

利用水准测量数据分析芦山 $M_s 7.0$ 地震前 龙门山断裂带南段应变积累^{*}

宋成科, 李腊月, 孟庆筱, 郑宇, 管见, 夏峰, 周海涛, 李进武

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要: 利用2010年和2013年两期一等水准测量数据分析了龙门山断裂带南段芦山 $M_s 7.0$ 地震前的应变积累。结果表明:(1)汶川地震的发生明显加速了该区域应变积累的过程, 龙门山断裂带南段主要断层区域垂直形变速率为 $6 \sim 9 \text{ mm/a}$, 表明汶川地震的发生加速了此次芦山地震的孕育过程; 靠近鲜水河断裂带区域垂直形变速率为 $1 \sim 5 \text{ mm/a}$, 低于汶川地震前的隆升速度。(2)芦山地震并未释放该区域长期积累的应变能, 龙门山断裂带南段仍然具有发生破坏性地震的可能。

关键词: 应变积累; 水准测量; 龙门山断裂带南段; 芦山 $M_s 7.0$ 地震

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2015)02-0237-05

0 引言

2013年4月20日芦山 $M_s 7.0$ 地震是继2008年汶川地震后发生在龙门山断裂带的又一破坏性地震, 中国地震台网测定震中位置为 (30.3°N , 103.0°E), 震源深度为13 km, 震源机制解的结果显示芦山地震为一次纯逆冲型地震(曾祥方等, 2013)。芦山 $M_s 7.0$ 地震发生在龙门山断裂带的南段, 地貌上为中高山区, 第四纪盆地与地层不发育, 顺地层发育一系列近平行的NE向断裂带。龙门山断裂带各条断裂南段自西向东分别为耿达—陇东断裂、盐井—五龙断裂、大川—双石断裂和大邑断裂。根据地形地貌资料和活动断层探测结果可知, 耿达—陇东断裂和大邑断裂至今尚未发现明确的断错晚更新世—全新世剖面; 盐井—五龙断裂直接断错晚第四纪地层剖面只有五龙附近1个; 大川—双石断裂断错了晚更新世—全新世地层, 一次事件的位错仅为0.3 m, 且断面并不十分清晰, 说明发生过的古地震事件震级应该不会太高(陈立春等, 2013)。沿龙门山断裂带南段, 历史上记载有1327年天全 $M_s \geq 6$ 地震、1941年泸定—天全一带 $M_s 6.0$ 和1970年大邑 $M_s 6.2$ 地震共3次 $M_s \geq 6.0$ 地

震。在此地震构造背景下, 研究人员利用不同的资料对芦山地震与汶川地震的关系进行了讨论(应丹琳等, 2013; 王卫民等, 2013), 并且进一步探讨了龙门山断裂带尤其是其南段以及周边区域的危险性(单斌等, 2013; 朱荣欢等, 2013)。

水准测量作为认识地震破裂过程、了解地震前应力应变积累过程、揭示地震孕育过程的重要手段而受到广泛关注。芦山地震后, 中国地震局迅速组织了“芦山 $M_s 7.0$ 地震科学考察”, 中国地震局第一监测中心于2013年5月在四川西南部开展了部分一等水准测量工作。本文利用2010年8月和2013年5月水准测量资料, 同时结合龙门山断裂带南段地震的活动性资料, 分析了芦山 $M_s 7.0$ 地震前的应变积累情况, 为认识芦山地震的孕震机理提供了参考。

1 水准测量资料介绍

2013年5月测量为一等水准测量, 每千米偶然中误差约为 $\pm 0.40 \text{ mm}$, 测网位于龙门山断裂带最南端, 部分处于龙门山断裂带与鲜水河断裂的交汇部位, 主要包括3条测线, 寨石线: 甘谷地基 (29.8°N , 102.2°E)—石棉 SCSSM (29.2°N , 102.3°E); 新

^{*} 收稿日期: 2014-07-01.

基金项目: 中国地震局地震研究所所长基金 (IS201366007) 和中国地震局第一监测中心主任基金 (FMC2014001) 联合资助.

雅线: 甘谷地基 (29.8°N, 102.2°E) —雅安 2033 (30.1°N, 103.1°E); 雅西线: 雅安 2033 (30.1°N, 103.1°E) —石棉 SCSM (29.2°N, 102.3°E), 总长约 425.7 km, 该水准线路与 2010 年中国地震局第一监测中心在四川地区开展的一等水准测量部分测点重合, 施测的具体范围见图 1。

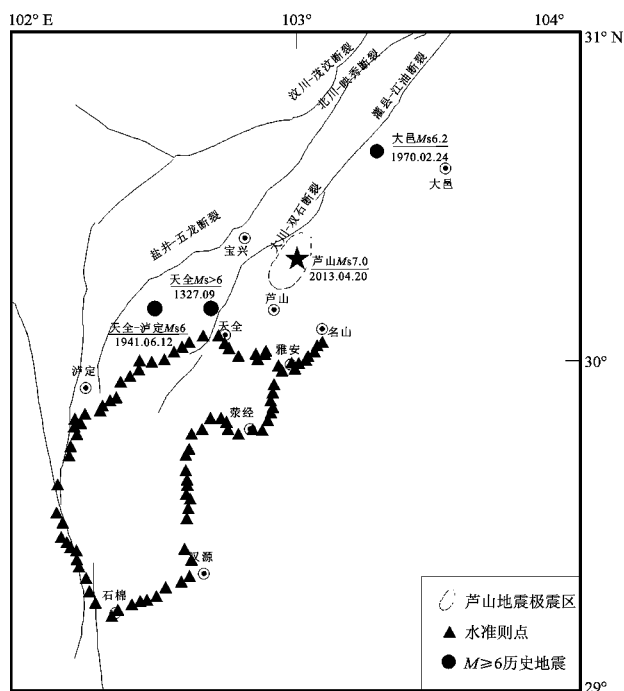


图 1 龙门山断裂带南段地震地质情况及测线分布
Fig. 1 The seismic geology condition and the survey line distribution in the southern segment of Longmenshan Faults

地震尤其是 6 级以上强震所产生的同震位移场和震后弛豫位移场会对区域垂直形变速率场产生一定的影响, 因此在利用重复水准观测资料研究区域垂直地壳运动速度时, 需要分析、避开或去除区域内强震的位移场和震后弛豫位移场影响。两次测量时间间隔 3 年, 在这段时间内发生了 2013 年 4 月 20 日芦山 $M_s 7.0$ 地震, 此次地震可能是对该区域地壳形变影响最大的事件。根据本次地震震源破裂过程可知, 地震能量主要释放区域沿震中两侧 20 km 左右, 且滑移破裂主要集中在深部, 地表附近的破裂很小 (刘成利等, 2013)。震后地震考察资料并未揭示大范围地表破裂 (徐锡伟等, 2013)。GPS 观测到的同震位移幅度不大 (蒋峰云等, 2013), 最靠近震中的 LS05 站位移最大, 垂直上升位移为 83.6 mm, 而其西侧临近的 LS06 站的垂

直位移为 16.3 mm, 往东北侧的 GPS 站位移较快衰减 (武艳强等, 2013)。通过对芦山地震余震资料进行的重新定位, 可知本次地震及其余震主要分布在 30°N 以北的区域 (苏金蓉等, 2013; 房立华等, 2013)。距离震中 15 km 的宝兴跨断层水准测点水准观测数据显示, 2010 ~ 2014 年间该区域的垂直形变变化幅度较小, 最大变化幅度小于 1 mm, 说明芦山地震并未对该区域造成显著影响 (图 2)。所有资料显示本次地震的同震位移较小, 对测网区域内地壳垂直形变造成的影响不显著, 因此可以利用 2010 年和 2013 年两期水准测量的结果分析该时段内龙门山断裂带南段的应变积累情况。

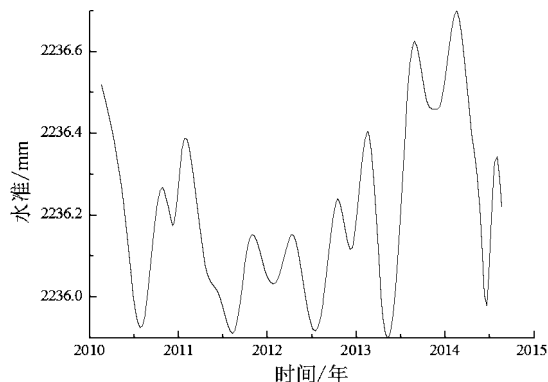


图 2 芦山 $M_s 7.0$ 地震前后宝兴跨断层水准变化
Fig. 2 The changes of cross fault water leveling at Baoping Station before and after Lushan $M_s 7.0$ earthquake

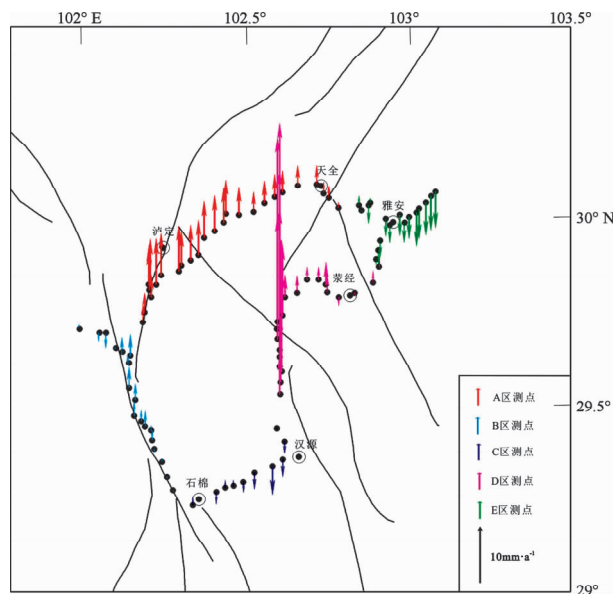


图 3 测区垂直形变速率分布图
Fig. 3 The distribution diagram of vertical deformation rate in survey zone

垂直位移能够反映断裂带的垂直活动特征。根据两期的水准测量资料, 绘制了该区域的垂直形变速率图 (图 3)。从两期的测量结果可知, 2010~2013 年, 测区内地壳垂直形变可划分为 5 个不同的区域。A 区 (泸定—天全) 位于龙门山断裂带上盘, 为隆升区域, 垂直形变速率约为 6~9 mm/a (图 4a)。B 区 (泸定—石棉) 靠近鲜

水河断裂带, 为隆升区域, 垂直形变速率约为 1~5 mm/a (图 4c)。C 区 (石棉—汉源) 为沉降区域, 垂直形变速率为 0~-3 mm/a (图 4e)。D 区 (汉源—荣经) 为隆升区域, 垂直形变速率不均匀, 最大可达 40 mm/a (图 4g)。E 区 (雅安) 为沉降区域, 垂直形变速率约为 -4~-6 mm/a (图 4i)。测区内不同区域垂直形变速率不同可能

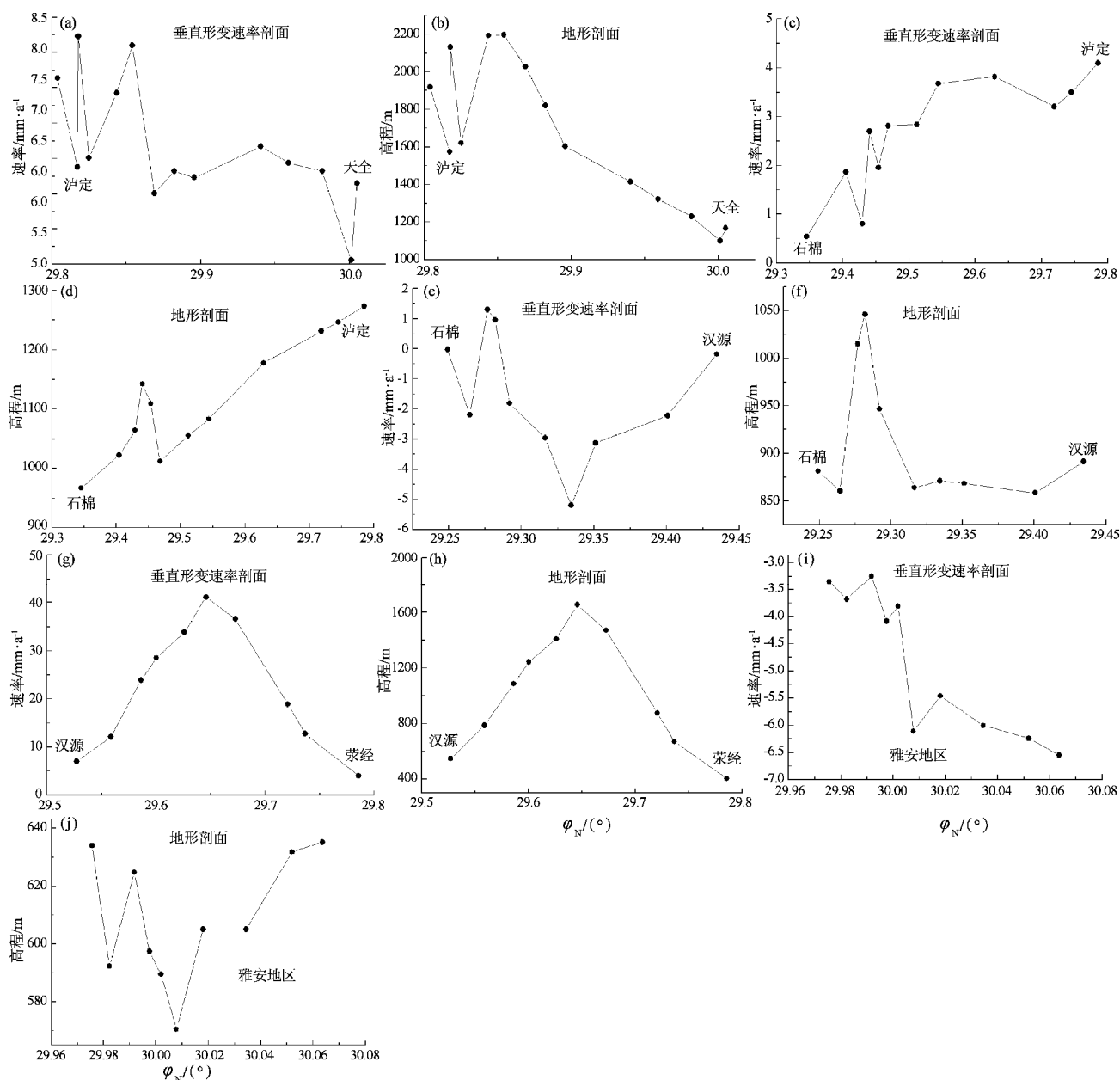


图 4 垂直形变速率及地形剖面图

(a), (b) 泸定—天全 (A 区) 剖面; (c), (d) 泸定—石棉 (B 区) 剖面; (e), (f) 石棉—汉源 (C 区) 剖面; (g), (h) 汉源—荣经 (D 区) 剖面; (i), (j) 雅安地区 (E 区) 剖面

Fig. 4 Profile maps of vertical deformation rate and topographic

(a) and (b) are profiles of Luding-Tianquan (A area); (c) and (d) are profiles of Luding-Shimian (B area); (e) and (f) are profiles of Shimian-Hanyuan (C area); (g) and (h) are profiles of Hanyuan-Yingjing (D area); (i) and (j) are profiles of Ya'an area (E area)

与其所处位置的构造背景有关,如 A 区隆升速率高于 B 区可能是因为 A 区处于逆冲作用强烈的龙门山断裂带上盘,而 B 区则处于以走滑运动为主的鲜水河断裂带附近。E 区出现地壳沉降可能是该区域处于芦山地震余震的边界地带,受到芦山地震及其余震的影响而形成沉降。从整体上看,测网所覆盖的区域以相对隆升为主,隆升向 NW 向展布。值得注意的是汉源—荥经区域(D 区)地壳垂直形变速率表现出明显的不均匀性,垂直形变速率与地形呈现出较强的正相关性,可能反映的是该区域的继承性隆升特点(图 4i、j)。下文重点分析该区域主要断裂带区域(A 区和 B 区)的应变积累情况。

2 应变积累与地震危险性分析

王庆良等(2008)利用 1970~2006 年川西及邻区多期水准观测资料获得了川西地区近 30 年的长期地壳垂直运动速率,其中泸定—石棉区域(B 区)相对于四川盆地的现今隆起速率为 5.8 mm/a,泸定—天全区域(A 区)垂直形变速率为 2~3 mm/a,汉源—雅安区域(D 区)为 1~3 mm/a。焦青(2008)利用跨龙门山断裂的流动短水准测量资料分析了汶川地震前龙门山断裂的活动性,其中距离本次测网较近的双河和蒲江测点的垂直形变速率均小于 1 mm/a。综合这些研究成果可知龙门山断裂带南段的垂直形变速率不高,为 1~3 mm/a,靠近鲜水河断裂带区域的垂直形变速率相对较高。根据 2010 年和 2013 年两期水准测量结果,泸定—天全区域地壳垂直形变速率较汶川地震前有明显增大,达到 6~9 mm/a,甚至更高,说明汶川地震使得龙门山断裂带南段地壳垂直变形加快,应变积累更加迅速。该区域地壳垂直形变速率加快,实际反映了该区域较汶川地震前遭受更强的挤压作用,这可能是由于汶川地震的发生导致锁闭的中北段解耦,巴颜喀拉块体向东的挤压运动更多的被依然锁闭的龙门山断裂带南段所吸收,从而增加了该区域的地震危险性,在一定程度上加速了芦山 $M_s7.0$ 地震的发生,该结果与 GPS 观测到的汶川地震后龙门山断裂带南段垂直断层的压性应变的快速积累是一致的(吕志鹏等, 2014)。王成虎等(2014)利用原地应力实测资料,结合震源机制解结果分析,认为芦山地震前研究区地壳

应力处于摩擦极限平衡或者压平衡状态。芦山地震前,龙门山断裂带南段较高的背景应力场和较快的应变积累速率是此次破坏性地震发生的重要地球动力学背景。泸定—石棉区域地壳垂直形变速率较汶川地震前具有明显的降低,为 1~5 mm/a,低于汶川地震前的隆升速度。

根据两期水准测量的结果,2010~2013 年,天全、泸定和荥经区域垂直形变积累速率较高,考虑到芦山地震的同震位移和余震未对这些区域的应变积累造成影响,这些区域仍然具有较高的地震危险性。芦山 $M_s7.0$ 地震后,高原等(2013)从地震地表破裂,同震位移场和库仑应力等角度对震后该区域地震危险性进行了分析。陈运泰等(2013)通过对地震构造、地震活动性、地震矩释放“亏空”区以及余震活动规律的分析,认为芦山地震的发生并没有显著地缓解龙门山断裂带南段的地震危险性,天全—荥经—泸定—康定一带存在发生 $M_w7.2$ 地震的潜在危险。

3 结论

本文利用 2010 年和 2013 年两期一等水准测量资料分析了芦山 $M_s7.0$ 地震前龙门山断裂带南段的应变积累,为认识该区域断层活动性和地震危险性提供了参考资料。

(1) 龙门山断裂带南段地壳垂直形变速率在汶川地震后明显加快,该断层上盘的隆升速率为 6~9 mm/a,表明汶川地震的发生加速了芦山地震的孕育过程;靠近鲜水河断裂带区域垂直形变速率为 1~5 mm/a,低于汶川地震前的隆升速度。

(2) 由于芦山地震并没有显著释放测区内积累的应变能,在现今地壳快速隆升的背景下测区内仍然具有发生破坏性地震的危险。

两次水准测量跨度 3 年,因此无法对 2010~2013 年某一特定时段的地壳垂直形变进行监测和分析。汉源—荥经区域(泥巴山)虽然表现出继承隆升运动特点,但汶川地震加速该区域垂直形变的结果显然不足以解释该区域异常高的形变速率,因此有必要在该区域继续开展更加深入的研究工作。

参考文献:

陈立春,冉永康,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.

- 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(D辑), 43(6):1064-1072.
- 单斌,熊熊,郑勇,等. 2013. 2013年芦山地震导致的周边断层应力变化及其与2008年汶川地震的关系[J]. 中国科学(D辑), 43(6):1002-1009.
- 房立华,吴建平,王未来,等. 2013. 四川芦山 $M_s7.0$ 级地震及其余震序列重定位[J]. 科学通报, 58(20):1901-1909.
- 高原,王琮,赵博,等. 2013. 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[J]. 中国科学(D辑), 43(6):1038-1046.
- 蒋峰云,朱良玉,张晓亮,等. 2013. 芦山7.0级地震形变孕育背景及同震响应[J]. 地震研究, 36(4):450-454.
- 焦清,杨选辉,许丽卿,等. 2008. 汶川8.0级地震前后龙门山断裂活动特征浅析[J]. 大地测量与地球动力学, 28(4):7-11.
- 刘成利,郑勇,葛黎,等. 2013. 2013年芦山7.0级地震的动态破裂过程[J]. 中国科学(D辑), 43(6):1020-1026.
- 吕志鹏,伍吉仓,孟国杰,等. 2014. 青藏高原东缘地应变空间分布特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 34(1):19-23.
- 苏金蓉,郑钰,杨建思,等. 2013. 2013年4月20日四川芦山 $M7.0$ 级地震与余震精确定位及发震构造初探[J]. 地球物理学报, 56(8):2636-2644.
- 王成虎,宋成科,郭啟良,等. 2014. 利用原地应力实测资料分析芦山地震震前浅部地壳应力积累[J]. 地球物理学报, 57(1):102-114.
- 王庆良,崔笃信,王文萍,等. 2008. 川西地区现今垂直地壳运动研究[J]. 中国科学(D辑), 38(5):598-610.
- 王卫民,郝金来,姚振兴. 2013. 2013年4月20日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果[J]. 地球物理学报, 56(4):1412-1417.
- 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:一次典型的盲断层型地震[J]. 科学通报, 58(20):1887-1893.
- 应丹琳,李忠权,曾庆,等. 2013. “4.20”芦山地震与“5.12”汶川地震发震断裂初析[J]. 成都理工大学学报, 40(3):250-256.
- 曾祥方,罗艳,韩立波,等. 2013. 2013年4月20日四川芦山 $M_s7.0$ 地震:一个高角度逆冲地震[J]. 地球物理学报, 56(4):1418-1424.
- 朱荣欢,解朝娣,赵小艳,等. 2013. 芦山7.0级地震产生的应力变化场及其对滇东地区的影响研究[J]. 地震研究, 36(4):455-461.

Analysis on Strain Accumulation in the Southern Segment of Longmenshan Fault Belt before Lushan $M_s7.0$ Earthquake Inferred from Leveling Data

SONG Cheng-ke, LI La-yue, MENG Qing-xiao, ZHENG Yu, GUAN Jian,
XIA Feng, ZHOU Hai-tao, LI Jin-wu
(First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China)

Abstract

The strain accumulation in the southern segment of Longmenshan Fault Belt before the Lushan $M_s7.0$ earthquake was analyzed by using first-order leveling data in 2010 and 2013. The results show that: (1) The occurrence of Wenchuan $M_s8.0$ earthquake obviously accelerated the strain accumulation of the study area, and the vertical deformation rate was 6 ~ 9 mm/a in main faults zone of the southern segment of Longmenshan Fault Belt, which indicated that the occurrence of Wenchuan $M_s8.0$ earthquake accelerated the preparation process of Lushan $M_s7.0$ earthquake. The vertical deformation rate was 1 ~ 5 mm/a in the area near the Xianshuihe Fault Belt, which was lower than the uplift velocity before Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. (2) The long-term accumulative strain energy was not released by Lushan $M_s7.0$ earthquake in the study zone, and it still had the risk to occur the destructive earthquake in the southern segment of Longmenshan Fault Belt in the future.

Key words: strain accumulation; leveling measure; southern segment of Longmenshan Fault; Lushan $M_s7.0$ earthquake