

牛安福, 顾国华, 曹景鹏, 张凌空, 闫伟, 赵静, 吉平. 2013. 芦山 $M_s7.0$ 地震前远、近场形变时空演化特征研究. 地震学报, 35(5): 670–680.

Niu Anfu, Gu Guohua, Cao Jingpeng, Zhang Lingkong, Yan Wei, Zhao Jing, Ji Ping. 2013. On the preseismic deformation changes prior to the Lushan $M_s7.0$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 35(5): 670–680.

芦山 $M_s7.0$ 地震前远、近场形变 时空演化特征研究^{*}

牛安福^{1),*} 顾国华²⁾ 曹景鹏^{1,2)} 张凌空¹⁾
闫伟¹⁾ 赵静¹⁾ 吉平¹⁾

1) 中国北京 100045 中国地震台网中心

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

摘要 应用芦山 $M_s7.0$ 地震震中附近跨断层及连续形变观测资料, 分析了芦山地震前不同阶段地形变变化的特点, 讨论了震中附近区域异常时空演化过程. 结果表明: ① 自 2013 年 1 月起, 沿鲜水河断裂带一些跨断层基线观测到显著的加速转折变化, 沿安宁河、则木河断裂带个别场地的跨断层水准基线, 2010 年以来出现的巨幅异常等是突出的场兆变化; 沿龙门山断裂带一些水准观测在汶川 $M_s8.0$ 地震后持续的调整变化具有近震源区变形特征. ② 鲜水河、龙门山和安宁河 3 条主要断裂围成的三叉口地区, 地倾斜、应变、重力及断层水准和蠕变观测临震前均未有显著的异常变化, GPS 水平、垂直位移年速率最小, 该地区是形变变化或形变异常分布的“空区”. ③ 在对近场与远场多种连续形变数据通过傅里叶变换提取年周期成分后发现, 临震前 2—3 年近震源区域的地倾斜、重力年变化幅度不是增大, 而是减小. 芦山 $M_s7.0$ 地震前观测到的形变前兆现象特征与汶川 $M_s8.0$ 地震等震前的前兆现象较为接近. 因此, 芦山地震前近震源区及外围形变异常分布特征不是个别的现象.

关键词 芦山地震 地形变 近震源区 形变空区

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.05.006 中图分类号: P315.72⁺5 文献标志码: A

On the preseismic deformation changes prior to the Lushan $M_s7.0$ earthquake

Niu Anfu^{1),*} Gu Guohua²⁾ Cao Jingpeng^{1,2)} Zhang Lingkong¹⁾
Yan Wei¹⁾ Zhao Jing¹⁾ Ji Ping¹⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract: This paper analyzes and discusses the spatio-temporal evolutionary characteristics of deformation prior to the Lushan $M_s7.0$ earthquake, based on the data of cross fault and continuous deformation measurements near the epi-

* 基金项目 国家科技支撑项目专题(2012BAK19B02, 2012BAK19B03)和地震行业项目(201108009)联合资助.

收稿日期 2013-06-04 收到初稿, 2013-07-24 决定采用修改稿.

* 通讯作者 e-mail: niuanfu01@sina.com

center of the earthquake. The results show that: ① the cross fault baseline length has been significant acceleration-turning at some cross-fault sites along the Xianshuihe fault since January of 2013, and some anomalies of leveling and baseline lengths recorded at individual sites along Anninghe and Zemuhe faults are the field precursors. Small adjustment of most of the leveling cross the Longmenshan fault presented the characteristic of source precursors. ② In the cross connected area of the Xianshuihe, Longmenshan and Anninghe faults, no significant anomalies were recorded by means of continuous deformation (tilt, strain, gravity), fault leveling, and creep observation. Moreover, the GPS horizontal and vertical velocities nearby the source are smaller than the outer region, so there is a concept of Weak Area, where no significant changes in deformation or no anomalies. ③ The annual amplitude of tilt and gravity in the near-field, extracted by the Fourier transform, is reduced 2—3 years prior to the event, which is our newly understanding about the earthquake precursors. The results mentioned above indicate that the precursory phenomena before the Lushan $M_s7.0$ earthquake, observed by deformation measurements, are similar to those before Wenchuan $M_s8.0$ and so on, so it is not individual.

Key words: Lushan earthquake; crustal deformation; near and far fields; deformation weak area

引言

大地震的短期前兆现象一直是国内外学者关注与争论的焦点之一。基于扩容扩散和扩容引起的摩擦滑动模型及地震破裂成核过程模型(Nur, 1972; Mjachkin *et al*, 1975; Rummel *et al*, 1978; Das, Scholz, 1981; Dubrovskiy, Sergeev, 2006), 地倾斜应变观测等被认为是监测地壳形变和捕捉地震前兆的重要手段。而实际观测结果表明, 震级小于 4.3 级的小地震前地倾斜应变信号与周围地震具有一定的相关性(Johnston, Mortensen, 1974; McHugh, Johnston, 1978), 但异常台站至震中距离很难达到 0 km 或 0 m (Rikitake, 1975), 因此, Takemoto (1991)提出了地震发生的最小前兆距离的概念; 对于震级大于 6.0 级地震, 临震前尽管观测到一些突出的短期异常, 但通常远离震中区域(Mogi, 1985; 牛安福等, 2009, 2012); 而靠近震源区域, 由于临震前变形不显著, 同样引起对以监测断层预滑动预报地震思路的质疑(Takemoto, 1991; Johnston *et al*, 1990; Linde *et al*, 1992; Bingham, 2005; Amoruso, Crescentini, 2010; 牛安福等, 2012)。

临近芦山 $M_s7.0$ 地震前的形变前兆分布, 为认识该地震孕育过程及其伴随的前兆现象等提供了不可多得的信息。2013 年 4 月 20 日发生的芦山 $M_s7.0$ 地震位于龙门山断裂带南段, 其破裂特征与汶川 $M_s8.0$ 地震相似, 属于逆冲型地震。该震震前沿鲜水河断裂带一些跨断层基线观测到显著的加速转折变化, 显示因巴颜喀拉地块的快速东向运动, 打破了鲜水河断裂长期左旋运动的格局, 是突出的场兆变化; 沿安宁河、则木河断裂带个别场地的跨断层水准基线呈巨幅变化; 沿龙门山断裂带一些水准观测在汶川 $M_s8.0$ 地震后呈持续调整变化; 而鲜水河、龙门山、安宁河 3 条主要断裂围成的三叉口地区, 地倾斜、应变、GPS、重力等连续形变变化不大, 断层蠕变及断层水准变化较小, 是形变变化最为薄弱的区域。

本文针对芦山 $M_s7.0$ 地震临震前多种形变观测结果进行综合分析, 提出了震前出现的形变异常“空区”现象, 并对该现象给出了可能的解释.

1 芦山 $M_s7.0$ 地震前突出形变异常分布

自 20 世纪 70 年代末开始, 四川省地震局沿龙门山断裂带、鲜水河断裂带、安宁河断裂带、则木河断裂带陆续开展了跨断层水准基线测量和断层蠕变测量, 断层水准基线观测周期为 1—3 个月. 本文使用的观测数据截止时间为芦山地震前最后一期, 即 2013 年 3 月份. 该地区自 2003 年开始多数地倾斜和地应变台站等实现了数字化观测, 采用的资料截止时间为震前 1 天.

1.1 鲜水河断裂带异常分布

芦山 $M_s7.0$ 地震前鲜水河断裂带较为显著的异常变化主要是侏倭、格菱、虚墟和龙灯坝跨断层基线. 这些基线长期变化趋势表现为巴彦喀拉块体南边界以左旋运动为主. 而 2013 年 1 月、3 月份的观测结果却给出了显著的转折变化, 短期的活动以右旋为主(图 1).

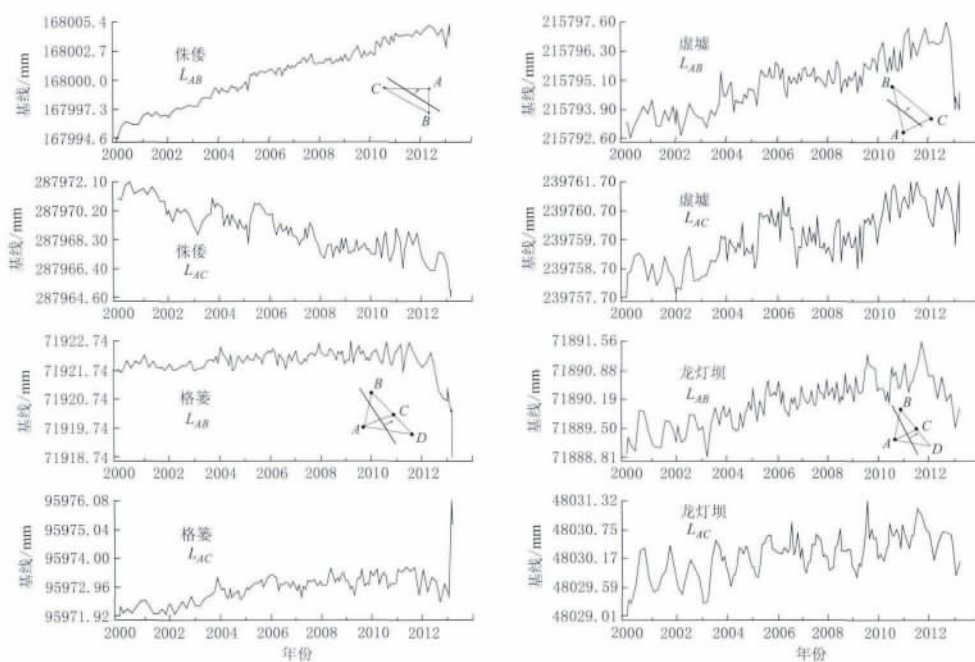


图 1 芦山 $M_s7.0$ 地震前沿鲜水河断裂带跨断层基线变化. L_{AB} 和 L_{AC} 分别表示 AB 边和 AC 边的边长

Fig. 1 The changes in cross fault baseline lengths along Xianshuihe fault prior to the Lushan earthquake, where L_{AB} and L_{AC} are the length of AB and AC lines, respectively

该断裂带跨断层水准变化与断层基线相比不显著. 沿鲜水河断裂带还有虾拉沱、恰叫、沟普、老乾宁和龙灯坝断层蠕变测量, 除沟普外, 多以趋势异常为主.

1) 侏倭基线. 该场地距离芦山 $M_s7.0$ 地震震中 280 km. 该断层观测场地自 1980 年开始观测, AB 边长 168 m, AC 边长 288 m 左右. 早期每 2—3 个月测量一期, 汶川 $M_s8.0$ 地震后每月测量一期. 1982 年以来, 该处断层的水平运动呈左旋张性活动. AB 边以平均 0.8 mm/a 左右速率拉张, 临震前有短时异常扰动; AC 边以平均 1.0 mm/a 速率缩短, 汶川 $M_s8.0$ 地震后, AC 边变化较小, 2013 年 1 月前后加速压缩, 震前最大压缩量达 2.8 mm, 异常持续

时间约 3—4 个月。

2) 格婆基线。该场地距离芦山 $M_s7.0$ 地震震中 270 km。该断层观测场地自 1982 年开始观测, AB 边长 72 m, AC 边长 96 m 左右。早期每 2—3 个月测量一期, 2004 年起每月测量一期。1982 年以来, 该处断层的水平运动呈左旋张性活动, 平均活动量在 0.1 mm/a 左右。2001 年昆仑山口西 $M_s8.1$ 地震后, 年变幅度增大, 但年变速率未有大的改变。2012 年 5 月起基线趋势出现转折, 2013 年 1 月有明显加速转向, AB 测边出现大幅度缩短, 变化幅度为 3.5 mm, 异常持续时间近 4 个月。

3) 虚墟水准、基线。该断层观测场地距离芦山 $M_s7.0$ 地震震中 260 km。该场地基线观测自 1980 年开始, AB 边和 AC 边基线分别长 215 m 和 240 m 左右, 每 1—3 个月观测一期。基线 L_{AB} 和 L_{AC} 受 2001 年昆仑山口西 $M_s8.1$ 地震、2004 年印尼苏门答腊 $M_s9.0$ 地震、以及 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震影响, 基线变化趋势发生改变。汶川地震后, 断层左旋张性活动, 2011 年底至 2012 年 10 月拉张的趋势有所减弱, 2013 年 1 月 AB 测边出现大幅度压性变化, 加速持续时间近 4 个月, 变化幅度为 2.96 mm。

4) 龙灯坝基线。该断层观测场地距离芦山 $M_s7.0$ 地震震中 160 km。该场地基线观测自 1985 年开始, AB 边和 AC 边基线分别长 48 m 和 72 m 左右, 每 1—3 个月观测一期。龙灯坝场地的水平运动历来较弱, 1991—2002 年两测边均以 0.04 mm/a 左右速率变化, 2003—2006 年以 0.19 mm/a 左右速率拉张。2011 年 11 月至 2013 年 1 月, AB 测边出现持续 13 个月的下降, 最大幅度为 2.03 mm。

5) 其它场地基线。老乾宁断层观测场地距离芦山 $M_s7.0$ 地震震中 140 km。该场地基线观测自 1979 年开始, 每 1—3 个月观测一期。2012 年以来两测边观测曲线波动变化, 临震前无明显的加速断层活动。折多塘断层基线(距芦山地震震中 110 km)呈现较稳定的趋势, 无显著的短期加速异常变化。

6) 沟普水平蠕变。该场地距离芦山 $M_s7.0$ 地震震中 200 km。沟普蠕变观测 1—3 测边在 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震后趋势发生转折, 在 2010 年玉树地震后出现较大幅度起伏。异常核实报告显示, 未发现仪器故障、人为干扰等。2011 年 5—9 月持续上升, 幅度为 0.59 mm, 10 月转折下降。2012 年 1—10 月继续大幅度上升, 幅度为 1.1 mm (图 2)。

从鲜水河断层基线及蠕变观测结果可知, 显著的短期异常变化主要分布在沟普以西地段, 而鲜水河东南段, 龙灯坝基线、老乾宁及折多塘基线则没有明显的短期加速异常。

1.2 沿龙门山断裂带形变异常分布

沿龙门山断裂带断层活动主要表现为汶川 $M_s8.0$ 地震后的调整。周围较近的观测场地包括宝兴、双河和灌县。

1) 宝兴水准。该场地水准观测开始于汶川 $M_s8.0$ 地震后, 距离芦山 $M_s7.0$ 地震震中 15 km。从 2010 年以来的观测结果看, 水准变化幅度较小, 震前 3 年变化幅度仅 0.6 mm。震前有小幅扰动, 但也在动态范围内(图 3)。

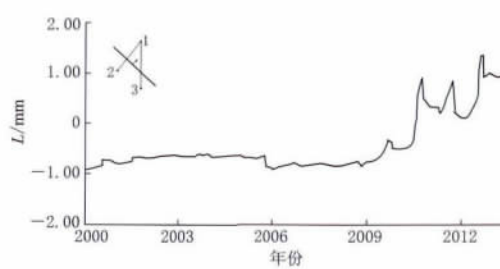


图 2 沟普水平蠕变 1—3 测边观测曲线

Fig. 2 The horizontal fault creep of 1—3 lines at Goupu site

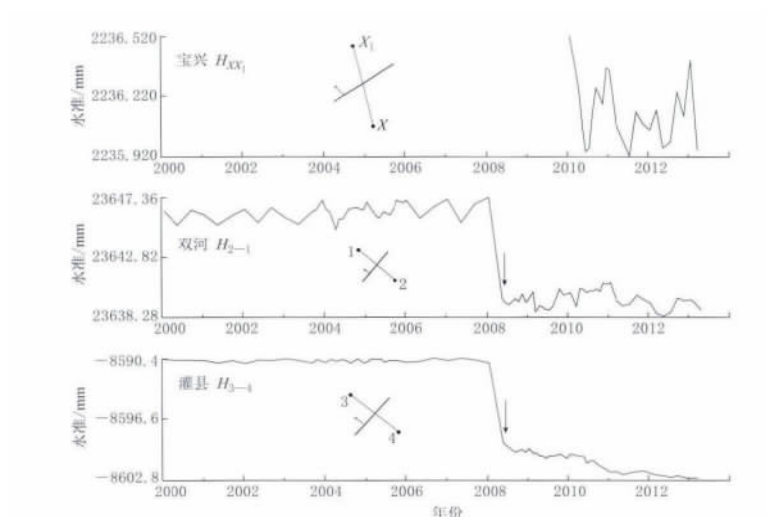


图3 芦山 $M_s7.0$ 地震前沿龙门山断裂带跨断层水准变化

图中 H_{XX_1} , H_{3-4} , H_{2-1} 分别表示 XX_1 边、3—4 边和 2—1 边测线高程变化

Fig. 3 The changes in cross fault leveling along the Longmenshan fault before the Lushan earthquake, where H_{XX_1} , H_{3-4} , and H_{2-1} denote the leveling of XX_1 , 3—4, and 2—1 lines, respectively

2) 双河水准. 双河场地跨越龙门山前山断裂带之安县—灌县断层中段的双河断层, 距离芦山 $M_s7.0$ 地震震中 90 km. 1991 年以来双河短水准的变化主要在 2 mm 范围内波动. 汶川 $M_s8.0$ 特大地震前没有监测到明显的前兆异常, 但同震变化非常显著, 上盘相对下盘下降 7.76 mm. 汶川 $M_s8.0$ 地震后, 断层一直处于压性调整活动阶段, 年动态变化在 1.5 mm 范围内(图 3).

3) 灌县水准. 灌县水准场地距离芦山 $M_s7.0$ 地震 100 km. 2000 年以来具有较稳定的年周期变化特征. 受汶川 $M_s8.0$ 地震的影响, 产生显著的同震变形. 之后至芦山地震前, 呈现持续下降, 幅度达 3 mm, 是龙门山断裂带上水准变化速率相对较大的场地之一(图 3).

1.3 沿安宁河、则木河断裂带形变异常

芦山 $M_s7.0$ 地震前沿安宁河、则木河断裂带突出的形变异常主要有西昌、尔乌水准和汤家坪水准基线. 宁南、冕宁、安顺场等场地水准存在一定的变化, 但不显著; 紫马跨断层蠕变在汶川 $M_s8.0$ 地震后出现年变化幅度增大现象, 震前年变化特征较为稳定.

1) 西昌水准. 西昌短水准测量场地位于西昌市李金堡镇, 距芦山 $M_s7.0$ 地震震中 270 km. 该场地布设了 A—B—C—A 短水准监测环线. 其中 AB、BC 为跨断层斜交边. 资料显示, 1988—2000 年平均速率为 0.27 mm/a 左右, 断层略显张性活动. 2004 年开始对该场地进行每年 6 期的加密观测, 2004—2009 年连续 6 年的观测显示该处断层无明显变化, 年变化比较清晰. 2010 年 4—6 月的观测显示, 该场地两测线同时出现明显的变化, AB 测线下降了 3.89 mm, AC 测线上升了 4.46 mm. 2010 年 7 月—2011 年 3 月有所转折. 2011 年 5 月—2012 年 5 月, 两测线又同时出现明显的变化, AB 测线下降了 10.6 mm, AC 测线上升了 10.5 mm. 2012 年 7—9 月的观测资料显示曲线有所转折, 该时段内在川滇交界先后发生了 2012 年 6 月 24 日的盐源 $M_s5.7$ 地震和 2012 年 9 月 7 日的彝良 $M_s5.6$ 地震, 震中距分别为 150 km 和 180 km. 两次地震发生在该水准转折变化过程中(图 4). 2013 年 1 月观测结果显示再次发生转折, 持续时间 4 个月左右.

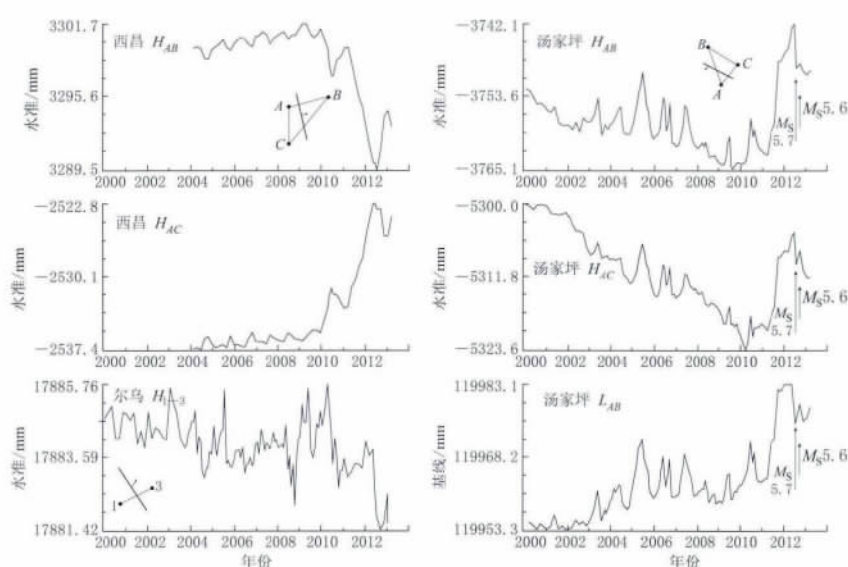


图 4 芦山 $M_S7.0$ 地震前沿安宁河、则木河断裂带跨断层水准、基线变化

H_{AB} , H_{AC} , H_{1-3} 分别表示相应测线的水准变化, L_{AB} 表示 AB 测线长度

Fig. 4 The changes in cross fault leveling and baseline lengths along the Anninghe and Zemuhe faults before the Lushan earthquake. H_{AB} , H_{AC} , H_{1-3} separately represent corresponding leveling changes for the lines AB, AC, and 1—3, and L_{AB} is the length of AB line

2) 尔乌水准. 尔乌短水准在 2008 年之前的变化显示此处断层垂直活动较弱. 汶川 $M_S8.0$ 大震后打破了往年同期的上升变化, 出现近 3 mm 幅度的异常扰动. 2010 年玉树地震后, 再次发生转折, 上升幅度达 2.34 mm 后恢复. 2012 年开始异常再次出现, 上升幅度为 2.23 mm, 临震前出现转折(图 4).

3) 汤家坪水准、基线. 该观测场地位于则木河断裂带紧靠南东的尾端地段, 距离芦山 $M_S7.0$ 地震震中 360 km. 汤家坪场地建成于 1980 年. 该场地水准在 2003—2007 年波动幅度较大, 2008 年汶川 $M_S8.0$ 地震后, AB 边和 AC 边出现趋势转折, 于 2011 年出现近 20 mm 的变化, 2012 年下半年出现转折, 转折前后发生了盐源 $M_S5.7$ 和彝良 $M_S5.6$ 两次中等地震(图 4).

该场地基线长期变化具有 10 年左右周期. 2003—2007 年出现较大幅度的异常扰动, 2008 年汶川 $M_S8.0$ 地震后, 趋势出现转折. 2011 年开始加速伸长, 意味着发生了较大幅度的左旋运动, 年最大幅度达 20 mm, 盐源 $M_S5.7$ 和彝良 $M_S5.6$ 两次中等地震均发生在基线达到最大值前后, 临近芦山 $M_S7.0$ 地震前, 基线出现转折(图 4).

2 芦山 $M_S7.0$ 地震前近场形变变化特征

应用地震震级估算此次地震破裂尺度约 30 km. 将 2 倍破裂尺度内定义为近场, 而 2 倍尺度外定义为远场. 近场的范围为震中附近 60 km, 沿地震破裂方向可接近 90 km.

芦山 $M_S7.0$ 地震近震源区域的形变观测点包括宝兴跨断层场地, 雅安和姑咱等连续形变观测台站.

芦山 $M_S7.0$ 地震最近的跨断层观测场地是宝兴场地, 震中距离 15 km. 该场地跨断层

水准结果表明,其变化幅度在研究区域内是最小的,震前3年变化幅度也只有0.6 mm,且震前扰动变化未超出2倍动态范围(图3).

1) 雅安台地倾斜变化. 雅安地震台处于龙门山断裂带西南段,位于芦山 $M_s 7.0$ 地震极震中区域. 雅安地震台地形变观测仪器为JB型金属水平摆倾斜仪,2003年完成数字化改造,仪器工作周期 $14.2 \text{ s} \pm 0.1 \text{ s}$. 仪器洞室东西走向,条石拱砌,进深7 m,顶层及两侧覆盖厚度 $>20 \text{ m}$,仪器墩高60 cm,岩性为砂泥岩. 仪器洞室年温度变幅 $\leq 1.6^\circ\text{C}$,日温度变幅 $\leq 0.2^\circ\text{C}$,相对湿度 $>95\%$. 日照和洞内潮湿对观测会有些干扰,但年周期变化较为稳定.

该台倾斜潮汐记录数据分析结果表明,除个别计算粗差外, M_2 波潮汐因子及相位较为稳定(图5). 2012年6月24日盐源 $M_s 5.7$ 地震前变化不大.

应用傅里叶周期分析方法,可提取相应的年周期成分. 其结果表明,该台地倾斜矢量模在震前没有出现显著的异常变化,但年周期成分自2008年开始则出现逐年下降特征(图6b).

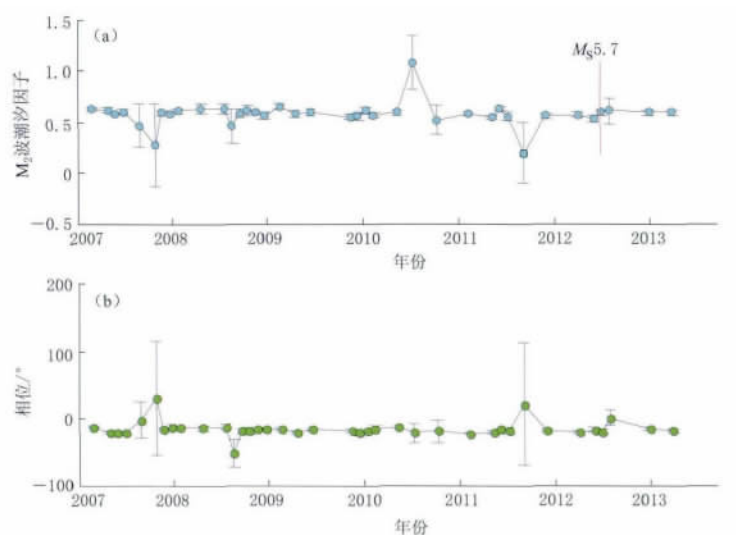


图5 芦山 $M_s 7.0$ 地震前雅安台地倾斜 M_2 波潮汐因子(a)、相位(b)及相应的误差
Fig. 5 The changes of tilt tidal factor (a) and phase (b) at Ya'an station before the Lushan earthquake where the bars denote the monthly errors

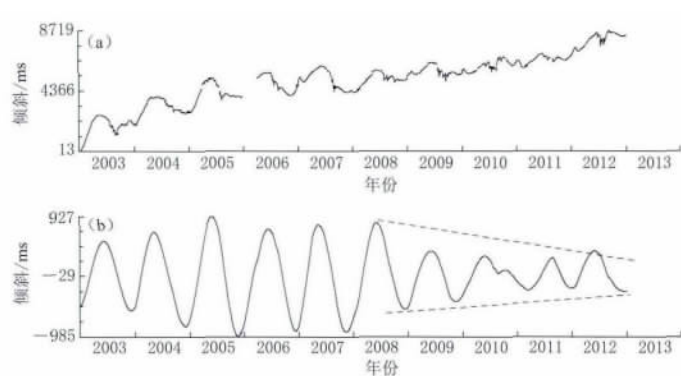


图6 芦山 $M_s 7.0$ 地震前雅安台倾斜矢量模(a)及年周期变化(b)

Fig. 6 The tilt vector modulus (a) and the annual period changes (b) at Ya'an station before the Lushan earthquake

2) 姑咱台地形变变化. 姑咱台处于北西向的鲜水河断裂带、北东向的龙门山断裂带和南北向的安宁河断裂带复合部位靠北的地段, 距离芦山 $M_s7.0$ 地震震中 90 km. 洞室的岩性为前震旦纪似斑状黑云母花岗闪长岩, 形变洞进深 90 m, 覆盖厚度大于 70 m, 洞温 18.5°C 左右, 日温变幅小于 0.03°C , 年温变幅小于 0.5°C , 相对湿度大于 95%; 洞室内装有 DZW 型重力仪、SQ 型水平摆、DSQ 型水管倾斜仪、SSY 型伸缩仪等, 该台在 2007 年还安装了 YRY 分量钻孔应变仪.

由该台多套倾斜仪、应变仪记录到数据计算得到的 M_2 波潮汐因子及相位无显著的短期异常变化. 该台定点重力结果中的年周期成分在 2004—2005 年、2010—2011 年扰动幅度较大, 然后逐年变小, 之后分别发生了汶川 $M_s8.0$ 地震和芦山 $M_s7.0$ 地震(图 7).

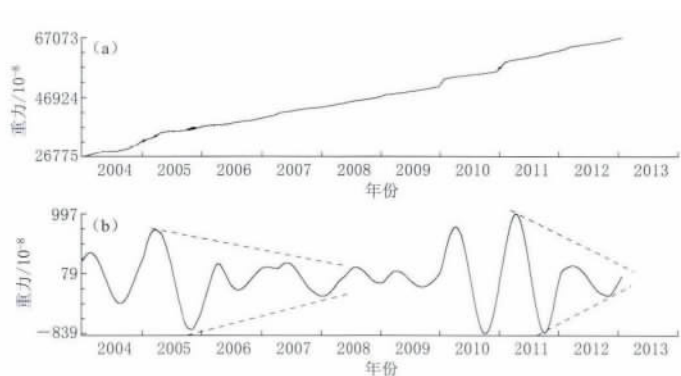


图 7 芦山 $M_s7.0$ 地震前姑咱台重力(a)及年周期成分变化(b)

Fig. 7 The changes in gravity (a) and the annual periodic component (b) at Guzan station before Lushan earthquake

芦山 $M_s7.0$ 地震前两个台站资料计算得到的年周期成分衰减现象, 反映了临震前孕震区域能量耗散存在逐年减小的特征, 这是开放系统所具有的减熵特征. 1850 年, 克劳修斯提出热力学第二定律, 即热量可以自发地从高温物体转移到低温物体, 但不能自发地从低温物体转移到高温物体. 这一定律指出了开放的热力学系统自发变化的必然方向, 并被应用在通讯、生物等诸多领域. 因此, 临震前记录到的各种前兆变化, 都是半无限空间内、弱约束条件下孕震系统演化的结果, 这也是许多前兆现象难以使用一些有限尺度的试验结果或一些物理模型来解释的原因之一. 20 世纪末, 我国地震学者也曾开展了地震孕育过程中的熵减现象研究, 取得了一些有意义的成果(朱传镇, 1989; 朱令人等, 1990; 王海涛, 杨马陵, 1990; 牛安福, 1991). 本文给出的芦山 $M_s7.0$ 地震前年变幅度减少现象是地震孕育过程中熵减的又一体现, 对借助连续变形观测进行近震源区域判定提供了一种重要的判据.

3 芦山 $M_s7.0$ 地震前形变异常分布特征讨论

芦山 $M_s7.0$ 地震前出现的一些形变突出异常是否与该地震相关, 以及如何解释近震源区域出现的形变变化等均是地震前兆研究的基本问题. 以往通常按照地域来建立异常与地震的相关性, 但发现异常特征与地震三要素的关系是复杂的.

对于大地震而言, 与其相关的前兆变化可能出现在很远的区域. 例如, 1944 年日本 Tonankai 8 级地震前观测到显著的倾斜异常, Kagegawa 测点距离该地震震中约 300 km

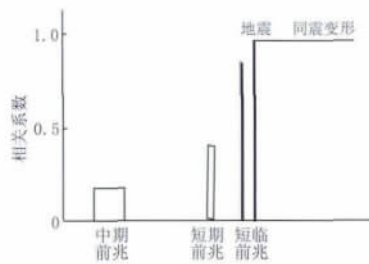


图 8 远场异常与地震相关性判别的时依赖准则

Fig. 8 Sketch map of the time dependent criterion for constructing the correlativity between far-field deformation anomalies and earthquakes

模型联系,作为震前的前兆也期待有这种结果.作者曾开展过相关的研究与试验工作(牛安福,2003).

考虑到芦山 $M_S7.0$ 地震前鲜水河断裂带出现的断层基线短期加速变化及观测周期,估计其异常持续时间为 90—120 天;安宁河、则木河断层水准在巨幅异常结束至芦山地震前,持续时间为 180—240 天.依据形变短期加速异常持续时间与地震震级的联系(牛安福,2003),估计其相应的震级范围分别为 $(6.4—6.6) \pm 0.4$ 和 $(6.8—7.0) \pm 0.4$,因此可认为芦山地震震前发生的这些异常变化与芦山地震具有一定的相关性.此处所指相关只是从时间依赖的角度而言,并非意味着该地区今后不会发生较大地震.

对芦山 $M_S7.0$ 地震前各种形变资料的进一步分析发现,震前形变异常形成的“空区”是较明显的,该空区属于变形幅度小或异常变化不显著的区域(图 9).形变异常“空区”是临近强地震前出现的一种重要的前兆分布现象.周硕愚等(1997)利用精密水准复测结果和跨断层资料,研究了唐山地震前震源区域形变场的演化,并验证了形变空区与地震活动区及断层闭锁区域间的联系.牛安福等(1999)利用 F 检验方法,研究了 1996 年 2 月 3 日丽江 $M_S7.0$ 地震前后异常强度的分布,提出了异常强度空区,并研究了形变“空区”内外地震活动性的差

(Mogi, 1985).为解决远场形变异常与地震的相关性,作者提出了时间依赖判别准则,即异常越接近地震发生时刻,其与地震的相关性越高(图 8).地震波及同震变形与地震震级和地点具有较确定的联系,拥有最高的相关系数为 1.0.而中期、短期及短临异常都低于最高值 1.0,且以短临异常最高,短期异常次之,这体现了地震预测的“最后一分钟”现象(牛安福,2005).地震波与同震变形场等与地震参数都可建立一定的

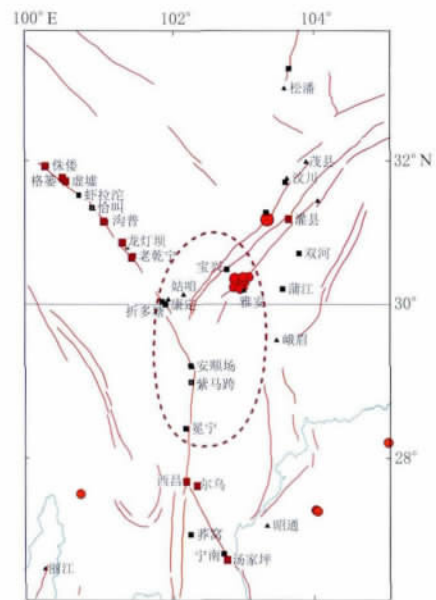


图 9 芦山 $M_S7.0$ 地震前的形变异常分布及形变异常“空区”

红色矩形表示芦山地震前形变变化较大或异常显著的场地,虚线椭圆表示形变异常“空区”,红色实心圆表示 2012 年以来研究区域内发生的 $M_S \geq 5.5$ 以上地震,黑色三角形、矩形分别表示连续形变观测台站和断层观测场地,红色线、绿色线分别表示断层及河流分布

Fig. 9 The deformation anomaly distribution showing the deformation weak area (denoted by dashed ellipse)

Red rectangles denote the sites with significant deformation changes or anomalies, the red circles denote the $M_S \geq 5.5$ earthquakes since 2012, respectively; black triangles and rectangles denote continuous deformation observation stations and cross fault observation sites, the red and blue lines show the faults and rivers

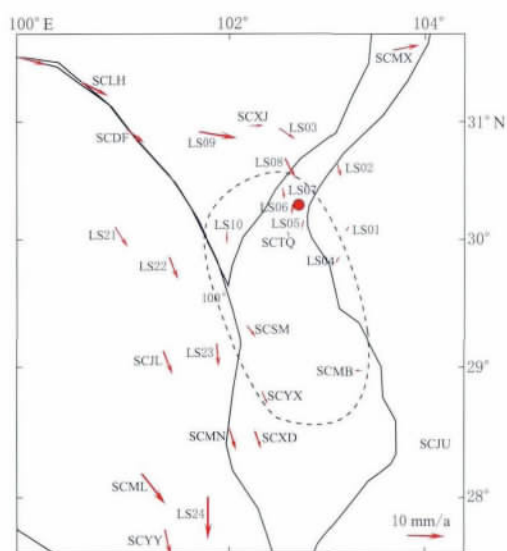


图 10 芦山 $M_s7.0$ 地震震中区域
水平位移年速率分布

虚线椭圆表示水平运动速率较低的区域

Fig. 10 Annual velocities of horizontal
displacements in the epicentral
area of Lushan earthquake

The dashed ellipse delineates the area with
lower horizontal movement velocities

异。芦山地震前观测到的变形空区明显受到台站布局及观测手段多样性的影响，这里展示的只是一个大致的分布。

GPS 资料也验证了芦山 $M_s7.0$ 地震前形变空区的存在。利用 GPS 陆态网络和中国地震局地震预测研究所汶川地震科考 GPS 站 2010 年 6 月 30 日—2013 年 2 月 20 日数据，以东部稳定基准计算获得了各站的水平位移年速率，依据其速率大小也可勾画出运动速率较小的台站所在的区域(图 10)。该区域内，靠近震中最近的 LS05 和 LS06 台站距离震中 17 km 左右。其水平位移年速率较周围台站是最小的，垂直位移速率也具有相近的特征。

比较图 9 与图 10，尽管给出的两个形变“空区”在形态和范围上有所差别，但基本上都反映出近震源区域是变形速率最小、异常最少的区域。

4 结论

对芦山 $M_s7.0$ 地震前多种形变观测数据的分析表明，强地震前近场与远场形变变化的特征具有显著的差别。沿鲜水河断裂带一些跨断层基线自 2013 年 1 月开始的短期加速变化，及沿安宁河、则木河断裂带个别场地的跨断层水准基线自 2010 年 4 月出现的巨幅异常等与芦山地震在异常持续时间和发震构造上具有一定的联系。这些突出的形变异常主要分布在芦山地震的外围区域。在靠近震中附近的鲜水河、龙门山和安宁河 3 条主要断裂围成的三叉口地区，连续形变(倾斜、应变、重力)及断层水准和蠕变观测临震前均未有显著的异常变化，GPS 水平、垂直位移年速率最小，是形变变化或形变异常分布的“空区”。其中，近震源区域附近台站的倾斜、重力年变化幅度震前 2—3 年不是增大，而是减小。

芦山 $M_s7.0$ 地震前各种形变资料的分析结果与构造活动引起的变形场也有较大的差别，甚至也有悖于常规意义上对“以场求源”，即在近震源区域捕捉失稳变化预报地震思路的理解，但这种结果可能体现了强地震应变积累与地震释放之间矛盾的交替(吴翼麟，1990)，即通过大变形释放地震能量，通过小变形积累起大的地震应变。

芦山 $M_s7.0$ 地震前观测到的形变前兆现象特征与汶川 $M_s8.0$ 地震等震前的前兆现象较为接近(Johnston *et al*, 1990; Linde *et al*, 1992; Bilham, 2005; Amoruso, Crescentini, 2010; 牛安福等, 2012)。因此，芦山 $M_s7.0$ 地震前近震源区域观测到的连续形变观测前兆为认识与强地震孕育有关的变形过程及开展地震预报研究等提供了新的思路。

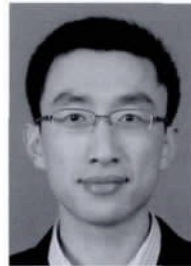
参 考 文 献

- 牛安福. 1991. 阳高 6.1 级地震前倾斜固体潮振幅因子熵的变化[J]. 地壳形变与地震, **11**(2): 1—7.
- 牛安福. 2003. 地倾斜变化的突变性及与地震关系的研究[J]. 地震学报, **25**(4): 441—445.
- 牛安福. 2005. 地震短期、短临预测面临的“最后一分钟”[J]. 国际地震动态, (2): 29—31.
- 牛安福, 张凌空, 闫伟, 吉平. 2012. 汶川地震近震源区地形变短期前兆现象的解析[J]. 地震, **32**(2): 52—63.
- 牛安福, 张凌空, 闫伟, 贾晓东, 李晓帆. 2009. 汶川地震前南北地震带中北段地形变变化特征的研究[J]. 地震, **29**(1): 100—107.
- 牛安福, 张雁滨, 柯丽君, 刘祖荫, 郑文衡. 1999. 地震前地壳形变异常分布的非均匀性特征[J]. 地震, **19**(2): 149—154.
- 王海涛, 杨马陵. 1990. 地震前兆系统信息熵的初步研究[J]. 中国地震, **6**(2): 10—14.
- 吴翼麟. 1990. 定点形变前兆预报地震的观测技术与分析方法[J]. 地震, (5): 33—45.
- 周硕愚, 施顺英, 帅平. 1997. 唐山地震前后地壳形变场的时空分布、演化特征与机理研究[J]. 地震学报, **19**(6): 559—565.
- 朱传镇. 1989. 应用熵的原理推进地震活动定量研究[J]. 地震, **12**(1): 75—76.
- 朱令人, 王海涛, 白超英, 周仕勇, 龚宇清. 1990. 澜沧—耿马 7.6 级地震前中小地震活动信息熵和分维的研究[J]. 内陆地震, **4**(4): 310—317.
- Amoruso A, Crescentini L. 2010. Limits on earthquake nucleation and other pre-seismic phenomena from continuous strain in the near field of the 2009 L'Aquila earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **37**: L10307, doi: 10.1029/2010GL043308, 2010.
- Bilham R. 2005. Co-seismic strain and the transition to surface afterslip recorded by creep-meters near the 2004 Parkfield epicenter[J]. *Seism Res Lett*, **76**(1): 49—57.
- Das S, Scholz C H. 1981. Theory of time-dependent rupture in the Earth[J]. *J Geophys Res*, **86**(B7): 6039—6051.
- Dubrovskiy V A, Sergeev V N. 2006. Short- and medium-term earthquake precursors as evidence of the sliding instability along faults[J]. *Physics of the Solid Earth*, **42**(10): 802—808.
- Johnston M J S, Linde A T, Gladwin M T. 1990. Near-field high precision strain prior to the October 18, 1989 Loma Prieta M_L 7.1 earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **17**: 1777—1780.
- Johnston M J S, Mortensen C E. 1974. Tilt precursors before earthquakes on the San Andreas fault, California[J]. *Science*, **186**: 1031—1034.
- Linde T, Gladwin M T, Johnston M J S. 1992. The Loma Prieta earthquake, 1989 and earth strain tidal amplitudes: An unsuccessful search for associated changes[J]. *Geophys Res Lett*, **19**(3): 317—320.
- Mjachkin V I, Brace W F, Sobolev G A, Dieterich J H. 1975. Two models for earthquake forerunners[J]. *Pure Appl Geophys*, **113**(1): 169—181.
- McHugh S, Johnston M J S. 1978. Dislocation modeling of creep-related tilt changes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **68**: 155—168.
- Mogi K. 1985. Temporal variation of crustal deformation during the days preceding a thrust-type great earthquake: The 1944 Tonankai earthquake of magnitude 8.1, Japan[J]. *Pure Appl Geophys*, **122**(6): 765—780.
- Nur A. 1972. Dilatancy, pore fluids and premonitory variations of t_S/t_P travel times[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **62**(5): 1217—1222.
- Rikitake T. 1975. Dilatancy model and empirical formulas for an earthquake area[J]. *Pure Appl Geophys*, **113**(1): 141—146.
- Rummel F, Alheid H J, Frohn C. 1978. Dilatancy and fracture induced velocity changes in rock and their relation to frictional sliding[J]. *Pure Appl Geophys*, **116**: 743—764.
- Takemoto S. 1991. Some problems on detection of earthquake precursors by means of continuous monitoring of crustal strains and tilts[J]. *J Geophys Res*, **96**(B6): 10377—10390.

作者简介



缪 森 中国地震局地壳应力研究所研究实习员, 中国地震局地球物理研究所在职博士研究生。2009 年中国海洋大学勘查技术与工程专业毕业, 获学士学位; 2012 年中国地震局地壳应力研究所固体地球物理学专业毕业, 获硕士学位。现主要从事地球动力学数值模拟方面的研究。



赵 静 中国地震台网中心研究实习员。2012 年中国地震局地震预测研究所固体地球物理专业毕业, 获硕士学位。硕士期间主要从事块体应变与断层滑动和闭锁的研究。现主要从事 GPS 数据处理与孕震信息提取、地震前兆信息分析等方面的研究。中国地震学会会员。



刘博研 中国地震局地壳应力研究所助理研究员。2006 年中国地质大学(北京)固体地球物理专业毕业, 获学士学位; 2009 年中国科学院研究生院(现为中国科学院大学)固体地球物理学专业毕业, 获硕士学位; 2012 年中国科学院研究生院固体地球物理专业毕业, 获博士学位。曾从事强地面运动模拟、震源物理等方面的研究, 现从事断层动力学、地震活动性等方面的研究。中国地球物理学会终身会员, 美国地球物理学会(AGU)会员。



陈 石 中国地震局地球物理研究所副研究员。2009 年中国科学院研究生院(现为中国科学院大学)固体地球物理学专业毕业, 获博士学位。主要从事重磁位场数据处理及方法、地球动力学、数值建模和并行计算及可视化、地球重力场变化与地震活动性关系等方面研究。中国地球物理学会、中国地震学会终身会员。



牛安福 中国地震台网中心研究员。1986 年山东师范大学应用数学专业毕业, 获学士学位; 1989 年武汉地震研究所构造形变与地球动力学专业毕业, 获硕士学位; 2000 年中国地震局地球物理研究所固体地球物理专业毕业, 获博士学位。主要从事地形变观测、前兆机理及地震预测方面的研究。中国地震学会、欧洲地球物理学会及美国地震学会会员。



石 磊 中国地震局地球物理研究所助理研究员。2012 年中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院地球探测与信息技术专业毕业, 获博士学位。主要从事重力资料处理与反演、解释方法及其应用方面的研究。美国地球物理学会(AGU)和勘探地球物理学家学会(SEG)会员。