

芦山 M_S 7.0 地震与 Northridge M_W 6.7 地震 地表变形场对比研究*

杜吉亮¹, 武艳强^{1,2}, 邹镇宇¹

(1 中国地震局地震预测研究所 (中国地震局地震预测重点实验室), 北京 100036; 2 中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要: 2013 年四川芦山 “4·20” M_S 7.0 地震和 1994 年美国 Northridge M_W 6.7 地震的近场同震位移均表现出破裂未达地表的特征, 利用 1999~2007 年 GPS 资料对比分析了 2 次地震的震前变形特征与同震位移的关联性。结果显示, 芦山震源区存在较为显著的挤压应变积累 (挤压应变率方位角约为 284°), 沿芦山地震破裂节面剪切变形不明显; 芦山地震的同震位移场表现为逆冲兼少量左旋特征, 反映了整个孕震周期的应变积累特性, 可能表明震前 10 余年的观测并不能代表整个孕震周期特征。Northridge 地震前, 地表变形表现为右旋-挤压特征, 同震以逆冲破裂为主, 近场表现出类似“圆屋顶形”的东西两侧水平运动和垂直向上运动, GPS 观测到的震前变形与同震释放的变形存在一定程度的不一致性。相同震中距测点结果表明: Northridge 地震的同震地表位移幅度明显大于芦山地震, 前者震前挤压应变积累速度显著大于 1999~2007 年芦山地震震源区的应变积累背景。

关键词: 芦山地震; Northridge 地震; 震前变形背景; GPS 同震位移

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)03-0404-06

0 引言

2013 年 4 月 20 日发生的芦山 M_S 7.0 地震位于龙门山断裂带南段, 该地震造成的地表位移以逆冲错动为主、靠近发震断层约 50 km 的上盘一侧表现出类似左旋应变释放特征, 推测认为同震位移的特殊分布模式是由于破裂未达地表所致 (武艳强等, 2013)。数字地震学反演和野外地质考察结果均表明, 芦山地震的同震破裂没有大规模出露地表 (张勇等, 2013; 徐锡伟等, 2013)。赵静等 (2013) 采用 DEFNODE 负位错反演程序, 估算了芦山地震前龙门山断裂带的闭锁程度, 结果表明汶川地震的发生加速了芦山地震的孕育过程。杜方等 (2013) 分析了芦山地震的基本参数、余震分布、序列衰减等特征, 认为芦山地震与汶川地震是两次独立的地震事件。吕坚等 (2013) 利用小震分布和区域应力场拟合了可能存在的发震断层参数, 综合分析了芦山地震序列的震源深度、震源机制、震源破裂面特征, 探讨了可能的发震构造。陈运泰等 (2013) 指出, 芦山地震后, 龙

门山断裂带南段仍存在发生 M_W 7.2~7.3 地震的危险性。祝意青等 (2013) 根据流动重力资料预测了芦山地震的震中位置, 证实区域重力场观测对强震震中位置的判定具有独到的优势。

与芦山地震类似, 1994 年 1 月 17 日发生在美国加利福尼亚州的 Northridge M_W 6.7 地震的同震地表位移分布也比较特殊, 震源区近场表现出东西双向挤出和垂直向上运动, 外围表现出逆冲位错为主, 同样表现出破裂未达地表特性 (Scientists of the US and the Southern California Earthquake Centre, 1994; Yeats, Huftile, 1995; Hudnut *et al.*, 1996)。Hudnut 等 (1996) 用多种模型对该地震的 GPS 数据进行处理来分析变形特征, 且对比了大地测量方法和地震学方法的异同。多位学者 (Scientists of the US and the Southern California Earthquake Centre, 1994; Yeats, Huftile, 1995; Donnellan *et al.*, 1993) 分析了 Northridge 地震震源附近断层和地质构造的演化特征以及其与 Northridge 地震之间的关系。Scientists of the US and the Southern California Earthquake Centre (1994) 认为该地震的发震断层为隐伏断裂, 且该隐伏断裂在发震后才被识别。

* 收稿日期: 2015-12-23.

基金项目: 国家自然科学基金课题 (41474002、41274008) 资助.

两次地震的近场同震位移均表现出与外围不一致的特征，且震级相当又同属逆冲型地震 (<http://www.globalcmt.org>)。因此，利用震源区及附近的 GPS 资料，针对震前和同震变形场的对比分析对认识地震孕育与破裂方式具有现实意义。

本文首先对比分析了芦山地震和 Northridge 地震前的变形背景，识别出了龙门山断裂南段在震间期的应变积累空间差异特征，并在此基础上对比分析了两次地震的震前变形特征与同震位移的关联性，并讨论了同震位移量值上的差异。

1 震前区域变形特征分析

1.1 芦山地震前

中国地壳运动观测网络区域站于 1999 年开始大规模观测，至 2007 年共进行了 4 期观测。图 1a

给出了 1999 ~ 2007 年龙门山断裂带附近 GPS 速度场分布，数据解算采用 GAMIT/GLBOK 软件 (Herring *et al*, 2010a, b) 和 QOCA 软件 (Dong *et al*, 1998)。首先利用 GAMIT 软件解算得到测站坐标和卫星轨道等参数的单日松弛解，然后利用 QOCA 软件选定分布于全球的 85 个框架点，解算得到 ITRF2005 框架下的速度结果，最后进行基准变换得到图 1 结果，具体数据处理细节可参见文献 (牛之俊等, 2005; 梁洪宝等, 2014, 2015; 占伟等, 2016; 陈长云, 2016)。1999 ~ 2007 年 GPS 结果显示龙门山断裂带北东段处于全线闭锁状态，表现为断裂带邻近区域观测不到显著的地壳变形，而远离断裂带的巴颜喀拉地块内部地壳运动相对明显，上述结果与前人关于汶川地震前龙门山断裂带应变积累速度的研究结果一致 (张培震等, 2008; 江在森等, 2009; 李延兴等, 2009)。

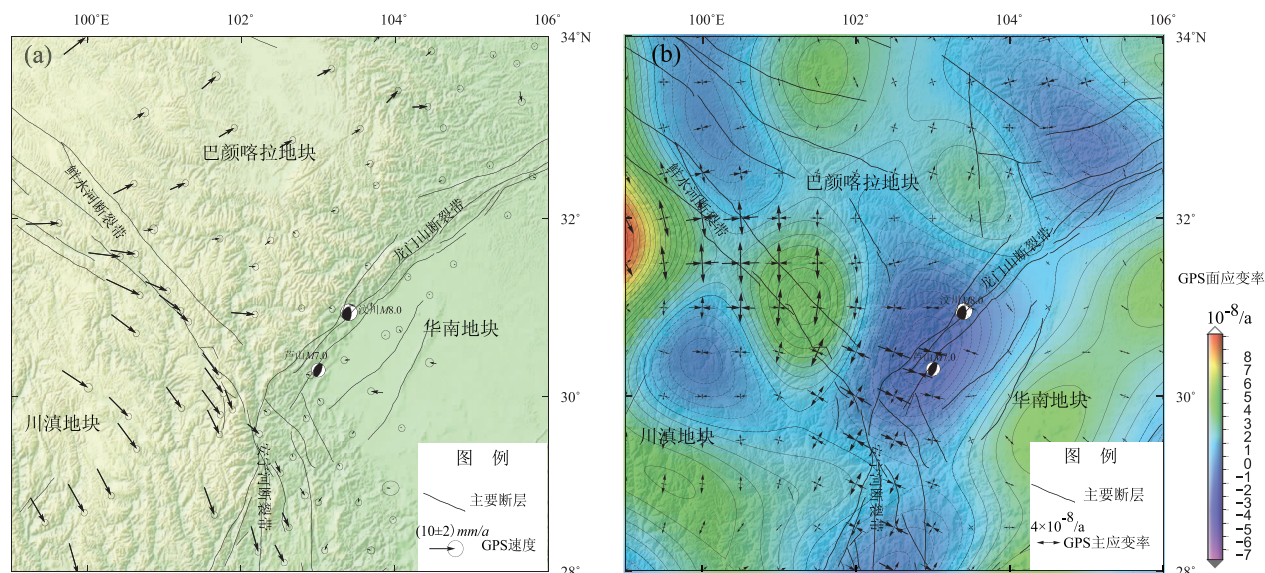


图 1 芦山地震前 GPS 速度场 (a) 及应变率场 (b) 结果 (1999 ~ 2007 年)

Fig. 1 The GPS velocity field (a) and strain rate field (b) before the Lushan earthquake (1999 ~ 2007)

考虑到最小二乘配置方法在边缘效应、孤立奇异测点影响、误差分布、点位稀疏度影响等方面均表现出的优势 (Wu *et al*, 2011)，基于该方法，图 1b 给出了研究区主应变率和面应变率分布。结果表明汶川地震震源区南西侧断裂的应变积累速度明显大于北东侧，断裂带中北段挤压兼右旋剪切变形特征明显，中南段以挤压应变积累为主，沿芦山地震破裂节面基本识别不到剪切变形。龙门山断裂带北西侧变形幅度从远离断裂带较大到靠近断裂带逐渐减小的特征，表明龙门山断裂带

在震前较长时期已经积累了较高的应变能，致使有 GPS 观测以来无法观测到断裂带显著变形。

1.2 Northridge 地震前

Northridge 地震震源区处于太平洋板块与北美板块交汇地区，震源位于圣安德列斯 (San Andreas) 断层附近的弯曲挤压区内，该区存在多组断层但没有一条为变形的主控断层，Northridge 地震前该区发生过多次逆冲型地震 (Scientists of the US and the Southern California Earthquake Centre, 1994)。为了凸显 Northridge 地震孕震区的变形特

征, 利用 Hudnut 等 (1996) 提供的震前 GPS 数据扣除了研究区域的整体欧拉运动, 图 2a 给出了该速度场分布, 图中断层数据来源于 Hudnut 等 (1996) 和网站 (<http://earthquake.usgs.gov/hazards/qfaults/>)。图 2a 的 GPS 速度场结果表明沿 Northridge 地震发震断层存在大规模的挤压和右旋剪切运动。利用图 2a 的 GPS 速度数据, 图 2b 给出了最小二乘配置球面方法计算得到的该区的应变率场分布 (武艳强等, 2009; Wu *et al.*, 2011)。应变率结果表明研究区域以近南北向挤压、近东西向拉张变形为主, 其中 Northridge 震源区以西及以南地区以近南北向挤压为主, 震源区东北部存在显著的剪切变形。考虑到 Northridge 发震断层为

NWW 向, 可知震前该断裂带存在右旋剪切-挤压应变积累背景, 量级为 $10 \times 10^{-8}/a$ 。另外, 利用图 2a 全部数据作为输入, 采用块体变形模型 (李延兴等, 2001) 计算得到了该区应变率具体量值为: 主张应变率为 $(10.4 \pm 1.0) \times 10^{-8}/a$ 、主压应变率为 $(-12.5 \pm 0.9) \times 10^{-8}/a$, 主张应变率方向为 $(80.5 \pm 1.7)^\circ$, 反映了该区的总体应变积累背景。本文所得到的 Northridge 地震震源区地壳变形特征与 Dunnellon 等 (2011) 的描述一致。

对比两次地震震前变形特征可知, Northridge 地震前的应变积累速度显著大于汶川地震前芦山地震震源区的长期应变积累速度。

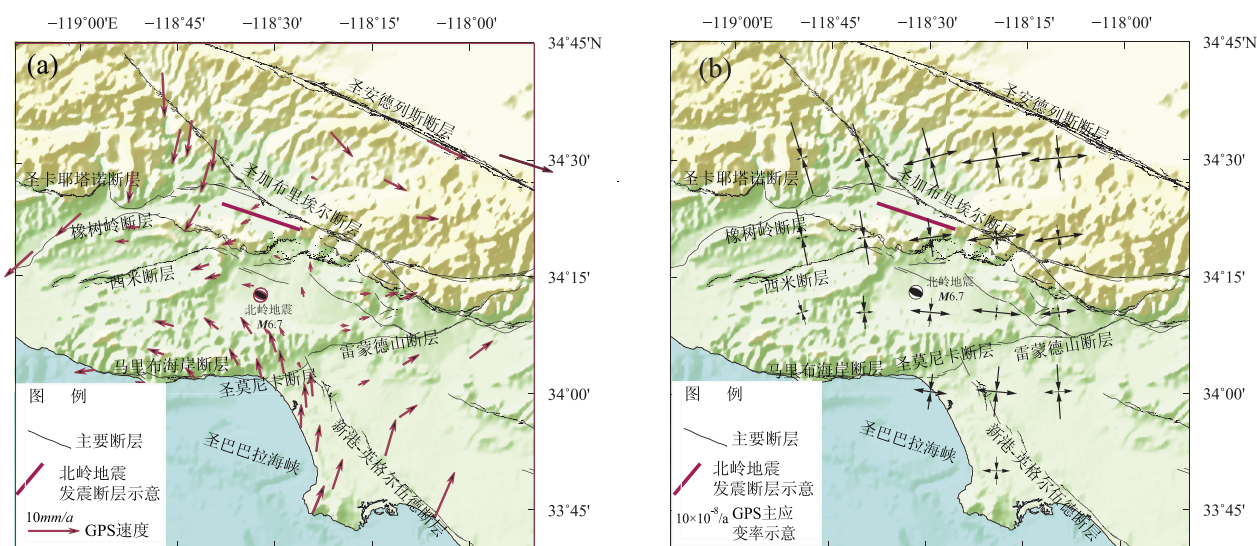


图 2 Northridge 地震前 GPS 速度场 (a) 及应变率场 (b) 结果
Fig. 2 The GPS velocity field (a) and strain rate field (b) before the Northridge earthquake

2 同震变形差异特征分析

芦山地震和 Northridge 地震的震源机制结果均显示为逆冲型破裂 (<http://www.globalcmt.org>), 多项研究结果表明破裂均未大规模出露地表 (张勇等, 2013; 徐锡伟等, 2013; Scientists of the US, 1994; Yeats, Huftile, 1995; Hudnut *et al.*, 1996), 且地表位移分布较为特殊 (武艳强等, 2013; Hudnut *et al.*, 1996), 图 3 给出了这两次地震的同震水平位移场分布。

对比图 3a、3b 结果可以发现, 二者既有相同点, 又存在显著差异。首先, 远离震源区均表现

为逆冲应变释放特征, 与震源机制一致。从芦山地震震中位置到茂县—汶川断裂之间表现出典型的左旋应变释放特征, 而从 Northridge 震中位置到 San Gabriel 断层间则表现出双侧挤出应变释放特征, 且延伸的范围较大。其次, 相同震中距测点的同震位移结果表明, 芦山地震的同震位移量值明显小于 Northridge 地震。最后, 垂向位移存在显著差异, 芦山地震的同震仅有个别测点表现出显著垂直位移特征, 如超过 10 mm 的测点仅包括 LS05 和 LS06。对比而言, Northridge 地震引起的垂向位移更加明显, 如超过 +100 mm 的测点包括 SAFE、SAFR、PICO、RESE、NEWH、NORT、CHAT、CHRN, 主要分布于震源区北侧。

基于 1999~2007 年和 2009~2011 年 GPS 资料

研究表明,汶川地震后龙门山断裂带南段的挤压应变积累速率显著增加,汶川地震在一定程度上加速了芦山地震的孕育发生(武艳强等, 2013; 刘晓霞等, 2015)。同时, 2008 年汶川地震后到芦山地震前震源区附近表现出快速挤压兼左旋剪切地表变形特征, 芦山地震同震过程表明地表应变释放过程为挤压兼少量左旋剪切错动, 从二者的

地表变形方式角度是自治的。Northridge 地震前的变形背景为右旋-挤压特征, 地震破裂以逆冲破裂为主, 近场表现出类似“圆屋顶形”的东西两侧水平运动和垂直向上运动(Hudnut *et al.*, 1996), 从 GPS 观测资料本身二者存在差异, 但 NWW 向同震挤出幅度大于 SEE 向的特征在一定程度上反映了震前该区的右旋剪切变形背景。

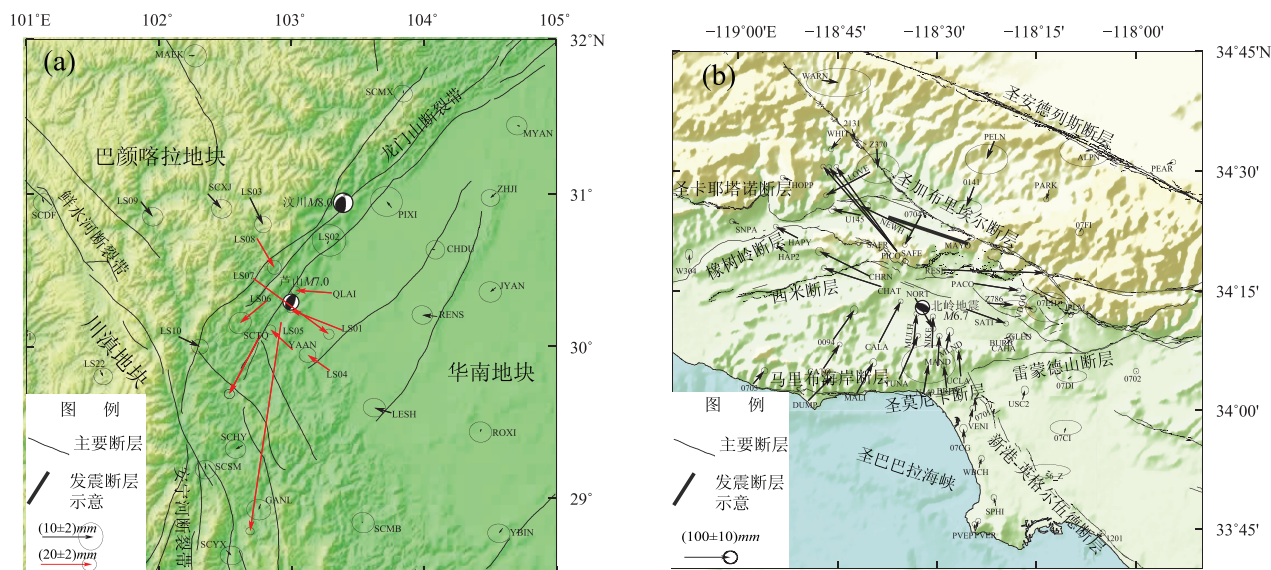


图3 芦山地震(武艳强等, 2013)(a)和 Northridge 地震(b)同震位移场分布
Fig. 3 The distribution of co-seismic displacements of the Lushan earthquake (Wu *et al.*, 2013) (a) and Northridge earthquake (b)

3 讨论与认识

强震孕育发生与区域地壳变形特征密切相关, 一般而言, 震前的变形模式与同震应变释放具有对称性, 但对于破裂未达地表的盲断层发震又有其复杂性。

首先, 芦山地震和 Northridge 地震震前各具特点, Northridge 地震前应变积累速率显著大于芦山地震前龙门山南段的应变积累速率。2 次地震的同震变形也表现出显著差异, 芦山地震表现出挤压兼少量左旋应变释放特征, 其中逆冲应变释放与震前挤压应变积累特征具有对称性; Northridge 地震表现出挤压兼东西双向挤出和垂直向上的“圆屋顶形”应变释放特征, 与震前右旋-挤压应变积累存在差异, 但 NWW 向同震挤出幅度大于 SEE 向的特征在一定程度上反映了震前该区的右旋剪切变形背景。

其次, Northridge 同震与震前变形特征存在差异的原因有如下可能: 由于该地震为隐伏断裂发震, 破裂未达地表导致了地表位移分布的顶端效应; 震源区存在多条断层, 震前地表变形场为这些断层的共同作用结果, 而同震位移主要反映了发震断层的破裂特征。另外, 相同震中距测点结果表明 Northridge 地震的同震变形幅度明显大于芦山地震。

最后, 由于芦山地震的发震断层并不是龙门山 3 条主干断裂(徐锡伟等, 2013), 同震位移结果显示该地震并未造成 3 条主干断层的解锁, 因此此次芦山地震不足以释放掉主干断裂的应变积累。

感谢两位匿名审稿专家提出的建设性意见; 本文部分数据来源于 GPS 数据中心和四川省地震局; 龙门山断裂带南段的 GPS 临时连续测网的运转得益于四川省地震局测绘工程院的大力支持, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- 陈长云. 2016. 张家口—渤海断裂带分段运动变形特征分析[J]. 地震, 36(1): 1–11.
- 陈运泰, 杨智娴, 张勇等. 2013. 从汶川地震到芦山地震[J]. 中国科学: 地球科学, 43(6): 1064–1072.
- 杜方, 龙锋, 阮祥等. 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.
- 江在森, 方颖, 武艳强等. 2009. 汶川 8.0 级地震前区域地壳运动与变形动态过程[J]. 地球物理学报, 52(2): 505–518.
- 梁洪宝, 刘志广, 黄立人等. 2015. 非构造形变对中国大陆 GNSS 基准站垂向周期运动的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 35(4): 589–593.
- 梁洪宝, 朱爽, 王友等. 2014. 陆态网络 GNSS 基准站阶跃偏移量的精确估计[J]. 震灾防御技术, 9(S1): 622–631.
- 李延兴, 黄斌, 胡新康等. 2001. 板内块体的刚性弹塑性运动模型与中国大陆主要块体的应变状态[J]. 地震学报, 23(6): 565–572.
- 李延兴, 张静华, 周伟等. 2009. 汶川 8.0 地震孕育发生的机制与动力学问题[J]. 地球物理学报, 52(2): 519–530.
- 刘晓霞, 武艳强, 江在森等. 2015. GPS 观测揭示的芦山 MS7.0 地震前龙门山断裂带南段变形演化特征[J]. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1198–1207.
- 吕坚, 王晓山, 苏金蓉等. 2013. 芦山 7.0 级地震序列的震源位置与震源机制解特征[J]. 地球物理学报, 56(5): 1753–1763.
- 牛之俊, 王敏, 孙汉荣等. 2005. 中国大陆现今地壳运动速度场的最新观测结果[J]. 科学通报, 50(8): 839–840.
- 武艳强, 江在森, 杨国华等. 2009. 利用最小二乘配置在球面上整体解算 GPS 应变场的方法及应用[J]. 地球物理学报, 52(7): 1707–1714.
- 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.
- 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军等. 2013. 四川芦山 7.0 级强震: 一次典型的盲逆断层型地震[J]. 科学通报, 58(20): 1887–1893.
- 赵静, 武艳强, 江在森等. 2013. 芦山地震前龙门山断裂带闭锁程度与变形动态特征研究[J]. 地震学报, 35(5): 681–691.
- 张勇, 许力生, 陈运泰. 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.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽等. 2008. 2008 年汶川 8.0 级地震震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 51(4): 1066–1073.
- 占伟, 李斐, 朱爽等. 2016. 应用 GPS 连续观测修正流动观测垂向速率的分析与试验[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 41(3): 1–5, doi:10.13203/j.whugis20130095.
- 祝意青, 闻学泽, 孙和平等. 2013. 2013 年四川芦山 M_s 7.0 地震前的重力变化[J]. 地球物理学报, 56(6): 1887–1894.
- Dong D, Hering T A, King R W. 1998. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data[J]. J Geophys Res, 72(4): 200–214.
- Donnellan A, Hager B H, King R W, et al. 1993. Geodetic Measurement of Deformation in the Ventura Basin Region, Southern California[J]. J Geophys Res, 98(B12): 21727–21739.
- Herring T, King R W, McClusky S C. 2010a. GAMIT Reference Manual. GPS Analysis at MIT. Release 10.4. Massachusetts Institute Technology [EB/OL]. (2011–10–05) [2015–12–23] <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgc/index.htm>.
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2010b. GLOBK Reference Manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.4. Massachusetts Institute Technology [EB/OL]. (2011–10–05) [2015–12–23] <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgc/index.htm>.
- Hudnut K W, Shen Z, Murray M, et al. 1996. Co-Seismic Displacements of the 1994 Northridge, California, Earthquake[J]. Bull Seism Soc Am, 86(1): S19–S36.
- Scientists of the U S Geological Survey and the Southern California Earthquake Center. 1994. The Magnitude 6.7 Northridge, California, Earthquake of 17 January 1994[J]. Science, 266(5184): 389–397.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Yang G. H, et al. 2011. Comparison of GPS strain rate computing methods and their reliability[J]. Geophys J Int, 185(2): 703–717.
- Yeats R S, Huftile G J. 1995. The Oak Ridge fault system and the 1994 Northridge earthquake[J]. Nature, 373: 418–420.

Comparison of Deformation Field Pertaining to Lushan $M_s7.0$ Earthquake and Northridge $M_w6.7$ Earthquake

DU Jiliang¹, WU Yanqiang^{1,2}, ZOU Zhenyu¹

(1. CEA Key Laboratory of Earthquake Prediction, Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China)

(2. First Crust Deformation Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China)

Abstract

The near field co-seismic displacement distributions pertaining to the 2013 Lushan $M_s7.0$ earthquake and the 1994 Northridge $M_w6.7$ earthquake showed the specific characteristics with fracture not reaching the crustal surface. We compared and analyzed the relationship between the pre-seismic deformation and the co-seismic deformation of these two earthquakes using GPS data from 1999 to 2007. The analysis results of Lushan $M_s7.0$ earthquake showed that there existed the obvious compressive strain accumulation (the azimuth is about 284°) in the focal area, however, the shear deformation along the rupture section was not obvious. The co-seismic deformations showed the characteristics of levorotation and extrusion, which reflected the strain accumulation characteristics in the whole seismogenic period and may indicate that the observation about 10 years before the earthquake cannot represent the characteristics in the whole seismogenic period. Before the Northridge earthquake, the characteristic of dextrorotation and extrusion of surface deformation was in dominant near the focal region. The co-seismic deformation of the earthquake mainly showed thrust rupture, and the horizontal movement in east and west directions and uplift movement were significant in near field which liked "dome" shape. As a result, the characteristic between pre-seismic and co-seismic deformations showed difference to a certain degree. In conclusion, the magnitude of the co-seismic deformation of the Northridge $M_w6.7$ earthquake was greater than that of the Lushan $M_s7.0$ earthquake reflected by the results of the stations with the same epicenter distance, and the pre-seismic extrusion strain accumulation rate of the Northridge earthquake was faster than that of the Lushan earthquake during 1999 and 2007.

Key words: Lushan $M_s7.0$ earthquake; Northridge $M_w6.7$ earthquake; pre-seismic deformation background; GPS co-seismic displacement