



2008年汶川8.0级特大地震孕育和发生的多单元组合模式

张培震, 闻学泽, 徐锡伟, 甘卫军, 王敏, 沈正康, 王庆良, 黄媛, 郑勇, 李小军, 张竹琪, 马胜利, 冉勇康, 刘启元, 丁志峰, 吴建平

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;

四川省地震局, 成都 610041;

中国地震局第二形变监测中心, 西安 710054;

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077;

中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080

E-mail: peizhen@ies.ac.cn

2009-03-06 收稿, 2009-03-24 接受

国家重点基础研究发展计划(编号: 2004CB418400)、国家自然科学基金(批准号: 40841013)、财政部和中国地震局汶川地震科学考察专项经费、中国地震局地质研究所基本科研业务费、地震动力学国家重点实验室基金(编号: LED2008A01)资助项目

摘要 2008年5月12日四川省汶川县境内发生8.0级特大地震. 这次逆冲型地震发生在大陆内部的高角度逆冲断裂之上, 与有历史记载以来所发生的逆冲型特大地震是不同的. 通过对汶川地震的地表破裂、震源机制、余震定位、地震破裂过程、同震地壳形变、强地面运动等的综合研究, 认为汶川特大地震的孕育和发生是3个地质单元共同作用的结果. 川西高原作为变形单元震前发生长期持续的变形, 并且将变形转换为积累在龙门山断裂带的应力; 龙门山断裂带作为闭锁单元震前变形缓慢但积累很大的应力, 当其超过断裂的摩擦强度或岩体的破裂强度时就突突破裂, 形成地震, 释放出巨大的能量; 四川盆地作为支撑单元对川西高原和龙门山的向东运动产生阻挡, 是汶川地震孕育不可缺少的元素. 汶川地震的孕育和发生可以用多单元组合模型来理解.

关键词

汶川地震
多单元组合模式
龙门山断裂
地震破裂
地震机理

2008年5月12日发生在四川省汶川县境内的8.0级特大地震引起了国内外地球科学界的广泛关注, 除了地震造成的重大人员伤亡和经济损失之外, 地震揭示出的诸多新自然现象和新科学问题也是有地震历史记载以来所未见的. 就地震发生机理而言, 新现象揭示的新问题至少表现在3个方面.

第一, 世界上绝大多数逆冲型8级以上强震主要发生在海洋板块边界的俯冲带上, 或发生在大陆碰撞的低倾角($<20^\circ$)逆冲推覆断裂带上. 例如, 1960智利大地震^[1]、1964年阿拉斯加大地震^[2]、2004年印尼苏门答腊大地震^[3,4]是发生在海洋板块俯冲带的巨大地震,

而发生在喜马拉雅南坡的3次8级以上强震则是板块碰撞带上的低倾角($<20^\circ$)逆冲型地震^[5-7]. 汶川地震地表破裂带在近地表处的倾角是 $70^\circ\sim 80^\circ$, 近震源处(15~19 km)倾角是 $30^\circ\sim 60^\circ$, 是有地震历史记载以来首次发生在大陆内部的高角度逆冲型8级强震.

第二, 世界上绝大多数逆冲型8级以上强震发生在滑动速率大于 ~ 20 mm/a的巨型断裂带上, 例如控制1960智利、1964年阿拉斯加和2004年印尼苏门答腊大地震的板块边界带俯冲速度分别是 ~ 100 、 ~ 80 和 ~ 70 mm/a; 喜马拉雅南坡的3次8级以上强震发生在喜马拉雅主逆冲推覆带(Main Himalayan Thrust

引用格式: 张培震, 闻学泽, 徐锡伟, 等. 2008年汶川8.0级特大地震孕育和发生的多单元组合模式. 科学通报, 2009, 54(7): 944-953

Zhang P Z, Wen X Z, Xu X W, et al. Tectonic model of the great Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China (in Chinese). Chinese Sci Bull (Chinese Ver), 2009, 54(7): 944-953

Fault), 其滑动速率为 ~ 20 mm/a^[5-8]. 控制汶川地震发生的龙门山断裂带的滑动速率不到 3 mm/a, 其中映秀-北川断裂的滑动速率只有不到 1 mm/a^[9-14]. 所以, 汶川地震又是有历史记载以来首例发生在大陆内部低滑动速率断裂上的逆冲型 8 级强震.

第三, 地震发生机理的研究表明(例如Scholz^[15]), 强震是应变在活动断裂带高度积累, 超过断裂摩擦强度时, 突发破裂和能量释放的结果. 对于走滑断裂而言, 强震发生在应变积累最大的发震断裂带上, 例如美国的San Andreas断裂^[16,17], 中国的鲜水河断裂^[18]. 对低角度逆冲推覆带而言, 喜马拉雅主逆冲推覆带 8 级强震应变状态的研究表明^[5-7], 大约一半的震前水平变形和应变发生在闭锁段, 另一半发生在脆-韧转换段, 垂直变形则主要发生在脆-韧转换段. 但汶川地震的发震断裂——龙门山断裂的震前和同震应变图像却有很大的不同. 震前形变观测表明整个龙门山断裂带的应变速率很低, 变形主要发生在龙门山断裂带以西的川西高原; 而同震变形则主要发生在龙门山断裂带上. 因而, 汶川地震的应变积累和释放过程与其他 8 级以上逆冲型强震是不同的.

上述 3 个新现象表明汶川地震孕育和发生的机理与其他特大逆冲型地震可能是不同的. 有关汶川地震的地表破裂^[19-23]、震源机制^[24]、余震定位^[25,26]、地震破裂过程^[27,28]、同震地壳形变^[29]、强地面运动^[30]等已有专门的文章论述, 本文基于对 2008 年汶川地震科学考察和前人的有关研究结果, 提出汶川地震孕育和发生的多单元组合模式, 解释震前和震时发生的构造变形过程, 试图理解和认识汶川地震的形成机理.

1 多单元组合孕震模式

5.12 汶川大地震是龙门山断裂带的映秀-北川断裂突发错动的结果. 龙门山逆冲断裂带是青藏高原和华南地块的边界构造带, 经历了长期的地质演化, 具有十分复杂的地质结构和演化历史^[9,31-39]. 晚新生代以来, 在青藏高原向东扩展的推挤和四川盆地(华南地块)的阻挡作用下, 使得中生代形成的逆冲断裂复活, 并发生强烈的隆升作用. 晚第四纪以来活动的龙门山断裂带主要由 3 条具有发生强烈地震能力的主干断裂所组成^[9,31-33](图 1 和 2): 西边一条是汶川-茂县断裂(后山断裂), 大体上沿汶川到茂县的高深峡谷延伸, 这次地震时没有发生破裂, 但滑坡等地质灾

害十分严重; 中间的一条是映秀-北川断裂(中央断裂), 沿映秀-北川-平通-石坎展布, 连续性较好, 是 2008 年 8.0 级地震的主要发震断裂; 东边的一条叫灌县-江油断裂(前山断裂), 沿龙门山与成都平原交界附近分布, 这次地震形成了 73 km 长的地表破裂. 除此之外, 在成都平原内部靠近山前的地方, 还发育一系列断续分布的隐伏断裂, 但他们规模有限、位移量较小, 尚未形成明显的地貌现象^[40]. 深部地球物理勘探还揭示了成都平原之下 5~6 km 深处的中生代低角度逆冲推覆带, 该带在成都平原以东的龙泉山出露地表(图 1 和 2), 中等强度的历史地震表明其具有一定的活动性, 但不具备发生 7 级以上强震的构造条件^[9,39,41]. 综合分析各种地质、地貌、地球物理和大地测量资料^[10-14,33-38,42,43]表明, 青藏高原东缘和四川盆地之间的构造变形主要沿着由 3 条主干断裂组成的龙门山断裂带发生, 山前隐伏断裂和龙泉山推覆断裂目前还属于受龙门山主断裂带变形影响的次级活动构造.

地震发生后的地震地质考察表明^[19-23], 沿映秀-北川断裂形成了长达 240 km 的地表破裂带. 该带从映秀镇以南开始向东北方向延伸, 经北川县城, 过南坝镇, 终止在平武县的石坎乡附近, 以逆冲断裂为主兼具右旋走滑, 水平走滑分量向北逐渐增大, 在接近北端部位以走滑为主, 断裂面向北西方向倾斜, 倾角较陡, 往往在 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 之间, 观测到的地表最大垂直位移和右旋水平位移分别为 (9.0 ± 0.5) 和 (4.9 ± 0.5) m^[44]. 另外, 龙门山与成都平原交界的灌县-江油断裂也发生了 73 km 长的破裂, 以逆冲断裂为主, 最大垂直位移约为 (3.5 ± 0.5) m^[19-23]. 陆内逆冲型大地震产生多条大型地表破裂带的是非常罕见的^[21], 这可能与两个因素有关: 一是龙门山断裂带所积累的高应力; 二是龙门山地区在中生代造山过程中形成的大量断裂面或软弱面.

通过对震前与震后地震地质、形变测量、地震活动、震源机制等方面的深入研究, 发现 2008 年汶川 8.0 级特大地震孕育和发生不仅仅是其发震断裂——龙门山断裂带应变积累和突发破裂的结果, 而是不同力学性质、不同变形方式的多个地质单元相互作用的结果. 青藏高原内部地壳物质向东扩展, 由于受到四川盆地强硬地壳的阻挡, 中下地壳物质以塑性流变的方式在龙门山及其以西川西高原之下堆积, 并有可

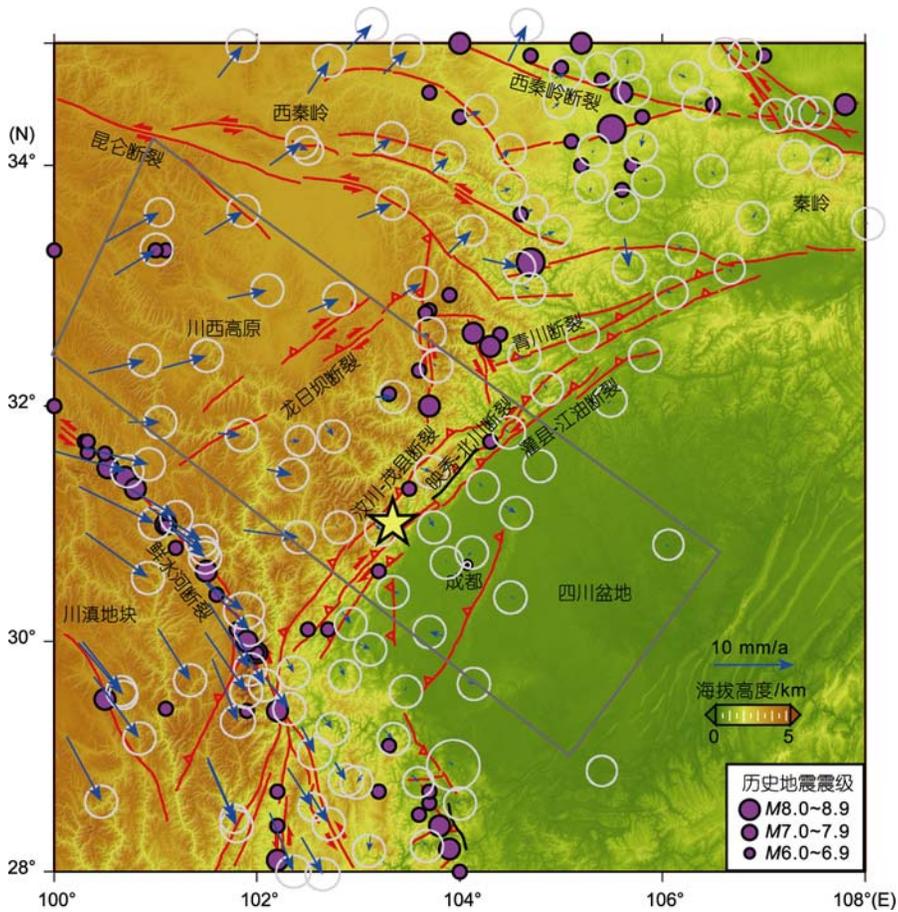


图1 南北地震带中段及龙门山地区活动构造图

黄色五角星代表2008年汶川8.0级特大地震的震中位置。蓝色箭头是相对于稳定华南地块(或四川盆地)的GPS运动速度。龙门山断裂带由汶川-茂县、映秀-北川和灌县-江油3条断裂所组成。灰色矩形框是图3、5和6的大体范围

能向四川盆地以北和以南的地区“流出”^[35,45]，导致川西高原中下地壳的显著增厚，并对上部脆性地壳施加垂直隆升作用；而上部脆性地壳的运动发生三维分解，垂向上造成龙门山和川西高原的隆升，水平方向上向北东方向运动，表现为平行于龙门山断裂的右旋剪切和垂直于龙门山断裂的挤压缩短。所以从大尺度的区域构造上看，汶川特大地震是在青藏高原向东扩展而产生的类似于纯剪切的应变状态下孕育和发生的。

与以往认识到的单条断裂的孕震方式不同，汶川地震孕育和发生涉及3个地质单元：川西高原由于地壳结构的软弱^[34,42]而发生强烈震前变形，是孕震的变形单元；龙门山断裂带的组成物质强度很高、断裂产状不利于滑动^[20,32]，震前的变形很缓慢，但能够积累很高的应力，是孕震的闭锁单元；四川盆地由于

刚性好不易变形而对青藏高原的向东扩展起着阻挡作用，是孕震的支撑单元(图2(a))。

在震前变形期间，作为变形单元的川西高原发生持续的右旋走滑、水平挤压和垂直隆升作用，除本身遭受应变和发生变形之外，还持续不断地将变形转换为应力而转移到龙门山断裂带。龙门山断裂带由于本身的高强度和闭锁，不发生或只发生缓慢的变形和运动，导致震前观测到的活动水平很低，但应力高度积累；当积累的应力超过断裂的摩擦强度或岩体的破裂强度时就突发破裂，形成长达340多公里长的破裂带(余震带)，释放出巨大的能量，形成特大地震；地震产生的同震形变既有很大的垂直抬升，又有右旋水平走滑，还有一定的水平缩短；所以龙门山断裂带又是汶川地震的破裂单元(图2(b))。作为支撑单元的四川盆地一直起着阻挡作用，不论是震前还

是震时都很稳定,是造成龙门山断裂带闭锁和高应力积累的必要条件.汶川地震的孕育和发生正是这3个单元相互作用的结果,可以用多单元组合模式来理解(图2).

多单元组合孕震模式要求不同的单元在震前和震时具有不同的变形状态.震前态:震前变形主要发生在变形单元(川西高原),闭锁单元(龙门山断裂带)只发生缓慢的变形和运动,支撑单元由于起着阻挡作用而与闭锁单元之间几乎不发生相对运动或变形(图2(a)).震时态:地震时的同震变形主要发生在闭锁单元(也是破裂单元)的龙门山断裂带内部,向两侧的变形单元和支撑单元衰减非常迅速(图2(b)).龙门山断裂带震前的构造变形图像和汶川地震同震变形的特征支持上述不同单元在震前和震时的不同变形状态.

2 震前变形状态

2.1 闭锁单元

地震地质研究表明,龙门山断裂的晚更新世以来(万年尺度)的活动强度相对较低.汶川-茂汶断裂全新世逆冲滑动速率为0.5~0.7 mm/a,晚更新世以来右旋走滑速率0.8~1.0 mm/a^[46,47],映秀-北川断裂垂直滑动速率1 mm/a,灌县-江油断裂活动水平与之相当^[9,48].龙门山构造带北段断裂在早、中更新世均发生过活动,但在晚更新世以来,尤其在晚更新世中期以来已不再活动^[49].上述研究结果与Densmore等人^[12]和Zhou等人^[13]近期得到的映秀-北川断裂0.3~0.6 mm/a逆冲速率和大约1.0 mm/a右旋走滑速率以及灌县-江油断裂约0.2 mm/a逆冲速率是一致的.所以,整个龙门山断裂带的滑动速率不超过2~3 mm/a.

历史记载及现代仪器记录表明龙门山断裂带发生过5次6级以上强震,分别是1970年2月24日大邑西6.3级、1958年2月8日北川6¹/₄级、1941年宝兴西6级、1657年4月21日汶川6¹/₂级和1327年天全西6级地震,没有记录到7级以上历史地震的发生^[18,46,50].除著名水利工程都江堰有2260余年的历史之外,成都平原最早的有感地震文字记载始于263 AD,自那时以来成都以及附近的地震文字记载从未间断,至少在2008年之前的1700多年中,龙门山断裂带中段地区不会漏记M₇的地震^[18,50].这种千年尺度的低历史地震活动水平支持龙门山断裂带全新世滑动速率低的地震地质研究结果.

GPS观测到的十年尺度的地壳变形支持地震地质和历史地震的研究结果.图3是横跨龙门山断裂的GPS速度剖面,将垂直和平行龙门山断裂的速度分量分别投影在剖面上,水平走滑和缩短分量跨过整个龙门山断裂带均在~2 mm/a的误差范围之内,不仅各断裂本身和整个断裂带的滑动速率很小,而且龙门山和四川盆地之间几乎不发生相对运动.这一结果与前人的研究结果完全一致^[10,11,51-54],表明GPS观测到的10 a时间尺度的现今滑动速率不超过约2 mm/a.

上述万年尺度的地震地质研究、千年尺度的历史地震研究和十年尺度的GPS形变测量研究均表明龙门山断裂带活动速度确实很低.南北地震带主要历史强震均发生在活动速度很大的断裂上,例如鲜水河断裂的滑动速率为(10.0±1.0) mm/a,过去的400年里发生过10次7级以上强震^[55];龙门山断裂以北的昆仑断裂的滑动速率为10~12 mm/a,以南的小江断裂具有8~10 mm/a的滑动速率,都分别控制了一系列7级以上历史强震的发生^[50].所以,龙门山断裂震前的较低变形速度实际反映了其处于闭锁状态.

2.2 变形单元

龙门山断裂以西的川西高原活动断裂不甚发育,Shen等人^[11]最先通过GPS测量发现了川西高原内部龙日坝断裂的存在(图1),并报道了5~6 mm/a的右旋走滑速率.徐锡伟等人^[56]通过野外调查证实了该断裂的存在,指出其右旋走滑速率约4.6 mm/a,地壳缩短速率约0.5 mm/a.这表明川西高原(变形单元)的震前万年尺度的活动速度大于龙门山断裂带.

由于川西高原的人烟稀少,历史地震的记录时间只能追溯到有仪器记录以来,期间没有发生7级以上地震^[50].同样由于人烟稀少的原因,川西高原上的地震台站相对于四川盆地十分稀少,不能记录中小地震活动的完整图像.尽管如此,川西高原还是显示了很强的中小地震活动性^[50],特别是在马尔康到阿坝一带还是记录到了中小地震集中分布,表明川西高原具有相当强度的中小地震活动性.

图3是相对于华南活动地块、垂直与龙门山断裂的GPS速度剖面,不论是垂直于龙门山断裂的水平缩短分量还是平行于龙门山断裂的水平右旋走滑分量都揭示了川西高原震前遭受着明显的、连续的变形和应变.第一,川西高原的水平缩短速率为4~5 mm/a,右旋走滑速率9~11 mm/a;第二,水平缩短和右旋走滑分布在500 km宽的整个川西高原;第三,速度剖

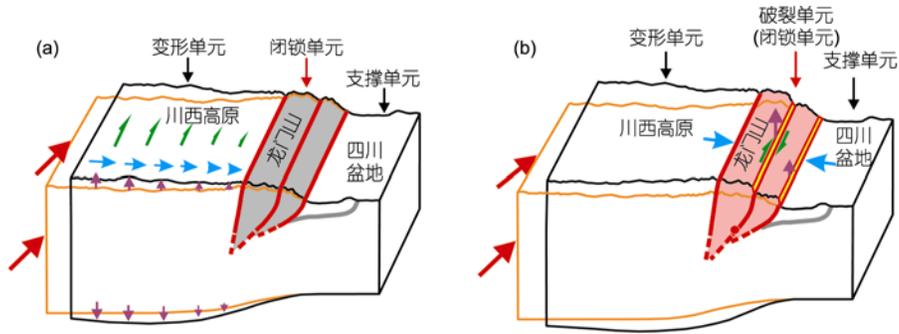


图2 汶川地震孕育和发生的多单元组合模式卡通图

橙色线条是变形之前的示意模型，黑色线条模型是震前变形和同震变形的状态示意。四川盆地之下的灰色线条代表中生代低角度逆冲推覆带，其现今构造活动性不强。(a)是震前变形状态，在青藏高原向东推挤和四川盆地的阻挡下，变形单元的川西高原发生右旋走滑、水平缩短和垂直增厚-隆升作用；龙门山断裂带由于高强度组成物质和不利于滑动的断裂产状而发生闭锁，变形缓慢但应力高度积累；四川盆地对上述变形起着支撑作用。(b)是同震变形状态，断裂错动、能量释放、地表破坏等都发生在震前变形缓慢的闭锁单元——龙门山断裂带，因而它又是汶川地震的破裂单元；四川盆地和川西高原几乎不发生同震变形

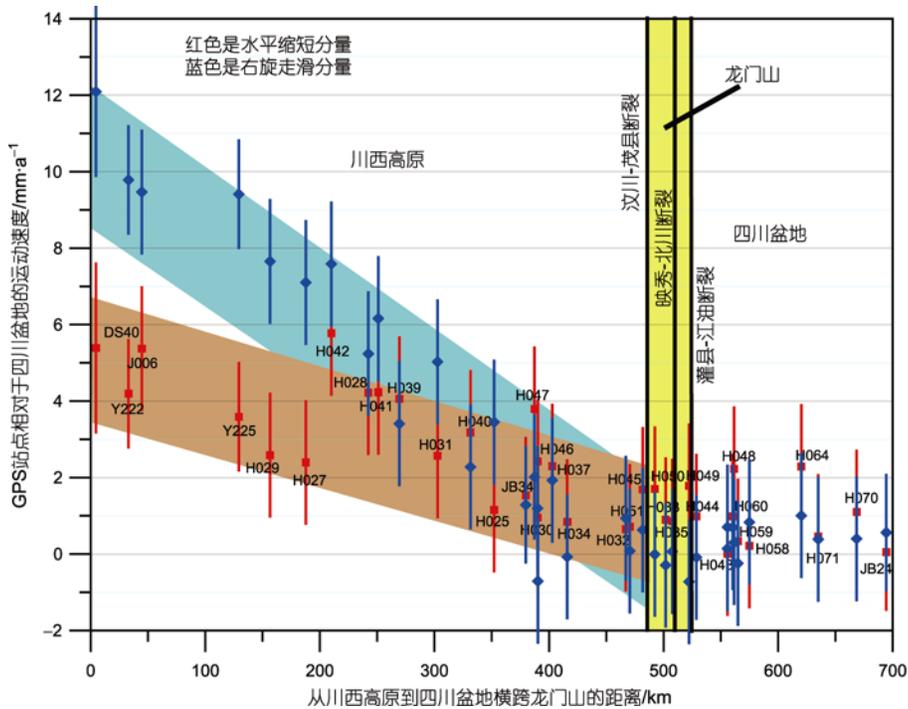


图3 横跨龙门山断裂的GPS速度场揭示的川西高原、龙门山和四川盆地的震前变形状态

所有的GPS速度都相对于稳定的华南地块。红色方块是垂直于龙门山断裂的水平缩短分量，蓝色菱形是右旋走滑分量

面大体上的线性梯度表明川西高原的变形和应变是准均匀的。除此之外，从阿坝到成都的水准测量表明，震前整个川西高原相对于成都盆地的上升速率为准均匀的 2~3 mm/a，而龙门山震前相对于成都平原的上升则不到 1 mm/a (王庆良私人交流, 2008)。由于水准复测时间间隔太长、标墩间隔太远、处理方法尚待改进等原因，上升速率具有较大的不确定性，但从定

性的角度还是能够说明川西高原的震前变形比龙门山和四川盆地要大得多的事实。

看来川西高原震前经历着强烈的变形，不仅其幅度远大于龙门山断裂带的变形，而且在空间上似乎是连续地分布在宽达 500 km 的整个川西高原。Helley 等人^[57]的研究表明，如果地壳的流变强度低(软弱)，地表观测到的变形就会均匀地分布在宽阔的

地区;反之当中下地壳流变强度高(强硬)的话,地表观测到的变形就会集中在断裂附近.图3所示的应变分布表明中下地壳可能是软弱的,与地震波反演的结果一致^[42,43].地壳结构和性质使得川西高原在汶川地震的孕育过程中能够、也确实扮演了“变形单元”的角色.

2.3 支撑单元

作为中生代的前陆盆地,四川盆地的上部地壳由数千米厚的沉积地层所构成,并遭受了广泛的褶皱和冲断作用^[39,58],但晚新生代以来的构造活动微弱,不发育活动断裂和6级以上强震,GPS速度场表明其作为华南刚性地块的组成部分不存在差异运动(图3).各种深部地球物理探测也表明四川盆地作为华南活动地块的一部分,地壳“冷”、“硬”、“薄”、不发育“低速”“高导”层、不存在新生代岩浆活动^[34,42,43,55],可以视为强度大、稳定性好、不易变形的刚性地块.在汶川地震的孕育过程中,四川盆地对川西高原的向东扩展和龙门山断裂带的向东运动形成阻挡作用,造成了川西高原的应变积累和龙门山断裂带的应力积累,是地震孕育和发生不可缺少的支撑单元(图2).

3 震时变形状态

在汶川地震发生的过程中,变形单元和支撑单元本身不发生明显的同震变形,只是受到破裂单元所产生震动的强烈影响.汶川地震的同震破裂和变形主要沿龙门山断裂带发生,向支撑单元的四川盆地和变形单元的川西高原迅速衰减.本节仅重点论述作为闭锁单元或破裂单元的龙门山断裂带同震变形的主要特征.

汶川地震震中烈度高达Ⅷ度,汶川县映秀镇、北川县县城和陈家坝乡等处于Ⅷ度区内,遭受了毁灭性破坏.烈度等震线沿龙门山断裂延伸,向两侧迅速衰减(图4).Ⅷ度区由两个中心呈长条状区域组成,其中映秀Ⅷ度区长轴约66 km,短轴约20 km;北川Ⅷ度区长轴约82 km,短轴约15 km;Ⅷ度区沿北川-映秀断裂分布,呈北东向狭长展布,长轴约224 km,短轴约28 km.极震区(Ⅷ度区)长宽之比为8:1,向两侧衰减之迅速,在国内外同等震级地震灾害中是罕见的^[30],也说明了地震破坏主要发生在作为闭锁单元的龙门山断裂带内部(图4).

余震的空间分布在很大程度上反映了地震的破

裂范围,但余震的定位误差(特别是深度的精度)往往影响对同震破裂图像的正确认识,因而必须对余震序列进行重新精确定位.黄媛等人^[25]对2706个余震事件进行了精确定位.重新定位进行3方面的改进:(1)改进双差定位方法^[59]使其能够使用深度敏感的震相;(2)增加了流动地震台站的近台数据,更好地控制震源深度;(3)龙门山断裂带东西两侧采用了不同的速度模式,减少地壳和上地幔速度结构巨大横向差异的影响.重定位后E-W, N-S和U-D三个方向大致的定位精度分别为0.6, 0.7和2.5 km,基本可以满足地震构造分析的需求.定位结果显示,余震主要集中在龙门山断裂带映秀-北川断裂和汶川-茂县断裂之间,总长度约340 km(图4).余震震源深度的优势分布在5~20 km之间,深度剖面图像显示余震分布表现出高角度西倾的特点,绝大多数余震位于3条断裂所夹持的龙门山断裂带内部,不仅表明断裂带结构对余震活动的控制作用^[25],还表明形成余震的震后微破裂主要发生在震前应力高度积累的闭锁单元内部(图4).

中国强震动观测台网系统中有460个固定自由场强震动观测台站获得了汶川8.0级特大地震的强震动加速度记录,共获得主震记录约1310条,其中地震动峰值加速度大于 200 cm/s^2 的42条、大于 400 cm/s^2 的16条、大于 600 cm/s^2 的7条,最大峰值加速度 957.7 cm/s^2 ,同时多个近断层观测点记录的竖向峰值加速度值大于其一个或两个水平向的值^[30].初步分析表明^[30],地震动峰值加速度东西向值多数比南北向值大,上盘值普遍比下盘值大;较大的地震动峰值加速度沿断裂带两侧分布,断层破裂传播前进方向位置的地震动峰值加速度值普遍比较大.图5是垂直于龙门山断裂带方向的强震动峰值加速度剖面,除了极少数台站之外,大多数大于 400 cm/s^2 的峰值加速度的台站都位于闭锁单元的龙门山断裂带之内,其量值高出龙门山断裂带以外台站一倍以上.与烈度分布和余震图像一样,强震动加速度进一步证明了作为闭锁单元或破裂单元的龙门山断裂带确实是汶川地震的主能量释放单元.

GPS揭示了5.12汶川大地震产生的大区域水平同震位移场^[29],其最显著的特征是以龙门山断裂带为核心的相向运动和地壳缩短,断裂以西的所有站点都向东运动,而以东的所有站点都向西运动,在龙门山断裂带形成强烈的地壳水平方向的缩短(图6).这一观测事实表明汶川地震是一次以逆冲为主的地

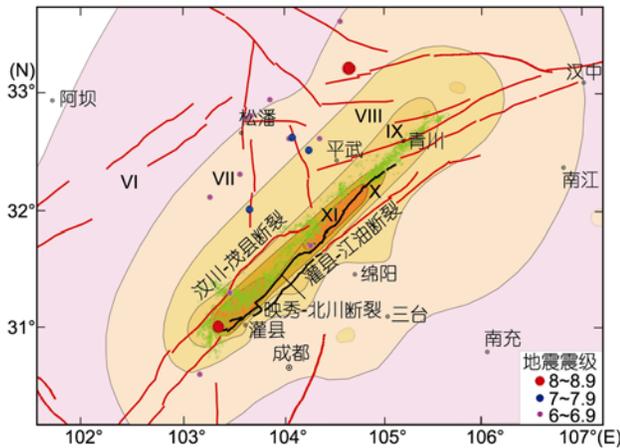


图4 川西地区主要活动断裂、2008年汶川8.0地震烈度等震线和余震分布

红色粗线条是活动断裂，黑色粗线条是汶川地震的地表破裂带。绿色圆圈是重新定位后的余震分布

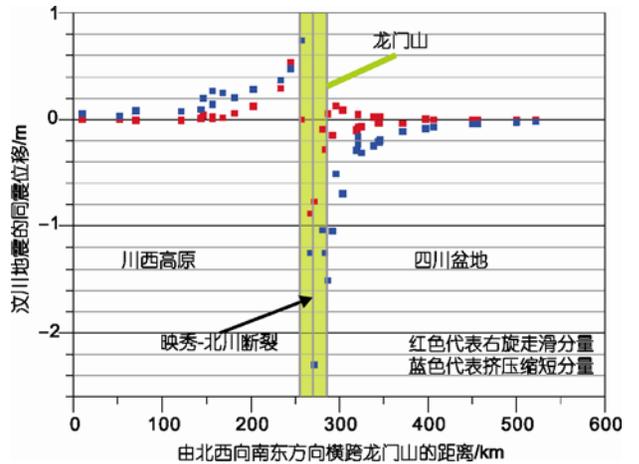


图6 由北西向东南横跨龙门山断裂的剖面显示汶川8.0级地震GPS同震位移值

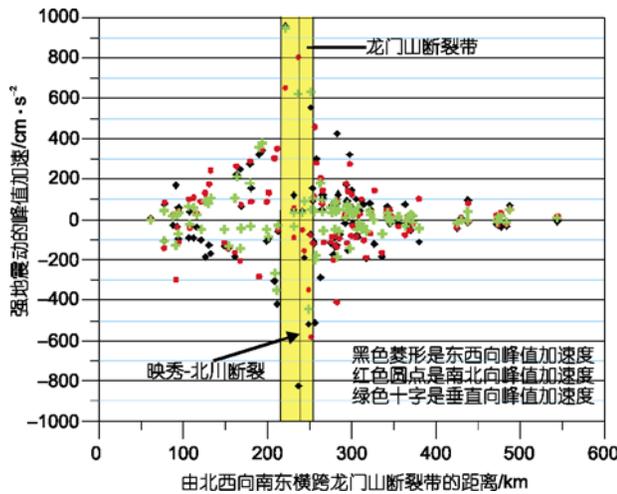


图5 由北西向东南横跨龙门山断裂的剖面显示汶川8.0级地震强地震动峰值加速度值

震，与地表地质考察和震源机制解的结果也是相符的。另外，5.12汶川大地震的同震位移集中发生在以龙门山断裂带为中心的震中区范围内，离开断裂带便很快衰减。但是，青藏高原东缘的向东运动幅度大于四川盆地向西的运动幅度，或同震位移在距映秀-北川断裂的相同距离处向西衰减得慢，向东衰减得快(图6)。

InSAR数据分析表明^[60,61]，大体上从映秀镇沿龙门山断裂带到青川县出现了一条无干涉条纹的非相干条带，长230 km，与地表地质考察发现的地表破裂带的位置相吻合，这可能是由于断层两侧出现较大位移和变形所造成的。另外，该非相干条带南段

宽度约为50 km左右，与龙门山断裂带的宽度相当，北段变窄只有10~20 km。因而可初步断定InSAR揭示的垂直同震形变限于龙门山断裂带内的较窄区域，也就是环绕去相干条带的干涉条纹区域，而在四川盆地和川西高原的同震变形相对微弱。

综上所述，龙门山断裂带震前表现为闭锁单元，发生缓慢的变形，但积累很高的应力(图2(a))。当积累的应力超过龙门山断裂带所能够承受的摩擦强度时，就突发破裂产生地震，释放出长期积累的能量，所以它又是汶川地震的破裂单元(图2(b))。

4 结论与讨论

汶川特大地震的孕育和发生是3个地质单元共同作用的结果，川西高原作为变形单元震前发生明显的变形，并且将变形转换为积累在龙门山断裂带的应力；龙门山断裂带作为闭锁单元震前变形缓慢但积累很大的应力，地震时发生破裂释放出长期积累的应力；四川盆地作为支撑单元对川西高原和龙门山的向东运动产生阻挡，是汶川地震孕育不可缺少的元素。这种多单元组合孕震的模式及其所产生的应力应变场演化为地震科学和防震减灾提出了许多新问题，也带来了许多新启示。

汶川地震孕育的多单元组合模式表明不同单元在不同时间的变形状态是不同的，认识汶川地震的孕育过程仅研究其发震断裂——龙门山断裂带是不够的，需要对3个不同的孕震单元都开展研究，才能获取完整可靠的信息和正确认识孕震过程。对于汶川地震这种多单元组合的孕震模式而言，震前的构

造变形主要发生在变形单元,再加上地震孕育的动力来源于西部的青藏高原向东的扩展,所以川西高原的变形应该最强烈,与地震有关的信息应该最丰富。闭锁单元震前表现为低滑动速率和缓慢应变积累,观测到的变形必然缓慢,与地震有关的信息究竟是什么还有待于进一步研究。所以,正确评价地震危险性还要求区域构造环境的综合研究,在充分理解构造变形模式的基础上,识别与地震孕育和发生有关的地质单元,特别是潜在的闭锁单元或闭锁构造。

如何来判断一个地区是否“闭锁单元”对于评价未来地震危险性非常重要,但这方面的研究的进展还相对缓慢。Avouac及其同事们^[5-8]对喜马拉雅主逆冲推覆带的系列研究提供了对低倾角逆冲断裂闭锁性质有益的探讨和启示。不同类型断裂的闭锁构造是不同的,通过对龙门山断裂带和汶川地震地表破裂带的研究,下面这些现象可能对于识别高倾角逆冲断裂“闭锁”是有借鉴意义的:(1)强烈区域构造变形背景下滑动缓慢的大型断裂;(2)在特定区域应力作用下不利于发生震间滑动的大型活动构造;(3)强度非常大、能够积累很高应力的逆冲席体(或断裂结构)。显然,研究不同类型断裂带的闭锁特性,建立一系列判别不同类型“闭锁单

元”或“闭锁段”的识别标志是一项非常重要的研究工作,有待于在今后的研究工作中重视和加强。

低估龙门山地震危险性的重要原因之一是其低滑动速率。前已述及,不同时间尺度、不同方法的研究均表明龙门山断裂带的滑动速率确实很低,但低滑动速率并不代表低地震危险性。因为断裂滑动速率反映的是长期和平均活动水平,与地震原地复发的时间和周期有关,低滑动速率的大断裂也有可能发生大地震,只不过其复发间隔可能更长。初步的古地震研究表明,龙门山断裂带的古地震可能具有特征地震的性质,汶川地震的原地复发周期可能是3000~5000 a^[12,14,34,62],但有关古地震的活动历史和活动习性方面的研究还在进行之中^[62]。龙门山断裂有文字记载以来没有记录到7级以上强震的原因很可能是由于历史地震记载时间短于强震复发周期。正确评价一条断裂(特别是重要边界断裂)的地震危险性仅仅靠断裂滑动速率和历史地震是不够的,还需要对该断裂的区域构造环境、构造变形方式、活动性质和历史、活动规模(长度和位移)、古地震活动历史和最近一次强震的离逝时间开展综合研究,才能更全面、更可靠评价一条断裂的地震危险性。

致谢 本文是中国地震局汶川地震应急和系统科学考察队的共同工作成果之一。感谢四川省地震局提供的各项后勤保障工作和在科学考察不同阶段提供的经费支持。感谢各位科考队员、驾驶员和志愿者,大家共同在艰苦的环境下冒着生命危险圆满地完成了科考任务。感谢四川省地震局漆桂理同志在后勤保障方面的辛勤工作。特别感谢二位匿名审稿专家和中国科学院青藏高原研究所刘静同志的建设性意见,使本文的考虑更周到,对科学问题的讨论更清楚。谨以此文悼念汶川地震中的遇难同胞。

参考文献

- 1 Kanamori H, Anderson D L. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull Seismol Soc Am*, 1975, 65: 1073—1096
- 2 Plafker G. Tectonics of the March 27, 1964, Alaska, earthquake. *US Geol Survey Prof Paper*, 1969, 543(1): 1—74
- 3 Lay T, Kanamori H, Ammon C, et al. The great Sumatra-Andaman earthquake of 26 December 2004. *Science*, 2005, 308(5725): 1127—1133[[doi](#)]
- 4 Ammon C, Ji C, Thio H, et al. Rupture process of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Science*, 2005, 308(5725): 1133—1139[[doi](#)]
- 5 Bilham R, Gaur V K, Molnar P. Himalayan seismic hazard. *Science*, 2001, 293: 1442—1444[[doi](#)]
- 6 Avouac J P. Mountain building, erosion, and the seismic cycle in the Nepal Himalaya. *Adv Geophys*, 2003, 46,[[doi](#)]
- 7 Bollinger L, Avouac J P, Cattin T, et al. Stress build up along the Himalayan Megathrust. *J Geophys Res*, 2003, 109: B11405,[[doi](#)]
- 8 Lave J, Avouac J P. Active folding of fluvial terraces across the Siwaliks Hills, Himalayas of central Nepal. *J Geophys Res*, 2000, 105: 5735—5770[[doi](#)]
- 9 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
- 10 Zhang P Z, Shen Z, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System data. *Geology*, 2004, 32: 809—812[[doi](#)]
- 11 Shen Z K, Lu J, Wang M, et al. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J Geophys*

- Res, 2005, 110: B11409, [\[doi\]](#)
- 12 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, [\[doi\]](#)
- 13 Zhou R, Li Y, Densmore A L, et al. Active tectonics of the Longmen Shan region of the eastern margin of the Tibetan plateau. *Acta Geol Sin*, 2007, 81: 593—604
- 14 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
- 15 Scholz C H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 439
- 16 Working Group on California Earthquake Probabilities. Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas fault. US Geol Surv Open-File Report, 1988. 88—398
- 17 Working Group on California Earthquake Probabilities. Probabilities of large earthquakes in the San Francisco Bay Region, California. US Geol Surv Open-File Report, 1990. 88—398
- 18 闻学泽. 四川西部鲜水河-安宁河-则木河断裂带的地震破裂分段特征. *地震地质*, 2000, 22(3): 239—249
- 19 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川MS8.0地震地表破裂带及其发震构造. *地震地质*, 2008, 30(3): 597—629
- 20 Xu Z H, Ji S H, Li H, et al. Uplift of the Longmen shang range and the Wenchuan earthquake. *Episodes*, 2008, 31: 291—301
- 21 刘静, 张智慧, 文力, 等. 汶川8级大地震同震破裂的特殊性及构造意义——多条平行断裂同时活动的反序型逆冲地震事件. *地质学报*, 2008, 82(12): 1707—1722
- 22 李海兵, 付小方, van der Woerd J, 等. 汶川地震(Ms 8.0)地表破裂及其同震右旋斜向逆冲作用. *地质学报*, 2008, 82(12): 1623—1643
- 23 付碧宏, 时丕龙, 张之武. 四川汶川Ms 8.0级大地震地表破裂带的遥感影像解译. *地质学报*, 2008, 82(12): 1679—1687
- 24 中国地震局地球物理研究所. 中国大陆部分5级以上地震震源机制解. <http://www.ccea-jgp.ac.cn/共享资源/中国大陆部分5级以上地震震源机制解.htm>
- 25 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: 地球科学*, 2008, 38(9): 1242—1249
- 26 吕坚, 苏金荣, 靳玉科, 等. 汶川8.0级地震序列重新定位及其发震构造初探. *地震地质*, 2008, 30(4): 917—924
- 27 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(10): 1186—1194
- 28 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
- 29 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组. GPS测定的2008年汶川Ms 8.0级地震的同震位移场. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(10): 1195—1206
- 30 Li X, Zhou Z, Huang M, et al. Preliminary analysis of strong-motion recordings from the magnitude 8.0 Wenchuan, China, earthquake of 12 May 2008. *Seismol Res Lett*, 2008, 79(6): 844—854 [\[doi\]](#)
- 31 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社, 1992. 1—60
- 32 许志琴, 李化启, 侯立玮, 等. 青藏高原东缘龙门山-锦屏造山带的崛起——大型拆离断层和挤出机制. *地质通报*, 2007, 26(10): 1262—1276
- 33 Burchfiel B C, Chen Z, Liu Y, et al. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions. *Int Geol Rev*, 1995, 37: 661—735
- 34 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): 4—11, [\[doi\]](#)
- 35 Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 1997, 276: 788—790 [\[doi\]](#)
- 36 Royden L, Burchfiel B C, van der Hilst R D. The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 2008, 321: 1054—1058 [\[doi\]](#)
- 37 Kirby E, Reiners P W, Krol M A, et al. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from ⁴⁰Ar/³⁹Ar and (U-Th)/He thermochronology. *Tectonics*, 2002, 21: [\[doi\]](#)
- 38 Kirby E, Whipple K, Harkins N. Topography reveals seismic hazard. *Nature Geosci*, 2008, 1: 1—3 [\[doi\]](#)
- 39 贾东, 陈竹新, 贾承造, 等. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育. *高校地质学报*, 2003, 9(3): 402—409
- 40 刘保金, 杨小平, 鄯少英, 等. 龙门山山前疑似汶川Ms8.0地震地表破裂的浅层地震反射调查. *地震地质*, 2008, 30(4): 909—916
- 41 王伟涛, 贾东, 李传友, 等. 四川龙泉山断裂带变形特征及其活动性初步研究. *地震地质*, 2008, 30(4): 968—979
- 42 刘启元, 李昱, 陈九辉, 等. 汶川Ms8.0地震: 地壳上地幔S波速度结构. *地球物理学报*, 2009, 52(2): 309—319
- 43 王椿镛, 楼海, 吕智勇, 等. 青藏高原东部地壳上地幔S波速度结构——下地壳流的深部环境. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(1): 22—32

- 44 冉勇康, 史翔, 王虎, 等. 汶川 M8 地震最大地表同震垂直位移量及其地表变形样式. 科学通报, 2009, 54
- 45 Clark M, Royden L. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 2000, 28: 703—706[[doi](#)]
- 46 唐荣昌, 韩渭宾. 四川活动断裂与地震. 北京: 地震出版社, 1993. 368
- 47 马保起, 苏刚, 侯治华, 等. 利用岷江阶地的变形估算龙门山断裂带中段晚第四纪滑动速率. *地震地质*, 2005, 27(2): 234—242
- 48 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(4): 422—428
- 49 李传友, 宋方敏, 冉勇康. 龙门山断裂带晚第四纪活动性讨论. *地震地质*, 2004, 26(2): 248—258
- 50 闻学泽, 张培震, 杜方, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震的历史与现今地震活动背景. *地球物理学报*, 2009, 52(2): 444—454
- 51 King R W, Shen F, Burchfiel B C, et al. Geodetic measurement of crustal motion in southwest China. *Geology*, 1997, 25: 179—182[[doi](#)]
- 52 Chen Z, Burchfiel B C, Liu Y, et al. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *J Geophys Res*, 2000, 105 (B7): 16215—16227[[doi](#)]
- 53 Gan W, Zhang P Z, Shen Z K, et al. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *J Geophys Res*, 2007, 112: B08416,[[doi](#)]
- 54 王闯昭, 沈正康, 王敏, 等. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂活动速率. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(5): 582—597
- 55 张培震. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(9): 1041—1056
- 56 徐锡伟, 闻学则, 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(5): 529—542
- 57 Helley G E, Burgmann R, Zhang P, et al. Bayesian inference of plastosphere viscosities near the Kunlun Fault northern Tibet. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L01302,[[doi](#)]
- 58 王二七, 孟庆任. 对龙门山中生代和新生代构造演化的讨论. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(10): 1221—1223
- 59 Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California. *Bull Seism Soc Am*, 2000, 90(6): 1353—1368[[doi](#)]
- 60 孙建宝, 梁芳, 沈正康, 等. 汶川 Ms8 地震 InSAR 变形观测及初步分析. *地震地质*, 2008, 30(3): 789—795
- 61 单新建, 曲春燕, 宋小明, 等. 汶川 Ms 8.0 级地震 InSAR 同震形变场观测与研究. *地球物理学报*, 2009, 52(2): 496—504
- 62 冉勇康, 陈立春, 陈桂华, 等. 汶川 8.0 级地震发震断裂大地震原地重复现象初析. *地震地质*, 2008, 30(3): 630—643