

2018花莲Mw 6.4级地震同震二维形变与断层触发和运动机制研究

吴少杰¹, 王泽根¹, 杨莹辉^{2*}, 熊凌艳³, 杨超³, 陈静³, 窦可璞¹

¹西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都

²成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都

³西南石油大学土木工程与测绘学院, 四川 成都

Email: 18244217931@163.com, *xzhfhy@126.com

收稿日期: 2021年1月21日; 录用日期: 2021年2月18日; 发布日期: 2021年2月26日

摘要

本文基于ALOS-2卫星PALSAR-2 SAR升降轨数据, 提取了2018年台湾花莲Mw6.4级地震同震地表形变场。构建了基于升降轨InSAR观测的地表东西向和垂向形变解算模型, 反演获得2018年花莲地震同震二维形变场。结果显示, 跨米伦断层垂向形变量级差异最大, 其上盘相对下盘抬升量级~0.28 m, 苓顶断层上盘相对下盘也存在~0.2 m的抬升变形。东西向形变场显示, 最大东向地表变形位于米伦断层上盘北段, 量级~0.15 m, 最大西向地表变形则位于米伦断层上盘南段和苓顶断层上盘, 量级~0.4 m。综合二维同震形变、库伦应力传输和反演断层滑动分布发现: 2018年Mw6.4级花莲地震主震断层为西向倾斜的隐伏断层, 且破裂传播至了米伦断层西侧区域, 并触发了苓顶断层和米伦断层的破裂; 其中米伦断层为东向倾斜高角度断层, 其同震破裂以左旋走滑为主并兼具逆冲运动, 苓顶断层为西向倾斜高角度断层, 其同震破裂为左旋走滑兼具逆冲运动; 滑移反演模型显示最大滑移量为~1.8 m, 位于孕震断层地下~5.5 km深度处。

关键词

2018花莲地震, 升降轨InSAR形变, 二维形变反演, 断层运动估计, 库伦应力变化

Research of the Triggering Relation, Faulting Mechanism and Two-Dimension Coseismic Displacement of the 2018 Mw 6.4 Hualian Earthquake

Shaojie Wu¹, Zegen Wang¹, Yinghui Yang^{2*}, Lingyan Xiong³, Chao Yang³, Jing Chen³, Kepu Dou³

*通讯作者。

文章引用: 吴少杰, 王泽根, 杨莹辉, 熊凌艳, 杨超, 陈静, 窦可璞. 2018 花莲 Mw 6.4 级地震同震二维形变与断层触发和运动机制研究[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(2): 193-206. DOI: 10.12677/ag.2021.112016

¹School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

²State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

³School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan
Email: 18244217931@163.com, *xzhfhyyy@126.com

Received: Jan. 21st, 2021; accepted: Feb. 18th, 2021; published: Feb. 26th, 2021

Abstract

The ascending and descending ALOS-2 satellite PALSAR-2 SAR images are used to extract the coseismic surface deformation fields of the 2018 Mw 6.4 earthquake occurring in the Hualian County of Taiwan. Hereby, we present a desirable mathematical model for solving ground deformation in east-west and vertical directions based on the ascending and descending InSAR observations and achieve the two-dimensional coseismic deformation fields of the 2018 Hualian Mw 6.4 earthquake. The results show that the most significant vertical deformation is across the Milun fault, and the largest vertical displacement difference between the hanging wall and the footwall is ~0.28 m. Another distinct vertical deformation zone is found near the Lingding fault, showing the uplift of ~0.2 m of the hanging wall with respect to the footwall. The east-west deformation field shows that the northern area on the hanging wall of the Milun fault experiences the maximum eastward surface displacement with a magnitude of ~0.15 m. The maximum westward ground displacement with a magnitude of ~0.4 m can be found in both the southern hanging wall of the Milun fault and the hanging wall of the Lingding fault. Due to the comprehensive analysis of the Coulomb stress change caused by the coseismic faulting motion, spatial distribution characteristics of the two-dimensional coseismic deformation, and inverted fault slip distribution, we find that the main fault of the 2018 Mw 6.4 Hualian earthquake is a blind west-dipping fault, and it may rupture and propagate to the western side of the Milun fault, triggering the ruptures of the Lingding and Milun faults. The Milun fault dips to east with a high dip angle, and the coseismic slip is predominated by the left-lateral strike-slip with slight thrust motion. The Lingding fault is characterized by a west-dipping high-angle fault plane, presenting the left-lateral strike-slip and thrust faulting. The maximum slip magnitude is ~1.8 m, and is located at the depth of ~5.5 km of the seismogenic fault.

Keywords

2018 Hualian Earthquake, Ascending and Descending InSAR Deformation, Two-Dimensional Deformation Inversion, Estimation of Faulting, Coulomb Stress Change

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2018年2月6日,中国台湾省花莲县东部地区发生Mw 6.4级地震,根据美国地质调查局(USGS)公布结果,此次地震震中位置位于(24.134°N, 121.659°E),震源深度~17 km [1],剧烈的同震运动给当地造成巨大生命和财产损失,截至2018年2月11日18时,花莲地震共造成17人遇难、285人受伤,多栋建筑物倒塌。

花莲地震震中位于花东纵谷断裂附近，花东纵谷北起花莲，南至台东，是台湾岛地质构造上的重要分界[2]。断裂带西侧为欧亚板块，东侧为菲律宾海板块，两板块的交汇速率~80 mm/a [3] [4] [5]。现有研究表明，花东纵谷断裂运动积累了 30~40 mm/a 的地壳压缩量[6] [7] [8]，导致沿该断裂带地震活动频发。根据中国地震台网监测显示，近六年来，在北纬 21°N~26°N，东经 120°E~122°E 的台湾岛及附近海域范围内，共发生了 10 次 Ms 6.0 级以上的地震，其中有两次强震事件位于台湾花莲县以东附近海域[9]。

震后的受灾情况调查显示，此次地震主要影响花莲县及其附近区域，野外调研发现米伦断层地表轨迹附近有明显的断层错动现象。但花莲县和米伦断层均距震中超过 20 km，该区域的显著地表位移究竟是由孕震断层破裂造成，或米伦断层受主震触发破裂造成，仍有待进一步的分析和研究。此外，GPS 形变场显示在花莲市南部的苓顶断层附近出现显著的地表位移[10]，对于该断层是否也同时被主震触发，也有待进一步论证。

利用合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术获取同震形变并开展相关发震机制研究，已经在国内外得到广泛应用[11]-[17]。花莲地震发生后，欧空局的 Sentinel-1 卫星和日本宇航局的 ALOS-2 卫星均迅速观测获得了覆盖震区的合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)数据，并基于 InSAR 技术提取了 2018 年花莲地震的同震地表卫星视线(Line-of-sight, LOS)方向形变场，结果显示花莲城区米伦断层上下盘存在明显的 LOS 向地表运动，推断该断层发生了破裂。此外，Huang 等利用地震期间的 InSAR 测量数据，研究了 2018 年 2 月发生的花莲 6.4 级地震的断层几何形态和滑移，结果表明，该事件至少涉及 3 个断层，包括位于花莲市的一条南倾断层、一条西倾主断层和东倾米伦断层，浅部逆断层滑动与地震后的现场调查结果相吻合[18]。Yen 等利用 InSAR 和 GPS 数据记录了此次地震的地表变形，并提出斜向汇聚和左旋走滑挤压的断层运动模式可解释此次地震同震形变场[19]。此外，Tung 等利用 InSAR 和 GPS 数据获取了此次地震地表变形，结果显示地表变形主要集中在米伦断层和苓顶断层附近，表明此次地震触发了多个断层滑动[20]。但受限于 InSAR 观测形变为北东高三维形变在卫星雷达入射方向的投影，直接分析 LOS 向形变不易判断相关发震断层在三维空间内的运动模式。

为提高利用 InSAR 数据解译断层运动特征的能力，并加深对 2018 花莲地震断层破裂机理的正确认知，本研究联合升降轨 InSAR 形变数据，构建了东西向与垂直向的形变解算模型，反演获得了 2018 年花莲地震的地表二维形变场，并论证了相对升降轨 InSAR 原始观测，反演二维地表形变在揭示断层运动机制方面的优势，分析地表二维形变的分布模式与量级，结合跨断层形变剖面数据、主震库伦应力传输和反演断层滑动模型，讨论了米伦断层和苓顶断层的破裂触发与运动机制，为 2018 花莲地震的研究提供了可靠的参考资料。

2. 花莲地震 InSAR 数据处理

本文搜集了 2018 年花莲地震前后，ALOS-2 卫星 PALSAR-2 传感器观测获得的花莲地区升降轨雷达影像数据(表 1)，影像覆盖区域如图 1 所示，其中两个黑色矩形虚线方框分别代表卫星升轨和降轨影像覆盖范围，橙黄色五角星标识花莲地震震中，暖色实心圆为相关余震序列，圆的直径尺寸标识余震规模。

Table 1. Radar image parameters
表 1. 雷达影像参数

轨道方向	主影像(年-月-日)	从影像(年-月-日)	极化方式	方位角(°)	入射角
升轨	2016-11-05	2018-02-10	HH	-10.99	27.80
降轨	2017-06-18	2018-02-11	HH	-169.73	40.55

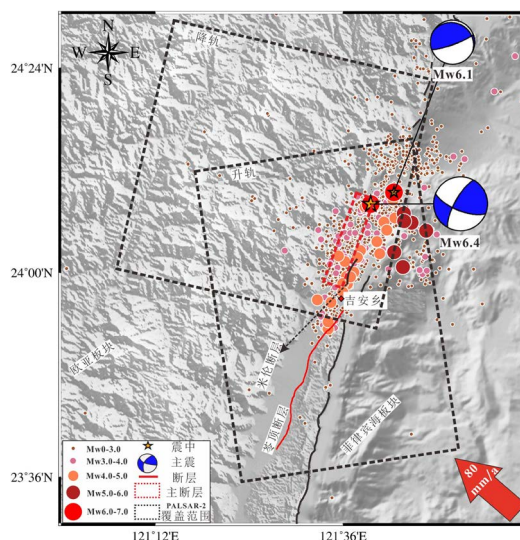


Figure 1. Study area of coseismic surface deformation of the Hualian earthquake. Orange stars show the epicenter of the Hualian earthquake. Black dotted rectangle shows the coverage of ascending and descending ALOS - 2 SAR image. Red dotted rectangles indicate the surface trace of the inferred main fault. Black arc is the surface trace of the Milun fault. Red solid line indicates the surface trace of the Lingding fault. Warm color solid circles show the aftershocks sequence of the 2018 Hualian earthquake

图 1. 花莲地震同震地表形变研究区域, 橙黄色五角星为花莲地震震中, 黑色虚线矩形框显示 ALOS-2 卫星升、降轨 SAR 影像覆盖范围, 红色虚线矩形框为推测的主震断层地表投影, 黑色弧线为米伦断层地表轨迹, 红色实线为苓顶断层地表轨迹, 暖色实心圆为 2018 花莲地震余震序列

利用 GAMMA 软件对上述 PALSAR-2 影像进行 InSAR 干涉处理[21], 并利用 30 m 分辨率的 SRTM DEM 数据移除地形相位获得差分干涉数据; 采用自适应滤波算法进行干涉图滤波降噪[22], 并使用 Chen 和 Zebker 开发的 Snaphu 软件对滤波后的差分干涉图开展相位解缠处理[23] [24]; 考虑到卫星轨道误差残余, 利用高相干 (相干系数 > 0.3) 数据构建轨道残余误差模型, 移除残余轨道误差分量[25] [26]; 并对校正后的数据进行地理编码, 最终获得 2018 年花莲地震升降轨 InSAR 同震地表形变场(图 2)。

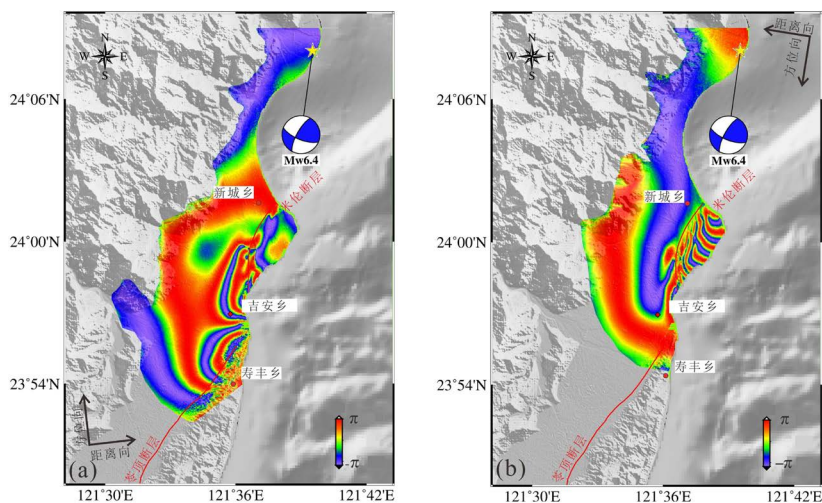


Figure 2. InSAR differential interferograms of the Hualian earthquake. (a) Ascending InSAR differential interferogram; (b) Descending InSAR differential interferogram. Red solid line represents the fault surface trace, and the yellow stars show the epicenter of the Hualian earthquake

图 2. 花莲地震 InSAR 差分干涉图。(a) 升轨 InSAR 差分干涉图, (b) 降轨 InSAR 差分干涉图; 红色实线代表断层地表轨迹, 黄色五角星为花莲地震震中

图 2 显示花莲地震升降轨 InSAR 同震干涉条纹, 其中一个周期($-\pi$ 到 π)的条纹变化, 对应地表在雷达视线方向半个波长(0.1145 m)的位移, 雷达视线向变形量级越大, 其在干涉图上对应条纹越密集。从升轨干涉结果(图 2(a))中可看出, 两处半椭圆形密集条纹呈近南北向分布在米伦断层和苓顶断层两侧, 吉安乡区域干涉条纹主要分布在米伦断层西南方向, 而寿丰乡区域干涉条纹集中在苓顶断层西北方向, 从空间关系上分析两处地表变形极有可能是上述断层活动造成的。需要指出的是, 由于卫星视角差异, 降轨干涉数据(图 2(b))的干涉条纹在空间位置和分布形状上与升轨(图 2(a))不同, 显著的干涉条纹主要集中在米伦断层的东侧, 且降轨影像在米伦断层东侧观测到的地表形变量级要显著大于升轨。同时, 升轨 InSAR 数据在苓顶断层东侧有较明显失相干现象, 这可能是由于该区域地表植被覆盖造成的。

图 3 为花莲地震同震形变场, 其中暖色调区域表示观测目标靠近卫星, 冷色调区域表示远离卫星。升轨形变场(图 3(a))显示, 花莲城区至寿丰乡区域, 形变特征以靠近卫星为主, 但在吉安乡及其以北区域发现显著的远离卫星地表运动信号, 花莲市区显著的靠近卫星地表运动主要位于米伦断层东侧, 而吉安乡所在的远离卫星地表运动区域位于米伦断层西南方向, 且靠近和远离卫星运动的地表分界线正好沿米伦断层分布。此外, 寿丰乡所在的苓顶断层西侧发现显著的靠近卫星向地表运动, 其最大形变量级达 0.22 m。

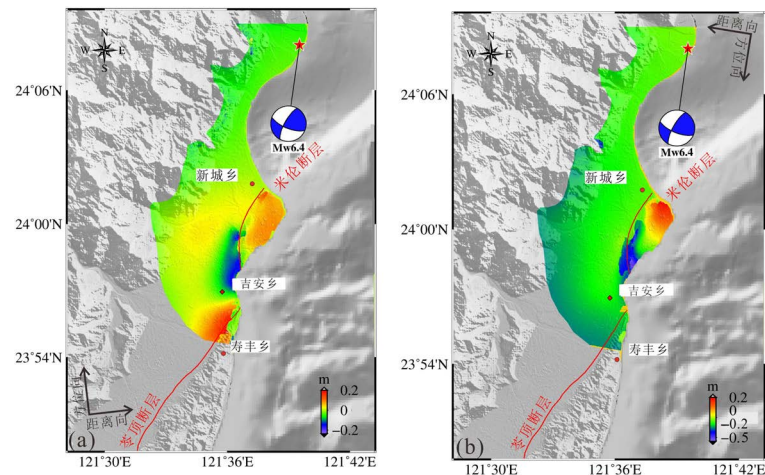


Figure 3. InSAR deformation field of the 2018 Hualien earthquake. (a) Ascending InSAR deformation field; (b) Descending InSAR deformation field. Red solid red line represents the fault surface trace, and the red stars denote the epicenter of the Hualien earthquake

图 3. 2018 花莲地震 InSAR 形变场。(a) 升轨 InSAR 形变场; (b) 降轨 InSAR 形变场; 红色实线代表断层地表轨迹, 红色五角星为花莲地震震中

InSAR 降轨形变场(图 3(b))显示米伦断层东侧存在显著的同震地表运动, 其中靠近卫星方向形变最大量级~0.25 m, 远离卫星方向最大形变量级~0.5 m, 即米伦断层上下盘最大相对位移达~0.75 m。此外, 卫星升降轨观测形变场均显示米伦断层东侧地表形变量级较西侧更为显著, 而根据同震断层的破裂机理可知, 断层上盘的运动量往往较下盘更为显著, 进一步综合区域地质调查结果[26] [27] [28] [29], 可推断米伦断层为东向倾斜断层。同理, 依据升降轨 InSAR 形变场特征, 在不考虑苓顶断层东侧失相关的情况下, 可初步推断苓顶断层向西倾斜。需要指出的是, 卫星视线向的形变并不能直接反映断层在三维空间内的运动模式, 需开展卫星视线向变形至北东高三维形变的转换以进一步加深对断层运动机制的认知。

3. 地表二维形变反演方法

InSAR 提取地表变形是北东高三维形变在卫星视线方向的投影, 其监测成果可很好地反映地表在卫星视线向的变形情况, 但考虑当前断层几何模型、GPS 观测变形、以及常规野外考察成果均是以北东高

三维空间坐标系为参考基准, 卫星视线向变形不便于科研人员的直观理解, 且不利于分析断层运动机制。因此, 将 InSAR 监测的 LOS 向变形转换到北东高三维空间坐标系下, 具有较高的实用价值。

根据雷达成像的几何模型, 可知视线向变形和北东高三维形变的转换关系如下[30]:

$$d_{LOS} = -d_N \cos\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) \sin \theta - d_E \sin\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) \sin \theta + d_U \cos \theta \quad (1)$$

其中 d_{LOS} 表示视线向变形, d_N 、 d_E 、 d_U 分别表示北、东、高三维地表形变分量, α 和 θ 代表卫星飞行方向角和雷达入射角。由于雷达卫星近南北向飞行的特点, 卫星视线向变形对南北方向的形变极不敏感 [30] [31] [32], 以本文使用的 ALOS-2 卫星数据为例, 其升、降轨飞行方向角分别为 349.01° , 190.27° ; 入射角分别为 27.80° , 40.55° , 计算可得北、东、高各维度在视线向形变中的投影系数(表 2), 其中南北向形变的投影系数显著小于东西向和垂直向, 进一步考虑单独使用升降轨 InSAR 观测反演地表北东高三维形变面临的秩亏问题, 此处假定地表南北方向变形对视线向形变的贡献分量可忽略, 据此可得到东西向和垂直向二维形变与卫星视线方向形变的关系[33] [34], 如式 2。

Table 2. LOS projection coefficient of 3D deformation

表 2. 北东高三维形变 LOS 向投影系数

	北	东	高
升轨	-0.0889	-0.4578	0.8846
降轨	-0.1159	0.6397	0.7598

$$\begin{pmatrix} d_{LOS1} \\ d_{LOS2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\left(\alpha_1 - \frac{3\pi}{2}\right) \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \\ -\sin\left(\alpha_2 - \frac{3\pi}{2}\right) \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_E \\ d_U \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中下标 1 为卫星升轨, 下标 2 为卫星降轨, 其它各字母含义与公式(1)保持一致。简化升降轨卫星视线向形变为矩阵 $D = (d_{LOS1}, d_{LOS2})^T$, 转换系数矩阵为 A , 东西向和垂直向地表形变向量为 $X = (d_E, d_U)^T$, 则上式可变换为:

$$D = AX \quad (3)$$

$$A = \begin{pmatrix} -\sin\left(\alpha_1 - \frac{3\pi}{2}\right) \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \\ -\sin\left(\alpha_2 - \frac{3\pi}{2}\right) \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

依据公式 3, 获得地表东西和垂直方向形变:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T D \quad (5)$$

其中 X 为待解算的东西和垂向二维地表形变向量, 可用于分析同震事件造成的地表变形空间分布特征, 特别是近断层数据可直接用于解译断层的运动机制。

需要指出的是, 此处的转换模型未考虑北方向变形对反演结果的影响, 将在一定程度上影响解算二维形变场的精度, 对该问题的解决有赖于增加新的独立观测数据, 特别是对北方向变形较为敏感的观测成果, 如像素偏移技术和多孔径技术提取获得的卫星飞行方向地表形变数据, 但上述两种方法在形变提取可行性和精度方面仍存在较多的限制因素[35] [36]。因此, 单独利用升降轨 InSAR 数据反演东西和垂向二维形变场, 在快速获取同震地表二维形变方面仍具有较高的实用价值。

4. 结果与讨论

4.1. 跨断层地表形变分析

利用上述二维形变反演方法,将图3所示的花莲地震升降轨卫星视线向形变转换为垂向和东西向变形(图4)。垂直向形变(图4(a),图5(e))显示苓顶断层西侧存在相对东侧的抬升运动,且断层西侧的绝对形变量级明显大于断层东侧,表明苓顶断层应向西倾斜,进一步分析垂向抬升变形集中于近苓顶断层西侧区域(图4(a)黑色椭圆区域),且跨苓顶断层形变剖面数据(图5(e))显示,地表形变主要集中在垂直于断层两侧~1公里范围内,即显著的地表形变均发生在紧邻断层地表破裂轨迹的断层近场区域,这与高倾角断层破裂造成的地表形变空间分布较一致,因此推断苓顶断层应具有高倾角特性。考虑高倾角断层多以走滑断层为主,可初步推测苓顶断层破裂为走滑兼具逆冲运动。进一步,东西向形变场(图4(b))显示苓顶断层西侧存在较明显的西向位移运动,最大西向位移~0.4 m,表明该断层具有左旋走滑的特征,结合垂向地表形变特征综合分析可知,苓顶断层应具有高倾角断层特征,且同震破裂模式以左旋走滑为主并兼具逆冲运动。需要注意的是,InSAR升轨观测结果在苓顶断层东侧相干性相对较差,会对上述分析造成一定的不利影响,更可靠的观测数据将能够提供更加定量精确的分析成果。

图4显示米伦断层附近变形情况较为复杂,特别是断层东侧同时存在抬升和下沉信号(图4(a)),且同时发现了东向和西向位移(图4(b))。米伦断层近南北走向,已有研究显示其为东向倾斜的高倾角断层,其运动机制也以走滑运动为主[26][27][28][29],考虑在一次地震事件中,同一断层运动往往具有相似的运动机制和渐变的空间分布,因此,单一米伦断层的破裂不易在断层东侧造成方向完全相反且分布如此复杂的地表运动。进一步分析可知,花莲地震震中位于米伦断层北部,且主震断层向西倾斜,破裂沿西南方向传播,而此次地震的余震也大都分布在米伦断层西北一侧(图1),综合以上信息,我们认为主震断层(图1与图4(b)红色虚线框所示)极有可能由震源位置破裂传播至米伦断层西侧,并触发米伦断层和苓顶断层发生破裂,进而造成该区域较为复杂的地表运动模式。

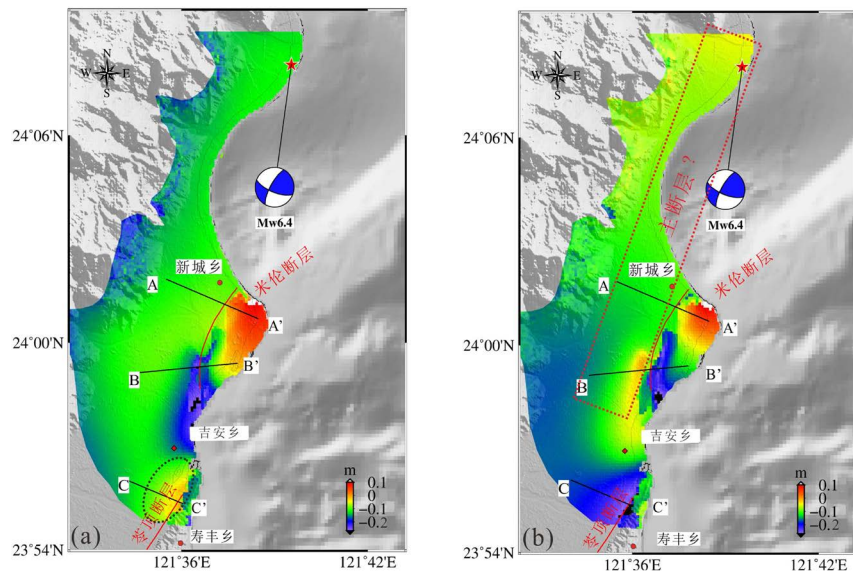


Figure 4. Vertical and East-west deformation fields of Hualien earthquake. (a) Vertical deformation field; (b) East-west deformation field. Red stars indicate the epicenter of the Hualien earthquake. Red dotted rectangle is the inferred main fault of the Hualien earthquake. Black dotted ellipse indicates the significant deformation region in the near field of the Lingding fault

图4. 花莲地震垂向和东西向二维形变场。(a) 垂向形变场; (b) 东西向形变场; 红色五角星为花莲地震震中, 红色虚线框为推断的花莲地震主震断层, 黑色虚线椭圆标识苓顶断层近场显著变形区域

跨断层的地表变形剖面数据,有助于加深对断层活动特性的认知,选择如图4中黑色实线所示的三条跨断层剖面线(AA'和BB'剖面线跨米伦断层,CC'剖面线跨苓顶断层),并绘制其垂向和东西向形变剖面(图5)。米伦断层北段的AA'剖面长度~7 km,从其垂向形变剖面(图5(a))可看出,米伦断层北段西侧沉降,东侧抬升,两侧最大相对位移~0.28 m,另外在米伦断层地表破裂线附近,形变梯度突然增大,运动方向也发生跳变。东西向形变剖面(图5(b))显示米伦断层北段西侧以西向位移为主,东侧则转变为东向位移,最大相对位移~0.4 m,与垂向形变剖面相似,东西向形变剖面在米伦断层地表轨迹附近形变方向跳变,这表明米伦断层北段的运动对周边区域的地表变形起决定性作用。

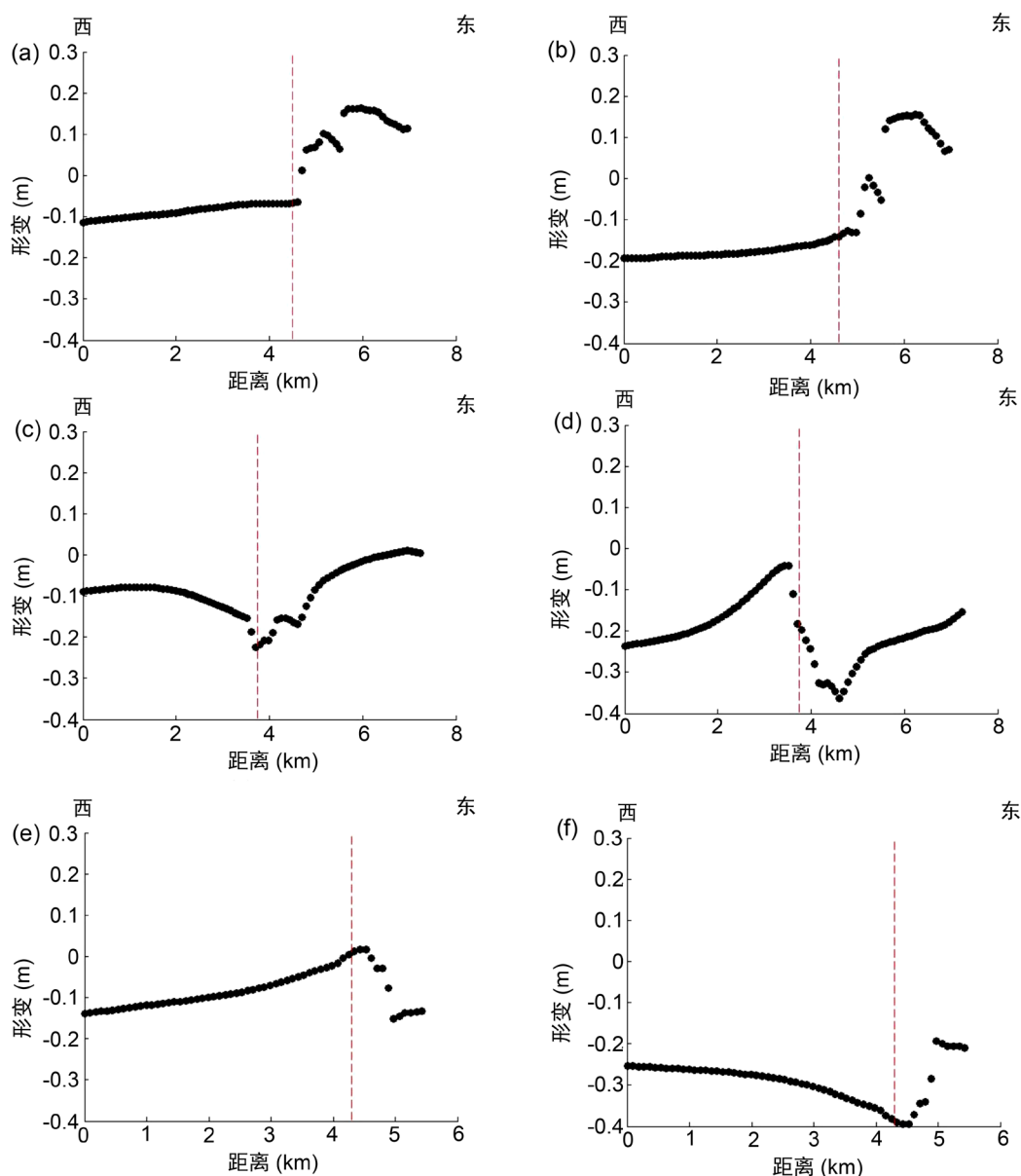


Figure 5. Deformation section across the fault of the Hualian Earthquake. (a) AA' vertical deformation section; (c) BB' vertical deformation section; (e) CC' vertical deformation section; (b) AA' east-west deformation section; (d) BB' east-west deformation section; (f) CC' east-west deformation section

图5. 花莲地震跨断层形变剖面。(a) AA'垂向形变剖面; (c) BB'垂向形变剖面; (e) CC'垂向形变剖面; (b) AA'的东西方向形变剖面; (d) BB'的东西方向形变剖面; (f) CC'的东西方向形变剖面

BB'形变剖面位于米伦断层南段, 长度~7 km, 其垂向剖面(图 5(c))显示东西两盘均为沉降变形, 但在断层附近沉降量级发生显著跳变, 断层西侧沉降剖面曲线呈现先减后增的变化, 转折点靠近断层位置, 断层两侧最大相对位移~0.3 m; 其东西向剖面(图 5(d))显示断层东西两盘位移有明显的性质变化, 断层两侧最大相对位移~0.4 m, 这一般是由地震事件中断层的回弹运动导致。

CC'剖面线跨苓顶断层, 呈西北东南走向, 长度~5 km, 其垂向剖面(图 5(e))显示苓顶断层西盘远场区域地表形变较为平缓, 但在近断层处发生形变跳变, 上下盘最大相对位移 0.2 m; 其东西向形变剖面(图 5(f))显示断层两盘均以西向位移为主, 但在靠近断层处其位移量由-0.4 m 跳变为-0.2 m, 表明苓顶断层浅部运动显著。进一步考虑苓顶断层远离震源, 推测苓顶断层破裂应由花莲地震主震事件所触发, 导致其发生了显著的浅层断层破裂, 并控制周边区域的地表运动。需要指出的是, 受升轨 InSAR 数据失相关作用, 苓顶断层东侧形变精度可能受到一定影响, 但 CC'剖面整体测量值依然具有一定参考性。

综上所述, 米伦断层两侧最大东西向相对位移(AA': ~0.4 m, BB': ~0.4 m)大于垂向(AA': ~0.28 m, BB': ~0.3 m), 进一步考虑米伦断层东向倾斜, 表明米伦断层在浅层地壳以走滑运动为主并兼具逆冲运动。而苓顶断层两侧(CC')最大东西向相对位移(~0.2 m)仅稍大于垂向(~0.18 m), 表明苓顶断层在浅层地壳的走滑与逆冲运动分量相当, 即其运动机制为走滑兼具逆冲运动。此外, 由于米伦断层更靠近主断层, 其两侧相对位移在东西向比苓顶断层大~0.2 m, 垂向比苓顶断层大~0.1 m, 表明 2018 年花莲地震米伦断层的活动性高于苓顶断层。

4.2. 主震造成米伦断层与苓顶断层库伦应力变化

为了进一步分析米伦断层和苓顶断层破裂与主震之间的关系, 我们依据 Yang et al., (2018)的研究成果构建了如图 6 所示的米伦断层和苓顶断层几何模型[26]。同时, 从 USGS 获取了花莲地震区域 2018 年 2 月 4 日和 6 日两次地震事件震源机制参数(表 3), 并基于点源模型计算了两次地震事件对米伦断层和苓顶断层的库伦应力传输(图 6)。

Table 3. Parameters of Hualien earthquake in February 2018
表 3. 2018 年 2 月花莲地震参数

日期(年-月-日)	经度(°)	纬度(°)	深度(km)	震级(Mw)	走向(°)	倾角(°)	滑动角(°)
2018-02-04	121.708	24.157	15.5	6.1	70	81	80
2018-02-06	121.659	24.134	19.5	6.4	209	73	22

观察图 6(a)可发现, 2018 年 2 月 4 日 Mw 6.1 级地震事件引起的库伦应力变化显示米伦断层北段整体变化约为-7 bar, 表明此次地震事件未正向促发米伦断层北段的破裂。但米伦断层南段的库伦应力显著增加, 其中 10 公里深度附近的库伦应力增量为~3 bar, 15~20 公里深度处应力增量达到了~8 bar, 远远超过应力触发阈值~0.1 bar [37] [38], 表明 2018 年 2 月 4 日的地震事件对米伦断层南段的破裂具有显著的促发效应。此外, 苓顶断层在 15 公里及其以下深度应力增量为~1 bar, 该量级的库伦应力增加, 将对苓顶断层的破裂具有明显的正向促发作用。

图 6(b)为 2018 年 2 月 6 日 Mw6.4 级地震事件对米伦断层和苓顶断层的库伦应力传输, 从中可发现, 此次地震事件显著改变了米伦断层北段的库伦应力, 在 10~20 km 深度区间, 其平均量级超过 7 bar, 表明在该深度范围内, 米伦断层北段的破裂风险显著增加。同时, 此次地震事件也增加了苓顶断层深部区域的库伦应力。

为揭示库伦应力变化空间分布与余震活动的关联性, 我们在三维空间中分别显示了 2018 年 2 月 4 和 2 月 6 日两次地震事件后花莲地震的余震空间分布情况(图 6(a), 图 6(b))。图 6 显示大部分余震事件为浅源地

震,且绝大多数余震震源深度在 5~20 km 范围内。从图 6 可看出 2018 年 2 月 4 日和 6 日两次地震事件的余震空间分布存在明显不同:首先,2 月 4 日地震发生后至 2 月 6 日地震发生前这段时间内,花莲地震余震事件(图 6(a))密集发生,且主要集中在米伦断层西北一侧,这与我们先前推断的花莲地震主断层位置具有较好的空间一致性。同时,2 月 6 日地震事件后的余震序列相对稀疏(图 6(b)),并主要沿主断层西南方向延伸,这一变化可能与 2 月 6 日地震造成主断层西南方向苓顶断层库伦应力正向增加有直接的关联。此外,综合分析图 6(a)和图 6(b)可发现,应力增量较大的米伦断层周围余震分布明显多于苓顶断层;且库伦应力显著增加的 10~20 km 深度相对于应力变化不显著的 0~10 km 深度,也发生了更多的余震事件。

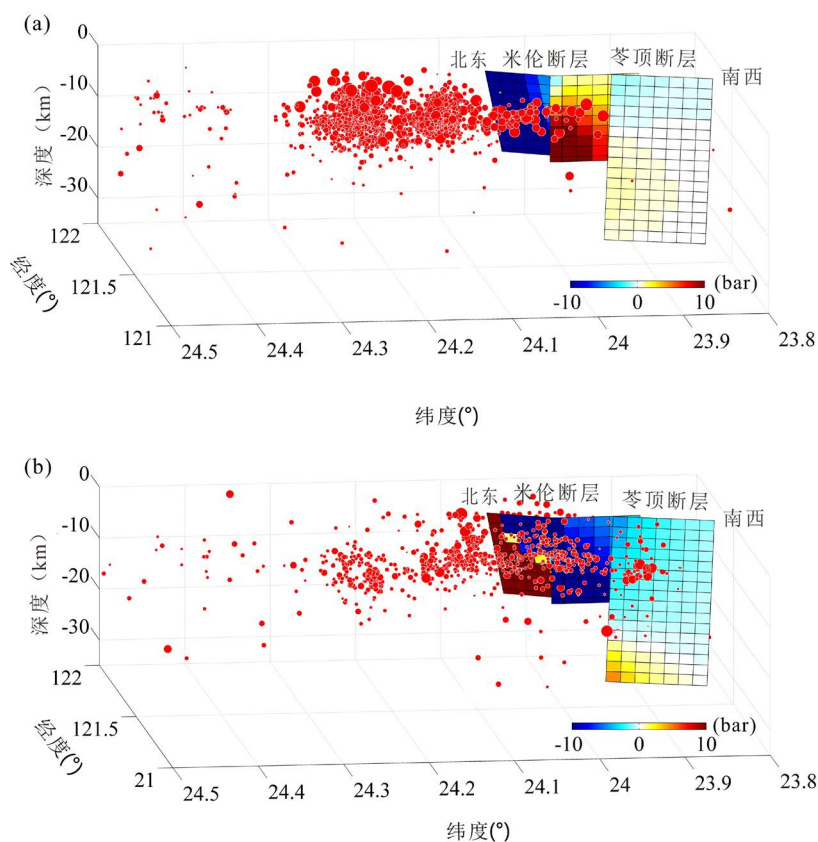


Figure 6. The Coulomb failure stress change on the Milun and Lingding faults caused by the mainshock of the Hualian earthquake, and the aftershocks distribution. (a) The Coulomb failure stress change caused by the strong earthquake occurred on February 4, 2018, and the aftershock sequence during the day and February 6, 2018; (b) The Coulomb failure stress change caused by the earthquake on February 6, 2018 and the aftershock sequence after that day. The red circles denote the aftershocks sequence of the 2018 Hualian earthquake

图 6. 花莲地震引起米伦断层和苓顶断层库伦应力变化与余震空间分布。(a) 2018 年 2 月 4 日强震引起的库伦应力变化与 2 月 4 日至 2 月 6 日间余震序列, (b) 2018 年 2 月 6 日地震事件引起的库伦应力变化与 2 月 6 日后余震序列。红色圆为 2018 花莲地震余震序列

整体而言,2018 年 2 月 4 日和 6 日的两次地震事件显著影响了米伦断层和苓顶断层的库伦应力。米伦断层南段受 2 月 4 日 Mw 6.1 级地震事件的促发影响显著,而北段的破裂则可能主要由 2 月 6 日的地震事件促发;同时,两次地震事件对苓顶断层深部均为正向库伦应力传输,但量级相对较弱。需要指出的是,同一区域地震事件之间,特别是主余震的触发关系除受本文所计算的静态库伦应力影响外,在断层破裂过程中的动态库伦应力传输也是一个很重要的因素。因此,精确定量的断层破裂触发关系研究,有赖于结合动态和静态库伦应力进一步开展针对性的计算与分析。

4.3. 花莲地震断层运动模型反演

为进一步认识 2018 花莲地震的断层破裂模型，并验证基于形变场推测断层运动机制的可靠性。我们根据图 4 中猜测的断层位置，并参考先前研究中利用多源大地测量观测成果推测的 2018 花莲地震断层几何参数，结合 ALOS-2 升降轨 InSAR 观测成果反演了此次地震的断层运动模型，结果如表 4 和图 7 所示 [10] [25] [26] [39]。同时，为验证反演模型的可靠性，我们正演计算了同震地表 InSAR 形变场，如图 8 所示，对比原始 InSAR 观测可发现，正演计算地表形变与 ALOS-2 观测成果有较好的一致性，不一致的区域主要分布在米伦断层近场，这是因为该区域存在剧烈的地表形变，导致区域 InSAR 干涉失相关，原始 InSAR 观测干涉条纹并不可靠。进一步统计发现，ALOS-2 升轨反演模型残差为 1.3 cm，降轨为 1.5 cm，正演结果与观测数据在大部分区域的高度一致性进一步表明了反演断层运动模型的可靠性和有效性。

Table 4. InSAR inversion fault geometric parameters of Hualian Earthquake in 2018
表 4. 2018 年花莲地震 InSAR 反演断层几何参数

断层名	走向角(°)	倾角(°)
主断层(F1)	204.7	89.2
苓顶断层(F2)	209.1	85.9
米伦断层(F3)	/	75.5

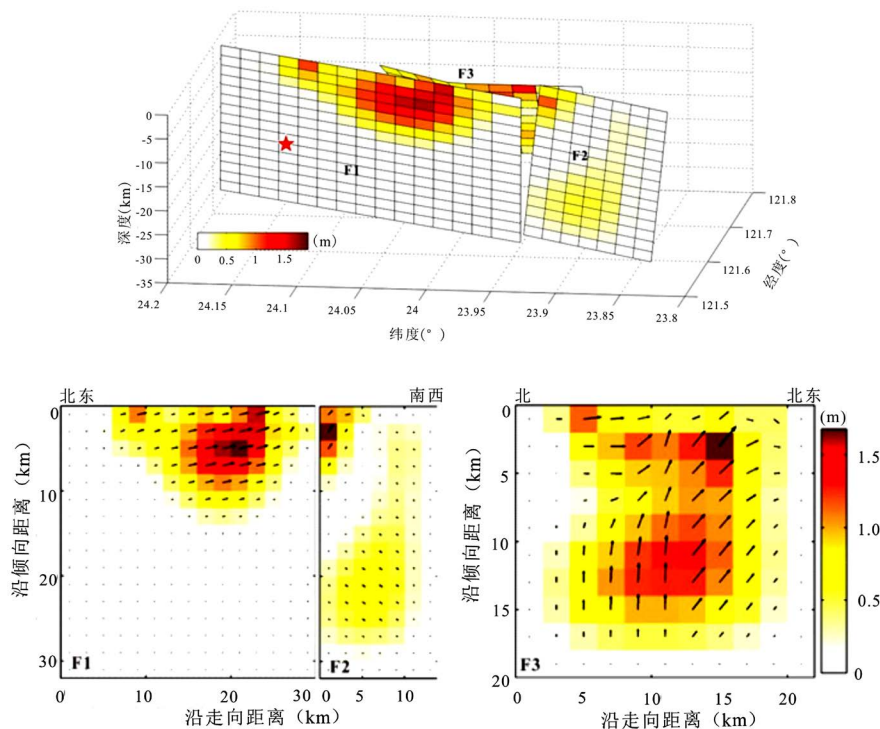


Figure 7. The estimated fault slip distribution based on the InSAR observation. F1: Seismogenic main fault; F2: Lingding fault; F3: Milun fault. Yellow star indicates the hypocenter of the mainshock. Black arrows show the direction of fault slip
图 7. 花莲地震 InSAR 反演断层滑动分布。F1: 孕震主断层；F2: 苓顶断层；F3: 米伦断层。其中黄色五角星标识主震震源位置，黑色箭头显示断层滑动方向

表 4 和图 7 显示了 2018 花莲地震主断层、苓顶和米伦断层几何参数与滑动分布，从中可发现，三断层均为高倾角断层，且米伦断层存在显著的左旋走滑分量并兼具逆冲运动，这与我们先前根据二维地表

形变得到的推论保持一致。同时, 苓顶断层浅层亦为显著的左旋走滑兼具逆冲运动, 也与前面的推论一致。需要指出的是, 在苓顶断层深部存在轻微的右旋运动分量, 但由于滑移位置较深, 对地表形变场影响不显著, 因此难以从 InSAR 形变场中直接解译获得该运动分量。反演所获断层运动模型显示, 孕震主断层为高倾角西倾左旋走滑断层, 且其并未破裂至地表, 显著的滑动分布集中在地下约 3~10 km 深度范围内, 这解释了野外调查未发现主断层出露的原因。主断层运动整体以走滑运动为主, 同时兼具少量的逆冲运动分量, 其最大滑动量~1.8 m, 位于地下~5.5 km 深度处。主断层与苓顶断层首尾衔接, 因此, 苓顶断层极有可能由主断层破裂直接接触, 其运动模式也与主断层基本一致, 但量级相对较小, 并在向南破裂的过程中逐渐减小最终趋于停止。米伦断层的运动存在显著的浅层和深层不一致现象, 其在地表浅层以左旋走滑运动为主, 而深层则转变为逆冲运动为主并兼具左旋运动分量, 最大滑动量级~1.7 m, 位于地下~3.0 km 深度处。

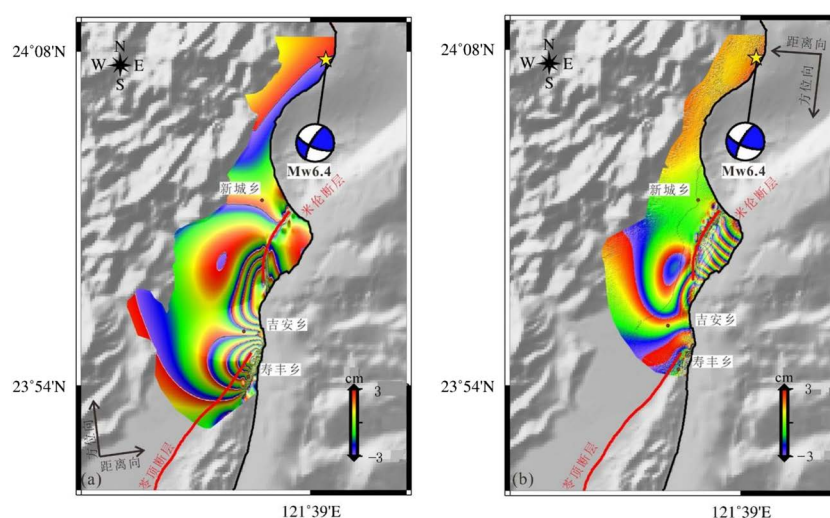


Figure 8. Predicted deformation field of the Hualian earthquake. (a) Predicted ascending deformation field; (b) Predicted descending deformation field. Red solid lines represent the fault surface trace. Yellow stars show the epicenter of the Hualian earthquake

图 8. 花莲地震正演形变场。(a) 升轨正演形变场, (b) 降轨正演形变场。红色实线代表断层地表轨迹, 黄色五角星为花莲地震震中

5. 结论

本文以 ALOS-2 卫星 PALSAR-2 传感器观测 SAR 影像为数据源, 获取了 2018 年花莲地震的 InSAR 同震地表形变场, 构建形变转换模型, 反演得到 2018 年台湾花莲地震垂向和东西向二维形变场; 并联合主震断层运动库伦应力传输和余震空间分布, 分析了此次地震的发震机制、地表形变分布模式和断层破裂触发关系, 最后利用反演断层滑动模型验证了推测结论的可靠性。结论如下: 1) 相比于原始的 InSAR 卫星视线向形变, 垂向和东西向二维地表形变场, 可更直接的表征断层运动特征, 对强震后断层活动特性的快速解译具有较高的实用价值; 2) 基于对二维形变场的分析发现, 米伦断层为东向倾斜高角度断层, 其同震破裂以左旋走滑为主并兼具逆冲运动, 苓顶断层为西向倾斜高角度断层, 其同震破裂为左旋走滑兼具逆冲运动; 两断层的运动控制了其近场区域的地表形变空间分布; 3) 花莲地震主震断层为西向倾斜隐伏断层, 其破裂传播至了米伦断层西侧和苓顶断层北侧区域, 并触发了苓顶断层和米伦断层的破裂; 4) 断层滑移反演模型显示最大滑移量为~1.8 m, 位于孕震断层地下~5.5 km 深度处。

基金项目

四川省科技厅应用基础研究项目(2020YJ0116), 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLG2020K019), 日本宇航局数据资助项目(PI No. 3255, 3105)资助。

参考文献

- [1] USGS. M6.4-18km NNE of Hualien, Taiwan. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000chhc/executive>, 2018-02-06.
- [2] 李海艳, 邵志刚, 马宏生, 等. 基于形变观测分析中国台湾东部花东纵谷断层运动特征[J]. 地学前缘, 2018, 25(1): 240-251.
- [3] Huang, W.J., Johnson, K.M., Fukuda, J., *et al.* (2010) Insights into Active Tectonics of Eastern Taiwan from Analyses of Geodetic and Geologic Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **115**, B03413. <https://doi.org/10.1029/2008JB006208>
- [4] Yu, S.B., Chen, H.Y. and Kuo, L.C. (1997) Velocity Field of GPS Stations in the Taiwan Area. *Tectonophysics*, **274**, 41-59. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00297-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00297-1)
- [5] Yu, S.B., Kuo, L.C., Punongbayan, R.S., *et al.* (1999) GPS Observation of Crustal Deformation in the Taiwan-Luzon Region. *Geophysical Research Letters*, **26**, 923-926. <https://doi.org/10.1029/1999GL900148>
- [6] Lee, J.C. and Angelier, J. (1993) Location of Active Deformation and Geodetic Data Analyses: An Example of the Longitudinal Valley Fault, Taiwan. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **164**, 533-570.
- [7] Hsu, L. and Burgmann, R. (2006) Surface Creep along the Longitudinal Valley Fault, Taiwan from InSAR Measurements. *Geophysical Research Letters*, **33**, L06312. <https://doi.org/10.1029/2005GL024624>
- [8] 李海艳, 邵志刚, 马宏生, 等. 基于 InSAR 形变数据分析台湾纵谷断层南段现今运动特征[J]. 地震, 2016, 36(3): 25-33.
- [9] 中国地震信息网. 台湾花莲县附近海域 6.4 级地震[EB/OL]. <http://news.ceic.ac.cn/CC20180204215642.html>, 2018-02-04.
- [10] Yang, Y.H., Hu, J.C., Tung, H., *et al.* (2018) Co-Seismic and Postseismic Fault Models of the 2018 Mw 6.4 Hualien Earthquake Occurred in the Junction of Collision and Subduction Boundaries Offshore Eastern Taiwan. *Remote Sensing*, **10**, 1372. <https://doi.org/10.3390/rs10091372>
- [11] 方进, 许才军, 温扬茂, 等. 基于方差分量估计的 2015 年尼泊尔 Mw7.8 地震同震滑动分布[J]. 地球物理学报, 2019, 62(3): 923-939.
- [12] 申文豪, 李永生, 焦其松, 等. 联合强震记录和 InSAR/GPS 结果的四川九寨沟 7.0 级地震震源滑动分布反演及其地震学应用[J]. 地球物理学报, 2019, 62(1): 115-129.
- [13] 洪顺英, 董彦芳, 孟国杰, 等. 2008 年 10 月西藏当雄 MW6.3 地震震后形变提取与余滑反演[J]. 地球物理学报, 2018, 61(12): 4827-4837.
- [14] Daout, S., Jolivet, R., Lasserre, C., *et al.* (2016) Along-Strike Variations of the Partitioning of Convergence across the Haiyuan Fault System Detected by InSAR. *Geophysical Journal International*, **205**, 536-547. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw028>
- [15] Garthwaite, M.C., Wang, H. and Wright, T.J. (2013) BROADSCALE INTERSEISMIC DEFORMATION AND FAULT SLIP RATES IN THE CENTRAL TIBETAN PLATEAU OBSERVED USING INSAR. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**, 5071-5083. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50348>
- [16] Wicks, C., Weaver, C. and Bodin, P. (2013) InSAR Evidence for an Active Shallow Thrust Fault beneath the City of Spokane Washington, USA. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **118**, 1268-1276. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50118>
- [17] Chen, Y., Remy, D. and Froger, J.L. (2017) Long-Term Ground Displacement Observations Using InSAR and GNSS at Piton de la Fournaise Volcano between 2009 and 2014. *Remote Sensing of Environment*, **194**, 230-247. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.038>
- [18] Huang, M.H. and Huang, H.H. (2018) The Complexity of the 2018 Mw 6.4 Hualien Earthquake in East Taiwan. *Geophysical Research Letters*, **45**, 13249-13257. <https://doi.org/10.1029/2018GL080821>
- [19] Yen, J.Y., Lu, C.H., Dorsey, R., *et al.* (2019) Insights into Seismogenic Deformation during the 2018 Hualien, Taiwan, Earthquake Sequence from InSAR, GPS, and Modeling. *Seismological Research Letters*, **90**, 78-87. <https://doi.org/10.1785/0220180228>

- [20] Tung, H., Chen, H.Y., Hsu, Y.J., *et al.* (2019) Triggered Slip on Multifaults after the 2018 Mw 6.4 Hualien Earthquake by Continuous GPS and InSAR Measurements. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **30**, 285-300. <https://doi.org/10.3319/TAO.2019.04.03.01>
- [21] Wegmuller, U. and Werner, C. (1997) Gamma SAR Processor and Interferometry Software. *Proceedings of the 3rd ERS Symposium*, Florence, 14-21 March 1997, 1687-1692.
- [22] Goldstein, R.M. and Werner, C.L. (1998) Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications. *Geophysical Research Letters*, **25**, 4035-4038. <https://doi.org/10.1029/1998GL900033>
- [23] Chen, C.W. and Zebker, H.A. (2002) Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: statistical Segmentation and Generalized Network Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**, 1709-1719. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802453>
- [24] 陈强, 杨莹辉, 刘国祥, 等. 基于边界探测的 InSAR 最小二乘整周相位解缠方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 441-448.
- [25] Yang, Y.H., Tsai, M., Hu, J.C., *et al.* (2018) Coseismic Slip Deficit of the 2017 Mw 6.5 Ormoc Earthquake That Occurred along a Creeping Segment and Geothermal Field of the Philippine Fault. *Geophysical Research Letters*, **45**, 2659-2668. <https://doi.org/10.1002/2017GL076417>
- [26] Yang, Y.H., Hu, J.C., Yassaghi, A., *et al.* (2018) Midcrustal Thrusting and Vertical Deformation Partitioning Constraint by 2017 Mw 7.3 Sarpol Zahab Earthquake in Zagros Mountain Belt, Iran. *Seismological Research Letters*, **89**, 2204-2213. <https://doi.org/10.1785/0220180022>
- [27] Huang, S.Y., Yen, J.Y., Wu, B.L., *et al.* (2019) Investigating the Milun Fault: The Coseismic Surface Rupture Zone of the 2018/02/06 ML 6.2 Hualien Earthquake, Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science Journal*, **30**, 1-14. <https://doi.org/10.3319/TAO.2018.12.09.03>
- [28] Tsai, M.C. (2018) Multiple-Fault Triggering Induced by the February 2018 Mw 6.4 Offshore Hualien Earthquake, Taiwan: Insights from Geodetic Measurements. *Japan Geoscience Union Meeting*, Chiba, 20-24 May 2018, STI23-09.
- [29] Shyu, J.B.H., Chung, L.H., Chen, Y.G., *et al.* (2007) Re-Evaluation of the Surface Ruptures of the November 1951 Earthquake Series in Eastern Taiwan, and Its Neotectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, **31**, 317-331. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.07.018>
- [30] 刘国祥, 张瑞, 李陶, 等. 基于多卫星平台永久散射体雷达干涉提取三维地表形变速度场[J]. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2598-2610.
- [31] Mouammad, A.G., Tsehaie, W. and Valentyn, A.T. (2011) Surface Deformation Caused by April 6th 2009 Earthquake in L'Aquila (Italy): A comparative Analysis from ENVISAT ASAR, ALOS PALSAR and ASTER. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **13**, 801-811. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.05.014>
- [32] 洪顺英, 单旭辉, 单新建, 等. 基于升降轨 ASAR 的于田 Ms7.3 级地震同震形变场信息提取与分析[J]. 国土资源遥感, 2010(4): 98-102.
- [33] Hu, J., Li, Z.W. and Ding, X.L. (2014) Resolving Three-Dimensional Surface Displacements from InSAR Measurements: A Review. *Earth-Science Reviews*, **133**, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.02.005>
- [34] Fialko, Y., Simons, M. and Agnew, D. (2001) The Complete (3-D) Surface Displacement Field in the Epicentral Area of the 1999 MW 7.1 Hector Mine Earthquake, California, from Space Geodetic Observations. *Geophysical Research Letters*, **28**, 3063-3066. <https://doi.org/10.1029/2001GL013174>
- [35] Jung, H.S., Won, J.S. and Kim, S.W. (2009) An Improvement of the Performance of Multiple-Aperture SAR Interferometry (MAI). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **47**, 2859-2869. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2016554>
- [36] 胡俊, 李志伟, 张磊, 等. 多孔径 InSAR 技术电离层校正方法及二维形变场应用研究——以玉树地震为例[J]. 中国科学地球科学, 2013, 43(3): 457-468.
- [37] Harris, R.A. (1998) Introduction to Special Section: Stress Triggers, Stress Shadow and Implications for Seismic Hazard. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 24347-24358. <https://doi.org/10.1029/98JB01576>
- [38] Stein, R.S. (1999) The Role of Stress Transfer in Earthquake Occurrence. *Nature*, **402**, 605-609. <https://doi.org/10.1038/45144>
- [39] 杨莹辉. 基于 InSAR 观测同震地表形变场反演汶川地震断层滑移[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015.