

# 川滇地区近期断层运动特征分析\*

贾 鹏, 唐红涛, 李瑞莎, 张 希

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 通过对川滇地区的跨鲜水河断裂带、龙门山断裂带等多条重要断裂的形变资料进行了速率合成计算, 并对这些场地的短水准和短基线在芦山地震、汶川地震等几次强震前后速率合成结果和张压趋势变化进行分析, 最后结合 2011—2015 年川滇地区 GPS 资料的面膨胀计算结果进行了对比, 总结该地区近年活动形变特征。结果表明: (1) 大多数断裂保持正常幅度的张、压变化, 而在地震前 1~3 年的变化幅度会明显异于常年; (2) 可能的地震前异常变化在短水准和短基线形变中反映并不完全一致; (3) 大地震后会对该地区及其附近的构造应力场产生深远影响, 加快断层的运动速率。

**关键词:** 速率合成; 川滇地区; 跨断层形变; 地震; 断裂带

**中图分类号:** P315.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2018)01-0073-09

## 0 引言

我国跨断层形变监测开始于 20 世纪 70 年代初, 是一种观测精度较高、能够直接反映断层活动的形变观测手段, 其通过分析断层活动性质(邓启东等, 2002; 张培震等, 2002)、运动速率, 建立观测模型提取异常观测信息, 结合构造应力背景对断层危险性进行研究, 为地震预测研究提供了有效的方法。周硕愚等(1998)利用系统科学理论构建板内地壳形变系统动力学, 并将系统科学引入断层形变领域, 识别“场兆”“源兆”性断层形变异常, 对稳态的偏离做定量描述; 施顺英等(2007)利用动态灰箱法提取长趋势异常和突跳异常, 再用孕震系统信息合成方法进行合成来提高异常识别的可靠性; 张晶等(2011)、李瑞莎等(2013)利用断层活动协调比来捕获潜在震源区异常变化信息与断层应变积累状态; 陈兵等(2000)、李杰等(2010)、张希和江在森(1999a)、焦青和周俊萍(1998)利用垂直形变趋势累积率、跨断层垂直位移速率的动态演化以及速率合成方法对震前的跨断层形变特征进行了分析和总结。上述研究成果表明, 跨断层形变的异常识别指标对地震预报方法的探索有着积极的作用。本文

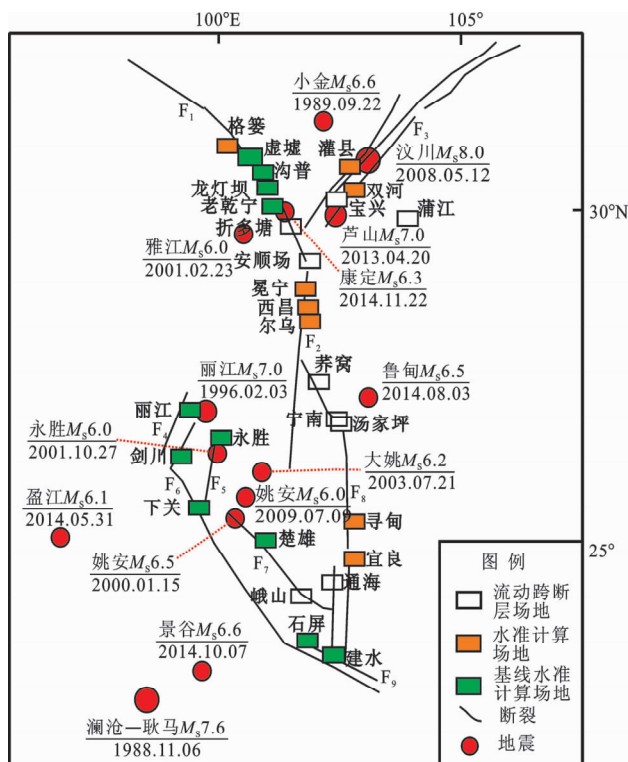
通过对近年来川滇地区的跨断层原始观测资料进行了速率合成计算, 并与 GPS 面膨胀计算结果进行对比, 总结研究区域近年活动形变特征, 并进一步探讨了川滇地区断裂活动与地震活动的关系。

## 1 研究区构造概况

川滇地区作为青藏块体的东南缘, 自新生代以来, 受青藏高原物质向东侧流动及阿萨姆顶楔入的作用, 构造活动复杂, 地震活动强烈而频繁。该地区发育有鲜水河断裂、龙门山断裂、安宁河—则木河断裂、红河断裂、小江断裂等多条重要断裂带, 曾发生过 1988 年澜沧—耿马  $M_s7.6$ 、 $M_s7.2$ , 1996 年丽江  $M_s7.0$ , 2000 年姚安  $M_s6.5$ , 2003 年大姚  $M_s6.2$ 、2008 年汶川  $M_s8.0$ 、2009 年姚安  $M_s6.0$ 、2013 年芦山  $M_s7.0$ , 2014 年康定  $M_s6.3$ 、鲁甸  $M_s6.5$ 、盈江  $M_s6.1$ 、景谷  $M_s6.6$  等地震(图 1)。从晚第四纪开始, 川滇菱形块体从北边界的甘孜—玉树断裂带, 东北边界的鲜水河断裂带, 东边界的安宁河断裂北段, 到南边界的丽江—小金河断裂带皆以左旋走滑运动为主; 而其西边界的金沙江、红河断裂带则以右旋走滑运动为主; 滇中次级块体的丽江—小金河断裂带、安宁河断裂南段、则木河断裂表现为连续的走滑运动特征(乔学军等, 2004)。

\* 收稿日期: 2017-03-30.

**基金项目:** 中国综合地球物理场观测——大华北地区项目(201508009), 地震科技星火计划项目(XH17061Y)及中国地震局震情跟踪定向工作任务(2018010203)联合资助.



F<sub>1</sub>: 鲜水河断裂; F<sub>2</sub>: 安宁河—则木河断裂; F<sub>3</sub>: 龙门山断裂; F<sub>4</sub>: 丽江断裂; F<sub>5</sub>: 程海断裂; F<sub>6</sub>: 红河断裂; F<sub>7</sub>: 楚雄断裂; F<sub>8</sub>: 小江断裂; F<sub>9</sub>: 石屏—建水断裂

图1 川滇地区跨断层形变场地示意图

Fig. 1 Sketch map of cross-fault sites in Sichuan-Yunnan area

## 2 数据处理与分析方法

关于跨断层速率合成方法很多学者(陈兵等, 2000; 李杰等, 2010; 张希, 江在森, 1999b; 焦青, 周俊萍, 1998)均有研究。以一定的时间间隔做差分, 该测点第 $j$ 年的平均速率为:

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i^j - h_i^{j-1})}{n} \quad (i = 1, 2, 3 \cdots n) \quad (1)$$

其中:  $h_i^j$  为 $j$ 年的第 $i$ 个观测数值;  $n$  为一年的总观测数。对于跨断层形变的数据处理(李杰等, 2010; 张希, 江在森, 1999b; 焦青, 周俊萍, 1998; 乔学军等, 2004), 定义上盘相对下盘上升为正, 趋势向下为挤压, 向上为拉张; 合成速率 $v_j > 0$  表示张性,  $v_j < 0$  为压性。若同一断层上的 $m$ 个场地的年均速率的平均值作为该断层的运动平均

合成速率, 则断层第 $j$ 年的合成速率 $\bar{V}_j = \frac{1}{m} \sum_{h=1}^m v_{jh}$ 。

利用中国地壳运动网络观测项目 2011—2013、2013—2015 年所得 GPS 资料统一进行 GIMIT/GLOBK 处理, 并借助最小二乘配置拟合与应变—位移偏导关系(江在森等, 2003; 张希, 江在森, 1999b), 计算获得川滇地区的面膨胀应变( $\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$ ), 最后利用 GMT 软件生成川滇地区的面膨胀视应变图。

## 3 断层运动与地震关系

本文数据选取川滇地区连续性较好、基本没有中断的跨断层形变场地资料(周海涛, 郭迁良, 2011; 杨永林等, 2005)(图1, 表1), 包括短水准和短基线场地。为了便于分析对比, 选取资料时段统一为 1980 年 1 月—2016 年 9 月(对于个别缺省期的数据予以内插处理), 常规以月为周期, 并逐个按断裂带进行计算分析。

表1 跨断层场所跨断裂表

Tab. 1 Lists of faults crossed by the selected cross-faults sites

场地名	所跨断裂带	场地名	所跨断裂带
格菱	鲜水河断裂	丽江	丽江断裂
虚墟	鲜水河断裂	永胜	程海断裂
沟普	鲜水河断裂	剑川	红河断裂
龙灯坝	鲜水河断裂	下关	红河断裂
老乾宁	鲜水河断裂	楚雄	楚雄断裂
冕宁	安宁河断裂	寻甸	小江断裂
西昌	安宁河断裂	宜良	小江断裂
尔乌	安宁河断裂	石屏	石屏—建水断裂
双河	龙门山断裂	建水	石屏—建水断裂
灌县	龙门山断裂		

### 3.1 鲜水河断裂带

以鲜水河断裂带的短基线原始数据观测曲线为例(初始值取为 0)进行分析(图2)。因篇幅有限, 下文不再对原始观测曲线进行详细分析, 直接采用速率合成计算结果进行分析。芦山地震前, 鲜水河断裂的虚墟、沟普、龙灯坝、老乾宁 4 个短基线场地出现了不同程度压性变化, 于震后趋势恢复, 但在其它地震前后变化不明显。

对 4 个短基线场地分别进行年均速率合成计算，从图 3a 中可以看出，芦山地震前这 4 个场地的压性变化更为突出，尤其是鲜水河断裂北段的虚墟场地，其余场地压性变化自北向南逐渐减弱；康定地震前这 4 个场地同步压性转为震后张性变化，在小金地震后有调整；雅江地震前，沟普场地

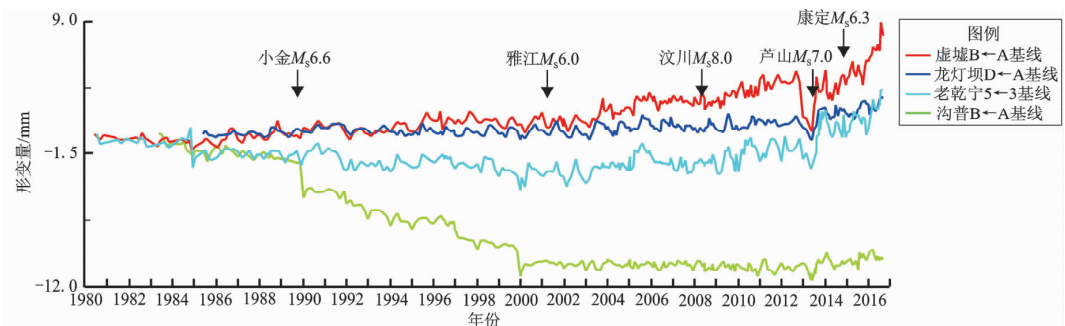


图 2 鲜水河断裂带短基线原始观测曲线

Fig. 2 Original variation curves of cross-fault baseline site in Xianshuihe Fault

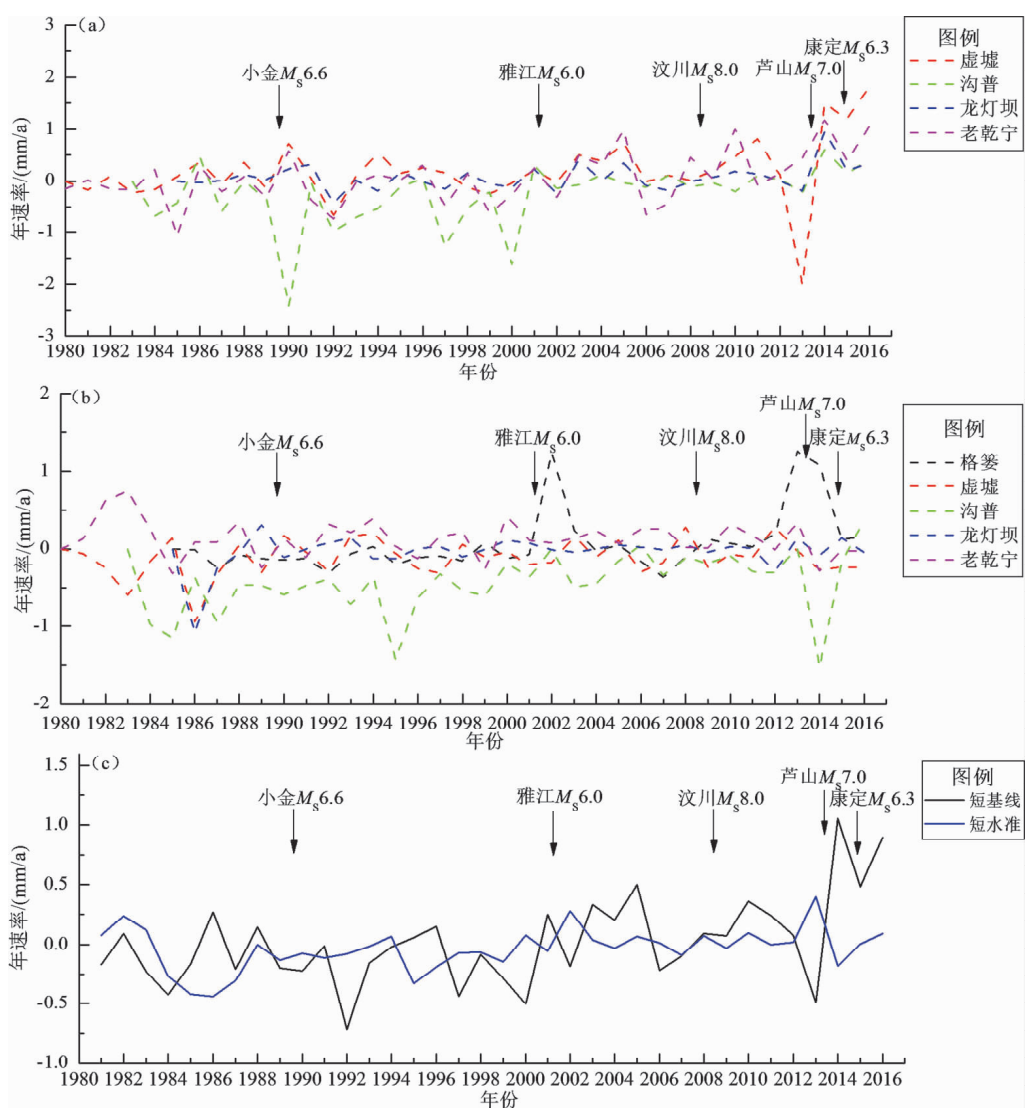


图 3 鲜水河断裂带各场地短基线 (a)、短水准 (b) 及该断裂带 (c) 年均速率合成曲线

Fig. 3 The annual average short baseline (a), the water leveling (b) rates curve of each cross-fault sit in Xianshuihe fault zone and the Xianshuihe fault annual average rates curve (c)

出现了压张趋势回返；汶川强震发生在龙门山断裂带，并且出现断层闭锁（贾鹏等，2012），这4个场地没有明显的趋势变化，其余时段速率都在0值附近波动。对鲜水河断裂（方颖等，2015；苏琴等，2012a）的5个短水准场地进行年速率曲线合成，如图3b所示，芦山地震前至康定地震间、雅江地震后，最北段格婆场地出现2次明显张压转折；沟普场地则是在芦山地震后、康定地震前完成了压张折返，康定地震后5条曲线基本都回到0值附近，反映出震后调整。进一步计算整个鲜水河断裂带的年变速率变化，对4个短基线、5个短水准场地的年速率进行合成，如图3c所示，在小金地震、雅江地震、汶川地震、芦山地震发生时的短基线和短水准的年速率变化量几乎都接近0，且2条线基本相交于此，表明地震

前断层挤压、滑移后逐渐闭锁、积累应力，震后断层开始活动。

### 3.2 安宁河—则木河断裂带

安宁河—则木河（苏琴等，2012b）断裂带上的场地数据连续性较好的主要有冕宁、西昌和尔乌3个短水准场地，其中西昌场地资料时间稍短，变化幅度较大，表现在汶川震后至芦山震前、芦山震后至康定震前，出现大幅张压转折（图4）；冕宁场地在小金和雅江地震前出现一定幅度的张压转折；尔乌场地在汶川地震后、芦山地震前有一个不同以往幅度的张压折返。通过对冕宁和尔乌短水准的合成，显示在小金、雅江、汶川和芦山地震时年均速率都近于0，而在地震前后则有张压趋势转折；而康定地震后压性大幅增强，主要是冕宁场地的大幅压性变化所致。

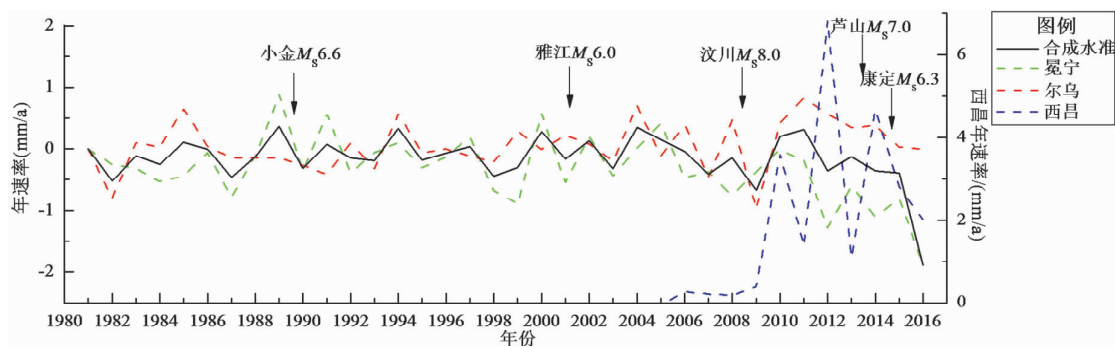


图4 安宁河—则木河断裂带各场地及该断裂短水准年均速率合成曲线

Fig. 4 Each site and the whole short leveling annual average rates of cross-fault sites in Anninghe-Zemuhe fault zone

### 3.3 龙门山断裂带

龙门山断裂带的短水准场地选取双河和灌县，单场地和该断裂带的年均速率合成曲线在汶川地震前基本变化不大（图5），反映出断层的长期闭锁状态，但同震响应明显（在震前、震后

分2个时段差分合成，以区别同震响应和异常）。汶川地震后，速率变化出现2~3年的逐步调整，在此过程中再次出现张压转折，该转折变化鲜水河断裂带也曾出现，或反映芦山地震前的断层活动。

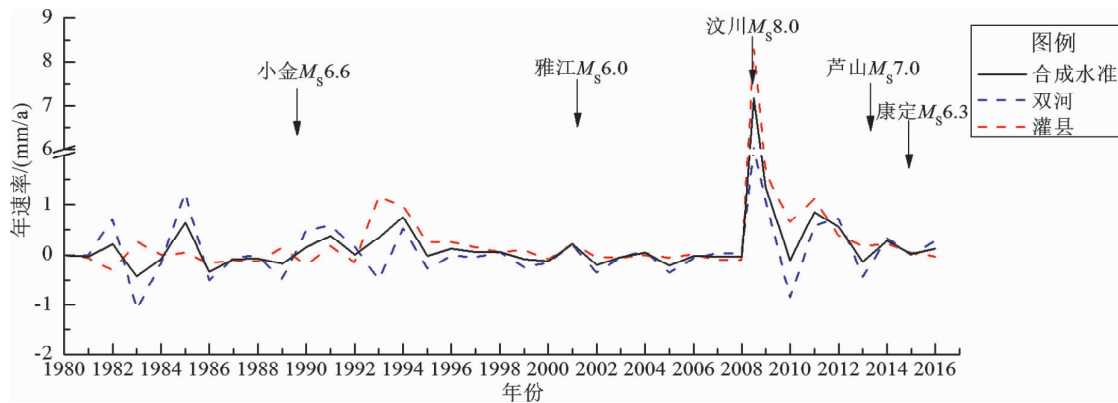


图5 龙门山断裂带各场地及该断裂带短水准年均速率合成曲线

Fig. 5 Each site and the whole short leveling annual average rates of cross-fault sites in Longmenshan fault zone



### 3.4 滇西北地区

滇西北地区断裂带及其次生断裂多、地震多，跨断层场地分散，故对滇西北地区5个场地的短水准和短基线场地进行了区域性计算。如图6a、b所示，除永胜场地年均速率合成变化较大之外，其他4个短基线和短水准场地的速率变化非常接近，趋势也基本一致。通过计算5个短水准和短基线场地的区域年均速率合成可以看出（图6c），在丽江 $M_s7.0$ 地震、姚安 $M_s6.5$ 地震前2条合成曲线的趋势变化成对称分布，有明显的转折过程，只是趋势

不同；短水准和短基线合成速率在永胜、大姚和盈江地震时速率比较低且都接近于0；澜沧—耿马地震震中距离较远，反应并不明显，整体上反映出滇西北区域构造运动的一致性。实际上丽江 $M_s7.0$ 地震前，丽江断裂和程海断裂明显活跃起来，活动速率加快，左旋正断性质的程海断裂上由以往的左、右旋交替活动表现为右旋走滑和正断活动的大幅增强（周海涛，郭迁良，2011；罗睿洁等，2015）；而震前形变速率的快速降低再次反映出断层活动受阻，应力集中。

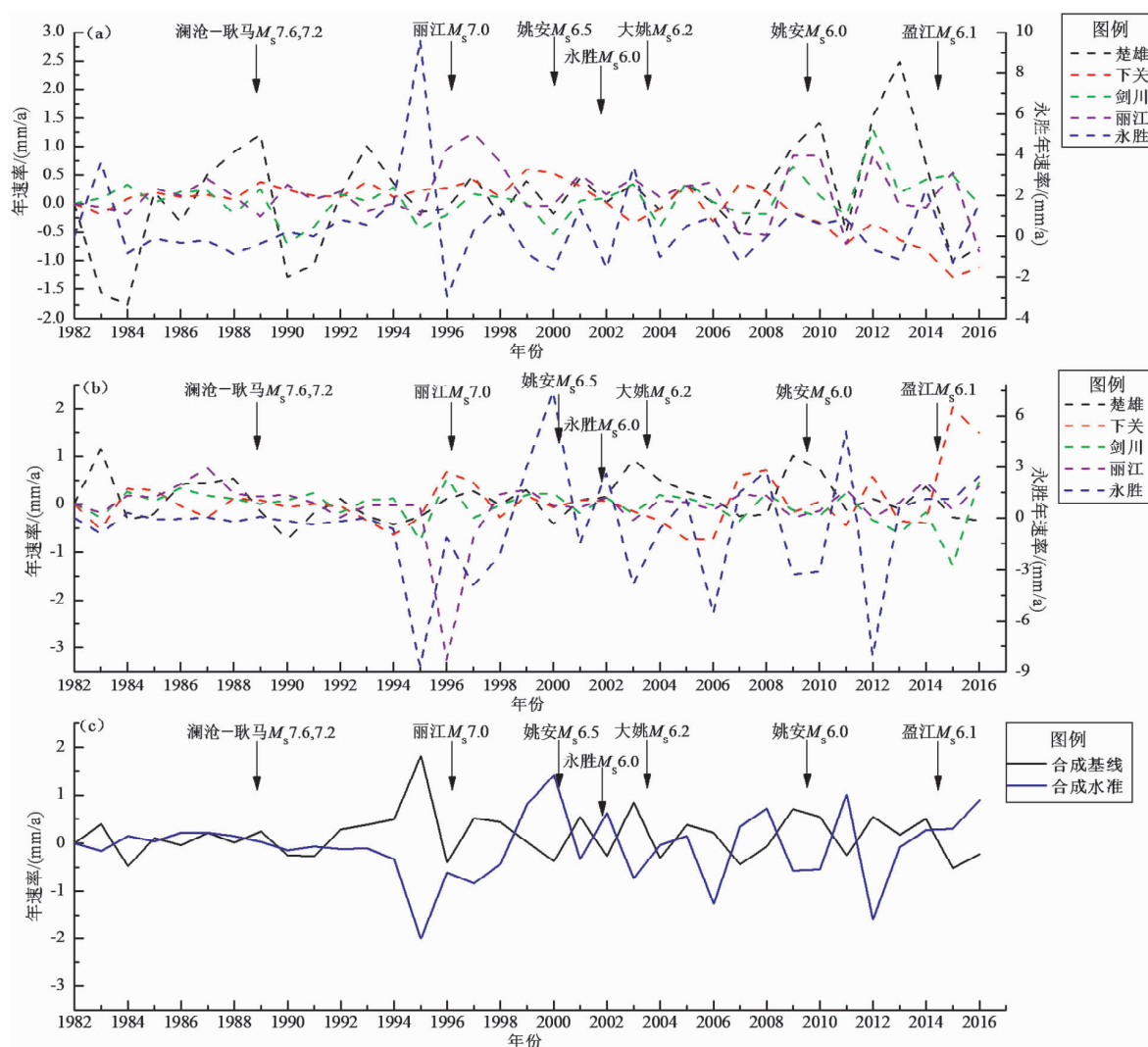


图6 滇西北地区各场地短基线(a)、短水准(b)及该地区年均速率合成曲线(c)

Fig. 6 The annual average short baseline (a), the short leveling (b) rates curve of each cross-fault sit in northwest Yunnan area (b) and the annual average rates of northwest Yunnan area (c)

### 3.5 小江断裂带

小江断裂带主要计算寻甸和宜良2个场地（图7），宜良场地数据可用时间较短，总体以寻甸场地为主。整体上小江断裂带1998年前在总体

变化幅度不大，为 $-0.5 \sim 0.5$  mm/a，从2001年到汶川地震发生速率变化更小，可能反映出应力的集中状态，汶川地震后有应力释放的调整阶段，鲁甸地震后再次拉张。

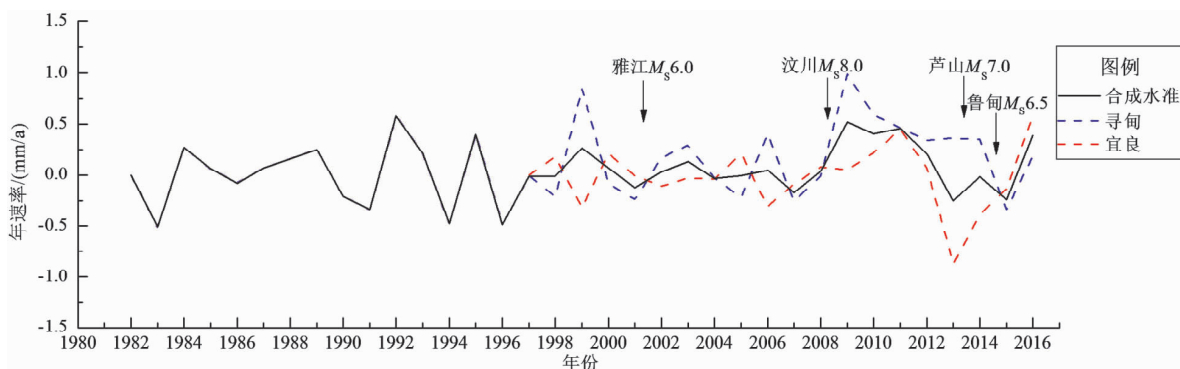


图7 小江断裂带各场地及该断裂带短水准年均速率合成曲线

Fig. 7 Each site and the whole short leveling annual average rates of cross-fault sites in Xiaojiang fault zone

### 3.6 石屏—建水断裂带

石屏和建水场地附近大震较少,这2个场地的短水准和短基线年运动合成速率主要在  $-1 \sim 1$  mm/a

之间波动(图8),对于滇西北和滇西南地区的远场地震来说,发生地震时运动速率也基本接近于0。建水短水准和短基线场地于景谷地震前1~3年

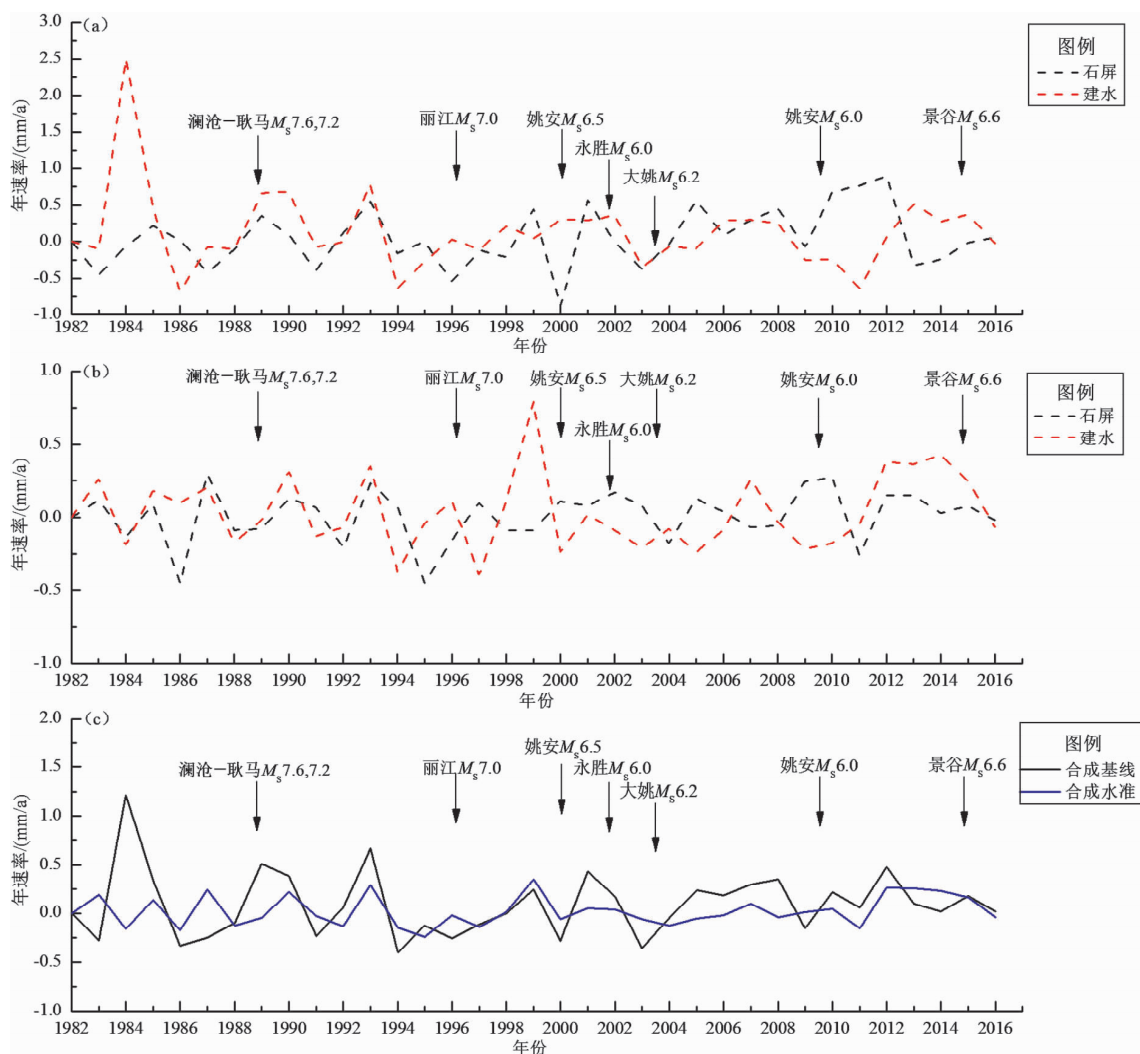


图8 石屏—建水断裂带各场地短基线(a)、短水准(b)及该断裂(c)年均速率合成曲线

Fig. 8 The annual average short baseline (a), the short leveling (b) rates curve of each cross-fault sit in Shiping-Jianshui fault zone and the Shiping-Jianshui fault zone annual average rates (c)

发生过同步张压变化,短水准运动速率在1998—2000年有压张折返,整体活动速率较石屏场地变化大,实际上石屏建水断裂的南段更为活跃(罗睿洁等,2015)。

### 3.7 综合分析

最后,将川滇地区的6个主要断裂带(或构造区)的短水准和短基线活动合成速率综合计算(图9)。对于整个川滇地区,断层活动速率较大的为1996年的丽江 $M_s7.0$ 地震前的滇西北地区,2008年的汶川 $M_s8.0$ 地震龙门山断裂带的同震变化。其中丽江 $M_s7.0$ 地震后10年内滇西北地区接连发生了姚安、永胜、大姚地震;而北部的鲜水河断裂带、龙门山断裂带及安宁

河—则木河断裂带的“Y”字交汇区附近,从汶川震后至今发生了芦山、康定以及鲁甸地震,在这些地震前基本都出现了断层的张压变化活动。进而利用中国地壳运动网络观测项目所得GPS资料,借助最小二乘配置拟合与应变—位移偏导关系获得川滇地区2011—2013年、2013—2015年的面膨胀应变(图10):鲜水河断裂带北段由张性变为了压性,幅度不大,总体以压性为主;龙门山断裂带压性逐渐减弱;安宁河—则木河断裂带变化不大;滇西北地区、小江断裂带和石屏—建水断裂带则是张性较之前增强,显示出汶川地震震后的调整,与近年的断层合成速率计算结果基本吻合。

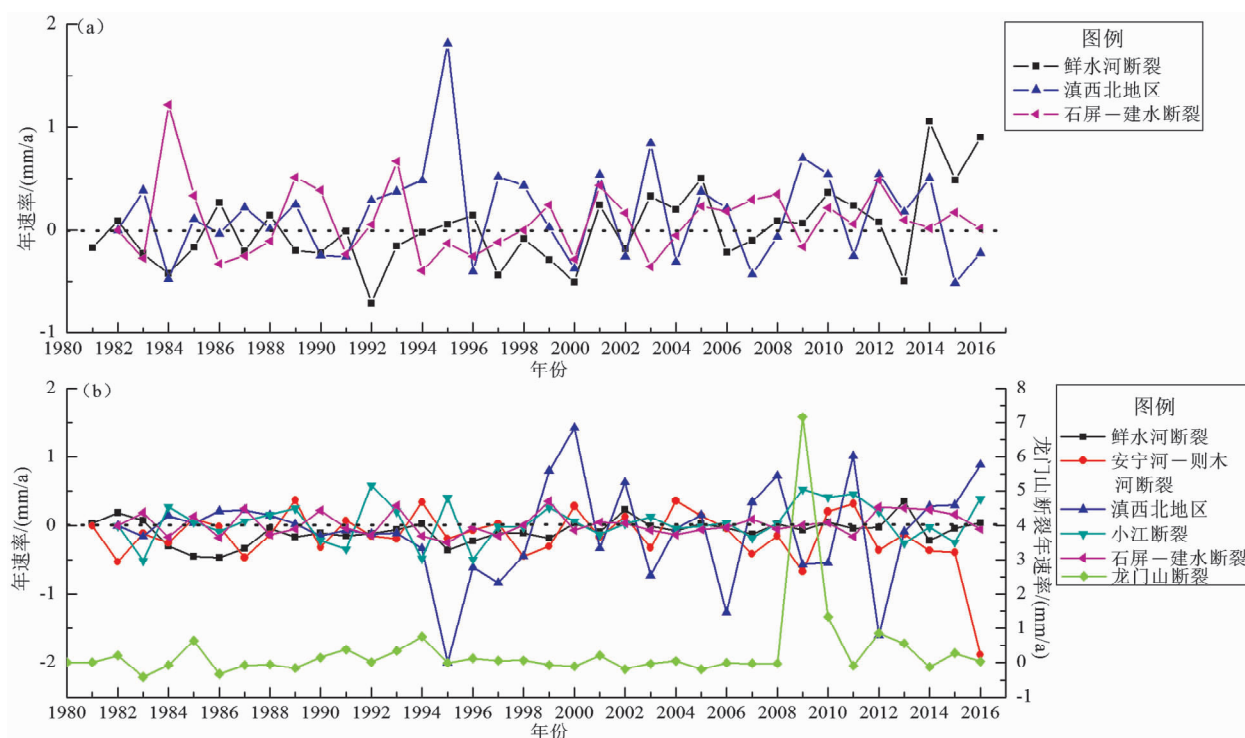


图9 川滇地区主要断裂带短基线(a)、短水准(b)年均速率合成曲线

Fig. 9 The short baseline (a) and short leveling (b) synthetic rates of main cross-fault sites in Yunnan-Sichuan area

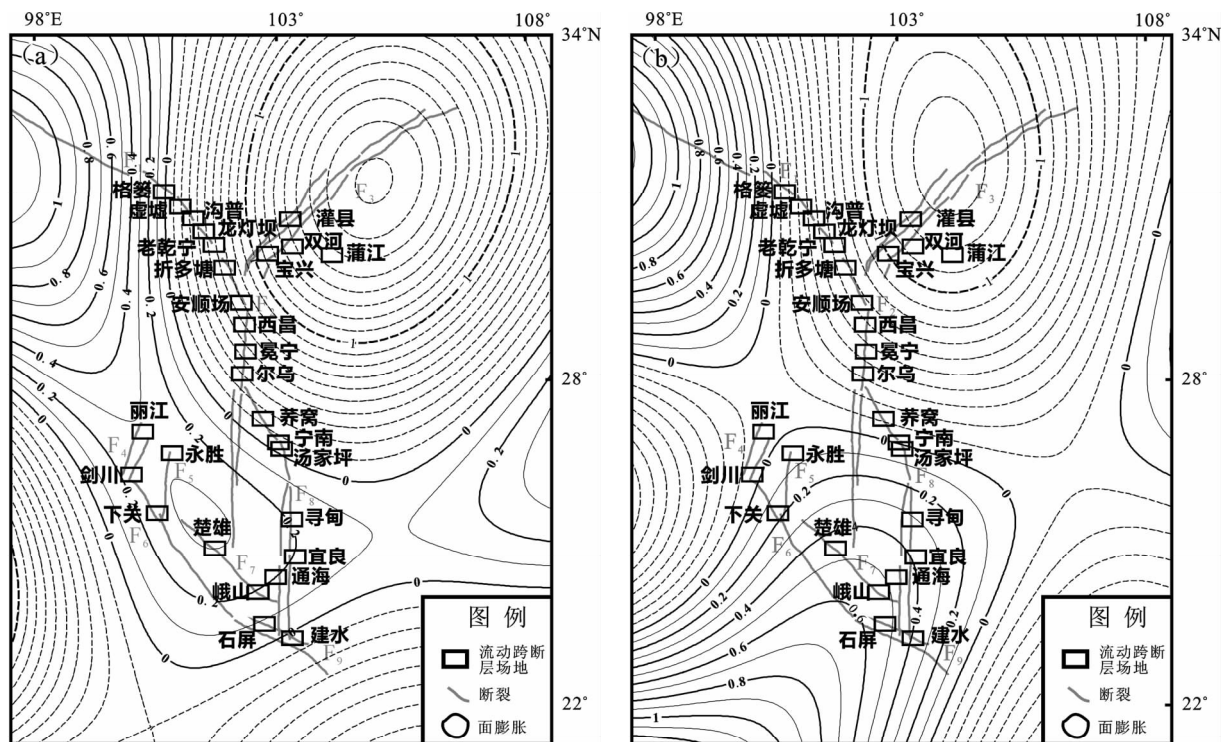
## 4 结论

通过对1980年初以来川滇地区的跨断层短基线和短水准资料进行速率合成计算,结合近期GPS资料计算的面膨胀变化分析,得到川滇地区各活动断裂带(或构造区)与地震活动的关系。

(1) 川滇地区的大多断裂带年均合成活动速

率不高,发震时速率接近于0,但地震前1~3年张压趋势变化幅度会显著增多,例如丽江地震、芦山地震、姚安地震和永胜地震等。

(2) 短水准和短基线场地对于不同地震反应和异常响应程度不同。芦山地震发生在龙门山断裂带,但压性异常主要表现在鲜水河断裂带的短基线场地上;而丽江地震前滇西北地区的几个短水准和短基线场地都有明显的异常张压转折变化。



$F_1$ : 鲜水河断裂;  $F_2$ : 安宁河—则木河断裂;  $F_3$ : 龙门山断裂;  $F_4$ : 丽江断裂;  $F_5$ : 程海断裂;  
 $F_6$ : 红河断裂;  $F_7$ : 楚雄断裂;  $F_8$ : 小江断裂;  $F_9$ : 石屏建水断裂

图 10 2011—2013 年 (a) 和 2013—2015 年 (b) 川滇地区 GPS 面膨胀等值线图 (单位:  $10^{-8}/a$ )

Fig. 10 The superficial expansion acquired by GPS in Sichuan - Yunnan area from 2011 to 2013 (a) and from 2013 to 2015 (b) (unit:  $10^{-8}/a$ )

(3) 对整个川滇地区影响最大的地震是四川地区发生的 2008 年汶川地震 (万永革等, 2009; 单斌等, 2008) 和云南地区发生的 1996 年丽江地震。在汶川地震时, 不仅龙门山断裂带同震影响大, 其他断裂也受到了不同程度的影响, 断裂活动在原状态下加速或进一步减弱, 使整个构造应力场状态发生改变。

#### 参考文献:

- 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[J]. 地震地磁观测与研究, 21(1): 50-55.
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 2008. 2008 年 5 月 12 日  $M_w 7.9$  汶川地震导致的周边断层应力变化[J]. 中国科学: 地球科学, 39(5): 537-545.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学: 地球科学, 32(12): 1020-1030.
- 方颖, 张晶, 江在森, 等. 2015. 用跨断层形变资料分析鲜水河断裂西北段的运动特征[J]. 地球物理学报, 58(5): 1645-1653.
- 贾鹏, 张希, 张晓亮, 等. 2012. 汶川地震前后川滇及其邻区 GPS 水平运动演化特征[J]. 西北地震学报, 34(3): 17-21.
- 江在森, 马宗晋, 张希, 等. 2003. GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形[J]. 地球物理学报, 46(3): 352-358.

- 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[J]. 地震, 18(3): 265-273.
- 李杰, 唐廷梅, 荆强, 等. 2010. 跨断层形变测量异常特征分析[J]. 地震, 30(2): 100-110.
- 李瑞莎, 张希, 贾晓东, 等. 2013. 断层活动协调比计算方法的改进及震例分析[J]. 中国地震, 29(1): 75-80.
- 罗睿洁, 吴中海, 黄小龙, 等. 2015. 滇西北宾川地区主要活动断裂及其活动构造体系[J]. 地质通报, 34(1): 155-170.
- 乔学军, 王琪, 杜瑞林. 2004. 川滇地区活动地块现今地壳形变特征[J]. 地球物理学报, 47(5): 806-812.
- 施顺英, 张燕, 吴云, 等. 2007. 基于跨断层形变异常预测云南地震的试验[J]. 大地测量与地球动力学, 27(5): 82-87.
- 苏琴, 杨永林, 王兰, 等. 2012a. 鲜水河断裂带跨断层形变中短期强震预测指标研究[J]. 四川地震, (4): 10-17.
- 苏琴, 杨永林, 向和平, 等. 2012b. 则木河断裂带断层活动特征与中强震关系浅析[J]. 地震研究, 35(1): 18-23.
- 万永革, 沈正康, 盛书中, 等. 2009. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响[J]. 地震学报, 31(2): 128-139.
- 杨永林, 苏琴, 朱航. 2005. 水准短基线观测资料反映出的川滇几个断层的活动特点[J]. 四川地震, (3): 17-21.
- 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[J]. 地震, 31(3): 21-26.
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速



- 度场[J]. 地学前缘, 9(2): 442–449.
- 张希, 江在森. 1999a. 用最小二乘配置获得地形应变场动态图像的几个问题研究[J]. 地壳形变与地震, 19(3): 32–39.
- 张希, 江在森. 1999b. 对华北 GPS 监测区近期地壳应变连续分布的估计[J]. 地震学刊, (2): 17–22.
- 周海涛, 郭迁良. 2011. 云南地区主要断裂现今活动性研究[J]. 山西地震, (2): 28–32.
- 周硕愚, 宋勇厚, 董慧凤. 1988. 断层地形变测量的系统分析与定量方法[J]. 地壳形变与地震, 8(2): 134–143.

## Analysis on the Recent Movement Characteristics of Faults in Sichuan-Yunnan Area

JIA Peng, TANG Hongtao, LI Ruisha, ZHANG Xi

(The Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

### Abstract

We calculated the synthetic rate of cross-fault deformation curves in Xianshuihe fault zone, Longmenshan fault zone etc. and analyzed the tension trend before and after the Lushan earthquake, Wenchuan earthquake etc. Moreover, the surface expansion that was derived from 2011—2015 GPS data was compared to study the characteristics of deformation activity in Sichuan-Yunnan area in recent years. The results show that: (1) The velocity of most faults keep change of tension and pressure low in the normal range, while higher obviously in 1~3 years before earthquakes. (2) The possible precursory may not be shown in the baselines and leveling results simultaneously. (3) There will be a significant impact on the tectonic stress field in the study area after a large earthquake, which will accelerate the activity of adjacent faults.

**Keywords:** synthetic rates; Sichuan-Yunnan area; cross-fault deformation; earthquakes; fault zones