

# 基于 GNSS 观测资料研究云南地壳形变与地震的关系\*

洪敏<sup>1,2</sup>, 邵德盛<sup>2</sup>, 王伶俐<sup>2</sup>, 李春光<sup>2</sup>, 张勇<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明 650093; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 以云南省内 GNSS 连续观测资料为基础, 进行扣除区域内稳定基准点、滑动均值等数据处理绘制云南省内区域形变场运动速率时序图, 分析在此期间发生的地震事件与地壳形变之间的关系。分析认为, 当部分点位运动方向背离长趋势运动背景时, 云南省内发生地震的危险性较大, 为 GNSS 连续观测资料用于地震预测预报方面做出了探索。

**关键词:** 地壳形变; 地震事件; GNSS

**中图分类号:** P315.727

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2013)03-0292-07

## 0 引言

云南位于印度板块与欧亚板块俯冲带东侧, 地质构造复杂, 构造活动强烈, 地震活动频繁, 地质灾害严重, 为我国大陆其他地区所少见(毛玉平等, 2003), 许多学者针对川滇地区的地震活动进行了研究。由于条件限制, 目前对于云南省内地震方面研究主要依靠地震学方法(刘虹, 苏有锦, 2007; 李永莉等, 2010), 而地壳形变方法一直受到观测资料收集难度大、周期长等因素的制约而未广泛使用。随着 GPS 连续观测方式的逐步推广应用, 这一情况正在逐步改善, 十五期间“中国地壳运动观测网络”工程建成后, 许多学者利用这些观测资料对地震活动做了比较系统的研究(江在森等, 2003; 牛之俊等, 2005), 这些研究为把握中国大陆的地壳运动背景提供了可靠依据, 但由于站点稀疏, 导致形变场存在空间分辨率不高。2012年, “中国大陆构造环境监测网络”建成并投入使用, 增加了全国 GNSS 连续观测站的数量, 为 GNSS 观测数据用于地震预报奠定了基础, 已有部分学者利用不同的方法基于 GPS 观测结果分析了地壳运动与地震之间的关系(张永志等, 2010; 张晓亮等, 2006; 李强等, 2012)。本文以云南地区现有的 GNSS 观测资料为基础, 分析省内地

壳运动与地震的关系。

## 1 数据处理

### 1.1 资料情况

自“中国大陆构造环境监测网络”项目建设以来, 云南省内共建成 GNSS 连续观测站点 28 个, 自 2010 年 2 月开始, 陆续进入了试运行阶段, 截至 2010 年 5 月底, 80% 以上的站点处于正常运行状态, 到 2012 年 5 月, 共积累了两年的观测数据。在此期间, 云南省内及周边共发生了 4 次  $M \geq 5.0$  的地震, 分别是 2011 年 3 月 10 日盈江 5.8 级地震、2011 年 3 月 24 日缅甸 7.2 级地震以及 2012 年 6 月 20 日和 8 月 9 日腾冲两次 5.2 级地震, 本文主要以这段时间的资料作为研究基础。

### 1.2 GNSS 观测资料处理

GNSS 数据处理使用美国麻省理工学院(MIT)和加州大学圣地亚哥分校 Scripps 海洋研究所(SIO)研制的 GAMIT/GLOBK 软件, 采用与全球 IGS 解算数据进行联合平差的方法, 平差过程中选用 38 个 IGS 核心站点为云南 GNSS 观测网的参考基准, 把平差结果归算到 ITRF2000 框架下。为了提高精度, 在得到单日解的基础上, 选用 4 天的单日解结果进行联合平差, 得到每点 4 天的坐标均值, 提高了资料的可靠性。经过统计, 所有测站的观测点位坐标精度均优于 3 mm。

1.3 分析方法

虽然经过了 GAMIT/GLBOK 软件的处理，剔除了多项干扰因素的影响，但是由于数据解算过程复杂，影响解算结果的因素比较多，解算结果中仍然残留着一些干扰噪声，为了提高信噪比，获取地壳运动的真实信息，对前期处理产出的点位坐标成果进行以下处理：

(1) 滑动均值：通过前期的处理获得了以 4 天为周期的站点坐标时间序列，为了消除抖动，假设某一个测站的某一期的观测值为  $X_j$  ( $j$  为观测时间)，以  $X_j$  的观测时间为起点， $W$  为时间窗长，向前追溯与  $X_j$  时间间隔不大于  $W$  的一组观测值 ( $X_1, X_2, \dots, X_j$ )，计算该组值的算术平均值  $X'_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^j X_i (i = 1 \cdots j)$ ，则  $X'_j$  就是  $j$  时刻所对应的滑动均值成果。

(2) 扣除文山：云南地区的地壳介质存在横向不均匀性变化基准（皇甫岗等，2010），自西向东  $Q$  值逐渐增大。说明了云南东部地区地质条件比较稳定，由于华南块体的稳定性较好，而文山点位于华南块体上，通过试算分析，认为文山点的运动基本能代表华南块体的运动状况，可以采用华南块体基准和文山基准（王伶俐等，2012）。对同一时刻的各个测站的观测值与文山点的观测值求差，计算出省内各个站点以文山为位移基准的时间序列，并认为该时间序列基本反映了云南省内各个块体相对于华南块体的运动情况。

(3) 地壳运动速度计算：在以上处理的基础上，通过给定一个起始时间，一个时间窗  $W_2$ ，对各个站点的时间序列进行同步采样，并计算出位于时间窗两端的数据的差值，代表了在这一时间窗内地壳运动变化的速度。由此得到了以  $W_2$  为周期的点位坐标变化速度时间序列，并把这一时间序列进行图像显示处理，得到了云南省内 2010 年 12 月至 2011 年 8 月间的地壳运动速率等值线图。

2 地壳形变与地震关系分析

板块运动有其自身的规律，在地震活动平静期，可以获得比较稳定的运动速度，该速度可以认为是正常活动背景。分析地壳运动与地震的关系需要两个步骤，第一步明确正常活动背景，第二步查找地震前是否有与长趋势相背离的异常运动。当然，出现地壳运动反向也不一定意味着这一区域一定会发生地震，但它能代表这一区域

为应力增强明显的地区，因此，该区域是否具有发震的危险性还需结合断层分布特征进行分析，如果出现了背离长趋势背景的地壳运动，但断层周边区域的运动一致性较好，那么，这一区域发生地震的危险性不高。反之，如果断层两侧运动一致性较差，则需要引起特别关注。

2.1 地壳运动背景

根据目前已有的资料总结区域内点位运动的规律，图 1 为根据 2010 年 5 月至 2012 年 5 月云南省 GNSS 观测资料计算的点位运动图像。从图中可以看出，云南省内各站点的运动趋势基本一致，除滇西北的中甸、丽江等个别点位表现出南南东向运动之外，其他点基本都表现为南西向运动，且西向运动量自东向西有逐渐增强的趋势。

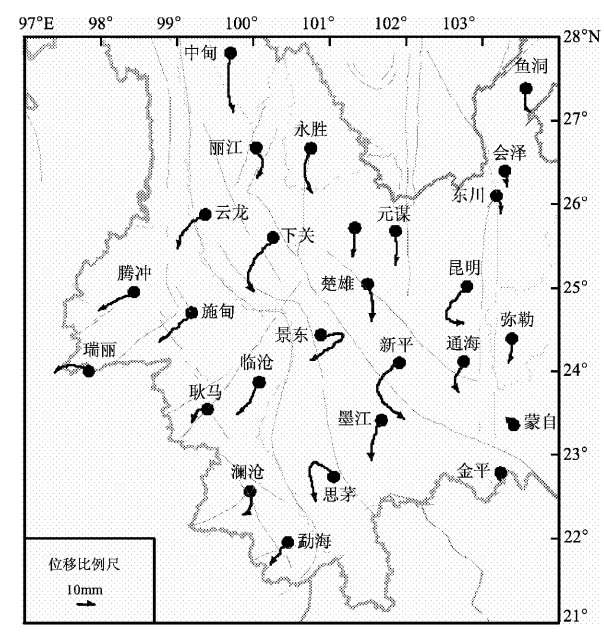


图 1 云南 IGS 点位运动图  
Fig. 1 Map of IGS points movement in Yunnan

2.2 短期形变特征分析

根据以上分析，云南省内的区域运动在以文山为位移基准的前提下，正常的运动方向应该是南向和西向，如果部分点位出现了北向运动或者是东向运动，则可以认为是异常。由于点位相对变化实际解算精度在单一方向上能够达到  $\pm 1.5 \text{ mm}$ ，大于该精度的变化量可以认为是真实的。因此，以一个月为窗长进行等值线图的绘制，设定东向、北向运动为正值，用深色进行填充，代表了异常区域。西向、南向运动为负值，代表正常运动，用浅色表示，运动方向反向交界线用加粗线条表示。

(1) 盈江 5.8 级地震与区域形变关系分析  
盈江地震的发震断层为北东向断裂, 为了避免同震形变引起的区域形变速率异常, 本文主要

分析地震前的形变速度图像, 图 2 为盈江 5.8 级地震前 3 个月 (2010-12-18~2011-02-17) 的东西和南北分量变化时序。

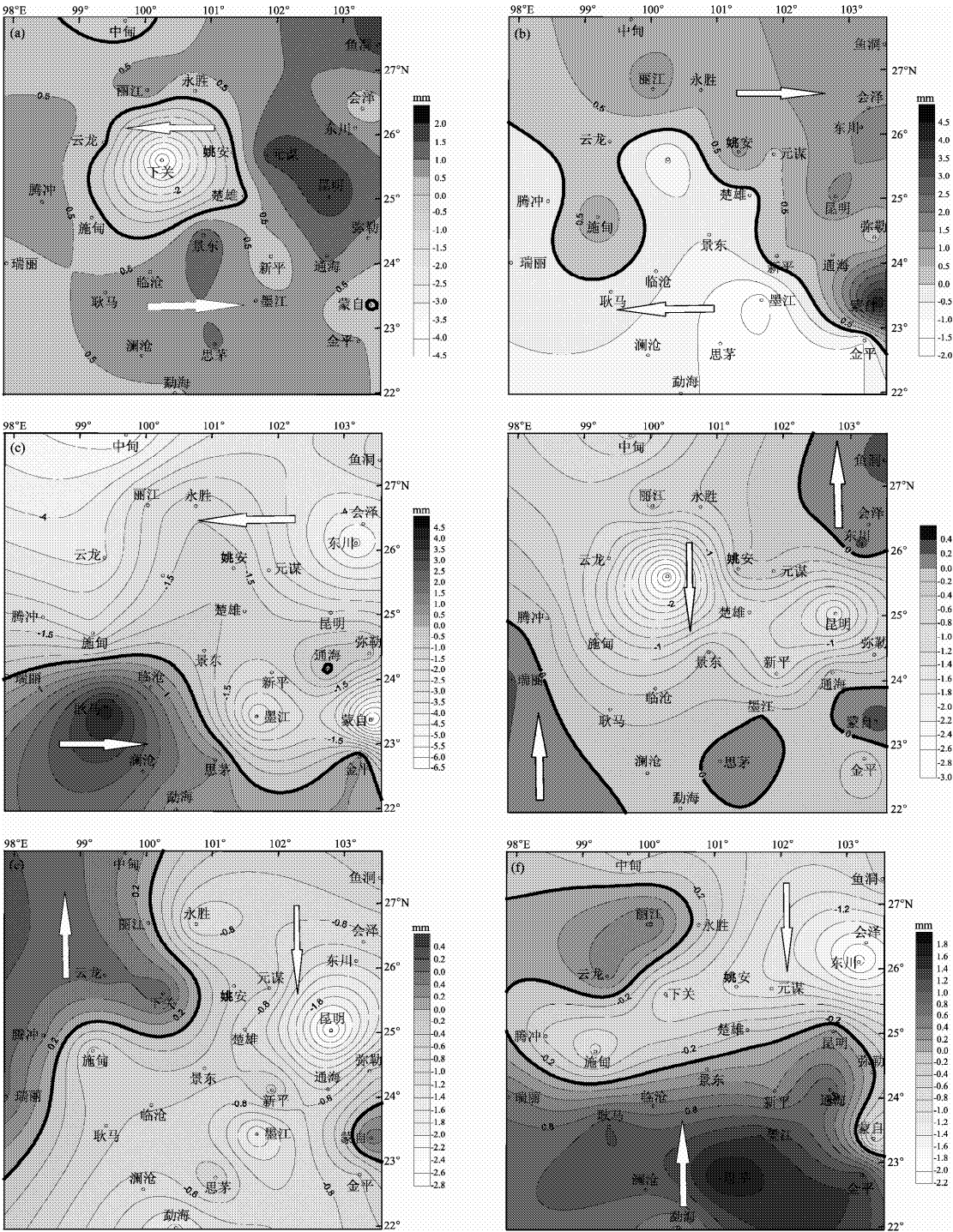


图 2 2010 年 12 月至 2011 年 2 月地壳形变变化时序图

(a) 2010 年 12 月东西分量; (b) 2011 年 1 月东西分量; (c) 2011 年 2 月东西分量; (d) 2010 年 12 月南北分量; (e) 2011 年 1 月南北分量; (f) 2011 年 2 月南北分量

Fig. 2 Time-sequence diagram of crustal deformation variation from Dec. , 2010 to Feb. , 2011  
(a) EW-component in Dec. , 2010; (b) EW-component in Jan. , 2011; (c) EW-component in Feb. , 2011;  
(d) SN-component in Dec. , 2010; (e) SN-component in Jan. , 2011; (f) SN-component in Feb. , 2011

从图2可以看到，区域应力变化所引起的形变传递过程比较清晰，2010年12月，云南省内北东向推挤加强，除下关点以外，其他区域全部为东向运动，南北向运动的异常区域集中在云南西南角瑞丽一带地区。2011年1月，该推挤力量有所减退，东向运动异常区域范围缩小，主要分布在红河断裂以北地区，2011年2月，云南南部再次出现了明显的北东向异常运动。

综合分析，由于云南省内长趋势的应力相对平衡状态被打破，区域内的主导应力出现短期变化，导致了较大的区域形变异常。在2011年2月，腾冲、施甸一带地区出现两个分量零值线在施甸一带相交的现象。根据这些现象可以推测，耿马一带再次受到明显的北东向推挤，

瑞丽、耿马一带呈现北东方向运动趋势，而其北边的腾冲、施甸一带由于受来自东北方向的应力作用，出现了南西向运动，使得这一地区在运动方向上出现了反向剪切，从耿马至腾冲一带的运动量差值达到了5 mm左右，在腾冲、施甸、瑞丽等地区形成了较大的剪切应力，这可能成为了前期应力积累释放的诱因。因此，我们认为2011年3月10日盈江5.8级地震与此形变异常存在因果关系。

(2) 缅甸7.2级地震与区域形变关系分析

根据中国地震台网测定：2011年3月24日21时55分在缅甸(20.8°N, 99.8°E)发生 $M_s7.2$ 地震，震中位于缅甸掸邦(Shan State)。断层总体走向为NEE向，断层性质为左旋走滑。

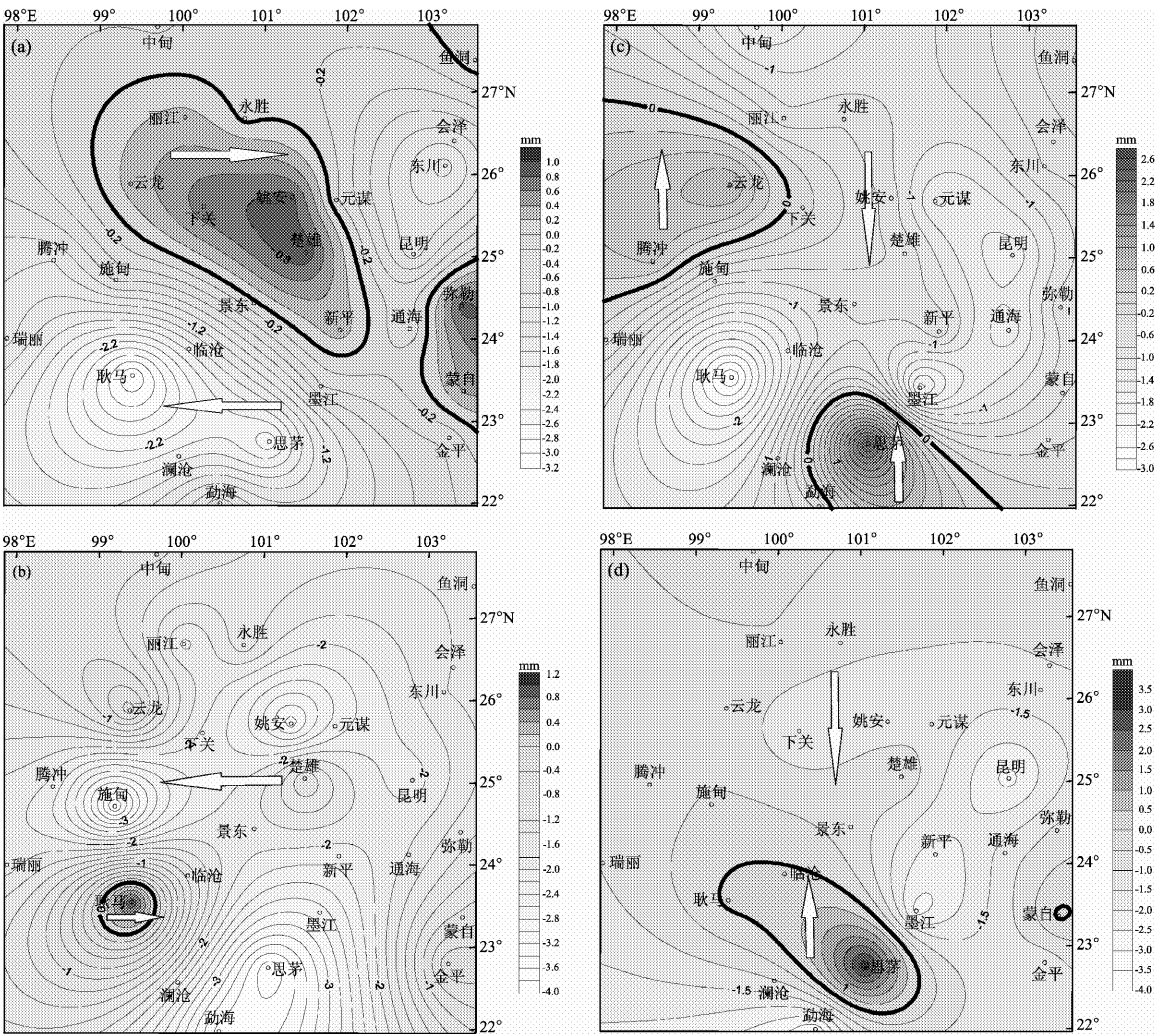


图3 缅甸地震前和震后的地壳形变时序图

(a) 2011年3月东西分量；(b) 2011年4月东西分量；(c) 2011年3月南北分量；(d) 2011年4月南北分量  
Fig. 3 Time-sequence diagram of crustal deformation variation before and after Myanmar  $M_s7.2$  earthquake  
(a) EW-component in Mar. , 2011; (b) EW-component in Apr. , 2011; (c) SN-component in Mar. , 2011; (d) SN-component in Apr. , 2011



由于该地震发生在境外，没有理想的观测点来解释这一地震过程，但该地震震级较大，周边地区应该会有所反应。图 2 和图 3a、c 为震前图像，图 3b、d 为震后图像，震前思茅一带地区有较长时间存在着北向运动异常，最大达 1.6 mm。震后思茅地区出现了明显的震后变形，思茅地区测点沿澜沧江断裂向西北方向运动，应该是发震断层的左旋走滑运动导致其右盘产生了北北东向推挤的结果。

(3) 2011 年 6 月腾冲 5.2 级地震与区域形变关系分析

2011 年 6 月 20 日发生腾冲 5.2 级地震，从图

4 可以看出 (2011 - 04 - 17 ~ 2011 - 06 - 17)，2011 年 4 ~ 5 月，受到缅甸地震的影响，震后思茅、墨江以及小江断裂一带仍然表现为东向运动，省内大部分区域表现为北向运动。5 ~ 6 月期间，思茅一带地区的北向运动已经消失，转向了南向正常运动，而腾冲、施甸、瑞丽一带地区出现了明显的北向运动，视为异常，且从东西分量来看，在大盈江断裂的两侧出现了明显的反向剪切运动，因此，我们认为此次腾冲 5.2 级地震前存在明显的形变异常。

(4) 2011 年 8 月腾冲 5.2 级地震与区域形变关系分析

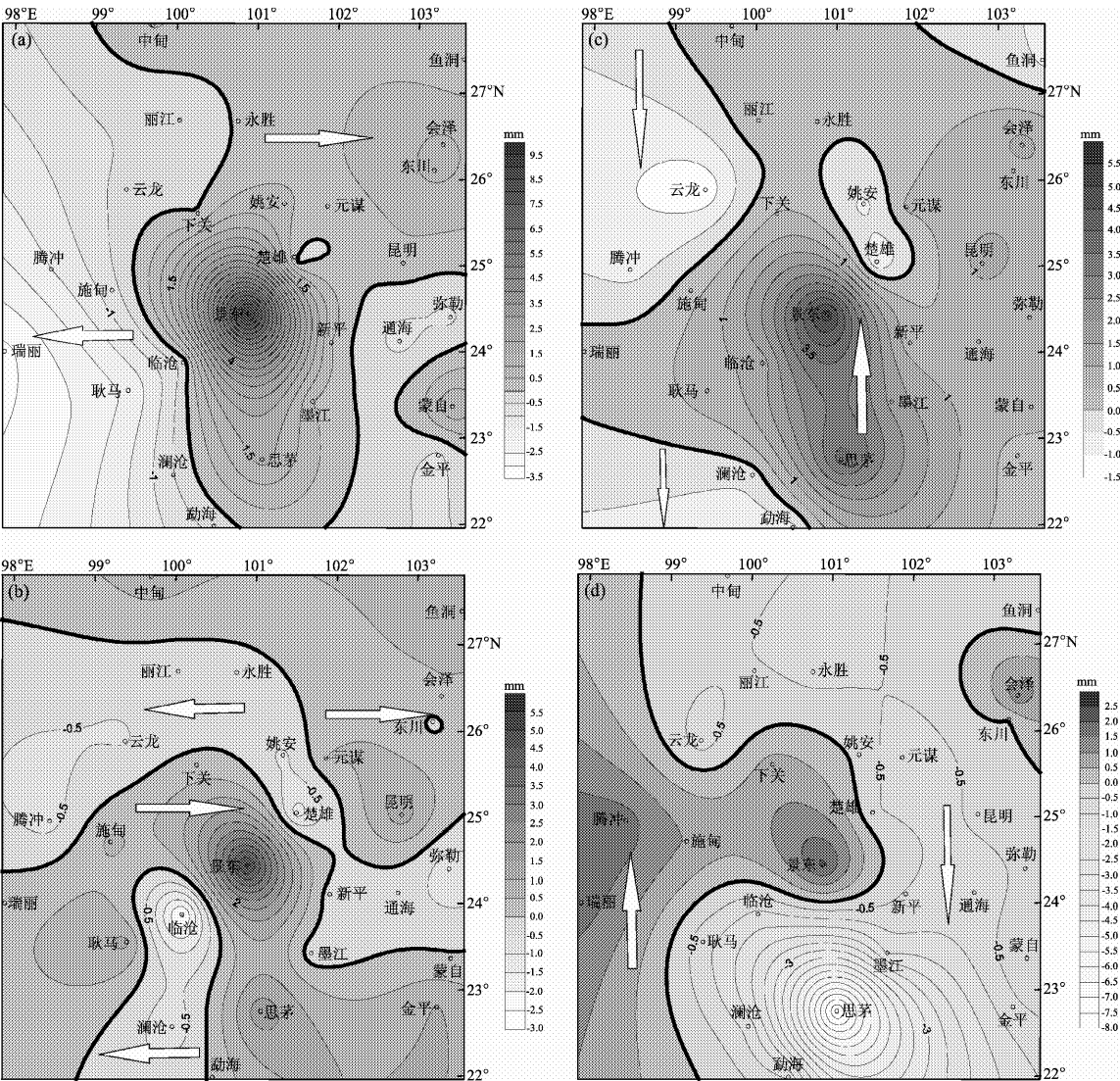


图 4 2011 年 6 月腾冲 5.2 级地震前形变量等值线图

(a) 2011 年 5 月东西分量; (b) 2011 年 6 月东西分量; (c) 2011 年 5 月南北分量; (d) 2011 年 6 月南北分量

Fig. 4 Contour map of deformation before Tengchong M5.2 earthquake

(a) EW-component in May. , 2011; (b) EW-component in Jun. , 2011; (c) SN-component in May. , 2011; (d) SN-component in Jun. , 2011

2011 年 8 月 10 日，腾冲再次发生了 5.2 级地震。由震前形变量等值线图（2011 - 06 - 10 ~ 2011 - 08 - 09）（图 5）可以看到，西南方向的挤压应力在 6 月发生腾冲 5.2 级地震后仍然存在，省内除景东、思茅一带为正常运动以外，其他地区均为东北或东南向运

动。7~8 月期间，腾冲一带地区的北向运动加强，省内东向运动区域扩大，大盈江断裂两侧东向和北向运动量均出现差异。因此，北东向的应力加强，导致小滇西地区的持续受压，压力对不同区域产生的形变量差异是这一地震发生的主要原因。

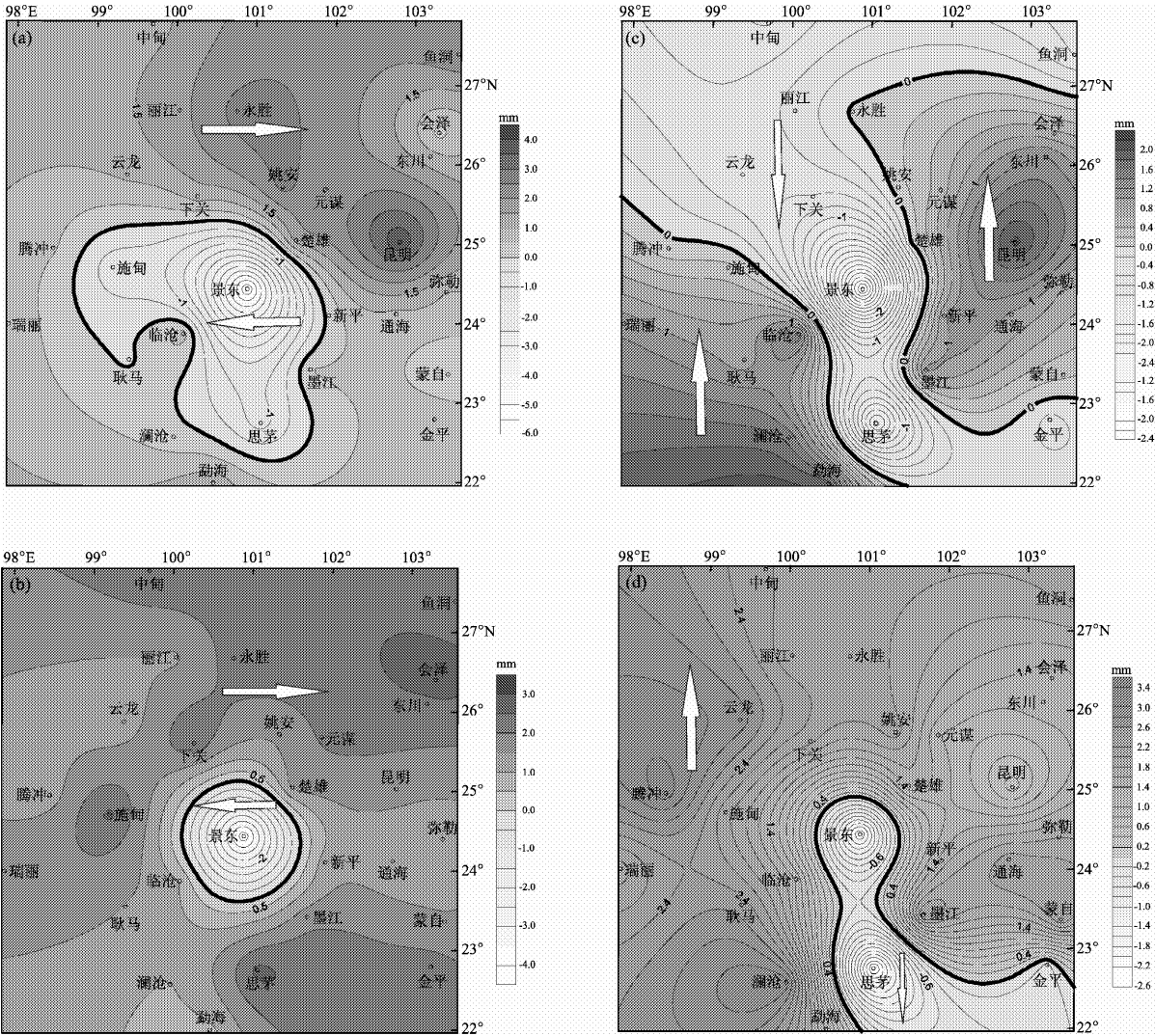


图 5 2011 年 8 月腾冲 5.2 级地震前形变量等值线图

(a) 2011 年 7 月东西分量；(b) 2011 年 8 月东西分量；(c) 2011 年 7 月南北分量；(d) 2011 年 8 月南北分量

Fig. 5 Contour map of deformation before Tengchong M5.2 earthquake in Aug. , 2011

(a) EW-component in Apr. , 2011; (b) EW-component in Jun. , 2011; (c) NS-component in Apr. , 2011 (d) NS-component in Jun. , 2011

3 结论

(1) 点位移计算的形变场变化速率有着比较明确的物理意义，能比较直观了解区域应力变化及块体活动，为 GNSS 观测资料在地震预测预报的工作中的应用提供了思路。

(2) 缅甸 7.2 级地震和盈江 5.8 级地震之间存在着关联性，缅甸地震前由于川滇菱形块体的南向运动受阻，使得川滇菱形块体位于滇西南地区的力量传递通道阻塞，同时，瑞丽、施甸一带由于印度板块侧向挤压加强，阻止了应力的西南向卸载通道，因此，来自菱形块体的运动全部沿腾冲、云龙一带向西传递，造成了剪切应力积累，

引起了盈江 5.8 级地震,随后发生了缅甸 7.2 级地震,可以认为都是由于缅甸地震前的南向运动阻力加强所诱发。

(3) 从以上震例的分析来看,盈江、缅甸以及腾冲两次的地震前,都曾出现了周边区域运动方向背离长趋势的情况,这一现象说明了该区域周边应力均衡性被打破,这是地震发生的诱因,此现象可以作为判定某一区域地震危险性的一个重要的指标。当某些区域存在明显的剪切运动或者差异运动时,需要注意这一区域发生地震的危险性,当然,地震是否发生还需要考虑该差异运动与断层分布的关系。

(4) 云南省内受到的区域应力的作用过程比较复杂,不同方向的应力对省内各个区域所产生的影响也不尽相同,应力的传递方式多种多样,由于目前 GNSS 站运行时间比较短,观测数据积累不够,对震例的总结也还不够充分,需要在今后的工作中不断的总结形变场变化与地震孕育之间的规律,才能更好的把握云南省内地震的发生规律。

## 参考文献:

- 皇甫岗,陈颢,秦嘉政,等. 2010. 云南地震活动性[M]. 昆明:云南科技出版社.
- 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.
- 李强,游新兆,杨少敏,等. 2012. 中国大陆构造变形高精度大密度 GPS 监测—现今速度场[J]. 中国科学:地球科学,42(5):629-632.
- 李永莉,毛慧玲,王世芹,等. 2010. 云南地区强震前波速比、震源深度及中小地震活动的特征[J]. 地震研究,33(3):259-264.
- 刘虹,苏有锦. 2007. 云南地区 7 级大震震源地地震活动特征研究[J]. 地震研究,30(1):18-23.
- 毛玉平,韩新民,谷一山,等. 2003. 云南地区强震( $M \geq 6$ )研究[M]. 昆明:云南科技出版社.
- 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.
- 王伶俐,邵德盛,洪敏,等. 2012. 云南省 GNSS 基准站数据处理参考框架研究[J]. 地震研究,35(4):449-454.
- 张晓亮,江在森,王敏,等. 2006. 利用 GPS 连续站资料研究地壳运动与地震的关系[J]. 大地测量与地球动力学,26(4):67-72.
- 张永志,吴小利,王卫东,等. 2010. 基于 GPS 观测的格林函数法研究汶川 8.0 级强震前构造应力场变化[J]. 测绘学报,39(1):15-19.

## Research on Relationship between Crustal Deformation and Earthquake Based on GNSS

HONG Min<sup>1,2</sup>, SHAO De-sheng<sup>2</sup>, WANG Ling-li<sup>2</sup>, LI Chun-guang<sup>2</sup>, ZHANG Yong<sup>2</sup>

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

(2. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650041, Yunnan, China)

### Abstract

Based on processing the data which were recorded by GNSS continuous observation stations in Yunnan Province by deducting intro-regional stable reference point, sliding mean value etc., we obtained timing diagram of regional deformation field movement rate of Yunnan Province, and analyzed the relationship between crustal movement and the seismic events occurred during this period. The analysis results showed that movement direction of some points deviated away from crust movement background in the long trend, earthquake was more likely to occur in Yunnan. This research made an exploration for GNSS continuous observation data used in earthquake prediction and forecasting.

**Key words:** crustal deformation; earthquake event; GNSS