



# 四川芦山 7.0 级强震: 一次典型的盲逆断层型地震

徐锡伟<sup>①\*</sup>, 闻学泽<sup>②</sup>, 韩竹军<sup>①</sup>, 陈桂华<sup>①</sup>, 李传友<sup>①</sup>, 郑文俊<sup>①</sup>, 张世民<sup>③</sup>, 任治坤<sup>①</sup>, 许冲<sup>①</sup>, 谭锡斌<sup>①</sup>, 魏占玉<sup>①</sup>, 王明明<sup>①</sup>, 任俊杰<sup>③</sup>, 何仲<sup>③</sup>, 梁明剑<sup>②</sup>

① 中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室, 北京 100029;

② 四川省地震局, 成都 610041;

③ 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

\* 联系人, E-mail: xiweixu@vip.sina.com

2013-05-15 收稿, 2013-05-29 接受, 2013-06-14 网络版发表

国家自然科学基金(40821160550, 91214201)资助

**摘要** 芦山地震区发育着龙门山推覆构造带南段大邑隐伏断裂、双石-大川断裂、盐井-五龙断裂、耿达-陇东断裂等活动断层。地震现场应急科学考察表明, 沿这些活动断层及其邻近地段没有发现明显的地震地表破裂带, 地表可见到一些脆性水泥路面挤压破裂现象, 说明在双石镇、太平镇、龙门乡、隆兴乡等地存在着 NW-SE 向局部的地壳缩短, 结合余震的空间分布特征、震源机制解等资料, 推测芦山地震属典型的盲逆断层型地震。龙门山推覆构造带尚未发生历史地震破裂的地震空段应引起有关部门高度重视。

## 关键词

芦山地震  
龙门山推覆构造带  
地震地表破裂带  
盲逆断层型地震  
青藏高原

2013 年 4 月 20 日芦山 7.0 级地震, 简称芦山地震, 是继 2008 年汶川 8.0 级特大地震近 5 年后又一次破坏性地震, 震中位于青藏高原中东部巴颜喀拉块体与华南块体相互碰撞、挤压的边界带——龙门山推覆构造带南段芦山县境内(30.314°N, 102.934°E), 与发生在龙门山推覆构造带中段的汶川地震起始破裂点或震中相距约 85 km<sup>[1-4]</sup>(图 1), 处于 2008 年汶川地震形成的龙门山推覆构造带南段库伦应力增加区内<sup>[5,6]</sup>, 引起了地震学界对芦山地震是否为 2008 年汶川地震之强余震的争论<sup>[7]</sup>。同时, 芦山地震仪器记录的微观震中位于地表可见的双石-大川断裂下盘, 其发震断层究竟是哪一条活动断层? 与双石-大川断裂或与汶川地震的关系如何? 对这些问题的深入研究, 可深刻理解龙门山推覆构造带地震破裂分段习性, 为判定未来地震发生地点和震级大小提供可以借鉴的实例。本文依据芦山地震发生后第一时间地震应急科考获得的第一手有关次生地表破裂分布特征,

结合重新定位的主震、余震空间分布信息和震源机制解等, 讨论芦山地震的发震构造模型, 指出芦山地震属典型的盲断层型地震, 为我国大陆挤压构造环境条件下提供了一种新的发震构造类型, 对判定芦山地震是否为汶川地震余震, 分析地震孕育过程和龙门山推覆构造带及其邻近地区未来地震趋势具有十分重要的科学意义。

## 1 区域地震构造环境简析

芦山地震和汶川地震所在的龙门山推覆构造带由后山断裂、中央断裂、前山断裂和山前隐伏断裂等组成<sup>[8-12]</sup>(图 1)。其中, 中央断裂中段北川-映秀断裂垂直滑动速率为 1~2 mm/a, 推测整个龙门山推覆构造带总体滑动速率 4~6 mm/a<sup>[11-13]</sup>; 从地质资料推测跨龙门山推覆构造带 NW 向地壳缩短速率约为 10 mm/a<sup>[14]</sup>, 由平衡剖面计算获得的地壳缩短率为 40%~60%<sup>[15]</sup>; 也有研究者指出, GPS 观测反映龙门山

**引用格式:** 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军, 等. 四川芦山 7.0 级强震: 一次典型的盲逆断层型地震. 科学通报, 2013, 58: 1887-1893

**英文版见:** Xu X W, Wen X Z, Han Z J, et al. Lushan Ms 7.0 earthquake: A blind reserve-fault earthquake. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-013-5999-4

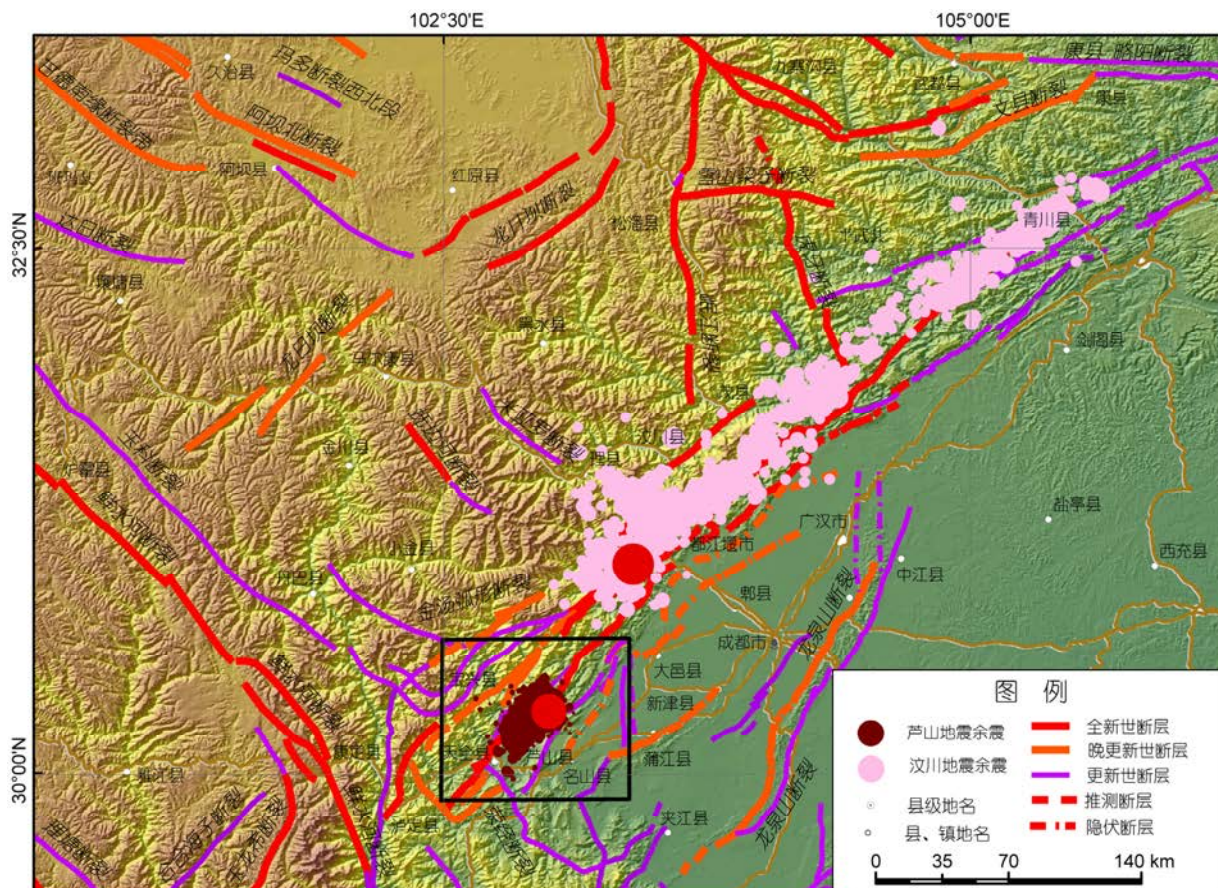


图 1 芦山地震和汶川地震区域构造框架图(黑框为图 2 位置)

推覆构造带现今地壳缩短速率不明显, 推测现今地壳缩短速率 $\leq 3 \text{ mm/a}$ <sup>[16-21]</sup>, 或跨龙门山推覆构造带 700 km 宽度范围内的现今地壳缩短速率约  $7 \text{ mm/a}$ <sup>[22]</sup>. 结合其他方面研究结果, 国际地学界形成了两种截然不同的青藏高原运动学模型: 分布式连续变形模型<sup>[17,18,23]</sup>和沿大型走滑断裂局部化滑动的块体运动模型<sup>[3,24]</sup>. 芦山地震发生在龙门山推覆构造带南段, 震区发育有 NE 走向的大邑隐伏断裂、双石-大川断裂、盐井-五龙断裂、耿达-陇东断裂等叠瓦状逆断层(图 2). 与 2008 年汶川地震的成因相类似<sup>[3,25]</sup>, 芦山地震也是巴彦喀拉块体向东南运动受到华南块体强烈阻挡引起块体间龙门山推覆构造带南段深部缓倾角逆断层黏滑错动产生的一次强烈地震, 由于地震震中位于汶川地震引起的昆仑应力增加区内<sup>[5,6]</sup>, 可以认为汶川地震对芦山地震存在触发作用或加快了芦山地震的发生. 上述最新构造活动环境构成了芦山地震发生的新构造背景.

## 2 地表破裂表现与震源参数

据出现地表破裂带的地震统计, 震级 $\geq 6.5$  级地震可能会沿发震活动断层形成数千米至百千米量级长的地表破裂带<sup>[26]</sup>, 但发生在挤压褶皱区深部尚未出露地表盲逆断层上的地震常常例外, 这些地震称为盲逆断层型地震(blind thrust earthquake)或褶皱地震(fold earthquake)<sup>[27,28]</sup>. 例如, 1980 年阿尔及利亚阿斯南(EL Asnam)地震、1983 年美国科林加(Coalinga)地震、1987 年美国怀特莱露(Whittier Narrows)地震和 1906 年北天山玛纳斯地震等就属于这类地震, 它们的一个共同特征是没有沿地表可见活动断层形成地表破裂带, 但在地壳中盲逆断层上断点附近可观测到背斜状隆起, 因而在震中附近可见背斜状隆起山地<sup>[27-31]</sup>, 横跨盲逆断层的垂直剖面上余震常呈面状分布; 而出露地表的活动断层引发的  $M \geq 6.5$  级地震, 不仅沿活动断层形成地表破裂带, 在剖面上余震也沿断层集中呈线状优势排列<sup>[28]</sup>. 这就是为什么我们

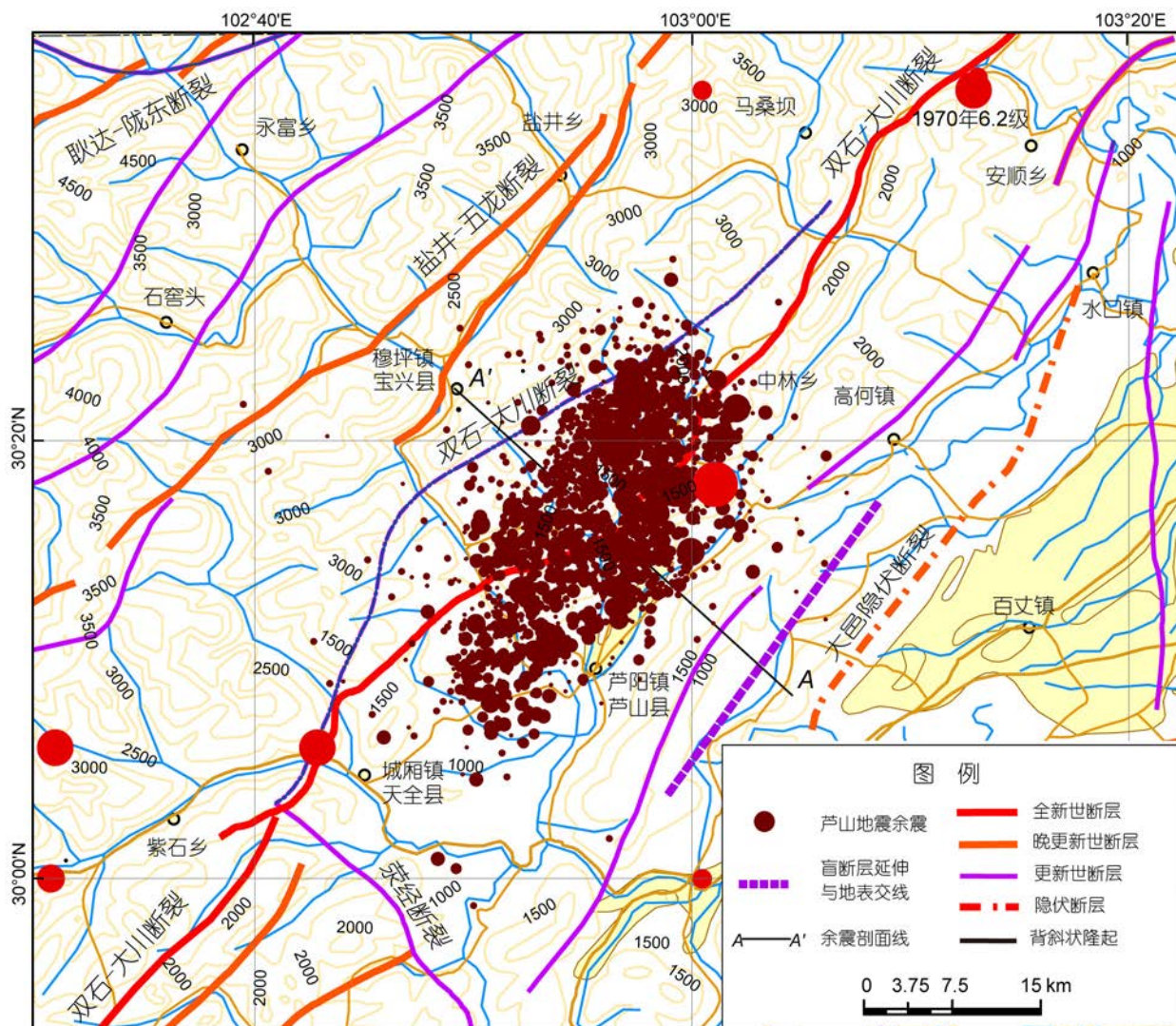


图 2 芦山地震区活动断层与余震分布图

余震记录截止时间: 2013 年 4 月 20 日 08 时 02 分至 4 月 26 日 23 时 59 分. 等高线单位: m

常常在盲逆断层地震震中区观测到背斜状隆起山地的原因.

2013 年 4 月 21 日至 5 月 1 日中国地震局现场应急科学考察表明, 在中国地震局颁布的芦山地震烈度Ⅷ和Ⅸ区, 以及龙门山推覆构造带南段大邑隐伏断裂、双石-大川断裂、盐井-五龙断裂、耿达-陇东断裂沿线尚未发现明显的地震地表破裂带; 在极震区芦山县太平镇、宝盛乡、龙门乡、双石镇、雅安雨城区上里镇、中里镇、下里镇、宝兴县大溪乡和灵关镇等第四纪覆盖区可见河流阶地或河漫滩上发育 NE 向和 NW 向地裂缝, 沿这些地裂缝出现喷水冒砂现象, 例如双石-大川断裂双石镇双河村堰坎组附近一级阶

地上存在雁行排列、整体走向 NE75°左右、长度约 1 km 的张性地裂缝带和喷水冒砂带(图 3(a), (b)), 探槽开挖可知喷水冒砂主要沿倾向东南的张性地裂缝发生(图 3(b), (c)), 向 NE 跨越青衣江支流到双石镇南河口东河漫滩和一级阶地上也有许多喷水冒砂点, 但主要沿 NW 向张性地裂缝分布, 由此推测这些地裂缝是地震条件下砂土液化引起的次生地破裂. 值得注意的是, 在双石镇双河村堰坎组由双石镇前往芦山县城的公路呈 N60°W 延伸, 横跨双石-大川断裂附近, 公路水泥路面出现挤压破裂, 由路边排水沟水泥护堤弯曲和路面翘起或重叠量可测量到该观测点存在 6 cm 左右的局部地壳缩短(图 3(d), (e)), 这

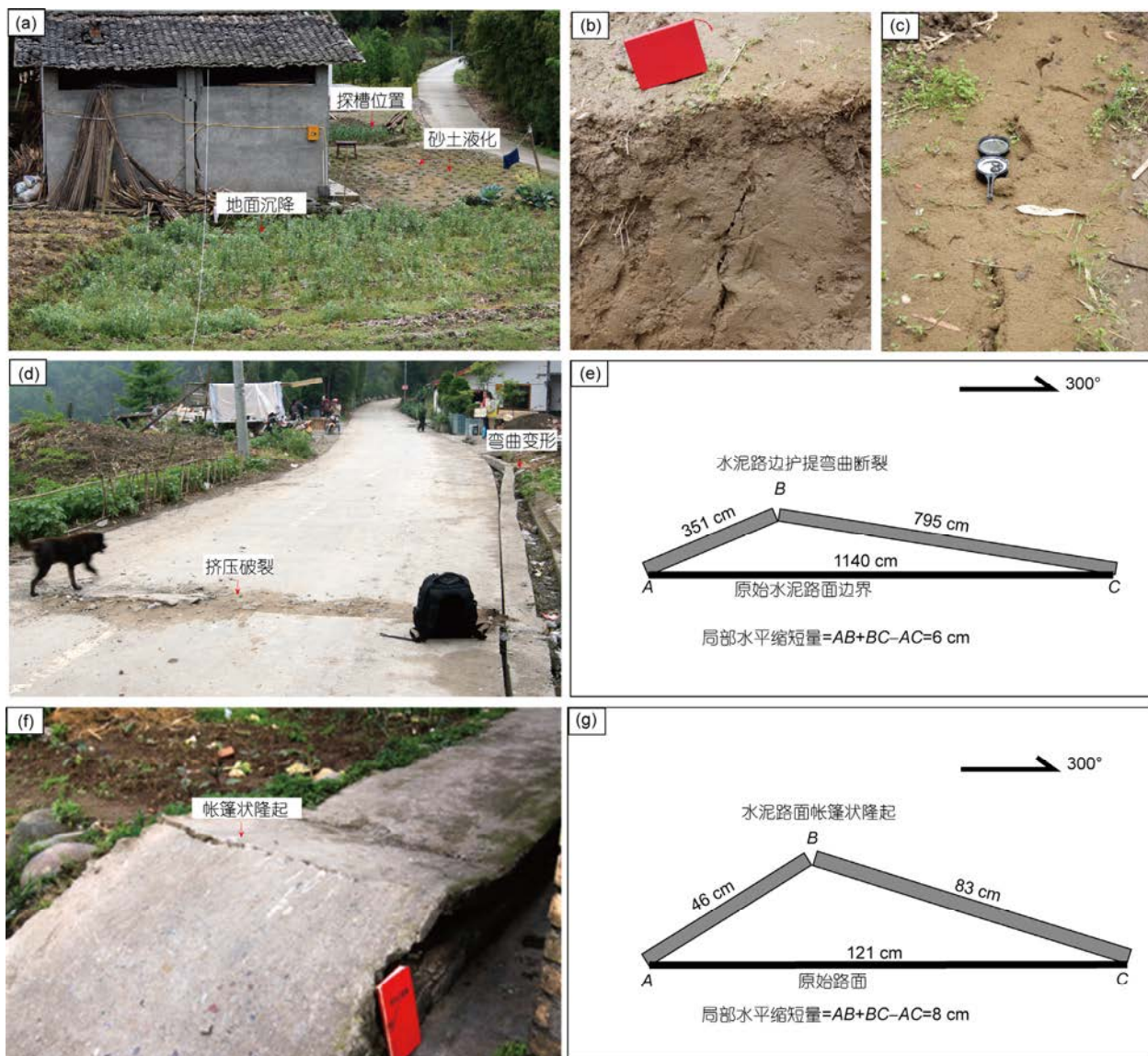


图 3 芦山地震震中区次生地地表破裂现象

(a) 双石镇堰坎组砂土液化与地面凹陷现象; (b) 探槽剖面上与喷水冒砂相关的走向 N75°E、倾向 SE 的张性地裂缝; (c) 走向 N75°E 左右的斜列张性地裂缝与砂堆; (d) 双石镇堰坎组公路上的挤压破裂与护堤弯曲破裂现象; (e) 双石镇堰坎组公路护堤弯曲破裂与缩短量; (f) 龙门乡青龙村王伙组河心白塔东南 30 m 处帐篷状隆起现象; (g) 王伙组河心白塔东南 30 m 处帐篷状隆起与缩短量

种反映地壳缩短的现象在该点西南跨河小桥、双石镇东北部去双河村茨竹坡组的公路上、龙门乡青龙村和芦山县城北隆兴村等多地都可见到缩短量级差不多的挤压破裂现象, 实地测量可知局部地壳缩短方向为 NW-SE 向, 缩短量介于 6~8 cm (图 3(f), (g)), 说明在双石镇、太平镇、芦阳镇、龙门乡等地地壳存在着 NW-SE 向同震缩短。

除此之外, 双石-大川断裂和大邑隐伏断裂沿线基岩山区或第四系覆盖区发育着大量与断层走向一

致、顺坡滑动的张性地裂缝带, 特别是在雅安雨城区上里、中里和下里以西的大邑隐伏断裂分支沿线, 集中分布在海拔 1500 m 左右的山坡上, 呈拉开状, 由于它们大都位于陡坡地带, 且有相当一部分直接构成滑坡体后缘陡坎或两侧的侧滑破裂面, 野外可确定它们大部分为震动条件下形成的张性地裂缝和相关的滑坡体, 可称之为芦山地震诱发的次生地地表破裂。

由此可见, 芦山地震没有形成明显的地震地表破裂带, 仅在陡峻地形边坡附近发育大量张性地裂

缝和滑坡体等,可以推测芦山地震属于盲逆断层型地震.据波形反演可知,矩震级  $M_w$  6.7 左右的芦山地震震源深度 10.2~15 km,震源盲逆断层走向  $N40^\circ E$ ,起始破裂点附近断层面倾角约  $35^\circ$ ,最大滑动量约 1.6 m<sup>[32,33]</sup>.这一盲逆断层发震模型得到了余震分布特征的部分支持.

### 3 余震空间分布与发震构造模型

利用从中国地震台网中心下载的 2013 年 4 月 20 日 08 时 02 分至 2013 年 4 月 26 日 23 时 59 分的震相数据,使用双差定位方法<sup>[34]</sup>对芦山地震及其 2291 个余震进行了重新定位,结果显示平面上余震呈  $N32^\circ E$  密集条带状分布,密集条带 NE 向长约 45 km, NW 向宽约 27 km,明显斜切双石-大川断裂(图 2),说明芦山地震与地表出露的双石-大川断裂关系不大;从主震、余震时空分布可以看出芦山地震破裂有从北东向西南扩展的趋势,正好与汶川地震破裂从西南向北东方向扩展相反(图 1).另外,汶川地震余震密集带西南端与芦山地震余震密集带北东端之间尚有约 35 km 的中小地震空缺(图 1),历史上曾于 1970 年 2 月 24 日发生过一次 6.2 级地震(图 2),这一余震空缺段未来的发震危险性值得进一步监测与研究.

在这里需要特别指出的是,在横切芦山地震 NE 向余震密集带的深度剖面上,余震有像美国科林加地震那样的面状分布特征,说明芦山地震的发震断层为尚未出露地表的盲逆断层.重新定位的余震序列震源深度优势分布在 9~19 km 范围,9 km 以上深度范围的上地壳很少有余震发生(图 4),说明正在形成过程中的盲逆断层上断点埋藏在 9 km 以下的地壳中.此外,重新定位的余震剖面密集带有与震源机制解反映出的震源断层一致的向 NW 倾斜特征,用最小二乘法拟合剖面密集带,即可知地下盲逆断层走向  $212^\circ$ ,倾向 NW,主震震源深度及其以下部分盲逆断层(F1)倾角约为  $35^\circ \pm 4^\circ$ ;主震震源深度以上至地下 7 km 深度范围余震明显减少,但存在一倾向 NW、倾角约为  $54^\circ \pm 4^\circ$  倾斜条带,推测可能为下部发生主震的盲逆断层向上扩展部分(F2),由于倾角偏大,不利于断层逆冲滑动,可能是本次地震断层未能出露地表的构造原因;7 km 以上基本上没有余震分布,在构造上对应于盲逆断层上断点以上的断层扩展背斜部位(图 4),对应于芦山县城与雅安雨城区之间安顺乡、高河镇、上里镇、下里镇一带的背斜山地(图 2).因此,深度在 7~9 km 的余震陡倾角条带(F2)也有可能为断层扩展背斜陡倾翼变形较大的膝折带.

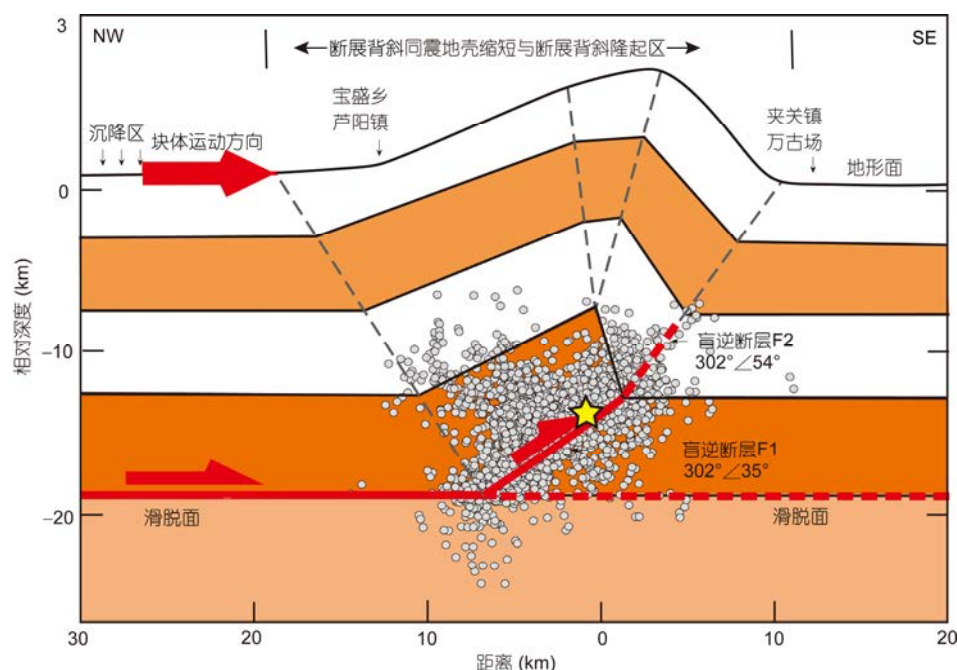


图 4 芦山地震发震构造模型平衡剖面图

白色小圆圈为重新定位后的芦山地震余震;黄色五角星为芦山地震震源位置

## 4 结论与讨论

芦山地震发生在龙门山推覆构造带南段双石-大川断裂附近, 其 NE 向余震密集带切割了 NEE 向双石-大川断裂, 加上芦山地震极震区以及大邑隐伏断裂、双石-大川断裂、盐井-五龙断裂、耿达-陇东断裂等沿线没有出现明显的地震地表破裂带, 显示芦山地震的发震断层不是出露地表的双石-大川断裂或其他地表可见的活动断层; 重新定位后余震在剖面上呈向北西倾斜的密集带和逆断层震源机制解等基础数据反映出芦山地震为盲逆断层型地震, 推测盲逆断层面上断点隐伏在芦山县城-龙门乡一线至下里镇、上里镇、高河镇、安顺乡一线的背斜隆起山地之下, 走向  $212^\circ$ , 倾向 NW, 倾角约  $35^\circ \pm 4^\circ$ , 其上部还有一倾角

为  $54^\circ \pm 4^\circ$  的陡倾角条带, 或者为盲逆断层向上扩展部分, 由于其倾角偏大不利于断层的逆冲滑动可能是芦山地震断层没有出路地表的构造原因; 或者为盲逆断层上部不对称断层扩展背斜陡倾翼膝折带, 需要高分辨率地震勘探作进一步甄别. 另外, 如果假定余震的空间分布代表震源破裂的范围, 则 2008 年汶川地震与芦山地震的震源破裂并不重叠, 可以认为它们是发生在龙门山推覆构造带中段和南段的两个独立的地震破裂事件. 但如果芦山地震是一次独立事件, 它是未来地震的前震还是主震是需要严肃对待的一个科学问题, 直接影响到对龙门山推覆构造带南段及其邻近地区, 包括鲜水河-安宁河-小江断裂带等尚无历史地震破裂的地段是否需要进一步加强地震监测和发震危险性等研究工作.

## 参考文献

- 1 Dong S, Zhang Y, Wu Z, et al. Surface rupture and co-seismic displacement produced by the  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake of May 12th, 2008, Sichuan, China: Eastwards growth of the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geol Sin*, 2008, 82: 801–840
- 2 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川  $M_s$  8.0 地震地表破裂带及其发震构造. *地震地质*, 2008, 30: 597–629
- 3 Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008  $M_w$  7.9 Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 2009, 37: 515–518
- 4 Yu G, Xu X, Klinger Y, et al. Fault-scarp features and cascading-rupture model for the Wenchuan earthquake ( $M_w$  7.9), eastern Tibetan Plateau, China. *Bull Seismol Soc Am*, 2010, 100: 2590–2614
- 5 Parsons T, Ji C, Kirby E. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin. *Nature*, 2008, 454: 509–510
- 6 Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 12 May 2008  $M=7.9$  Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L17305, doi: 10.1029/2008GL034903
- 7 潘希, 冯丽妃. 龙门山为何如此不安? *中国科学报*, 2013, 5785 期, 第一版
- 8 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32: 1020–1030
- 9 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: 657–673
- 10 徐锡伟, 闻学泽, 陈桂华, 等. 巴颜喀拉地块东部龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 529–542
- 11 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: 389–403
- 12 赵小麟, 邓起东, 陈社发. 龙门山逆断裂带中段的构造地貌学研究. *地震地质*, 1994, 16: 422–428
- 13 Densmore A L, Ellis M A, Li Y, et al. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 2007, 26: TC4005, doi: 10.1029/2006TC001987
- 14 Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in Central Asia. *Geophys Res Lett*, 1993, 20: 895
- 15 林茂炳, 吴山. 龙门山推覆构造带变形特征. *成都地质学院学报*, 1991, 18: 46–55
- 16 Hubbard J, Shaw J H. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan Plateau, and the 2008 Wenchuan ( $M_w$  7.9) earthquake. *Nature*, 2009, 458: 197–197
- 17 King R W, Shen F, Burchfiel B, et al. Geodetic measurement of crustal motion in Southwest China. *Geology*, 1997, 25: 179–182
- 18 Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 2004, 32: 809–812
- 19 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
- 20 Meade B J. Present-day kinematics at the India-Asia collision zone. *Geology*, 2005, 35: 81

- 21 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, doi: 10.1130/GSATG18A.1
- 22 王小亚, 朱文耀, 符养, 等. GPS 监测的中国及其周边现时地壳形变. *地球物理学报*, 2002, 45: 198–209
- 23 Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 1997, 294: 1671–1677
- 24 Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001, 294: 1671–1677
- 25 Zhang P, Wen X, Shen Z, 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: 353–382
- 26 Yeats R S, Sieh K, Allen C R. *The Geology of Earthquake*. Oxford: Oxford University Press, 1997. 568
- 27 Stein R, King G. Seismic potential revealed by surface folding: 1983 Colifornia, earthquake. *Science*, 1984, 224: 869–872
- 28 Stein R, Yeats R S. Hidden earthquakes. *Sci Am*, 1989, 260: 48–57
- 29 King G, Vita-Finzi C. Active folding in the Algerian earthquake of 10 October 1980. *Nature*, 1981, 292: 22–26
- 30 张培震, 邓起东, 徐锡伟, 等. 盲断裂, 褶皱地震与新疆 1906 年玛纳斯地震. *地震地质*, 1994, 16: 193–204
- 31 Heaton T H, Hall J F, Wald D J, et al. Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical  $M_w$  7.0 blind thrust earthquake. *Science*, 1995, 13: 206–211
- 32 王卫民, 郝金来, 姚振兴. 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果. *地球物理学报*, 2013, 56: 1412–1417
- 33 刘超, 许力生, 陈运泰. 2013 年 4 月 20 日四川雅安市芦山县  $M_s$ 7.0 地震. <http://www.cea-igp.ac.cn/upload/Image/mrtp/tpxw/2013n/2013n4r/2669133725.jpg>
- 34 Walhuaser F, Ellsworth W. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault. *Bull Seismol Soc Amer*, 2003, 90: 1353–1368