M ，Zhao L F，Li J，et a1．Rupture process of the Ms8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan，China．Chinese J． Geophys．(in Chinese)，2008，51(5)：1403～1410.

[6] 张勇，许力生，陈运泰(2009), 2008 年汶川大地震震源机制的时空变化. 地球物理学报，2009，52(2)：379～389.

Zhang Y ，Feng W P，Xu 1 S，et a1． Spatiotemporal rupture process of the 2008 Wenchuan great earthquake．Science in China (Series D) (in Chinese)，2008，38(10)：1186～1194.

[7] 黄媛，吴建平，张天中等．汶川 8．0 级大地震及其余震序列重定位研究．中国科学(D 辑)，2008，38(10)：1250～1257

Huang Y，Wu J P，Zhang T Z，et a1．Relocation of the Ms8.0 Wenchuan earthquake and its aftershock sequence． Science in China(Series D)，2008，51(12)：1703～1712

[8] 陈九辉，刘启元，李顺成等(2009) 汶川 Ms8.0 地震余震序列重新定位及其地震构造研究. 地球物理学报，2009，52(2)：390～397

Chen J H, Liu Q Y, Li S C, et al. Seismotecttonic study by relocation of Wenchuan Ms8.0 earthquake sequence. Chinese J． Geophys．(in Chinese)，2009，52(2)：390～397.

[9] Shen Z K, Sun J., Zhang P. Z., et al. (2009), Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake, Nature Geoscience 2(10): 718～724

[10] Zhang P Z, Wen X Z, Shen Z K, et al. Oblique, high-angle, listric-reverse faulting and associated development of strain: The Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2010, 38(1): 353～382

[11] Deng, Q D, Chen, G H, Zhu, A L, Discussion of rupture mechanisms on the seismogenic fault of the 2008 Ms8.0 Wenchuan earthquake, Science China Earth Sciences,2011, 54(9): 1674-7313

[12] Hubbard J and Shaw J H, Uplift of the Longmen Shan and Tibetan plateau, and the 2008 Wenchuan (M = 7.9) earthquake, Nature 458, 194-197, doi:10.1038/nature07837

[13] 张竹琪, 张培震, 王庆良. 龙门山高倾角逆断层结构与孕震机制,地球物理学报 2010 Vol. 53 (9): 2068-2082

ZHANG Z Q, ZHANG P Z, WANG Q L.The structure and seismogenic mechanism of Longmenshan high dip-angle reverse fault.Chinese J.Geophys. (in Chinese),2010,53(9): 2068-2082,doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.09.007

[14] 姚琪, 徐锡伟, 邢会林, 张微, 高翔.青藏高原东缘变形机制的讨论: 来自数值模拟结果的限定. 地球物理学报, 2012,55(3): 863-874,doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.016

YAO Q, XU X W, XING H L, ZHANG W, GAO X. Deformation mechanism of the eastern

Tibetan plateau: Insights from numerical models.Chinese J.Geophys. (in Chinese),2012,55(3): 863-874,doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.016

[15] 王椿镛，吴建平，楼海等．川西藏东地区的地壳 P 波速度结构．中国科学（D 辑），2003,33(增刊):181-189

Wang C Y, Wu J P, Lou H et al. Crustal structure for P wave velocity in eastern margin of Tibetan plateau. Science in China (Ser. D), 2003, 33(suppl.):181-189

[16] 王椿镛，楼海，吕智勇等．青藏高原东部地壳上地幔 S 波速度结构—下地壳流的深部环境．中国科学 D 辑，2008, 38(1):22-32

Wang C Y, Lou H, Lu Z Y, et al. S wave velocity structure of the crust and upper mantle in the eastern Tibetan plateau – deep environment of lower crustal flow, Science in China (Ser. D), 2003, 38(1):22-32

[17] Yao H, van der Hilst R D and de Hoop M V (2008), Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis: II. Crustal and upper-mantle structure . Geophys. J. Int., 2008,173：205～219

[18] Wang Y Z，Wang N N，Shen Z K，et a1．GPS-constrained inversion of present day slip rates along major faults of the Sichuan—Yunnan region，China．Science in China (Series D)，2008，51(9)：1267～1283

[19] 黄金莉,赵大鹏,郑斯华.川滇活动构造区地震层析成像，地球物理学报，2001.44 (增刊):127～136

Huang J L,Zhao D P,Zheng S H.Seismic tomography of the Sichuan-Yunan active tectonic region. Chinese J.Geophys.(in Chinese), 2001.44(Suppl.)：127～136

[20] 朱艾斓;徐锡伟;周永胜;尹京苑;甘卫军;陈桂华.川西地区小震重新定位及其活动构造意义．地球物理学报, 2005,48(3): 629-636

ZHU A L, XU X W, ZHOU Y S, et al. Relocation of small earthquakes in western Sichuan, China and its implications for active tectonics. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2005, 48(3): 629-636

[21] Li H Y, Su W, Wang C Y, et al. Ambient noise Rayleigh wave tomography in Western Sichuan and Eastern Tibet, Earth and Planet. Sci. Lett., 2009, 282:201-211, doi:10.1016/j.epsl.2009.03.021

[22] 李昱，姚华建，刘启元等．川西地区台阵环境噪声瑞利波相速度层析成像．地球物理学报，2010, 53(4)：842-852.

Li Y, Yao H J, Liu Q Y, et al. Phase velocity array tomography of Rayleigh waves in western Sichuan from ambient seismic noise. Chinese J． Geophys．(in Chinese)，2010，53(4)：842～852.

[23] 刘启元，李昱，陈九辉等(2009), 汶川 Ms8.0 地震：地壳上地幔 S 波速度结构的初步研究．地球物理学报，2009，52（2）：309～319

Liu Q Y, Li Y, Chen J H , et a1. Wenchuan Ms8.0 earthquake： preliminary study of the S-wave velocity structure of the crust and upper mantle．Chinese J． Geophys. (in Chinese)，2009，52(2)：309～319

[24] Zhang, Z J, Wang Y, Chen Y, et al.Crustal structure across Longmenshan fault belt from passive source seismic profiling, Geophys. Res. Lett., 2009, 36, L17310, doi:10.1029/2009GL039580

[25] Robert A, Zhu J, Vergne J, Cattin R, Chan L S, Crustal structures in the area of the 2008 Sichuan earthquake from seismologic and gravimetric data, - Tectonophysics, 2010

[26] 郭飚，，刘启元，陈九辉等．川西龙门山及邻区地壳上地幔远震Ｐ波层析成像．地球物理学报，2009,52（2）：346-355.

Guo B, Liu Q Y, Chen J H, et al. Teleseismic P-wave tomography of the crust and upper mantle in Longmenshan area, west Sichuan. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2009, 52(2):346-355.

[27] 吴建平，黄媛，张天中，明跃红，房立华(2009)，汶川 MS8.0 级地震余震分布及周边区域 P 波三维速度结构研究，地球物理学报，52(2)： 320～328

Wu J P, Huang Y, Zhang T Z, et al. Aftershock distribution of the Ms8.0 Wenchuan earthquake and three dimensional P-wave velocity structure in and around source region. Chinese J． Geophys．(in Chinese)，2009，52(2)：320～328.

[28] 雷建设,赵大鹏，苏金蓉，张光伟，李凤(2009)，龙门山断裂带地壳精细结构与汶川地震发震机理,地球物理学报，52 (2)：339～345

Lei J S, Zhao D P Su J R, Zhang G W, et al. Fine seismic structure under the Longmenshan fault zone and the mechanism of the large Wenchuan earthquake. Chinese J． Geophys．(in Chinese)，2009，52(2)：339～345.

[29] 胥颐，黄润秋，李志伟，徐亚，刘劲松，刘建华，龙门山构造带及汶川震源区的 S 波速度结构，地球物理学报，2009, 52 (2)： 329～338

Xu Y, Huang R Q, Li Z W, et al. S-Wave velocity structure of the Longmen Shan and Wenchuan earthquake area. Chinese J. Geophys．(in Chinese)，2009，52(2)：329～338.

[30] Zhang H J, Thurber C H，Double-difference tomography; the method and its application to the Hayward Fault, California, Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(5):1875-1889, doi: 10.1785/0120020190

[31] Zhang H J, Thurber C, Adaptive mesh seismic tomography based on tetrahedral and Voronoi diagrams: Application to Parkfield, California, J. Geophys. Res., 2005, 110, B04303, doi:10.1029/2004JB003186

[32] Waldhauser F，Ellsworth W．A double-difference earthquake location algorithm ： method and application to the northern Hayward Fault，California．Bul1．Seism．Soc．Am.，2000，90(6)：1353～1368

[33] Thurber C, Zhang H, Waldhauser F, et al. Three-Dimensional Compressional Wavespeed Model, Earthquake Relocations, and Focal Mechanisms for the Parkfield, California, Region，BSSA, 2006, 96(4B)：S38～S49

[34] Shelly D R, Beroza G C, Ide S, Nakamula S, Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip, Nature, 2006, 442, 188-191, doi:10.1038/nature04931

[35] Thurber C, Roecker S, Zhang H, et al. Fine-scale structure of the San Andreas fault zone and location of the SAFOD target earthquakes, Geophys. Res. Lett., 2004, 31, L12S02, doi:10.1029/2003GL019398

[36] Pei S P, Su J R, Zhang H Z, et al. Three-dimensional seismic velocity structure across the 2008 Wenchuan Ms8.0 earthquake, Sichuan, China. Tectonophysics, 2010, 491(3), 211～217.

[37] 刘启元，陈九辉，李顺成等，汶川 Ms 8.0 地震: 川西流动地震台阵观测数据的初步分析，地震地质，2008,30(3)：684-695

Liu Q Y, Chen J H, Li S C, et al. The Ms 8.0 Wenchuan earthquake: preliminary results from the Western Sichuan mobile seismic array observations. Seismology and Geology (in Chinese), 2008, 30(3)：684-695

[38] 赵珠，范军，郑斯华等．龙门山推覆构造带地壳速度结构和震源位置的精确修订．地震学报，I997，19(6)：615～622

Zhao Z ，Fan J，Zheng S H ，et a1．Precision determination of the crustal structure and hypocentral locations in the Longmenshan thrust nappe belt．Acta Seismological Sinica (in Chinese)，1997，19(6)：6l5～622VanDecar,J.C.,and R.S.Crosson(1990).Determination of teleseismic relative phase arrival times using multi-channel cross-correlation and least squares. BSSA, 1990, 80(1): 150～169.

[39] Thurber C H. and D. Eberhart-Phillips.1999. Local earthquake tomography with flexible gridding, Comput.Geosci.,25,809~818

[40] Scarfi L.Giampiccolo, E. Musumeci C., et al. New insights on 3D crustal structure in southeastern Sicily(Italy) and tectonic implications from an adaptive mesh seismic tomography, 2007,Phys. Earth Planet,Inter.161:74~85

[41] 郑秀芬，欧阳飚，张东宁等.“国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑．地球物理学报，2009,52(5)：1412-1417，doi:10.3969/j.issn.0001_5737.2009.05.031

Zheng XF, Ouyang B, Zhang DN, et al., Technical system construction of Data Backup Center of China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2009,52(5)：1412-1417，doi:10.3969/j.issn.0001_5737.2009.05.031