

张超, 王世进, 王宁, 王生文, 徐佳垚, 2017. 垂直形变趋势累计率在川滇地区的应用. 震灾防御技术, 12 (2): 329—337.
doi: 10.11899/zzyf20170209

垂直形变趋势累计率在川滇地区的应用¹

张超 王世进 王宁 王生文 徐佳垚

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要 本文在研究形变趋势累计率的基础之上, 对数据处理方法进行了局部改进, 将跨断层场地布设较多的川滇地区作为实验区, 利用精密水准测量分析该地区的垂直形变异常强度, 并结合川滇地区震例开展研究。分析发现强震发生前后一段时期, 震中附近形变异常强度几乎保持一致, 但在震前(1、2个月左右)会发生较大改变, 震后逐步恢复到与震前相同的情况; 强震主要发生在形变异常强度值变化较大区域附近。垂直形变趋势累计率在中短期的映震效果较好。

关键词: 垂直形变趋势累计率 跨断层测量 精密水准 形变异常强度

引言

跨断层形变测量是通过观测布设在断层两侧控制点的相对关系, 以监测断层(上、下盘)的相对运动。由于控制点布设的位置, 跨断层测量能更容易、更直接地观测到断层的相对运动情况。很多学者对跨断层测量进行了研究。张超(1981)将断层上、下盘作为刚性块体, 从几何学的角度进行了研究, 利用基线观测数据、水准观测数据得到断层三维运动情况。薄万举等(1998)在此基础上, 对八宝山断裂带上的跨断层场地数据进行了处理, 对该地区的断层运动情况进行分析, 发现在一定区域内跨断层测量对异常形变监测和震情预测研究有重要意义。张兴飞(1992)针对跨断层形变测量的特点, 构建了基于混合回归理论的动态数据处理模型, 该模型对地震前兆有较好的反映。焦青等(1998)利用华北和南北地震带跨断层流动水准和定点水准观测资料, 研究了断层垂直位移速率异常的空间分布以及震源区的逼近情况, 发现通过研究断层垂直位移速率预测地震是一种可行方法。张希等(2013)将自适应控制理论引入断层流动形变分析中, 通过构建慢时变前兆系统结构, 对5个典型场地资料进行分析, 发现其异常识别、异常分类的判定较原始曲线更为直观, 与以往的形变指标相比也有所改进。张晶等(2011)从断层受力运动方向入手, 对断层在一定外力作用下的运动情况进行了不同的组合, 形成断层活动协调比理论, 分析了断层活动性质和应变积累状态, 对地震中长期预测有一定的参考意义。

基于跨断层测量的研究基本上都是通过计算断层的三维运动情况, 然后对其运动规律进行发掘, 发现异常, 这些方法的最终目的都是为了寻找或确定某条断层或某个场地附近断层

1 基金项目 科技部科技基础性工作专项(2015FY210400), 中国地震局第一监测中心主任基金(FMC2015006), 中国地震局监测、预测、科研三结合课题(CEA-JC/3JH163703)共同资助

[收稿日期] 2016-07-11

[作者简介] 张超, 男, 生于1987年。硕士研究生, 助理工程师。主要从事区域地壳形变数据处理与方法等研究。E-mail: 875011229@qq.com

的运动变化机理, 进而开展地震预测预报工作。本文在该领域专家研究的基础上, 深入研究垂直形变趋势累计率(陈兵等, 2000), 对其反映的物理机制以及区域应变场在中强震发生前后的变化规律进行了进一步研究, 并得到了一些有用的结论。

1 基本原理

垂直形变趋势累计率是通过垂直形变时变曲线建立的一种可较明确地量化趋势变化的判定方法。此方法以断层总体速率变化绝对量为基础, 再根据断层总的垂直活动量判断断层运动趋势, 而且具有表征孕震应力场时空动态演化的物理意义。

首先通过公式(1)获得断层的相对运动速率(上盘相对下盘, 上升为正):

$$v_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (1)$$

i 表示观测值序列号, t_i 为观测序列所对应的时间, y_i 表示 t_i 时刻上盘相对下盘观测的高差值, v_i 表示 t_i 时刻相邻 2 期断层的相对垂直形变速率。

为了排除干扰因素, 更真实地计算断层上、下盘的相对运动速度, 本文在计算断层相对运动速率时, 首先将不同年份(序号为 j) 相同月份(序号为 k) 的速率值 $v_{j,k}$ 取平均得到 \bar{v}_k , 然后再在此基础上, 用每一年每一期的速率值 ($v_{j,k}$) 减去每一期对应的平均值 \bar{v}_k 获取 $v'_{j,k}$, 称之为总体性去周期, 其中 j 为年。具体见式(2)、(3):

$$\bar{v}_k = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m v_{j,k} \quad (2)$$

其中 m 为参与计算测线的总观测年数。

$$v'_{j,k} = v_{j,k} - \bar{v}_k \quad (3)$$

该想法启发于大地水准面的确定。与相邻年同期观测数据做差或较短观测期间不同时间段(年)中相同期(年中月)取平均值获取相对运动速率的传统方法相比, 这样做能够更好地消除因环境等因素引起的长短周期影响。

总体去周期后, 那么以起算时刻(序号为 s , 场地起始观测年份<起算年份<最后观测年份)至计算时刻(序号为 m 、 k_0 所对应年份和相应的月份)这一时间段断层总体垂直速率变化量 v_{a,k_0} 如下:

$$v_{a,k_0} = \sum_{j=s}^{m-1} \sum_{k=1}^{12} v'_{j,k} + \sum_{k=1}^{k_0} v'_{m,k} \quad (4)$$

其中, 一般情况下 $s=m-10$ 。

将每期垂直形变速率取绝对值求和, 得到(5)式, v_{d,k_0} 为此时间段垂直形变变化幅度。

$$v_{d,k_0} = \sum_{j=s}^{m-1} \sum_{k=1}^{12} |v'_{j,k}| + \sum_{k=1}^{k_0} |v'_{m,k}| \quad (5)$$

依据(4)、(5)式, 计算垂直形变趋势性的量化标准, 即(6)式, 垂直形变趋势累计率。

$$D_c = \frac{v_{a,k_0}}{v_{d,k_0}} = \frac{\sum_{j=s}^{m-1} \sum_{k=1}^{12} v'_{j,k} + \sum_{k=1}^{k_0} v'_{m,k}}{\sum_{j=s}^{m-1} \sum_{k=1}^{12} |v'_{j,k}| + \sum_{k=1}^{k_0} |v'_{m,k}|} \quad (6)$$

如果断层运动速率 v_i 为恒值，那么 $v_{a,k_0} = v_{d,k_0} = 0$ ，即 D_c 为 0/0 型。为使 D_c 与实际物理情况相符，此情况下规定 $D_c=1$ 。

由 (6) 式可以发现 $D_c \in [-1,1]$ ，那么确定垂直形变趋势起算时间后，如果 $D_c > 0$ ，则断层运动趋势与起算时刻的运动趋势一致，且断层活动性为压性；如果 $D_c < 0$ ，则断层运动趋势与起算时刻的运动趋势相反，且断层活动性为张性；如果 $D_c = 0$ ，说明断层恢复到起算时的状态，即垂直形变无变化。 $|D_c|$ 越接近 1，则可以认为断层形变异常强度越高；如果 $|D_c|$ 越接近 0 则反之。在分析过程中需要注意的是，获取的 D_c 值是基于一定的起止时间段的，因此其仅反映此时间段内断层的活动性，而且可能会与一些块体总体（长趋势）活动性不尽相同。

另外，速率绝对幅度的大小及积累时间的长短与相应的地震强度和复发周期有关。强震孕育到一定程度后，会出现闭锁、微破裂、预滑移等现象，必然对断层形变的大小和方向产生影响，从而反映到 D_c 值的异常变化。

2 跨断层观测场地情况

基于以上原理，本文以川滇地区为实验区，利用布设在重要断裂带上的跨断层场地的水准观测数据开展实验，并进行了分析。

以下为川滇地区跨断层流动场地水准资料观测情况。各个场地、各条测线的观测情况如表 1，川滇地区跨断层流动观测场地分布情况如图 1。

表 1 川滇地区在测流动跨断层场地情况表

Table 1 List of the across fault monitoring in the Sichuan-Yunnan region

场地名称	测段	所跨断层	开始观测时间	复测周期
侏倭	AB、AC	鲜水河断裂	1980.4	6 期/年
格箐坝子	AB、AC	鲜水河断裂	1974.8	6 期/年
虚墟	BA、CA	鲜水河断裂	1973.2	6 期/年
沟普	BA、CA	鲜水河断裂	1983.5	6 期/年
龙灯坝	BA、CA、DA	鲜水河断裂	1985.5	6 期/年
老乾宁	13、53、54	鲜水河断裂	1979.9	6 期/年
折多塘	BE	鲜水河断裂	2013.11	6 期/年
团结	12、13、43	鲜水河断裂	1986.5	6 期/年
棉蟹支线	13、23、57（停）、78（停）	安宁河则木河断裂	1990.3	6 期/年
安顺场	BA、CA	鲜水河断裂	1977.8	6 期/年
冕宁支线	13、23、54	安宁河则木河断裂	1981.9	6 期/年
宁南支线	54	安宁河则木河断裂	1972.6	6 期/年
汤家坪	AB、AC	安宁河则木河断裂	1981.9	6 期/年

续表

场地名称	测段	所跨断层	开始观测时间	复测周期
汤家坪新	BC	安宁河-则木河断裂	2012.9	6 期/年
尔乌	31	安宁河则木河断裂	1981.9	6 期/年
蒲江	BC	蒲江-新津-成都-德阳断裂	1977.7	6 期/年
双河	12	龙门山断裂	1977.7	6 期/年
灌县	34	龙门山断裂-灌县断裂	1978.2	6 期/年
七盘沟	CA	龙门山断裂	1986.5	6 期/年
荞窝	BC	安宁河-则木河断裂	2010	6 期/年
西昌	BA、BC	安宁河-则木河断裂	1974.6	6 期/年
宝兴	BX	盐井-五龙断裂	2008.8	6 期/年
映秀	BC	龙门山断裂-映秀断裂	1985.5	6 期/年
剑川	21、31	剑川断裂	1982.2	12 期/年
丽江	1x-2x、43	丽江断裂	1982.2	12 期/年
永胜	14、1-2x、3-2x	程海断裂	1982.2	12 期/年
楚雄	1x-2、32、35	楚雄断裂	1982.2	12 期/年
羊街	1x-x5	小江断裂-西支断裂	1982.2	12 期/年
宜良	2x-1x、2x-3x、4-3x	小江断裂东支断裂带南羊街断裂	1997.7	12 期/年
峨山	12、34	曲江断裂	1982.3	12 期/年
通海	12、32、34	曲江断裂	1982.3	12 期/年
建水	21、31	越屏-建水断裂	1982.3	12 期/年
石屏	21、31	石屏-建水断裂	1982.3	12 期/年
下关 ^①	12、32	洱海断裂	1982.2	12 期/年

①说明：例如下关测段 12，即表示从上盘控制点 1 到下盘控制点 2；2x-1x 表示上盘 2 号新控制点到下盘新 1 号控制点，x 代表新点。

上述场地中部分测线因场地环境改变或观测墩（点）遭破坏等情况而停测或更改观测路线的测段，以及未跨过断层的测段并未列出。另外由于一些新建场地的观测时间距现在较近，故这些场地的相关信息也未列出。

川滇地区跨断层观测场地多数建于 20 世纪 80 年代，主要分布在鲜水河断裂带、龙门山断裂带、安宁河-则木河断裂带以及小江断裂带等几大断裂带上，其场地分布见图 1。场地位置用五角星标注。

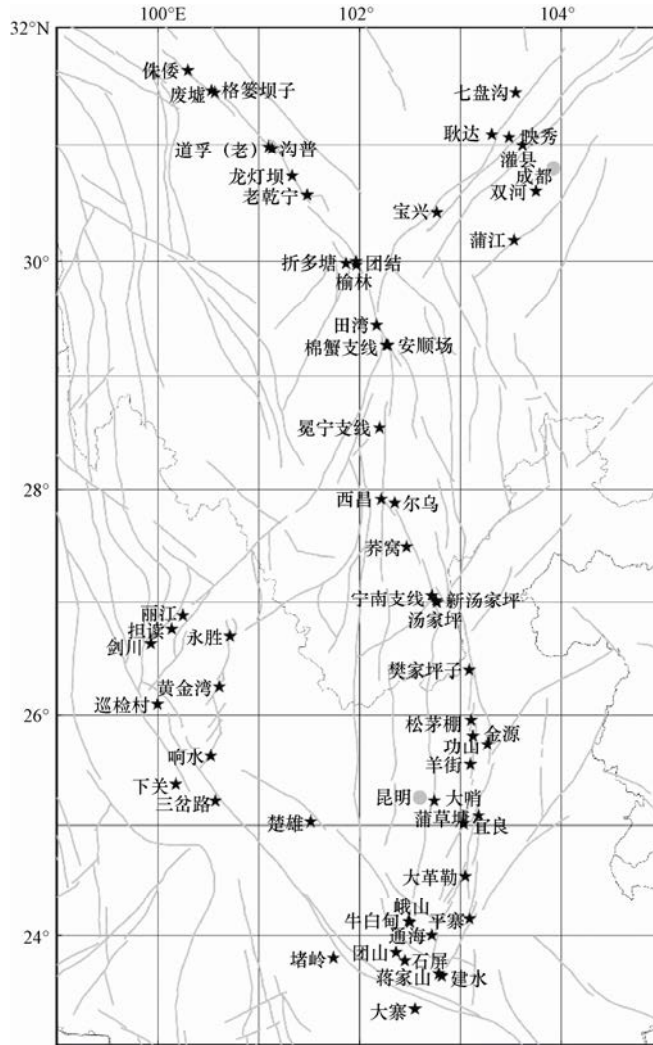


图 1 川滇地区跨断层流动观测场地及断层分布图

Fig. 1 The distribution of faults and across fault monitoring sites in the Sichuan-Yunnan region

3 实验分析

川滇地区的观测场地主要位于南北地震带上，而南北地震带是我国地震高发地区，拥有丰富的震例（刘辛中等，2015），因此作者选取该地区地震为样本进行分析。另外为弥补云南、四川跨断层场地观测周期不同以及因外界环境等因素造成的数据不全对计算的影响，在数据预处理过程中对数据进行了3次样条插值处理。其中，为获取地震前后川滇地区垂直形变趋势较为真实的变化情况，尽量选择发震时间前后各个场地都有观测数据的时间作为实验时间，对受外界条件影响或在核实异常过程中认为存在质量问题的观测数据不予采用，也尽量避免因插值造成的不必要误差。

由于篇幅原因，基于第2章所列观测场地的观测资料仅对汶川地震、芦山地震前后 D_c 值变化所反映的规律分别进行讨论，其中起算时间分别选为1998、2003年。

图 2 中, (a) 与 (d) 分别为汶川地震发生前 4 个月、震后 2 个月的垂直形变趋势累计率, (b) 与 (c) 为地震发生前 2 个月、震后 1 个月的垂直形变趋势累计率。可以看出, 汶川地震发生在垂直形变趋势变化较大的区域附近, 而地震前后, 发震地附近的垂直形变趋势发生较大改变 (矩形框示意范围), 反映其附近断层垂直形变异常强度改变较大。地震发生前 2 个月形变趋势表现为运动平缓, 即形变异常强度变小, 而震后则逐渐恢复到与震前相同的情况。作者认为, 这种情况说明发震地附近震前断层的“正常”运动趋势受阻, 导致断层附近出现更为明显的闭锁现象, 为地震的发生提供了必要条件。相关文献 (赵静等, 2012) 也给出了类似的观

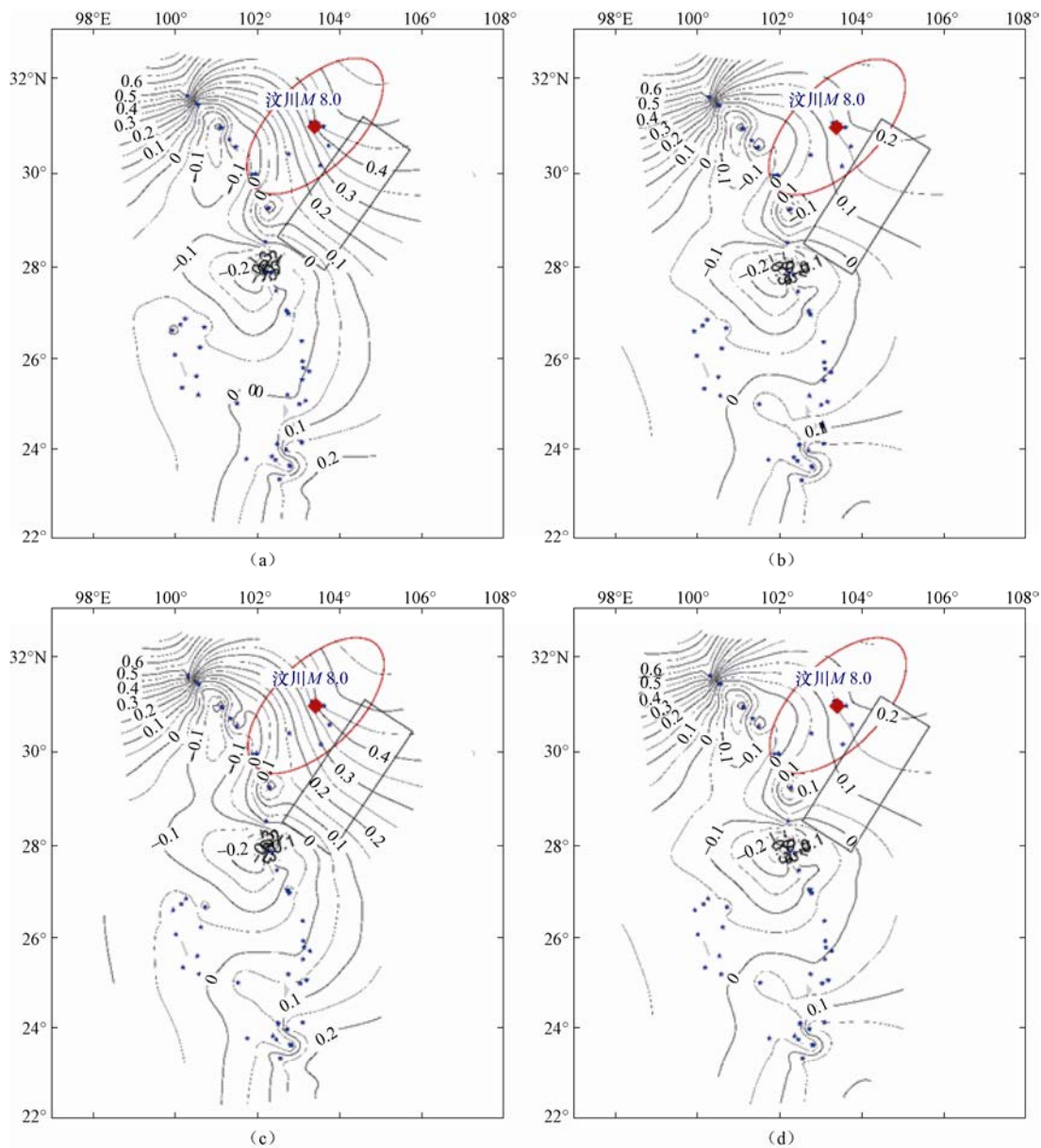


图 2 汶川地震 (2008.5.20) 前后垂直形变速率趋势变化

Fig. 2 The vertical deformation trend variation before and after the Wenchuan earthquake

点，进一步说明跨断层水准能够较有效地反映地震前兆。实验过程中，作者发现在汶川地震发生后 2 个月（图 2（d））川滇地区的垂直形变异常强度与汶川地震发震前（图 2（b））的垂直形变异常强度极为相似，而通过查询中国地震台网中心发布的地震目录可以发现，在汶川地震发生 2 个多月后，即 2008 年 7 月 24 日，汶川主震震中东北方约 250km 处的广元发生了 6.0 级强余震（郑勇等，2009；温瑞智等，2009）。需要说明的是，川滇地区跨断层观测数据的获取时间主要集中在每个观测月的中上旬，故图 2（d）显示的为广元地震发生前该地区的垂直形变异常强度，这从另一个方面（形变学）说明跨断层手段所反映的垂直形变异常强度具有较好的映震能力。

图 3 中，（a）、（b）分别为该地区发震前 6 个月和 1 个月的垂直形变趋势图，（c）、（d）

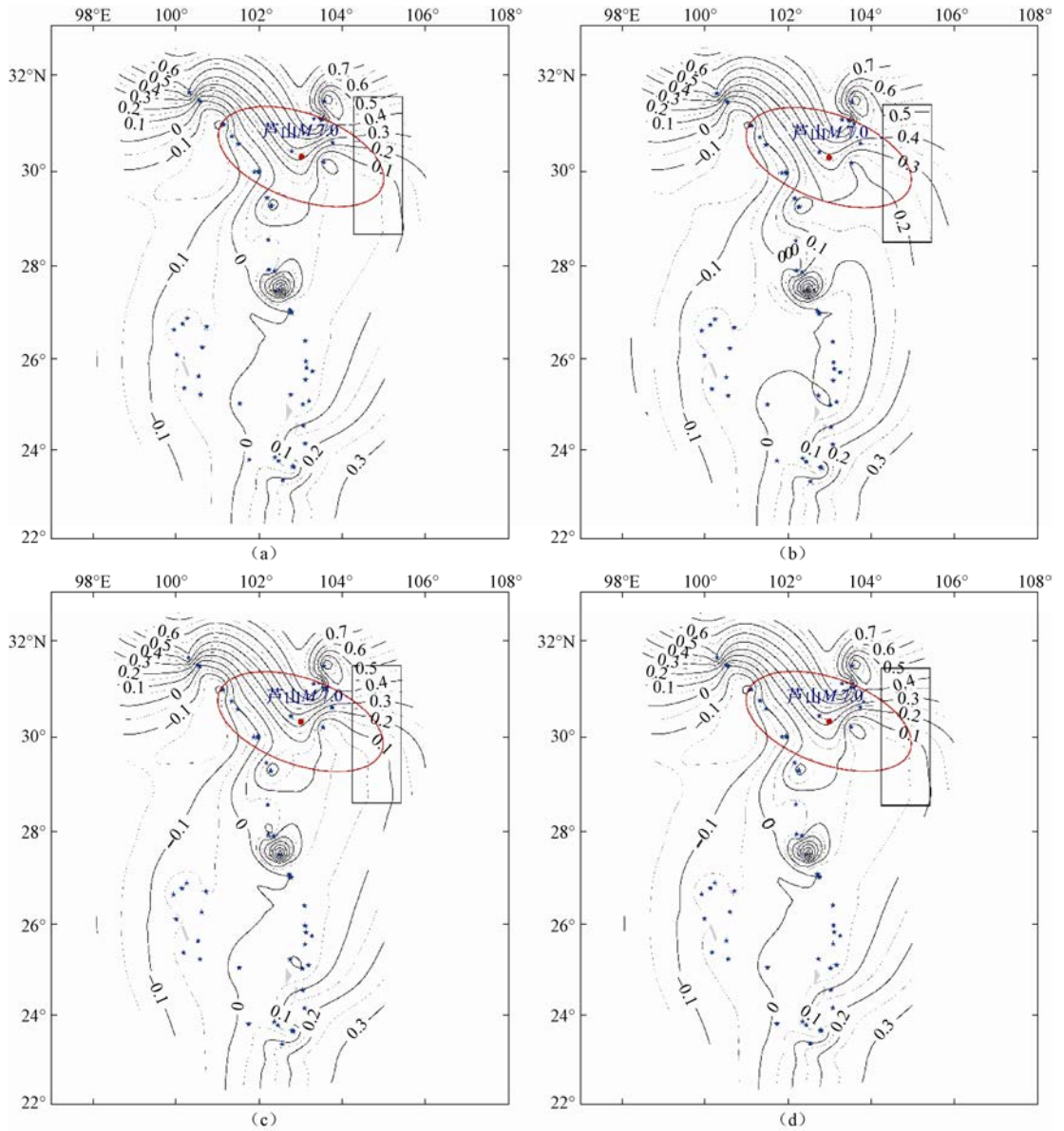


图 3 芦山地震（2013.4.20）前后垂直形变速率趋势变化

Fig. 3 The vertical deformation trend variation before and after the Lushan earthquake

为震后 1 个月和 2 个月的垂直形变趋势图。从图中可以发现芦山地震的发震地同样处于垂直形变趋势变化较大（即垂直形变异常强度值变化较大，主要集中在震中东南方向，矩形框示意范围）的地区附近。川滇地区 2012 年 9 月份与 2013 年 5 月、6 月的垂直形变趋势累计率几乎保持一致，而该地区 2013 年 3 月较 2012 年 9 月的垂直形变累计率发生了较大改变，即断层垂直形变异常强度值改变较大，随即 2014 年 4 月 20 日在该区域便发生 M_S 6.7 芦山地震。

总的来说，垂直形变趋势累计率在以下 2 方面有较好的效果：①从地震发生的位置上来看，发震地一般都处于断层形变异常强度值改变较大的地区，地震发生前断层附近的垂直形变异常强度有突然变缓或加剧的趋势；②从地震前后应变能变化的角度研究，地震发生前应变能大量累积，地震发生后得到释放，但仍处于平衡自适应阶段，震后一段时间应变能达到平衡，使其与震前相当，较好地反映了地震孕震、发震以及震后平静期的应变能变化过程（许昭永等，2015）。

4 讨论

通过分析川滇地区的震例，得到了几方面认识：从时间角度看，地震发生前后，川滇地区跨断层场地附近垂直形变异常强度几乎维持不变；从空间位置角度看，地震（中强震）主要发生在垂直形变异常强度较大地区或者其边缘及附近；从震级角度来看，较大震级的地震在震前的异常形变强度值变化比较小震级地震更为明显，但目前缺少更为确切的依据，需要开展进一步研究。总体来说，垂直形变趋势累计率在时间和空间上对中短期地震预测预报能够发挥不错的效果，但对于短临预报，由于数据采集频率以及跨断层场地分布情况的影响，该手段的有效性有待进一步验证。另外，该方法需要足够的监测场地密度，否则仅从单个跨断层场地的垂直形变趋势变化速率以及趋势变化幅度分析，会因缺少断层运动的整体性判断而更加难以获得真实的空间异常变化特征，因此对地震预测预报的帮助可能较小。地震发生过程是应变能积累-释放-再积累的过程，因此在选用垂直形变趋势累计率方法时，起算时间的选择也是不可忽略的因素之一。

致谢：感谢 2 位审稿人对本文的悉心指导，提出的建议对本文质量提升有很大帮助。本文所使用的跨断层观测数据为一线观测人辛苦所得以及兄弟单位慷慨提供，在此一并感谢。

参考文献

- 薄万举，谢觉民，郭良迁，1998. 八宝山断裂带形变分析与探讨. 地震, 18 (1): 63—68.
- 陈兵，江在森，胡斌，2000. 断层形变趋势变化研究——垂直形变趋势累积率 D_c 值. 地震地磁观测与研究, 21 (1): 50—55.
- 焦青，周俊萍，1998. 跨断层垂直位移速率的动态演化特征与强震的关系. 地震, 18 (3): 265—273.
- 刘辛中，刘志广，朱爽等，2015. 安宁河-则木河断裂带断层活动特征及其与地震活动的关系. 震灾防御技术, 10 (2): 253—261.
- 温瑞智，周正华，李小军等，2009. 汶川 M_S 8.0 地震的强余震流动观测. 地震学报, 31 (2): 219—225.
- 许昭永，文丽敏，石宝文等，2015. 川滇菱形地块的应变能积累释放周期和强震预测. 地震学报, 37 (5): 774—786.
- 张超，1981. 跨断层位移测量与局部断层活动. 地震, 1 (5): 24—25.
- 张晶，黎凯武，武艳强等，2011. 断层活动协调比在地震预测中的应用. 地震, 31 (3): 19—26.

- 张希, 唐红涛, 贾鹏等, 2013. 跨断层形变的慢时变结构分析与异常识别初探. 武汉大学学报·信息科学版, **38** (6): 710—715.
- 张兴飞, 1992. 跨断层形变测量动态数据模型的研究. 武汉测绘科技大学学报, **17** (2): 79—85.
- 赵静, 江在森, 武艳强等, 2012. 汶川地震前龙门山断裂带闭锁程度和滑动亏损分布研究. 地球物理学报, **55** (9): 2963—2972.
- 郑勇, 马宏生, 吕坚等, 2009. 汶川地震强余震 ($M_S \geq 5.6$) 的震源机制解及其与发震构造的关系. 中国科学 D 辑: 地球科学, **39** (4): 413—426.

The Application of the Accumulation Rate of Vertical Deformation Trend in the Sichuan-Yunnan Region

Zhang Chao, Wang Shijin, Wang Ning, Wang Shengwen and Xu Jiayao

(The First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China)

Abstract Based on the study of the cumulative rate of vertical deformation trend, the data processing method is modified partially, and the Sichuan-Yunnan region with more cross-fault site is taken as experimental area. The intensity of vertical deformation anomalies from precision leveling is analyzed. The results show that the intensity of deformation anomalies near the epicenter remains almost the same in a period before and after the occurrence of strong earthquakes, but the great change may take place one and two months before and after the earthquake. Then, it would gradually recover to the original situation. We also found that strong earthquakes occur mainly near the regions where the values of anomalous intensity change greatly. The reflect effect of accumulative rate of the vertical deformation tendency is good in the short to medium term.

Key words: The accumulation rate of vertical deformation trend; Cross-over fault measurement; Precise leveling; Intensity of deformation anomalies