

陈九辉,刘启元,李顺成等. 汶川  $M_s8.0$  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. Seismotectonic study by relocation of the Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 390~397

## 汶川 $M_s8.0$ 地震余震序列重新定位 及其地震构造研究

陈九辉,刘启元,李顺成,郭 飏,李 昱,王 峻,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** 综合利用川西流动地震台阵观测数据和震后应急地震观测站的震相数据,采用双差地震定位方法对汶川地震的余震序列进行了精确重新定位,并对汶川地震的地震构造进行了深入研究. 其结果显示,汶川地震序列从彭灌杂岩南缘开始破裂,主震及其余震破裂带长约 350 km,在大部分区域宽约 20~30 km,其宽度和空间形态沿破裂带显示了强烈的分段和非均匀特征. 坚硬的彭灌杂岩对余震的非均匀性分布和汶川地震复杂的破裂过程起到了重要的控制作用. 以松潘—甘孜地块中地壳低速层顶部为底边界,余震主要分布在 4~24 km 深度范围内的龙门山东缘上地壳高速层内. 余震深度分布剖面清晰地显示了映秀—北川断裂和灌县—江油断裂以及汶川—茂汶断裂在 20~22 km 深度合并为剪切带的特征. 小鱼洞到理县方向存在一条长度超过 60 km 的垂直于龙门山走向的余震分布条带. 综合震源机制解和地震破裂过程的研究结果,我们推测,这是坚硬的彭灌杂岩体底部在长期应力积累作用下发生破裂的反映,并成为汶川地震释放出巨大能量的主要原因.

**关键词** 汶川  $M_s8.0$  地震,余震序列重新定位,地震构造,龙门山断裂带,地震台阵

**文章编号** 0001-5733(2009)02-0390-08

**中图分类号** P315

**收稿日期** 2009-01-04,2009-02-12 收修定稿

### Seismotectonic study by relocation of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake sequence

CHEN Jiu-Hui, LIU Qi-Yuan, LI Shun-Cheng, GUO Biao, LI Yu, WANG Jun, QI Shao-Hua

*State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administrator, Beijing 100029, China*

**Abstract** Accurate relocation of the Wenchuan earthquake sequence is obtained by using the double difference relocation algorithm from the integrated travel time data recorded at the Western Sichuan movable seismic array and the earthquake emergency response stations. In this presentation, the seismotectonic deformation and rupture process is also investigated. The results show that the Wenchuan earthquake sequence begins from the south margin of the Pengguan Massif and extends northeastward for about 350 km within a width of 20~30 km. The spatial distribution of the aftershocks exhibits obvious inhomogeneity which can be divided into small sectors. The rigid Pengguan Massif controls the distribution of the earthquake sequence and the complex rupture process. The aftershocks occurred mainly in the depth ranging from 4 to 24 km inside the high velocity layer of the upper crust in the eastern border of the Longmen Shan and above the low velocity zone in the middle crust. Depth distributions of the aftershocks across the sections show clearly that the Yingxiu-Beichuan, Guanxian-Jiangyou and the Wenchuan-Maowen

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2004CB418402),汶川 8.0 级地震科学考察专项和地震动力学国家重点实验室自主科研项目(LED2008-A04)联合资助.

**作者简介** 陈九辉,男,副研究员,主要从事宽频带地震学和宽频带流动地震台阵探测研究. E-mail: chenjh@ies. ac. cn

faults merge into a shear belt at the depth of 20~22 km. There exists an aftershock distribution belt from Xiaoyudong to the direction of Lixian, which is perpendicular to the strike of the Longmen Shan and longer than 60 km. Consulting with the results of the focal mechanism of strong aftershocks and the rupture process of the main shock, it could be inferred that the lower part of the Pengguan Massif has been broken up during the earthquake after long term stress accumulation, which would be the main reason why such a great earthquake occurred.

**Keywords** Wenchuan earthquake, Relocation of earthquake sequence, Seismotectonics, Longmenshan fault belt, Portable seismic array

## 1 引言

2008年5月12日在四川省龙门山推覆构造带中段发生了  $M_s 8.0$  级地震,四川省汶川、北川和青川等县受到毁灭性打击。汶川  $M_s 8.0$  地震是有仪器记录以来大陆内部发生的最为强烈的逆冲型地震,并具有超长的复发周期<sup>[1]</sup>。鉴于该地震的特殊性,对该地震孕育和发生过程的详细研究将对板内地震机理和强震预测具有重要意义。

前期地震地质研究<sup>[1,2]</sup>表明,汶川地震发生在四川龙门山逆冲推覆断裂带上。晚第四纪以来,龙门山断裂带由自西向东分布的汶川—茂县断裂(后山断裂),映秀—北川断裂(中央断裂)和灌县—江油断裂(前山断裂)三条具有发生强烈地震能力的主干断裂组成。大概到地下 20 多公里深处,三条断裂收敛合并成一条剪切带,成为青藏高原推覆于四川盆地之上的主要控制构造。地震破裂过程反演表明<sup>[3~5]</sup>,汶川地震可分解为沿倾角约  $33^\circ$  的走滑逆断层向北东单侧破裂扩展的两次同震位移量达 6~9 m 的次级地震事件。其中映秀镇附近的次级地震事件为右旋走滑逆断层型事件,北川附近为右旋走滑型事件。该地震断层面的平均位移达 5 m。尽管地震资料反演为震源滑动位移分布提供了重要的地震学约束,但基于“单一破裂面”的假设过于简单。汶川地震复杂的滑动分布和破裂传播过程表明,几条活动断层可能同时参与了地震破裂过程,地下介质的横向非均匀性对破裂过程有重要控制作用。震后野外地质考察表明<sup>[6]</sup>,汶川地震不仅沿龙门山中央断裂和龙门山前山断裂分别存在长达 240 km 和 72 km 的地表破裂,而且存在垂直龙门山走向的地表破裂。汶川地震地表破裂是近期发生的特大地震中结构最为复杂、地表破裂长度最长的一次逆断层型地表破裂。

余震序列的精确定位是研究强震发生的深部构

造和过程的最直接方式。汶川地震后已有部分余震序列的重新定位结果<sup>[7,8]</sup>,他们均采用了相同或相近的方法和数据集,也得到了基本类似的结果。尽管如此,现有结果尚未对主要发震断裂的延伸和深部展布形态以及汶川地震复杂的滑动破裂过程的深部构造成因机制给出足够清晰的解释。

自 2006 年 10 月开始,中国地震局地质研究所在川西地区( $100^\circ\text{E}\sim 105^\circ\text{E}$ ,  $26^\circ\text{N}\sim 32^\circ\text{N}$ )布设了由 297 台流动数字地震仪组成的大规模流动地震台阵,台阵覆盖了约 2/3 汶川地震地表破裂带范围,获得了汶川地震震前到震后的连续地震波形记录<sup>[9]</sup>。本文综合利用川西地震台阵获取的汶川地震余震序列走时数据和汶川地震后地震应急台站震相数据,对汶川地震的余震序列进行了重新精确定位,并重点探讨了汶川地震的深部地震构造。

## 2 余震序列的重新定位

### 2.1 台站分布和数据

图 1 给出了本文的研究区域和用于余震序列重新定位的台站分布。由图 1 可见,它包括了川西流动地震台阵观测台站、汶川地震后应急布设的流动地震台站和四川、甘肃和陕西部分固定台站。其中,川西流动地震台阵分布在  $104^\circ 38' \text{N}$  和  $31^\circ 59' \text{E}$  西南方向的区域,覆盖了余震分布区域的大约 2/3 范围,并在汶川地震主震震中 100 km 范围内布设了 30 多个台站,平均台站间距约为 20 km。其台站密度与震后应急流动地震台站的分布密度接近,并在汶川地震发震断裂上盘具有很好的台站分布,大大改善了四川地震台网和震后应急流动地震台站在断层上盘的分布合理性,这对川西台阵覆盖的南半部分余震序列的精确定位具有重要意义。川西流动地震台阵震中区台站,除汶川县台站因山体滑坡被掩埋、汉旺清平台站由于震后交通问题没有取得数据、以及北川老县城台站因震后滑坡和泄洪灾害被迫提前

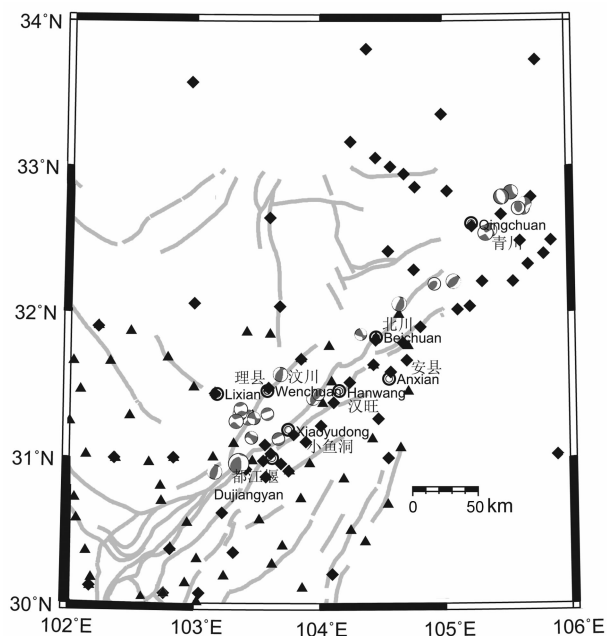


图 1 研究区域与台站分布

三角形代表川西流动地震台阵台站, 菱形为震后应急流动台站和固定台网台站, 震源机制解显示了主震和早期强余震的位置。

Fig. 1 Study area and station distribution

Bold triangles stand for stations of the Western Sichuan seismic array, bold diamonds stand for earthquake emergency response stations, focal mechanism solutions indicate position of the main shock and early strong aftershocks.

撤除外, 绝大多数获得了从震前到震后完整的连续观测记录。上盘个别台站因供电问题有较长时间的记录间断, 但也在震后 15~20 天内恢复了正常观测。

震后应急流动地震台站沿汶川地震发震断裂的分布相当密集, 这有利于更好地对地震深度和位置进行有效控制。

本文用于余震序列重新定位的震相数据由四川

台网提供的余震观测数据和川西流动地震台阵拾取的震相数据共同组成。为了使余震序列重新定位的震相数据更加可靠, 我们选取 2008 年 5 月 12 日到 2008 年 9 月 26 日间, 四川台网地震目录提供了震源深度, 且经川西台阵波形记录检验具有较高信噪比的地震事件用于地震定位研究。为避免到时拾取困难以及精度较差的首波震相对定位精度的影响, 我们限制震中距小于 100 km 的台站参与重新定位, 同时限制每个地震最少记录台站数为 8 个。最终用于余震定位的台站数为 126 个, 地震事件 3920 个, 总计震相数为 109705。

## 2.2 余震序列的双差定位

余震序列重新定位采用双差定位方法<sup>[10,11]</sup>。地震的初始震中位置和深度依据四川台网提供的地震目录。地壳 P 波速度模型参照赵珠等<sup>[12]</sup>提供的龙门山地区地壳速度模型, P 波和 S 波速度比结果则参考了陈九辉等<sup>[13]</sup>和刘启元等<sup>[14]</sup>利用接收函数方法得到的结果。重新定位前的走时初始均方根残差为 0.89 s, 重新定位后, 共有 3622 个地震获得了重新定位结果, 其均方根残差降为 0.20 s。水平和垂直方向平均标准差分别为 0.85 km 和 0.75 km。

图 2 给出了重新定位后余震序列的震中分布。重新定位后汶川  $M_s 8.0$  地震主震纬度为  $30.9607^\circ$ , 经度  $103.3525^\circ$ , 震源深度 18.8 km, 发震时刻为北京时间 2008-05-12 14:28:0.39。

图 3a 进一步给出了沿龙门山走向的余震序列深度分布, 按照重新定位后震源深度误差小于 2 km 的条件过滤后, 余震序列的深度分布如图 3b 所示。对比过滤前后余震震源深度分布可以发现, 全部震源深度位于中下地壳深度和大部分震源深度接近地表的地震被滤除。过滤前后南半部分余震集中带的

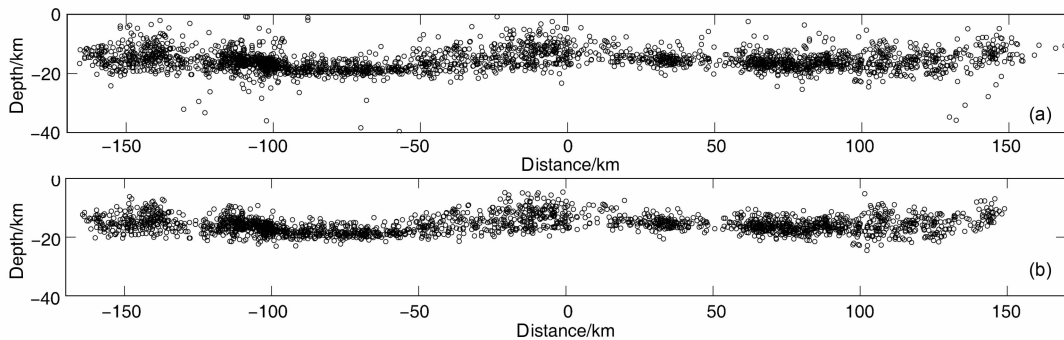


图 3 (a)全部重定位后地震的深度分布; (b)深度误差小于 2 km 的地震深度分布  
投影方向为北东  $45^\circ$ , 投影中心点坐标  $31.72^\circ\text{N}, 104.21^\circ\text{E}$ 。

Fig. 3 (a) Depth distribution of all aftershocks; (b) Aftershocks with depth error less than 2 km  
Projection direction is  $N45^\circ\text{E}$ , projection center coordinate is  $31.72^\circ\text{N}, 104.21^\circ\text{E}$ .

形态没有明显变化,而余震带最北端的形态略有变化.这从一个侧面说明了川西流动地震台阵数据在余震重定位过程中起到的作用.过滤后,所有地震均分布于 4~24 km 深度范围,沿龙门山走向方向的分段特征更加明显.后面关于汶川地震地震构造的讨论都基于过滤后的地震分布结果进行.

### 3 汶川地震的地震构造

#### 3.1 余震分布的总体特征

图 2 给出的余震震中位置分布图显示,汶川地震主震起始于破裂带最南端,余震几乎向北东方向沿断层带单向延伸.这与地表地质考察结果<sup>[6]</sup>和地震破裂过程反演结果<sup>[3~5]</sup>相符.余震在北东  $45^\circ$  方向上分布在长达 350 km 的破裂带上,其宽度和空间形态沿破裂带显示了强烈的分段和非均匀特征,并在一些段落有明显的间断.汶川地震绝大部分余震沿龙门山中央断裂延伸,并向龙门山逆冲断裂带的上盘一侧分布.在安县以南的区段,灌县—江油断裂西侧可见明显余震分布,在北段则未见余震发生,这意味着灌县—江油断裂在主震过程中可能只有安县以南的区段发生了破裂.

除小鱼洞到理县方向存在一条北西向余震分布带外,整个破裂带宽度小于 30 km,并在断裂带的各个区段呈现出明显的非均匀变化.余震分布宽度最大的区段位于破裂带最南段和北川附近,这两个区段正是地表地质考察发现位错最大的区段,同时也是震源破裂过程反演<sup>[4]</sup>得到断层面上破裂滑动量最大的区段.在这两个区段,汶川—茂汶断裂表现为余震分布的西边界.在这两个区段之间,余震分布宽度只有约 20 km,并且很多余震分布于灌县—江油断裂和映秀—北川断裂之间,显示余震主要发生于这两条断裂之间.在余震分布带最北端,余震分布比较集中,并在青川断裂和龙门山中央断裂交叉点附近出现明显弯折.余震分布符合高角度走滑断裂特征.应该说明的是,限于台站分布状况,川西台阵台站数据没有参与最北端余震的重新定位,这一段地震定位结果的置信度较南部稍差.

小鱼洞到理县方向的北西向余震分支是目前各个余震定位结果中普遍存在的现象.图 2 显示其余震分布长度超过了 60 km,远远超过其他余震分布区段的破裂宽度.在该分支附近区域发生了一次 6 级以上和 10 多次 5 级以上的强余震,且破裂机制以北西向走滑为主<sup>[15]</sup>,应当是汶川地震主破裂的继

续.地表地质考察结果也发现了北西向延伸的小鱼洞断裂,但地表发现的破裂出露带长度只有 6 km<sup>[6]</sup>,远远小于近 60 km 长的北西向余震分布带长度.因此,该余震分支不能看作龙门山三条主要断裂的简单分支,其构造成因需要进一步研究.

图 3b 表明,汶川地震绝大部分余震分布在 4~24 km 深度.余震上沿深度较浅的区段分别对应地震初始的映秀和北川两地,这与在这两个区域地表观测到较大垂直错动是一致的.这两个区域之间的区段余震分布集中于 15~20 km 深度,据此推断,浅部介质对余震起到了控制作用.平均震源深度最大的区段出现在余震序列的最北段.接收函数反演获得的 S 波速度结构结果<sup>[14]</sup>显示,松潘—甘孜地块中下地壳存在西厚东薄的楔状低速区,汶川大震区 12~23 km 深度上的地壳为 3.8~4.0 km/s 的 S 波高速结构,而其下方地壳为 3.1~3.4 km/s 低速结构.图 4 给出了  $31^\circ\text{N}\pm 5\text{ km}$  范围的余震在 S 波速度结构剖面上的投影分布.图 4 表明,余震以中地壳低速区顶部为底边界,主要分布于上地壳高速区.

#### 3.2 余震非均匀分布的构造成因

汶川地震的地表地质考察结果<sup>[6]</sup>、余震分布的总体特征和破裂过程反演结果<sup>[3~5]</sup>均显示,汶川地震是近期发生的特大地震中结构最复杂、破裂长度最长的一次逆冲兼右旋走滑型地震.为了进一步研究汶川地震复杂的余震分布的构造成因,图 5 给出了简化的地表地质构造图与余震分布叠加结果,图 6 则给出了垂直龙门山的分段余震深度分布剖面.

图 5 给出的龙门山地区地质构造显示,坚硬的彭灌杂岩体和宝兴杂岩体是汶川地震发生的龙门山中段地区最显著的地质构造单元,其中,彭灌杂岩在龙门山构造模型和龙门山地震构造背景中具有重要地位<sup>[1,17,18]</sup>.余震分布显示,汶川地震起始于宝兴杂岩和彭灌杂岩之间的交接区域,余震在小鱼洞—理县一线以南近似均匀分布在彭灌杂岩体内部.小鱼洞到理县的北西向余震分支横切彭灌杂岩,并沿雪龙堡杂岩南缘延伸.主震有限断层反演结果<sup>[3~5]</sup>显示此处发生了超过 9 m 的滑动位移,并且作为主破裂进一步向北西方向延伸的强余震的震源机制以北西向走滑为主<sup>[15]</sup>,据此可以推断,汶川地震过程中彭灌杂岩南半部分发生了脆性破裂.图 6AA' 和 BB' 剖面给出的彭灌杂岩南半部分两个区段的余震深度分布截面表明,彭灌杂岩很可能在 8~20 km 深度范围内发生了破裂.坚硬的彭灌杂岩体在长期应力积累作用下发生突然破裂,由此释放出巨大的应变

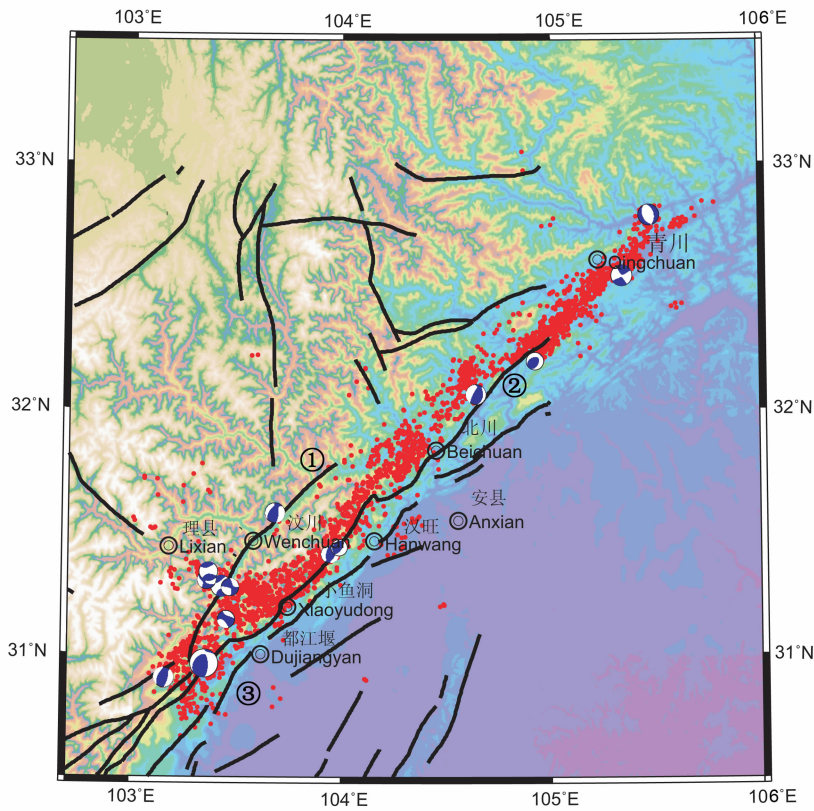


图 2 重新定位后汶川地震余震序列分布震源机制解结果据 Global CMT 的结果, 地表断层分布据徐锡伟等<sup>[6]</sup>. ① 灌县—江油断裂; ② 映秀—北川断裂; ③ 汶川—茂汶断裂.

Fig. 2 Spatial distribution of the Wenchuan earthquake sequence after relocation. Focal mechanisms follow results from Global CMT, faults based on Xu et al. <sup>[6]</sup>; ① Guanxian-Jiangyou fault; ② Yingxiu-Beichuan fault; ③ Wenchuan-Maowen fault.

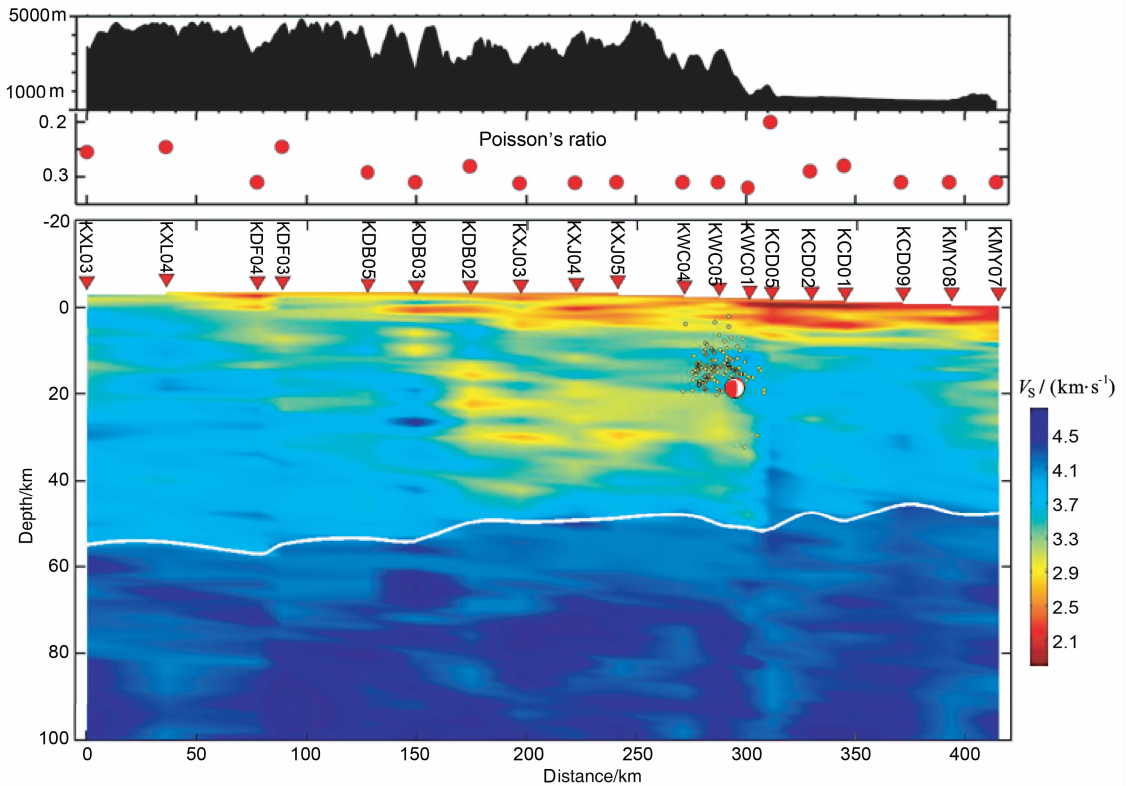


图 4 沿 31°N 的地壳上地幔 S 波速度结构<sup>[14]</sup>与地震分布

从上至下依次为地表高程、地壳平均泊松比和 S 波速度结构, 距剖面 5 km 范围内的余震由圆圈表示, 主震位置用地震矩张量解标出.

Fig. 4 S-wave velocity profile<sup>[14]</sup> along 31°N and distribution of aftershocks

From top to bottom: surface elevation, crust Poisson's ratio and S-wave velocity structure, circles are aftershocks within 5 km range from the profile, position of main shock is indicated by the focal mechanism solution.

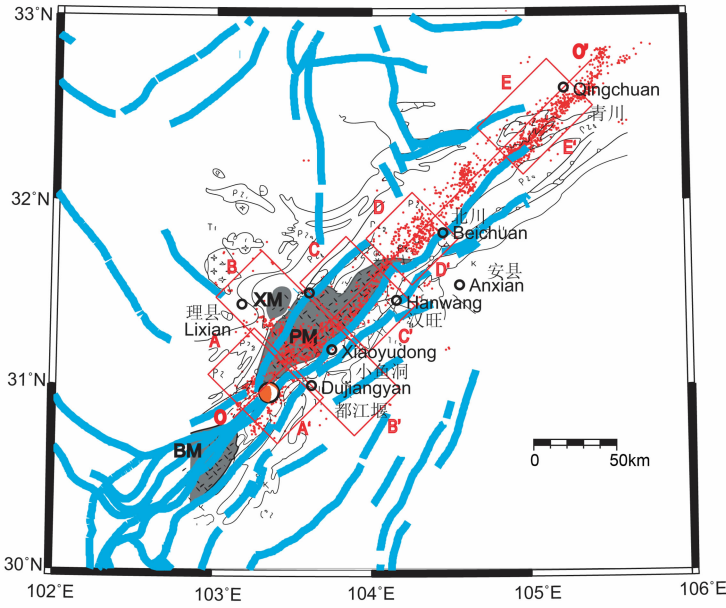


图 5 简化的地表地质图与地震分布  
其中,地表地质图据 Meng et al. [16] 的结果,蓝色粗线为地表活动断裂[6],红色圆点为余震;红色方框 AA'~EE'代表图 6 中分段投影区域,图 6 中水平距离坐标原点沿 OO' 坐标中心点同图 3;PM 代表彭灌杂岩,BM 代表宝兴杂岩,XM 代表雪龙堡杂岩.

Fig. 5 Simplified geological map and aftershock distribution

Surface geological map is recompiled from Meng et al. [16], blue thick lines are active faults[6], red dots are aftershocks; red boxes labeled AA'~EE' indicate the projection area in Fig. 6 and their horizontal origin is along OO'. PM, BM and XM stands for Pengguan, Baoxing and Xuelongbao massifs respectively.

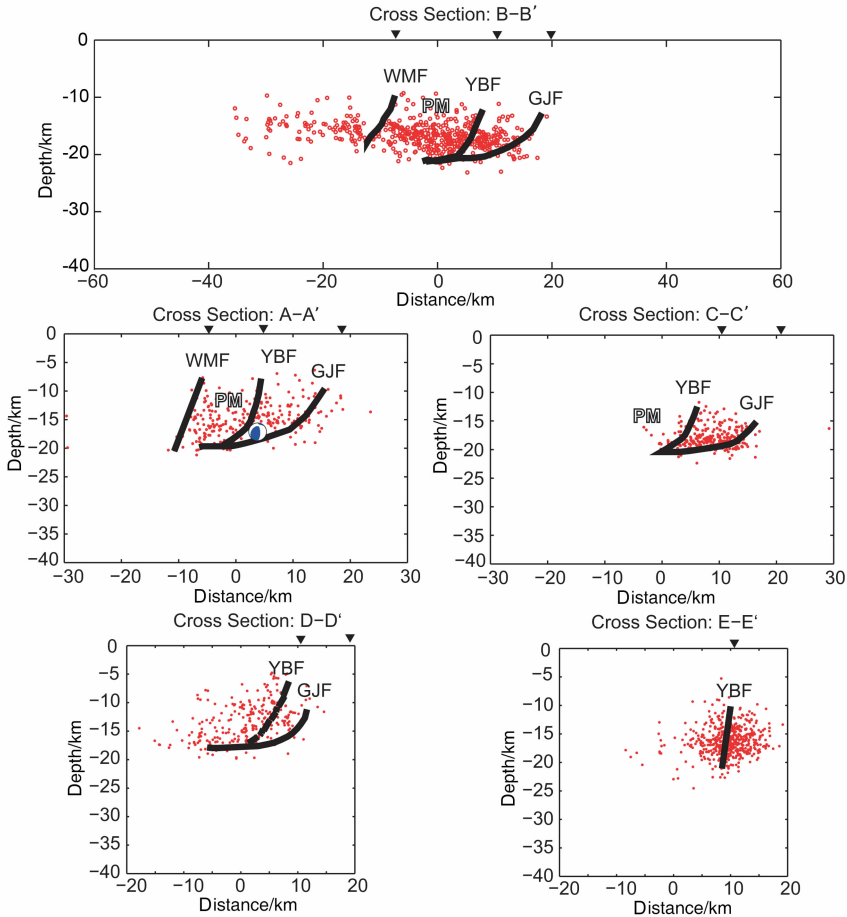


图 6 垂直龙门山方向余震深度分布与推测断层

其中 AA'~EE' 分别对应图 5 中红色方框包围的区域在垂直龙门山方向的投影. WMF: 汶川—茂汶断裂; YBF: 映秀—北川断裂; GJF: 灌县—江油断裂; PM: 彭灌杂岩.

Fig. 6 Depth distribution of aftershocks across sections AA'~EE'

Cross sections AA'~EE' correspond to red boxes in Fig. 5 respectively. WMF: Wenchuan-Maowen fault; YBF: Yingxu-Beichuan fault; GJF: Guanxian-Jiangyou fault; PM: Pengguan Massif.

能,这可能是汶川地震震级巨大的必要条件。

在图 6CC'剖面对应的区域,余震主要分布在彭灌杂岩东边界 YBF 和 GJF 之间.在此区段,彭灌杂岩内部几乎没有地震发生.主震震源破裂过程<sup>[4]</sup>显示在此区段 YBF 上破裂向北传播出现暂时停滞,说明彭灌杂岩北段对地震破裂的传播起到了阻碍作用。

图 6 中区段 DD'处于彭灌杂岩以北和地表位错量较大的北川附近.此处形成主震滑动位移量的第二个峰值区.由图 2 可知,该处余震分布宽度明显加大。

图 6AA'到 DD'剖面清晰显示了 YBF 和 GJF 在约 20~22 km 深度合并收敛的特征,该深度同时也是图 4 中下地壳低速层的顶部边界<sup>[14]</sup>.这与龙门山逆冲推覆断裂带底部存在韧性剪切带的认识是一致的.同时,这几个区段近 150 km 长度上的余震分布显示了与彭灌杂岩体的相关性,主震滑动位移分布结果显示<sup>[3]</sup>,汇聚位移仅在南段 120~135 km 范围内表现明显,因此,挤压应力和龙门山下方坚硬的彭灌杂岩对主震破裂过程和余震分布起到了共同作用。

由于台站分布关系,同时由于处在两条走滑断层相互交叉的区域,最北端的 EE'区段余震深度剖面难以显示断层的深部展布,但余震分布在一定程度上显示出了走滑断裂的特征。

## 4 结论与讨论

本文综合利用川西流动地震台阵观测到时数据、汶川地震震后应急台网和四川及邻近省份固定台网震相数据,对汶川地震余震序列进行了重新定位.根据本文结果,可以得到如下结论:

(1)汶川地震从彭灌杂岩南缘开始破裂,主震及其余震破裂带长约 350 km,在大部分区域宽度约 20~30 km.其宽度和空间形态沿破裂带显示了强烈的分段和非均匀特征.坚硬的彭灌杂岩对余震的非均匀性分布和汶川地震复杂的破裂过程<sup>[3~5]</sup>起到了重要的控制作用。

(2)以松潘—甘孜地块中地壳低速层顶部为底边界,余震主要分布在龙门山东缘 4~24 km 深度范围的上地壳高速层内.余震深度分布剖面清晰地显示了映秀—北川断裂和灌县—江油断裂以及汶川—茂汶断裂在 20~22 km 深度合并为剪切带的特征。

(3)小鱼洞到理县方向存在一条长度超过 60 km 的北西向余震分布条带.综合震源机制解和地震破裂过程的研究结果,我们推测,这是坚硬的彭灌杂岩

体在长期应力积累作用下发生破裂的反映。

本文获得的余震震源分布与震源破裂过程反演获得的滑动量分布有很好的 consistency.需要指出的是,尽管地表地质考察发现了垂直于龙门山走向的小鱼洞断裂,从余震分布情况看,彭灌杂岩体的破裂尺度应该大于地表考察发现的小鱼洞断裂的尺度。

另外,尽管本文用于地震定位研究的台站分布更加合理,同时也参考了川西流动地震台阵获得的地壳速度结构结果,本文的余震序列重新定位结果仍然是在一维速度模型基础上给出的.进一步开展震源和速度结构联合反演是有待进一步研究的问题。

**致谢** 感谢四川省地震台网中心和参加汶川地震震后应急地震观测的中国地震局地球物理研究所、重庆市地震局、湖北省地震局、甘肃省地震局、广东省地震局、河北省地震局和中国地震局地震台网中心等单位在震后的辛勤劳动,他们为本次工作提供了宝贵的观测数据.感谢河北省地震局的高景春研究员的大力帮助,感谢 Felix Waldhauser 博士提供双差地震定位程序.对论文评阅人的合理化建议表示感谢。

## 参考文献(References)

- [1] 张培震,徐锡伟,闻学泽等. 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, 2008, **51**(4):1066~1073  
Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. Slip rate and recurrence interval of the Longmenshan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12, 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(4):1066~1073
- [2] 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 dynamics of Longmenshan Mountains and its adjacent regions. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1994, **16**(4):389~403
- [3] Ji C, Shao G F, Zhong L, et al. Rupture history of the May 12, 2008  $M_w$ 8 Wenchuan Earthquake: An update. 2008 Bilateral Workshop under the Sino-US Earthquake Studies Protocol, November 11~14 in Boulder, Colorado, USA
- [4] 王卫民,赵连锋,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  $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5):1403~1410
- [5] 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. Spatiotemporal rupture

- process of the 2008 Wenchuan great earthquake. *Science in China (Series D) (in Chinese)*, 2008, **38**(10):1186~1194
- [6] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青等. 汶川  $M_s8.0$  地震地表破裂带及其发震构造. *地震地质*, 2008, **30**(3):597~629  
Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The  $M_s8.0$  Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology (in Chinese)*, 2008, **30**(3):597~629
- [7] 朱艾斓, 徐锡伟, 刁桂苓等. 汶川  $M_s8.0$  地震部分余震重新定位及地震构造初步分析. *地震地质*, 2008, **30**(3):759~767  
Zhu A L, Xu X W, Diao G L, et al. Relocation of the  $M_s8.0$  Wenchuan earthquake sequence in part: preliminary seismotectonic analysis. *Seismology and Geology (in Chinese)*, 2008, **30**(3):759~767
- [8] 黄媛, 吴建平, 张天中等. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重新定位研究. *中国科学(D辑)*, 2008, **38**(10):1250~1257  
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):1703~1712
- [9] 刘启元, 陈九辉, 李顺成等. 汶川  $M_s8.0$  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):584~596  
Liu Q Y, Chen J H, Li S C, et al. The  $M_s8.0$  Wenchuan earthquake: preliminary results from the Western Sichuan mobile seismic array observations. *Seismology and Geology (in Chinese)*, 2008, **30**(3):584~596
- [10] Waldhauser F, Ellsworth W. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward Fault, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2000, **90**(6):1353~1368
- [11] 杨智娴, 陈运泰, 郑月军等. 双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用. *中国科学 D 辑*, 2003, **33**(增刊): 129~134  
Yang Z X, Chen Y T, Zheng Y J, et al. Accurate relocation of earthquakes in central-western China using the double-difference earthquake location algorithm. *Science in China (Series D)*, 2003, **46**(Suppl.):181~188
- [12] 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*, 1997, **19**(6):615~622  
Zhao Z, Fan J, Zheng S H, et al. Precision determination of the crustal structure and hypocentral locations in the Longmenshan thrust nappe belt. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 1997, **19**(6):615~622
- [13] 陈九辉, 刘启元, 李顺成等. 川西地区地壳厚度和泊松比结构研究. *中国地球物理*. 2008. 366  
Chen J H, Liu Q Y, Li S C, et al. Crustal thickness and Poisson's ratio in the region of Western Sichuan (in Chinese). *Chinese Geophysics*. 2008. 366
- [14] 刘启元, 李昱, 陈九辉等. 汶川  $M_s8.0$  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 al. Wenchuan  $M_s8.0$  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
- [15] 胡幸平, 俞春泉, 陶开等. 利用 P 波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解. *地球物理学报*, 2008, **51**(6):1711~1718  
Hu X P, Yu C Q, Tao K, et al. Focal mechanism solutions of Wenchuan earthquake and its strong aftershocks obtained from initial P polarity analysis. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(6):1711~1718
- [16] Meng Q R, Hu J M, Wang Y, et al. Late Cenozoic denudation by large-magnitude landslides in the eastern edge of Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, **243**:252~267
- [17] Burchfiel B C. New technology: new geological challenges. *GSA Today*, 2003, **14**(2):4~10
- [18] Burchfiel B C, Royden L H, Van der Hilst R D, et al. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *GSA Today*, 2008, **18**(7):4211. doi: 10.1130/GSATG18A.1

(本文编辑 何燕)