

# 利用 InSAR 技术研究滇西南镇康—永德地区 现今地壳形变特征<sup>\*</sup>

季灵运, 刘立炜, 郝明

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 基于 12 景 ALOS PALSAR 卫星影像, 利用 InSAR 的前沿技术, 提取了 2007 ~ 2010 年滇西南镇康—永德一带的平均地壳形变速率和形变时间序列, 并结合不同时段的水准和 GPS 监测结果, 从三维角度研究了该区域现今的地壳运动特征。研究表明, 水准资料显示的镇康—永德一带异常隆起区位于南汀河断裂带附近, 范围沿北东—南西方向呈近椭圆形展布。这一地壳形变异常区在数十年尺度上表现为隆升 (速率约 2 ~ 3 mm/a), 表明区域具备中强地震孕育的地壳形变背景。而在 2007 ~ 2013 的数年时间尺度上表现为大幅垂向形变波动, 可能反映区域近年来地壳垂直运动比较活跃, 应加强跟踪与监视。

**关键词:** InSAR; 滇西南; 形变异常; 地壳形变速率; 形变时间序列

**中图分类号:** P315.727

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2015)01-0084-06

## 0 引言

云南省位于南北地震带南段, 从构造的角度, 位于欧亚板块和印度板块会聚、消减、相互作用的边缘地带。因此该地区地震频度高、强度大、震源浅、分布广, 是我国大陆内部地震活动最强烈的场所之一 (赵洪声等, 2001)。其中的滇西南地区被中国地震局“中国大陆 7 ~ 8 级地震中长期危险性预测”项目 (M7 项目) 确定为我国大陆地区未来十年及稍长时间 7 级以上地震危险性值得注意地区 (M7 专项工作组, 2012)。虢顺民等 (1999) 研究表明, 滇西南地区的龙陵—澜沧断裂现今活动比较显著, 是一条正在发展中的新生破裂带, 结构上还没有完全连通, 断裂南段发生了多次强震, 如 1988 年的澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震; 断裂北段则缺乏历史强震, 是未来强震易发地区。研究地震危险区内地壳形变特征及其随时间的演化对认识大陆内部变形、确定地震复发周期和理解地震孕育过程具有重要意义。因此, 跟踪研究滇西南地区的现今地壳形变特征对区域强震危险性分析以及震情跟踪工作具有重要的指导

意义。已有研究表明滇西南镇康—永德一带存在地壳垂直形变隆升异常, 笔者在这一研究背景下, 利用合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, 简称 InSAR) 技术获取研究区域 2007 ~ 2010 年的形变演化时间序列, 并结合 GPS 和水准测量结果, 确定水准垂直形变异常隆升的空间展布范围和精细特征, 研究形变异常的诱发原因和断裂的活动特征, 落实 2011 年以来研究区域水准巨幅波动的地震前兆指示意义的可靠性, 为滇西南 10 年尺度 7 级以上强震值得注意地区的强震危险性分析和震情跟踪提供重要依据。

## 1 区域现今地壳垂直形变特征

滇西南地区自 20 世纪 70 年代至 2013 年已开展了多期一等精密水准测量, 郝明 (2012) 通过计算 20 世纪 70 年代至 2011 年的多期水准测量资料, 发现该区域的地壳形变速率相对于昌宁, 镇康—永德一带以 2 ~ 3 mm/a 的速率大幅隆升 (图 1), 表明在数十年时间尺度下该地区存在显著的地壳垂直形变异常, 具备中强以上地震发震背景。在此背景下, 中国地震局自 2011 年以来对该条水

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2014-08-01.

**基金项目:** 地震科技星火计划项目——基于 InSAR 的滇西南异常区地壳形变演化综合研究 (XH14069Y) 和陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目—多平台 InSAR 融合技术用于矿区开采沉陷规律研究 (2014JQ5185) 联合资助。

准线路进行了 3 次复测, 其中 2011 年由中国地震局第一监测中心观测 (使用电子水准仪), 2012 和 2013 年由中国地震局第二监测中心观测 (使用光学水准仪), 结果表明近年来该地区垂直形变变化幅度较大, 波动明显, 最大相对变化达到 120 mm (图 2)。有专家认为水准巨幅波动是由电子水准仪和光学水准仪之间的系统误差引起的, 但是 2012 和 2013 年均使用光学水准仪观测, 一年间垂直形变最大也超过了 30 mm, 可能反映了区域近年来正在发生着强烈的构造运动。然而, 水准测量的时间、空间分辨率均较低, 较难捕捉区域垂直形变随时间的演化, 也不容易判定异常的空间展布范围。区域形变随时间演化的特征以及形变异常的空间覆盖范围对区域强震危险性分析以及震情跟踪工作具有重要的指导意义。

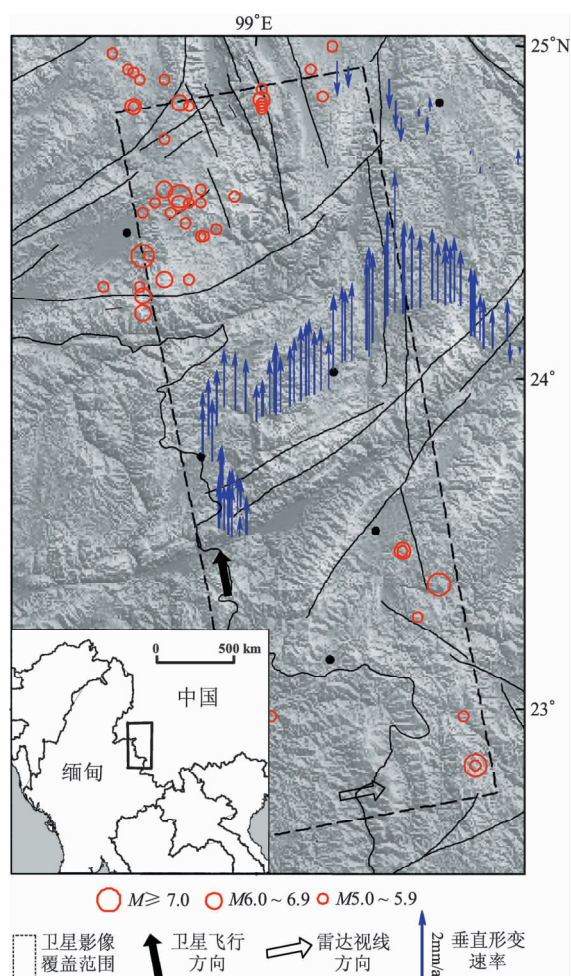


图 1 滇西南镇康—永德地区区域构造图

Fig. 1 Regional tectonic map of Zhenkang-Yongde area in southwest Yunnan

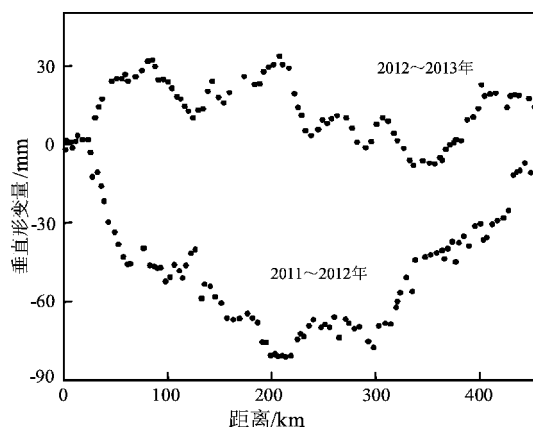


图 2 水准资料显示的 2011 ~ 2013 年  
区域垂直形变异常

Fig. 2 Regional vertical deformation anomalies shown by leveling data from 2011 and 2013

## 2 InSAR 技术简介及数据处理

### 2.1 InSAR 技术简介

InSAR 是近 20 年发展起来的一项空间对地观测技术, 由于具有大范围、高精度提取地壳形变的优势, 已经在地学研究的多个领域取得了广泛应用 (季灵运等, 2013; 刘智荣等, 2013; Marshall *et al.*, 2013)。特别是近年来发展起来的干涉图堆叠 (stacking) 技术、短基线集 (Small Baseline Subsets, 简称 SBAS) 技术等, 削弱了常规 InSAR 测量中的轨道误差、外部 DEM 误差、大气相位延迟误差等, 拓展了 InSAR 技术的应用领域。干涉图堆叠技术将覆盖同一地区的多幅干涉图加权平均, 达到削弱各种误差和噪声、提取微量变形信号的目的 (Zebker *et al.*, 1997; Wright *et al.*, 2001; Emardson *et al.*, 2003; Biggs *et al.*, 2007)。一般来说, 堆叠  $N$  幅干涉图, 可以削弱  $N^{1/2}$  的大气相位延迟误差 (Biggs *et al.*, 2007)。短基线集技术 (Berardino *et al.*, 2002; Jung *et al.*, 2008) 仅选取空间垂直基线较短的干涉图进行时间序列形变求解, 削弱了空间失相干的影响, 同时大大降低了外部 DEM 引入的误差和大气相位延迟。本文借助于干涉图堆叠和短基线集两种 InSAR 前沿技术提取云南镇康—永德地区的地壳形变并研究其随时间演化的特征。

### 2.2 SAR 影像及 InSAR 数据处理

滇西南镇康—永德地区纬度较低, 植被覆盖

茂盛, 本文选用了对植被具有较强穿透能力的日本 ALOS PALSAR 影像 (波长 23.6 cm), 共 12 景 (每景影像包含 3 帧; 2009 年 12 月 29 日由于大气湍流影响太大而舍弃, 未参与 InSAR 计算), 获取时间从 2007 年 6 月到 2010 年 11 月, 选取的影像提供了 3.5 a 的地表形变观测资料 (图 3)。

给定垂直基线小于 2 000 m, 自由组合生成 66 幅干涉图。为了提高信噪比, 对于每幅干涉图, 多视因子给定 16: 76, 即每个像元约  $240 \times 240 \text{ m}^2$ 。同时, 对干涉图滤波两次。对于含有基线误差的干涉图, 基于已有 DEM, 利用最小二乘法进行了基线精化。最终选取 17 幅相干性好、相位解缠误差小、大气相位延迟误差可忽略的干涉图进行后续计算与分析 (图 3)。

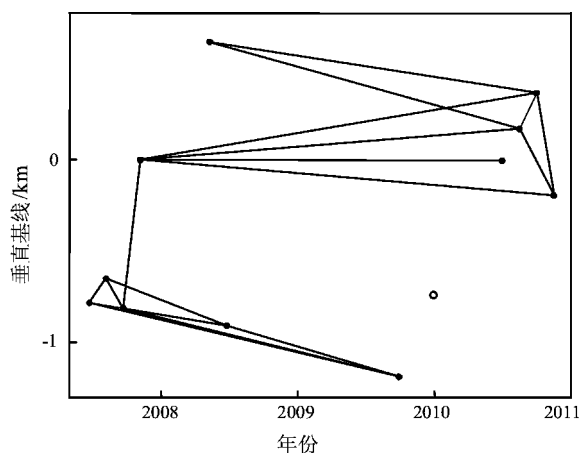


图 3 InSAR 干涉图组合与基线 (空心圆表示未参与计算的 SAR 影像)

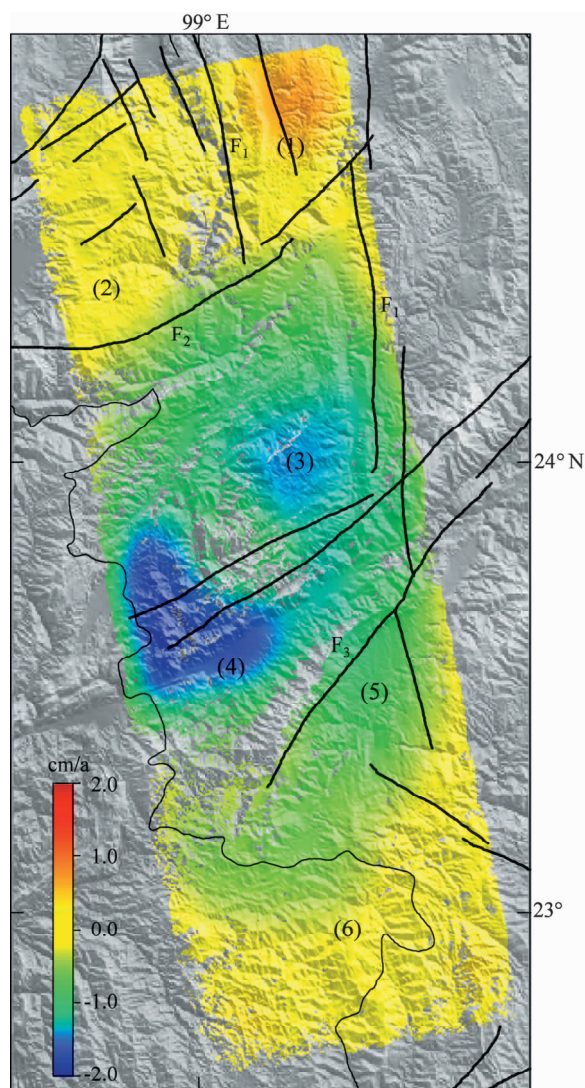
Fig. 3 Combination and baselines of InSAR interferograms (hollow circle represents the SAR image that was not used during processing)

### 3 InSAR 结果分析与讨论

#### 3.1 InSAR 形变场分析

虽然 ALOS PALSAR 影像工作在 L 波段, 允许较长的空间垂直基线, 然而数据处理结果表明, 由于研究区域地形起伏较大, 垂直基线大于 1 000 m, 则会造成较严重的空间失相干。图 3 为选取进行干涉图堆叠计算的 17 幅干涉图的时间和空间基线信息, 图中可见所有干涉图的垂直基线均较短, 在 800 m 以内, 保证了后续计算结果的可

靠性。图 4 为通过干涉图堆叠技术得到 2007 ~ 2010 年镇康—永德地区的平均地壳形变速率 (雷达视线方向), 图中序号 (1) ~ (6) 为选取的指定区域, 用于提取形变时间序列 (图 5)。由图 4 可知: (1) 干涉图整体相干性较好, 仅在部分地势陡峭的山区失相干; (2) 形变异常位于区域中间部位的南汀河断裂带附近, 为北东—南西方向近椭圆形异常下沉区域, 最大下沉形变速率近  $2 \text{ cm/a}$ ; (3) 区域内分布的断层大多形变不明显, 仅区域北部的畹町—安定断裂两侧存在差异性运



$F_1$ : 龙陵—澜沧断裂;  $F_2$ : 畹町—安定断裂;  $F_3$ : 南汀河断裂

图 4 2007 ~ 2010 年滇西南镇康—永德地区地壳平均形变速率 (雷达视线方向)

Fig. 4 Average crustal deformation velocity in Zhenkang—Yongde area in Southwest Yunnan (from the direction of radar sight)



动, 断层运动性质为左旋, 差异运动速率约为 5 mm/a (雷达视线方向)。地震地质研究结果表明, 畹町—安定断裂第四纪以来活动性较强, 其水平左旋滑动速率约为 2 ~ 3 mm/a (常祖峰等, 2012; 吴中海等, 2012), 与本文 InSAR 技术得到的结果比较吻合, 并且该断裂参与了龙陵、瑞丽一带的地震活动 (常祖峰等, 2012), 未来的强震危险性仍不能忽视 (吴中海等, 2012)。

为了揭示滇西南镇康—永德地区地壳形变随

时间的演化特征, 本文利用短基线集技术计算了 2007 ~ 2010 年滇西南镇康—永德地区形变时间序列。图 5 是选取的研究区域不同位置的形变时间序列曲线, 2007 ~ 2010 年间几处区域均表现出不同程度的形变波动特性, 其中, (2)、(5)、(6) 三处波动幅度较小, 表明这 3 个区域相对比较稳定; (1)、(3)、(4) 三处波动幅度较大, 最大达 9 cm, 表明这 3 个区域可能存在不同程度的构造活动。

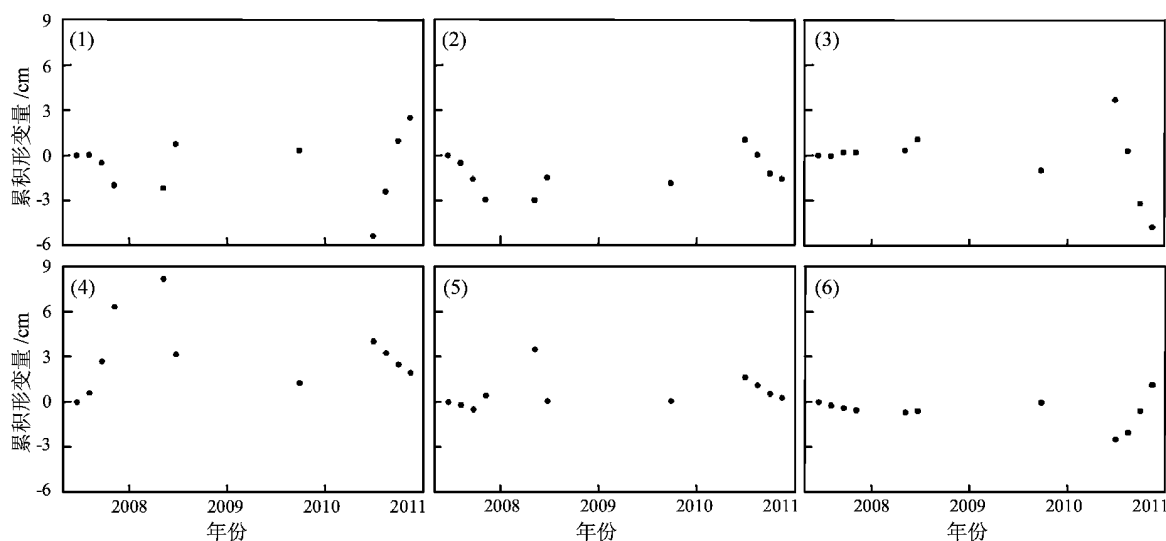


图 5 选取指定区域的 InSAR 形变时间序列

Fig. 5 InSAR deformation time series of the selected designated areas

### 3.2 InSAR 形变场可靠性分析

首先, 在获取地壳形变场的技术方法选取上, 本文采用干涉图堆叠和短基线集两种技术, 较多研究实例表明, 这两种技术可以以较高的精度提取区域的微小地壳形变, 被证明是可靠的 (Emardson *et al.*, 2003; Biggs *et al.*, 2007); 其次, InSAR 监测结果显示, 2007 ~ 2010 年滇西南的镇康—永德一带地壳形变波动较大 (图 5), 该区域 2011 ~ 2013 年的水准监测结果也表现出较强的波动特征。虽然两者的监测时间不一致, 无法直接进行定量比较, 但是从运动趋势来看, 两者均显示相似的波动特征, 表明 InSAR 监测结果是可信的。

### 3.3 结果对比分析与讨论

为了探讨和分析滇西南镇康—永德一带的区域地壳运动状态和地震危险性, 本文收集了 2009 ~ 2013 年研究区域的 GPS 水平速度场, 如图 6 所

示。为了便于分析比较, 图 6 同时叠加了 20 世纪 70 年代至 2011 年的长期地壳垂直运动速率 (郝明, 2012) 以及本文干涉图堆叠技术获得的 2007 ~ 2010 年研究区的平均地壳形变速率。GPS 水平速度场表明, 相对于欧亚板块, 镇康—永德一带整体向南运动, 量级约 5 ~ 6 mm/a, 2011 ~ 2013 年相对于 2009 ~ 2011 年有整体向西旋转运动的趋势, 幅度不大。区域内部水平形变差异不显著。在数十年时间尺度上, 相对于北部的昌宁地区, 镇康—永德一带表现为大幅垂向隆升, 量级约为 2 ~ 3 mm/a。可见, 水准资料显示的地壳形变隆起区与 InSAR 反映的地壳形变下沉区范围基本一致, 分析两者反映相反的形变态势, 可能有两个原因: (1) 区域地壳垂直运动在数十年的时间尺度上较为稳定, 但在几年至数年时间尺度上则往往波动较大 (王庆良等, 2008)。郝明 (2012) 获取的垂直运动速率反映的是近 40 年时间尺度的平均速率,

是区域长期稳定地壳垂直运动的体现。而本文的 InSAR 资料时间跨度仅为 3.5 a, 反映的是区域近期的地壳运动状况, 可能说明区域近期地壳运动有活跃增强的趋势。因此, 两种手段反映的是不同时间尺度范围的地壳运动状况。(2) InSAR 形变场是区域各个方向地壳运动分量在雷达视线方向的投影 (主要反映的是区域垂向运动特征), 而水准测量结果仅是垂直方向的运动。因此, 两者反映的区域地壳运动方向不同。综合分析不同时间段的 GPS、水准和 InSAR 地壳形变场, 滇西南的

镇康—永德一带内部近期水平地壳运动不显著, 以垂直形变为主, 且近些年来地壳垂直运动比较活跃。值得注意的是, 镇康—永德一带的地壳形变异常活动区内中强以上地震活动较弱, 从图 1 可以看出, 1970 ~ 2013 年的四十余年该区域缺乏 5 级以上地震活动, 因此未来发生中强以上地震的危险性不容忽视。

## 4 结论

本文基于 12 景日本 ALOS PALSAR 卫星影像, 利用 InSAR 技术 (包括干涉图堆叠和短基线集技术) 提取了 2007 ~ 2010 年滇西南镇康—永德一带的平均地壳形变速率和形变时间序列, 并结合不同时段的水准和 GPS 监测结果, 从三维角度研究了区域现今的地壳运动特征。InSAR 结果表明, 水准资料显示的异常隆起区范围沿北东—南西方向呈近椭圆形展布, 这一地壳形变异常区在数十年尺度上表现为隆升 (速率约 2 ~ 3 mm/a), 表明区域具备中强地震孕育的地壳形变背景。而在 2007 ~ 2013 的数年尺度上表现为大幅的垂向形变波动, 可能反映区域近年来地壳垂直运动比较活跃, 应加强跟踪与监视。另外, 区域内分布的畹町—安定断裂两侧存在差异性运动。

本文的研究结果再次证明 InSAR 形变场具有较高的空间分辨率, 有效弥补了 GPS、水准测量空间分辨率较低的不足, 厘清了滇西南镇康—永德一带地壳形变异常的空间范围和展布特征, 证实了区域近几年确实存在垂直形变的大幅波动, 为区域地震危险性分析和震情跟踪工作提供了重要依据。

## 参考文献:

- 常祖峰, 安晓文, 张艳凤. 2012. 畹町断裂晚第四纪活动与水系构造变形[J]. 地震研究, 34(2): 228-239.
- 魏顺民, 向宏发, 周瑞琦, 等. 1999. 滇西南龙陵—澜沧断裂带——大陆地壳上一条新生的破裂带[J]. 科学通报, 44(19): 2118-2121.
- 郝明. 2012. 基于精密水准数据的青藏高原东缘现今地壳垂直运动与典型地震同震及震后垂直形变研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 季灵运, Zhong Lu, 王庆良, 等. 2013. 利用 SBAS-InSAR 技术研究印尼 Agung 火山的形变特征与岩浆房参数[J]. 地震研究, 36(3): 313-318.

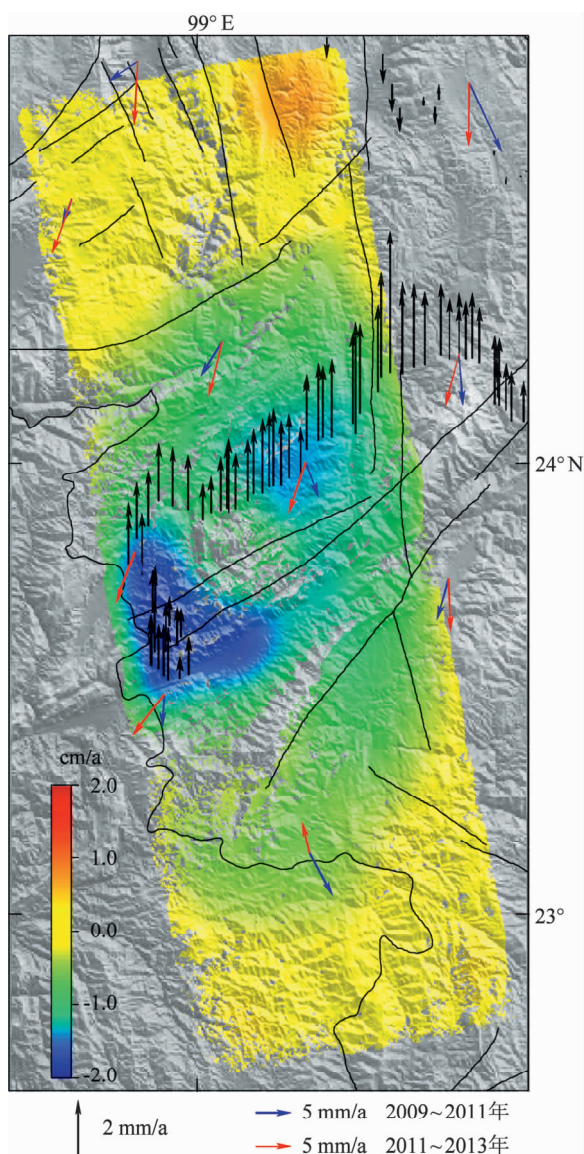


图6 研究区域不同时段 GPS、水准、InSAR 形变场  
Fig. 6 Deformation field from GPS, leveling and InSAR in the study area in different time periods

- 刘智荣, 黄静宜, 洪顺英, 等. 2013. 基于 PS-InSAR 技术的丽江断裂形变监测研究[J]. 地震研究, 36(3): 319–323.
- 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.
- 吴中海, 赵希涛, 范桃园, 等. 2012. 泛亚铁路滇西大理至瑞丽沿线主要活动断裂与地震地质特征[J]. 地质通报, 31(2~3): 191–217.
- 赵洪声, 和宏伟, 张立, 等. 2001. 云南地震灾害特征分析[J]. 内陆地震, 15(1): 11–22.
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., *et al.* 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 40(11): 2375–2383.
- Biggs J., Wright T., Lu Z., *et al.* 2007. Multi-interferogram Method for Measuring Interseismic Deformation: Denali fault, Alaska [J]. Geophysical Journal International, 170(3): 1165–1179.
- Emardson T. R., Simons M., Webb F. H. 2003. Neutral Atmospheric Delay in Interferometric Synthetic Aperture Radar Applications: Statistical Description and Mitigation[J]. J. Geophys. Res., 108(B5): 2231, doi:10.1029/2002JB001781.
- Jung H. S., Lee, C. W., Park J. W., *et al.* 2008. Improvement of Small Baseline Subset (SBAS) Algorithm for Measuring Time-series Surface deformations from differential SAR interferograms[J]. Korean Journal of Remote Sensing, 24(2): 165–177.
- M7 专项工作组. 2012. 中国大陆大地震中—长期危险性研究[M]. 北京: 地震出版社.
- Marshall S. T., Funning G. J., Owen S. E. 2013. Fault Slip Rates and Interseismic Deformation in the Western Transverse Ranges, California [J]. J. Geophys. Res. Solid Earth, 118: 4511–4534, doi: 10.1002/jgrb.50312.
- Wright T. B., Parsons, Fielding E. 2001. Measurement of Interseismic Strain Accumulation Across the North Anatolian Fault by Satellite Radar Interferometry [J]. Geophys. Res. Lett., 28: 2117–2120, doi:10.1029/2000GL012850.
- Zebker H. A., Rosen P. A., Hensley S. 1997. Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps[J]. J. Geophys. Res., 102(B4): 7547–7564, doi:10.1029/96JB03804.

## Crustal Deformation Characteristic of Zhenkang-Yongde Region in Southwest Yunnan Observed by InSAR Technology

Ji Ling-yun, LIU Li-wei, HAO Ming

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

### Abstract

On the basis of 12 ALOS PALSAR satellite images, we extracted the average crustal deformation velocity and the deformation time series of Zhenkang-Yongde region in southwest Yunnan during 2007 and 2010 by InSAR advanced technique. Then, combined with leveling and GPS observation results in different period, we studied the regional three dimensional deformation characteristics in the study area. The InSAR results showed that the abnormal uplift area in Zhenkang-Yongde region which was shown by the leveling data was located around the Nantinghe Fault, its range distributed from northeast to southwest with an oval pattern. The deformation anomaly area was uplifting with the velocity of 2~3 mm/a in several decades, which indicated that there had the crustal deformation background for moderate strong earthquake preparation in this area. However, it showed a vertical deformation fluctuant by a large margin during 2007 and 2013, which may reflect that the crustal vertical movement was active in the study area. Therefore, we should reinforce the deformation tracing and monitoring around the Zhenkang-Yongde region.

**Key words:** InSAR; southwest Yunnan; deformation anomaly; crustal deformation velocity; deformation time series