

DOI:10.13203/j.whugis20200289



文章编号:1671-8860(2022)11-1896-10

# 联合地震位错模型和 InSAR 数据构建 2017 年九寨沟 Mw 6.5 地震同震三维形变场

彭 颖<sup>1</sup> 许才军<sup>1,2,3</sup> 刘 洋<sup>1,2,3</sup>

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

3 自然资源部地球物理大地测量重点实验室,湖北 武汉,430079

**摘要:**利用哨兵(Sentinel)-1A 卫星升、降轨影像,在地震位错模型约束下获取了 2017 年九寨沟 Mw 6.5 地震的高质量三维形变场。首先,利用合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)提取九寨沟地震升、降轨同震形变场;然后,通过“两步法”反演获取该地震发震断层的几何参数和分布式滑动模型,以此为约束,采用方差分量估计算法联合解算九寨沟地震三维形变场。结果表明,九寨沟地震同震三维形变场以水平位移为主,垂向形变较弱;南北向形变呈拉张趋势,断层上盘向南、下盘向北滑动,最大位移分别为 -19.81 cm 和 14.38 cm;东西向形变不对称性明显,断层上盘西北部向东水平运动,最大位移为 18.37 cm,下盘东南部向西运动,最大位移不足 8 cm。将南北、东西向形变与 6 个全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)台站观测数据进行比较,两者一致性较好且均方根误差较小,分别为 1.44 cm 和 1.77 cm,表明联合升、降轨 InSAR 观测和地震位错模型约束构建同震三维形变场方法具有较高可行性,显著降低了大地测量数据不足、InSAR 观测对南北向形变不敏感等问题的影响。

**关键词:**九寨沟地震;差分干涉测量;位错模型;分布式滑动;三维形变场

中图分类号:P237

文献标志码:A

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)具有全天候、大范围、高空间分辨率、长波长微波穿透性强等优势,被广泛应用于火山、地震、滑坡、城市地面沉降等形变监测。由于雷达侧视成像机制,InSAR 只能获取视线向(line of sight, LOS)形变,无法全面反映真实的地表三维形变信息,需要结合其他技术才能建立地表三维形变场<sup>[1]</sup>。

目前,利用 InSAR 技术构建地表三维形变场的方法主要分为两类:(1)直接解算,主要包括多视线向 InSAR 观测<sup>[2-3]</sup>、InSAR 结合方位向偏移量(azimuth offset, AZO)观测<sup>[4-7]</sup>、InSAR 结合多孔径干涉测量<sup>[8-10]</sup>(multiple aperture InSAR, MAI)和 InSAR 结合全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)数据<sup>[11-13]</sup>等方法;(2)利用 InSAR/GNSS 观测数据结合模型进行三维形变场提取。直接解算法具有较高的可

信度,能够避免因模拟、假设等方法带来的不确定性,但是对于突发性强震引起的地面运动来说,获取充足的 GNSS 数据或搜集多个不同 LOS 成像的 InSAR 观测较为困难;升、降轨 InSAR 观测结合 AZO 观测虽然降低了对数据的要求,但精度较低<sup>[7]</sup>; MAI 技术测量精度严重依赖于 InSAR 相干性,只有在相干性较高的情况下测量结果才较为精确<sup>[8]</sup>。这些问题使得直接解算法在地震三维形变场构建方面受到严重制约,而联合地震位错模型和 InSAR/GNSS 观测,可以降低对观测数据的要求,也能够在遵循地震物理机制的基础上更好地对三维形变结果进行约束,减少观测误差的影响,目前已经 在伊朗 Bam 地震<sup>[14]</sup>、中国西藏阿里地震<sup>[15]</sup>、中国四川汶川地震<sup>[16]</sup>等案例研究中得到成功应用。

北京时间 2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分,四川省九寨沟县发生了 Mw 6.5 地震,震中坐标为

收稿日期:2020-06-15

项目资助:国家自然科学基金(41721003,41874011);国家重点研发计划(2018YFC1503603)。

第一作者:彭颖,硕士,研究方向为 InSAR 高精度三维形变序列测量。pngying@163.com

通讯作者:许才军,博士、教授。cjxu@sgg.whu.edu.cn

( $103.855^{\circ}\text{E}$ ,  $33.193^{\circ}\text{N}$ ), 震源深度  $13.5\text{ km}$ 。此次地震震中位于青藏高原巴颜喀拉次级块体东部与华南块体交界处<sup>[17-18]</sup>(见图 1), 地质结构复杂, 植被茂密, 震中附近无水准路线通过, GNSS 台站分布稀疏, InSAR 观测相干性也较差<sup>[19]</sup>, 使得直接解算地震近场区域的高精度三维形变场非常困难, 不利于后续断层精细运动模式和孕震机制的研究。因此, 本文通过两步法<sup>[20-23]</sup>反演获取该地震发震断层的几何参数和分布式滑动模型, 并以此为约束, 联合 InSAR 升、降轨观测, 提取九寨沟地震高质量三维同震形变场, 进而分析该地震的形变分布特征与运动属性。

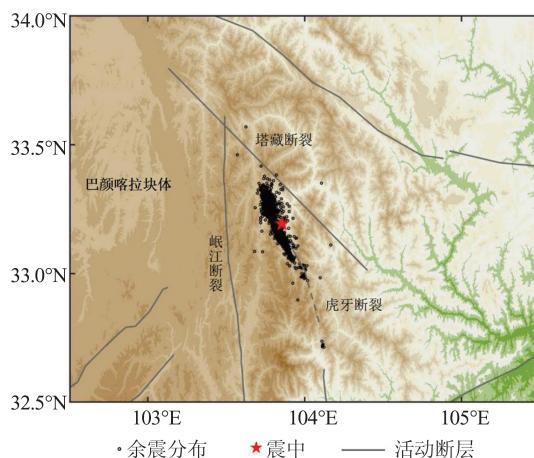


图 1 2017 年九寨沟地震构造背景图

Fig.1 Tectonic Setting of the 2017 Jiuzhaigou Earthquake

## 1 InSAR 数据处理与同震形变场

### 1.1 InSAR 数据处理

本文采用的数据为欧洲空间局(European Space Agency, ESA)免费发布的哨兵(Senti-

nel)-1A 合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像数据, 升轨影像和降轨影像各两景(见表 1)。其中, 升轨影像观测时间为 2017 年 7 月 30 日(震前)和 8 月 11 日(震后), 降轨影像观测时间为 8 月 6 日(震前)和 8 月 18 日(震后), 升、降轨影像构成的干涉对时间基线为 12 d, 垂直基线分别为  $38.36\text{ m}$  和  $-70.64\text{ m}$ 。

表 1 Sentinel-1A 卫星数据基本信息

Tab.1 Details of Sentinel-1A Satellite Images

模式	获取时间		时间基 线/d	垂直基线/ m
	主影像	辅影像		
升轨	2017-07-30	2017-08-11	12	38.36
降轨	2017-08-06	2017-08-18	12	-70.64

InSAR 数据处理基于 GAMMA 软件平台<sup>[24]</sup>, 利用两轨法<sup>[25]</sup>生成九寨沟地震的同震干涉形变场。在数据处理过程中, 采用 ESA 提供的精密轨道数据和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的  $30\text{ m}$  分辨率的航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM)数字高程模型(digital elevation model, DEM)去除地形相位的影响<sup>[26]</sup>; 为提高干涉图的信号质量, 采用自适应滤波方法<sup>[27]</sup>对干涉图进行降噪处理; 相位解缠采用基于 Delaunay 三角网的最小费用流算法<sup>[28-29]</sup>, 并通过二次多项式拟合去除干涉图中的残余轨道相位。差分干涉图中大气垂直分层引起的相位延迟, 通过下载相应的通用型 InSAR 大气校正在线服务(generic atmospheric correction online service for InSAR, GACOS)数据<sup>[30-31]</sup>来进行改正。图 2 为削弱各种误差后的九寨沟地震 InSAR 同震形变场。

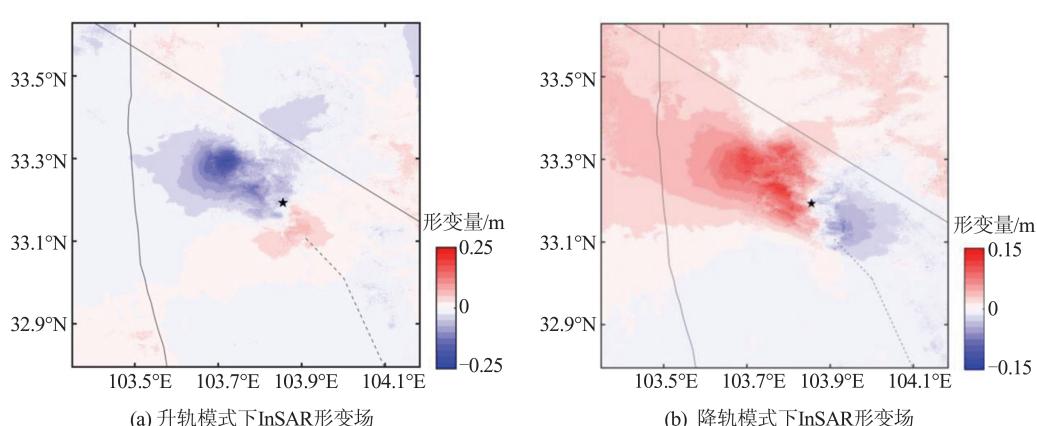


图 2 九寨沟地震 InSAR 同震形变场

Fig.2 The InSAR Coseismic Interferograms of Jiuzhaigou Earthquake

## 1.2 同震形变场

从图2中可以看出,此次九寨沟地震主要形变区位于塔藏断裂、岷江断裂和虎牙断裂交汇处,形变范围约 $60\text{ km}\times 50\text{ km}$ ,成北西向展布。升轨形变图中,震中西北部存在明显的LOS下沉区,最大沉降量为21.86 cm;东南方向存在LOS上升区,最大抬升量为8.83 cm;降轨形变图中上升区和下沉区的位置相反,LOS抬升区在西北方向,最大抬升量为13.53 cm,东南方向最大沉降量为8.47 cm。根据卫星LOS与垂向、正东、正北的投影关系,升、降轨干涉图中相反的形变特征表明九寨沟地震同震形变以水平方向为主,符合走滑型地震的形变特征。

## 2 地震位错模型反演

Okada弹性半空间位错模型<sup>[32-33]</sup>较好地描述了均质半空间或多层半空间介质中剪切和拉张断层引起的断层内部形变和地表位移,在大地测量数据不足的情况下,该模型可作为先验条件约束InSAR观测,重建高质量地表三维形变场。这样可在遵循地震物理机制的同时,降低InSAR失相干区域的影响,使得形变结果更加合理、精确。

本文采用了两步法策略<sup>[20-23]</sup>来进行地震位错模型反演。为提高反演效率,采用数据分辨率约束的四叉树方法<sup>[34]</sup>对九寨沟地震InSAR同震形变场进行降采样,并按照采样点位置计算实际卫星入射角和轨道方位角,得到6 202个观测数据来反演断层参数,其中包括3 767个升轨InSAR观测数据和2 435个降轨InSAR观测数据。

反演过程中,首先建立InSAR观测与断层参数之间的函数关系:

$$\begin{cases} D_{\text{obs}} = G(\mathbf{m}) + \epsilon \\ D_{\text{los}} = D_U \cos \theta + D_N \sin \alpha \sin \theta - D_E \cos \alpha \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中, $D_{\text{obs}}$ 为地表形变观测值,包含垂直向、南北向和东西向3个方向的位移分量( $D_U, D_N, D_E$ ); $G$ 为格林函数; $\mathbf{m}$ 表示断层几何参数和滑动参数; $\epsilon$ 表示误差; $D_{\text{los}}$ 表示InSAR获取的视线向形变; $\alpha$ 表示方位角; $\theta$ 表示入射角。

首先,通过多峰值粒子群算法(multipeak particle swarm optimization, MPSO)<sup>[35]</sup>进行非线性求解得到断层的几何参数,如断层位置、长度、深度、走向、倾向等(见表2)。然后,将断层面沿走向和倾向离散成 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 大小的700个断层片,根据断层片上滑动量与观测值之间的线性关系来反演九寨沟地震断层的分布式滑动模型。

表2 不同机构或研究团队发布的九寨沟地震

### 震源机制解对比

Fig.2 Focal Mechanism Solutions of 2017 Jiuzhaigou Earthquake by Different Researches

来源	矩震级	地震矩/Nm	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
USGS	6.51	$7.23\times 10^{18}$	153	84	-33
GCMT	6.5	$6.98\times 10^{18}$	151	79	8
文献[36]	6.5	$6.61\times 10^{18}$	153	84	-19.5
文献[37]	6.5		153	50	-9
文献[38]	6.5		152	74	8
文献[39]	6.49	$6.635\times 10^{18}$	155	81	-11
本文	6.5	$7.025\times 10^{18}$	153	75	8.3

注:USGS为美国地质勘探局(United States Geological Survey);GCMT为哈佛大学全球矩张量解(global centroid moment tensor)

断层片上滑动量与观测值之间的线性关系为:

$$\begin{bmatrix} G \\ \kappa^2 L \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} D_{\text{los}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\kappa^2$ 为光滑因子; $L$ 为拉普拉斯二阶平滑算子; $S$ 为各断层片上待求的滑动量。

由于之前反演得到的均匀滑动断层模型倾角并非是分布式滑动模型所对应的最优倾角<sup>[40-41]</sup>,需要综合考虑粗糙度和模型拟合残差的方法<sup>[30]</sup>重新搜索最优倾角。

图3为最优滑动分布结果。从图3中可知,同震滑动主要集中在1~15 km的深度范围内,以左旋走滑为主;最大滑动量为1.42 m,位于约6 km的深度位置处,平均滑动角为-8.3°;地震释放的总能量为 $7.025\times 10^{18}$  Nm,相当于矩震级6.5,与USGS、GCMT发布的结果一致。

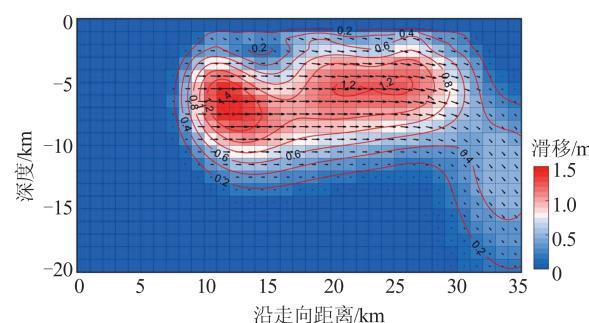


图3 基于InSAR数据反演的同震滑动分布模型

Fig.3 Fault Slip Distribution from Inversions Constrained by InSAR

## 3 三维形变场计算与分析

### 3.1 三维形变场计算方法

本文将反演得到的断层分布式滑动模型重

新正演,得到东西向、南北向和垂向形变,以此作为约束,联合升、降轨 InSAR 观测,提取九寨沟地震同震三维形变场,其计算公式为:

$$\begin{cases} X = (B^T P B)^{-1} B^T P L \\ L = [L_1 \ L_2]^T \\ P = \text{diag}(P_1, P_2) \\ B = \text{diag}(B_1, B_2) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $X$ 为真实地表形变; $L_1, L_2$ 分别为升、降轨 InSAR 观测和断层模型约束; $P_1, P_2$ 为两者相对权阵; $B_1, B_2$ 为两者系数矩阵。在无法确定 In-

$$\begin{cases} \hat{\theta} = S^{-1} W_\theta = [\hat{\sigma}_1^2 \ \hat{\sigma}_2^2]^T \\ W_\theta = [V_1^T P_1 V_1 \ V_2^T P_2 V_2]^T \\ S = \begin{bmatrix} m_1 - 2 \text{tr}(N^{-1} N_1) + \text{tr}(N^{-1} N_1)^2 & \text{tr}(N^{-1} N_1 N^{-1} N_2) \\ \text{tr}(N^{-1} N_1 N^{-1} N_2) & m_2 - 2 \text{tr}(N^{-1} N_2) + \text{tr}(N^{-1} N_2)^2 \end{bmatrix} \\ N = N_1 + N_2 = B_1^T P_1 B_1 + B_2^T P_2 B_2 \end{cases}$$

式中, $m_1, m_2$ 分别为 InSAR 观测矩阵与模型约束矩阵的维度; $N$ 为法方程系数矩阵; $S$ 为对称矩阵; $W$ 为残差平方和矩阵。

3)根据方差分量结果确定新的权阵:

$$\begin{cases} \hat{P}_1 = P_1 \\ \hat{P}_2 = \frac{\hat{\sigma}_1^2}{\hat{\sigma}_2^2 P_2^{-1}} \end{cases} \quad (6)$$

重复步骤 1)、2)更新 WLS 解和残差,直到满足:

$$\hat{\sigma}_1^2 \approx \hat{\sigma}_2^2 \quad (7)$$

得到最终权阵。

### 3.2 三维形变结果

根据§3.1 介绍的三维形变场计算方法,本文得到的九寨沟地震三维形变结果如图 4(g)~4(i) 所示。从三维形变分量结果可知,该地震以水平向形变为主,垂向形变较弱,仅在断层北部存在少量抬升,最大抬升量为 3.15 cm。

南北向形变分量结果(图 4(i))显示,断层两侧有向外拉张的运动趋势,西侧(即上盘)主要表现为向南水平运动,最大形变量为 19.81 cm;东侧(即下盘)则表现为向北水平运动,形变量稍小于上盘,最大形变不足 15 cm。

东西向形变分量结果(图 4(g))表现出不规则的“蝴蝶”形态。其中,断层上、下盘北段均呈现向东运动形变特征,最大东向位移为 18.37 cm;断层下盘南段则表现为向西运动的形变特征,最大位移为 7.84 cm。东西向形变场在断层两侧差异明显,西侧形变量远远大于东侧,根据已有研究,这种不对称性机制产生的原因主要有两种:

SAR 观测和断层模型约束准确方差的情况下,本文采用方差分量估计准则(variance component estimation, VCE)<sup>[42-43]</sup>来求解权阵  $P$ ,具体流程如下:

1)采用单位权计算加权最小二乘(weighted least squares, WLS)初始解  $\hat{X}$  和残差  $V_1, V_2$ :

$$\begin{cases} V_1 = B_1 \hat{X} - L_1 \\ V_2 = B_2 \hat{X} - L_2 \end{cases} \quad (4)$$

2)根据式(4)得到的残差  $V_1, V_2$  计算 InSAR 观测和断层模型约束的单位权方差  $\hat{\sigma}_1^2, \hat{\sigma}_2^2$ :

$$\begin{bmatrix} \text{tr}(N^{-1} N_1 N^{-1} N_2) \\ m_2 - 2 \text{tr}(N^{-1} N_2) + \text{tr}(N^{-1} N_2)^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

(1)分析精定位的余震分布情况<sup>[44-47]</sup>,认为发震断层并非是完全垂直的,断层北部朝西南方向略微倾斜,并且倾角从地表到深部发生了变化,导致断层两侧运动性质产生差异;(2)断层两侧形变特征差异也可能是由于该地震的运动机制并非纯走滑模式,考虑到垂向形变分布情况,推测其可能同时带有一定的正断性质。

为了更直观地反映九寨沟地震的运动模式,分别沿 A-A'、B-B'、C-C'(图 4(g)灰色虚线)绘制三维形变剖面图(图 5)。首先,可以清楚看到 3 条剖面在水平方向显示出一致的位移变化趋势,从远场到近场位移逐渐增大,震中左侧即断层上盘表现出向东、向南的运动趋势,下盘则表现出明显的向北运动趋势,这与左旋走滑的断层运动特征相吻合。其次,断层上盘在 A-A' 剖面图中,东向位移要略大于南向位移,而在 B-B'、C-C' 剖面图中,东向位移逐渐小于南向位移,说明上盘的运动方向发生了变化,由南东方向逐渐过渡到南北方向,进而到南西方向;断层下盘整体为向西、向北的运动趋势,并且北向运动始终占主导。对于垂直方向的位移,在 A-A' 剖面较为明显,下盘存在 0~3 cm 的抬升,结合该断层的滑动分布情况(图 3)进行分析,认为该断层的滑动方式除左旋走滑之外,同时存在一定的正滑分量,这与远震体波反演结果相一致<sup>[38]</sup>。

### 3.3 讨论与分析

InSAR 同震形变场通常受早期余震和震后形变的干扰,进而会影响三维形变场的构建。对于九寨沟地震,根据中国地震台网测定,截至

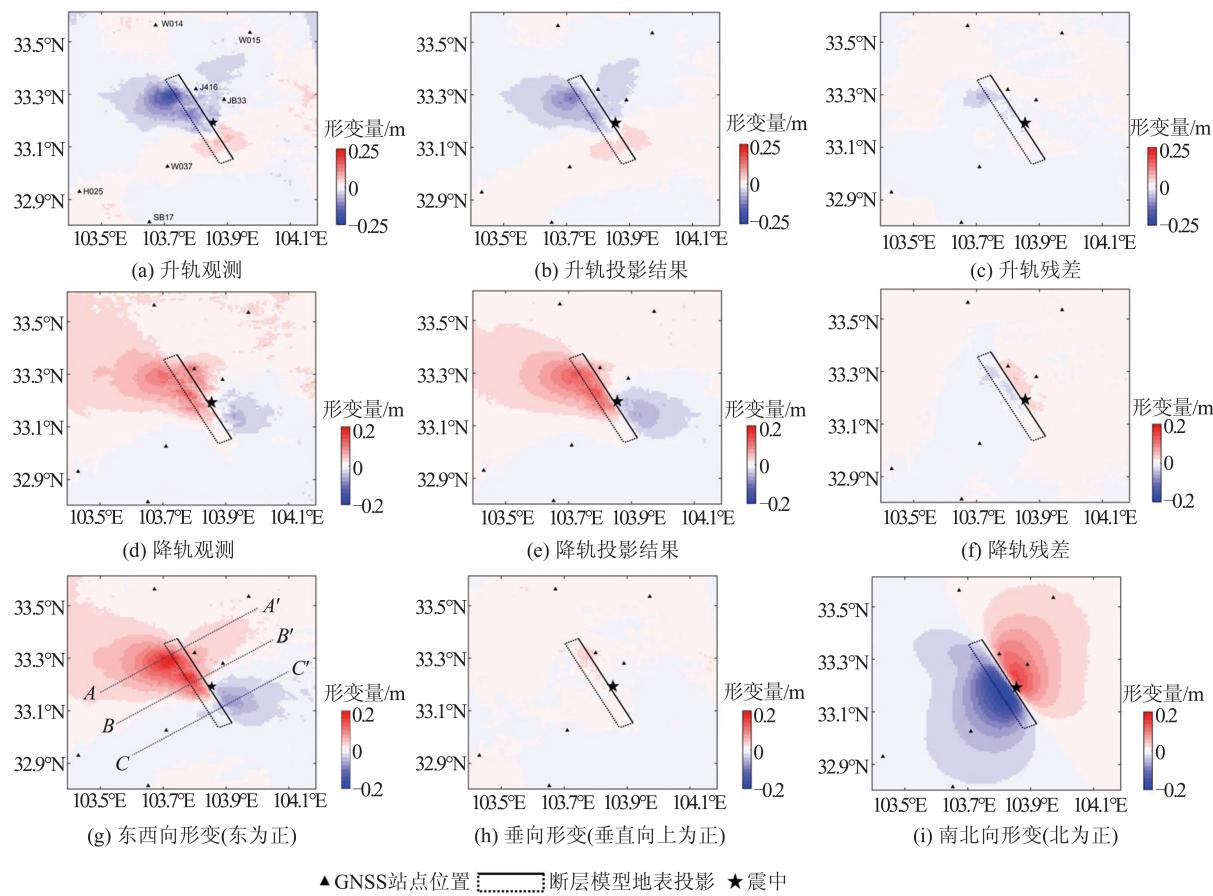


图4 2017年九寨沟地震InSAR观测与三维形变解算结果

Fig.4 InSAR Observations and 3D Displacement Result of 2017 Jiuzhaigou Earthquake

2017年8月10日10时,共发生余震1 741个,震级主要分布于Ms 1.5~3.0范围内,最大余震震级Ms 4.8<sup>[40]</sup>,利用经验公式<sup>[48-49]</sup>计算Ms 4.8余震的平均滑动量,结果为2.2 cm,远小于前面反演得到的主震断层平均滑动量(68 cm)。除此之外,文献[50]通过对九寨沟地震震后8个月哨兵数据的研究分析,没有发现明显的余滑信号,通过反演得到的同震-震后滑动分布模型与同震滑动模型相差不大,震后最大滑动量不足同震最大滑动量的3.5%。因此,本文认为九寨沟地震InSAR同震观测受早期余震和震后形变影响较小,解算的三维形变结果是可靠的。

为了进一步评估九寨沟地震三维形变结果的准确性,本文将其分别投影到升、降轨LOS,计算了与InSAR观测之间的相关度和残差,投影结果与升、降轨观测的相关度分别达到了0.944 5和0.952 3,均方根误差仅0.91 cm和0.78 cm。这表明三维形变结果能较好地恢复InSAR形变场,且精度达到亚厘米级。

除此之外,本文收集了形变区内7个GNSS台站观测数据,具体观测信息见表3。其中,据实

测人员介绍,J416台站所处位置在地震发生后地面出现开裂现象,观测数据可能出现较大误差,所以在后续分析时将其排除。

图6显示了本文解算的南北向、东西向形变与GNSS测量结果的比较,可以看出,两者一致性较好,其均方根误差分别为1.44 cm和1.77 cm,稍大于升、降轨LOS投影的均方根误差,但顾及InSAR和GNSS两种测量方式固有的时空尺度差异和精度差异,本文认为解算的三维形变较为准确,尤其是InSAR观测不敏感的南北向形变也得到良好恢复。

本文同时基于GCMT发布的震源参数(走向、倾角、滑动角、滑动量),利用MPSO算法搜索得到发震断层长宽与位置,建立均匀滑动模型,并在其约束下解算三维形变场,将解算结果与GNSS观测数据相比较,南北向与东西向形变的均方根误差分别为2.10 cm和1.99 cm;根据同样的方法,计算USGS均匀滑动模型约束下的南北向与东西向形变,其与GNSS数据的均方根误差分别为2.80 cm和1.79 cm。利用本文反演所得的震源参数(表2)建立均匀滑动模型,在其约束下

南北向与东西向形变的均方根误差分别为 1.64 cm 和 1.88 cm。

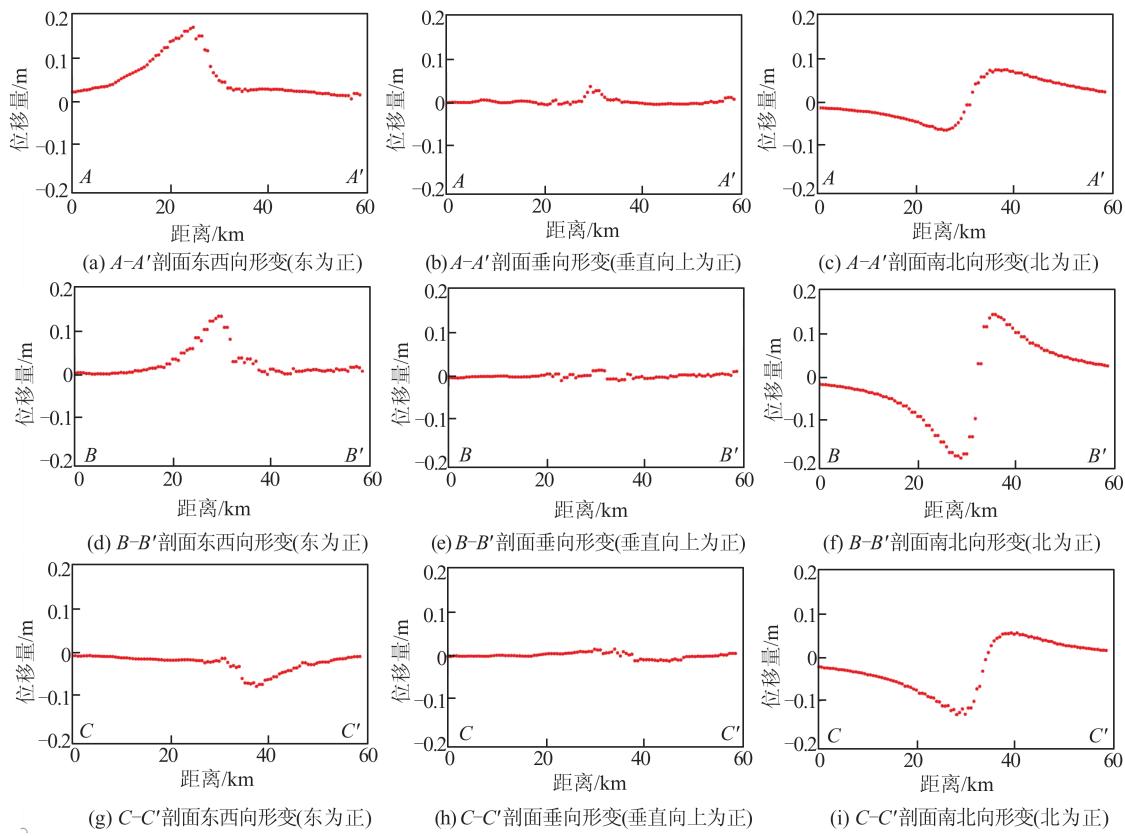


图 5 九寨沟地震三维形变剖面图

Fig.5 3D Displacement Profiles of 2017 Jiuzhaigou Earthquake

表 3 GNSS 观测到的同震位移<sup>[51]</sup>

Tab.3 Coseismic Displacements Observed from GNSS<sup>[51]</sup>

台站名	经度	纬度	东西向 形变/cm	南北向 形变/cm
JB33	103.89°E	33.28°N	3.0	9.0
J416	103.80°E	33.32°N	9.0	22.0
H025	103.43°E	32.93°N	0.5	1.0
W014	103.67°E	33.56°N	-0.9	-0.7
W015	103.97°E	33.53°N	2.2	0.4
W037	103.71°E	33.03°N	-4.1	-6.6
SB17	103.65°E	32.81°N	-2.5	3.0

综上所述,以上 3 种均匀滑动模型对于地震同震形变都具有一定的约束作用,但与 GNSS 观测数据相比,其南北向和东西向均方根误差均大于分布式滑动模型(图 3)约束下的均方根误差,特别是南北向形变,说明基于 InSAR 反演得到的分布式滑动模型对三维形变场的约束效果要优于 GCMT、USGS 等均匀滑动模型。

## 4 结语

本文利用 Sentinel-1A 升、降轨影像提取了

2017 年九寨沟地震的 InSAR 同震形变场,在此基础上,通过两步反演算法获取该地震发震断层的精确几何参数和分布式滑动模型,以此为约束,解算九寨沟地震同震三维形变场。主要得到以下结论:

1) InSAR 同震形变场显示,九寨沟地震形变影响范围约 60 km × 50 km,呈北西向展布;升、降轨模式下,其最大形变量分别为 -21.86 cm 和 13.53 cm,集中在断层西侧,东侧形变最大值分别为 8.83 cm 和 -8.47 cm。

2) 三维形变解算结果显示,九寨沟地震以水

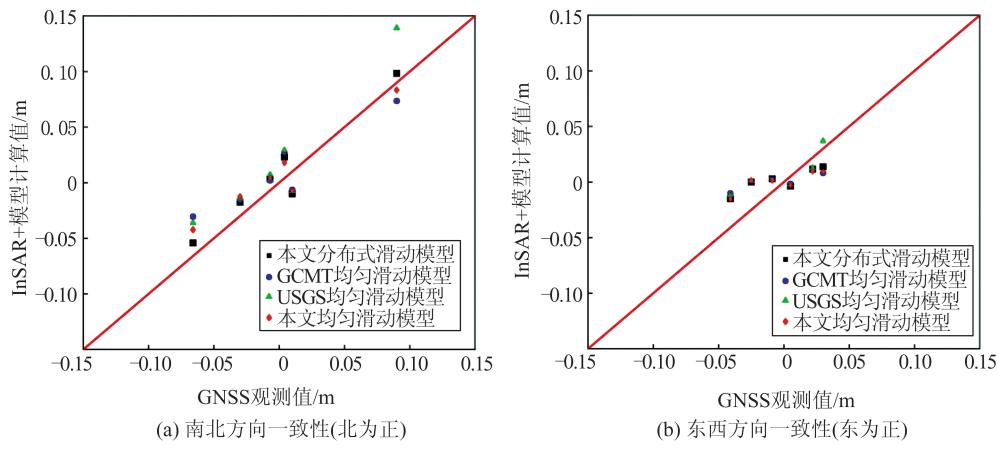


图6 GPS观测与解算结果一致性比较

Fig.6 Comparisons Between GNSS Observation and Displacement Results Based on InSAR and Fault Model

平位移为主,垂向形变较弱。南北向形变存在向外拉张趋势,断层西侧向南、东侧向北滑动,最大位移量分别为19.81 cm和14.38 cm;东西向形变不对称性明显,断层西北部为东向位移,最大位移量为18.37 cm,东南部为西向位移,最大位移量为7.84 cm;垂向形变较弱,主要集中在断层北部,存在0~3 cm左右的抬升。以上形变特征表明九寨沟地震是一次以左旋走滑为主兼少量正断性质的地震事件。

3)为了定量评估三维形变结果准确性,本文计算了其LOS投影与升、降轨InSAR观测的均方根误差,结果均在亚厘米级,这说明三维形变结果能较好地恢复InSAR形变场;同时,将南北、东西向形变结果与收集的GNSS数据进行比较,两者一致性较好,均方根误差分别为1.44 cm、1.77 cm,验证了形变结果的准确性,表明联合地震位错模型约束和InSAR可克服大地测量数据不足问题,较好地重建地震三维形变场,尤其是InSAR观测不敏感的南北向形变也能够得到良好恢复,这为地震形变监测提供了更为广泛的应用前景。

4)计算3种均匀滑动断层模型约束下的南北向与东西向形变,并与GNSS观测数据进行比较,发现其均方根误差均大于分布式滑动模型约束下的均方根误差,说明InSAR反演得到的分布式滑动断层模型对三维形变场的约束效果要优于GCMT、USGS等均匀滑动模型。

致谢:感谢ESA提供Sentinel-1A卫星数据。

## 参 考 文 献

- [1] Hu J, Li Z W, Ding X L, et al. Resolving Three-Dimensional Surface Displacements from InSAR Measurements: A Review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 133:1-17
- [2] Wright T J, Parsons B E, Lu Z. Toward Mapping Surface Deformation in Three Dimensions Using InSAR [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(1):L01607
- [3] Wang Yongzhe, Li Zhiwei, Zhu Jianjun, et al. Co-seismic Three-Dimensional Deformation of L'Aquila Earthquake Derived from Multi-platform DInSAR Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(7):859-863 (王永哲,李志伟,朱建军,等.融合多平台DInSAR数据解算拉奎拉地震三维同震形变场[J].武汉大学学报·信息科学版,2012,37(7):859-863)
- [4] Fialko Y, Simons M, Agnew D. The Complete (3D) Surface Displacement Field in the Epicentral Area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine Earthquake, California, from Space Geodetic Observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(16):3063-3066
- [5] Fialko Y, Sandwell D, Simons M, et al. Three-Dimensional Deformation Caused by the Bam, Iran, Earthquake and the Origin of Shallow Slip Deficit [J]. *Nature*, 2005, 435(7040): 295-299
- [6] Hu J, Li Z W, Ding X L, et al. Two-Dimensional Co-seismic Surface Displacements Field of the Chi-Chi Earthquake Inferred from SAR Image Matching [J]. *Sensors*, 2008, 8(10):6484-6495
- [7] Werner C, Wegmüller U, Strozzi T, et al. Precision Estimation of Local Offsets Between Pairs of SAR SLCs and detected SAR Images[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005
- [8] Bechor N B D, Zebker H A. Measuring Two-Dimensional Movements Using a Single InSAR Pair [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(16): L16311

- [9] Yang Honglei, Peng Junhuan. Mapping Three-Dimensional Co-seismic Deformation by Combining Multiple-Aperture Interferometry and Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar [J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(6): 2580–2586(杨红磊,彭军还. 基于 DInSAR 和 MAI 技术揭示地震三维形变场 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2580–2586)
- [10] Jung H S, Yun S H, Jo M J. An Improvement of Multiple-Aperture SAR Interferometry Performance in the Presence of Complex and Large Line-of-Sight Deformation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(4): 1743–1752
- [11] Gudmundsson S, Sigmundsson F, Carstensen J M. Three-Dimensional Surface Motion Maps Estimated from Combined Interferometric Synthetic Aperture Radar and GPS Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B10): 1–14
- [12] Liu Bin. Method for Monitoring Displacement Field of Earthquake with High-Precision and Constructing 3D Coseismic Maps Using InSAR [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013 (刘斌. InSAR 高精度观测地震形变场及其三维重建技术研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013)
- [13] Cao Haikun, Zhao Lihua, Zhang Qin, et al. Ascending and Descending Orbits InSAR-GPS Data Fusion Method with Additional Systematic Parameters for Three-Dimensional Deformation Field [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(9): 1362–1368 (曹海坤,赵丽华,张勤,等. 利用附加系统误差参数的升降轨 InSAR-GPS 数据融合方法建立三维形变场 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(9): 1362–1368)
- [14] Sun Jianbao, Liang Fang, Xu Xiwei, et al. 3D Co-seismic Deformation Field of the Bam Earthquake (Mw 6.5) from Ascending and Descending Pass ASAR Radar Interferometry [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(4): 59–66 (孙建宝,梁芳,徐锡伟,等. 升降轨道 ASAR 雷达干涉揭示的巴姆地震 (MW6.5)3D 同震形变场 [J]. 遥感学报, 2006, 10(4): 59–66)
- [15] Wen Yangmao, Feng Yiting. Three-Dimensional Deformation Field of Ali Earthquake from InSAR Observations and Earthquake Rupture Model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(9): 1369–1375(温扬茂,冯怡婷. 地震破裂模型约束的中国阿里地震三维形变场 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(9): 1369–1375)
- [16] Song X, Jiang Y, Shan X, et al. Deriving 3D Co-seismic Deformation Field by Combining GPS and InSAR Data Based on the Elastic Dislocation Model [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 57: 104–112
- [17] Gan W, Zhang P, Shen Z K, et al. Present-day Crustal Motion Within the Tibetan Plateau Inferred from GPS Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2007, 112(B8): B08416
- [18] Chen Changyun, Ren Jinwei, Meng Guojie, et al. Analysis of Modern Activity of Major Faults in Northeast Margin of Baryan-Har Block [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(3): 27–30 (陈长云,任金卫,孟国杰,等. 巴颜喀拉块体北东缘主要断裂现今活动性分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(3): 27–30)
- [19] Dong Xiujun, Xu Qiang, She Jinxing, et al. Preliminary Study on Interpretation of Geological Hazards in Jiuzhaigou Based on Multi-source Remote Sensing Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 119–128 (董秀军,许强,余金星,等. 九寨沟核心景区多源遥感数据地质灾害解译初探 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(3): 119–128)
- [20] Feng Wanpeng, Li Zhenhong. A Novel Hybrid PSO/Simplex Algorithm for Determining Earthquake Source Parameters Using InSAR Data [J]. *Progress in Geophys*, 2010, 25(4): 1189–1196 (冯万鹏,李振洪. InSAR 资料约束下震源参数的 PSO 混合算法反演策略 [J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1189–1196)
- [21] Wen Yangmao, He Ping, Xu Caijun, et al. Source Parameters of the 2009 L'Aquila Earthquake, Italy from Envisat and ALOS Satellite SAR Images [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(1): 53–65 (温扬茂,何平,许才军,等. 联合 Envisat 和 ALOS 卫星影像确定 L'Aquila 地震震源机制 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 53–65)
- [22] Wang Zhenjie, Ou Jikun, Liu Lintao. A Method for Solving Ill-Posed Problems: Two Step Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(9): 821–824 (王振杰,欧吉坤,柳林涛. 一种解算病态问题的方法:两步解法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(9): 821–824)
- [23] Wang Leyang, Zhao Xiong, Gao Hua. A Two-Step Solution Method for the Co-seismic Slip Distribution Inversion of Earthquake Fault in Geodesy [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1265–1311 (王乐洋,赵雄,高华).

- 大地测量地震断层同震滑动分布反演的两步解法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(9): 1265–1311)
- [24] Werner C, Wegmüller U, Strozzi T, et al. Gamma SAR Processor and Interferometry Software [C]// The ERS-ENVISAT Symposium, Gothenburg, Sweden, 2000
- [25] Liao Mingsheng, Lin Hui. Synthetic Aperture Radar Interferometry: Principle and Signal Processing [M]. Beijing: Sino Maps Press, 2003(廖明生, 林珲. 雷达干涉测量: 原理与信号处理基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2003)
- [26] Farr M, Rosen A, Caro E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 1(2):361–369
- [27] Goldstein R M, Werner C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21):4035–4038
- [28] Carballo G F, Fieguth P W. Probabilistic Cost Functions for Network Flow Phase Unwrapping [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2192–2201
- [29] Yu Yong. Study on Phase Unwrapping Algorithm based on Network Plan[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2002(于勇. 基于网络规划的干涉雷达相位解缠算法研究[D]. 北京: 中国科学院, 2002)
- [30] Yu C, Li Z H, Penna N T. Interferometric Synthetic Aperture Radar Atmospheric Correction Using a GPS-Based Iterative Tropospheric Decomposition Model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204(1):109–121
- [31] Li Peng, Gao Mengyao, Li Zhenhong, et al. Evaluation of Wide-Swath InSAR Tropospheric Delay Estimation Methods over the Altyn Tagh Fault [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(6): 879–887(李鹏, 高梦瑶, 李振洪, 等. 阿尔金断裂带宽幅 InSAR 对流层延迟估计方法评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(6): 879–887)
- [32] Okada Y. Surface Deformation to Shear and Tensile Faults in a Half-Space [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(4):1135–1154
- [33] Okada Y. Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, 82 (2) : 1018–1040
- [34] Lohman R B, Simons M. Some Thoughts on the Use of InSAR Data to Constrain Models of Surface Deformation: Noise Structure and Data Down Sampling [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(1):359–361
- [35] Feng W P, Li Z H, Elliott J R, et al. The 2011 Mw 6.8 Burma Earthquake: Fault Constraints Provided by Multiple SAR Techniques[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 195(1):650–660
- [36] Zhang Xu, Feng Wanpeng, Xu Lisheng, et al. The Source-Process Inversion and the Intensity Estimation of the 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60 (10) : 4105–4116(张旭, 冯万鹏, 许力生, 等. 2017年九寨沟Ms 7.0级地震震源反演过程与烈度估计[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4105–4116)
- [37] Shan Xinjian, Qu Chunyan, Gong Wenyu, et al. Co-seismic Deformation Field of the Jiuzhaigou Ms 7.0 Earthquake from Sentinel-1A InSAR Data and Fault Slip Inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(12) : 4527–4536(单新建, 屈春燕, 龚文瑜, 等. 2017年8月8日四川九寨沟7.0级地震 InSAR 同震形变场及断层滑动分布反演[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12):4527–4536)
- [38] Xie Zujun, Zheng Yong, Yao Huajian, et al. Preliminary Analysis on the Source Properties and Seismogenic of the 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou Earthquake [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2018, 48(1) : 79–92(谢祖军, 郑勇, 姚华建, 等. 2017年九寨沟Ms7.0地震震源性质及发震构造初步分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(1): 79–92)
- [39] Nie Z, Wang D J, Jia Z, et al. Fault Model of the 2017 Jiuzhaigou Mw 6.5 Earthquake Estimated from Coseismic Deformation Observed Using Global Positioning System and Interferometric Synthetic Aperture Radar Data [J]. *Earth, Planets and Space*, 2018, 70(1):55
- [40] Burgmann R. Deformation During the 12 November 1999 Duzce, Turkey, Earthquake, from GPS and InSAR Data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(1):161–171
- [41] Wen Yangmao, Xu Caijun, Liu Yang, et al. The 2007 Ali Earthquake Inversion from Ascending and Descending InSAR Observations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(6) : 649–654(温扬茂, 许才军, 刘洋, 等. 升降轨 InSAR 数据约束下的 2007 年阿里地震反演分析[J]. 测绘学报, 2015, 44(6):649–654)
- [42] Cui Xizhang. Generalized Surveying Adjustment [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2006(崔希璋. 广义测量平差[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006)
- [43] Hu J, Li Z W, Sun Q, et al. Three-Dimensional Surface Displacements from InSAR and GPS Mea-

- surements with Variance Component Estimation [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4):754–758
- [44] Fang Lihua, Wu Jianping, Su Jinrong, et al. Relocation of Mainshock and Aftershock Sequence of the Ms 7.0 Sichuan Jiuzhaigou Earthquake [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(7): 649–662 (房立华, 吴建平, 苏金蓉, 等. 四川九寨沟 Ms 7.0 地震主震及其余震序列精定位 [J]. 科学通报, 2018, 63(7): 649–662)
- [45] Liang Jianhong, Sun Li, Liu Jie. A High Precision Relocation Study of the Ms 7.0 Jiuzhaigou Earthquake and the Aftershocks Occurred in 2017 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(5): 2152–2162 (梁建宏, 孙丽, 刘杰. 2017 年四川九寨沟 Ms 7.0 地震及余震精定位研究 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(5): 2152–2162)
- [46] Liang Shanshan, Lei Jianshe, Xu Zhiguo, et al. Relocation of Aftershocks of the 2017 Jiuzhaigou, Sichuan, Ms 7.0 Earthquake and Inversion for Focal Mechanism of the Mainshock [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(5): 2163–2175 (梁姗姗, 雷建设, 徐志国, 等. 2017 年四川九寨沟 MS7.0 强震的余震重定位及主震震源机制反演 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(5): 2163–2175)
- [47] Hu Xiaohui, Sheng Shuzhong, Wan Yongge, et al. Fault Plane Parameters of 2017 Jiuzhaigou Ms 7.0 Earthquake Determined by Aftershock Distribution [J]. *Journal of Seismological Research*, 2019, 42(3): 366–371 (胡晓辉, 盛书中, 万永革, 等. 由余震分布确定 2017 年九寨沟 Ms 7.0 地震发震断层面参数 [J]. 地震研究, 2019, 42(3): 366–371)
- [48] Xie Z J, Zheng Y, Liu C L, et al. An Integrated Analysis on Source Parameters, Seismogenic Structure and Seismic Hazard of the 2014 Ms 6.3 Kangding Earthquake, China [J]. *Tectonophysics*, 2017, (712/713): 1–9
- [49] Wells D L, Coppersmith J J. New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(4): 974–1002
- [50] Li Y X, Bürgmann R, Zhao B. Evidence of Fault Immaturity from Shallow Slip Deficit and Lack of Postseismic Deformation of the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou Earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, 110(1): 154–165
- [51] Liu G, Xiong W, Wang Q, et al. Source Characteristics of the 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou, China, Earthquake and Implications for Recent Seismicity in Eastern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124: 4895–4915

## Deriving 3D Coseismic Deformation Field of 2017 Jiuzhaigou Earthquake with Elastic Dislocation Model and InSAR Data

PENG Ying<sup>1</sup> XU Caijun<sup>1,2,3</sup> LIU Yang<sup>1,2,3</sup>

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Key Laboratory of Geophysical Geodesy, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Objectives: The coseismic deformation field of 2017 Jiuzhaigou earthquake has been investigated by previous numerous studies. However, these studies most focus on the one-dimensional(1D) ground motion along the radar line of sight(LOS), thus resulting in anamorphic coseismic displacements. Methods: We construct high-quality three-dimensional(3D) coseismic deformation field using ascending and descending synthetic aperture radar(SAR) data from Sentinel-1A satellite with constraint of the elastic dislocation model to reflect the real movement patterns of 2017 Jiuzhaigou earthquake. Firstly, we use differential interferometry method to generate LOS coseismic deformation field with SAR images. Then, a two-step inversion algorithm is used to subdivide the fault plane, and obtain the geometric parameters and the optimal fault slip distribution. With constraint of this fault model, we take the variance component estimation approach to reconstruct 3D coseismic deformation field based on interferometric synthetic aperture radar(InSAR) measurements. Results: 3D coseismic deformation results show that the coseismic deformation field is dominated by

(下转第 1937 页)