中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 6 期: 1038 ~ 1046
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

龙门山断裂带中南段的一个破裂空段——芦山地震的震后效应

高原[①*], 王琼[①③], 赵博[②③], 石玉涛[①③]

① 中国地震局地震预测研究所(地震预测重点实验室), 北京 100036;
② 中国地震台网中心, 北京 100045;
③ 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081
* E-mail: gaoyuan@seis.ac.cn

收稿日期: 2013-05-10; 接受日期: 2013-05-16; 网络版发表日期: 2013-05-22
国家自然科学基金(批准号: 41174042, 41040034)和地震行业科研专项(编号: 201008001)资助

摘要 2013 年 4 月 20 日, 在青藏高原东缘的龙门山断裂带的南段发生了芦山 7.0 级地震. 通过地壳剪切波分裂的分析, 揭示了龙门山断裂带域的地壳主压应力方向及其与断裂之间的关联. 芦山地震余震的定位结果显示, 芦山地震的破裂与汶川地震的破裂没有贯通, 在芦山与汶川之间形成了一个"破裂空段". 本文建议, 应关注芦山地震与汶川地震之间"破裂空段"的应力变化. 采用不依赖于天然地震记录的井下人工源观测技术是一种有意义的科学尝试.

关键词
芦山地震
龙门山断裂带
破裂空段
地壳各向异性
地震双差定位
井下应力变化监测

1 芦山地震与区域地震活动背景

北京时间 2013 年 4 月 20 日 8 时 2 分在四川省雅安市芦山县发生了一个强烈地震, 造成芦山、宝兴等地区民众的严重伤亡. 据中国地震台网(CENC)测定, 震中位置北纬 30.3°, 东经 103.0°, 震级为 M_S7.0 级, 震源深度 13 km, 该地震被称为四川省芦山"4·20" 7.0 级地震, 以下简称芦山地震.

印度板块新生代以来向北推挤欧亚板块造成青藏高原的隆升, 伴随地壳的缩短加厚, 青藏块体的东部从北到南分别向东北、东和西南方向推挤. 这种大规模持续的构造运动, 引起青藏块体内部和周缘地区的强震活动频繁[1,2]. 从空间位置上看, 芦山地震发生在龙门山断裂带的南段. 众所周知, 在青藏块体东缘的龙门山断裂带区域, 由于青藏块体向东挤压, 受到四川盆地坚硬地壳的阻挡, 有证据显示青藏块体东缘的下方地壳物质东流, 导致软弱的下地壳物质向上逆冲挤出, 形成逆冲型的龙门山断裂带[3]. 从龙门山断裂带区域的构造背景及速度结构来看, 龙门山地区的地壳速度结构横向变化剧烈, 存在明显的不均匀性[3~7]. 据龙门山断裂带地壳结构的研究结果[6], 位于龙门山断裂带南段的芦山地震的震中, 恰巧在P波速度变化较大的区域, 与最近对青藏东南缘的研究结果有很好的一致性 1).

1) 王琼, 高原. 青藏东南缘背景噪声的瑞利波相速度层析成像及强震活动. 中国科学: 地球科学, 评审中

中文引用格式: 高原, 王琼, 赵博, 等. 龙门山断裂带中南段的一个破裂空段——芦山地震的震后效应. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1038–1046
英文引用格式: Gao Y, Wang Q, Zhao B, et al. A rupture blank zone in middle south part of Longmenshan Faults: Effect after Lushan Ms7.0 earthquake of 20 April 2013 in Sichuan, China. Science China: Earth Sciences, 2013, doi: 10.1007/s11430-013-4646-x

根据美国 PDE(初始震中确定)的全球地震目录, 2000年以来青藏块体东缘及周边区域5.0级以上地震分布有如下几个特点(图 1): (1) 在 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震发生之前, 地震主要分布在青藏块体东缘及东南缘伸延到云南境内; 在 8 年零 4 个多月的时间里, 发生 5 级以上地震 23 次(其中 6 级以上地震 3 次), 地震频次为 2.8 次/年. (2) 汶川地震发生后到 2013 年 4 月 20 日芦山 7.0 级地震发生前, 地震分布主要特征类似, 同样在青藏块体东缘及东南缘伸延到云南境内, 但龙门山断裂带中、北段因汶川地震而发生了多个强余震, 在成都盆地内部也有一个地震; 在不到 5 年的时间里, 除了汶川 8 级地震及其 5 级以上余震序列共 73 次外, 区域内还有 5 级以上地震 19 次(其中 6 级以上地震 1 次), 地震频次为 3.9 次/年. (3) 芦山地震之后, 除芦山 7 级地震及其 5 级以上余震序列共 6 次外, 只有一个 5 级地震, 即 4 月 25 日的 mb5.3 地震; 据中国地震台网中心速报结果, 该地震位于四川省宜宾市长宁县、珙县、兴文县交界处, 震级为 4.8. 可以看到, 汶川地震后到芦山地震前, 除汶川地震及强余震之外, 这期间的 5 级以上地震的年均频次较汶川地震前依然有明显增加.

2　地壳剪切波分裂揭示的地壳主压应力方向特征及其与断裂的关联

为研究龙门山断裂带的地壳各向异性, 根据汶川地震后在震源区及沿龙门山断裂带布设的流动地震台站记录, 结合区域内四川(固定)地震台网台站记录[8], 针对汶川地震余震序列, 使用剪切波分裂系统分析(SAM)法[9], 得到了台站下方地壳剪切波分裂的研究结果. 研究发现一个重要的现象[10]: 大致以安县为界, 位于龙门山断裂带东北段(B 区)的台站快剪切波偏振的优势方向为 NNE 向, 与断裂带走向近似一致; 而位于龙门山断裂带中段和中南段(A 区)的台站快剪切波偏振的优势方向近似为 NW 向, 与断裂带走向近似垂直; 而在芦山地震震中西南方向的龙门山断裂带南段靠近鲜水河断裂处(C 区), 快剪切波偏振方向表现得比较离散, 但平均方向为近 EW 方向(图 2).

研究表明, 快剪切波偏振的优势方向一般与原地主压应力方向一致[11~13], 其特征分布与构造特点相关, 可揭示出隐伏的走滑断裂[12]. 汶川地震余震序列快剪切波偏振方向的分段性揭示出龙门山断裂带

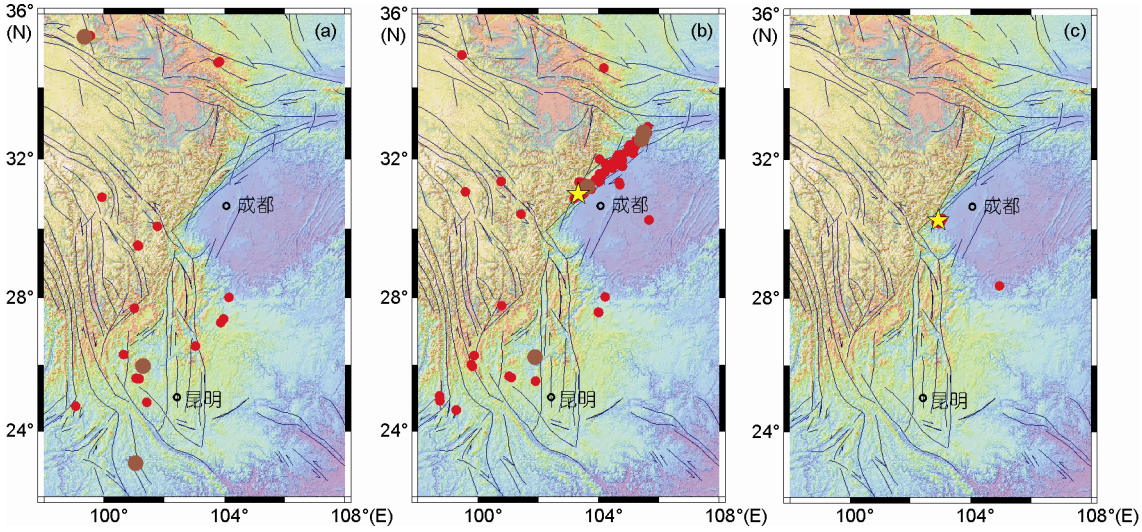


图 1　龙门山断裂带域及周边区域的地震活动

(a) 2000 年 1 月 1 日至 2008 年 5 月 11 日, 5 级以上地震分布; (b) 2008 年 5 月 12 日至 2013 年 4 月 19 日, 5 级以上地震分布, 黄色五角星为汶川地震; (c) 2013 年 4 月 20 日至 4 月 30 日, 5 级以上地震分布, 黄色五角星为芦山地震. 蓝色线段表示断裂. 地震数据来自美国 PDE 目录, 红色圆点为 5~5.9 级地震, 褐色圆点为 6~6.9 级地震, 黄色五角星分别为 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震和 2013 年 4 月 20 日芦山 7.0 级地震. 这两个地震的震级使用中国地震台网中心的结果, 以下相同

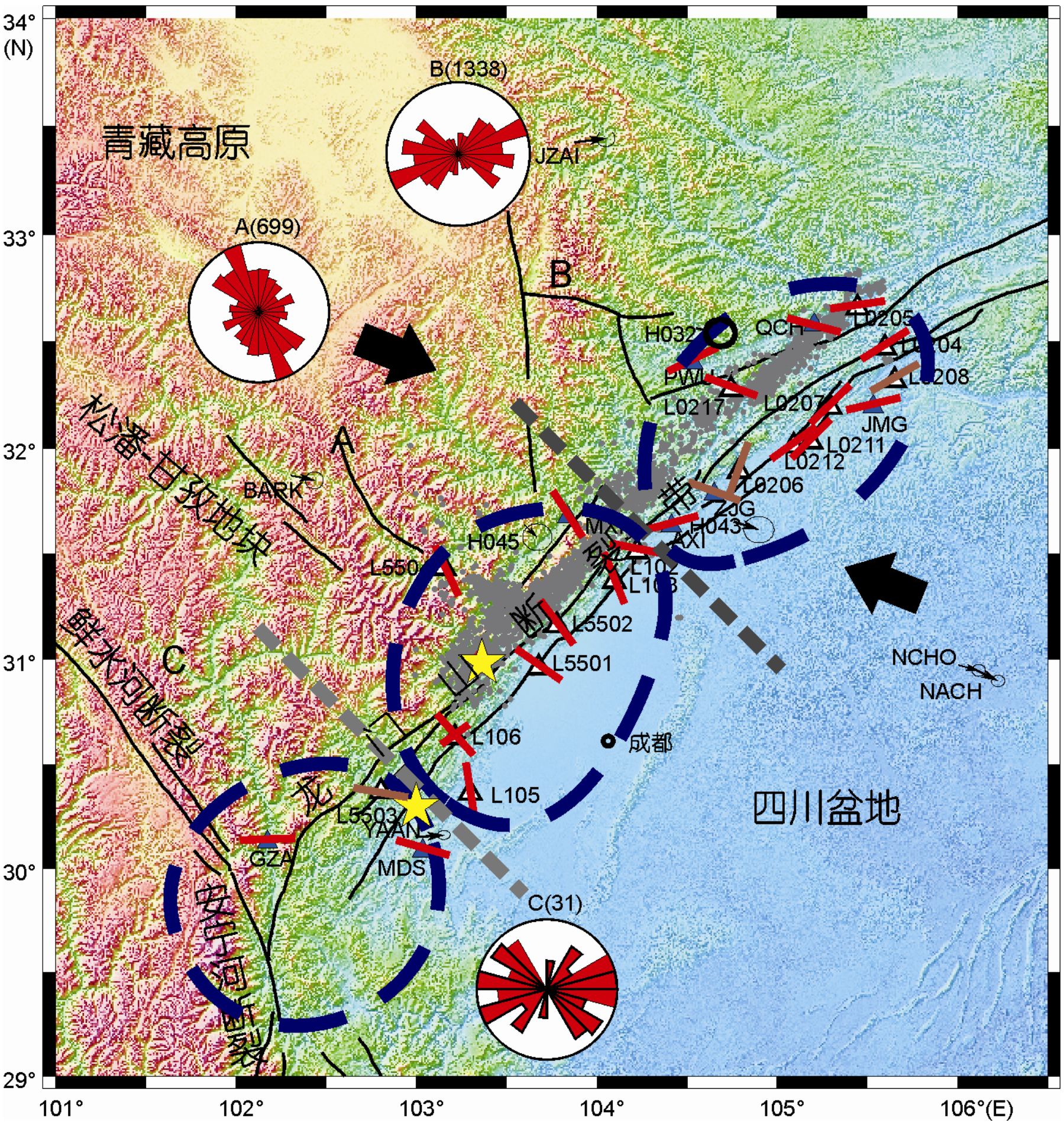


图 2　汶川地震余震序列地壳剪切波分裂的快剪切波偏振方向等面积投影玫瑰图

把龙门山断裂带分成 A, B 和 C 三段, 即 A 区、B 区和 C 区, 三个白底圆圈里的快剪切波偏振方向等面积投影玫瑰图分别是 A, B 和 C 三个分区里全部有效数据的综合结果. 图中黑色线段表示断裂, 一对粗黑箭头是区域主压应力方向, 箭头带圈的是 GPS 资料反演得到的主压应变方向, 北面的黄色五角星是 2008 年汶川地震, 南面的黄色五角星是 2013 年芦山地震, 蓝色三角形代表区域地震台网台站, 白色三角形代表流动台网台站. 台站上的直线段代表每个台站得到的平均快剪切波偏振方向, 红色表示有效数据至少 11 条以上, 而褐色的三个台站的有效数据只有 1~2 条. 图中灰色小点是重新定位过的汶川地震余震

西南段逆冲、东北段带有明显走滑性质的特征(图 2). 汶川地震后的地质考察结果也证实, 龙门山断裂带东北段, 有多个具走滑性质的区域断裂存在. 在龙门山断裂带与鲜水河断裂带、安宁河断裂交汇区附近的三个台站(MDS, GZA 和 L5503)的综合结果显示, 快剪切波偏振平均方向为近 EW 方向, 但快剪切波偏振方向表现得比较离散[10](其中 L5503 只有一条有效数据), 这可能是由区域内局部的复杂构造及引起的复杂应力分布有关.

在使用流动地震台站结合固定地震台站记录, 使用更长时间段的近场小地震的记录(包括汶川地震余震序列), 进行龙门山断裂带域地壳剪切波分裂的分析, 可以获得更多的观测信息[14]. 通过使用区域地震台网记录的近场小地震数据, 收集 2000 年 1 月至 2010 年 4 月的数据记录, 使得可能把龙门山断裂带的中段和西南段(包括与鲜水河断裂和安宁河断裂的交汇部分)进行更细的分区, 以芦山地震为界把该段再分成两部分, 得到三个分段(或分区)的快剪切波偏振的优势方向(图 3). 对比汶川余震资料得到的结果, 可见: 同样大致以安县为界, 位于龙门山断裂带东北段(B 区)的台站快剪切波偏振的优势方向仍然近似为 NNE 向, 与断裂带走向近似一致; 位于龙门山断裂带西南段北部(A 区)的台站, 快剪切波偏振的优势方向仍近似为 NW 向, 与断裂带走向近似垂直, 但明显

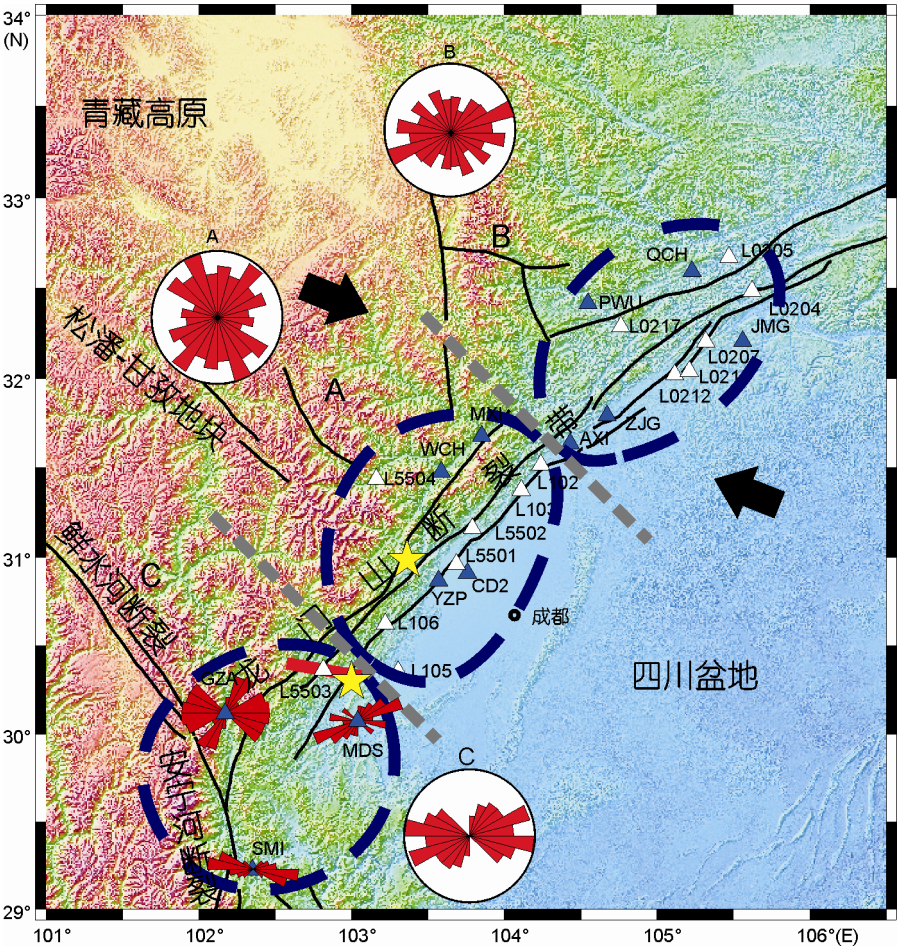


图 3　研究区地壳剪切波分裂的快剪切波偏振方向等面积投影玫瑰图

把龙门山断裂带分成 A, B 和 C 三段, 即 A 区、B 区和 C 区, 三个白底圆圈里的快剪切波偏振方向等面积投影玫瑰图分别是 A, B 和 C 三个区里全部有效数据的综合结果. C 区里还展示了全部三个固定台站的快剪切波偏振方向等面积投影玫瑰图, 一个流动台站 L5503 只有一条有效数据, 用红色线段表示快剪切波偏振方向. 数据为区域地震台网和流动台阵记录的 2000 年 1 月至 2010 年 4 月区域地震, 其中流动台网仅记录了汶川地震余震序列. 蓝色三角形代表区域地震台网台站, 白色三角形代表流动台网台站, 黄色五角星分别为 2008 年汶川地震和 2013 年芦山地震, 其他含义同图 2

地有了一个与断裂带的地表走向一致的优势方向; 在龙门山断裂带南段及与鲜水河断裂和安宁河断裂的交汇区(C 区)的台站, 快剪切波偏振的优势方向仍较离散, 但总体的优势方向近似为 EW 方向(图 3).

对于龙门山断裂带南段及多条断裂带交汇区的 C 区, 剪切波分裂特性与区域应力场受到断裂或深部构造的影响有关, 但在靠近成都盆地一侧的两个台站(MDS 和 SMI), 快剪切波偏振的优势方向都明显的偏向 EW 方向, 与该区域内青藏块体整体上的向东推挤受到成都盆地的阻挡有关(图 3). 在汶川地震后, 使用汶川地震余震序列资料和汶川地震前后的近场资料, MDS 台共获得 11 条有效剪切波分裂记录, GZA 台共获得 19 条有效剪切波分裂记录[10]. MDS 台的快剪切波偏振有两个优势方向, 一个约为 NW 方向, 另一个约为 NEE 方向; GZA 台的快剪切波偏振较离散, 没有明显的优势方向, 但仍可看出其快剪切波偏振平均方向约为近 EW 方向, 标准偏差高达 32.8°(图 2). 收集的数据记录时间扩展到 2000 年 1 月至 2010 年 4 月后, MDS 台共获得 48 条有效剪切波分裂记录, GZA 台共获得 52 条有效剪切波分裂记录[14]. MDS 台的快剪切波偏振方向优势明显, 为 NEE 方向(计算结果是 NE63.5°); GZA 台的快剪切波偏振依然很离散, 没有明显的优势方向, 但仍可看出其快剪切波偏振平均方向约为 NEE 近 EW 方向, 标准偏差也增加为 35.1°

(图 3). 从而可以发现, 位于雅安地区的 MDS 台的快剪切波偏振优势方向有了改变, 从两个优势方向减少为一个优势方向, 这可能提示了该台站下方地壳应力场调整的信息. NEE 方向的快剪切波偏振优势方向揭示了 MDS 台站下方主压力为 NEE 方向, 这个方向的主压应力有利于 NE 地表走向的逆冲断裂的破裂, 这个推测需要其他资料进一步的证实. 此外, SMI 台快剪切波偏振方向优势明显, 为 WNW 近 EW 方向(计算结果是 NE95.8°), 该方向的主压应力与其西侧不远处的安宁河断裂走向近似垂直, 从而对安宁河断裂起到一定的闭锁作用.

3 芦山地震及余震序列重新定位

芦山地震发生后, 中国地震局各研究单位和四川省地震局立即在地震现场布设了流动台网, 监测这次地震的余震活动. 结合区域内的固定地震台网台站和流动台网台站的记录, 开展了芦山地震余震序列的重新定位.

双差定位法[15]是目前应用最广泛的一种相对定位法, 该方法采用地震对的走时差, 从而可以最大程度地减小对速度模型的依赖, 可以不需要设主地震事件, 也不依赖地震事件的初始位置, 避免了主事件定位误差影响的传递[16]. 2010 年玉树 7.1 级地震余震的重新定位结果显示出余震分布很好地沿玉树断裂展布, 也证实了双差定位法的可靠[17]. 采用双差定位法, 对芦山地震的余震序列进行了重新定位.

根据芦山地震震后的流动地震观测, 通过中国地震局的地震应急管理系统收集到的资料, 对 2013 年 4 月 20 日至 5 月 2 日的芦山地震余震资料进行了重新定位(图 4). 这里我们共收集到 3813 个地震, 用双差定位法重新定位, 得到 3708 个重新定位后的芦山地震余震的震源位置. 在重新定位计算中, 收集了区域地震台网 60 个台站和流动台网 15 个台站, 共 75 个台站的记录. 对比重新定位前后的直方图(图 5), 芦山地震余震的震源深度更多地集中到 10~20 km 深度范

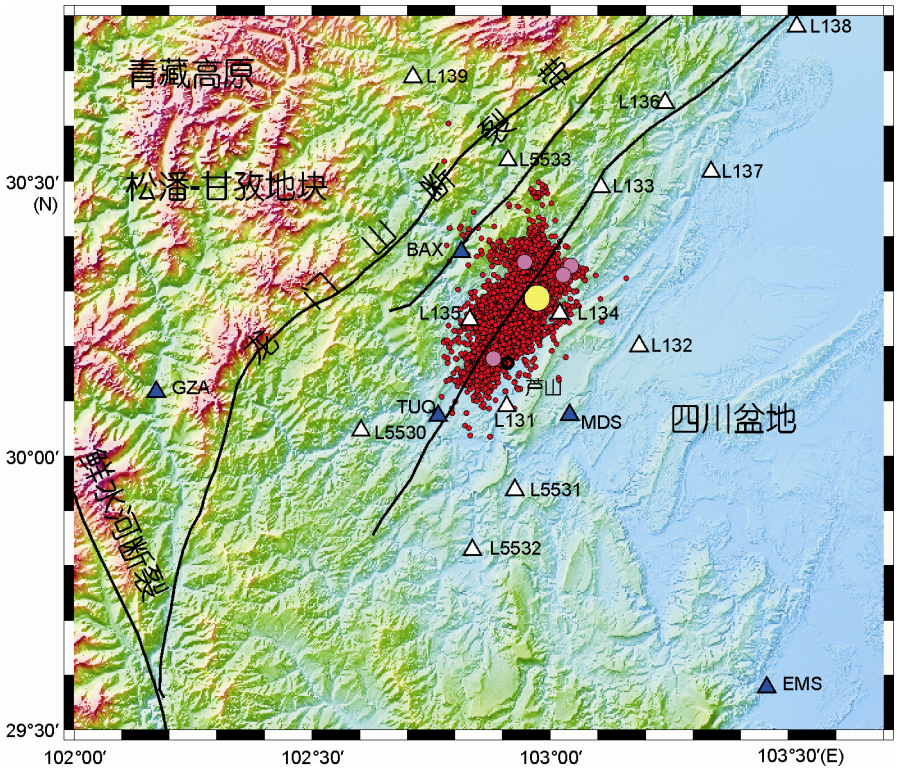


图 4　2013 年 4 月 20 日四川芦山 7.0 级地震及余震序列的重新定位结果

记录的余震序列数据时间为 2013 年 4 月 20 日至 5 月 2 日. 黄色圆圈为芦山 7.0 级地震主震, 红色小圆点是重新定位过的芦山地震余震. 三角形是范围内的地震台站, 其中蓝色为四川地震台网的台站, 白色为流动台网的台站

围, 揭示这次地震的余震分布主要在 20 km 以上.

芦山地震及其 5 个震级大于 5 级的强余震的震源初始破裂深度在 15~20 km 范围, M_S7.0 的主震震源初始破裂位置深度约 18 km(表 1). 在龙门山南段区域的这个地壳深度, 芦山地震震中所处的位置正是高速区与低速区的过渡区域, 并更深入高速区里, 这正是一种有利于强地震发生的结构 [1)].

根据重新定位后的芦山 7.0 级主震及其震级大于等于 5 级的几个强余震的震中位置参数(表 1), 可以看到, 震源深度的参数值变化较大. 需要指出的是, 震源深度是较难确定的一个地震参数, 各种测量技术和定义的不同, 以及对于较大震级的地震, 由于地震的破裂范围大, 不同定义下的深度从本质上讲就具有不一样的数值[18].

4　芦山地震后龙门山断裂带形成一个破裂空段

根据汶川地震余震序列的重新定位结果[19], 这次的芦山地震余震序列发生在汶川地震的西南方向, 位于龙门山断裂带的南段. 从空间上看, 在龙门山断裂带的中南段, 芦山地震及余震分布与汶川地震及余震分布(即是在汶川和芦山之间), 形成一个地震活动空段, 或称“破裂空段”(图 6).

根据中国地震局地震预测研究所对芦山地震震源性质的应急分析结果[2)], 以及国内外研究机构的快速

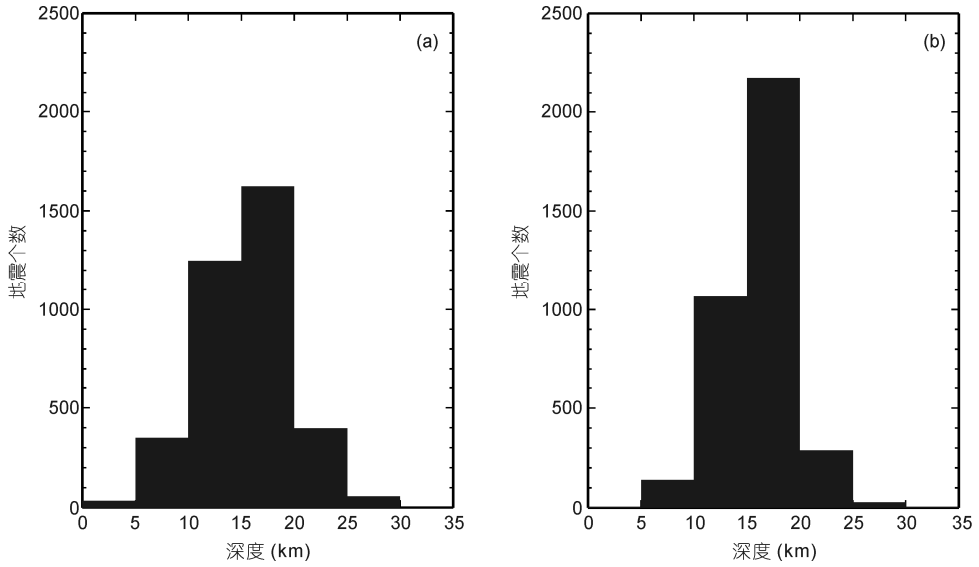


图 5　2013 年 4 月 20 日四川芦山 7.0 级地震余震序列重新定位前后直方图

(a) 重新定位前; (b) 重新定位后. 记录的余震序列数据时间为 2013 年 4 月 20 日至 5 月 2 日

表 1　芦山 7.0 级地震几个震级大于 5.0 的余震重新定位结果 [a)]

发震时刻	重新定位前			重新定位后			震级 M_S
	纬度(N)	经度(E)	深度(km)	纬度(N)	经度(E)	深度(km)	
2013-04-20 08:02:46	30.3°	103.0°	13	30.29°	102.97°	17.8	7.0
2013-04-20 08:07:29	30.3°	102.9°	10	30.35°	102.95°	18.5	5.1
2013-04-20 11:34:14	30.1°	102.9°	11	30.18°	102.88°	15.1	5.3
2013-04-21 04:53:44	30.3°	103.0°	17	30.35°	103.04°	19.8	5.0
2013-04-21 17:05:22	30.3°	103.0°	17	30.33°	103.03°	16.4	5.0

a) 重新定位前震源位置参数来自 CENC 正式速报结果, 震级采用 CENC 速报结果

2) 中国地震局地震预测研究所. 工作信息. 2013. 第 31, 33, 34 期

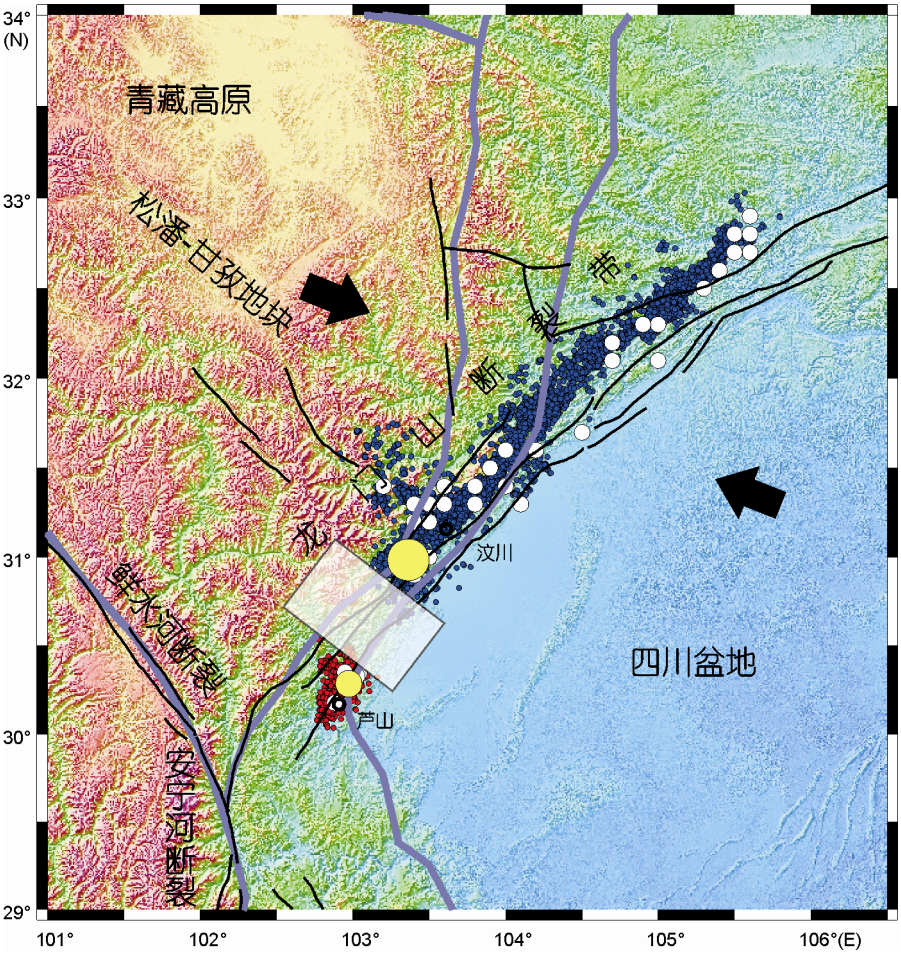


图 6　2013 年芦山 7.0 级地震及余震序列与 2008 年汶川 8.0 地震及余震序列

大、小黄色圆圈分别为 2008 年汶川 8.0 级地震和 2013 年芦山 7.0 级地震, 白色圆圈是震级为 5.0≤*M*<5.9 的强余震, 芦山地震与汶川地震余震序列都经过重新定位. 蓝色小圆点是重新定位过的汶川地震余震, 红色小圆点是重新定位过的芦山地震余震. 两个地震序列在龙门山断裂带的中南段形成一个“地震空段”, 图中用矩形白色影区表示. 灰色粗线条是一级块体边界, 黑色细线条是断裂

结果公布, 芦山地震主震的震源机制显示出高倾角的纯逆冲型特征, 结合断裂带和余震分布, 西倾的断层面为芦山地震的破裂面. 结合汶川地震主震的震源机制及破裂过程[20,21], 汶川地震主事件以几乎纯逆冲开始破裂, 破裂的后期带有走滑的特性. 因此, 芦山地震发生后, 在芦山地震主震与汶川地震主震之间的“破裂空段”, 依然处在东南向的推挤和西北向的阻挡作用之下. 如果龙门山断裂带域中南段周边的区域应力继续增强, 在周边区域没有发生显著地震的前提下, 这个“破裂空段”有发生破裂的可能性, 把芦山地震造成的破裂与汶川地震造成的破裂贯通. 根据沿龙门山断裂带走向的空段长度, 未来发生地震的震级不会很大. 如果该处破裂发生, 更可能以具有显著逆冲分量的方式破裂.

依据剪切波分裂获得的快剪切波偏振优势方向的分布(图 2 和 3), 提供了原地(区域内)主压应力方向的信息. 汶川地震初始破裂区直至破裂中段处在龙门山断裂带中段(图 3 中的 A 区), 由于青藏高原内松潘-甘孜地块向东和东南的运移, A 区几乎为纯逆冲特征. 处在龙门山断裂带南段北部(也有称中南段)的芦山地震震源区及其西南方向的断裂交汇区(图 3 中的 C 区), 由于多条断裂的交汇, C 区的构造特征从纯逆冲渐变为逆冲与走滑共存, 在鲜水河断裂的南侧, 还有川滇地块的阻挡. 可见, A 和 C 两区由于所处构造位置的不同, C 区主压应力方向有明显的改变, 从 C 区北端的近 NW 方向变为在与鲜水河断裂、安宁河

断裂交汇处的近 EW 方向.

虽然龙门山断裂带南端交汇多条断裂, 与龙门山断裂带中段的纯逆冲特征不同, 应力背景有变化. 但芦山地震本身却是逆冲型地震, 与汶川地震相同, 这个特征突出了芦山地震与汶川地震中间尚未破裂的空段.

研究显示, 汶川地震的发生是四川盆地西缘的龙门山断裂带受到其西侧巴颜喀拉地块(图 6 中的松潘-甘孜地块)推挤导致大尺度、长时期、缓慢的地壳应变积累的结果[22]. 跨龙门山断裂带的地震观测剖面揭示了龙门山断裂带下方存在Moho不连续及突然变高的地壳 V_p/V_s[23,24], 区域速度结构研究同样显示出该区域下方有明显的速度变化[25], 给出了深部结构的地震学证据. 基于历史与现今地震活动及构造特征, 研究认为在 2008 年之前至少 1100 年里, 龙门山断裂带未发生震级≥7.0 的地震, 因而相对其南、北两侧的其他活动断裂带形成一个地震空区, 2008 年汶川 M_s8.0 地震就发生在这个空区中[26]. 汶川地震发生之后, 由于青藏块体东部松潘-甘孜地块持续的向东推挤, 研究人员已经关注到龙门山断裂带尚未破裂的南段具有破裂的危险性. 芦山地震的发生, 减小了在龙门山断裂带南段发生 7 级以上地震的可能性, 但依然要关注在这个“破裂空段”再次发生破裂的危险性.

5 讨论与结论

通过对龙门山断裂带上汶川地震和芦山地震的余震活动及剪切波分裂研究, 给出了关于震源位置[19,27]及应力环境的信息[8,10,14,28], 本文的分析显示, 在芦山地震震中沿着龙门山断裂带向西南方向, 到与鲜水河断裂带、安宁河断裂交汇区附近, 区域主压应力从近 NW 方向, 变为近 EW 方向. 这种应力方向的空间变化, 揭示了深部构造运动的信息, 进一步的研究需要加强.

芦山地震发生在龙门山断裂带的南段, 芦山地震发生后与汶川地震破裂区之间形成了一个长约 60 km 的“破裂空段”. 在这个空段区域内, 虽然 1970 年曾发生过一个 6.2 级地震, 至今已 40 多年, 芦山地震的余震重新定位显示, 芦山地震的发生依然没有与汶川地震的破裂区贯通. 当前关注芦山地震与汶川地震的“破裂空段”的应力变化, 加强对龙门山断裂带南段的各种监测, 具有积极的现实意义和科学意义.

研究已经表明, 地壳剪切波分裂是一个有效监控地震活动导致应力变化的手段[29~31], 但该方法使用的数据源是小地震激发的地震波, 严重依赖于台站附近大量小地震的存在, 因此更为有效的方法是采用井下人工源和井下记录的井间观测, 即应力监控站(Stress-monitoring Sites)技术[30,31]. 在美国圣安德列斯断层上的研究也发现, 通过井下连续激发, 记录并测量出小震前的波速变化[32], 这是另一个可尝试的可控源井下测量应力变化的有效方法. 虽然这两种井下观测方法都需要有足够的经费支持才能开展, 但加强重点地区应力变化和波速变化的监测需要引起足够的重视.

青藏东缘和东南缘是地震活动频繁的区域, 为了更好的监控地下应力及速度结构的微小变化、深化对孕震构造和地震震源的研究, 在该地区选择合适的断裂带或构造区并实施井下可控源的研究计划, 将会促进相关科学问题的深入研究.

致谢 芦山地震余震定位所用资料来自中国地震台网中心(CENC)、中国地震局参加芦山地震的流动地震观测的各研究单位. 感谢地震应急系统的资料共享机制.

参考文献

1 Gao Y, Wu Z L, Liu Z, et al. Seismic source characteristics of nine strong earthquakes from 1988 to 1990 and earthquake activity since 1970 in the Sichuan-Qinghai-Xizang (Tibet) zone of China. Pure Appl Geophy, 2000, 157: 1423–1443

2 高原, van der Lee S, Giardini D, 等. 使用振型叠加方法研究 1997 年 11 月 8 日西藏玛尼地震震源机制. 地球物理学报, 2001, 44(增刊): 98–106

3 Zhang Z J, Deng Y F, Liu C, et al. Seismic structure and rheology of the crust under mainland China. Gondwana Res, 2013, 23: 1455–1483

4 Wang Z, Zhao D P, Wang J. Deep structure and seismogenesis of the north-south seismic zone in southwest China. J Geophys Res, 2010, 115: B12334, doi: 10.1029/2010JB007797

5 张忠杰, 陈赟, 田小波. 青藏高原东缘地壳上地幔结构及其动力学意义. 地质科学, 2009, 44: 1136–1150
6 雷建设, 赵大鹏, 苏金荣, 等. 龙门山断裂带地壳精细结构与汶川地震发震机理. 地球物理学报, 2009, 52: 339–345
7 Zhang Z, Deng Y, Teng J, et al. An overview of the crustal structure of the Tibetan plateau after 35 years of deep seismic soundings. J Asian Earth Sci, 2011, 40: 977–989
8 张永久, 高原, 石玉涛, 等. 四川区域地震台网的剪切波分裂研究. 地震学报, 2008, 30: 123–134
9 高原, 石玉涛, 梁维, 等. 剪切波分裂系统分析系统 SAM(2007)——软件系统. 中国地震, 2008, 24: 345–353
10 石玉涛, 高原, 赵翠萍, 等. 汶川地震余震序列的地震各向异性. 地球物理学报, 2009, 52: 398–407
11 高原, 吴晶. 利用剪切波各向异性推断地壳主压应力场——以首都圈地区为例. 科学通报, 2008, 53: 2933–2939
12 Gao Y, Wu J, FukaoY, et al. Shear-wave splitting in the crust in North China: Stress, faults and tectonic implications. Geophys J Int, 2011, 187: 642–654
13 Gao Y, Shi Y T, Wu J, et al. Shear-wave splitting in the crust: Regional compressive stress from polarizations of fast shear-waves. Earthquake Sci, 2012, 25: 35–45
14 石玉涛, 高原, 张永久, 等. 松潘-甘孜地块东部, 川滇地块北部与四川盆地西部的地壳剪切波分裂. 地球物理学报, 2013, 56: 481–494
15 Waldhauser F, Ellsworth L W. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California. Bull Seism Soc Amer, 2000, 90: 1353–1368
16 赵博, 高原, 石玉涛. 华北地区小震精定位及其构造意义. 地震, 2013, 33: 12–21
17 Zhao B, Shi Y T, Gao Y. Seismic relocation, focal mechanism and crustal seismic anisotropy associated with the M_S7.1 Yushu earthquake and its aftershocks. Earthquake Sci, 2012, 25: 111–119
18 高原, 周蕙兰, 郑斯华, 等. 测定震源深度的意义的初步讨论. 中国地震, 1997, 13: 321–329
19 Zhao B, Shi Y T, Gao Y. Relocation of aftershock of the Wenchuan M_s8.0 earthquake and its implication to seismotectonics. Earthquake Sci, 2011, 24: 107–113
20 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: 地球科学, 2008, 38: 1186–1194
21 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: 1403–1410
22 江在森, 方颖, 武艳强, 等. 汶川 8.0 级地震前区域地壳运动与变形动态过程. 地球物理学报, 2009, 52: 505–518
23 Zhang Z, Wang Y, Chen Y, et al. Crustal structure across Longmenshan fault belt from passive source seismic profiling. Geophys Res Lett, 2009, 36: L17310, doi: 10.1029/2009GL039580
24 Zhang Z, Yuan X, Chen Y, et al. Seismic signature of the collision between the east Tibetan escape flow and the Sichuan Basin. Earth Planet Sci Lett, 2010, 292: 254–264
25 Lü Y, Zhang Z, Pei S, et al. 2.5-Dimensional tomography of uppermost mantle beneath Sichuan-Yunnan and surrounding regions. Tectonophysics, 2013, doi: 10.1016/j.tecto.2013.03.008
26 闻学泽, 张培震, 杜方, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震发生的历史与现今地震活动背景. 地球物理学报, 2009, 52: 444–454
27 张瑞青, 吴庆举, 李永华, 等. 汶川中强余震震源深度的确定及其意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 1234–1241
28 丁志峰, 武岩, 王辉, 等. 2008 年汶川地震震源区横波分裂的变化特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 1600–1604
29 Gao Y, Crampin S. Observations of stress relaxation before earthquakes. Geophys J Int, 2004, 157: 578–582
30 Gao Y, Crampin, S. Shear-wave splitting and earthquake forecasting. Terra Nova, 2008, 20: 440–448
31 Crampin S, Gao Y, Peacock S. Stress-forecasting (not predicting) earthquakes: A paradigm shift? Geology, 2008, 36: 427–430
32 Niu F, Silver P, Daley T, et al. Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site. Nature, 2008, 454, doi: 10.1038/nature07111