

近年来龙门山断裂 GPS 剖面变形与应变积累分析*

唐红涛¹, 孙兴华², 保长燕³, 张 希¹, 朱良玉¹, 贾 鹏¹

(1. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省交通规划设计研究院, 陕西 西安 710035;
3. 青海省第二测绘院, 青海 西宁 810001)

摘要: 利用 1999~2012 年 4 期 GPS 速度场数据, 对龙门山断裂天全—映秀段及安县—广元段的 GPS 剖面变形与应变积累作了探讨。在剖面应变积累对地震触发成因及程度方面, 将芦山 $M_s7.0$ 与汶川 $M_s8.0$ 地震进行了对比分析。结果表明: (1) 芦山地震之前, 该地区压性速率远高于 1999~2007 年, 它是汶川大震后的应力调整过程; (2) 汶川 $M_s8.0$ 、芦山 $M_s7.0$ 两次强震间隔如此之短, 不排除是汶川地震之后龙门山断裂西南段应力场高值压应力的调整过程对此次芦山地震起到触发作用的可能性。

关键词: 龙门山断裂; GPS 剖面变形; 应变积累; 应力调整; 汶川 $M_s8.0$ 地震; 芦山 $M_s7.0$ 地震

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)03-0373-06

0 引言

龙门山地理位置独特, 西部与青藏高原腹地连接, 东部与扬子地台相邻, 是构造复杂、位置及其重要的川滇造山带和前陆盆地系统。在深部构造上, 龙门山位于我国西部南区 (青藏) 幔拗区和中部深层构造过渡带, 处于贺兰山—龙门山陡变带的南段, 该带西北为青藏高原厚壳厚幔区, 东南部为四川盆地薄壳薄幔区 (李勇等, 2009), 是龙门山后山断裂、龙门山主中央断裂及龙门山前山断裂的组合。而龙门山前山断裂处于最东侧, 又称灌县—彭县断裂, 走向 219° , 西南端始于天全附近, 向 NE 延伸经芦山大川、大邑双河、灌县、彭县通济场、安县、江油、广元插入陕西汉中一带消失 (刘志成等, 2013)。2013 年 4 月 20 日芦山 7.0 级地震可能发生在龙门山前山断裂以东的隐伏断裂, 破裂未达地表 (陈立春等, 2013; 武艳强等, 2013)。在此之前, 自 1800 年以来该区曾发生过 4 次中强地震, 最大一次是 1970 年发生在大邑西边的 6.2 级地震 (邓邵辉, 2013; 易桂喜等, 2012)。从空间方位上看, 汶川 8.0 级地震震中位于汶川映秀, 属龙门山主中央断裂 (唐新功等, 2012), 以压性逆冲为主, 属单向破裂地震, 由 SW 向 NE 迁移, 地震破裂南段以逆冲为主兼具

右旋走滑分量, 北段以右旋走滑为主兼逆冲分量, 于彭县—灌县断裂发生了同震地表破裂, 地表破裂南西起于都江堰向峨, NE 延伸至安县桑枣, 全长约 82 km (吴小平等, 2008; 张希等, 2010a, b; 秦向辉等, 2013; 姚琪等, 2012; 张贵钢等, 2011; 乔宝成等, 2009)。因此两次地震形成了大川—映秀与安县—广元两个未破裂空区。由于芦山地震靠近龙门山前山断裂, 笔者在该断裂上选取了两个剖面, 并利用 1999 年以来的 GPS 水平运动速度场结果, 通过高斯投影, 研究了龙门山断裂在芦山地震与汶川地震的地表破裂区与未破裂空区的剖面变形特征与应变积累的分段差异性。

1 GPS 剖面及数据的选择

GPS 剖面变形可以反映断裂两侧的应变积累特性与震前位移差异的变化。张培震等 (2009) 与张希等 (2011a, b) 对汶川震前跨龙门山断裂 (发震构造) GPS 剖面 (断裂两侧一定范围内选点构成剖面) 与长水准观测剖面 (一条测线基本垂直于断裂走向、穿过断裂) 的变形分析, 都显示断层两侧数十至一、二百千米范围内有明显的位移差异变化, 越靠近断裂, 位移变化量逐渐减弱, 呈现一种类似“S”或反“S”形特征。通过对所研究断裂两侧一定范围内 GPS 站点各期水平运动

* 收稿日期: 2013-07-24.

基金项目: 地震行业专项《2016-2025 年中国大陆强震危险区预测》01-03 子专题“大地形变在 2016-2025 年中国大陆强震危险区预测中的应用研究”与“十二五”国家科技支撑计划课题 (2012BAK19B01-07) 联合资助。

矢量差异的对比,来判断断裂两侧的相对运动方式,可以判定断裂上、下两盘挤压、拉张、走滑及能量的积累与释放等基本特性。在数据的选取上,应尽量多地采用断裂两侧的 GPS 站点,通常情况下选取断裂两侧各 100 ~ 200 km 的范围,选取范围如图 1 所示(南段天全至映秀,北段安县至广元)。

中国地壳运动网络工程项目 1999 年以来对龙门山断裂及其周围进行了 GPS 观测,后期利用 GAMIT/GLOBK 解算了相对欧亚板块的水平运动速度场结果,均方根差均值均小于 2.0 mm/a,如图 2 所示。时间上,笔者选取了 1999 ~ 2001 年、2001 ~ 2004 年、2004 ~ 2007 年及 2009 ~ 2012 年 4 个时段;空间上,选取了龙门山前山断裂天全—映秀段向断裂两侧各扩展 100 km,安县—广元段两侧各延至 160 km 区域(考虑到尽可能多地选取剖面两侧的 GPS 站点,因此安县—广元段长度较天全—映秀段略长)。本文所用方法属于线性计

算,计算前剔除了个别均方根差偏大的站点,笔者认为所获得的跨断裂剖面变化曲线的拉张、挤压、走滑等趋势特征在剖面的动态演化与应变积累分析中是有意义的。

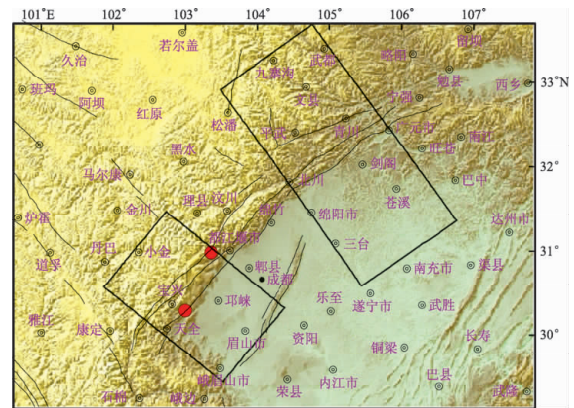


图 1 选取 GPS 剖面分布图

Fig. 1 Distribution of the selected GPS sections

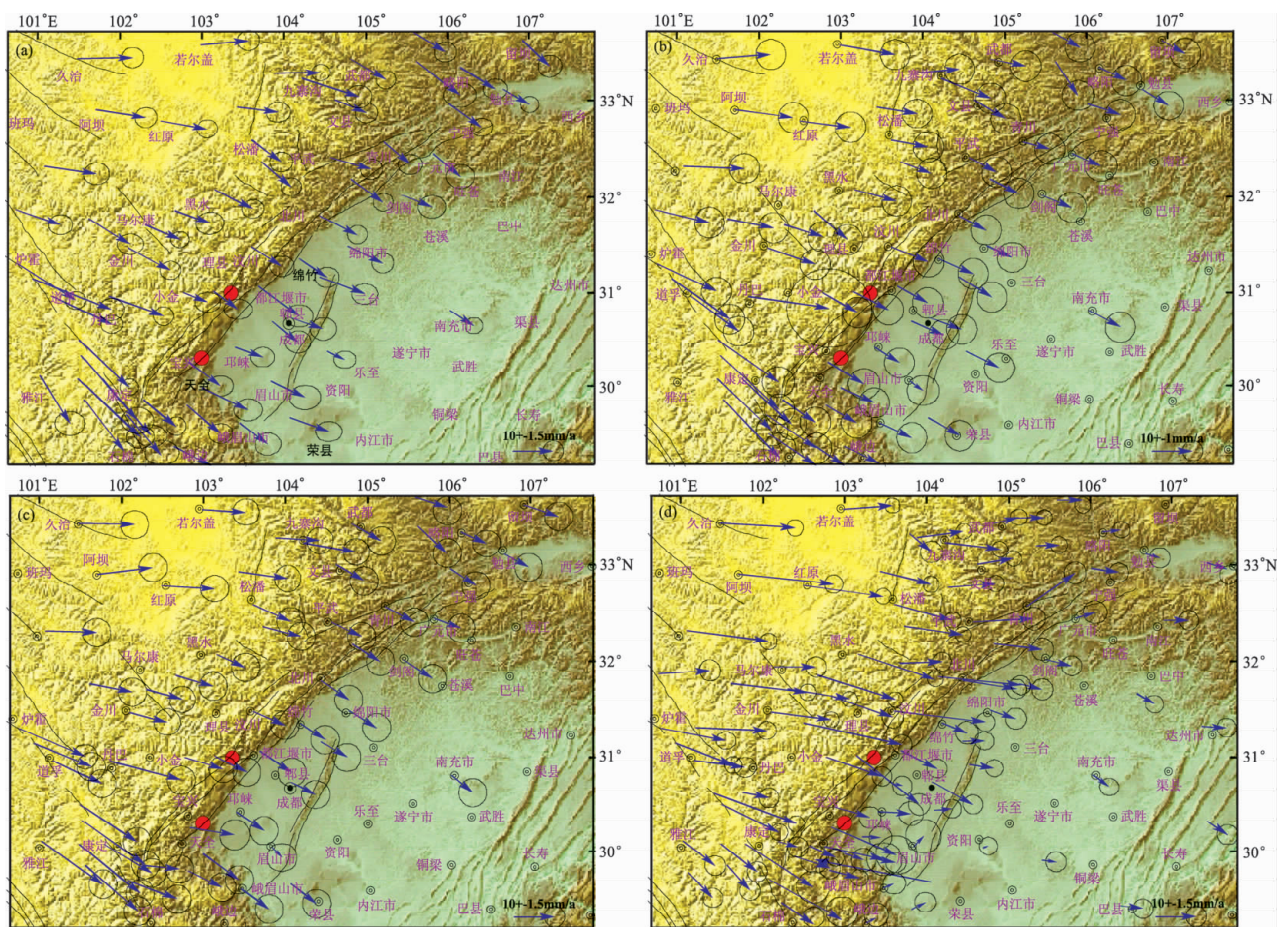


图 2 分时段相对欧亚板块 GPS 水平运动矢量图

(a) 1999 ~ 2001 年; (b) 2001 ~ 2004 年; (c) 2004 ~ 2007 年; (d) 2009 ~ 2012 年

Fig. 2 GPS horizontal movement vectors relative to Eurasia Plate during several periods

2 GPS 剖面的动态演化与应变积累分析

图3、图4中纵轴为所有站点投影后速率减去下盘最远站点的速率所得相对位移变化量,通过对上、下两盘的速率差异对比来分析龙门山前山断裂两侧的相对运动性质。

2.1 跨天全—映秀段剖面变形分析

如图3所示,断层段长160 km,断层两侧延伸100 km,平行于走向,1999~2001年上盘相对下盘略微左旋,两盘差异不大,2001~2004年断裂两侧差异变化微弱,前两期剖面变化稳定,2004~2007年下盘较前期变化不大,上盘波动反向,相对下盘右旋走滑明显(上盘相对下盘最远点最高变化量为 -4.5 mm/a),2009~2012年下盘的运动速率不大,曲线起伏波动较大的位于上盘(最

高值达 -10.2 mm/a),两盘速率差异大,且1999~2007年(汶川8.0级地震前)数据曲线表现稳定。比较4期数据,可以判断2009~2012年曲线的大幅波动是汶川8.0级大震之后上盘(巴颜喀拉地块)相对下盘(四川盆地)的应力调整过程,右旋走滑显著;垂直走向,1999~2001年两盘间速率无明显差异,2001~2004年、2004~2007年显示了上盘对下盘微弱的挤压特性,汶川地震过后,2009~2012年上盘对下盘的相对运动增强,其平均速率曲线反映了龙门山断裂2009~2012年的整体活动特征,它是震后调整的影响,上盘相对于下盘的差异变化突出。所以,芦山7.0级地震是巴颜喀拉地块向东南运动,受四川盆地阻挡,应力积累和释放的结果,与武艳强等(2013)的GPS应变积累分析结果一致,不排除是汶川地震过后龙门山断裂南段区域应力场调整对芦山地震引起触发作用的可能性。

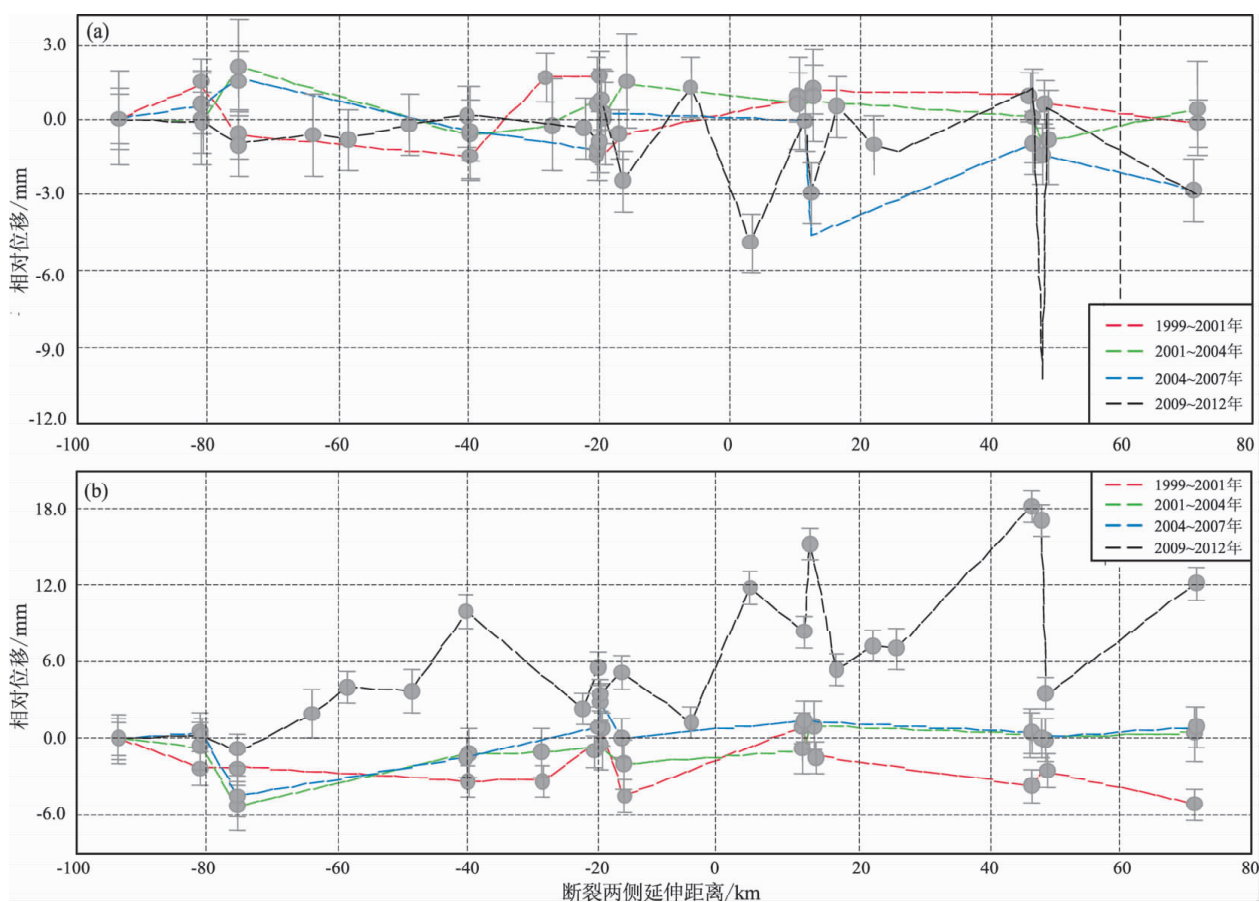


图3 天全—映秀段剖面变化

(a) 平行走向剖面; (b) 垂直走向剖面

Fig. 3 Section variation at the Tianquan-Yingxiu segment

(a) section parallel to the strike; (b) section perpendicular to the strike

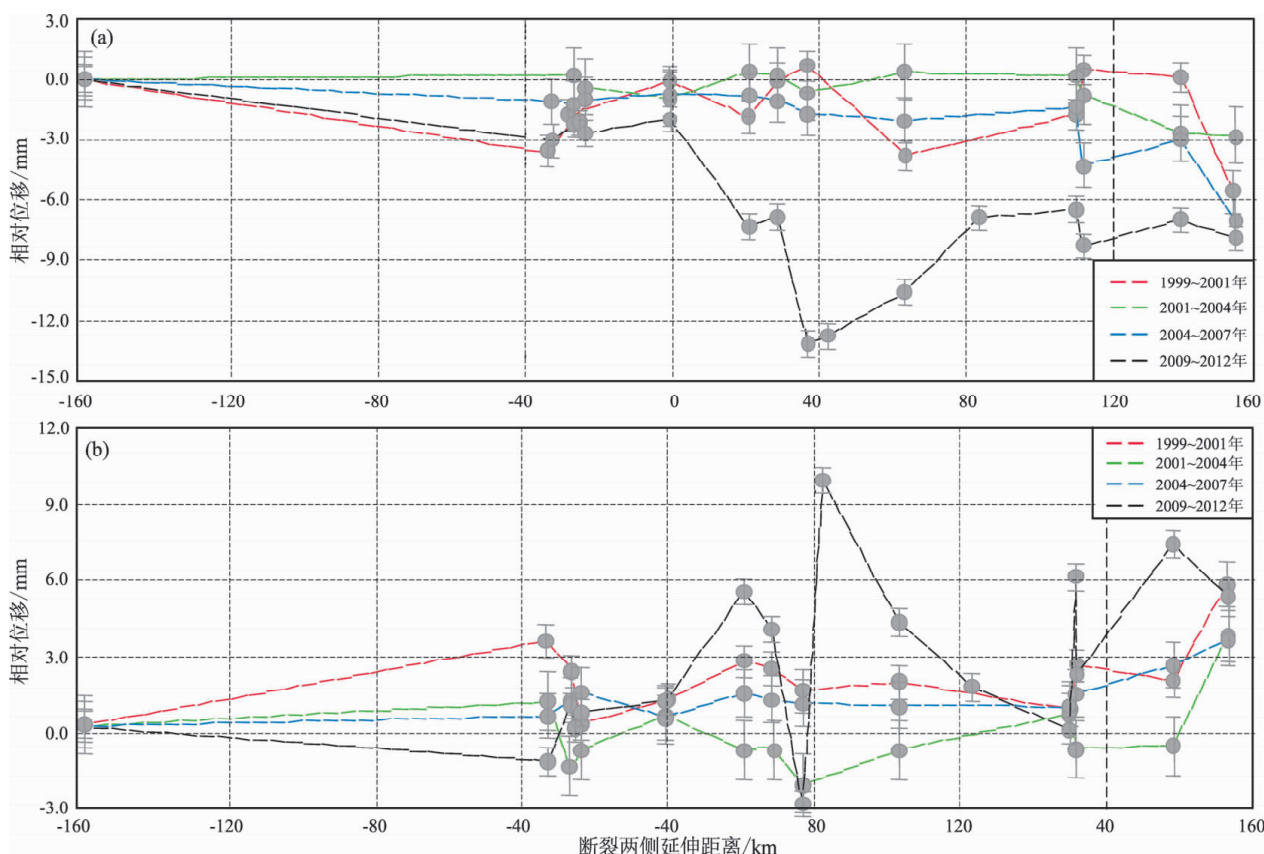


图4 安县—广元段剖面变化

(a) 平行走向剖面; (b) 垂直走向剖面

Fig. 4 Section variation at the Anxian-Guangyuan segment

(a) section parallel to the strike; (b) section perpendicular to the strike

2.2 跨安县—广元段剖面变形分析

如图4所示,断层段长140 km,断层两侧延伸160 km,1999~2012年4期数据显示该剖面整体呈右旋走滑特征,前3期龙门山前山断层两侧速率差异变化微弱,2004~2007年相对走滑速率最大,为 -7.0 mm/a ,略高于天全—映秀段,2009~2012年走滑速率上盘最大为 -13.0 mm/a ,与图3相似,两盘相对速率差异变化明显,且前3期数据平稳,第4期的大幅波动表明了汶川地震后上盘相对下盘的整体右旋走滑运动;垂直走向,2009~2012年上盘挤压速率明显高于下盘,最大 10.0 mm/a ,且2001~2012年表现为压性递增的过程,表明安县—广元段近年来两盘间应变呈“积累—松弛—积累”的过程。

2.3 天全—广元剖面的空间变形分析

沿天全至广元将整个龙门山断裂展开,如图5所示,断层长400 km,断层两侧延伸100 km,把

所选范围内GPS站点投影后的高斯坐标展到平面上,可以看出它是一个高斯投影后的平面直角坐标系,原点位于龙门山前山断裂带的西南端,可以直观地看出每个站点与断裂的空间位置关系。图中橙色方格表示GPS站点,左下角圆形站点为基准点(下盘最远点),将各期速度场同样分解为两个方向,平行于断裂方向(表示走滑方向)和垂直方向(表示挤压与拉张)。

汶川地震在映秀沿NE方向破裂过程中,龙门山前山断裂上盘相对于下盘压性特征逐步转变为以右旋走滑为主。汶川地震之后,芦山地震之前,2009~2012年数据显示了上盘对下盘的挤压,上盘的挤压速率较高,最高达 18 mm/a ,它是汶川地震过后的调整过程,显示了青藏高原巴颜喀拉地块持续对东部四川盆地的挤压性质。芦山地震一带(A区),两盘压性的相对差异变化较高,差异量最大处为两次大震中间地带空区(B区)。

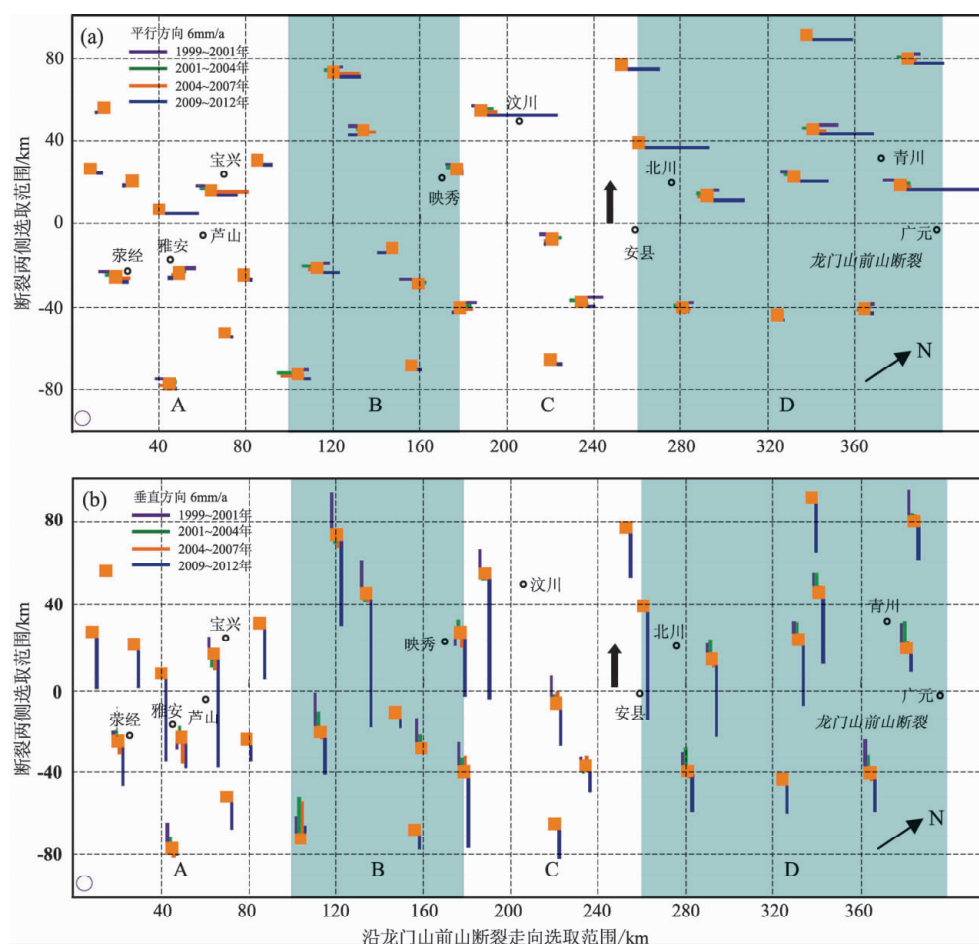


图5 天全—广元段剖面空间变化图

Fig. 5 Section space variation at the Tianquan-Guangyuan segment

D区为安县—广元段剖面，压性特征显著，且越靠近广元段右旋走滑越明显，压性速率最大超过12.0 mm/a，远高于龙门山断裂南段。

3 结论

本文通过利用1999~2012年的4期GPS速度场数据，对龙门山断裂的动态演化与应变积累进行了分析，可以获得如下结论：

(1) 在芦山地震之前的2009~2012年数据显示，龙门山前山断裂上盘压性速率远高于下盘，也大大高于1999~2007年，它是汶川地震后的应力调整过程，且西南端压性特征显著，兼顾右旋走滑，沿东北方向两盘压性减弱，右旋走滑特性逐渐增强，此调整过程也恰好反映了巴颜喀拉地块持续对东部四川盆地的挤压背景。

(2) 龙门山断裂带南段大震的孕育与发生是

由断裂两盘较高的压性应变积累到一定程度的结果，且同震过程中伴随着走滑特性。但汶川地震与芦山地震的发震间隔时间之短，不排除是汶川地震之后龙门山断裂南段区域应力场高值压应力的调整对此次芦山地震起到触发作用的可能性。

参考文献：

- 陈立春,冉勇康,王虎,等. 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.
- 邓绍辉. 2013. 龙门山—岷山断裂带上的历史地震[J]. 西华大学学报(哲学社会科学版), 32(2): 18-22.
- 李勇,黄润秋,周荣军,等. 2009. 龙门山地震带的地质背景与汶川地震的地表破裂[J]. 工程地质学报, 17(1): 3-18.
- 刘志成,李建清,涂继耀,等. 2013. 龙门山断裂带变形特征[J]. 地质科学, 48(2): 515-531.
- 乔宝成,李勇,董顺利,等. 2009. 汶川 $M_s 8.0$ 地震中央断裂北段地表破裂特征[J]. 西北地震学报, 31(4): 333-338, 348.
- 秦向辉,陈群策,谭成轩,等. 2013. 龙门山断裂带西南段现今地应力状态与地震危险性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 32(1): 2870

- 2876.
- 唐新功,胡文宝,陈立. 2012. 龙门山断裂带地震时空分布规律探讨[J]. 长江大学学报(自然科学版:理工卷),9(6):21-23.
- 吴小平,黄雍,胡家富,等. 2008. 汶川 $M_s8.0$ 巨震产生的完全库仑破裂应力变化及其强余震群[J]. 地震研究,31(4):317-323.
- 武艳强,江在森,王敏,等. 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.
- 姚琪,邢会林,徐锡伟,等. 2012. 断裂两盘岩性差异对汶川地震的影响[J]. 地球物理学报,55(11):3634-3647.
- 易桂喜,龙锋,乔慧珍,等. 2012. 青藏高原东缘龙门山断裂带西段地震危险性分析[J]. 国际地震动态,(6):97-97.
- 张贵钢,杨志强,王庆良. 2011. 龙门山断裂带三维滑动速率反演及其分段性研究[J]. 大地测量与地球动力学,31(1):5-8.
- 张培震,闻学泽,徐锡伟,等. 2009. 2008 年汶川 8.0 级特大地震孕育和发生的多单元组合模式[J]. 科学通报,54(7):944-953.
- 张希,蒋锋云,唐红涛,等. 2011a. 汾渭断裂带近 10 年 GPS 观测获得的剖面变形与应变积累分析[J]. 地震研究,34(4):504-509.
- 张希,王庆良,唐红涛,等. 2011b. 汶川地震孕震背景与同震变化的铲形断层位错模拟[J]. 地球学报,32(2):189-194.
- 张希,王双绪,张晓亮,等. 2010a. 昆仑山与汶川强烈地震对青藏块体东北缘地壳运动及应变积累的影响[J]. 地球学报,31(1):32-42.
- 张希,张晓亮,张四新,等. 2010b. 青藏块体东北缘近期 GPS 水平运动特征与汶川大震影响[J]. 地震研究,33(4):265-268.

Analysis on GPS Section Deformation and Strain Accumulation of Longmenshan Fault in Recent Years

TANG Hong-tao¹, SUN Xing-hua², BAO Chang-yan³, ZHANG Xi¹, ZHU Liang-yu¹, JIA Peng¹

(1. The Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, Shannxi, China)

(2. Shanxi Provincial Transport Planning Design and Research Institute, Xi'an 710035, Shannxi, China)

(3. The 2nd Institute of Surveying & Mapping Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai; China)

Abstract

Using the four periods of GPS velocity field data from 1999 to 2012, we discuss the GPS section deformation and strain accumulation of segments from Tianquan to Yingxiu and from Anxian to Guangyuan of Longmenshan Fault. In the respect of GPS section strain accumulation on the cause and degree of earthquake triggering, we compare the Lushan $M_s7.0$ earthquake and Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. The results show that: (1) The pressure rate before Lushan $M_s7.0$ earthquake is much higher than that of 1999 ~ 2007 in this region, which is the stress adjustment process after Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. (2) The interval of Wenchuan $M_s8.0$ and Lushan $M_s7.0$ earthquakes is so short, the Lushan $M_s7.0$ earthquake might be affected by the adjustment process of high pressure stress along the southwest section of Longmenshan Fault after Wenchuan $M_s8.0$ earthquake.

Key words: Longmenshan Fault; GPS section deformation; strain accumulation; stress adjustment; Wenchuan $M_s8.0$ earthquake; Lushan $M_s7.0$ earthquake