

赵荣涛, 安美建, 冯梅, 张士安, 张纪中, 侯春堂. 2015. 利用余震震中分析芦山 $M_S7.0$ 地震发震构造. 地震学报, 37(2): 205-217. doi:10.11939/jass.2015.02.001.

Zhao R T, An M J, Feng M, Zhang S A, Zhang J Z, Hou C T. 2015. Analysis on the seismogenic fault of Lushan $M_S7.0$ earthquake by using epicenters of its aftershocks. *Acta Seismologica Sinica*, 37(2): 205-217. doi:10.11939/jass.2015.02.001.

利用余震震中分析芦山 $M_S7.0$ 地震发震构造*

赵荣涛 安美建[†] 冯梅 张士安 张纪中 侯春堂

(中国北京 100081 中国地质科学院地质力学研究所)

摘要 对 2013 年 4 月 20 日芦山 $M_S7.0$ 地震主震震中周边 29 个地震台记录到的震后一年多的微、小余震, 利用 Hypo71 绝对定位方法进行定位, 获得了约 1960 次地震的震源位置. 结果显示, 芦山地震余震在平面上主要沿双石—大川分支断裂及其周边分布, 在垂向上主要集中在大约 5—20 km 深度之间的两条余震交叉带上. 其中一条余震带倾向 NW, 倾角在 12 km 左右深度发生变化, 浅部倾角较陡, 该余震带延伸至地表与双石—大川分支断裂和新开店断裂之间的推测隐伏断裂位置相重合; 另一条余震带倾向 SE, 其延伸至地表的位置与双石—大川断裂非常接近, 但与该断裂倾向相反. 主震震源位置与两条余震带相交的位置接近, 且芦山地震主震的两个节面产状与这两条余震带的深部几何形态正好对应, 表明芦山地震主震可能是两条余震带所对应的两条断裂同时活动的结果.

关键词 龙门山断裂带 微地震 地震定位 震源

doi:10.11939/jass.2015.02.001 中图分类号: P315.2 文献标志码: A

Analysis on the seismogenic fault of Lushan $M_S7.0$ earthquake by using epicenters of its aftershocks

Zhao Rongtao An Meijian[†] Feng Mei Zhang Shian
Zhang Jizhong Hou Chuntang

(Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The absolute earthquake location method (Hypo71) was used to locate micro- and small-aftershocks of 2013 $M_S7.0$ Lushan earthquake, which were recorded by 29 stations around the mainshock region for more than one year. Finally we got the epicentral location of about 1960 aftershocks. Results reveal that aftershocks laterally distribute along Shuangshi-Dachuan branch fault and its surrounding area, and vertically concentrate on two intersecting aftershock belts in depth range of ~5—20 km. One aftershock belt dips towards NW, and its dip angle becomes steeper at depth about 12 km. This belt's

* 基金项目 国家自然科学基金(41174039)资助.

收稿日期 2015-01-06 收到初稿, 2015-02-02 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: meijianan@live.com

extrapolation coincides with the buried fault between Shuangshi-Dachuan branch fault and Xinkaidian fault at surface. The other aftershock belt dips towards SE. Its extrapolation is close to Shuangshi-Dachuan fault at surface; however, its dipping direction is opposite to that of Shuangshi-Dachuan fault. The hypocenter of the Lushan main shock locates close to intersect of the two aftershock belts. Two nodal planes of focal mechanism of the main shock correspond well to the geometry of the two aftershock belts, respectively. This seismogenic structural feature implies that Lushan earthquake probably is resulted from simultaneous movement of two faults along the two aftershock belts.

Key words: Longmenshan fault zone; micro-earthquake; earthquake location; hypocenter

引言

2013年4月20日四川芦山 $M_s7.0$ 地震是继汶川 $M_s8.0$ 地震后在龙门山断裂上发生的又一次破坏性地震。该地震发生在龙门山断裂带的南段,震中位于双石一大川断裂以东(图1)。但地表调查表明除了在受灾较严重地区(如芦山县太平镇、宝盛乡、龙门乡、双石镇等地区)的河流阶地或河漫滩上发育有NE向和NW向地裂缝及沿这些地裂缝出现喷水冒砂等现象外,未发现明显的沿区域断裂发育的同震破裂(洪海春等,2013;徐锡伟等,2013;张岳桥等,2013)。同震破裂的缺失给主震断裂的辨认造成了困难。例如,张岳桥等(2013)推测主震断裂与双石一大川断裂深部断坡构造有关;徐锡伟等(2013)则认为主震断裂可能是一条尚未出露地表的盲逆断层;李传友等(2013)认为芦山地震的主要发震构造是大川一双石断裂与新开店断裂之间的龙门山前缘滑脱带,该滑脱带的运动可能带动了上面的双石一大川断裂和新开店断裂的活动。芦山主震后短时间内的余震分布跨越了双石一大川断裂的上、下盘,并斜切该断裂地表迹线。研究人员利用双差重定位对台站间距大于20 km的流动观测台和震中距大于15 km的固定台站7—18天所进行的余震观测进行了分析。虽然所得结果(房立华等,2013;苏金蓉等,2013;赵博等,2013)基本相近,但由于余震带状分布不明显导致不同研究给出了不同的解释。苏金蓉等(2013)认为大邑一名山断裂是芦山地震主震的发震断裂;赵博等(2013)则认为主震与大邑断裂西北侧的隐伏断裂有关;房立华等(2013)认为主震断裂延伸至地表与上述两者接近,同时主破裂面逆冲前段受阻反向逆冲而出现一条反冲断层,两者共同构成了“Y”字型断层。由此可见,芦山地震主震的发震断裂比较复杂,各研究得出的结论差别较大。

芦山地震发生后,在中国科学技术大学等的协助下,中国地质科学院地质力学研究所芦山地震震中及周边地区部署了29个间距约5 km的高频台站(图1),这些台站对震中区实现了较好的覆盖。对微、小余震进行研究可以获取主震发震断层及其周边断层在深部的几何特征和运动特征(An *et al.*, 2009, 2010)。利用高密度台站获得的高频观测可以有效地提高余震定位精度,利用更长时间的余震观测也可能得到更有价值的结果。本文利用这些高密度短周期台站记录的一年多的观测数据,确定了震源附近的微、小余震位置,期望根据主震和余震的位置能够给出芦山地震发震构造更准确的结论。

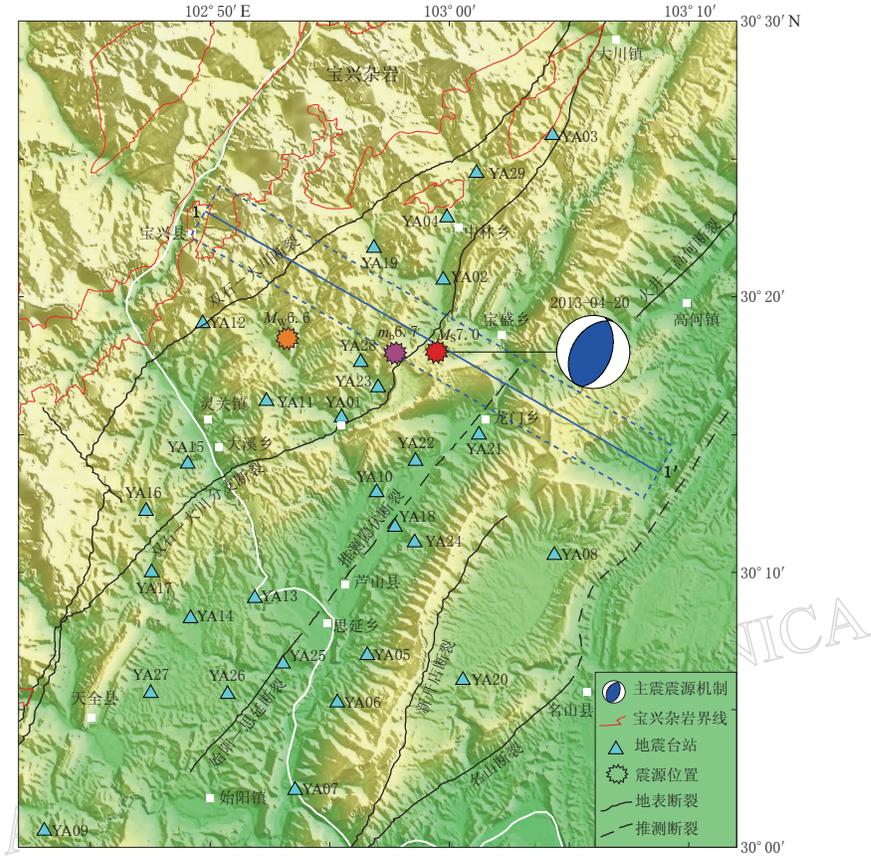


图 1 芦山主震及其周边构造简图

3 个爆炸图形为不同机构给出的芦山地震主震震源位置，其中红色引自中国地震台网中心(2013)，紫色引自国际地震台网中心(International Seismological Centre, 2013)，橙色引自美国地质调查局(U S Geological Survey, 2013)；蓝色实线表示剖面位置，蓝色虚线矩形表示垂直投影到剖面的地震范围；主震震源机制解引自 Global CMT (Dziewonski *et al*, 2012; Ekström *et al*, 2012)。断裂信息简化自中国 1 : 20 万地质图，断裂名称参考李传友等(2013)和徐锡伟等(2013)

Fig.1 Simplified tectonic map of Lushan main shock and its surrounding regions
 Three explosive stars mark the epicenter of Lushan mainshock; the red is from China Earthquake Networks Center (2013), the purple from International Seismological Centre (2013), the orange from U S Geological Survey (2013). Blue solid line is position of transect, and blue dashed lines delineate the range of earthquakes projected on the transect. Focal mechanism of the mainshock is from Global CMT (Dziewonski *et al*, 2012; Ekström *et al*, 2012). All faults are simplified from 1 : 200 000 geological map, names of faults are from Li *et al* (2013) and Xu *et al* (2013)

1 地质构造背景

龙门山断裂带是青藏高原与华南地块的边界构造带，是两大地块强烈挤压碰撞的产物，具有复杂的地质构造和演化历史(许志琴等, 1992, 2007)。芦山县位于龙门山断裂带南段，该区域主要发育有双石—大川断裂、始阳—思延断裂、新开店断裂、火井—高何断裂以及名山断裂(李传友等, 2013) (图 1)。双石—大川断裂是龙门山西南段的主要断裂，从天全以南向北经大溪、双石、大川、西岭等，向北东可能与安县—灌县断裂相连

(Densmore *et al.*, 2007). 双石一大川断裂不是一个单一延伸的孤立断层, 而是由多条断层组成, 这些断层呈叠瓦状排列, 产状相同, 以逆冲推覆为主兼具右旋走滑性质(林茂炳, 陈运则, 1996). 该断裂的总体走向大致为 $N45^{\circ}E$, 倾向 NW, 倾角 $45^{\circ}-65^{\circ}$ 不等(杨晓平等, 2009; 赵博等, 2013). 龙门山山前发育有新开店断裂(又称山前隐伏断裂)、名山断裂和北部的火井—高何断裂, 均属于广义上的大邑—名山断裂, 是其向南延伸的部分(李传友等, 2013), 地表断续出露一些小断层和单斜构造(邓起东等, 1994; 徐锡伟等, 2005). 大邑断裂的遥感影像特征不明显, 是一条右旋逆冲活动性质的全新世活动断裂(Densmore *et al.*, 2007; 董绍鹏等, 2008; 张岳桥等, 2013). 新开店断裂位于成都平原西北缘, 是隐伏于平原区地表之下的若干级次级逆断裂, 走向 $N55^{\circ}-60^{\circ}E$, 倾向主要为 NW(唐荣昌, 韩渭宾, 1993; 中国地震局监测预报司, 2009). 火井—高何断裂始于北部的火井、高何, 在西南终止于分水岭一带, 总体走向 $N40^{\circ}E$ 左右. 此外, 在芦山县所在的盆地内还发育有始阳—思延断裂和其向北延伸可能存在的隐伏断裂(图 1 中推测隐伏断裂). 始阳—思延断裂南段始于始阳镇, 向北延伸至思延乡附近, 长约 14 km, 走向 $N40^{\circ}E$. 其向北部的延伸可能隐伏于第四纪沉积物之下(李传友等, 2013). 震源区的西部和北部山区分布有大面积的宝兴杂岩(图 1), 主要由强烈变形、中低级变质的火成岩组成, 岩石组合主要为斜长角闪岩、绿泥石片岩、辉长质片麻岩、闪长质片麻岩、英云闪长质片麻岩和少量块状二长花岗岩(刘树文等, 2009).

历史上龙门山断裂带南段曾发生过几次破坏性较强的地震. 历史地震研究表明, 在过去的 1100 多年中龙门山断裂带南段未发生过 $M \geq 7.0$ 大地震(闻学泽等, 2009). $M \geq 6.0$ 地震历史记载有 3 次, 分别为 1327 年天全 $M \geq 6.0$, 1941 年泸定—天全一带 $M 6.0$ 和 1970 年大邑 $M 6.2$ (陈立春等, 2013). 其中, 1327 年地震发生在鲜水河断裂南段(Wen *et al.*, 2008). 1941 年 $M 6.0$ 地震震中位于泸定与天全之间, 破坏较为严重的地区包括康定、泸定和宝兴(中国地震局震害防御司, 1999; 孙成民, 2010). 1970 年大邑 $M 6.2$ 地震极震区位于芦山县大川长石坝—双河大飞水一带(中国地震局震害防御司, 1999; 陈立春等, 2013). Densmore 等(2007)根据探槽揭示双石一大川断裂最近的活动是在全新世, 最近一次破裂事件发生于距今 (930 ± 40) — (860 ± 40) 年.

2 数据和方法

本文使用芦山地震主震震中及其周边地区的 29 个高密度流动地震台站(图 1) 2013 年 4 月 26 日—2014 年 5 月 8 日记录到的地方震事件观测波形. 这些台站基本实现了对主震震中区域较好的覆盖(图 1). 各台使用 Sercel L-22E 短周期探头, 其有效频率大于 2 Hz. 图 2 给出了地震台站记录到的一次余震的波形, 可以看出, 该波形数据的信噪比很高, P 波初动时刻也非常清晰.

首先, 我们对记录的地震事件波形进行人工震相标注等预处理. Hypo71(Lee, Lahr, 1975), Hypoinverse(与 2000 版兼容修改后称为 Hypo2000)(Klein, 1978)和 Hypoellipse(Lahr, 1979)是 3 个一直被广泛使用的地震定位软件. 本文利用 Hypo71 进行绝对定位, 该程序使用了 Geiger (1912)提出的经典思想, 即将非线性方程组线性化, 通过最小二乘原理求解.

定位误差主要取决于震相到时标注和波速结构. 由于 S 波到时标注的误差较大, P 波

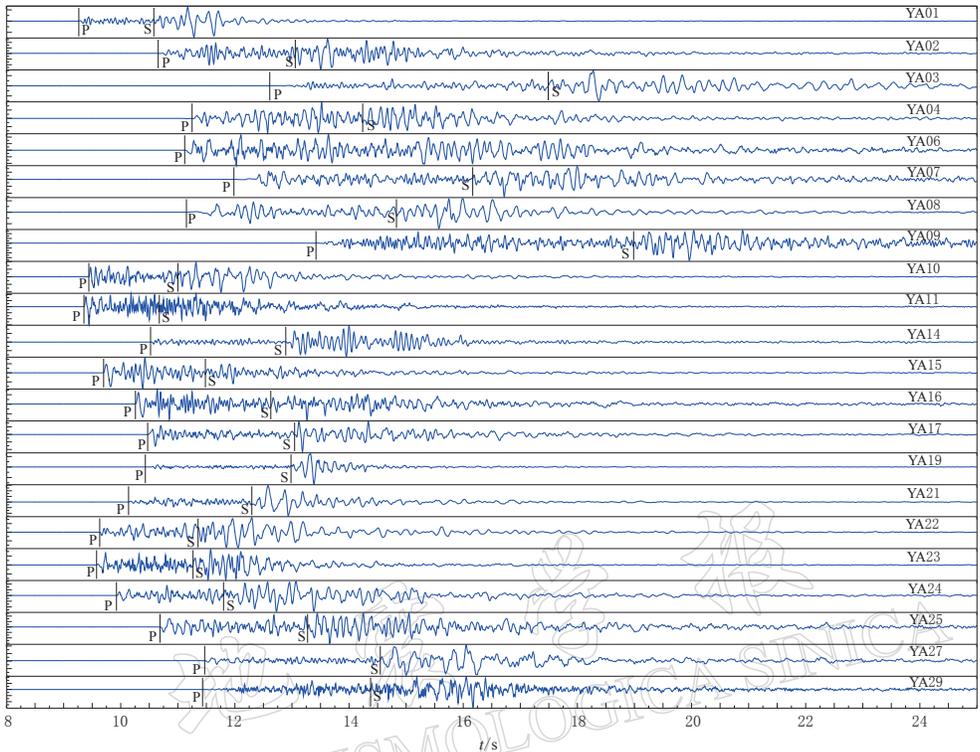


图 2 地震台站记录到的一次芦山余震的垂向分量波形

Fig. 2 Vertical-component waveforms of one Lushan aftershock recorded by seismic stations

到时比较精确，因此在定位时只采用 P 波到时。我们使用的地震波信号频率为 10—30 Hz，该频段的微地震 P 波震相标注误差小于 0.1 s。Sun 等(2014)在盈江地震定位时通过测试得出，震相标注误差为 0.1 s 时对震源深度和水平位置造成的误差不超过 1 km。盈江地震位于微地震台网之外，而本研究所用的地震台网对余震实现了很好的覆盖，因此本文的定位精度更高。

我们在定位中使用了 3 个不同的模型(图 3)，其中模型 1 和 2 分别基于赵珠等(1997)和 Wang 等(2007)给出的龙门山地区一维波速模型修改得到。考虑到近地表岩层裂隙度随深度的加大而缩小可导致岩层波速快速升高，我们把前人模型中近地表波速均匀层改为由数个波速渐变层所组成(图 3)。模型 3 在 20 km 深度以上的波速与前两者差别较大。基于不同模型得到的结果的差别可看作由波速模型误差导致的定位结果误差。计算结果表明，利用模型 1 定位时水平向和

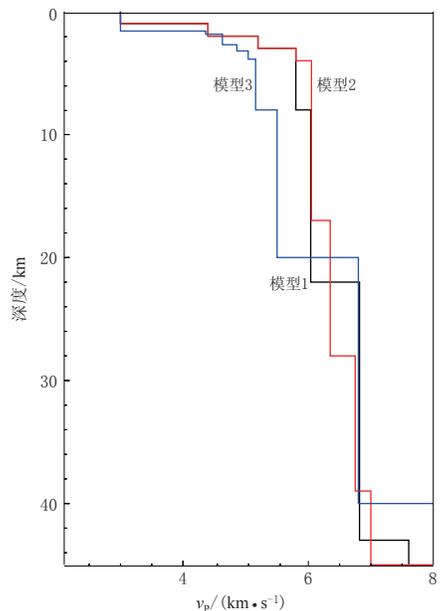


图 3 本文余震定位时使用的 3 个波速模型
Fig. 3 Three velocity models used to locate aftershocks in this study

垂向上的平均误差分别为 0.65 km 和 1.06 km, 平均定位残差为 0.09 s; 利用模型 2 定位时平均误差分别为 0.73 km 和 1.19 km, 平均定位残差为 0.10 s; 使用模型 3 定位时平均误差分别为 0.62 km 和 0.96 km, 平均定位残差为 0.08 s. 利用 3 个波速模型所得到的余震水平分布没有明显差别, 但在垂直方向却存在一定的差别. 图 4 给出了利用 3 个波速模型获得的余震沿剖面 1—1' (位置见图 1) 的分布对比. 可以看出, 利用模型 1 和模型 2 获得的余震震源深度定位结果基本相同, 利用模型 3 获得的余震震源深度比利用模型 1 和 2 获得的约深 4 km, 但余震在垂向上聚集形态基本一样. 总之, 余震在水平位置上的误差较小, 而在深度上可能存在 4 km 的误差, 但这个深度误差对余震聚集形态的影响不明显. 由于获得模型 2 的人工地震剖面距离龙门山南段更近, 因此后面只介绍利用模型 2 获得的结果.

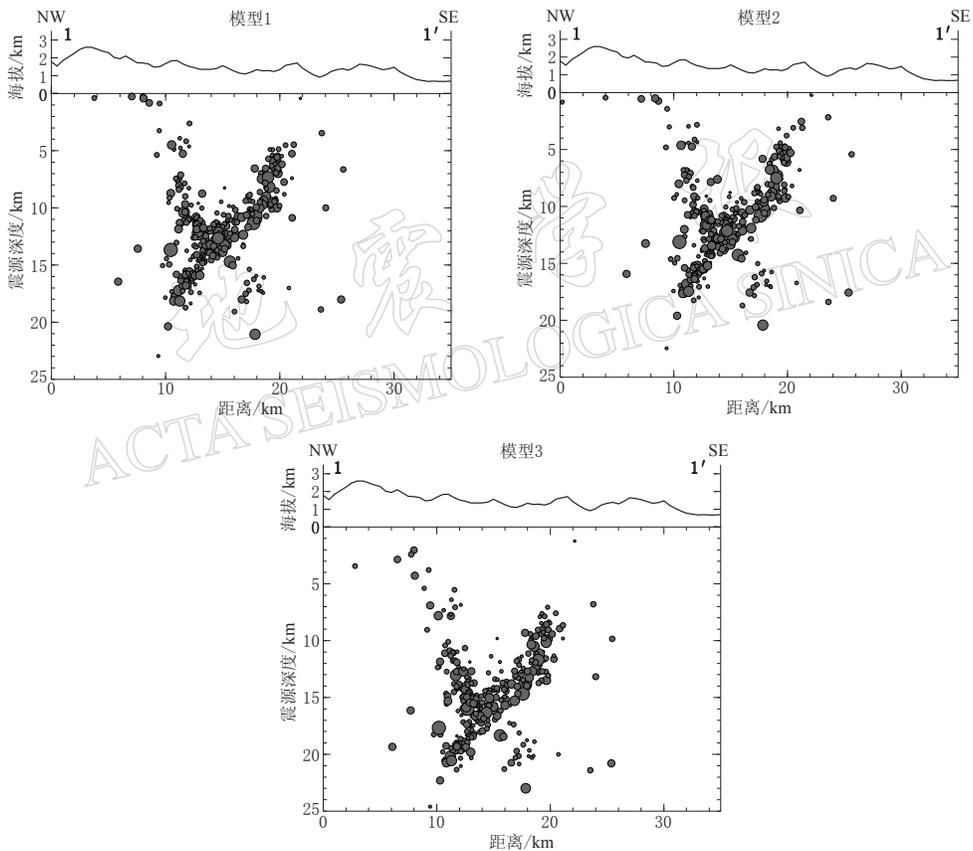


图 4 利用 3 个模型获得的余震在剖面 1—1' 上的分布

Fig. 4 Distribution of aftershocks obtained using the three models along the transect 1—1'

图 4 给出的各模型结果中余震明显呈带状分布, 且这个带状分布比前人利用较大间距台站观测的双差重定位结果更清楚. 鉴于本文绝对定位的结果已明显呈带状分布, 故不再进行相对重定位分析.

3 结果

利用 Hypo71 程序, 在一年多的观测中确定了约 1960 个余震事件的震源位置(图 5). 图 5 给出了根据模型 2 获得的定位结果(利用另外两个模型获得的结果与该结果基本一

致)。可以看出，余震主要分布在芦山县以北及主震的 SW 和 NW 两个方向，余震主要沿着 NE 走向的双石—大川分支断裂及其周边分布。

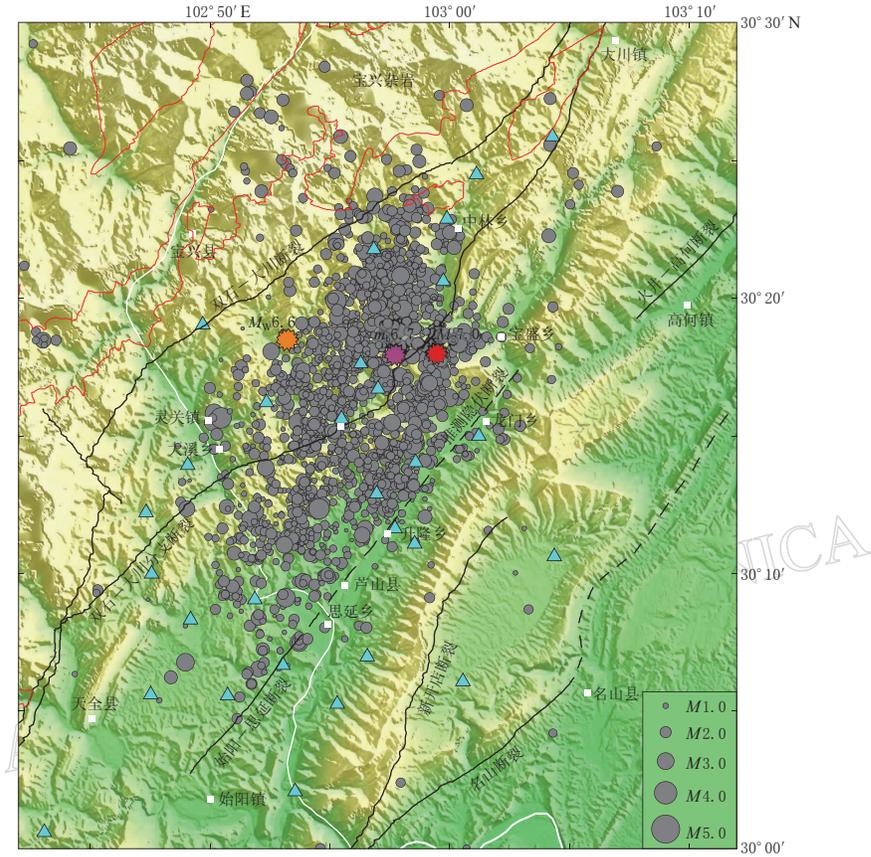


图 5 2013 年 4 月 26 日—2014 年 5 月 8 日芦山地震的余震分布

Fig. 5 Aftershocks of Lushan earthquake from April 26, 2013 to May 8, 2014

图 6 给出了余震沿大致垂直和平行区域断层走向的垂直剖面(1—1', 2—2', A—A', B—B')的分布. 各剖面宽度(图 6a 中的虚线)均为 4 km, 即距各剖面 2 km 范围内的所有余震(所有深度范围)均被垂直投影到该剖面上. 图 6 只给出了根据模型 2 得到的余震在剖面上的分布, 另外两个模型获得的余震在聚集形态上与此一致. 结果表明, 余震在深度上主要分布在 5—20 km 之间. 5 km 以上很少有余震发生, 这与芦山地震主震没有造成明显的地表同震破裂是一致的.

图 6b 中, 剖面 1—1' 近似垂直于区域内 NE 走向的双石—大川分支断裂(图 6a). 该剖面中, 余震主要沿着倾向相反、在 12 km 深度左右相互交叉的两个条带(P_1, P_2)分布. 其中, P_1 余震带的倾角在 12 km 深度有一定的变化, 即在小于 12 km 的深度(图 6b 中 P_{1-1}), 余震带的倾角比 12 km 以下(图 6b 中 P_{1-2})更大. 图 6b 显示倾向 NW 的 P_1 余震带(图 6b 中 P_{1-1})延伸至地表与双石—大川分支断裂(F_{1-2})东侧芦山县盆地内的推测隐伏断裂位置(F_2)基本重合; P_2 余震带倾向 SE, 其延伸至地表的位置与双石—大川断裂(F_{1-1})位置非常接近.

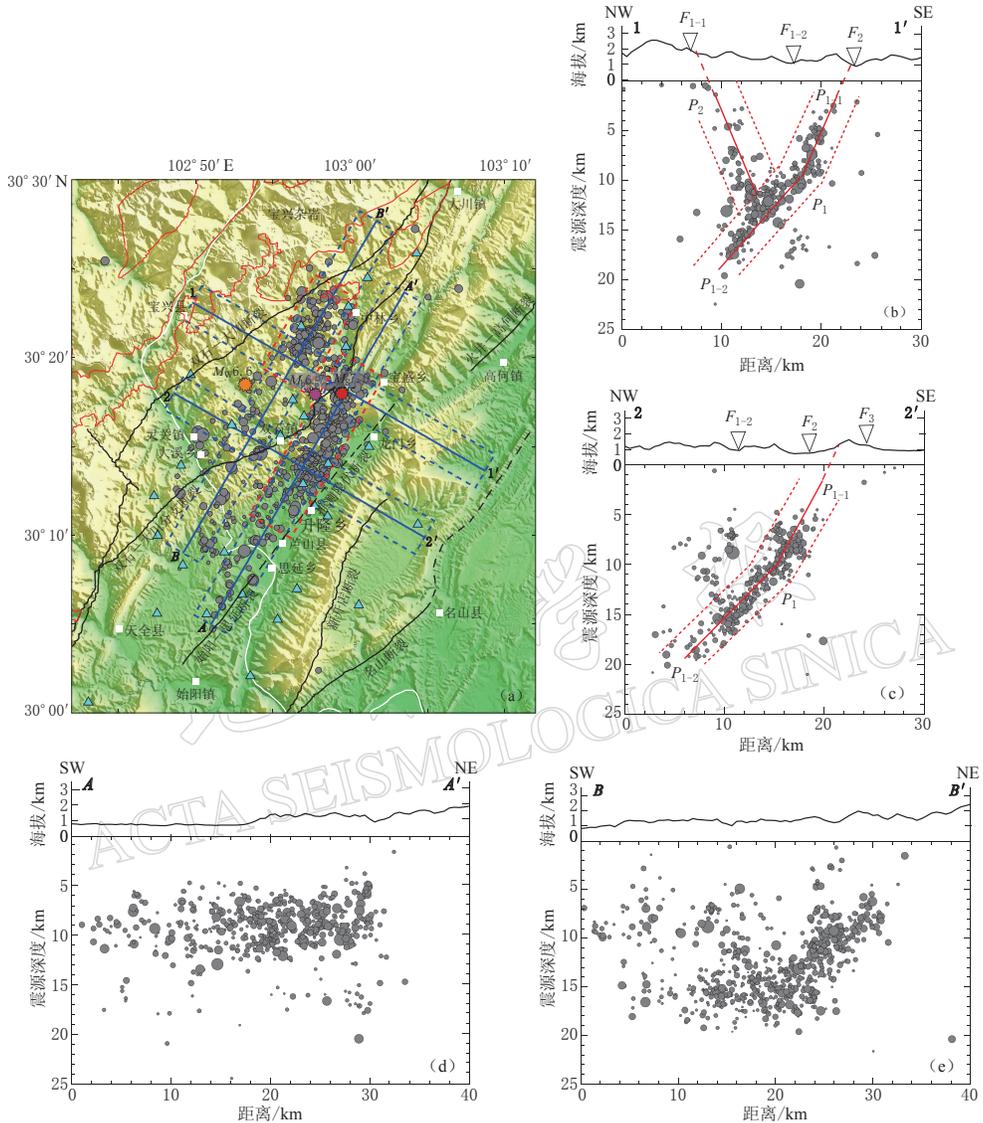


图 6 余震空间切片分布图

图(b)–(e)显示了余震沿 4 个剖面的分布; 倒三角表示区域断裂的地表出露位置或推测断裂位置, F_{1-1} 为双石—大川断裂, F_{1-2} 为双石—大川分支断裂, F_2 为推测隐伏断裂, F_3 为新开店断裂. 其它图注同图 1 或图 5; 剖面位置见图(a), 其中只显示了 7—11 km 内的余震, 红色虚线表示余震带的范围, 蓝色实线表示剖面位置, 蓝色虚线矩形表示垂直投影到剖面的地震范围

Fig. 6 Distribution of aftershocks along four vertical transects

Figs. (b)–(e) show aftershocks distribution along four transects. Hollow inverted triangles are the positions or inferred positions of surface ruptures. F_{1-1} : Shuangshi–Dachuan fault, F_{1-2} : Shuangshi–Dachuan branch fault, F_2 : a buried fault, F_3 : Xinkaidian fault. Others are the same as in Figs. 1 and 5. Locations of the transects are marked in Fig. (a), where only aftershocks in depths of 7–11 km are shown, red dashed lines delineate boundaries of aftershocks belts, blue solid lines are positions of transects, and blue dashed lines delineate the range of earthquakes projected on the transect

不同研究机构给出的主震位置均基于较远台站观测确定, 它们在水平位置上(图 6b)的差别可达 10 km, 这表示这些水平位置可能包含了数千米的误差. 理论上讲, 深度误

差一般大于水平位置误差. 例如 ISC 所推荐的主震震源深度为 33 km, 与大部分研究机构给出的结果(12—19 km)相比差距很大. 本文显示的 ISC 结果中的深度直接采用了中国地震台网中心给出的 17 km 的震源深度. 图 6b 显示, 主震震源位置靠近 P_1 与 P_2 余震带相交的位置(图 6a 中紫色爆炸形).

为验证 P_1 和 P_2 余震带在侧向上是否成带分布, 考虑到 P_1 和 P_2 余震带(图 6b)是在小于 12 km 深度上呈带状分布, 并在约 12 km 深度处相交, 我们把 7—11 km 深度范围内的余震绘在图 6a 上. 可以看出, 余震在平面上分成了与图 6b 中 P_1 和 P_2 对应的大致平行的两个带, P_1 余震带上的地震非常密集, 从北部的宝盛乡一直向西南延伸至芦山县以南的始阳—思延断裂上; P_2 余震带在中林乡西部地区形成了一个明显的集中, 但其南部地震较少.

剖面 2—2'(图 6c)位于剖面 1—1'的西南方向, 并与之平行(图 6a). 该剖面中 P_1 余震带的优势分布十分清晰, 是剖面 1—1'的 P_1 余震带向 SW 方向的延伸(图 6a). 剖面 2—2'中, P_{1-1} 余震带在地表的延伸位置位于推测隐伏断裂(F_2)与新开店断裂(F_3)之间, P_{1-2} 余震带延伸至地表的位置与新开店断裂(F_3)位置基本重合. P_2 余震带上的地震较少, 但仍有一定分布.

剖面 A—A'(图 6d)和剖面 B—B'(图 6e)大致平行于区域内 NE 走向的双石—大川分支断裂(图 6a), 并大致沿 P_1 和 P_2 这两个余震带. 图 6d 和图 6e 显示了两个余震带上的余震随深度的分布特征.

4 讨论与结论

虽然余震平面分布(图 5)显示余震主要分布在双石—大川分支断裂之下, 但 1—1'和 2—2'(图 6b, c)两个剖面显示出余震在深部分成了 P_1 和 P_2 两个相互交叉的条带. 前人研究(房立华等, 2013; 苏金蓉等, 2013; 赵博等, 2013)的余震结果中也有这两个条带的大致轮廓, 但均无此处显示得清晰. 测试表明, 本文与前人结果的差别在于本文使用了震中距更小、台站密度更大的台站资料. 本文所获得的结果清楚地显示了这两个余震带, 并且它们分别对应了两条尚未被清楚认识的芦山县盆地内的隐伏断裂和通向双石—大川断裂的南东倾向的未知断裂.

在 12 km 深度以下, P_1 余震带倾角约为 40° — 50° , 倾向 NW; 在 12 km 以上, P_1 余震带(P_{1-1})的倾角增大为 50° — 60° , 倾向不变. 该余震带整体几何形态与芦山地震主震震源机制解所给出的一个节面产状(刘杰等, 2013; 刘瑞丰等, 2013; 谢祖军等, 2013)大致相同. 这说明 P_1 余震带可能是芦山地震的发震断层. 图 6b 中 P_{1-1} 延伸至地表的位置与推测隐伏断裂位置(F_2)基本重合, 图 6c 中 P_{1-1} 延伸至地表的位置位于推测隐伏断裂(F_2)与新开店断裂(F_3)之间, 但仍然位于芦山县所在的盆地一侧, 图 6c 中 P_{1-2} 延伸至地表的位置则大致与新开店断裂基本重合. 12 km 深度以上的余震带对应的断裂位置与赵博等(2013)通过双差定位得到的结果是一致的, 12 km 深度以下的余震带所对应的断裂与苏金蓉等(2013)和房立华等(2013)定位的东部的大邑—名山断裂(本文为新开店断裂)的结果相同. 鉴于发震断裂应与近地表的余震关系更密切, 因此芦山地震的发震断裂(P_1)延伸至地表所对应的位置应该是芦山县所在的盆地内的推测隐伏断裂, 而不是东侧的新开店断裂.

芦山地震后的现场地质调查在龙门乡附近发现了水泥地面挤压拱曲变形, 地表破裂迹象点也呈现出沿 NE—SW 向线性分布的特征(韩竹军等, 2013). 中国地震局发布的芦山地

震烈度图显示,芦山地震的最大烈度区东北自芦山县太平镇、宝盛乡以北,向西南延伸至芦阳镇向阳村(孟令媛等,2014),基本位于芦山县所在的盆地内.这些都从侧面证明了芦山县所在盆地内可能存在一条隐伏断裂,为芦山地震的发震断裂.李传友等(2013)综合震后地质调查、地震数据资料、GPS观测资料等推测该断裂是芦山地震发震断裂最有可能的出露位置.本文结果进一步证明了上述推测.

P_2 余震带与 P_1 余震带在大致12 km深度相交. P_2 余震带倾角 $50^\circ-60^\circ$,倾向SE.该余震带与 P_1 余震带在12 km深度以上的分支带(P_{1-1})倾向相反,倾角大致相同.另外GPS观测结果显示,芦山站(LS05)所在的块体在地震后发生明显的抬升,而双石一大川断裂东侧的灵关站(LS06)所处的块体却出现小幅下降(武艳强等,2013).芦山站所在的块体的上升应该是 P_2 余震带所对应的断裂向上逆冲造成的,而灵关站处的下降则可能说明该处处于 P_2 余震带所对应的逆冲断裂的下盘,这说明 P_2 余震带所对应断裂的活动是逆冲性质. P_2 余震带的几何形态、动力性质与芦山地震主震震源机制的另一个节面产状和活动性质大致相同,这预示着 P_2 余震带所对应的断裂也可能是主震的发震断裂.该余震带延伸至地表的大致位置与双石一大川断裂(F_{1-1})非常接近,但其倾向与NW倾向的双石一大川断裂相反,所以 P_2 余震带并不代表双石一大川断裂在深部的状态,而有可能是一条未知的次级断裂.

主震震源空间位置的不同可能代表了不同的发震机制,但已经公布的主震震源位置误差较大,这里只能对一些可能进行推测.如果主震位置与 P_2 余震带的空间关联性不明显,那么 P_1 应为主震断裂, P_2 则对应主震震源机制解的辅助面.芦山地震发生时, P_1 断裂首先破裂, P_2 断裂可能是主震断裂 P_1 逆冲滑动受阻而反向逆冲造成的(房立华等,2013).

上面提到,芦山主震震源可能靠近 P_1 与 P_2 余震带相交的位置. P_1 和 P_2 这两个余震带的整体几何形态分别与芦山地震主震震源机制解的两个节面产状大体对应.一次地震一般只有一个破裂面,震源机制解中一个节面应该对应这个破裂面;而另一个不是真的破裂面,即为辅助面.由于辅助面不是破裂面,那么余震带不应沿辅助面呈带状分布.本文结果表明,芦山地震余震带有两个,且各自对应一个节面.这说明芦山地震同震破裂过程比较复杂,它是一个不同于一般地震的非常特殊的地震.每个余震带都应是主震开始后破裂的结果,但由于地震破裂并未延伸至地表,破裂过程反演的精度较低,以及主震位置误差较大等因素,我们无法明确判定二者的主次.那么 P_1 和 P_2 余震带所对应的断裂则可能是同时活动的,即芦山地震可能是两条余震带所对应的两条断裂同时活动所产生.

对中国科学技术大学张海江研究组人员、中国科学院青藏高原研究所裴顺平等所有参加和协助野外工作的人员表示感谢.

参 考 文 献

- 陈立春,冉勇康,王虎,李彦宝,马兴全. 2013. 芦山地震与龙门山断裂带南段活动性[J]. 科学通报, **58**(20): 1925-1932.
- Chen L C, Ran Y K, Wang H, Li Y B, Ma X Q. 2013. The Lushan M_s 7.0 earthquake and activity of the southern segment of the Longmenshan fault zone[J]. *Chinese Science Bulletin*, **58**(28/29): 3475-3482.
- 邓超东,陈社发,赵小麟. 1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质, **16**(4): 389-403.
- Deng Q D, Chen S F, Zhao X L. 1994. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan mountains and its adjacent regions[J]. *Seismology and Geology*, **16**(4): 389-403 (in Chinese).

- 董绍鹏, 韩竹军, 尹金辉, 李峰, 安艳芬. 2008. 龙门山山前大邑断裂活动时代与最新构造变形样式初步研究[J]. 地震地质, **30**(4): 996–1003.
- Dong S P, Han Z J, Yin J H, Li F, An Y F. 2008. A preliminary research on the latest tectonic deformation style and the activity age of the Dayi fault in the piedmont of the Longmen mountains[J]. *Seismology and Geology*, **30**(4): 996–1003 (in Chinese).
- 房立华, 吴建平, 王未来, 吕作勇, 王长在, 杨婷, 蔡妍. 2013. 四川芦山 $M_s7.0$ 级地震及其余震序列重定位[J]. 科学通报, **58**(20): 1901–1909.
- Fang L H, Wu J P, Wang W L, Lü Z Y, Wang C Z, Yang T, Cai Y. 2013. Relocation of the mainshock and aftershock sequences of $M_s7.0$ Sichuan Lushan earthquake[J]. *Chinese Science Bulletin*, **58**(28/29): 3451–3459.
- 韩竹军, 任治坤, 王虎, 王明明. 2013. 芦山县龙门乡芦山“4·20” 7.0 级强烈地震地表破裂迹象与讨论[J]. 地震地质, **35**(2): 388–397.
- Han Z J, Ren Z K, Wang H, Wang M M. 2013. The surface rupture signs of the Lushan “4·20” $M_s7.0$ earthquake at Longmen township, Lushan county and its discussion[J]. *Seismology and Geology*, **35**(2): 388–397 (in Chinese).
- 洪海春, 许汉刚, 宋峰, 张熙海, 李国浩. 2013. 2013年芦山 $M_s7.0$ 地震的地震地质灾害和发震断裂探讨[J]. 地震学报, **35**(5): 738–748.
- Hong H C, Xu H G, Song F, Zhang X H, Li G H. 2013. Discussion on seismo-geological hazards induced by 2013 Lushan $M_s7.0$ earthquake and its seismogenic fault[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **35**(5): 738–748 (in Chinese).
- 李传友, 徐锡伟, 甘卫军, 闻学泽, 郑文俊, 魏占玉, 许冲, 谭锡斌, 陈桂华, 梁明剑, 李新男. 2013. 四川省芦山 $M_s7.0$ 地震发震构造分析[J]. 地震地质, **35**(3): 671–683.
- Li C Y, Xu X W, Gan W J, Wen X Z, Zheng W J, Wei Z Y, Xu C, Tan X B, Chen G H, Liang M J, Li X N. 2013. Seismogenic structures associated with the 20 April 2013 $M_s7.0$ Lushan earthquake, Sichuan Province[J]. *Seismology and Geology*, **35**(3): 671–683 (in Chinese).
- 林茂炳, 陈运则. 1996. 龙门山南段双石断裂的特征及地质意义[J]. 成都理工学院学报, **23**(2): 64–68.
- Lin M B, Chen Y Z. 1996. The characteristic and geological significance of the Shuangshi fault at the southern section of Longmen mountains[J]. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, **23**(2): 64–68 (in Chinese).
- 刘杰, 易桂喜, 张致伟, 官致君, 阮祥, 龙锋, 杜方. 2013. 2013年4月20日四川芦山 $M7.0$ 级地震介绍[J]. 地球物理学报, **56**(4): 1404–1407.
- Liu J, Yi G X, Zhang Z W, Guan Z J, Ruan X, Long F, Du F. 2013. Introduction of the Lushan, Sichuan $M7.0$ earthquake on 20 April 2013[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(4): 1404–1407 (in Chinese).
- 刘瑞丰, 陈运泰, 邹立晔, 陈宏峰, 梁建宏, 张立文, 韩雪君, 任泉, 孙丽. 2013. 2013年4月20日四川芦山 $M_w6.7$ ($M_s7.0$) 地震参数的测定[J]. 地震学报, **35**(5): 652–660.
- Liu R F, Chen Y T, Zou L H, Chen H F, Liang J H, Zhang L W, Han X J, Ren X, Sun L. 2013. Determination of parameters for the 20 April 2013 Lushan $M_w6.7$ ($M_s7.0$) earthquake in Sichuan Province[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **35**(5): 652–660 (in Chinese).
- 刘树文, 杨恺, 李秋根, 王宗起, 闫全人. 2009. 新元古代宝兴杂岩的岩石成因及其对扬子西缘构造环境的制约[J]. 地学前缘, **16**(2): 107–118.
- Liu S W, Yang K, Li Q G, Wang Z Q, Yan Q R. 2009. Petrogenesis of the Neoproterozoic Baoxing Complex and its constraint on the tectonic environment in western margin of Yangtze Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, **16**(2): 107–118 (in Chinese).
- 孟令媛, 周龙泉, 刘杰. 2014. 2013四川芦山 $M_s7.0$ 地震近断层强地面运动模拟及烈度分布估计[J]. 地球物理学报, **57**(2): 441–448.
- Meng L Y, Zhou L Q, Liu J. 2014. Estimation of the near-fault strong ground motion and intensity distribution of the 2013 Lushan, Sichuan, $M_s7.0$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(2): 441–448 (in Chinese).
- 苏金蓉, 郑钰, 杨建思, 陈天长, 吴朋. 2013. 2013年4月20日四川芦山 $M7.0$ 级地震与余震精确定位及发震构造初探[J]. 地球物理学报, **56**(8): 2636–2644.
- Su J R, Zheng Y, Yang J S, Chen T C, Wu P. 2013. Accurate locating of the Lushan, Sichuan $M7.0$ earthquake on 20 April 2013 and its aftershocks and analysis of the seismogenic structure[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(8):

- 2636-2644 (in Chinese).
- 孙成民. 2010. 四川地震全记录(下卷)[M]. 成都: 四川人民出版社: 1-435.
- Sun C M. 2010. *Full Record of Historical Earthquakes in Sichuan (Volume II)* [M]. Chengdu: Sichuan People's Press: 1-435 (in Chinese).
- 唐荣昌, 韩渭宾. 1993. 四川活动断裂与地震[M]. 北京: 地震出版社: 1-368.
- Tang R C, Han W B. 1993. *Active Faults and Earthquakes in Sichuan* [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-368 (in Chinese).
- 闻学泽, 张培震, 杜方, 龙锋. 2009. 2008年汶川8.0级地震发生的历史与现今地震活动背景[J]. 地球物理学报, **52**(2): 444-454.
- Wen X Z, Zhang P Z, Du F, Long F. 2009. The background of historical and modern seismic activities of the occurrence of the 2008 M_s 8.0 Wenchuan, Sichuan, earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(2): 444-454 (in Chinese).
- 武艳强, 江在森, 王敏, 车时, 廖华, 李强, 李鹏, 杨永林, 向和平, 邵志刚, 王武星, 魏文薪, 刘晓霞. 2013. GPS监测的芦山7.0级地震前应变积累及同震位移场初步结果[J]. 科学通报, **58**(20): 1910-1916.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Wang M, Che S, Liao H, Li Q, Li P, Yang Y L, Xiang H P, Shao Z G, Wang W X, Wei W X, Liu X X. 2013. Preliminary results of the co-seismic displacement and pre-seismic strain accumulation of the Lushan M_s 7.0 earthquake reflected by the GPS surveying[J]. *Chinese Science Bulletin*, **58**(20): 1910-1916 (in Chinese).
- 谢祖军, 金笔凯, 郑勇, 葛燦, 熊熊, 熊诚, 许厚泽. 2013. 近远震波形反演2013年芦山地震震源参数[J]. 中国科学: 地球科学, **43**(6): 1010-1019.
- Xie Z J, Jin B K, Zheng Y, Ge C, Xiong X, Xiong C, Hsu H T. 2013. Source parameters inversion of the 2013 Lushan earthquake by combining teleseismic waveforms and local seismograms[J]. *Science China: Earth Sciences*, **43**(6): 1010-1019 (in Chinese).
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 秦尊丽, 陈桂华, 朱艾斓. 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型[J]. 地震地质, **27**(3): 446-461.
- Xu X W, Zhang P Z, Wen X Z, Qin Z L, Chen G H, Zhu A L. 2005. Features of active tectonics and recurrence behaviors of strong earthquakes in the western Sichuan Province and its adjacent regions[J]. *Seismology and Geology*, **27**(3): 446-461 (in Chinese).
- 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军, 陈桂华, 李传友, 郑文俊, 张世民, 任治坤, 许冲, 谭锡斌, 魏占玉, 王明明, 任俊杰, 何仲, 梁明剑. 2013. 四川芦山7.0级强震: 一次典型的盲逆断层型地震[J]. 科学通报, **58**(20): 1887-1893.
- Xu X W, Wen X Z, Han Z J, Chen G H, Li C Y, Zheng W J, Zhang S M, Ren Z K, Xu C, Tan X B, Wei Z Y, Wang M M, Ren J J, He Z, Liang M J. 2013. Lushan M_s 7.0 earthquake: A blind reserve-fault event[J]. *Chinese Science Bulletin*, **58**(28/29): 3437-3443.
- 许志琴, 侯立炜, 王忠秀. 1992. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社: 1-60.
- Xu Z Q, Hou L W, Wang Z X. 1992. *Orogenic Processes of the Songpan-Garze Orogenic Belt of China* [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-60 (in Chinese).
- 许志琴, 李化启, 侯立炜, 付小芳, 陈文, 曾令森, 蔡志慧, 陈方远. 2007. 青藏高原东缘龙门山—锦屏山带的崛起: 大型拆离断层和挤出机制[J]. 地质通报, **26**(10): 1262-1276.
- Xu Z Q, Li H Q, Hou L W, Fu X F, Chen W, Zeng L S, Cai Z H, Chen F Y. 2007. Uplift of the Longmen-Jinping orogenic belt along the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau: Large-scale detachment faulting and extrusion mechanism[J]. *Geological Bulletin of China*, **26**(10): 1262-1276 (in Chinese).
- 杨晓平, 李安, 刘保全, 鄯少英, 陈献程, 石金虎, 寇昆朋, 郭新景. 2009. 成都平原内汶川 M_s 8.0级地震的地表变形[J]. 地球物理学报, **52**(10): 2527-2537.
- Yang X P, Li A, Liu B J, Feng S Y, Chen X C, Shi J H, Kou K P, Guo X J. 2009. Surface deformation in the Chengdu Plain area produced by the Wenchuan M_s 8.0 earthquake of 12 May 2008, Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(10): 2527-2537 (in Chinese).
- 张岳桥, 董树文, 侯春堂, 石菊松, 吴中海, 李海龙, 孙萍, 刘刚, 李建. 2013. 四川芦山2013年 M_s 7.0地震发震构造初步研究[J]. 地质学报, **87**(6): 747-758.
- Zhang Y Q, Dong S W, Hou C T, Shi J S, Wu Z H, Li H L, Sun P, Liu G, Li J. 2013. Preliminary study on the seis-

- motectonics of the 2013 Lushan $M_s7.0$ earthquake, west Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, **87**(6): 747–758 (in Chinese).
- 赵博, 高原, 黄志斌, 赵旭, 李大虎. 2013. 四川芦山 $M_s7.0$ 地震余震序列双差定位、震源机制及应力场反演[J]. 地球物理学报, **56**(10): 3385–3395.
- Zhao B, Gao Y, Huang Z B, Zhao X, Li D H. 2013. Double difference relocation, focal mechanism and stress inversion of Lushan $M_s7.0$ earthquake sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(10): 3385–3395 (in Chinese).
- 赵珠, 范军, 郑斯华, 长谷川昭, 堀内茂木. 1997. 龙门山断裂带地壳速度结构和震源位置的精确修定[J]. 地震学报, **19**(6): 615–622.
- Zhao Z, Fan J, Zheng S H, Hasegawa A, Horiuchi S. 1997. Crustal structure and accurate hypocenter determination along the Longmenshan fault zone[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **10**(6): 761–768.
- 中国地震局监测预报司. 2009. 汶川 8.0 级地震科学研究报告[M]. 北京: 地质出版社: 1–216.
- Department of Earthquake Monitoring and Prediction, China Earthquake Administration. 2009. *Report of Scientific Research for Wenchuan 8.0 Earthquake*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1–216 (in Chinese).
- 中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录[M]. 北京: 中国科学技术出版社: 1–637.
- Department of Earthquake Disaster Prevention, China Earthquake Administration. 1999. *The Catalogue of Chinese Modern Earthquake*[M]. Beijing: China Science and Technology Press: 1–637 (in Chinese).
- 中国地震台网中心. 2013. 中国地震台网统一地震目录[EB/OL]. [2015-01-02]. <http://data.earthquake.cn/data/>.
- China Earthquake Networks Center. 2013. China-earthquake networks uniform earthquake catalogue[EB/OL]. [2015-01-02]. <http://data.earthquake.cn/data/>.
- An M J, Feng M, Dong S W, Long C X, Zhao Y, Yang N, Zhao W J, Zhang J Z. 2009. Seismogenic structure around the epicenter of the May 12, 2008 Wenchuan earthquake from micro-seismic tomography[J]. *Acta Geologica Sinica*, **83**(4): 724–732.
- An M J, Feng M, Long C X. 2010. Deep ruptures around the hypocenter of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake deduced from aftershock observations[J]. *Tectonophysics*, **491**(1/2/3/4): 96–104.
- 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): 1–17.
- Dziewonski A M, Chou T A, Woodhouse J H. 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity[J]. *J Geophys Res*, **86**(B4): 2825–2852.
- Ekström G, Nettles M, Dziewonski A M. 2012. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13 017 earthquakes[J]. *Physics Earth Planet Inter*, **200–201**: 1–9.
- Geiger L. 1912. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only[J]. *Bull Louis Univ*, **8**(1): 56–71.
- International Seismological Centre. 2013. International seismological centre on-line bulletin[EB/OL]. [2015-01-02]. <http://www.isc.ac.uk/>.
- Klein K W. 1978. *Hypocenter Location Program HYPOINVERSE*[CP]. U S Geological Survey Open File Report: 78–694.
- Lahr J C. 1979. *HYPOELLIPSE; A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude, and First Motion Pattern*[CP]. U S Geological Survey Open File Report 79–431: 310.
- Lee W H K, Lahr J C. 1975. *HYPO71 (Revised); A Computer Program for Determining Hypocenter Magnitude, and First Motion Pattern of Local Earthquakes*[CP]. U S Geological Survey Open File Report: 75–311.
- Sun Y, An M J, Feng M, Long C X, Yang Z Y. 2014. Seismogenic tectonics and dynamics of the 2011 $M_s5.9$ Yingjiang earthquake in Yunnan, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, **88**(2): 468–482.
- U S Geological Survey. 2013. Search earthquake archives[EB/OL]. [2015-01-02]. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>.
- Wang C Y, Han W B, Wu J P, Lou H, Chan W W. 2007. Crustal structure beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. *J Geophys Res*, **112**: B07307.
- Wen X Z, Ma S L, He Y N. 2008. Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan–Yunnan faulted-block, southwestern China[J]. *Physics Earth Planet Inter*, **168**(1/2): 16–36.