

引文格式:王乐洋,高华,冯光财.利用 InSAR 和 GPS 数据分析台湾西南两次 $M_w > 6$ 地震的触发关系及应力影响[J].测绘学报,2019,48(10):1244-1253. DOI:10.11947/j.AGCS.2019.20180587.

WANG Leyang,GAO Hua,FENG Guangcai.Triggering relations and stress effects analysis of two $M_w > 6$ earthquakes in southwest Taiwan based on InSAR and GPS data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2019,48(10):1244-1253. DOI:10.11947/j.AGCS.2019.20180587.

利用 InSAR 和 GPS 数据分析台湾西南两次 $M_w > 6$ 地震的触发关系及应力影响

王乐洋¹,高 华^{1,2},冯光财³

1. 东华理工大学测绘工程学院,江西 南昌 330013; 2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉 430079; 3. 中南大学地球科学与信息物理工程学院,湖南 长沙 410083

Triggering relations and stress effects analysis of two $M_w > 6$ earthquakes in southwest Taiwan based on InSAR and GPS data

WANG Leyang¹,GAO Hua^{1,2},FENG Guangcai³

1. Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. School of Geoscience and Info-Physics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: InSAR and GPS have great advantages in seismic research. InSAR can quickly obtain continuous co-seismic deformation observation in a wide range, while GPS has high accuracy and can quickly obtain stable measurement. With the increase of SAR satellites and the shortening of the return period, it is more powerful to study the seismic triggering relationship and stress effects by using InSAR and GPS jointly. On March 4, 2010, and February 6, 2016, two earthquakes with $M_w > 6.0$ occurred successively in southwestern Taiwan, which are called Jiashian earthquake and Meinong earthquake, respectively. Those are two of the three destructive earthquakes that have occurred in the southwestern plain of Taiwan in the last 200 years (the other was the 1946 M 6.1 Hsinhua earthquake). The time and space intervals between Jiashian and Meinong earthquakes are very small. The study of the relationship between them can not only explore the underground structure of the two events but also further understand the triggering relationship between strong earthquakes. In addition, the effect of the surrounding faults after the two events and which faults have high seismic risk are also worth discussing. As no scholar has deeply studied the relationship between the two events and the effect of the surrounding faults, we used the GPS and InSAR coseismic deformation obtained from ALOS to invert the slip distribution model of the Jiashian earthquake. Based on the static Coulomb stress model, the relationship between Jiashian and Meinong earthquake is analyzed. Seven faults in southwestern Taiwan have been constructed and the stress change models of them have been obtained. We analyzed the high earthquake risk area in southwestern Taiwan based on these stress change models. Fault model obtained by InSAR and GPS inversion shows that the fault structures of Jiashian and Meinong events are very similar, both of which are thrust faults with certain strike-slip. The major slip area of the Jiashian event is between 12~16 km which is slightly deep than that of the Meinong event. The maximum slip of the Jiashian event is 0.61 m at about 14 km depth. The moment of the Jiashian event we obtained by linear inversion is 2.27×10^{18} Nm corresponding to M_w 6.20 which is consistent with the results of USGS (M_w 6.21) and GCMT (M_w 6.3). After Jiashian earthquake, the stress on the causative fault of Meinong event increased greatly, the maximum increment reached 4.0 MPa, and the area of stress increase accounted for about 74% of the total area of the inferred fault. This shows that the Jiashian earthquake has a very obvious acceleration effect on the Meinong

earthquake. However, after the Meinong event, the stress of the causative fault of the Jiashian event increased less, and the average increment is only 0.03 MPa. Under the combined effect of the Jiashian and Meinong events, the Zouchen and Hsinhua faults on the west of the Jiashian earthquake have obviously stress accumulated. We believe that Zouchen and Hsinhua faults in southwestern Taiwan are of high risk after Jiashian and Meinong earthquakes, which deserve continuous attention and further study.

Key words: the Jiashian earthquake; inversion of seismic source parameters; InSAR; earthquake triggering; static Coulomb stress

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41664001; 41874001); The Support Program for Outstanding Youth Talents in Jiangxi Province (No. 20162BCB23050); The National Key Research and Development Program (No. 2016YFB0501405)

摘 要:利用 InSAR 和 GPS 进行地震研究具有很大的优势,InSAR 能够在较大范围内快速地获得连续的同震形变观测,而 GPS 测量精度高,可迅速获得稳定的测量结果。随着 SAR 卫星的增多、重返周期的缩短,利用 InSAR 和 GPS 联合进行地震触发关系及应力影响研究也变得更为有力。2010 年 3 月 4 日和 2016 年 2 月 6 日台湾西南部接连发生两次 $M_w > 6.0$ 以上地震,分别被称为甲仙地震和美浓地震。本文利用 GPS 和 InSAR 同震形变场联合反演了甲仙地震的滑动分布模型;结合之前的研究成果,基于静态库伦应力改变对甲仙地震与美浓地震的关系进行了分析;还为台湾西南部 7 个主要断层构建了断层格网并获取了它们的应力改变模型。结果表明,甲仙地震的发震断层表现为逆冲倾滑兼一定走滑分量的断层。甲仙地震的主要滑动区域处于 12~16 km 深度之间;最大滑动量为 0.61 m 位于约 14 km 深处。本文线性反演得到的甲仙地震地震矩为 2.27×10^{18} Nm,相当于 $M_w 6.20$ 。甲仙地震后美浓地震的发震断层上应力增值达 4.0 MPa,应力增加的面积约占推断断层总面积的 74%,表明甲仙地震对美浓地震的发生具有十分明显地加速作用。甲仙和美浓地震共同作用下,西侧的左镇断层和新化断层产生了较明显地应力积累。根据应力改变结果,本文认为甲仙地震和美浓地震后,台湾西南部的左镇断层和新化断层都具有较高的危险性,值得持续关注和进一步研究。

关键词:甲仙地震;震源参数反演;InSAR;地震触发;静态库伦应力

中图分类号:P227

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2019)10-1244-10

基金项目:国家自然科学基金(41664001;41874001);江西省杰出青年人才资助计划(20162BCB23050);国家重点研发计划(2016YFB0501405)

我国台湾岛位于菲律宾断层和欧亚断层斜向逆冲带之间,由于板块之间的相互运动,造就了台湾岛上许多近南北走向的断层^[1]。密布的断层和板块的持续俯冲作用带来了频繁的地震。台湾西南部平原为人口聚集区域,位于该区域的台南市、高雄市均为 180 万人口以上的聚集地。在该区域发生的具有破坏性的地震一般都会造成较大的人员与财产损失。2010 年和 2016 年台湾西南区域接连发生了两次 $M_w > 6.0$ 地震并造成了较大的破坏。它们分别为 2010 年 3 月 4 日发生在高雄市甲仙区的 $M_w 6.3$ 地震(以下称为甲仙地震)和 2016 年 2 月 6 日发生在高雄市美浓区的 $M_w 6.4$ 地震(以下称为美浓地震),如图 1 所示。图 1 中蓝色和红色五角星分别为甲仙和美浓地震震中所在位置^[2];右下角插图中红色框范围为大图所示

范围;白色框表示本文中提及的 InSAR 影像覆盖范围;带颜色的小圆圈为 1990 年 1 月—2018 年 6 月台湾及周边海域发生的 $M_w 2.5$ 以上地震;红色线条表示主要活动断层(F1 为新化断层;F2 为后甲里断层;F3 为小冈山断层;F4 为旗山断层;F5 为左镇断层;F6 为潮州断层;F7 为六甲断层^[3])。

GCMT 给出的甲仙地震震中坐标为(120.56°E, 22.86°N),震源深度为 29.1 km,美浓地震震中坐标为(120.43°E, 22.94°N),震源深度约为 17.3 km^[4]。利用地震波^[5-6]、大地测量^[7-13]等数据资料进行独立数据或联合数据的震源参数反演结果总体差异不大,均表明这两次地震的发震断层为 NNW 走向朝 NE 倾斜,且均表现为小倾角逆冲兼走滑的盲断层,但对于这两次地震均有学者作出为多断

层滑动导致的推断^[9]。对现有的研究结果分析可以发现,这两次地震不仅发震时间相隔很短(6年)、震中位置相距很近(约20 km),其震源机制也十分相似。然而就目前的研究而言,除了文献[10]对这两次地震之间的关系有过简单推测外,尚未有学者对这两次地震之间的相互关系进行过深入研究。同时,目前对于这两次地震发生后周边断层的应力积累和释放情况也缺少深入系统地研究和评估。地震与地震间的触发关系是理解地震发生与断层构造变化的重要资料;地震发生后周边断层的应力变化则是周边区域地震风险评估、灾害预警的重要参考。大地测量用于地震反演已有较多成功实例^[14-21]。相对于传统方式而言,利用 InSAR 和 GPS 进行地震研究具有很大的优势,InSAR 能够在较大范围内(5~500 km)快速地获得连续的同震形变观测;而点状测量的 GPS 测量精度高,数据稳定,可迅速获得测量结果。利用 InSAR 和 GPS 进行联合地震反演既利用了 InSAR 大面积连续性观测的优点,又结合了 GPS 精度高、数据稳定的优势,所以能够获得较准确、细致的反演结果;基于静态库伦应力研究地震间触发关系也已是较为成熟可靠的技术^[22-23],随着 SAR 卫星的增多、重返周期的缩短,利用 InSAR 和 GPS 结合静态库伦应力改变模型进行地震触发关系及应力影响研究也变得更为有力。

为了更好地理解美浓地震和甲仙地震的关系并分析这两次地震发生后周边的高风险区域,本文在文献[11]的基础上,利用合成孔径干涉雷达技术(InSAR)获取了甲仙地震的 InSAR 同震形变场;利用采样后的 InSAR 同震形变数据和 GPS 数据获取了它的断层几何参数和滑动分布模型;基于美浓地震和甲仙地震的滑动分布模型以及静态库伦应力改变模型对二者的触发关系进行了研究;最后结合上述结果和历史断层数据对这两次地震发生后周边的7条断层进行了库伦应力改变分析和风险评估。

1 甲仙地震的同震形变场与震源参数反演

1.1 甲仙地震同震形变场获取与分析

本文采用了一对能覆盖主要形变区域的 ALOS 升轨影像(2010年2月23日—8月26日)

获取甲仙地震的同震形变场,如表1所示,其中 ALOS 卫星数据由 JAXA 的 PP3214002 项目提供。InSAR 数据处理采用 GAMMA 软件进行,本文采用了 90 m 分辨率的 SRTM DEM(shuttle radar topography mission digital elevation model)数据模拟地形相位以去除干涉图中的地形;利用 Goldstein 自适应滤波方法滤波^[24],减弱了噪声的影响并获取了干涉图;再通过最小费用流法(minimum cost flow, MCF)进行相位解缠、相位数值变换,最终获取了卫星视线向(line of sight, LOS)的地表形变,如图2(a)所示。在采样之前笔者对远离震中的山区以及受大气影响较严重或失相较严重区域的数据人为掩膜,以减弱观测误差对反演结果的影响。经过四叉树采样后本文为甲仙地震获取了288个 InSAR 观测点,如图2(b)所示。本文还将文献[8]提供的甲仙地震的同震 GPS 数据加入到联合反演之中以提高反演精度。

表1 生成甲仙地震同震形变场的 InSAR 影像信息

Tab.1 Interferogram information of Jiashian earthquake

地震	卫星	主影像	从影像	模式	垂直基线 /m
甲仙地震	ALOS	20100223	20100826	升轨	494

同震形变结果显示,甲仙地震和美浓地震的主要形变区域距离十分接近。而且甲仙地震的同震形变与美浓地震相似,也是以正值(靠近卫星方向)为主^[11]。甲仙地震所产生的地表形变在总体上小于美浓地震,信噪比较高。ALOS 卫星观测到的甲仙地震最大形变为 5.9 cm。将 GPS 的三维形变投影到 LOS 方向后,最大形变为 GS51 台站观测到的 3.6 cm,在该位置 InSAR 观测到的形变为 4.3 cm^[8]。甲仙地震的主要形变区域被旗山断层纵穿,但从此次地震的形变特征中并未发现明显分界痕迹。

1.2 甲仙地震的断层几何参数

基于上文获取的 InSAR 和 GPS 同震形变数据,本文采用了粒子群非线性搜索算法和矩形弹性半空间位错模型进行甲仙地震的断层几何搜索^[25-26]。本文首先采用大范围和大粒子数量进行全局搜索,当获得初步的参数结果后再缩小搜索范围进行多次迭代搜索最后获得稳定的断层几何参数,结果如表2所示。

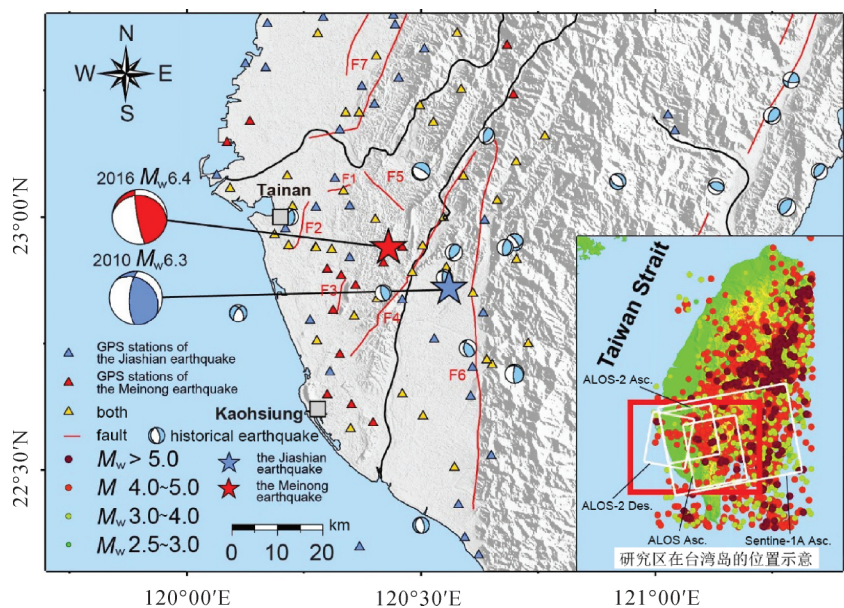


图 1 研究区域位置、InSAR 数据覆盖范围、GPS 台站与历史地震分布

Fig.1 Study area, InSAR data coverage, GPS stations and historical earthquake distribution

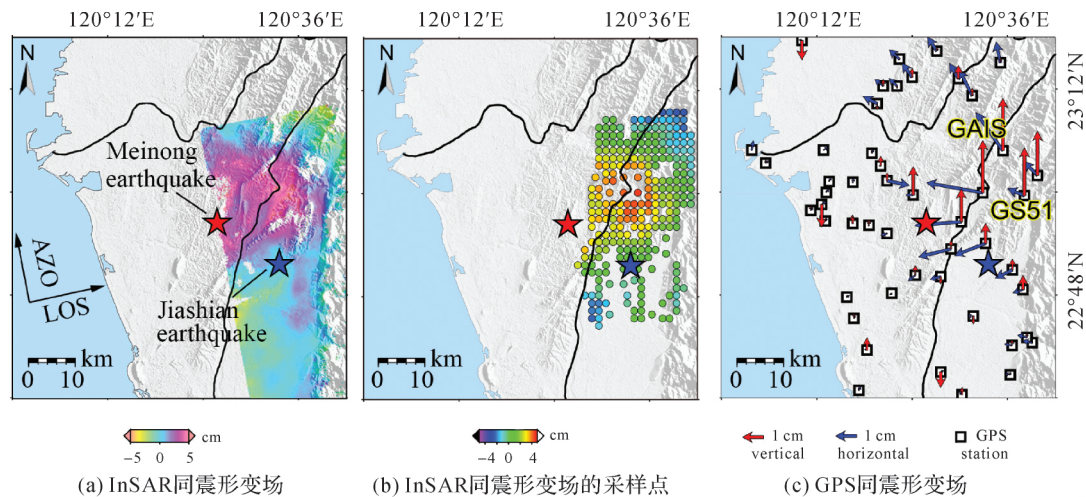


图 2 甲仙地震 InSAR 和 GPS 同震形变场

Fig.2 The coseismic deformation fields observed by InSAR and GPS

表 2 甲仙地震与美浓地震的断层几何参数对比

Tab.2 Comparison of fault parameters between the Jiashian and Meinong earthquake

地震	来源	东经/(°)	北纬/(°)	长度/km	深度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	M_w
甲仙地震	本文	120.65	22.97	21	15	328	27.7	43	6.20
	USGS	120.80	22.92	—	21	310	26	42	6.21
	GCMT	120.56	22.86	—	29.1	313	30	45	6.3
美浓地震	文献[11]	120.42	22.92	15	12	307	16.5	51.5	6.33

获得参数后本文对反演结果进行了蒙特卡洛分析。本文利用获得的参数正演出地表形变,并将正演出的 InSAR 和 GPS 地表形变数据分别加上均值为 0、方差为 5 mm 和 1 倍中误差的随机正态分布误差,构建了 200 组模拟观测数据,并利用

这些数据进行非线性反演,得到的各参数结果如图 3 所示。图中最底部为各参数 200 次反演结果的统计直方图,其他图为各参数之间的相关性分布,各参数的均值和 95% 的置信水平的标准偏差已在图 3 右侧给出。从图 3 可以看出,该参数结

果除少部分几何参数有一定偏差外(如长、宽),大部分参数结果稳定可靠。表 2 中给出了 USGS 和 GCMT 中提供的甲仙地震断层参数,从结果来看,本文的非线性反演结果总体上与这两个机构给出的结果吻合,机构给出的结果基本上在本文

结果的 95% 置信区间内。但是本文获得的结果中深度略浅于其他机构,然而从本文蒙特卡洛分析结果可知,深度的 95% 的置信偏差并不大,可认为本文的结果更可靠。

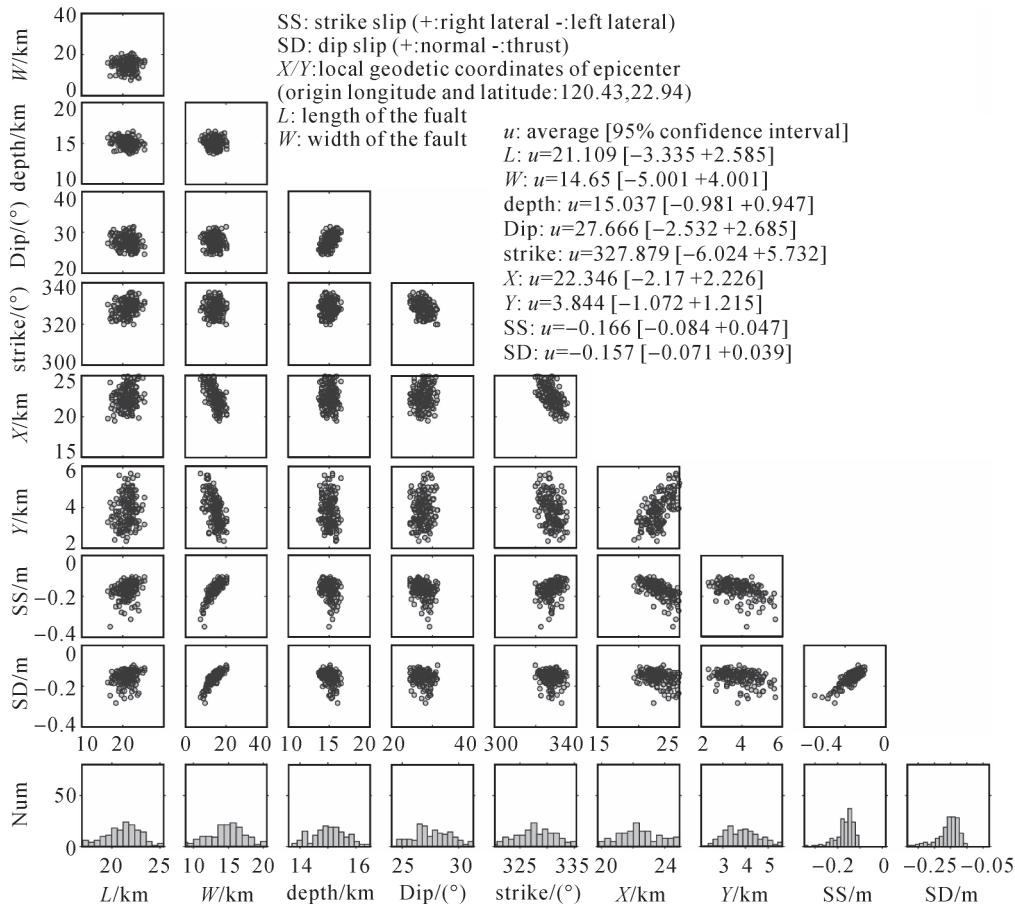


图 3 非线性参数反演的蒙特卡洛分析结果

Fig.3 The Monte-Carlo analysis of nonlinear parameter inversion

初步获取的断层几何参数显示,甲仙地震的发震断层为 NWN 走向往 EN 倾斜,倾角小于 30° ,震源深度 15 km,为一次小倾角的逆冲兼左旋走滑盲断层滑动引起的地震。该断层几何与美浓地震发震断层参数类似,但甲仙地震发震断层滑动角比美浓地震略小,表明甲仙地震的走滑分量占比较大。以上结果与已有的基于地震波^[5]、大地测量数据^[9]的研究结果吻合。

1.3 滑动分布模型反演与结果分析

本文采用了文献[11]的方法获取平滑因子并进行滑动分布反演。反演的模型如下

$$\begin{bmatrix} d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{ss} & G_{ds} \\ \lambda H_{ss} & 0 \\ 0 & \lambda H_{ds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{ss} \\ m_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$m_{ss} \geq 0, \quad m_{ds} \geq 0$

式中, d 为参与反演的 InSAR 和 GPS 地表形变观测值; G_{ss} 和 G_{ds} 分别为走滑和倾滑量的格林函数; H_{ss} 和 H_{ds} 为走滑和倾滑分量的平滑约束矩阵,该约束可以避免相邻断层单元的滑动量发生跳变; λ 为平滑因子; m_{ss} 和 m_{ds} 分别为待求解的每个单元的走滑量和倾滑量; ε 为观测误差。本文首先将甲仙地震的断层扩展到 32×24 km,再将其划分为 1×1 km 大小的 768 个断层单元,经过适当平移断层后使得主要滑动区域居中。经过迭代反演后获得的平滑因子为 0.02,最终获得的甲仙地震滑动分布结果见图 4。图 4(a)左下角插图为三维视角下的断层模型;图 4(d)中深蓝和浅蓝箭头分别为 GPS 水平观测值和模拟值;图 4(e)中红色和橙色箭头分别为 GPS 垂直观测值和模

拟值;图 4(f)中蓝色和红色箭头分别为 GPS 水平和垂直方向的模拟残差。

滑动分布结果显示,甲仙地震的主要滑动区域深度略大于美浓地震,处于 12~16 km 深度之间,最大滑动量为 0.61 m 位于约 14 km 深处。线性反演得到的甲仙地震地震矩为 2.27×10^{18} Nm,相当于 $M_w 6.20$ 。甲仙地震的形变中心为倾滑分量占主导,而在形变中心上部逐渐转变为走滑分量占主导,总体走滑分量与倾滑分量比值为 1:1.24,该比例高于美浓地震。图 4(b)为本文断层模型(图 4(a))正演得到的 LOS 向同震形变图,图 4(c)为观测值解缠后与模拟值之差再缠绕的结果。从图 4(c)及图(d)(e)(f)中的 GPS 形变正演结果可以看出本文断层能够较好地还原地表形变。

2 甲仙地震与美浓地震的库伦应力改变分析

地震发生后的静态库伦应力改变是研究地震与地震之间关系的重要分析指标,其在地震触发关系以及风险评估方面已有较多应用^[22]。较常用的静态库伦应力改变模型如下

$$\Delta CFS = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma_n \quad (2)$$

式中, ΔCFS 为静态库伦应力改变值; $\Delta \tau$ 表示断层滑动方向上的剪切力改变值; μ' 表示有效摩擦系数(本文取 0.4); $\Delta \sigma_n$ 为接收断层上的应力变化(以张应力为正)。

本文利用最优拟合的美浓地震滑动分布模型^[11]和甲仙地震滑动分布模型(图 4)来研究这两次地震发生后的库伦应力改变。本文收集了这两次地震周边的 7 个断层的基本断层几何参数并为它们按 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 格网建立了断层模型来进行应力改变计算^[3]。本文将这两次地震引起的应力变化分为 3 部分进行分析:①以甲仙地震断层为发震断层,美浓地震断层及周边断层为接收断层进行库伦应力改变分析(图 5(a));②以同样的方法计算了美浓地震发生后甲仙地震断层及其他断层的库伦应力改变情况(图 5(b));③本文获取了这两次地震后周边断层总的应力变化情况以分析这两次地震对周边断层造成的影响(图 5(c))。图 5 中的断层标注与图 1 一致,透明矩形为发震断层,带格网四边形为接收断层,接收断层上每个格子表示 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 大小的断层单元。

图 5(a)结果显示,甲仙地震发生后靠近其发

震断层区域的最大增量和最大减量均超过 0.3 MPa,尤其是与其断层参数相似的美浓地震断层,该断层上最大增值为 4.0 MPa,位于地表下 15 km 深处,然而在该断层中部也存在一块应力减小区域,该区域与甲仙地震主要形变区域十分接近。除了美浓地震断层外,周边几个断层也受到了一定影响,如距震中较近的潮州断层和旗山断层以及六甲断层南部。美浓地震发生后,甲仙地震断层应力变化并不明显,平均增值仅为 0.03 MPa,然而周边的左镇断层应力增值较大,平均增值为 0.14 MPa,最大增值达到了 0.27 MPa,且主要增量区域都集中在断层上部。两次地震后周边的综合应力变化如图 5(c)所示,结果显示,应力增长最显著的是左镇断层,新化断层、后甲里断层上部以及六甲断层南端少部分区域。

3 讨 论

3.1 甲仙地震与美浓地震的触发关系及地下构造

结合本文与文献^[11]的研究成果可以看出,甲仙地震与美浓地震的断层结构十分相似,二者均表现为倾滑占主导兼一定走滑分量的逆冲断层。就走滑分量而言,甲仙地震占比高于美浓地震,所以甲仙地震发震断层具有更多偏北方向的滑动分量。这两个发震断层走向角相差约 20° ,走向方向上以一种近平行的方式处在不同深度。由于倾角相差约 11° ,这两个断层有可能相交(图 6),但是这取决于这两个断层的长度,从目前的主要破裂区域看来,位于较浅深度的美浓地震破裂并未延伸至底部,二者主要滑动区域也未重叠,所以在底部相交的可能性较小。图 5(a)显示甲仙地震后美浓地震发震断层上既有应力增加区域也有应力减少区域,其中应力增加区域占主导,最大增值为 4.0 MPa,相对于周边其他断层而言,该断层应力增加最大,通常认为应力增值大于 0.01 MPa,则地震间可能存在加速触发作用^[22]。就此而言,甲仙地震对美浓地震具有十分明显地加速作用。虽然美浓地震震级比甲仙地震大,但是美浓地震发生后,甲仙地震发震断层的应力增长却并不明显,平均增值仅为 0.03 MPa。这是由于这两个断层主要滑动区域所处的深度不同,甲仙地震发震断层较深,该断层上盘滑动对美浓地震断层的下盘具有较大影响;而美浓地震断层较浅,其上盘逆冲运动对下盘影响较小(图 6)。

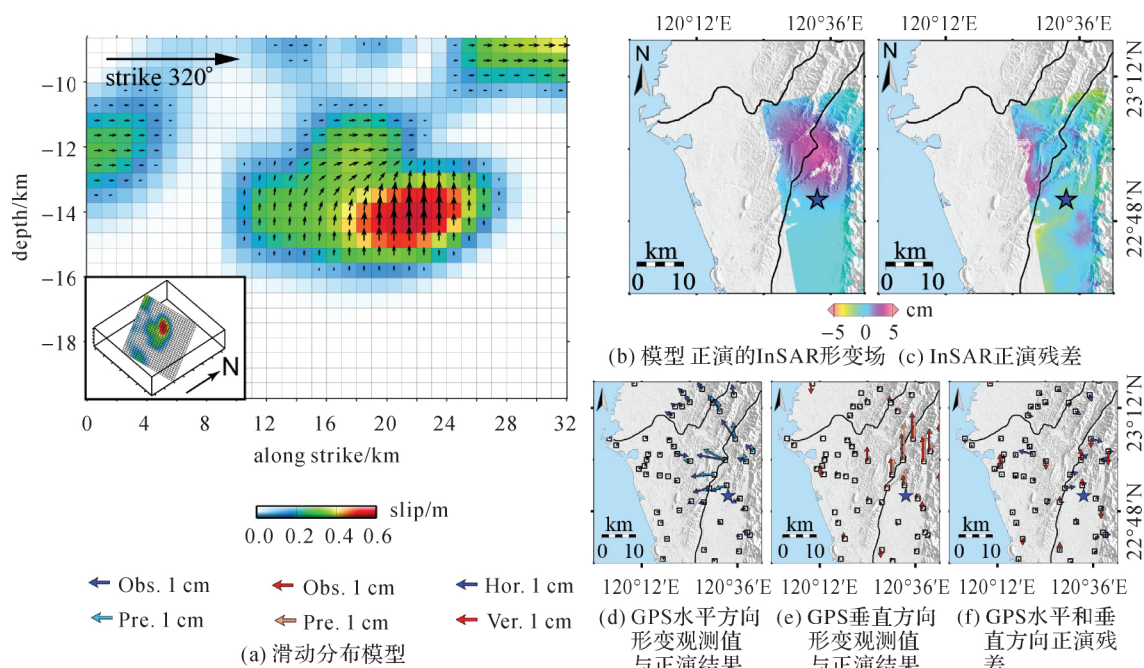


图4 甲仙地震的断层滑动分布模型、正演结果及残差

Fig.4 The slip distribution model, InSAR and GPS forward results and residuals of the Jiashian earthquake

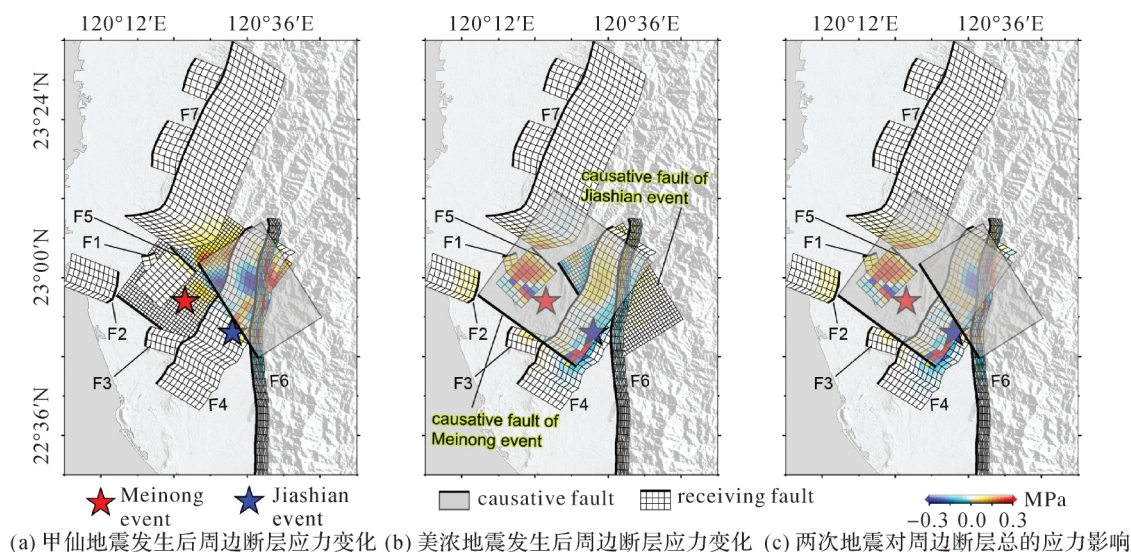


图5 甲仙地震和美浓地震后周边主要断层的应力变化

Fig.5 Stress changes of the major faults in SW Taiwan after Jiashian and Meinong earthquakes

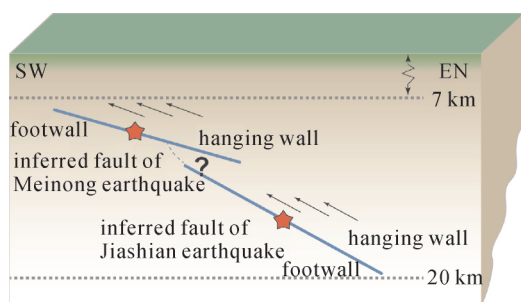


图6 甲仙地震和美浓地震发震断层相对位置

Fig.6 The relative location between the causative faults of the Jiashian and Meinong earthquakes

3.2 地震风险评估

图5的结果显示甲仙和美浓地震对周边断层造成了一定的影响,较为明显的为左镇断层、新化断层、后甲里断层上部以及六甲断层南端少部分区域。这些断层在历史上中强震较少,从有记载以来,台湾西南区域发生的破坏性地震共6次,其中3次都发生在美浓地震西侧的新化断层附近^[27]。然而甲仙和美浓地震后,虽然新化断层整体应力增加但增幅不大,平均增值为0.1 MPa。后甲里断层、小岗山断层及六甲断层有不同程度

的应力增长,但是增值并不明显,所受影响较小。潮州断层和旗山断层虽然与两个发震断层距离较近,但由于断层几何差异较大,所受影响同样较小。为了分析甲仙地震和美浓地震对周边断层不同深度的影响,本文截取了 3 个不同深度的应力变化剖面(图 7)。图 7 中的断层标注与图 1 一致;黑色实心小矩形分别为这两次地震的余震^[27]。从图 7 中可以看出,甲仙地震发生后对 10~15 km 深度影响较大,美浓地震的影响主要集中在 10 km 处。美浓地震发生后,其发震断层西侧出现了大面积的应力增强区,西侧的左镇断层和新化断层正是主要受到美浓地震的影响产生了较大的应力积累。结合图 5 和图 7 可以看出,左镇断层

的应力积累最为明显,而且该断层的应力增值集中在浅部,最大增值为 0.27 MPa,位于约 6 km 深处。根据已有记载,左镇断层总长约 10 km,位于新化丘陵附近,断层为 NW-ES 走向,朝西南倾斜。该断层线性边界明显,但是从地表地质调查中无法了解其活动年代所以将其归类为存疑的活动断层。通过本文的研究,发现甲仙和美浓地震发生后,左镇断层应力增长明显,而且应力增值集中在断层的浅部,使得该断层成了一个危险断层。截止到目前,对于该断层的研究较少,仅仅是对其基本断层几何有所了解,为了避免该断层滑动产生较大损失,可以对该断层进行持续的研究。

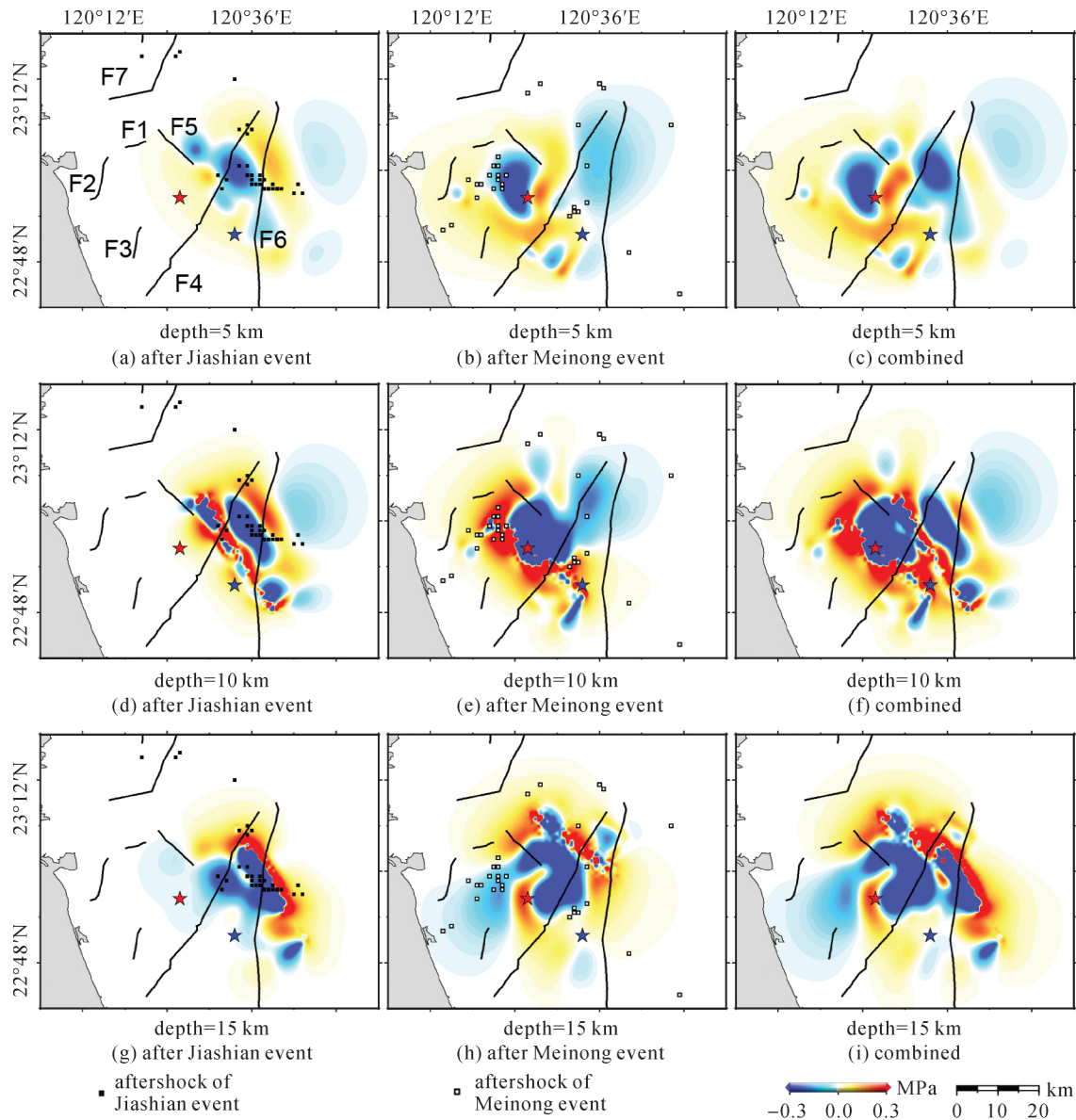


图 7 甲仙地震和美浓地震后台湾岛西南部不同深度的应力变化

Fig.7 Stress changes at different depths in southwestern Taiwan after the Jiashian and Meinong earthquakes

4 结 论

InSAR 和 GPS 等大地测量手段为地震研究者提供了更多、更快速、全面和精确的研究数据,地震研究者可以利用这些数据对同震形变、断层几何以及更复杂的触发关系进行更为详细的全面的研究,以进一步揭开地震的神秘面纱。本文利用 InSAR 数据生成了甲仙地震的同震形变场;基于降采样后的 InSAR LOS 形变数据和三维 GPS 数据反演获取了甲仙地震的断层滑动分布;结合文献[11]和本文的滑动分布模型,基于库伦应力改变情况分析了甲仙地震与美浓地震之间的关系;根据已有断层资料,分析了台湾西南部其他 7 个主要断层的应力改变情况并对存在的高风险区域进行了分析讨论。主要结论如下:

(1) 甲仙地震与美浓地震的断层结构十分相似,二者均表现为倾滑逆冲兼一定走滑分量的断层。这两个发震断层在地底是否相交尚不明确。

(2) 甲仙地震发生后美浓地震发震断层应力普遍增高,前者对后者具有较明显的加速作用。甲仙地震和美浓地震均为台湾西南少有的 6 级以上破坏性地震,二者明显的促进关系应该提高相关学者的注意,应该针对该区域的进一步进行持续、详细研究,以减轻下一次可能的地震带来的损失。

(3) 甲仙与美浓地震发生后对周边断层造成了一定影响,其中左镇断层应力增加明显,值得进一步关注。此外,曾发生多次破坏性地震的新化断层整体呈现应力增加状态,虽然增幅不大但是同样值得持续关注。

参考文献:

- [1] 台湾地震科学中心. 2016/02/06 M6.4 高雄美浓地震(PPS) [EB/OL]. (2016-02-06) [2018-10-01]. http://tec.earth.sinica.edu.tw/new_web/upload/news/EQfile/2016-02-06M6.4.ppsx.
Taiwan Seismological Science Center. 2016/02/06 M6.4 earthquake in Meinong, Gaoxiong, Taiwan(PPS). [EB/OL]. (2016-02-06) [2018-10-01]. http://tec.earth.sinica.edu.tw/new_web/upload/news/EQfile/2016-02-06M6.4.ppsx.
- [2] USGS. Earthquake catalog released by U.S. Geological Survey [DB/OL]. (2016-02-06) [2018-10-01]. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
- [3] 台湾地质调查所. 台湾活动断层[DB/OL]. (2013-08-20) [2018-10-01]. <http://fault.moeacgs.gov.tw/MgFault/index.php/2017-06-16-09-18-50/2017-06-22-05-59-26>
Taiwan Geological Survey Institute. Active faults in Taiwan[DB/OL]. (2013-08-20) [2018-10-01]. <http://fault.moeacgs.gov.tw/MgFault/index.php/2017-06-16-09-18-50/2017-06-22-05-59-26>
- [4] GCMT. The global centroid-moment-tensor (CMT) project [DB/OL]. (2016-02-06) [2018-10-01]. <http://www.globalcmt.org>.
- [5] LEE S J, MOZZICONACCI L, LIANG W T, et al. Source complexity of the 4 March 2010 Jiashian, Taiwan, earthquake determined by joint inversion of teleseismic and near field data[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 64 (3): 14-26. DOI: 10.1016/j.jseaes.2012.11.018.
- [6] LEE S J, YEH T Y, LIN Y Y. Anomalous large ground motion in the 2016 ML 6.6 Meinong, Taiwan, earthquake: a synergy effect of source rupture and site amplification[J]. Seismological Research Letters, 2016, 87(6): 1319-1326. DOI: 10.1785/0220160082.
- [7] CHING K E, JOHNSON K M, RAU R J, et al. Inferred fault geometry and slip distribution of the 2010 Jiashian, Taiwan, earthquake is consistent with a thick-skinned deformation model [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 301 (1-2): 78-86. DOI: 10.1016/j.epsl.2010.10.021.
- [8] HSU Y J, YU S B, KUO Longchen, et al. Coseismic deformation of the 2010 Jiashian, Taiwan earthquake and implications for fault activities in southwestern Taiwan [J]. Tectonophysics, 2011, 502(3-4): 328-335. DOI: 10.1016/j.tecto.2011.02.005.
- [9] HUANG Monghan, DREGER D, BÜRGEMANN R, et al. Joint inversion of seismic and geodetic data for the source of the 2010 March 4, M_w 6.3 Jia-Shian, SW Taiwan, earthquake[J]. Geophysical Journal International, 2013, 193(3): 1608-1626. DOI: 10.1093/gji/ggt058.
- [10] HUANG Monghan, TUNG H, FIELDING E J, et al. Multiple fault slip triggered above the 2016 M_w 6.4 Meinong earthquake in Taiwan[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(14): 7459-7467. DOI: 10.1002/2016GL069351.
- [11] 王乐洋, 高华, 冯光财. 2016 年台湾美浓 M_w 6.4 地震震源参数的 InSAR 和 GPS 反演[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2578-2588. DOI: 10.6038/cjg20170707.
WANG Leyang, GAO Hua, FENG Guangcai. InSAR and GPS inversion for source parameters of the 2016 M_w 6.4 Meinong, Taiwan earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60 (7): 2578-2588. DOI: 10.6038/cjg20170707.
- [12] 高华. InSAR 震源参数反演与地震触发关系研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2018.
GAO Hua. Research on InSAR seismic source parameter inversion and the triggering relationship between earthquakes[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2018.

- [13] LIN Kuanchuan, DELOUIS B, HU J C, et al. Reassessing the complexity of the rupture of the 2010 Jia-Shian earthquake (M_w 6.2) in Southwestern Taiwan by inverting jointly teleseismic, strong-motion and CGPS data[J]. *Tectonophysics*, 2015, 692: 278–294. DOI: 10.1016/j.tecto.2015.09.015.
- [14] 王乐洋. 基于总体最小二乘的大地测量反演理论及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
WANG Leyang. Research on theory and application of total least squares in geodetic inversion[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011.
- [15] 王永哲, 朱建军, 李志伟, 等. 利用 PALSAR 数据反演 2010 年玉树地震断层的同震滑动分布[J]. *测绘学报*, 2013, 42(1): 27–33.
WANG Yongzhe, ZHU Jianjun, LI Zhiwei, et al. Coseismic slip distribution inversion of the 2010 Yushu earthquake using PALSAR data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(1): 27–33.
- [16] 刘洋, 许才军, 温扬茂, 等. 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[J]. *测绘学报*, 2015, 44(11): 1202–1209. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2015.20140628.
LIU Yang, XU Caijun, WEN Yangmao, et al. The InSAR coseismic deformation observation and fault parameter inversion of the 2008 Dachaidan M_w 6.3 earthquake[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(11): 1202–1209. DOI: 10.11947/j. AGCS.2015.20140628.
- [17] FENG Guangcai, LI Zhiwei, SHAN Xinjian, et al. Source parameters of the 2014 M_w 6.1 South Napa earthquake estimated from the Sentinel 1A, COSMO-SkyMed and GPS data[J]. *Tectonophysics*, 2015, 655(8): 139–146. DOI: 10.1016/j.tecto.2015.05.018.
- [18] FENG Guangcai, LI Zhiwei, SHAN Xinjian, et al. Geodetic model of the 2015 April 25 M_w 7.8 Gorkha Nepal earthquake and M_w 7.3 aftershock estimated from InSAR and GPS data[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 203(2): 896–900. DOI: 10.1093/gji/ggv335.
- [19] FENG Guangcai, LI Zhiwei, XU Bing, et al. Coseismic deformation of the 2015 M_w 6.4 Pishan, China, earthquake estimated from Sentinel-1A and ALOS2 data[J]. *Seismological Research Letters*, 2016, 87(4): 800–806. DOI: 10.1785/0220150264.
- [20] CHEN Kejie, XU Wenbin, MAI P M, et al. The 2017 M_w 7.3 Sarpol Zahab earthquake, Iran: a compact blind shallow-dipping thrust event in the mountain front fault basement[J]. *Tectonophysics*, 2018, 747–748(2): 108–114. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.09.015.
- [21] XU Wenbin, FENG Guangcai, MENG Lingsen, et al. Transpressional rupture cascade of the 2016 M_w 7.8 Kaikoura earthquake, New Zealand[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(3): 2396–2409. DOI: 10.1002/2017JB015168.
- [22] 汪建军. 同震、震后和震间应力触发[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
WANG Jianjun. Coseismic, postseismic and interseismic stress triggerings[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [23] WANG Leyang, GAO Hua, FENG Guangcai, et al. Source parameters and triggering links of the earthquake sequence in central Italy from 2009 to 2016 analyzed with GPS and InSAR data[J]. *Tectonophysics*, 2018, 744(2): 285–295. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.07.013.
- [24] GOLDSTEIN R M, WERNER C L. Radar interferogram filtering for geophysical applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 4035–4038. DOI: 10.1029/1998GL900033.
- [25] OKADA Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(4): 1135–1154.
- [26] 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. DOI: 10.3969/j. issn. 1004–2903. 2010. 04.007.
FENG Wanpeng, LI Zhenhong. A novel hybrid PSO/simplex algorithm for determining earthquake source parameters using InSAR data[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(4): 1189–1196. DOI: 10.3969/j. issn. 1004–2903. 2010. 04.007.
- [27] 台湾气象局. 地震活动汇总[DB/OL]. (2015–03–02) [2018–10–01]. https://www.cwb.gov.tw/V7/earthquake/damage_eq.htm
Taiwan Meteorological Bureau. Catalogue of seismicity [DB/OL]. (2015–03–02) [2018–10–01]. https://www.cwb.gov.tw/V7/earthquake/damage_eq.htm.

(责任编辑:袁俊军)

收稿日期: 2018-12-20

修回日期: 2019-07-10

第一作者简介: 王乐洋(1983—),男,博士,教授,研究方向为大地测量反演及大地测量数据处理。

First author: WANG Leyang (1983—), male, PhD, professor, majors in geodetic inversion and geodetic data processing.

E-mail: wleyang@163.com

通信作者: 高华

Corresponding author: GAO Hua

E-mail: gaohuastudent@163.com