

# 基于 InSAR 技术的冕宁跨断层场地形变监测与分析\*

赵强<sup>1</sup>, 苏琴<sup>2</sup>

(1. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054; 2. 四川省地震局测绘工程院, 四川 雅安 625000)

**摘要:**冕宁跨断层水准场地 1-1C 测段观测曲线从 2016 年 6 月开始出现大幅度突降, 这是自汶川 8.0 级地震后四川地区出现的显著巨幅异常。针对该异常, 使用 Sentinel-1 卫星影像数据, 利用 SBAS 技术对冕宁跨断层场地进行沉降监测, 通过 SBAS-InSAR 技术获取了变空间范围和幅度以及形变时间序列曲线。结果表明: (1) 从空间看, 形变中心位于西康温泉井附近; (2) 从形变时间序列曲线上可以看出, 沉降发生的时间与西康温泉井活动一致。因此, 认为此形变是由西康温泉井抽水引起的。

**关键词:**冕宁; 跨断层场地; InSAR; 地面沉降

**中图分类号:** P315.725

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2018)03-0361-07

## 0 引言

InSAR 技术是近几十年发展起来的空天地测量技术, 具有全天候、无接触、大范围、高空间分辨率、高精度等优势。与以往的监测手段相比, InSAR 技术具有实时动态、大尺度范围、高精度等优势, 弥补了传统水准测量方法只能监测有限离散点的不足, 在地面形变监测方面显示出巨大优势(张磊等, 2017; 季灵运等, 2015)。其中 SBAS-InSAR 技术, 是一种时序分析技术, 能够克服时空失相干和大气效应的影响, 监测长时间内间隔的地表形变, 获得研究区域的沉降规律和演化特征, 而且 SBAS 技术对影像数量的要求较低, 在地表形变监测方面得到了广泛的应用(陈志谋等, 2017)。

2016 年 6 月, 冕宁跨断层水准场地 1-1C 测段观测曲线开始出现大幅度突降, 经过四川省地震局测绘工程院(以下简称测绘院)、四川省地震预报研究中心、中国地震局地震预测研究所、中国地震台网中心等多家单位 10 余次的实地调查核实和讨论, 认为冕宁跨断层短水准场地 2-1 测段地表未见断层通过, 表明该段未跨安宁河主干断裂; 3-2 和 4-3 测段跨安宁河主干断裂。短水准

异常变化最大段为 1-1C 段, 对该测段所有端点和过渡点相对于 2016 年 1 月的高程变化进行分析, 发现在 1 号点附近至少有 1.1 km 范围出现形变, 跨主干断裂的 3-2 测段没有监测到明显变化。形变与滑坡、降水、房屋荷载等环境因素关联性不强, 可能与距离 1 号点约 215 m 的西康温泉钻井、出水有关, 或者是由 1-1C 测段附近的隐伏断层活动所引起<sup>①</sup>。该形变究竟是地震前兆还是由于抽水引起的值得深入研究。

由于传统的水准测量是基于点的观测, 测点分布稀疏, 难以在宏观上揭示整个形变区域的形变规律(李宁等, 2017)。因此, 本文采用 InSAR 技术监测冕宁跨断层场地形变, 确定形变的空间范围, 判断形变的原因。

## 1 研究区概况

根据历史资料(图 1), 冕宁短水准观测曲线从 1998 年开始出现趋势性下降压性变化, 水准场地 100 km 范围内 4.0 级以上地震活动增多, 反映出川滇块体附近断层受到了区域的挤压应力作用。在 2001 年雅江 6.0 级(震中距 134 km)、2008 年汶川 8.0 级(震中距 216 km)、2013 年芦山 7.0 级(震中距 184 km)地震前后, 曲线

\* 收稿日期: 2018-04-23.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划——基于 InSAR 的东昆仑断裂玛沁玛曲段地震危险性分析(XH17059)资助。

① 四川省地震局. 2017. 2017 年 2 月 20 日冕宁跨断层场地异常核实报告.

下降趋势明显减弱,持续 2~3 a 后再继续下降。由此认为:在区域强震发生前后,冕宁跨断层水准观测曲线存在破年变现象。2014 年 9—12 月,观测曲线有近 6 mm 的上升变化(图 1 中矩形方框所示),转折过程中发生了金口河 5.0 级地震,震后曲线一直在低值波动变化,表明该处断层未

完成年变,有“闭锁”痕迹,2016 年在恢复正常年变的过程中曲线出现大幅度突降(最大幅度 16.87 mm),分析历史资料,没有类似的震例可以参考。2016 年 6 月以前单期变化最大值为 2.98 mm,而 7 月突降 5.63 mm,之后持续下降,主要由 1-1C 段变化所致。

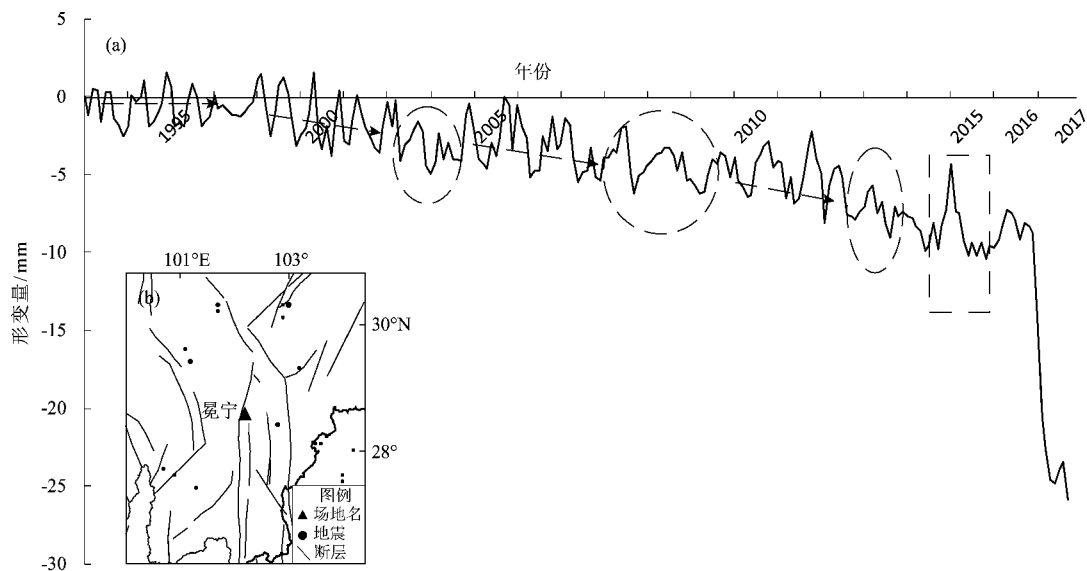
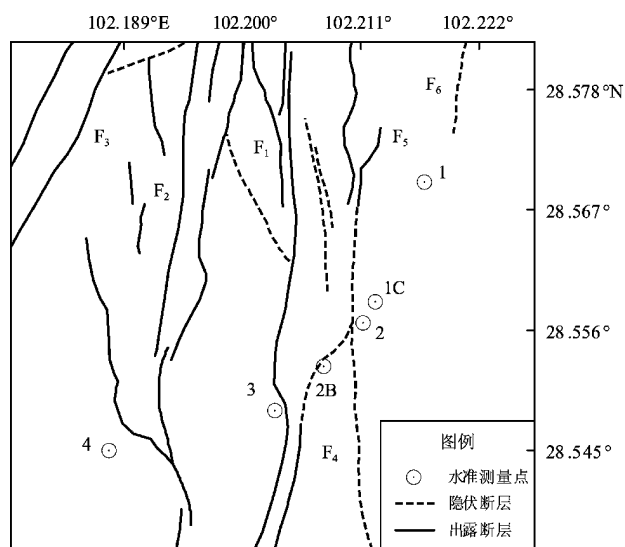


图 1 冕宁跨断层场地 1-3 测段水准历史资料 (a) 和周边地震分布图 (b)

Fig. 1 Historical data of the leveling measurement of the section 1-3 (a) and surrounding seismic distribution map (b) of the Mianning cross-fault site

冕宁跨断层水准场位于西昌市冕宁县城厢镇枳槽村六组,处于 2017 年道孚—川滇交界东侧 7.0 级地震危险区内,跨越川滇菱形块体东边界安宁河断裂,是短临跟踪的重点区域。该水准场地跨越的近 S-N 向安宁河断裂带是川滇块体东边界活动断裂带之一。在冕宁附近,安宁河活动断裂带由主干断裂、西支断裂和彝海—后山断裂(相当于东支断裂)组成(图 2),伴有若干平行或次平行的低级分支,总体的新活动性质为逆-左旋走滑;在主断裂、分支断裂和次级断裂之间的岩块,除了走滑运动外,还伴有不等的相对垂直升降运动(闻学泽,2000)。

冕宁跨断层水准场地共设有 1, 1C, 2, 2B, 3 共 5 个固定点(场地选埋时认为 1 至 2、2 至 3 测段跨过断层,考虑到测线较长,1C, 2B 作为相对固定的过渡点),其中 1 号点位于斜坡小树林中;1C, 2B 位于农田旁;2 号点位于小河沟旁边;3 号点位于马尿河边,视野开阔,周围无大型工矿企



F<sub>1</sub>: 安宁河主断裂; F<sub>2</sub>: 安宁河支断裂; F<sub>3</sub>: 南河断裂;  
F<sub>4</sub>: 后山断裂; F<sub>5</sub>: 彝海断裂; F<sub>6</sub>: 大药沟断裂

图 2 冕宁跨断层场地水准测量点及其附近活动断裂

Fig. 2 Levelling points of the Mianning cross-fault site and active faults near the site

业，观测环境良好，交通方便（图 2）。冕宁水准场地原设计是跨越安宁河断裂带的主干活动断裂，但由于位于主干断裂上盘的 4 号点 1993 年停测，3 号点又位于主干断裂破碎带上，使得本场地自 1993 年以来不能有效跨越安宁河主干活动断裂。

2 技术方法与数据处理

2.1 SBAS-InSAR 技术简介

SBAS 技术是 Berardino 和 Lanari 等研究人员提出的一种长时间序列 InSAR 分析方法（Berardino *et al*, 2002; Mora *et al*, 2003; 严建国, 李双平, 2002），是基于高相干散射体上稳定可靠的相位信息，通过相位模型迭代拟合的方法来估计和去除各类误差项，达到提取微小形变信号的目的（刘一霖, 2016）。其原理是将小于给定的垂直基线和时间基线阈值条件内的所有 SAR 影像进行干涉组合，由于在影像自由组合干涉时对时空基线进行了限制，因此能获得若干幅独立、高相干性的干涉图。然后对所有干涉对进行去除地平相位、地形相位和解缠处理。在此基础上，高程（DEM）误差与线性形变相位，并将其从原始干涉相位中去除，然后对残余相位进行相位解缠并通过时空域滤波分离出地表形变相位与大气延迟相位，最终可获取到完整的地表形变时间序列。在对多个干涉图子集进行联合求解时，SBAS 采用矩阵奇异值分解（Single Value Decomposition, 简称 SVD）算法对干涉对组合较好的基线集进行最小二乘求解，增加了时间采样，提高干涉对的时空相干性，获取最终形变时间序列结果（屈春燕等, 2014）。

此方法的优点是可以根据设定的小基线原则自由组合影像干涉对，使时空失相干和 DEM 引起的误差大大减少，能有效利用相干的点目标和分布目标，增加观测值，使观测时间加长，在数据量较少的情况下，也能开展有效的干涉测量（刘一霖, 2016）。

2.2 SBAS 时序分析

本文使用欧空局的哨兵 1A 和 1B（Sentinel-1 雷达探测卫星）雷达影像，成像波段为 C 波段，该影像可以免费下载，具有双极化、短重访周期、多模式等优点。

哨兵 1A 和 1B 影像的具体参数如下：影像幅宽 250 km，空间分辨率为 5~20 m。为减少计

算量，对影像统一做了裁剪，得到范围为（102.170°~102.248°E），（28.525°~28.595°N）的小区域。影像时间跨度为 2016 年 1 月至 2017 年 3 月，共 14 景，TOP 模式 IW（干涉宽幅模式）影像如表 1 所示。其极化方式为 VV 极化，轨道号为 135（降轨）。

表 1 14 景哨兵 1 影像数据参数  
Tab. 1 Parameters of 14 Sentinel-1 images

SAR 影像获取日期	时间基线/d	垂直基线/m
2016-01-25	0	0
2016-02-18	24	42.577
2016-03-13	48	-26.048
2016-04-30	96	12.752
2016-05-24	120	21.581
2016-08-04	192	120.875
2016-08-28	216	-25.788
2016-09-27	246	70.542
2016-10-09	258	59.491
2016-11-02	282	90.660
2016-11-26	306	37.404
2016-12-20	330	62.249
2017-01-13	354	128.443
2017-02-06	378	12.206

为了更好地进行干涉测量，消除轨道误差，本文使用 Sentinel-1 卫星的精密轨道数据。另外，选取 90 m 采样间隔 SRTM V4 DEM 作为外部 DEM 数据，以去除地形相位的影响。本文选取 2016 年 1 月 25 日的影像，即第一景影像为超级主影像，以此影像作为统一的配准基准，同时以此影像作为时间参考点。由于冕宁跨断层场地附近植被覆盖茂密，使得时空基线较大的干涉对会存在严重的失相干，因此设置时间基线和空间基线阈值分别为 90~400 d 和 45~200 m，共获得 28 对干涉影像对，如图 3 所示。在 28 对影像组合中，最大时间间隔为 378 d，最长垂直基线为 128.443 m，表 1 列出了所有影像的成像日期及相对于超级主影像的时间基线和垂直基线。

首先将所有影像与超级主影像进行配准处理，然后对由小基线原则得到的 28 对影像对进行干涉处理。采用 Goldstein 滤波法和 Delaunay MCF 解缠方法，因为这 2 种方法可以很好地处理 2 个较孤

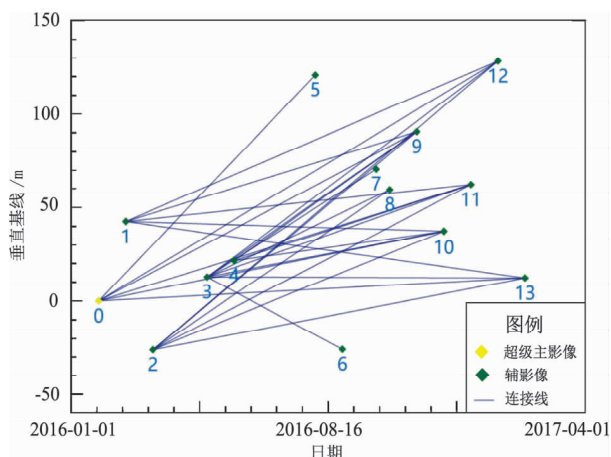


图3 干涉时空基线

Fig. 3 Spatial-temporal baselines of interferograms

立的相干性高的区域, 只对相干性高的部分进行解缠, 不受低相干像元的影响, 对于有大量相干性低的地物存在时, 如潮湿或植被浓密区域等, 最小化相位突变的影响, 得到去平和滤波后的干涉图、相干系数图和解缠结果。然后对干涉结果进行轨道精炼和重去平。在进行时

序分析时, 通过查看相干系数图, 得知研究区域植被未覆盖部分的相干系数基本都大于 0.2, 覆盖区域大部分相干系数小于 0.2, 因此设定相干系数阈值为 0.2。第一次估计位移速率和残余地形, 对合成的干涉图进行去平, 重新做相位解缠和精炼, 二次解缠, 生成更优化的结果。在第一步得到的形变速率基础上, 进行定制的大气滤波, 从而估算和去除大气相位, 在进行大气滤波时假设大气在空间上是具有高相关性, 因为大气空间相关距离为 1~2 km, 根据经验设置参数为 1 200 m, 时间上是低的相关性, 设置参数时 365 天, 最后得到更优的时间序列上的形变量和形变速率 (图 4)。

### 3 沉降监测结果分析

基于 Sentinel-1A, TOPS 模式数据, 采用 SBAS 时序分析方法, 对冕宁跨断层场地进行了监测研究, 得到该地区 2016 年 1 月至 2017 年 2 月的最新沉降监测结果 (图 4)。

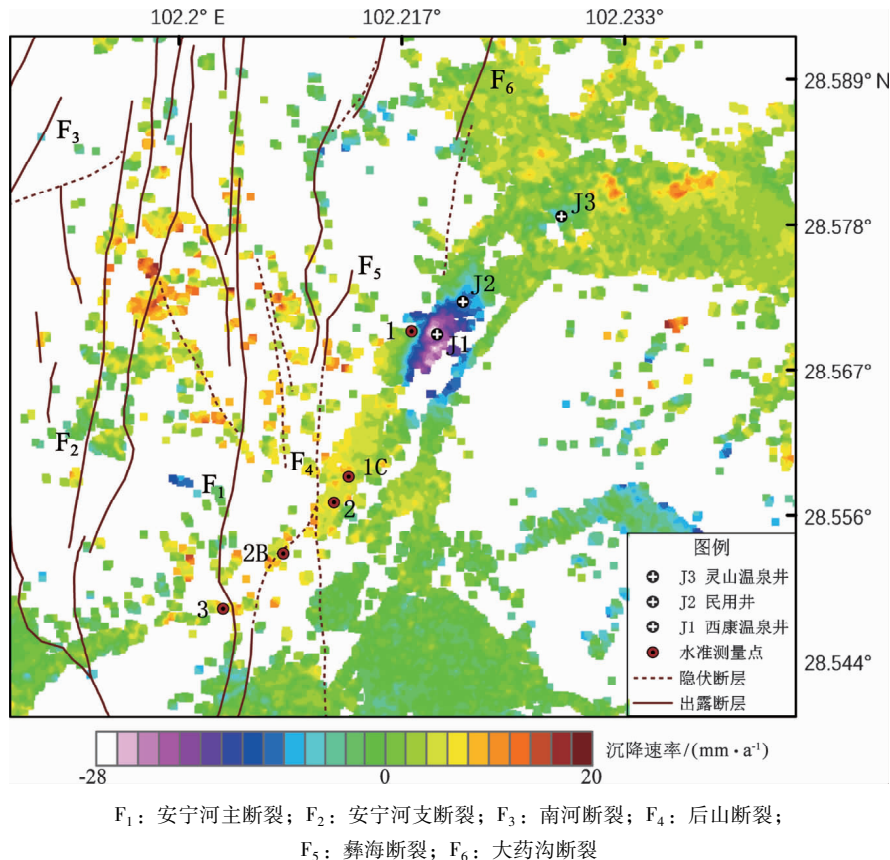


图4 冕宁跨断层场地形变速率图 (视线方向)

Fig. 4 Deformation rate of the Mianning cross-fault site (line of sight)

沉降监测结果显示，西康温泉井周边存在较为严重的沉降，且西康温泉井位于形变中心，以该点为中心形变场呈椭圆状分布，形成了监测区域最大的沉降漏斗，沿卫星视线方向沉降速率最大达到 27 mm/a，沉降范围沿椭圆长轴方向约为 1.2 km，沿短轴方向约 0.4 km。分别沿形变中心

向外选取 5 个点（图 5），得到沉降时间序列结果（图 6）。图 6 显示整个形变场同步沉降，2016 年 2—9 月，为整个区域沉降期，沉降速率最大。9 月之后，形变中心西康温泉附近的沉降量平稳变化，远离西康温泉井处于形变区域边缘开始有所回升。

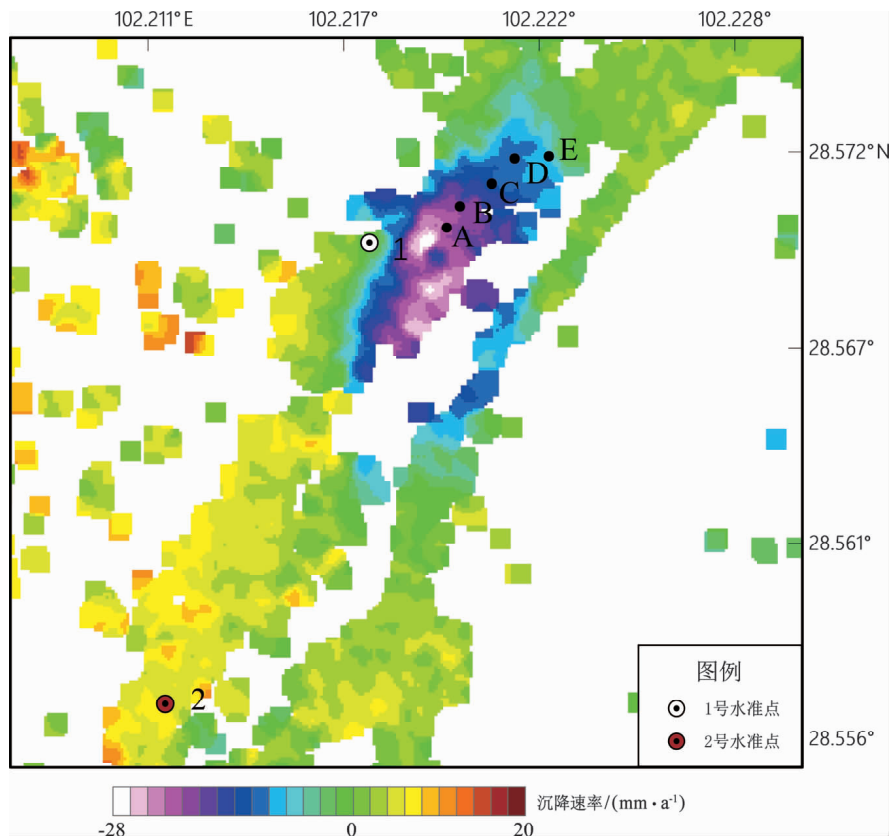


图5 沿沉降区域由内向外所选取的ABCDE五点示意图

Fig. 5 Five points of ABCDE selected from inside to outside in the subsidence area

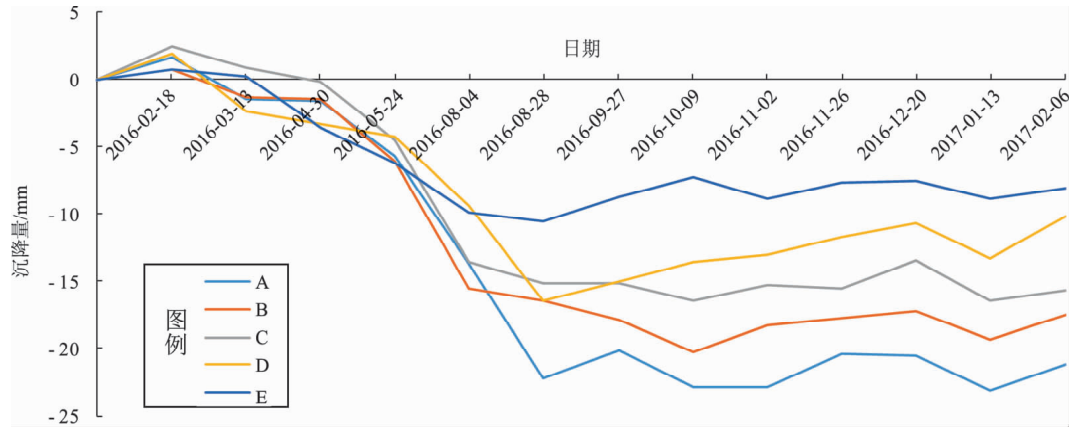


图6 ABCDE 五点的形变时间序列曲线（视线方向）

Fig. 6 Deformation time series curves of the ABCDE points (line of sight)

从获得的 1-2 支线、1-3 支线和 2-3 支线的水准观测值曲线 (图 7) 可以看出, 沉降主要由于 1 号水准点的变化引起。对比 2 组沉降曲线 (图 6 和图 7), 利用 SBAS-InSAR 获得的沉降时间序列曲线和水准观测值曲线形态类似, 沉降主要发生在 2016 年 6—9 月。由于 1 号水准点位于小树林里, 受树木

的遮挡严重, 未能在用 SBAS 技术获得的形变场中提取到 1 号水准点的形变时间序列, 但是 1 号水准点距离西康温泉仅 215 m, 此处已查明没有明显的活动断层, 西康温泉井的抽水活动必然影响 1 号点的观测。由此可以判断西康温泉的开采是引起监测区域沉降的主要原因。

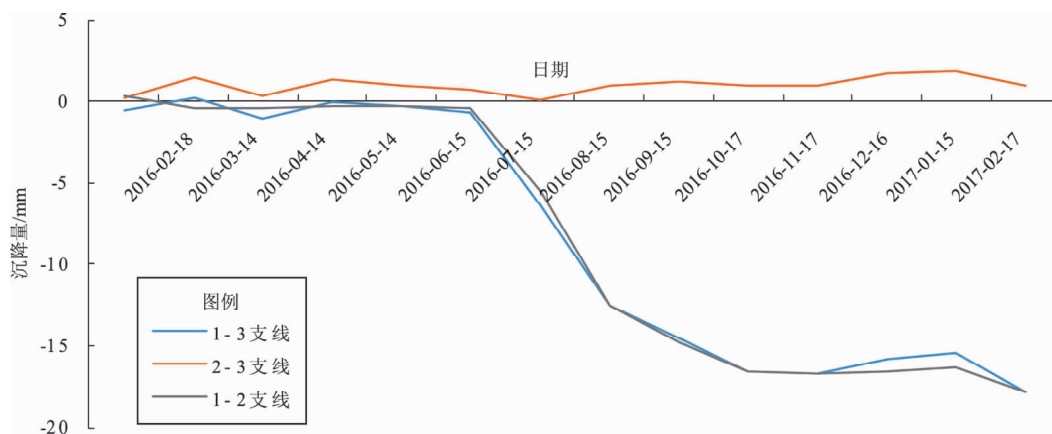


图 7 1-3 支线、1-2 支线和 2-3 支线水准观测值

Fig. 7 Leveling observations of the branch 1-3, branch 1-2, and branch 2-3

## 4 结论

本文利用 SBAS-InSAR 技术对冕宁跨断层场地进行监测研究, 得到该场地 2016 年 1 月至 2017 年 2 月期间沉降监测结果, 监测结果表明:

(1) 整个形变场形变范围沿东北方向约 1.2 km, 沿西南方向约 0.4 km, 沉降中心位于西康温泉井附近, 且沉降速率沿视线方向 (LOS) 最大约为 27 mm/a。整个形变场同步沉降, 在 9 月达到最大沉降量。

(2) 形变场的范围较小, 且未经过断层, 离断层距离较远, 形变范围不受断层控制, 形变范围和断层位置没有明显的相关性。对比 SBAS 技术获得的形变场时间序列曲线与水准监测获得的 1-3 和 1-2 支线沉降曲线, 两组曲线形态类似, 沉降都主要发生在 6—9 月。同时, 西康温泉的抽水活动也发生在 6—9 月之间, 因此, 判断此形变是由于西康温泉井抽水活动引起的。虽然因为小树林的遮挡, 未能获取 1 号水准点的形变时间序列, 但 1 号水准点距离西康温泉仅 215 m, 也可以判断 1 号水准点的形变是由西康温泉的抽水引起的。

(3) 对比 1-2 和 1-3 支线的形变曲线与 SBAS 获得的形变曲线, 2 组曲线形态类似, 但是在沉降量大小上有所差异, 这包含水准点的监测误差、SBAS 监测误差和地面沉降的时空差异。

## 参考文献:

- 陈志谋, 陈金座, 罗楚楚, 等. 2017. 利用小基线集技术 (SBAS) 监测泉州地区地表形变 [J]. 测绘工程, 26 (7): 36-40.
- 季灵运, 刘立炜, 郝明. 2015. 利用 InSAR 技术研究滇西南镇康—永德地区现今地壳形变特征 [J]. 地震研究, 38 (1): 84-89.
- 李宁, 赵强, 李金. 2017. 基于 InSAR 形变观测反演 2015 年皮山  $M_s 6.5$  地震滑动分布 [J]. 地震, 37 (2): 67-76.
- 刘一霖. 2016. 黄河三角洲地面沉降时序 InSAR 技术监测与地下流体开采相关性分析 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (海洋研究所).
- 屈春燕, 单新建, 张国宏, 等. 2014. 时序 InSAR 断层活动性观测研究进展及若干问题探讨 [J]. 地震地质, 36 (3): 731-748.
- 闻学泽. 2000. 四川西部鲜水河—安宁河—则木河断裂带的地震破裂分段特征 [J]. 地震地质, 22 (3): 239-249.
- 严建国, 李双平. 2002. 三峡大坝变形监测设计优化 [J]. 人民长江, 33 (6): 36-38.
- 张磊, 杨帆, 李超飞, 等. 2017. 宁波地面沉降的短基线集监测与分析 [J]. 测绘科学, 42 (12): 77-82.
- Bernardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR in-



terferograms[J]. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11):2375–2383.  
Mora O, Mallrqui J J, Broquetas A. 2003. Linear and nonlinear terrain de-

formation maps from a reduced set of interferometric SAR Images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(10):2243–2253.

## Deformation Detection and Analysis of the Mianning Cross – fault Site , from InSAR Technology

ZHAO Qiang<sup>1</sup>, SU Qin<sup>2</sup>

(1. *The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, Shaanxi, China*)

(2. *Survey Engineering department, Sichuan Earthquake Agency, Ya'an 625000, Sichuan, China*)

### Abstract

The section 1 – 1C of the Mianning cross – fault site began to undergo a sharp drop in June 2016. It is a significant anomaly that occurred in the Sichuan region since the Wenchuan M8.0 earthquake. In response to the anomaly, this paper uses Sentinel – 1 image data to monitor the subsidence of the cross – fault site in Mianning with the SBAS technology. The spatial extent and amplitude of the topographic variations and the time series curves of the deformation in the Mianning cross – fault field are obtained. InSAR deformation field results show that, first, from the perspective of space, the deformation center is located near the well of Xikang Hot Spring. Second, from the time series curve of deformation, it shows that the subsidence time coincides with the Xikang hot spring well activity. Therefore, we believe that the deformation should be caused by the pumping of the Xikang Hot Spring well.

**Keywords:** mianning; cross – fault site; InSAR; land subsidence