

陈运泰, 杨智娴, 张勇, 刘超. 2013. 浅谈芦山地震. 地震学报, 35(3): 285–295.

Chen Yun-Tai, Yang Zhixian, Zhang Yong, Liu Chao. 2013. A brief talk on the 20 April 2013 Lushan $M_w6.7$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 35(3): 285–295.

浅谈芦山地震^{*}

陈运泰^{*} 杨智娴 张 勇 刘 超

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 地震序列是对地震现象的回顾性描述, 只有在地震序列结束后它才有可能被确切无疑地判定. 鉴于龙门山断裂带或地震带的整体性、统一性和系统性, 不可否认在其西南段发生的芦山地震是与汶川地震一样的同属于龙门山断裂带的事件. 鉴于芦山地震的震源位置、震源机制、震级大小和破裂区覆盖的范围, 目前可认为它是汶川地震迄今最大的余震. 鉴于地震序列的判定是对地震现象的唯象的描述, 有相当的任意性, 对芦山地震究竟是“新的主震”还是“汶川余震”的“讨论”实质上是在根据经验判定地震的类型, 即使目前看“主震说”提出的 4 条“论据”明显缺乏说服力, “余震说”比较有说服力, 但最后都需要等到地震序列结束之后才有可能“定论”. 作者认为, 相对于需要等到地震序列结束之后才能“定论”、甚而在地震序列结束之后未必能“定论”的芦山地震究竟是“新的主震”还是“汶川余震”问题, 应当更为关注芦山地震的发生引出的一些重要的亟待研究的科学问题与防震减灾问题.

关键词 芦山地震 汶川地震 地震破裂过程 地震成丛 地震序列

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.03.001 中图分类号: P315.3⁺3 文献标志码: A

A brief talk on the 20 April 2013 Lushan $M_w6.7$ earthquake

Chen Yun-Tai^{*} Yang Zhixian Zhang Yong Liu Chao

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

Abstract: An earthquake sequence is a retrospective designation of earthquake phenomena, and it can only be identified without doubt after the earthquake sequence has been completed. In view of the integrity, uniformity and systematicness of the Longmenshan fault zone or seismic belt, there is no denying the fact that the 20 April 2013 $M_w6.7$ Lushan earthquake which occurred in the southwestern segment of the Longmenshan fault is an event of the Longmenshan fault zone as the 12 May 2008 $M_w7.9$ Wenchuan earthquake. Taking into account the hypocentral location, focal mechanism, magnitude and ruptured area of the Lushan earthquake, it is preferable that the Lushan earthquake is the largest aftershock up to the present, of the 2008 $M_w7.9$ Wenchuan mainshock. Due to the fact that the identification of an earthquake sequence is phenomenological description with arbitrariness to some extent, whether the Lushan earthquake is

^{*} 基金项目 国家自然科学基金项目(41090291)资助.

收稿日期 2013-05-24 收到初稿, 2013-05-28 决定采用修改稿.

^{*} 通讯作者 e-mail: chenyt@cea-igp.ac.cn

a new mainshock or one of the aftershocks of the 2008 Wenchuan earthquake is based on empirical knowledge and remains unsolved till the whole earthquake sequence has been completed, even though at present the arguments of the “one of the aftershocks of the Wenchuan earthquake” are convincing. It is emphasized that prompt solution should be given to some outstanding scientific issues related to the Lushan earthquake as well as prevention and mitigation of earthquake disasters.

Key words: Lushan earthquake; Wenchuan earthquake; earthquake rupture process; earthquake cluster; earthquake sequence

引言

2013 年 4 月 20 日四川省雅安市芦山县境内发生的 $M_w 6.7$ ($M_s 7.0$) 地震(发震时刻: 北京时间上午 8 时 2 分 46 秒; 震中位置: 30.3°N , 103.0°E ; 震源深度: 13.0 km)是继 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_w 7.9$ ($M_s 8.0$) 地震之后在龙门山断裂带上发生的又一次灾害性地震事件。据报道, “从芦山地震发生的那一刻起, 各种媒体上有关地震成因的推测、分析、判断甚至争议就非常热烈。”“对于芦山地震是否为一个新的‘主震’还是汶川大地震的余震, ‘争议’尤为突出。”(李娜, 2013)。

尽管媒体报道说争议非常热烈, 不过作者并未能恭逢其盛, 迄今也尚未参加过任何有关芦山地震是否为一个新的“主震”还是汶川大地震余震的“非常热烈”的研讨会或辩论会, 所知情况也仅来自新闻报道(例如, 李娜, 2013)和若干篇新出版的有关芦山地震的论文(刘杰等, 2013; 王为民等, 2013; 杜方等, 2013), 其中涉及上述问题的则更少, 且均寥寥数语(刘杰等, 2013; 杜方等, 2013)。鉴于芦山地震发生才一个月, 作者还未来得及对这次地震做深入研究, 目前仅就这个“热点问题”谈一些很浅显的认识。

1 芦山地震: “新的主震”还是“汶川地震的余震”?

据报道, 主张芦山地震是一个新的“主震”的“论据”是(李娜, 2013):

“第一, 芦山地震震中距离汶川 85 km, 并不在汶川地震产生的同震破裂延展的同一区域内。”“汶川地震对芦山 $M_s 7.0$ 级地震的发生具有触发作用, 两地震密切相关。2013 年 4 月 20 日芦山 $M_s 7.0$ 级地震发生在龙门山断裂带南段, 距 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 级主震约 87 km, 两个余震区之间存在明显的空段, 间隔大致 45 km, 因此, 这次芦山 $M_s 7.0$ 级地震不是 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 级地震的余震(刘杰等, 2013)。”“汶川地震芦山地震两次地震都发生在龙门山断裂带, 但长达 470 km 的龙门山断裂带包括 4 条几乎平行的断裂, 汶川地震发生在第 2 条断裂并向北东方向延伸, 芦山地震发生在第 3 条断裂往西南方向延伸, 从地源(原文如此)位置和走向来看是两次独立地震。”

“第二, 地震学理论中有一个大森(Omori)定律可以用来检验余震, 这个公式表明一次地震触发的系列余震其能量是逐渐衰减的, 汶川地震之前(原文如此)的数千次余震都不及芦山地震的震级高, 因此 5 年后爆发强余震的可能性不大。”

“第三, 2008 年汶川地震发生时, 震源区附近介质破裂主要向北东方向延伸, 而没有向西南方面延伸, 这说明在汶川与西南方向可能有一个阻隔(或断层闭锁), 使得介质破裂

无法向西南方向延伸, 龙门山断裂带是一个不均匀体, 不同部位可能会积蓄不同的应力, 所以很有可能是两次独立的地震。”

“第四, 芦山地震有自己的系列余震, 而且据地震前方发回的报道, 自芦山地震爆发后, 大大小小的余震已经发生了千余次。”

与参与“讨论”的大多数专家见解可能不同, 作者并不提倡地震刚发生即急于对此做出判断, 理由如下。

芦山地震性质的界定离不开对龙门山断裂带或龙门山地震带这一重要的断裂带、地震带的整体性、统一性和系统性的认识这个前提。地质学家、地震学家对这一条重要的断裂带(地震带)的深入研究可能会导致对此断裂带(地震带)作进一步的细划或分段等等, 但是, 目前似乎还没有见到否认此断裂带或地震带的整体性、统一性和系统性的论断。

对于上述第一个“论据”, “芦山地震震中距离汶川 85 km, 并不在汶川地震产生的同震破裂延展的同一区域内”, “两个余震区之间存在明显的空段, 间隔大致 45 km, 因此, 这次芦山 $M_s 7.0$ 级地震不是 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 级地震的余震(刘杰等, 2013)”, 以及“芦山地震与汶川地震震中位置相距 90 km, 两次地震的余震密集区相距 50 km, 汶川地震造成龙门山断裂中北段较充分破裂, 芦山地震则展布于龙门山断裂南段且破裂尺度有限, 两者有发震构造上的联系, 但是两次相对独立的地震事件(杜方等, 2013)”, 作者认为不妨考量下述情况。

“地震震源”(earthquake source 或 seismic source)通常有两个涵义。一是指地震破裂的起始点(initiation point, nucleation point)即“震源”(focus, hypocenter), 公众被告知的“震中”(epicenter)即“震源”在地面的投影。“地震震源”的另一个涵义是“地震断面”(earthquake fault plane), “地震破裂面”(earthquake rupture plane)。无论是将地震视为几何上一个点的“震源”, 还是将它视为几何上一个面(“断面”)的“震源”, 都是对复杂的地震破裂高度简化的“模型”。已知许多地震可以近似地用平面断层来表示, 涉及或主要涉及某一断层。汶川大地震比较复杂, 主要涉及龙门山断裂带由西向东数的第 2 条断层, 即中央断裂(映秀—北川断裂), 但还涉及第 3 条断层即山前断裂(安县—灌县断裂, 亦称彭县—灌县断裂, 江油—灌县断裂), 在这两条断层上及其附近区域, 发生了大量余震(张勇等, 2008)。然而, 并非所有余震都发生在主震的破裂面上或其附近(陈运泰等, 2013)。在图 1 所示的 6 个震级较大($M_s \geq 6.0$)的汶川地震的余震(图 1 中的红色实心圆)中也只有两个是在汶川地震的破裂面上(符合第一个“论据”“同震破裂延展的同一区域内”的说法), 但是有两个在远离断层面的上盘(不符合第一个“论据”“同震破裂延展的同一区域内”的说法)。是否发生在主震的破裂面上或其附近, 并非是成为“余震”的必要条件。除了汶川地震本身的例子外, 国内国际广为知晓的例子还有一些, 并非孤证。

1) 1972 年 7 月 30 日阿拉斯加锡特卡(Sitka) $M_w 7.6$ 地震与 1976 年 2 月 4 日危地马拉(Guatemala) $M_w 7.6$ 地震。图 2 表示大地震的破裂区与矩释放的集中区(Scholz, 1990)。图中星号表示大地震的震中, 闭合区域表示大地震的破裂区, 阴影区表示矩释放集中的区域。图的右下角表示 1972 年 7 月 30 日锡特卡 $M_w 7.6$ 地震和 1976 年 2 月 4 日危地马拉 $M_w 7.6$ 地震各有一个矩释放集中区与主震震中分别相距 70 km 和 100 km, 且都有长约 70 km 的“空段”、“间隔”。

2) 1970 年 1 月 5 日云南省通海 $M_s 7.7$ 地震及位于其 NNE 方向上的最大余震 1970 年

2月5日 $M_S 5.7$ 地震(图3). 通海 $M_S 7.7$ 主震的 $M_S 5.7$ 余震不但与主震相距约 50 km, 而且两者的余震区还有长约 30 km 的“空段”或“间隔”(陈立德, 1988).

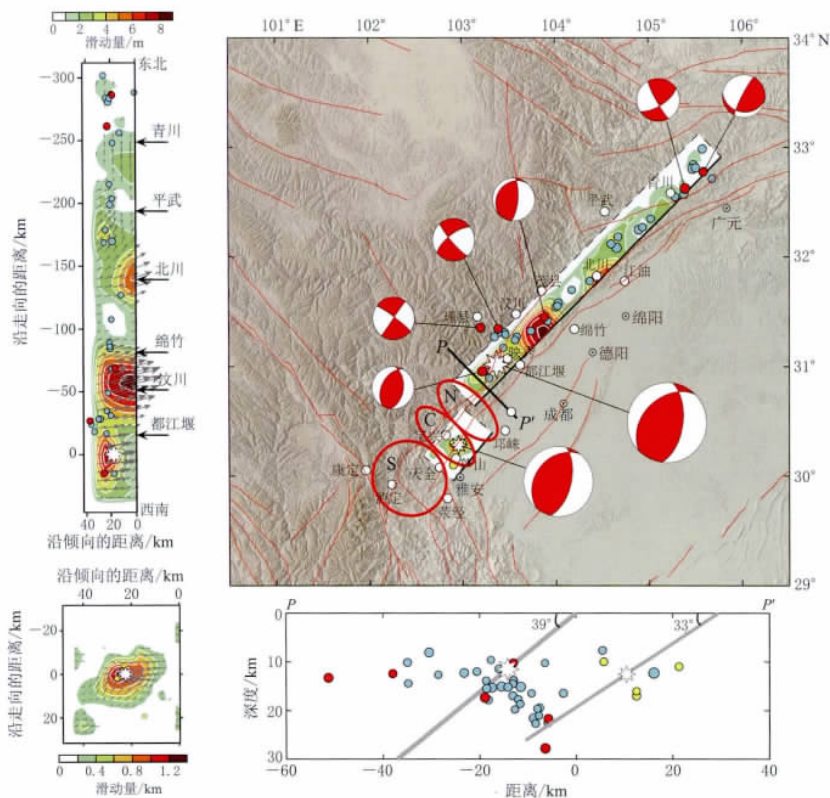


图1 汶川地震及其较大余震($M_S \geq 5.0$)的空间分布、震源机制与滑动量分布图(引自陈运泰等, 2013)

大、小白色星号分别表示汶川 $M_W 7.9$ ($M_S 8.0$) 地震、芦山 $M_W 6.7$ ($M_S 7.0$) 地震, 实心圆表示汶川地震余震, 小实心圆表示 $5.0 \leq M_S < 6.0$ 地震, 大实心圆表示 $M_S \geq 6.0$ 地震, 红色实心圆表示在图中给出表示其震源机制解的“海滩球”(震源球下半球投影)的汶川地震的较大余震, 青色实心圆表示其它较大余震, 黄色实心圆表示芦山地震的余震. 汶川地震与芦山地震在其断层面上的滑动量分布表示于图的左侧, 与其相应的色标分别表示于图左侧最上方与最下方, 滑动量分布在地面的投影图表示于主图上. 龙门山断裂带西南段的北段(N段)、中段(C段)与南段(S段)以红色空心圈圈出. 详细解释参见正文

Fig. 1 Spatial distribution, focal mechanism and slip distribution, of the 2008 Wenchuan earthquake and its larger aftershocks of $M_S \geq 5.0$ (from Chen *et al.*, 2013)

Large and moderate white stars represent the 2008 Wenchuan $M_W 7.9$ ($M_S 8.0$) and 2013 Lushan $M_W 6.7$ ($M_S 7.0$) earthquake, respectively. Circles represent the aftershocks of the 2008 Wenchuan earthquake, small and large circles represent the earthquakes of $5.0 \leq M_S < 6.0$ and $M_S \geq 6.0$, respectively. Red solid circles represent larger earthquakes with beach-ball representation (lower hemisphere projection) of the fault plane solution, cyan solid circles represent other major aftershocks, and yellow solid circles represent the aftershocks of the Lushan earthquake. The static (final) slip distribution on the fault plane of the 2008 Wenchuan and the 2013 Lushan earthquakes are shown in the left panel with different colour scales as indicated in the top and bottom of the panel, respectively. The projection on the ground surface, of the slip distribution on the fault plane is shown on the main panel of the figure. The northern, central and southern segments of the southwestern segment of the Longmenshan fault zone are depicted by red open circles with N, C, and S, respectively. For details see text

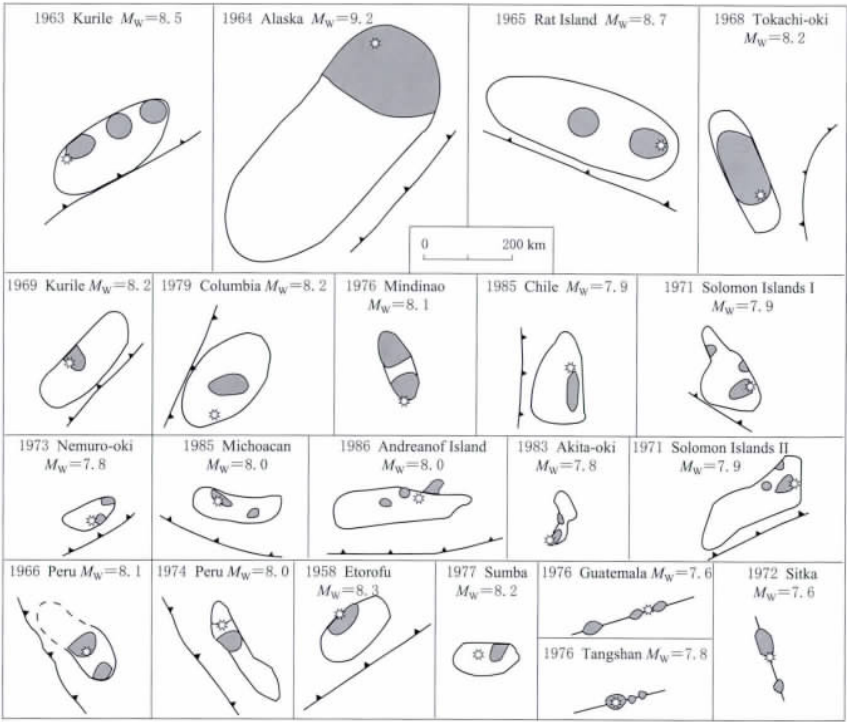


图 2 一些大地震的破裂区与矩释放的集中区(引自 Scholz, 1990)
星号表示大地震的震中, 闭合区域表示大地震的破裂区, 阴影区表示矩释放
的集中区, 锯齿线表示海沟, 锯齿位于上覆板块一侧

Fig.2 Rupture zones and zones of concentrated moment release
for a selection of large earthquakes (from Scholz, 1990)
Star represents epicenter of a large earthquake. Enclosed and shaded areas represent
rupture zone and zone of concentrated moment release, respectively. Sawtoothed
curve represents trench with sawteeth on the overriding plate side

3) 1976 年 7 月 28 日唐山 $M_s7.8$ 地震及其最大余震 1976 年 7 月 28 日滦县 $M_s7.1$ 地震. 滦县 $M_s7.1$ 地震发生于 7 月 28 日 18 时 45 分(北京时间), 位于唐山 $M_s7.8$ 主震震中 ENE 约 60 km(图 4). 唐山 $M_s7.8$ 主震的破裂区(后来被称为“中区”)呈北东—南西向展布, 但其最大余震滦县 $M_s7.1$ 地震则发生在呈北西—南东向展布的这一最大余震所在地区“东区”, 并不在唐山主震“同震破裂延展的同一区域内”(图 4).

4) 2004 年 12 月 26 日苏门答腊—安达曼(Sumatra—Andaman) $M_w9.2$ 地震(红色三角形)及其最大余震 2005 年 3 月 28 日尼亚斯(Nias) $M_w8.7$ 地震又是一个例子. 图 5 表示从 2004 年 12 月 26 日苏门答腊—安达曼 $M_w9.2$ 地震(红色三角形)开始并持续到 2011 年初的沿印度尼西亚俯冲带的地震序列(Jordan *et al.*, 2011). 作为余震的 $M_w8.7$ 地震发生在 $M_w9.2$ 主震以南约 200 km, 不但震中相距 200 km, 而且其余震区与主震的余震区也不重合(只不过是邻接). 余震震中是否靠近主震震中, 余震是否发生在主震的破裂面上或其附近, 都并非是成为“余震”的必要条件(Parsons, 2002).

关于第二个“论据”, 我们知道, 大森(Fusakichi Omori, 大森房吉, 1868—1923)定律或其改进形式大森-宇津(Tokuji Utsu, 宇津德治, 1928—2004)定律 (Omori, 1894; Utsu,

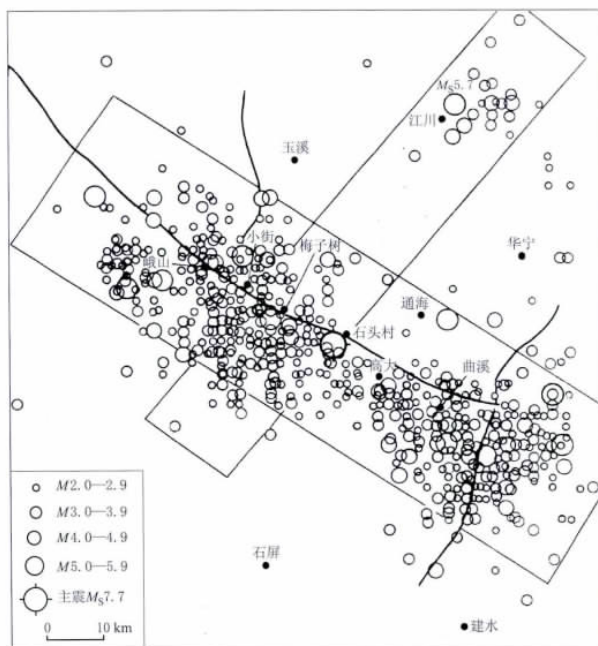


图3 1970年1月5日云南省通海 $M_s7.7$ 地震及其最大余震 1970年2月5日 $M_s5.7$ 地震(引自陈立德, 1988)

$M_s5.7$ 余震位于主震 NNE 方向上, 距主震约 50 km, 与 ESE 向的余震区有约 30 km 长的“空段”

Fig. 3 The 5 January 1970 Tonghai, Yunnan, $M_s7.7$ earthquake and its largest aftershock, the 5 February 1970, $M_s5.7$ earthquake (from Chen, 1988)

The $M_s5.7$ aftershock is located at about 50 km to the NNE direction of the mainshock, with a “gap” of about 30 km in length between the ESE striking aftershock area and the $M_s5.7$ aftershock

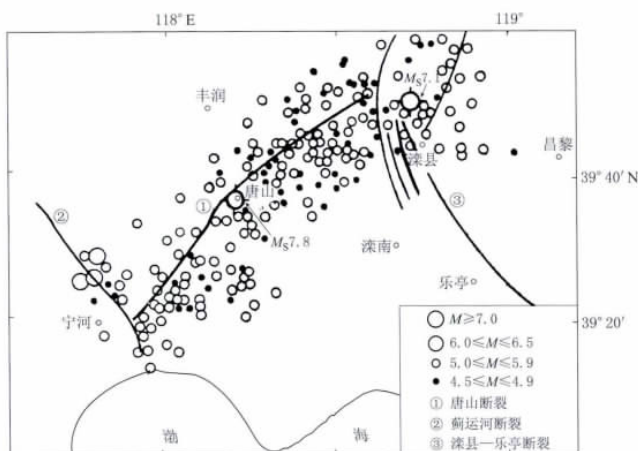


图4 1976年7月28日唐山 $M_s7.8$ 地震及其最大余震 1976年7月28日滦县 $M_s7.1$ 地震(引自朱传镇, 1985)

滦县 $M_s7.1$ 余震震中位于唐山 $M_s7.8$ 主震震中 ENE 约 60 km

Fig. 4 The 28 July 1976 Tangshan $M_s7.8$ earthquake and its largest aftershock, the 28 July 1976 Luanxian $M_s7.1$ earthquake (from Zhu, 1985)

The $M_s7.1$ Luanxian aftershock is located at about 60 km to the ENE of the $M_s7.8$ mainshock

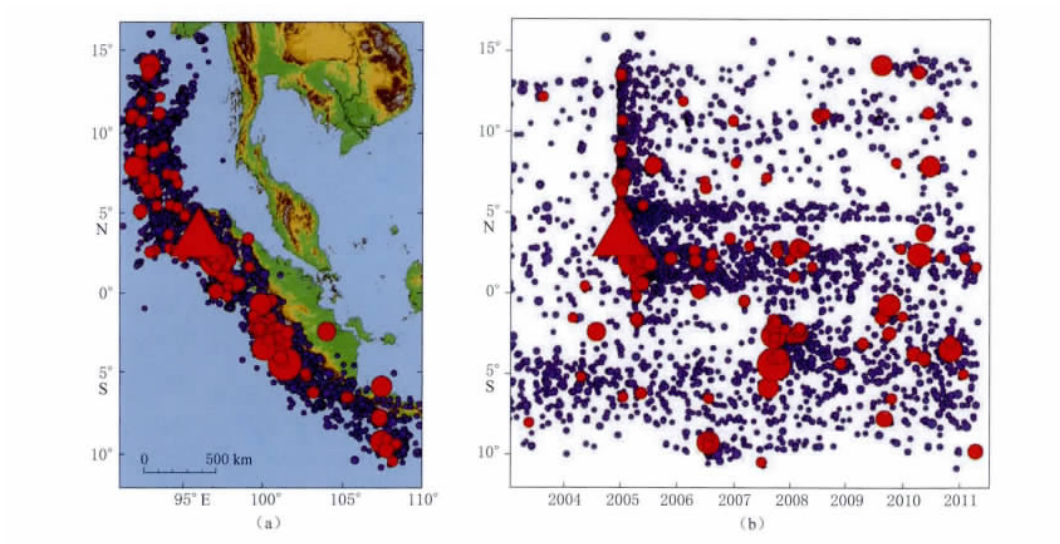


图 5 从 2004 年 12 月 26 日苏门答腊—安达曼 $M_w9.2$ 地震开始并持续到 2011 年初的沿印度尼西亚俯冲带的地震序列(引自 Jordan *et al.*, 2011)

(a) $M_w9.2$ 地震序列的震中分布; (b) $M_w9.2$ 地震序列的时-空分布

红色三角形表示 $M_w9.2$ 主震, 红色实心圆表示 $M_w\geq7$ 余震, 包括 2005 年 3 月 28 日尼亚斯 $M_w8.7$ 地震; 蓝色实心圆表示较小的地震。右侧的时-空分布图展示了地震触发的随机过程, 特别是显示了大的余震是怎样产生它们自身的余震序列的

Fig. 5 Earthquake sequence along the Indonesian subduction zone, beginning with the 26 December 2004 Sumatra-Andaman $M_w9.2$ earthquake and continuing through early 2011 (from Jordan *et al.*, 2011)

(a) Epicentral distribution of the $M_w9.2$ earthquake sequence; (b) Spatial-temporal distribution of the $M_w9.2$ earthquake sequence. Red triangle represents $M_w9.2$ mainshock. Red solid circles represent $M_w\geq7$ aftershocks, including the 2005 Nias $M_w8.7$ earthquake. Blue solid circles represent smaller earthquakes. The spatial-temporal distribution of the $M_w9.2$ earthquake sequence illustrates the stochastic process of earthquake triggering, especially how large aftershocks generate their own aftershock sequences

1961, 2002; Utsu *et al.*, 1995)是一个经验公式, 用于描述余震的频度随时间衰减的总趋势。但是余震的频度随时间衰减是有起伏地衰减的, 而不是单调地衰减的, 并且可以延续数年甚而数十年(Liu, Stein, 2011)。由于与主震无关的背景地震活动以及大余震的余震序列都会叠加在主震的地震序列上, 所以的确会给正确判别余震序列是否“结束”带来困难, 给“争论”留下了很大的空间。就像 1966 年邢台地震、1976 年唐山地震那样, 虽然分别是 1966 年、1976 年发生的, 但迄今余震区仍不时有小地震发生, 不断引发“余震”、“背景地震”之争。一年前, 即 2012 年 5 月 28 日 10 时 22 分在河北唐山、滦县交界处发生了 $M_L4.8$ 地震(震中位置: 39.7°N , 118.5°E ; 震源深度: 8.0 km), 就是一个例子。

“主震说”的第三个“论据”无异于已将芦山地震解释为汶川地震的余震。事实上, 作者由地震破裂过程反演得到的结果与其它类似工作结果有所不同。其中一个不同是, 作者根据反演结果指出: 2008 年汶川地震的破裂是“不对称双侧破裂”而不是简单的“单侧破裂”(陈运泰等, 2008; 张勇等, 2008)。由图 1 可以看出, 汶川地震并非没有向西南方向的破裂, 而是向西南方向的破裂扩展相当“艰难”, 只扩展了大约 40 km 便遇到了“障碍”(图 1

主图与左侧断层面的滑动量分布图), 嘎然停止. 因此才显现出总体上、表观上是“纯”向东北方向单侧破裂的样子, 实际上是破裂既向东北方向又向西南方向扩展、但以向东北方向扩展为主的“不对称双侧破裂”. 如图 1 所示, 由反演得到的在主震西南的破裂区以及在主震震中西南的余震区虽然都不大, 但都反映出破裂向西南方向扩展并在距主震震中大约 40 km 处遇到了障碍. 按照近代地震学对余震的科学解释, 所谓余震就是主震破裂过程中遇到了一时不能克服的“阻隔”即“障碍体”, “障碍体”的延时破裂就是余震 (Das, Aki, 1977; Das, Scholz, 1981).

“主震说”的第四个“论据”以芦山地震发生后接着发生了许多余震为由, 认为芦山地震是一次新的“主震”. 其实, 大的余震常常“自成一统”, 大的余震常常还有自己的余震, 是地震学中早已确立的事实, 在地震学中称为“二级余震” (second-order aftershock) (Richter, 1958; 傅承义, 1963). 还是以 2004 年 12 月 26 日苏门答腊—安达曼 $M_w 9.2$ 地震及其最大余震 2005 年 3 月 28 日尼亚斯 $M_w 8.7$ 地震为例 (图 5). 在图 5 中, 红色实心圆表示 $M_w \geq 7$ 地震; 蓝色实心圆表示较小的地震. 图 5b 所表示的地震时-空分布图不但展示了 $M_w 9.2$ 主震 (红色三角形) 如何触发包括 $M_w 8.7$ 特大余震在内的大余震 (红色实心圆) 的, 还清楚地展示了 $M_w 8.7$ 特大余震以及其它大余震是怎样产生它们自身的余震 (蓝色实心圆) 序列的 (据 Jordan *et al.*, 2011).

至于“芦山地震有自己的系列余震”, 按照地震发生的规律, 这是非常正常的, 也是常见的. 在傅承义先生 1963 年 10 月为中国科学技术大学地球物理系编写的《地壳物理讲义》中特别写道 (傅承义, 1963, 29 页):

“一般大地震 ($M=8$) 其余震震级有时亦可达 $M=7$. 对于这样的余震, 它本身有时又会出现一系列震级下降很快的所谓二级余震, 李希特 (今译为里克特, Charles Francis Richter, 1900—1985, 最先提出“里氏震级”的著名地震学家——引者注) 曾仔细研究了 1952 年加利福尼亚 Kern County (克恩郡) 地震, 并区分出这类二级余震, 二级余震的存在说明较大的余震多少有其相对的独立性.”

整段文字包括震级 (其时“矩震级 M_w ”尚未问世) 大小好像是预先专为汶川地震 ($M_s=8.0$) 和芦山地震 ($M_s=7.0$) 的“讨论”、“争论”或“辩论”写的, 既明确指出具有“一系列震级下降很快”的所谓二级余震的强余震是大震的余震, 又不失周到地指出“较大的余震多少具有其相对的独立性”, 也即看似“新的主震”, 只不过“独立性”再大也还是余震.

2 地震的时空成丛性——地震序列

地震在时间上和空间中都有集中发生的倾向, 地震学家称之为地震在时间上和空间中的“成丛性”, 即“地震序列”. 一个地震序列结束后, 地震序列中比其它地震大得多的最大地震称为“主震”. 一旦一个地震序列中的主震被确定, 那么那些在主震之前而且主震震源附近发生的地震就称为“前震”, 而那些发生在主震之后的地震则称为“余震”. 如果地震序列中没有突出的主震, 那么该序列便称为“震群” (Jordan *et al.*, 2011).

虽然理论上, 余震一般指的是在某时-空窗内发生于主震后的小地震, 但实际上, 时-空窗的界定多少有些任意性. 例如, 在空间方面, 余震通常定义为主震后发生于主震破裂面及其附近的小地震, 但在许多情形中, 如图 2 所示, 余震区常比主震破裂区大得多 (特别是在消减带中); 更有余震不发生在主震破裂面甚而远离主震破裂面的情形. 这里, 还不包

括所谓的“广义余震”的情形。在时间方面,余震常被定义为主震之后高于背景地震活动水平的小地震,但是如何界定背景地震活动性又有相当的任意性(Jordan *et al.*, 2011; Liu, Stein, 2011)。

前震、主震、余震、双震和震群等等都是对地震现象的唯象的、“回顾性”的、具有相当任意性的描述,它们只在地震序列完成之后才可能被确切无疑地识别出。通俗地说,是“马后炮”。但是,前震、主震、余震、双震和震群等等都是地震,而且是“地地道道的地震”倒是确切无疑的!迄今地震学家还没有研究出一种令人信服的方法能在物理基础上将上述序列中的单个地震从与主震无关的背景地震活动中确切无疑地识别出。背景地震活动会叠加在地震序列上,给试图从时间-空间中划定前震或余震序列的过程带来明显的不确定性(Jordan *et al.*, 2011)。因此,在一个地震序列结束后判断一个地震是否是余震最主要的依据还是它们和主震在构造上的联系(Richter, 1958)。

从现在已有的证据看,鉴于龙门山断裂带或地震带的整体性、统一性和系统性,不可否认其西南段发生的芦山地震是与汶川地震一样同属于龙门山断裂带(地震带)的事件;鉴于芦山地震的震源位置、震源机制、震级大小和破裂区覆盖的范围(张勇等, 2013),目前可认为它是汶川地震迄今最大的余震。但是芦山地震的大小($M_w 6.7$)与龙门山断裂带西南段(图 1 中的 N+C+S 段)潜在的地震危险性的规模并不相称(陈运泰等, 2013),它的发生并没有显著地缓解龙门山断裂带西南段的地震危险性,该地段整体上仍存在发生 $M_w 7.2-7.3$ 地震的潜在危险性;特别是,其北段(图 1 中的 N 段)即邛崃大邑西—宝兴北—汶川南一带存在发生 $M_w 6.8$ 地震的潜在危险性;其南段(图 1 中的 S 段)即天全—荣经—泸定—康定一带存在发生 $M_w 7.2$ 地震的潜在危险性。考虑到上述情况,不能排除待到整个地震序列结束前,会发生若干个 $M_w 7.0$ 左右、最大可达 $M_w 7.3$ 左右地震的可能性。按照对地震序列的一种分类方法(例如,张国民等, 2001),主震与次大地震的震级差如果小于 0.6,才可称其为双震;如果主震与次大地震的震级差大于等于 0.6,那么该次大地震仍然得称为最大余震。果真如此,届时倾向于这一分类法的人们将会因次大地震为 $M_w 7.3$ (与主震正好相差 0.6 级而不是小于 0.6 级)继续坚持“汶川余震说”。若是按照对地震序列的另一种分类方法(例如,吴开统等, 1990; 刘祖荫等, 2002),主震与次大地震的震级差小于 0.7 即可称它们为双震。届时倾向于这一分类法的人们将会将其归类于像 1976 年龙陵-潞西地震、1988 年澜沧-耿马地震那样的“双震型地震”,甚而像 1966 年邢台地震那样的“强震群型地震”,等等。基于上述理由,作者并非如媒体所报道的或“被划分”的“旗帜鲜明”的主张“汶川余震说”者,但是毋庸置疑,目前的确是“旗帜鲜明”地倾向于“非主震说”者。

地震序列的分类是对地震现象的“回顾性”描述,是“马后炮”,它们只在地震序列完成之后才可能被确切无疑地判定,且有相当的任意性。地震序列的判定标准在国际、国内不同专家间也有所不同。对芦山地震究竟是“新的主震”还是“汶川余震”的“讨论”实质上是在根据经验判定地震的类型。有鉴于此,即使目前看“主震说”提出的 4 条“论据”明显缺乏说服力,“余震说”比较有说服力,但最后都需要等到地震序列完成之后才能“定论”。一个国内熟悉的例子便是 1976 年 7 月 28 日唐山 $M_s 7.8$ 地震的最大余震滦县 $M_s 7.1$ 地震的类型问题。直至 1985 年,时隔 9 年,在总结性论文中对发生在唐山 $M_s 7.8$ 地震“东区”的最大余震(滦县 $M_s 7.1$ 地震)及该余震的余震(图 4)仍然被谨慎地称之为“似乎可看成是主余震型的地震”(朱传镇, 1985)。即使“定论”之后仍然有相当大的“讨论”空间,如: 2004 年 12 月

26 日苏门答腊—安达曼 $M_w 9.2$ 地震及其最大余震 2005 年 3 月 28 日尼亚斯 $M_w 8.7$ 地震。两者震级差仅为 0.5 级, 无论是持“震级差小于 0.6 还是 0.7 即为双震”观点的, 均会认定它们为双震。可是由于它们的破裂区或余震区相邻接但不重叠, 并且尼亚斯地震的震级曾经被定为 $M_w 8.6$, 与 $M_w 9.2$ 之差恰好是 0.6, 不能排除还会有认为 $M_w 8.7$ 地震是新的主震的“争论”。但是, 由于它们都是沿同一构造带印度尼西亚俯冲带发生的, 所以在多数情况下国际上目前还是称 2005 年尼亚斯 $M_w 8.7$ 地震为 2004 年苏门答腊—安达曼 $M_w 9.2$ 地震的余震。

3 讨论与结论

相对于需要等到地震序列完成之后才能“定论”、甚而在序列完成之后未必就能“定论”的芦山地震究竟是“新的主震”还是“汶川余震”问题, 芦山地震的发生引出了一些亟待研究的更为重要的科学问题与防震减灾问题。

从龙门山断裂带(地震带)的角度看, 芦山地震的发生显示了龙门山断裂带在地震构造上的整体性, 它的发生结束了龙门山断裂带西南段沉寂多年没有较大地震发生的历史, 解决了、但只是部分地解决了在 2008 年 5 月 12 日汶川地震时龙门山断裂带西南段没有发生破裂的困惑; 同时开启了龙门山断裂带西南段的地震活动, 引出了该段为什么迟滞 5 年之后才开始发生较大破裂的困惑, 可以说是龙门山断裂带具有承前启后意义的地震。目前龙门山断裂带西南段(图 1 中的 N+C+S 段)整体上仍存在发生 $M_w 7.2—7.3$ 地震的潜在危险性; 芦山地震东北长约 30 km 的一段断层(图 1 中的 N 段)存在发生 $M_w 6.8$ 地震的潜在危险性, 而其西南长约 70 km 的一段断层(图 1 中的 S 段)存在发生大到 $M_w 7.2$ 地震的潜在危险性(陈运泰等, 2013), 亟待加强监测与研究。

进入 21 世纪以来, 在青藏高原东北部, 沿着巴颜喀拉地块(亦称松潘—甘孜地块)的边缘, 大地震不断。例如, 发生于巴颜喀拉地块北缘东昆仑断裂带的 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 $M_w 7.8(M_s 8.1)$ 地震, 东缘的 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_w 7.9(M_s 8.0)$ 地震, 南缘的 2010 年 4 月 14 日玉树 $M_w 6.9(M_s 7.0)$ 地震等。相对于复发时间达千年量级的龙门山断裂带的汶川大地震(有一种说法称是 2000—6000 年, 虽然误差范围很大, 也是千年量级, 但这个数量级估计还是可供参考的), 十年、数十年不过是一个瞬间。巴颜喀拉地块边界断裂带上近来多次大地震的发生表现出巴颜喀拉地块作为一个整体向 ESE 方向运动的统一性和块体运动的“同时性”。芦山地震作为巴颜喀拉地块东部边缘南段的地震, 是巴颜喀拉地块正对着其东面的华南地块持续地向 ESE 方向运动过程中发生的重要事件, 它的发生对于巴颜喀拉地块运动的影响以及对作为其边界的断裂带(龙门山断裂带、鲜水河断裂带、东昆仑断裂带等)的影响具有重要意义, 是亟待加强研究予以阐明的问题。

芦山地震毗邻连接北东向龙门山断裂带、北西向鲜水河断裂带与近南北向安宁河断裂带的 Y 字形的“三叉口”, 是近年来发生于最靠近 Y 字形“三叉口”的重要地震。芦山地震的发生是否有可能开启在它南面的沉寂多年的近南北向的安宁河断裂带及其附近现今小震活动相当活跃的冕宁地震带与石棉地震带(Yang *et al.*, 2005)的强震活动, 它对马边、宜宾与内江等地震带的可能影响, 等等, 都是亟待加强监测与研究的重要科学问题。

作者衷心感谢两位审稿专家提出的中肯的修改建议。

参 考 文 献

- 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 刘超. 2013. 从汶川地震到芦山地震[J]. 中国科学: 地球科学, **43**(6): 1064–1072.
- 陈运泰, 许力生, 张勇, 杜海林, 冯万鹏, 刘超, 李春来, 张红霞. 2008. 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告[R/OL]. [http://www.cea-igp.ac.cn/汶川地震专题/地震情况/初步研究及考察结果\(一\)](http://www.cea-igp.ac.cn/汶川地震专题/地震情况/初步研究及考察结果(一)).
- 陈立德. 1988. 1970 年 1 月 5 日云南省通海 7.7 级地震[M]//张肇诚主编. 中国震例(1966—1975). 北京: 地震出版社: 57–76.
- 杜方, 龙锋, 阮祥, 易桂喜, 官悦, 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, doi:10.6038/cjg20130535.
- 傅承义(编著). 1963. 地壳物理讲义[M]. 合肥: 中国科学技术大学地球物理系: 1–134.
- 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, doi:10.6038/cjg20130434.
- 刘祖荫, 苏有锦, 秦嘉政, 李忠华, 张俊伟(编著). 2002. 20 世纪云南地震活动[M]. 北京: 地震出版社: 1–288.
- 李娜. 2013. 争议“芦山地震是否汶川地震余震”意义何在[J]. 科技导报, **31**(12): 8–9.
- 吴开统, 焦远碧, 吕培苓, 王志东(编著). 1990. 地震序列概论[M]. 北京: 北京大学出版社: 1–250.
- 王为民, 郝全来, 姚振兴. 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果[J]. 地球物理学报, **56**(4): 1412–1417, doi:10.6038/cjg20130436.
- 朱传镇. 1985. 唐山及其邻区的地震活动[M]//刘恢先主编. 唐山大地震震害(第一册)[M]. 北京: 地震出版社: 1–16.
- 张国民, 傅征祥, 桂斐泰(编著). 2001. 地震预报引论[M]. 北京: 科学出版社: 1–399.
- 张勇, 陈运泰, 许力生. 2013. 芦山 4.20 地震破裂过程及其致灾特征初步分析[J]. 地球物理学报, **56**(4): 1408–1411, doi:10.6038/cjg20130435.
- 张勇, 冯万鹏, 许力生, 周成虎, 陈运泰. 2008. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学: D 辑, **38**(10): 1186–1194.
- Das S, Aki K. 1977. Fault planes with barriers: A versatile earthquake model[J]. *J Geophys Res*, **82**: 5648–5670.
- Das S, Scholz C H. 1981. Theory of time dependent rupture in the earth[J]. *J Geophys Res*, **86**: 6039–6051.
- Jordan T H, Chen Y-T, Gasparini P, Madariaga R, Main I, Marzocchi W, Papadopoulos G, Sobolev G, Yamaoka K, Zschau J. 2011. Operational earthquake forecasting: State of knowledge and guidelines for utilization[J]. *Annals of Geophysics*, **54**(4): 315–391, doi:10.4401/Ag-5350.
- Liu M, Stein S. 2011. Earthquake, aftershocks[M]//Gupta H K ed. *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Dordrecht, The Netherlands: Springer: 192–194.
- Omori F. 1894. On the aftershocks of earthquake[J]. *J College Sci, Imperial Univ Tokyo*, **7**: 111–200.
- Parsons T. 2002. Global Omori law decay of triggered earthquakes: Large aftershocks outside the classical aftershock zone[J]. *J Geophys Res*, **107**(B9): 2199, doi:10.1029/2001JB000646.
- Richter C F. 1958. *Elementary Seismology*[M]. San Francisco: W F Freeman: 1–769.
- Scholz C H. 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 1–439.
- Utsu T, Ogata Y, Matsu'ura R S. 1995. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity[J]. *J Phys Earth*, **43**(1): 1–33.
- Utsu T. 1961. A statistical study on the occurrence of aftershocks[J]. *Geophys Mag*, **30**: 521–605.
- Utsu T. 2002. Statistical features of seismicity[M]//Lee W H K, Kanamori H, Jennings P C, Kisslinger C eds. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A*. San Diego: Academic: 719–732.
- Yang Z X, Waldhauser F, Chen Y T, Richards P. 2005. Double-difference relocation of earthquakes in central-western China, 1992–1999[J]. *Journal of Seismology*, **9**(2): 241–264.