

吴建平, 黄媛, 张天中等. 汶川 $M_s 8.0$ 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, 2009, 52(2): 320~328
Wu J P, Huang Y, Zhang T Z, et al. Aftershock distribution of the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake and three dimensional P-wave velocity structure in and around source region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(2): 320~328

汶川 $M_s 8.0$ 级地震余震分布及周边区域 P 波三维速度结构研究

吴建平, 黄媛, 张天中, 明跃红, 房立华

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘 要 利用川滇地区长期积累的地震走时观测资料和汶川地震余震观测资料对汶川地震震源区及周边区域地壳和上地幔 P 波三维速度结构进行了研究. 结果表明, 浅部 P 波速度分布与地表地质之间具有很好的对应关系. 龙门山断裂带在 20 km 以上深度表现为高速异常带, 彭灌杂岩体和宝兴杂岩体为局部高速异常区. 龙门山断裂带中上地壳的局部高速异常体对汶川地震的余震分布具有明显的控制作用. 在余震带南端, 余震全部发生在与宝兴杂岩体对应的高速异常体的东北侧; 在余震带的中段, 与彭灌杂岩体对应的高速异常体在一定程度上控制了余震的分布; 在余震带的东北端, 宁强-勉县一带的高速异常体可能阻止了余震进一步向东北扩展. 龙门山断裂带中上地壳的 P 波高速异常表明介质具有相对较高的强度, 在青藏高原物质向东挤出过程中起到了较强的阻挡作用, 有利于深部能量积累. 在 30 km 深度之下, 扬子地块具有明显的高速特征, 其前缘随深度增加向青藏高原方向扩展, 在下地壳和上地幔顶部已达到龙门山断裂带以西.

关键词 汶川地震, 地震定位, 层析成像, 龙门山断裂带, 青藏高原

文章编号 0001-5733(2009)02-0320-09

中图分类号 P315

收稿日期 2008-12-30, 2009-01-24 收修定稿

Aftershock distribution of the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake and three dimensional P-wave velocity structure in and around source region

WU Jian-Ping, HUANG Yuan, ZHANG Tian-Zhong, MING Yue-Hong, FANG Li-Hua

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

Abstract 3-D P-wave velocity structure in crust and uppermost mantle in and around Wenchuan earthquake source region was studied using long-term accumulated seismic travel time data in Sichuan-Yunnan region and aftershock data of Wenchuan earthquake. The result shows that shallow P-wave velocity structure has good correlation with surface geology. Longmenshan fault zone is imaged as high P-wave velocity region in 0~20 km depth. Pengguan complex and Baoxing complex are imaged as two local high velocity anomaly bodies. The upper crustal high velocity anomaly bodies in Longmenshan fault zone control the distribution of aftershocks. At the southern part of the aftershock zone, aftershocks occurred only in the northeast of the high velocity body related to Baoxing complex. In the middle part, the distribution of aftershocks seems to be controlled by the high velocity anomaly body corresponding to Pengguan complex to some extent; In the northeast part, the high velocity body around Ningqiang-Mianxian may prevent the further extension of aftershocks to the northeast. The existence of upper crustal high

基金项目 地震行业科研专项(200808001)、基本科研业务专项(DQJB08Z03)资助, 中国地震局地球物理研究所论著号 09AC1001.

作者简介 吴建平, 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事地震学与地球内部物理学研究. E-mail: wjpwu@cea-igp.ac.cn

P-wave velocity zone in Longmenshan implies that the upper crust has relatively high strength, which may play an important role in obstructing the extrusion of Tibetan Plateau material to east, and are prone to accumulate energy in deep depth. Yangzi Block is characterized by high velocity region below 30 km depth, and its front extends to Tibetan Plateau with depth increasing and reaches to the west of Longmenshan fault zone in the lower crust and upper mantle.

Keywords Wenchuan Earthquake, Earthquake location, Seismic tomography, Longmenshan fault zone, Tibetan Plateau

1 引言

2008年5月12日14时27分58秒发生的 $M_s 8.0$ 级汶川地震发生在青藏高原东缘的龙门山断裂带上,初始破裂点位于汶川县南映秀镇附近. 龙门山断裂带长约 500 km,宽 40~50 km,是中生代造山作用形成的断裂带,新生代以及晚第四纪以来仍然有不同程度的活动,并以北川—江油—一线为界,中、南段具较强的晚第四纪活动性,北段第四纪活动性相对较弱^[1~5].

龙门山断裂带主要由 3 条大断裂构成,自西向东分别是龙门山后山断裂、中央断裂和前山断裂^[1,2]. 龙门山断裂带显示出明显的右旋-逆冲运动,但在空间上断裂带的活动具有明显的分段性. 中段和西南段的茂汶—汶川断裂、北川—映秀断裂、彭县—灌县断裂和龙门山前山隐伏断裂显示出右旋-逆冲的运动方式^[1~6]. 北川以北的龙门山断裂带北段,以往的调查研究认为没有明显的晚第四纪活动的证据^[6]. 有历史记录以来,龙门山断裂带中、南段至少发生过 4 次 $6 \sim 6\frac{1}{2}$ 级强震,龙门山断裂带北段无 6 级以上强震发生的记载. 1970 年以来,沿龙门山断裂带的中小地震活动主要集中在断裂带中段和南段,北段地震活动较弱. 汶川 $M_s 8.0$ 大地震之前,断裂带中段和南段较频繁的小震活动与根据 GPS 观测结果得出的龙门山断裂带中-南段的现代地壳变形不明显的认识^[7~9] 不完全相符. 震前的 GPS 观测表明,横跨整个龙门山断裂带的滑动速率不超过约 2 mm/a,单条断裂的活动速率不超过约 1 mm/a.

龙门山断裂带作为青藏高原的重要东部边界,其深部结构一直受到人们的重视. 近 20 年来,利用人工地震^[10~13] 和天然地震资料^[14~16] 对青藏高原东部边界进行了一系列研究,获得了许多很有意义的成果. 天然地震层析成像研究从不同角度揭示了青藏高原东部地区的总体结构特征,然而受固定地震

台站台间距较大的影响,在青藏高原与扬子地块接触边界—龙门山断裂带附近成像分辨率大多较低,很难获得有关龙门山断裂带的深部特征. 本文采用川滇地区长期积累的地震走时数据,并充分利用汶川地震发生后流动地震台站观测的大量余震资料,对汶川地震震源区及周边地区的深部速度结构和余震序列进行了研究.

2 资料与方法

本文使用的区域地震波走时资料主要包括两个部分:1)云南和四川省地震台网 174 个台站在 1982 年到 1999 年的观测资料;2)汶川地震后,四川、云南、甘肃、陕西固定地震台站和震后应急流动观测台站记录的地震资料. 本研究采用的地震台站数量共计 239 个,包括了汶川地震发生后架设的流动地震台站,图 1 给出了台站的分布. 数据的挑选要求每个地震的 P 波到时观测数量超过 8 个,最大台站方位空隙不超过 160° ,最大的走时残差为 3.0 s. 第一部分的观测资料共挑选了 4625 个地震,第二部分共挑选了 3991 个地震,观测的 P 波震相到时数据共计 128576 个.

本文采用了 Zhao 等^[17,18] 提出的走时层析成像方法研究该地区的三维速度结构. 该方法可以在三维速度结构中考虑地壳和上地幔内部速度间断面的复杂形状,快速准确地计算三维介质中的理论走时. 三维速度结构的参数化表示采用网格方法,其优点在于网格可以根据震中和台站位置的分布稠密程度而作不等间距划分,以保证每个网格内有足够的射线交叉覆盖.

研究区域三维速度模型的地理范围为 21°E 至 35°E 和 97°N 至 107°N ,重点研究区网格的纬向和经向均以 0.25° 间距作水平向划分. 考虑到部分区域的实际分辨能力可能无法达到 0.25° ,我们在速度结构反演中采用了光滑约束,光滑系数的选择以保证绝大部分速度异常体有 3 个以上相同符号的扰

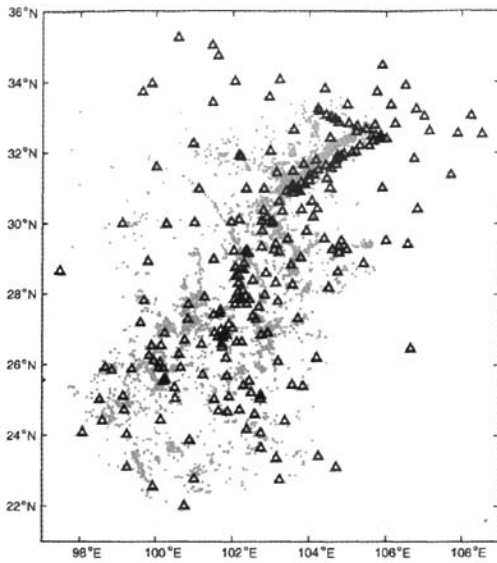


图1 地震台站与震中分布

圆点为地震震中位置,三角为地震台站的位置.

Fig. 1 Distribution of seismic stations and epicenters used in this study

Triangles and dots represent seismic stations and epicenters, respectively.

动值为原则.垂直向共划分为8层,其中第1层位于1 km深,第2层位于10 km,其他节点以10 km间隔增加. Moho面和康氏面的分布与王椿镛等^[15]采用的相同.一维初始模型如图2所示,它是在综合考虑该地区人工地震测深剖面解释结果以及初步反演后,根据不同深度的平均速度调整获得的.

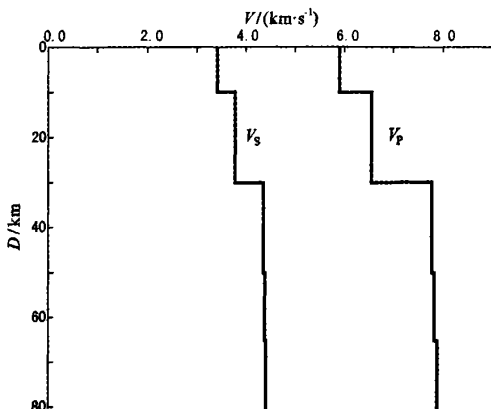


图2 层析成像反演中采用的初始一维速度模型

Fig. 2 1-D initial velocity model used for tomography inversion

我们采用检测板 (Checkerboard) 方法^[18]对解的分辨率进行了估计.检测板方法的基本原理是:根据层析成像反演中使用的实际数据计算三维速度模型下与实际观测资料射线路径分布相同的理论走时数据,根据检测板模型的理论数据反演三维模型,通过对反演结果中每一个节点上的速度值与理论值的对比,可以了解成像的分辨能力.三维速度模型(即检测板)是在初始一维速度模型基础上加上正负相间的速度扰动构成.本文采用的扰动值取正常值的 $\pm 5\%$.

我们采用的数据以王椿镛等^[15]收集的数据为基础,增加了汶川地震后的余震资料和部分其他地震的资料.王椿镛等^[15]曾对该地区的分辨率进行了讨论,认为大多数地区的分辨能力可以达到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.本文利用新的数据集,横向以 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 进行了检测板试验,图3给出了1 km、10 km、20 km、50 km的检测板反演结果.可以看出在1 km、10 km和20 km,大多数地区的横向分辨率可以达到 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,特别是汶川地震震源区附近,由于震后流动地震台站分布较好,可以获得很好的分辨能力.考虑到部分地区的分辨率较低,我们在实际资料的反演中引入了光滑约束.

在速度结构反演过程中对地震进行了重新定位.地震定位和速度结构反演交替进行,即根据初始三维速度模型对地震进行重定位,然后根据定位结果,在射线追踪的基础上进行速度结构反演,如此反复迭代,直至满足条件为止.本文采用这种反演方式共迭代6次,最终的走时RMS残差为0.48 s.

在基于三维速度模型的地震定位基础上,我们采用双差定位方法^[19]对2008年5月12日 $M_s 8.0$ 级地震的余震进行了再次定位.双差定位采用的速度模型和定位方法在黄媛等^[20]的文章中进行了详细的说明,这里不再重复.本文采用汶川地震发生后的地震共计3991个,由于部分地震分布在距离龙门山断裂带较远的地点,因此满足双差定位条件可以得到有效定位结果的地震共计3775个.

3 震源区及周边的三维速度分布

图4给出了川滇地区1 km和10 km深度的P波速度结构.图5给出了汶川地震区及周边区域20~50 km深度的速度异常分布图.在1 km深度的速度异常图上,四川大部分地区P波速度异常以低速为主,但在龙门山断裂带的中央断裂和后山断裂带P波速度为高速异常带,与第四纪沉积有关的雅

安—都江堰—绵阳一带表现出低速异常,沿鲜水河断裂,除了康定附近存在明显的高速区外,总体表现为低速特征.在龙门山断裂带北端,广元—宁强附近存在明显的高速区.在四川南部和云南北部存在较大范围的高速异常,腾冲火山区表现为局部低速异常.与地质资料对比发现,在彭灌杂岩地表出露区以及康定杂岩区^[21]存在明显的高速异常,浅部 P 波速度的高速特征与地表地质观测到的古老的杂岩体及盆地内部第四纪沉积层相一致,在一定程度上佐证了层析成像较高的分辨力和可靠性.

在 1 km、10 km 深度,小金河断裂与安宁河断裂之间存在明显的高速异常区,它们与区域长期形变观测揭示^[22]的沉降区相对应;在中上地壳的低速

异常区,包括理塘、道孚以及西昌以东等地区,长期形变表现出明显的隆升特征^[22],这可能是低速异常区介质强度相对较低,在挤压环境下容易变形抬升造成的.

从宝兴、映秀到北川,10~20 km 深度表现为明显的高速异常带,广元—宁强之间高速体随深度增加表现得更为突出.从余震定位结果看(图 6),龙门山断裂带及附近的深部速度结构似乎在很大程度上控制了汶川地震的余震分布.在 10 km 和 20 km 深度,宝兴县城以北的宝兴杂岩体下方存在明显的 P 波高速异常区,汶川地震的余震均发生在该异常区的边缘以外,异常体内部及南部没有余震.在汶川与茂县之间,与彭灌杂岩体相对应的高速异常体内部

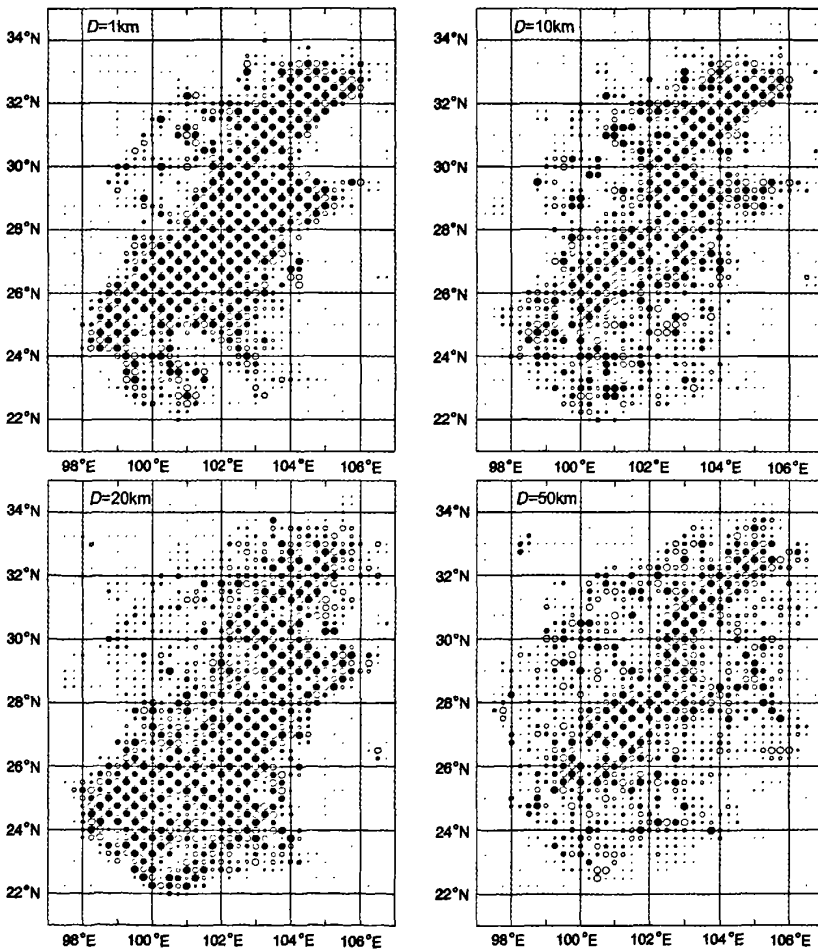


图 3 利用 P 波到时资料获得的检测板分辨结果

黑实心圆点为正扰动值,空心圆点为负扰动值,圆点的大小表示反演恢复值的大小.

Fig. 3 Results of checkerboard resolution test using P-wave arrival data
Solid and open circles denote positive and negative velocity perturbations, respectively.
The size of the circle is proportional to the recovered velocity.

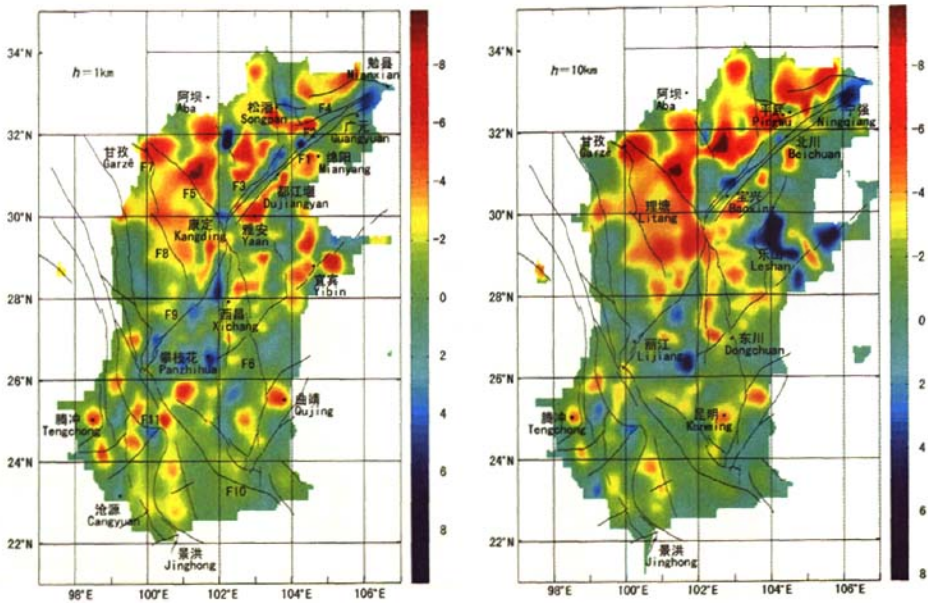


图 4 川滇地区上地壳 P 波速度异常分布

色标是相对一维模型的速度扰动量(下同),图中的速度异常只给出射线超过 10 条的部分;黑线为区内主要断层, F1 龙门山前山断裂, F2 龙门山中央断裂, F3 龙门山后山断裂, F4 青川—平武断裂, F5 鲜水河断裂, F6 小江断裂, F7 甘孜—理塘断裂, F8 理塘—德巫断裂, F9 小金河断裂, F10 红河断裂, F11 澜沧江断裂.

Fig. 4 P wave velocity perturbation image at two depth slices

The color scale in percent is referred to the 1-D initial velocity model. Grid nodes with ray-path number excess 10 are plotted. Black lines denote main faults in the study region. F1 Longmenshan front fault, F2 Longmenshan central fault, F3 Longmenshan back fault, F4 Qingchuan-Pingwu fault, F5 Xianshuhe fault, F6 Xiaojiang fault, F7 Garze-Litang fault, F8 Litang-Dewu fault, F9 Xiaojinhe fault, F10 Honghe fault, F11 Lancangjiang fault.

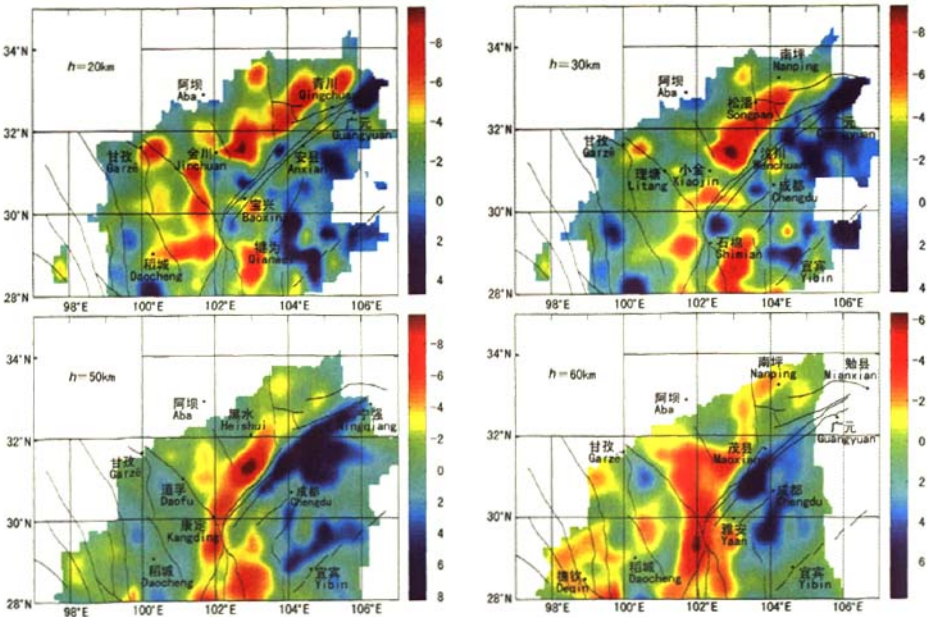


图 5 龙门山断裂带及周边区域的 P 波速度异常分布

图中给出了 20 km、30 km、50 km 和 60 km 的速度异常分布;图中黑线为主要断层.

Fig. 5 P wave velocity perturbation image around Longmenshan fault zone at four depth slices (20 km, 30 km, 50 km and 60 km). The legend of this figure is same as Fig. 4.

似乎很少有余震发生,余震主要发生在异常体的边缘以外,致使余震带在该地区宽度相对变小。

汶川地震的余震主要分布在主震初始破裂点的东北方向,长度超过 300 km,西南方向的余震分布仅 30 km,即主震破裂主要向东北方向扩展,向西南方向很快停止。我们认为主震产生的破裂没有继续向南扩展,除了与该地区的 SE-SEE 区域应力方向有关外,还与南部宝兴杂岩体下方上地壳存在刚性较大的局部地质体的阻挡有关。同样,在余震带的北端,宁强—勉县一带上地壳高速体的存在可能阻止了破裂的进一步扩展,或导致破裂的走向发生了一定程度的改变,从而增加破裂进一步向前扩展的难度。龙门山断裂带中上地壳的地震波高速特征表明介质具有相对较高的强度,有利于深部能量积累,同时由于其对青藏高原东流物质的阻挡作用导致地表运动速度较小。

在 10~20 km 深度,龙门山断裂带以西的川西高原低速特征明显,鲜水河断裂附近表现为明显的低速特征。四川盆地西部边缘附近的雅安—都江堰—绵阳一带的低速区范围和幅度随深度增加明显减小,盆地内部乐山—犍为一带出现明显的高速异常区。

30 km 深度之下,扬子地块的高速特征逐步明显,其前缘随深度增加向青藏高原方向扩展,表明扬子地块岩石圈在中下地壳和上地幔顶部已插入到龙门山断裂带以西,这可能是青藏高原东缘主要断裂均为向西倾斜的逆冲断裂的主要因素。四川盆地在中下地壳呈现出大范围的高速异常,表现出稳定块体的特征。

川西高原地区在浅部出现的低速异常,随着深度的增加范围逐步减小,在 30 km 以下深度主要分布在金川—黑水—松潘—南坪以东、龙门山断裂带以西地区。在 50~60 km 深度,川西高原的低速异常呈南北向分布,鲜水河断裂与龙门山断裂似乎控制了 30° 以北的低速异常体的形态。川西高原的低速异常区,与布格重力异常资料得到的该地区的低视密度异常区基本一致^[23]。介质的 P 波速度与其化学组分、温度、压力等有关,为了确定引起介质速度异常的原因通常需要进一步了解 P 波与 S 波波速比信息。我们根据重定位后的川西地区 P_g 及 S_g 震相的走时得到该地区中上地壳的 P 波与 S 波波速比为 1.68。这一速度比也被用于双差定位的模型中^[20]。温度增加引起介质部分熔融可以导致 P 波速度的下降,但同时导致波速比的增加,川西地区较低

的波速比表明 P 波低速异常并不是高温异常引起的。实验室测试表明^[24],地壳内部的波速比与 SiO_2 的含量变化密切相关, SiO_2 含量的增加可以导致波速比的减小。松潘—甘孜褶皱带在东北—南西向缩短的同时,曾发生大规模花岗岩活动^[25],我们推测该地区地壳内部大范围的低速异常与侏罗纪大规模花岗岩活动导致地壳内部物质组分变化有关。

4 汶川地震余震分布

汶川地震的余震总体走向为北西方向,长约 330 km,主要集中分布在龙门山中央断裂带附近(图 6,7)。余震带在东北部偏离了地质构造图中给出的中央断裂(映秀—北川断裂和茶坝—林庵寺断裂),沿北东方向在青川附近跨越了青川—平武断裂。余震主要集中在 15~30 km 宽度的分布带内,在西南段局部地区宽度可达 40 km,且横跨龙门山三条主要断裂。在北川附近,余震带出现两条相互平行的条带,西侧的条带长约 80 km。从余震带的西南端到中段安县一带,中央断裂和前山断裂之间有少量余震分布。在北川东北 50 km 处附近,余震分布存在明显的转折,地震带在东北段向东南方向偏移了 10 km 左右。王卫民等^[26]认为北川附近的断裂具有时间上的复杂性,可能存在断层几何形态的变化或相交的隐伏断层。我们推测余震定位结果揭示的北川附近存在的两条相互平行的余震带,以及东北部余震带的错移可能是导致破裂在时间上的复杂性的重要因素。在余震带的最北段,余震分布出现了分叉现象。

余震序列的震源深度总体表现为西部深、东部浅(图 7)。结合震后反演得到的主震破裂过程和地表地质调查获得的地表破裂分布,我们推测余震主要发生在逆冲断层的上盘;龙门山中央断裂巨大的逆冲破裂过程造成了上盘物质破坏,导致上盘在震后应力调整过程中发生大量余震;主震破裂面在浅部较陡,深部明显变缓,缓倾的主破裂面导致较宽的余震分布带。前山断裂的上盘地震数量较少,下盘余震很少,表明主震发生时滑移量相对较小,是中央断裂带失稳过程中形成的次一级破裂。在东北部余震分布带宽度相对较窄,该段南部有限的地表破裂位于余震分布带的中部。震源破裂过程反演揭示,北端破裂以走滑为主,兼有逆冲^[27]。我们认为由于断层在走滑破裂过程中造成两侧介质的破坏程度相当,在震后应力调整过程中余震会发生在断层两侧,由

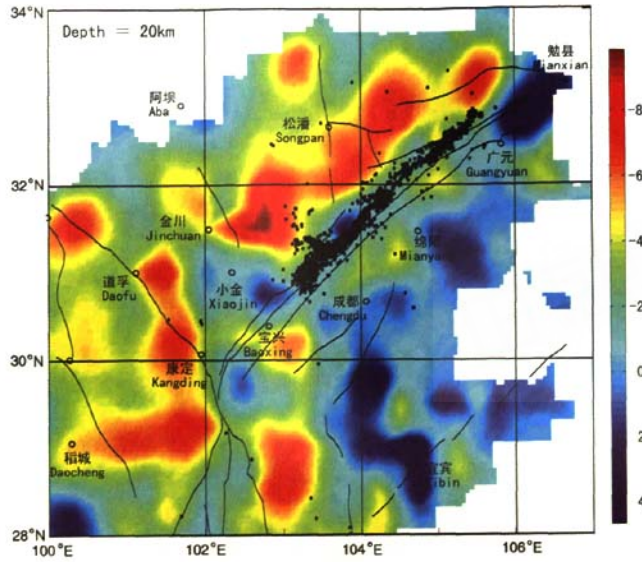


图 6 震源区及周边 20 km 深度的 P 波速度异常与汶川地震余震分布
黑点为基于三维速度模型进行地震定位获得的汶川地震后至 2008 年 8 月 1 日前
该地区地震的震中位置,黑线为主要断裂(见图 5)。

Fig. 6 P wave velocity perturbation image around Wenchuan earthquake epicentral region at 20 km depth and distribution of Wenchuan earthquake aftershocks
Black dots indicate epicenters between 12th, May and 1st, August, 2008 obtained by 3-D earthquake location. Black lines represent main faults (same as Fig. 5).

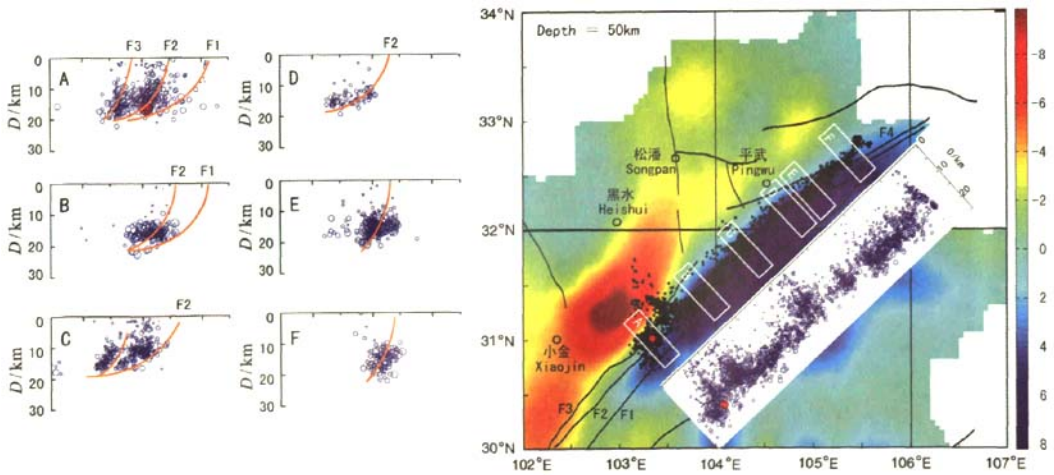


图 7 震源区及周边 50 km 深度的 P 波速度异常与汶川地震余震分布
余震为采用双差定位得到 2008 年 8 月 26 日之前的余震震中位置,黑线为主要断裂(见图 5)。
左图为垂直断层的震源深度剖面,剖面位置见右图,橘红色实线代表断层,是根据地表
断层位置和余震空间源分布推测的。右图内的插图是沿断层的震源深度剖面。

Fig. 7 P wave velocity perturbation image around Wenchuan earthquake epicentral region at 50 km depth and distribution of Wenchuan earthquake aftershocks

Black dots indicate epicenters between 12th, May and 26th, August, 2008 obtained by Double-Difference earthquake location method. Black lines represent main faults (same as Fig. 5). The left panel shows the distribution of focus depth along different profiles perpendicular to earthquake fault. The locations of these profiles are indicated in the right panel. The solid jacinth line indicates earthquake fault deduced from fault outcrop and space distribution of aftershocks. The inset of the right panel shows the distribution of focus depth along Longmenshan fault.

于走滑断层大多为高角度,断层破裂影响的宽度较小,余震带较窄。

在主震初始破裂点的东北 30 km 处,余震分布出现一条明显的北西向分支带,它与余震总体的北东向分布带向垂直,可能是主震发生时同时形成的一条共轭断层破裂,相互垂直的两条断裂同时破裂也造成了该地区很强的地面运动。

5 结论

龙门山断裂带在 20 km 以上深度表现为明显的相对高速特征,彭灌杂岩、宝兴杂岩区均为局部高速异常区。龙门山断裂带中上地壳地震波高速异常揭示了介质具有相对较高的强度,在青藏高原物质向东挤出过程中起到了较强的阻挡作用,有利于深部能量积累。

龙门山断裂带附近中上地壳的高速异常体对汶川地震破裂过程具有明显的控制作用。层析成像结果与余震定位揭示,在余震带南端余震分布受到南部与宝兴杂岩体相对应的高速异常体的阻挡,余震全部发生在高速异常体的东北侧。在余震带的东北端,宁强—勉县一带的高速异常体可能是阻止破裂进一步向北扩展的重要因素。彭灌杂岩体也在一定程度上控制了余震的分布,导致余震分布带变窄。

川西地区松潘—甘孜褶皱带东部,地壳内部存在大范围的低速异常,其范围与重力资料得到的低密度体的范围基本一致。根据地震定位结果和震相观测资料得到的松潘—甘孜褶皱带东部的波速比为 1.68。我们推测该地区地壳内部大范围的低速异常与侏罗纪大规模花岗岩活动导致地壳内部物质组分变化有关。

在 30 km 深度以下,扬子地块具有明显的高速特征,其前缘随深度增加向青藏高原方向扩展,在地下壳和上地幔顶部已达到龙门山断裂带的西侧。汶川地震的余震分布几乎全部集中分布在扬子地块在上地幔的高速前缘内侧,这意味着扬子地块在深部的作用对龙门山断裂带和汶川地震的发生具有重要的控制作用。

汶川地震的余震在南部和中部主要发生在逆冲断裂的上盘,在东北段余震发生在具有走滑性质的断裂的两侧。在余震带中部,两条相互平行的余震带揭示在龙门山中央断裂的西部存在一条与之平行的隐伏断裂,断裂之间的距离在 7~10 km,长度约 80 km。初始破裂北部与主破裂近垂直的余震分布

带是主震发生时产生的一条共轭断层,余震震源分布特点与南坝以北以走滑为主的破裂产生的余震特征一致,可能具有走滑性质。

致谢 王椿镛教授为本研究提供了 1999 年之前的川滇地区的震相资料,四川台网中心为本研究提供了汶川地震后的震相数据。本文采用了赵大鹏教授提供的层析成像程序。在此向他们深表谢意。

参考文献(References)

- [1] 邓起东,陈社发,赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学. 地震地质, 1994, 16(4): 389~403
Deng Q D, Chen S F, Zhao X L. Tectonics, Seismicity and geodynamics of the Longmenshan Mountains and its adjacent regions. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1994, 16(4): 389~403
- [2] 陈国光,计凤桔,周荣军等. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究. 地震地质, 2007, 29(3): 657~673
Chen G G, Ji F G, Zhou R J, et al. Primary research on activity segmentation of the Longmenshan fault zone since late Quaternary. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2007, 29(3): 657~673
- [3] 杨晓平,蒋 涛,宋方敏等. 龙门山断裂带南段错断更新世以来地层的证据. 地震地质, 1999, 21(4): 341~345
Yang X P, Jiang F, Song F M, et al. The evidence of the south longmenshan fault zones cutting late quaternary stratum. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1999, 21(4): 341~345
- [4] 李 勇,周荣军, A L Densmore 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑—逆冲作用的地貌标志. 第四纪研究, 2006, 26(1): 40~51
Li Y, Zhou R J, A L Densmore, et al. Geomorphic evidence for the late cenozoic strike-slipping and thrusting in Longmen mountain at the eastern margin of the Tibetan plateau. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2006, 26(1): 40~51
- [5] 贾秋鹏,贾 东,朱艾刚等. 青藏高原东缘龙门山冲断带与成都平原的现今构造表现: 数字地形和地震活动证据. 地质科学, 2007, 42(1): 31~44
Jia Q P, Jia D, Zhu A L, et al. Active tectonics in the Longmen thrust belt to the eastern Qinghai-Tibetan plateau and Sichuan basin: evidence from topography and seismicity. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 2007, 42(1): 31~44
- [6] 唐荣昌,韩渭宾主编. 四川活动断裂与地震. 北京:地震出版社, 1993. 368
Tang R C, Han W B. Active faults and earthquakes in Sichuan Province. (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993. 368
- [7] King R W, Shen F, Burchfiel, et al. Geodetic measurement of crustal motion in southwest China. *Geology*, 1997, 25: 179~182

- [8] 吕江宁, 沈正康, 王敏. 川滇地区现代地壳运动速度场和活动块体模型研究. 地震地质, 2003, 25(4): 543~554
Lu J N, Shen Z K, Wang M. Contemporary crustal deformation and active tectonic block model of the Sichuan-Yunnan region, China. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2003, 25(4): 543~554
- [9] Shen Z, Lu J, Wang M, et al. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110: 1~17
- [10] 陈学波, 吴跃强, 杜平等. 龙门山构造带两侧地壳速度结构特征. 见: 国家地震局科技监测司编, 中国大陆深部构造的研究与进展. 北京: 地震出版社, 1988. 97~113
Chen X B, Wu Y Q, Du P S, et al. The characteristics of crustal velocity structure along the sides of the Longmenshan tectonic belt. In: Department of Research and Monitor, State Seismological Bureau (ed). *Achievement of Deep Tectonics Research in China Continent* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1988. 97~113
- [11] 张中杰, 李英康, 王光杰等. 藏北地壳东西向结构与“下凹”莫霍面—来自宽角反射剖面的启示. 中国科学(D辑), 2001, 31(11): 881~888
Zhang Z J, Li Y K, Wang G J, et al. East-west crustal structure and “down-bowing” Moho under the northern Tibet. *Science in China* (Series D), 2001, 31(11): 881~888
- [12] 王榕镛, 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. P-wave crustal velocity structure in western Sichuan and eastern Tibetan region. *Science in China* (Series D), 2003, 46(S2): 254~265
- [13] 朱介寿. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(4): 348~356
Zhu J S. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere. *Journal of Chengdu University of Technology* (Science & Technology Edition), 2008, 35(4): 348~356
- [14] 刘建华, 刘福田, 吴华等. 中国南北带地壳和上地幔的三维速度图像. 地球物理学报, 1989, 32(2): 143~151
Liu J H, Liu F T, Wu H, et al. 3-D velocity images of crust and upper mantle in China South-North seismic belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1989, 32(2): 143~151
- [15] 王榕镛, Mooney W D, 王溪莉等. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究. 地震学报, 2002, 24(1): 1~16
Wang C Y, Mooney W D, Wang X L, et al. Study on 3-D velocity structure of crust and upper mantle in Sichuan-Yunnan region, China. *Acta Seismologica Sinica*. (in Chinese), 2002, 24(1): 1~16
- [16] Huang J, Zhao D, Zheng S. Lithospheric structure and its relationship to seismic and volcanic activity in southwest China. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107(B10), 2255, doi: 10.1029/2000JB000137
- [17] Zhao D, Hasegawa A, Horiuchi S. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97: 19909~19928
- [18] Zhao D, Hasegawa A, Kanamori H. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 22313~22329
- [19] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm; method and application to the Northern Hayward Fault, California. *Bull Seismol Soc Amer*, 2000, 90(6): 1353~1368
- [20] 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): 1242~1249
Huang Y, Wu J P, Zhang T Z, et al. Relocation of the M_s8.0 Wenchuan earthquake and its aftershock sequence. *Science in China* (Series D), 2008, 51(12): 1703~1711
- [21] 许志琴, 李化启, 侯立伟等. 青藏高原东缘龙门—锦屏造山带的崛起—大型拆离断层和挤出机制. 地质通报, 2007, 26(10): 1262~1276
Xu Z Q, Li H Q, Hou L W, et al. Uplift of the Longmen-Jinping orogenic belt along the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau: Large-scale detachment faulting and extrusion mechanism. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2007, 26(10): 1262~1276
- [22] 王庆良, 崔笃信, 王文萍等. 川西地区现今垂直地壳运动研究. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008, 38(5): 598~610
Wang Q L, Cui D X, Wang W P, et al. Present vertical crustal displacement field of western Sichuan region. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2008, 38(5): 598~610
- [23] 楼海, 王榕镛, 吕智勇等. 2008年汶川M_s8.0级地震的深部构造环境—远震P波接收函数和布格重力异常的联合解释. 中国科学(D辑), 2008, 38(10): 1207~1220
Lou H, Wang C Y, Lü Z Y, et al. Deep structural environment of 2008 Wenchuan M_s8.0 earthquake. Joint interpretation from teleseismic P-wave receiver function and Bouguer gravity anomaly. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2008, 38(10): 1207~1220
- [24] Christansen N I. Poisson's ratio and crustal seismology. *J Geophys Res*, 1996, 101: 3139~3156
- [25] 王二七, 孟庆任. 对龙门山中生代和新生代构造演化的讨论. 中国科学(D辑), 2008, 38(10): 1221~1233
Wang E Q, Meng Q R. Discussion about Longmenshan tectonic evolution in Mesozoic and Cenozoic. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2008, 38(10): 1221~1233
- [26] 王卫民, 赵连泽, 李娟等. 四川汶川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 al. Rupture process of the M_s8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(5): 1403~1410
- [27] 张勇, 冯万鹏, 许力生等. 2008年汶川大地震的时空破裂过程. 中国科学(D辑), 2008, 38(10): 1186~1194
Zhang Y, Feng W P, Xu L S, et al. Space-time rupture process of 2008 Wenchuan earthquake. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2008, 38(10): 1186~1194

(本文编辑 汪海英)