

王乐洋, 高华, 冯光财. 2017. 2016 年台湾美浓 M_w 6.4 地震震源参数的 InSAR 和 GPS 反演. 地球物理学报, 60(7):2578-2588, doi:10.6038/cjg20170707.

Wang L Y, Gao H, Feng G C. 2017. InSAR and GPS inversion for source parameters of the 2016 M_w 6.4 Meinong, Taiwan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 60(7):2578-2588, doi:10.6038/cjg20170707.

2016 年台湾美浓 M_w 6.4 地震震源参数的 InSAR 和 GPS 反演

王乐洋^{1,3,4}, 高华^{1,3}, 冯光财²

1 东华理工大学测绘工程学院, 南昌 330013

2 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

3 流域生态与地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室, 南昌 330013

4 江西省数字国土重点实验室, 南昌 330013

摘要 2016 年 2 月 6 日台湾西南部高雄市美浓区发生了 M_w 6.4 地震. 本文结合 ALOS2 卫星升降轨、Sentinel-1A 升轨 SAR 数据, 采用两轨差分干涉技术获取了该区域的同震形变场, 形变结果表明震中西北部以抬升为主, 最大视线向形变量约为 11.2 cm. 基于均匀位错模型和多峰值粒子群(MPSO)算法, 利用 InSAR 和 GPS 形变数据联合反演了美浓地震的断层几何参数, 结果表明震源中心位于 $22.920^\circ\text{N}, 120.420^\circ\text{E}$, 深度约 12 km, 发震断层长度约 15 km, 走向角 307° , 倾角 16.5° , 平均滑动角为 51.5° , 此次地震是以逆冲倾滑兼左旋走滑的破裂模式. 利用格网迭代搜索法得到最优倾角为 15.7° , GPS 和 InSAR 最优权比为 18:1, 最优平滑因子为 0.06. 基于非均匀位错模型, 利用非负最小二乘方法进行线性反演, 结果显示最大倾滑和走滑量分别为 51.7 cm 和 55.3 cm, 对应矩震级为 M_w 6.38, 略小于 GCMT(M_w 6.4)的结果. 通过与已有文献的比较和对该区域断层构造的分析, 发现美浓地震的发震断层为单一断层的解释更为合理, 我们推测发震断层是位于左镇、后甲里等断层之间的一条东南-西北走向往东北倾斜的盲断层, 并初步推测 2010 年 M_w 6.3 甲仙地震也同该断层有关.

关键词 美浓地震; 震源参数反演; InSAR; 同震形变场; PSO

doi:10.6038/cjg20170707

中图分类号 P223, P315

收稿日期 2016-07-20, 2017-03-13 收修定稿

InSAR and GPS inversion for source parameters of the 2016 M_w 6.4 Meinong, Taiwan earthquake

WANG Le-Yang^{1,3,4}, GAO Hua^{1,3}, FENG Guang-Cai²

1 Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2 School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

3 Key Laboratory of Watershed Ecology and Geographical Environment Monitoring, NASG, Nanchang 330013, China

4 Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, Nanchang 330013, China

Abstract On February 6, 2016, an M_w 6.4 earthquake struck the Meinong district of Kaohsiung city in Taiwan, China. Many studies have been conducted on this event, most of which are based on seismic Data, while no consensus has been reached on its fault structure and focal parameters

基金项目 国家自然科学基金(41664001, 41204003, 41574005), 江西省杰出青年人才资助计划项目(20162BCB23050), 国家重点研发计划(2016YFB0501405), 江西省教育厅科技项目(GJJ150595), 江西省数字国土重点实验室开放研究基金资助项目(DLLJ201705)和江西省研究生创新专项资金项目(YC2016-S281)联合资助.

第一作者简介 王乐洋, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为大地测量反演及大地测量数据处理. E-mail: wleyang@163.com.

yet. Surface displacement obtained by InSAR technology is widely used in earthquake studies because of its high resolution and accuracy with large and continuous coverage. This study used InSAR and GPS data to investigate the focal mechanism and slip distribution of the 2016 Meinong earthquake.

Using the dual-track differential interferometric SAR (D-InSAR) technology, we extracted the coseismic deformation field of this earthquake from synthetic aperture radar (SAR) data (both the ascending and descending) acquired by satellite ALOS2 and the ascending data by satellite Sentinel-1A. The results show that the maximum deformation occurred in the west of the epicenter with an uplift around 11.2 cm.

The uniform dislocation model and multiple peak particle swarm optimization (MPSO) algorithm were employed to determine the fault geometry of this earthquake based on the InSAR and GPS data. The results show that the rupture is a reverse fault with sinistral strike-slip with the average slip angle of 51.5° . The deformation center is at 22.920°N , 120.420°E with a depth of 12 km. The rupture plane is about 15 km long with a strike of 307° and a dip angle of 16.5° . The optimal dip angle (15.7°), weighting ratio (18:1) between GPS and InSAR and the smoothing factor (0.06) obtained by the grid iteration method based on a non-uniform dislocation model, and the non negative least squares method are used to determine the detailed slip distribution. The results show that the maximum value of dip slip and strike slip are 51.7 and 55.3 cm, respectively. The moment magnitude of the non-uniform rupture model is $M_w6.38$, slightly smaller than that of GCMT ($M_w6.4$).

The comparison between our research and previous work and the analysis of the regional faults indicate that a single fault geometry is more reasonable which can fit both the GPS and InSAR data well. We also find that the ruptured fault is a blind structure located between the Zouchen and Chishan faults with an SE-NW strike, dipping toward to SE. We infer this fault should be also related with the 2010 $M_w6.3$ Jiashian earthquake.

Keywords Meinong Taiwan earthquake; Inversion for seismic source parameters; InSAR; Coseismic deformation field; PSO

1 引言

2016 年 2 月 6 日 3 时 57 分(北京时间)我国台湾省高雄市美浓区发生了 $M_w6.4$ (Global Centroid Moment Tensor, GCMT)地震(下称美浓地震),这次地震给台湾南部地区带来了巨大的人员伤亡及财产损失. GCMT 发布的震源机制表明该地震震中位于屏东县政府北偏东约 27 km 处(高雄市美浓区),中心坐标(22.94°N , 120.43°E),震源深度约为 17.3 km,属于浅层地震. 台湾现今的构造格局是欧亚板块与菲律宾海板块斜碰撞的结果(Huang et al., 2013). 2 月 6 日发生的美浓地震震区位于台湾造山带的褶皱逆冲带最南端,此处是该逆冲带最年轻的部分. 该区域的构造以一系列近平行的南北走向的逆冲断层与相关的褶皱为主,主要成因为欧亚板块与菲律宾海板块的斜向聚合自北向南发展,目前构造活动仍

十分活跃(台湾地震科学中心, http://tec.earth.sinica.edu.tw/new_web/index.php).

有学者推断此次地震是在较低的地壳断层产生的板内地震,由欧亚板块俯冲脱水而来的上升流体所触发(Toyokuni et al., 2016). 受场地效应及沙土液化的影响,虽然震中靠近高雄但台南地区受灾更为严重(Lee et al., 2016; 李兆焱和袁晓铭, 2016). Lee 等(2016)利用地震波及 GPS(Global Positioning System)数据进行联合反演,认为此次地震断层为东南-西北走向. 断层破裂主要分为两部分,东北部破裂较大且深度较深,西南部破裂范围和滑动量均较小且深度较浅. 此次地震未发现出露地表的破裂,因此有学者认为此次地震有可能为位于左镇、后甲里等断层之间的一条东西走向向北倾斜的盲断层(20160206 地震地质调查报告, http://fault.moeacgs.gov.tw/TaiwanFaults_2009/PageContent.aspx?type=C&id=250&149). Huang 等(2016)利用地震波、GPS

以及 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 数据进行了联合反演, 采用了主断层触发浅层断层的多断层模型来解释此次地震, 但该模型并不能很好的拟合 InSAR 观测数据, 存在较大残差. 现有对美浓地震的研究多以地震波相关数据主导, 利用大地测量数据尤其是以 InSAR 数据进行的研究较少且并不深入, 并且关于引起此次地震的断层构造和震源参数仍然存在分歧, 值得进一步研究. 另外, 2010 年在震中东南部约 21 km 处发生了 $M_w 6.3$ 甲仙地震, 2008 年在震中东部约 15 km 处发生 $M_w 5.1$ 地震, 因此系统研究近年来发生在该区域的几次大中型破坏性地震之间的触发机制, 并深化对该地区的地质构造理解和认识都具有重要的意义.

地表形变是地震发生最直接的表现现象, 是研究地震破坏程度、震源机制及断层构造等的重要资料. 近年来雷达差分干涉测量技术 (Differential InSAR, D-InSAR) 被广泛地应用于地震的研究 (刘智等, 2002; Feng et al., 2016). 相对于传统大地测量方法而言, D-InSAR 技术在监测地表形变方面具有全天候、全天时、无需地面控制的特点, 且其监测精度可以达到厘米甚至毫米级 (许才军等, 2015; Ding et al., 2016). 同时, 由于 D-InSAR 技术获取的地表形变信息范围大、连续性好, 从而使断层几何参数反演和滑动分布反演的结果更全面、细致和可靠. 震源参数反演通常分为两步: 首先利用震区的形变数据进行震源位错模型非线性反演得到初步的断层几何参数; 然后利用形变数据及上一步得到的断层几何参数进行精细滑动分布反演. 本文使用改进的 MPSO 算法 (冯万鹏和李振洪, 2010) 来非线性反演断层几何参数. 相对于常用的遗传算法、模拟退火算法以及传统 PSO 等优化算法, MPSO 具有所需控制参数少、全局收敛效率高、解稳定可靠等优点 (冯万鹏和李振洪, 2010).

本文结合 InSAR 数据和 GPS 连续站数据获取美浓地震的同震形变场; 采用改进的 MPSO 算法, 基于均匀位错模型反演出断层几何参数; 利用格网迭代搜索法确定较优倾角和最优权值, 基于非均匀位错模型获取断层滑动分布; 通过对比 GPS 与 InSAR 观测值和模拟结果, 对主要残差的产生原因进行分析; 最后结合已有文献和地质资料, 讨论了导致美浓地震的断层结构特征, 并分析了 2010 年甲仙地震和 2016 年美浓地震的震源机制和两者之间的关联.

2 InSAR 和 GPS 形变数据获取和分析

2.1 InSAR 和 GPS 数据

Sentinel-1A 卫星是欧洲航空局和欧洲委员会于 2014 年 4 月 3 日发射升空的全天时、全天候雷达成像系统, 其轨道位于近极地太阳同步轨道, 单颗卫星重访周期为 12d (双星为 6d), 具有大范围、多模式监测等特点 (杨魁等, 2015). ALOS2 卫星是日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 为了接替上一代 ALOS 卫星于 2015 年 5 月 24 日发射升空的陆地观测卫星. 本文分别获取了 Sentinel-1A 与 ALOS2 卫星此次地震前后的升、降轨数据. 但是由于 Sentinel-1A 卫星降轨数据失相比较严重, 所以只选择了 ALOS2 卫星升、降轨及 Sentinel-1A 卫星升轨数据进行处理 (见表 1), 影像均较好地覆盖了震中区域 (见图 1).

表 1 影像信息

Table 1 Data of satellite images

卫星	主影像	从影像	模式	垂直基线(m)
ALOS2	20151126	20160218	升轨	198
ALOS2	20151113	20160219	降轨	78
S1A	20160202	20160214	升轨	-24

“台湾中央学术研究院地球科学协会”管辖的超过 390 个连续 GPS 站记录到了此次地震形变. 我们使用了 Huang 等 (2016) 采用的美浓地震前后四小时靠近地震区域的 75 个 GPS 连续站的形变数据, 进行同震形变分析和震源参数反演. GPS 台站分布如图 1 中黄色三角所示, GPS 获得的形变场如图 2a 和 2b 所示.

2.2 D-InSAR 数据处理及同震形变分析

本文利用两轨 D-InSAR 技术获取该次地震地表形变, 通过影像配准、重采样、基线估计等基本步骤生成干涉图; 选用 90 m 分辨率的 SRTM DEM 数据去除地形相位, 获得差分干涉图. 然后进行滤波处理、相位解缠及地理编码等步骤, 得到最终的同震形变场 (如图 2 所示).

从图 2a 和 b 中 GPS 观测值的白色箭头可以看出, 此次地震引起了台湾西南部显著的西南向位移, 并且自南向北逐渐趋于向正西方向运动. 震源西南、东北区域均出现了较为显著的水平位移. GPS 台站观测到的最大水平位移量为 3.9 cm, 位于震源西部的 GS30 台站. 震中西部区域垂直方向位移以抬升

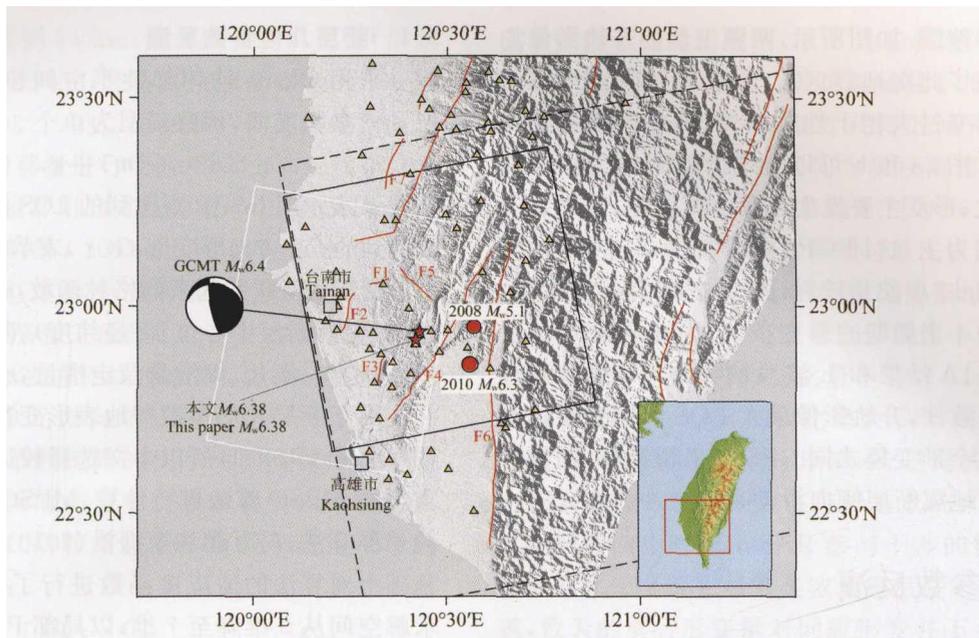


图 1 研究区域范围图

图中黑色实线框和白色实线框分别为 ALOS2 升、降轨影像覆盖范围;黑色虚线框为 Sentinel-1A 升轨影像覆盖范围;红色五角星为震源所在位置;红色圆点为附近区域的历史地震;灰色方形为附近城市;黄色三角形为 GPS 连续站位置;F1:新化断层;F2:后甲里断层;F3:小冈山断层;F4:旗山断层;F5:左镇断层;F6:潮州断层;F7:六甲断层.

Fig. 1 Map showing study area and relevant data

Black and white rectangles outline the coverage of ascending and descending images of ALOS2, respectively. Black dotted rectangle shows the coverage of ascending image of Sentinel-1A. Red star is the epicenter. Red dots are historical earthquakes. Gray rectangles are cities. Yellow triangles are GPS stations of continuous observation. F1: Hsinhua fault; F2: Houjiali fault; F3: Xiaogangshan fault; F4: Chishan fault; F5: Zouchen fault; F6: Chaozhou fault; F7: Liuchia fault.

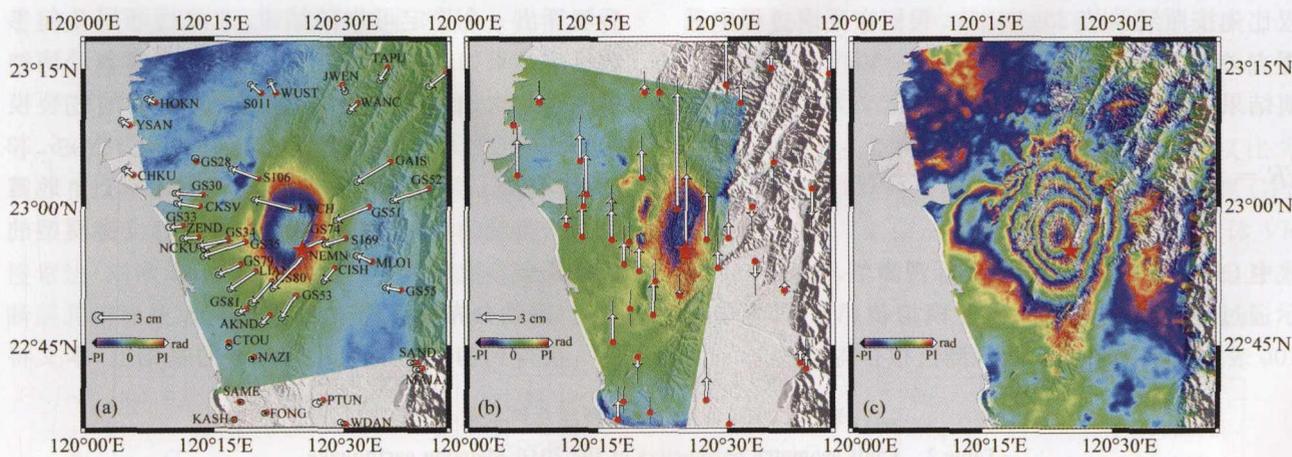


图 2 美浓地震差分干涉图与 GPS 形变观测值

(a)(b)(c)中彩色底图分别为 ALOS2 卫星升轨、降轨及 Sentinel-1A 升轨形变干涉相位;红色五角星为震源位置; (a)和(b)中白色箭头分别为 GPS 水平形变观测值和垂直形变观测值;(a)(b)中红色圆点为 GPS 台站位置.

Fig. 2 Differential interferograms and GPS deformation measurements of the Meinong earthquake

Colored background maps in (a), (b) and (c) are the differential interferograms of ascending ALOS2, descending ALOS2 and ascending Sentinel-1A, respectively. Red star indicates the epicenter. White arrows in (a) and (b) are horizontal and vertical displacements from GPS, respectively. Red dots in (a) and (b) are GPS stations.

为主,最大抬升量为 10.5 cm,由震源北部的 LACH 台站观测得到,震源东部的 GS51、GS52 台站有轻微的沉降出现.根据图 2 中 GPS 的形变形式,可以

初步推测此次地震断层倾向滑动以逆冲为主.

图 2a、b 和 c 中的干涉条纹底图分别为利用 ALOS2 升轨、降轨及 Sentinel-1A 升轨数据得到的

同震差分干涉图. 如图所示, 两颗卫星的升轨影像均较好地覆盖了此次地震区域. 干涉条纹除震中部分区域由于形变过大相干性较差外, 其他区域条纹均清晰、完整. 图 2a 和 b 可以清楚的看到约 1 个周期的形变条纹; 形变主要发生在震中西北侧, 以靠近卫星方向运动为主, 这同 GPS 的形变特征非常吻合. 由于 Sentinel-1A 波长较短, 图 2c 的条纹更加密集, 可以看到约 4 个周期的形变条纹. 因此升轨 C 波段的 Sentinel-1A 结果和 L 波段的 ALOS2 结果表现出较好的一致性, 升轨影像最大 LOS 向形变量约为 11.2 cm. 这个形变模式同 GPS 结果相符合, 同样可以推断出该地震断层倾向滑动是以逆冲为主.

3 震源参数反演

为提高反演效率, 本文采用四叉树法对 InSAR 形变数据进行降采样. 四叉树降采样是以窗口梯度为阈值, 能够较好地保留形变信息并大大减少数据量, 提高运算效率(Feng et al., 2015a). 在本实验中, 该算法将 10^6 量级的数据量降为 10^3 量级(0.1%), 最终得到 3733 个采样点, 其中 ALOS2 卫星升轨 1116 个、降轨 1076 个, Sentinel-1A 卫星升轨 1541 个. 参与计算的 GPS 连续站点共 75 个, GPS 与 InSAR 的权比先按照经验值 20:1 选取. 我们在反演过程中采用方差缩减(Variance Reduction, VR)值来评价反演结果(Huang et al., 2013), 其定义为:

$$VR = \left[1 - \frac{\sum_i (\text{Observation}_i - \text{Prediction}_i)^2}{\sum_i \text{Prediction}_i^2} \right] \times 100, \quad (1)$$

式中 Observation_i 表示形变实际观测值, Prediction_i 表示通过反演模型得到的形变模拟值, VR 值越接近 100 表示反演结果与实际观测值拟合得越好.

3.1 断层几何参数反演

采用 Okada 均匀弹性半空间位错模型进行断层几何参数反演, 函数模型为:

$$d = G(m) + \varepsilon, \quad (2)$$

式中 d 表示用 InSAR 观测到的 LOS 向形变量及 GPS 观测到的三个方向形变量, $G(\cdot)$ 表示将断层几何参数与形变观测值联系起来的格林函数, m 表示断层几何参数, 包括断层中心位置(经纬度)、断层长度、宽度、深度、走向、倾角、倾滑量及走滑量, ε 为观测误差.

由于断层几何参数与地表形变是高度非线性关系(Okada, 1985), 所以本文选择较适宜非线性问题求解的 MPSO 算法进行计算. MPSO 是一种改进的粒子群算法, 冯万鹏和李振洪(2010)在 PSO 算法的基础上对算法的适应度函数进行了改进, 将非线性求解空间从 9 维降至 7 维, 以局部 PSO 算法代替全局版 PSO 算法, 并以局部 PSO 得到的多个局部最优解为基础, 引入单纯形法进一步搜索得到全局最优解. 经过改进后, MPSO 在一定程度上修正了断层几何参数反演过程中早期收敛的问题, 具有较高的收敛率(冯万鹏和李振洪, 2010). 本文在利用 MPSO 算法进行断层几何参数反演时, 首先选用较大的范围和较多粒子数进行大范围全局搜索. 在确定参数大致范围后缩小搜索范围进行多次求解, 最后解算出一个稳定可靠的结果. 非线性断层几何参数反演结果如表 3 所示. 初步断层几何参数反演结果表明此次地震是逆冲倾滑兼左旋走滑的破裂模式. 地震矩为 $3.475 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$, 矩震级为 $M_w 6.33$ (剪切模量 μ 为 3.3×10^{10}), 略小于 GCMT 由地震波数据得到的结果($M_w 6.4$). 基于均匀位错模型的断层几何参数反演得到的 VR 值为 68.8.

3.2 滑动分布反演

在得到初步的断层几何参数的基础上, 本文将

表 2 2016 年美浓地震断层几何参数

Table 2 Fault geometry parameters of the 2016 Meinong earthquake

	东经/(°)	北纬/(°)	长度/km	深度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	M_w
均匀滑动	120.42	22.92	15	12	307	16.5	51.5	6.33
GCMT	120.43	22.94	/	17.3	279	22	21	6.40
USGS	120.60	22.94	/	25.5	299	25	38	6.40
*CEA	120.54	22.94	/	15	299	25	/	/
**Huang 等	/	/	/	15~20 5~10	299/8	15/30	45/85	6.39/ 5.79
**Lee 等	/	/	/	15	281	24		6.52

注: * 中国地震局地球物理研究所; ** Huang 等和 Lee 等的参数为非均匀位错模型反演结果, 其他为均匀位错模型反演结果.

断层面长度扩展到 34 km(沿走向长度),宽度(沿倾向长度)扩展到 38 km,并将其按照 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的矩形划分为 1292 个单元.采用非均匀弹性半空间位错模型对断层滑移量进行反演.滑动分布反演是一个线性求解问题,较常用的方法为最小二乘法(Funning et al., 2005; 周辉等, 2013; 温扬茂等, 2014),也有学者尝试采用总体最小二乘法(王乐洋, 2011; 刘洋, 2012; 李海燕和王乐洋, 2015).本文采用非负约束最小二乘方法进行线性求解,其目的在于避免出现少量滑动单元方向矛盾的问题(Feng et al., 2015b).为避免系数矩阵的秩亏性同时保证各单元块之间的平滑度,滑动分布反演需要引入平滑约束条件.本文采用二阶拉普拉斯平滑算子进行平滑约束,函数模型为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{ss} & \mathbf{G}_{ds} \\ \lambda \mathbf{H}_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \lambda \mathbf{H}_{ds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{ss} \\ \mathbf{m}_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{m}_{ss} \geq 0 \quad \mathbf{m}_{ds} \geq 0. \end{cases} \quad (3)$$

式中 \mathbf{G}_{ss} 、 \mathbf{G}_{ds} 分别表示走滑量 \mathbf{m}_{ss} 和倾滑量 \mathbf{m}_{ds} 的格林函数矩阵, \mathbf{H}_{ss} 和 \mathbf{H}_{ds} 分别为对应的拉普拉斯平滑约束矩阵. λ 是平滑因子,用于平衡观测数据与平滑约束条件之间的权比关系. λ 值越小,断层面单元间的位错平滑性越弱,具有较强的突变性; λ 值越大,断层面单元间的位错平滑性越强,初始 λ 值按经验选取为 0.1.

已有文献证明(Bürgmann et al., 2002; 刘洋等, 2015)在均匀位错假设下得到的断层倾角在滑动分布反演中有可能并非最优,因此有必要在滑动分布反演中重新确定更精确的倾角.本文采用格网搜索法(刘洋等, 2015)进行倾角的确定.初步获取断层几何参数后,选取倾角范围 $10^\circ \sim 20^\circ$,在保证其

他参数值不变的情况下,以 1° 为步长逐步搜索得到初步的较优倾角,然后以此为基础减小步长、缩小搜索范围、提高搜索精度,最终获得的倾角为 15.7° .这个结果略小于由断层几何参数反演得到的倾角.此时 GPS 和 InSAR 的 VR 值分别为 66.0 和 70.5,如图 3a 所示.以该倾角为基础对最优权比和平滑因子进行搜索, GPS 与 InSAR 权比搜索结果如图 3b 和 c 所示.从图 3b 中可以看出平滑因子对于 VR 值的影响并不明显,总体变化量不超过 1;而图 3c 中,随着 GPS 与 InSAR 的权比增大 GPS 的 VR 值逐渐增加, InSAR 的 VR 值逐渐减小.这是由于 GPS 和 InSAR 数据获取时间存在差异造成的(GPS 为地震发生前后四小时而 InSAR 参与干涉的影像间隔为地震后 8~13 天).虽然美浓地震后并未出现较大余震,数天的震后形变量对同震形变并不会太大影响,但两类数据的形变值由于获取时间的原因仍存在一定差异并不能完全一致.在搜索出两者权比对应的 VR 值变化曲线后(图 3c),我们发现 GPS 的 VR 值在权比较小时变化较剧烈,而曲线后部变化平缓,横坐标值 18~40 这一段 GPS 的 VR 增加值不超过 2,而 InSAR 的 VR 值约下降了 7.考虑到既要顾及 GPS 数据能够提供更高精度的形变信息的优点,又要顾及 InSAR 数据能够提供更多观测量更能反映大范围形变的整体特点,我们最终选择了当 GPS 的 VR 值不再显著增加时 InSAR 的 VR 值能够取得的最大值所对应的权比(Huang et al., 2013),既图中绿色标记所表示的点,最优权比为 18:1.同理,获得最优的平滑因子为 0.06.最终 GPS 和 InSAR 的 VR 值分别为 65.6 和 74.8.整体 VR 值为 74.6.通过格网搜索得到最优倾角、权比及平滑因子后,反演得到的滑动分布模型如图 4 所示.

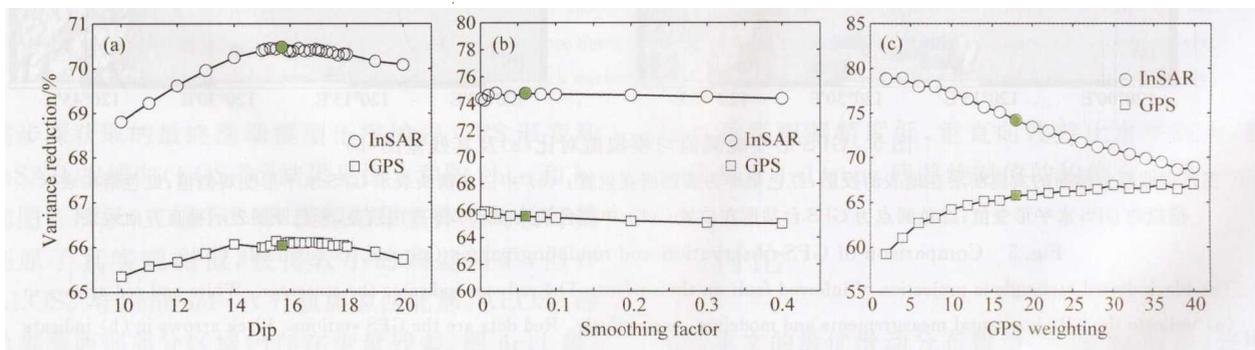


图 3 确定最优倾角(a)、权比(b)及平滑因子(c)

图(a)(b)(c)中绿色标记表示最优倾角、GPS 与 InSAR 最优权比及最优平滑因子.

Fig. 3 Optimal dip (a) and weighting ratio (b) from GPS and InSAR and the smoothing factor (c) marked by green squares and circles

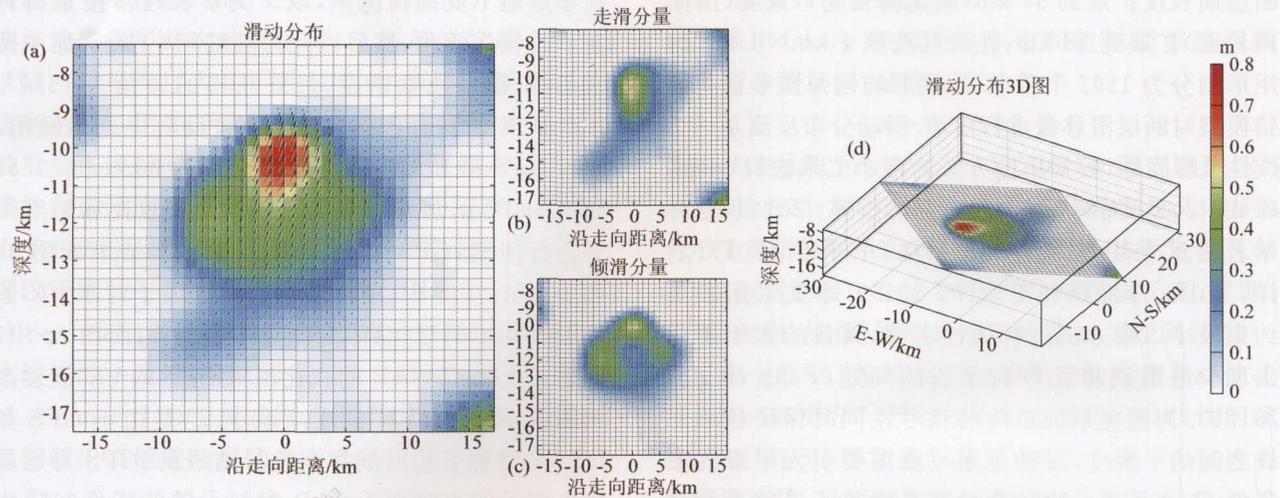


图4 美浓地震断层精细滑动分布模型

(a) 断层滑动分布 2 维示意图; (b) 断层滑动走滑分量; (c) 断层滑动倾滑分量; (d) 断层滑动分布 3 维示意图.

Fig. 4 Fault slip distribution model of the Meinong earthquake

(a) Fault slip distribution in a two-dimensional sketch. (b) Strike slip component; (c) Dip slip component; (d) Fault slip distribution in a three-dimensional sketch.

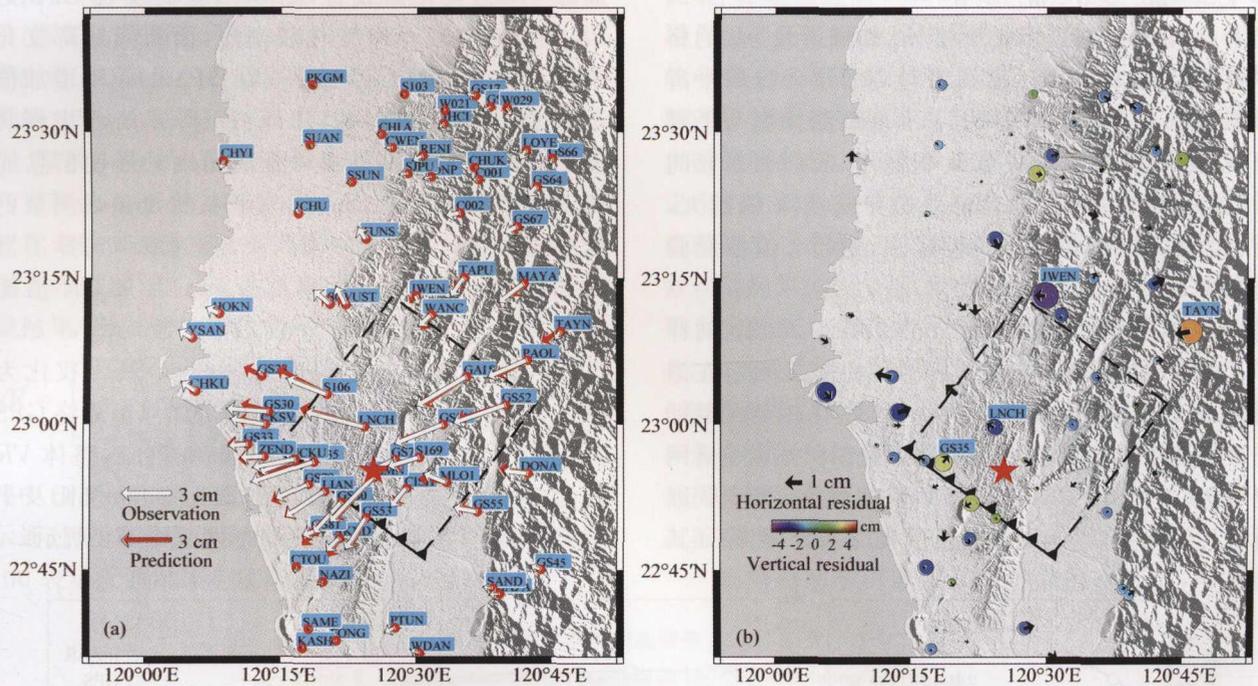


图5 GPS形变观测值与模拟值对比(a)及其残差图(b)

黑色虚线框为推断的发震断层在地表的投影;红色星形为震源所在位置; (a) 中白色箭头表示 GPS 水平形变观测值;红色箭头表示模拟的 GPS 水平形变值;红色圆点为 GPS 台站所在位置; (b) 中黑色箭头表示水平方向残差,彩色圆圈表示垂直方向残差.

Fig. 5 Comparison of GPS observation and modeling values (a) and its residuals (b)

The black dotted rectangle is projection of inferred fault on the surface. The red star indicates the epicenter. White and red arrows in (a) indicate the GPS horizontal measurements and modeling, respectively. Red dots are the GPS stations. Black arrows in (b) indicate horizontal residuals. Colored circles in (b) indicate vertical residuals.

断层滑动分布结果显示,此次地震以倾滑为主,最大倾滑和走滑量分别为 51.7 cm 和 55.3 cm,且均位于地下约 10.5 km 处,主要滑动集中于地下

9~14 km 之间,没有延伸至地表,这与此次地震未发现明显地表破裂相吻合.最终得到的地震矩为 $4.116 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$,对应矩震级为 $M_w 6.38$.利用上

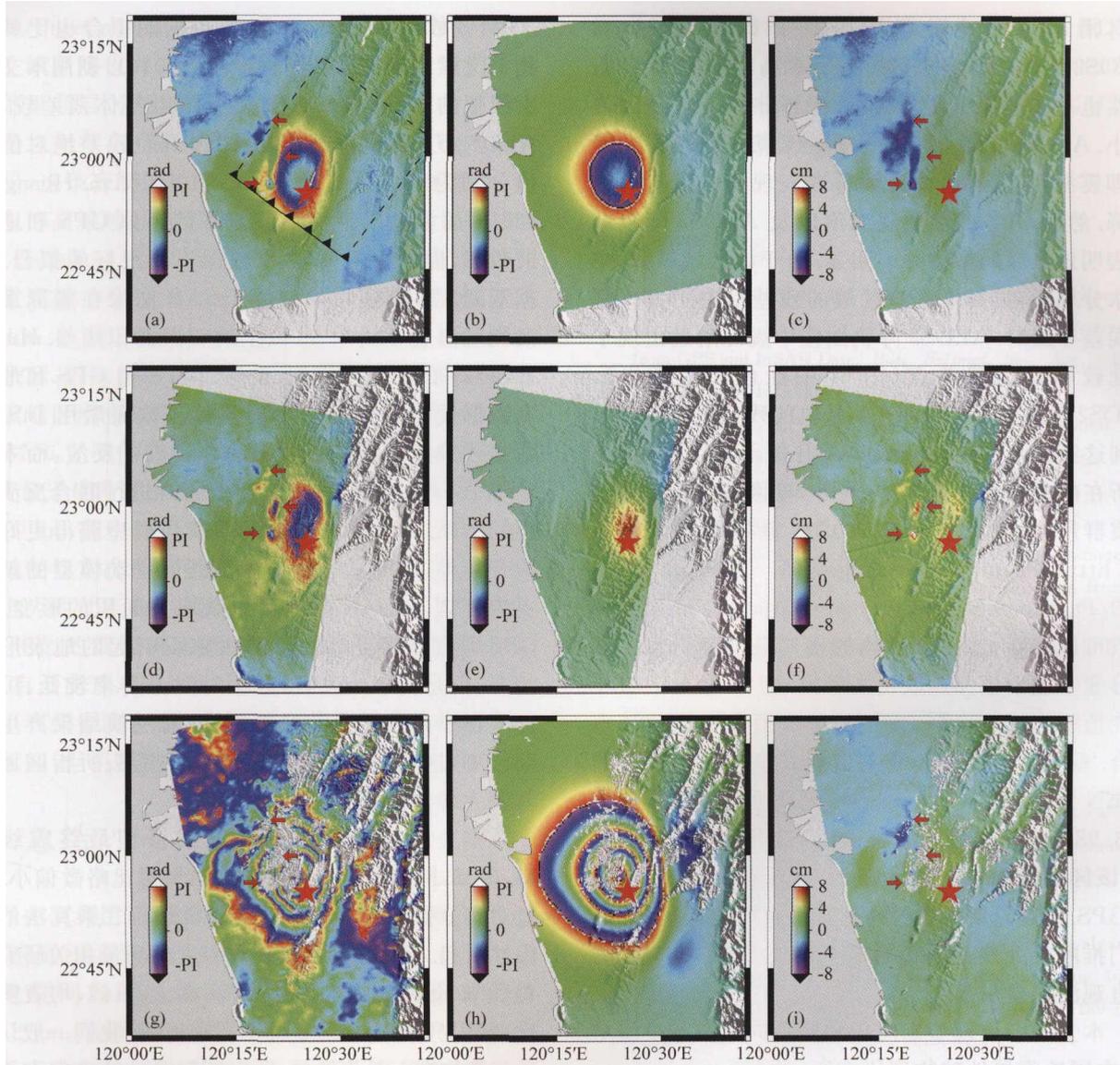


图 6 InSAR 观测相位与模拟相位对比及残差图

图中(a)(d)(g)分别为 ALOS2 升轨、降轨及 Sentinel-1A 升轨 LOS 观测值;(b)(e)(h)分别为其对应的模拟值;(c)(f)(i)为二者形变残差;红色星形为震源所在位置;红色箭头指出的是形变残差较大的位置;(a)中黑色虚线框为推断的发震断层在地表的投影。

Fig. 6 Comparison between InSAR observation and modeling phases and its residuals

(a), (d) and (g) are the LOS displacements from ALOS's ascending and descending and Sentianl-1A's ascending data. (b), (e) and (h) are modeling values of these data. (c), (f) and (i) are deformation residuals corresponding to (b), (e) and (h), respectively. Red arrows indicate the places with major residuals. Black dashed box in (a) is the projection of the inferred fault on the surface.

述步骤获取的最终滑动模型正演地表 GPS 形变和 InSAR 视线向(LOS 向)结果见图 5 和图 6b、e 和 h。如图 6 所示,三幅 InSAR 模拟结果整体上均较好的还原了真实观测值,获得较小的残差结果,但在 ALOS2 与 Sentinel-1A 升轨震源西北部,ALOS2 降轨震源西部部分区域仍存在少量残差。图 6c、f 和 i 残差绝对值的均值分别为 0.85 cm、0.75 cm 和 0.67 cm。GPS 形变整体拟合得较好,东西向和南北向最大残差绝对值分别为 1.00 cm 和 0.65 cm,残差绝对值的均值分别为 0.29 cm 和 0.19 cm。由于

GPS 垂直观测精度低,垂直向残差比水平向大,最大残差为 4.14 cm,残差绝对值的均值为 1.24 cm。

4 讨论

本文的最优滑动分布模型(如图 4a 所示)表明断层的滑动方向由左侧的纯逆冲滑动向右逐渐转变为倾滑兼走滑的滑动模式,这同图 2a 和 b 中 GPS 观测到的台湾西南部显著的西南方向位移且自南向北逐渐趋于向正西方向运动的形变模式十分吻合。

同时滑动模型也较好地还原了 Sentinel-1A 和 ALOS2 升轨干涉条纹(如图 6b 和 h). ALOS2 降轨虽然也基本还原了干涉条纹,但整体形变较观测值偏小. ALOS2 升轨图像的残差主要集中在图像左上方即震源西北区域,该区域形变表现为一定范围的沉降.然而 GPS 的形变观测值以及 ALOS2 降轨结果表明该区域的形变并不明显.由于该区域靠海,空气水分较大,我们推测该区域的残差是由于大气延迟误差导致的. ALOS2 降轨图像中震源附近出现了三处较明显的残差点(图 6f 中红色箭头指出), ALOS2 升轨和 Sentinel-1A 升轨的残差图同样可以找到这三个点.在 Sentinel-1A 升轨干涉图中,这三点所在的位置失相干严重.另外,该区域是美浓地震余震群所在位置之一(20160206 地震地质调查报告, http://fault.moeacgs.gov.tw/TaiwanFaults_2009/PageContent.aspx?type=C&id=250&149).所以可以推断,这三个区域的残差是余震引起的局部形变未能由模型反映出来所致.图 5a 和 b 中 GPS 形变值整体拟合良好,模拟的形变值与实测值基本吻合.垂直向形变最大残差出现在东北部山麓带的 JWEN 台站,残差为 4.14 cm,此处垂直形变观测值为 3.98 cm.但是通过比较 ALOS2 升轨图像我们发现,该区域整体相干性良好,未发现有明显形变.鉴于 GPS 观测为点状观测并且其垂直向的精度较低,我们推断此处残差是由远场局部形变以及 GPS 的垂直观测误差引起.

本文的断层模型走向角和倾角同地震波反演结果(中国地震局地球物理研究所, <http://www.ceai-gp.ac.cn/tpxw/273625.shtml>)相差不大,均表现为东南-西北走向、向东北方倾斜的断层结构,倾角较小. Lee 等(2016)采用 P 波和 GPS 数据对美浓地震进行了联合反演,较详细的解释了断层滑动的过程,认为本次地震的断层滑动是由东向西北扩散而后又在东南区域产生了小范围滑动.根据 Lee 等(2016)的断层模型反演的震级为 $M_w 6.57$,这个结果同本文及其他机构的结果相比偏大. Lee 等(2016)的反演结果较好的拟合了地震波数据,但是并没有给出 GPS 的拟合结果.根据对 Lee 等(2016)滑动模型的滑动方向进行分析,发现其断层基本为向西方向滑动,这种滑动模式并不能合理解释震源西南侧出现的西南向 GPS 形变观测值.本文的滑动模型不仅能够对震源西侧向西方向 GPS 形变观测拟合良好,对震源西南部的 GPS 观测也能够完美的拟合.本文的模型和滑动分布结果不仅较好地拟合

了 GPS 数据,并且对 InSAR 数据的拟合也比其他相关文献精度高(Huang et al., 2016).利用本文模型模拟的 InSAR LOS 向形变结果整体残差较小, ALOS2 升、降轨和 Sentinel-1A 升轨残差绝对值均值分别为 0.85 cm、0.75 cm 和 0.67 cm. Huang 等(2016)的多断层模型能够较好的还原 GPS 和地震波数据,但是对于 InSAR 数据不能很好的拟合,根据双断层模型模拟的四幅 InSAR 图像在震源东西两侧均出现了约 5 cm 以上的较大面积残差. Huang 等(2016)的多断层模型,是通过先采用 GPS 和地震波数据反演确定大断层的几何参数而后用 InSAR 数据残差拟合浅部小断层的方式进行反演,而本文是将 InSAR 数据和 GPS 数据同时进行联合反演确定的结果.本文以较简单的单断层模型获得更好的拟合结果,证明了该地震为单断层滑动模型的解释更为合理. InSAR 数据可以获取大面积的形变,较 GPS 而言能够更好的反映由地震引起的地表形变情况,但是由于 InSAR 数据时间分辨率较低,可能引入由于余震造成的局部形变,对反演结果产生局部影响,这也可能是图 7c、f 和 i 中箭头所指区域残差较大的原因.

本文得到的滑动分布反演模型最终震级为 $M_w 6.38$,同其他机构和文献的结果对比略微偏小.经过对比分析实验发现这是由非负最小二乘算法的局限性引起.根据已有的地震波和大地测量相关研究资料(Huang et al., 2016; Lee et al., 2016),均表明本次地震主要为左旋兼逆冲形式的地震.我们一般认为地壳在物理上是连续的,所以断层滑动的方向在总体上应该保持一致.为了避免出现滑动方向矛盾的情况,通常在求解滑动量的过程中进行适当非负约束(Feng et al., 2015a; 温扬茂等, 2014).其目的是使滑动方向统一,更加符合物理规律,但是对于一些复杂的破裂过程,断层几何和地震机制,也会使得地震模型和过程简化,从而使得震级稍偏小.

美浓地震发生于后甲里断层、新化断层、左镇断层、旗山断层与小冈山断层之间的一块平原区域,现有的资料并未发现该区域有出露地表的断层.美浓地震震中周边有资料记载的断层除左镇断层外,其余断层均为近南北走向或北北东走向,与本次地震发震断层为西北走向的推断不符.左镇断层的走向和推断的美浓地震发震断层走向类似,但左镇断层为走滑型断层且离此次地震震中较远,实地考察也未发现存在明显形变(20160206 地震地质调查报告, http://fault.moeacgs.gov.tw/TaiwanFaults_

2009/PageContent.aspx?type=C&id=250&149), 故左镇断层也并非该地震发震断层. 综上, 我们推测后甲里断层、新化断层左镇断层、旗山断层与小冈山断层之间存在一条未出露地表的逆冲兼左旋走滑盲断层, 这条盲断层的滑动导致了美浓地震的发生. 台湾南部高雄地区有记载的大型地震多发生于平移断层(Huang et al., 2013). 如 1946 年的 $M_w6.6$ 新化地震发生于北北东走向的新化平移断层, 长度约 30 km. 该断层截穿小冈山断层北段并延伸进海岸平原区. 斜向截穿该区域褶皱逆冲带的左镇断层也是该地区潜在的发震断层. 有学者猜测 2010 年发生的 $M_w6.3$ 甲仙地震可能是此断层深部活动所造成, 但仍缺乏确凿证据(Lee et al., 2013). 甲仙地震震源深度 29 km, 震中位于 $22.86^\circ\text{N}, 120.56^\circ\text{E}$ (GCMT). 其震源机制与本次地震相似(Huang et al., 2013), 断层面也为西北走向, 主余震分布同样约呈西北东南分布. 相似的震源机制解、较小的时间间隔和空间间隔, 有可能预示着这两个地震的地下结构存在关联. 所以我们推测存在两次地震均为同一条盲断层导致的可能, 但仍需进一步研究.

5 总结

本文利用 D-InSAR 技术, 联合 ALOS2 和 Sentinel-1A 卫星 SAR 数据, 获取了 2016 年 2 月 6 日台湾美浓地震同震形变场, 得到最大 LOS 向形变约为 11.2 cm. 结合 GPS 和 InSAR 数据, 利用 MPSO 算法基于均匀位错模型反演了断层几何参数, 结果表明此次地震是逆冲倾滑兼左旋走滑的破裂模式. 基于非均匀位错模型反演断层滑动分布, 反演结果表明: 滑动主要集中在地表下 9~14 km 处, 最大倾滑和走滑量分别为 51.7 cm 和 55.3 cm, 均位于地表下约 10.5 km 处滑动中心. 最终得到的地震矩为 $4.116 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$, 对应矩震级约为 $M_w6.38$, 与 GCMT 的结果($M_w6.4$)接近. 通过同现有文献对比分析, 发现美浓地震的发震断层为单一断层的解释更为合理, 同时推断发震断层是位于左镇、后甲里等断层之间的一条东南-西北走向往东北倾斜的盲断层. 2010 年甲仙地震同 2016 年美浓地震震源机制相似且距离十分接近, 两次地震是否均与这条盲断层有关、前者和后者是否存在因果关系, 有待后继深入验证.

致谢 感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见, 感谢中南大学升华育英计划的资助. 本文使用的 Sentinel-

1A SAR 数据由欧空局科学数据中心提供, ALOS2 卫星数据是由 JAXA 的 P1229002 和 P1390002 项目提供, 本文中部分图像是使用开源软件 GMT 绘制, 在此一并表示感谢.

References

- Bürgmann R, Ayhan M E, Fielding E J, et al. 2002. Deformation During the 12 November 1999 Düzce, Turkey, Earthquake, from GPS and InSAR Data. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92(1): 161-171, doi: 10.1785/0120000834.
- Ding C, Feng G C, Li Z W, et al. 2016. Spatio-temporal error sources analysis and accuracy improvement in landsat 8 image ground displacement measurements. *Remote Sens.*, 8(11): 937, doi: 10.3390/rs8110937.
- Feng G C, Li Z W, Shan X J, et al. 2015a. Source parameters of the 2014 $M_w6.1$ South Napa earthquake estimated from the sentinel 1A, COSMO-SkyMed and GPS Data. *Tectonophysics*, 655: 139-146, doi: 10.1016/j.tecto.2015.05.018.
- Feng G C, Li Z W, Shan X J, et al. 2015b. Geodetic model of the April 25, 2015 $M_w7.8$ Gorkha Nepal Earthquake and $M_w7.3$ aftershock estimated from InSAR and GPS data. *Geophys. J. Int.*, 203(2): 896-900, doi: 10.1093/gji/ggv335.
- Feng G C, Li Z W, Xu B, et al. 2016. Coseismic deformation of the 2015 $M_w6.4$ Pishan, China Earthquake estimated from sentinel-1A and ALOS2 data. *Seismol. Res. Lett.*, 87(4): 800-806, doi: 10.1785/0220150264.
- Feng W P, Li Z H. 2010. A novel hybrid PSO/simplex algorithm for determining earthquake source parameters using InSAR data. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 25(4): 1189-1196, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.04.007.
- Funning G J, Parsons B, Wright T J, et al. 2005. Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) Earthquake from envisat advanced synthetic aperture radar imagery. *J. Geophys. Res.*, 110(B9): B09406, doi: 10.1029/2004JB003338.
- Huang M H, Dregre D, Bürgmann R, et al. 2013. Joint inversion of seismic and geodetic data for the source of the 2010 March 4, $M_w6.3$ Jia-Shian, SW Taiwan, Earthquake. *Geophys. J. Int.*, 193(3): 1608-1626, doi: 10.1093/gji/ggt058.
- Huang M H, Tung H, Fielding E J, et al. 2016. Multiple fault slip triggered above the 2016 $M_w6.4$ MeiNong earthquake in Taiwan. *Geophys. J. Int.*, 43(14): 7459-7467, doi: 10.1002/2016GL069351.
- Lee S J, Mozziconacci L, Liang W T, et al. 2013. Source complexity of the 4 March 2010 Jiashian, Taiwan, Earthquake determined by joint inversion of teleseismic and near field data. *J. Asian Earth Sci.*, 64: 14-26, doi: 10.1016/j.jseas.2012.11.018.
- Lee S J, Yeh T Y, Lin Y Y. 2016. Anomalous large ground motion in the 2016 $M_L6.6$ Meinong, Taiwan, Earthquake: a synergy effect of source rupture and site amplification. *Seismol.*

- Res. Lett.*, 88(3): 1-8, doi: 10.1785/0220160082.
- Li H Y, Wang L Y. 2015. Applying total least squares to the model of earthquake dislocation. *Surveying and Mapping of Jiangxi* (in Chinese), (3): 2-4.
- Li Z Y, Yuan X M. 2016. Seismic damage summarization of site effect and soil liquefaction in 2016 Kaohsiung earthquake. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics* (in Chinese), 36(3): 1-7, doi: 10.13197/j.eeev.2016.03.1.lizy.001.
- Liu Y. 2012. InSAR inversion considering model error for hypocenter parameter [Ph. D. thesis] (in Chinese). Wuhan: Wuhan University.
- Liu Y, Xu C J, Wen Y M, et al. 2015. The InSAR coseismic deformation observation and fault parameter inversion of the 2008 Dachaidan M_w 6.3 Earthquake. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 44(11): 1202-1209, doi: 10.11947/j. AGCS. 2015. 20140628.
- Liu Z, Zhang H, Wang C. 2002. Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a Half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75(4): 1135-1154.
- Toyokuni G, Zhao D P, Chen K H. 2016. Tomography of the source zone of the 2016 South Taiwan earthquake. *Geophys. J. Int.*, 207(1): 635-643, doi: 10.1093/gji/ggw304.
- Wang L Y. 2011. Research on theory and application of total least squares in geodetic inversion [Ph. D. thesis] (in Chinese). Wuhan: Wuhan University.
- Wen Y M, Xu C J, Li Z H, et al. 2014. Coseismic and postseismic deformation of the 2008 Wenchuan earthquake from InSAR. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(6): 1814-1824, doi: 10.6038/cjg20140613.
- Xu C J, He P, Wen Y M, et al. 2015. Recent advances InSAR interferometry and its applications. *Journal of Geomatics* (in Chinese), 40(2): 1-9, doi: 10.14188/j.2095-6045.2015.02.001.
- Yang K, Yang J B, Jiang B R. 2015. Sentinel-1 Satellite Overview. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying* (in Chinese), (2): 24-17.
- Zhou H, Feng G C, Li Z W, et al. 2013. The fault slip distribution of the myanmar M_w 6.8 earthquake inferred from InSAR measurements. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(9): 3011-3021, doi: 10.6038/cjg20130914.

附中文参考文献

- 冯万鹏, 李振洪. 2010. InSAR 资料约束下震源参数的 PSO 混合算法反演策略. *地球物理学进展*, 25(4): 1189-1196, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.04.007.
- 李海燕, 王乐洋. 2015. 总体最小二乘方法在地震位错模型中的应用探讨. *江西测绘*, (3): 2-4.
- 李兆焱, 袁晓铭. 2016. 2016 年台湾高雄地震场地效应及砂土液化破坏概述. *地震工程与工程振动*, 36(3): 1-7, doi: 10.13197/j.eeev.2016.03.1.lizy.001.
- 刘洋. 2012. 顾及模型误差的震源参数 InSAR 反演 [博士论文]. 武汉: 武汉大学.
- 刘洋, 许才军, 温扬茂等. 2015. 2008 年大柴旦 M_w 6.3 级地震的 InSAR 同震形变观测及断层参数反演. *测绘学报*, 44(11): 1202-1209, doi: 10.11947/j. AGCS. 2015. 20140628.
- 刘智, 张红, 王超. 2002. 星载合成孔径雷达干涉测量. 北京: 科学出版社.
- 王乐洋. 2011. 基于总体最小二乘的大地测量反演理论及应用研究 [博士论文]. 武汉: 武汉大学.
- 温扬茂, 许才军, 李振洪等. 2014. InSAR 约束下的 2008 年汶川地震同震和震后形变分析. *地球物理学报*, 57(6): 1814-1824, doi: 10.6038/cjg20140613.
- 许才军, 何平, 温扬茂等. 2015. InSAR 技术及应用研究进展. *测绘地理信息*, 40(2): 1-9, doi: 10.14188/j.2095-6045.2015.02.001.
- 杨魁, 杨建兵, 江冰茹. 2015. Sentinel-1 卫星综述. *城市勘测*, (2): 24-27.
- 周辉, 冯光财, 李志伟等. 2013. 利用 InSAR 资料反演缅甸 M_w 6.8 地震断层滑动分布. *地球物理学报*, 56(9): 3011-3021, doi: 10.6038/cjg20130914.

(本文编辑 张正峰)