

周辉,冯光财,李志伟等. 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, 2013, 56(9): 3011-3021, doi: 10.6038/cjg20130914.

Zhou H, Feng G C, Li Z W, et al. The fault slip distribution of the Myanmar M_w 6.8 earthquake inferred from InSAR measurements. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(9): 3011-3021, doi: 10.6038/cjg20130914.

利用 InSAR 资料反演缅甸 M_w 6.8 地震断层滑动分布

周 辉,冯光财*,李志伟,许 兵,雷广渊

中南大学 地球科学与信息物理工程学院,长沙 410083

摘 要 2011 年 3 月 24 日缅甸东北部发生 M_w 6.8 级地震. 本文利用覆盖该地区的升降轨 ALOS PALSAR 数据, 获取了该次地震的同震形变场, 并采用灰度配准技术获取了其地表破裂位移. 针对影像中因轨道不精确造成的非线性长波长误差, 本文采用二次多项式曲面法予以去除, 获取了更为精确的同震形变场. 最后, 基于弹性半空间形变模型反演了该地震的断层滑动分布. 结果表明, 该地震断层滑动以左旋走滑为主, 兼具少许的倾滑运动分量, 断层滑动主要集中分布在断层面 0~10 km 深度范围, 最大滑动量达 5 m, 位于地表以下 5 km 深处. 反演获得的地震标量矩为 $2.49 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$, 震级约为 M_w 6.8 级.

关键词 缅甸地震, ALOS PALSAR, 轨道误差, 断层滑动分布

doi: 10.6038/cjg20130914

中图分类号 P237

收稿日期 2012-11-14, 2013-07-21 收修定稿

The fault slip distribution of the Myanmar M_w 6.8 earthquake inferred from InSAR measurements

ZHOU Hui, FENG Guang-Cai*, LI Zhi-Wei, XU Bing, LEI Guang-Yuan

School of Geoscience and Info-Physics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract On 24th March 2011, an M_w 6.8 earthquake occurred in Northeastern Myanmar, close to Thailand and Laos. We utilize both the ascending and descending orbit ALOS PALSAR data to obtain the coseismic deformation of this event. We also use a quadratic surface to remove the long wavelength orbital ramps related to imprecise orbit information. In addition to phase measurement, we also use offset-tracking technique to obtain coseismic deformation and fault trace, which can assist to construct the fault geometry. The fault slip distribution of Myanmar earthquake is inferred from the InSAR observation based on Okada half-space elastic model. The result shows that there is large sinistral strike-slip in the fault concentrating in the depth above 10 km, with a little dip-slip component. The maximum slip of 5 m is observed at a depth of 5 km. The inverted seismic moment is $2.49 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$ (M_w 6.8).

Keywords Myanmar earthquake, ALOS PALSAR, Orbital ramps, Fault slip distribution

基金项目 国家自然科学基金(41104003, 41222027)和湖南省杰出青年科学基金(13JJ1006)资助.

作者简介 周辉,女,1986年生,研究生,主要从事 InSAR 数据处理以及地震震源参数反演工作. E-mail: zhouhuifriends@163.com

* **通讯作者** 冯光财,博士/博士后, E-mail: fredgps@csu.edu.cn

1 引言

北京时间 2011 年 3 月 24 日 21 时 55 分, 缅甸东北部地区(20. 687°N, 99. 822°E)发生了 M_w 6. 8 级地震, 震源深度约为 8 km, 在不到一分钟时间内, 同一地区又发生 M_w 7. 0 地震, 震源深度约为 230 km, 紧接着发生了一系列 5 级左右的余震. 该地震的震中距中缅边界仅 87 km, 我国广西、云南地区都有震感, 多处房屋受到破坏. 泰国北部清莱地区震感强烈. 地震引发了滑坡、泥石流等地质灾害, 造成至少 74 人死亡, 111 人受伤, 413 所房屋遭到破坏^[1]. 地震发生后不久, 美国地质调查局(USGS)、哈佛大学(Harvard CMT)以及中国地震台网中心(CENC)都很快反演出了这次地震的震源机制解(表 1 和图 1), 三者的震源参数略有不同, Harvard 反演的发震时刻要略晚于其它两个机构, 这是因为 USGS 和 CENC 均采用 P 波初动解对地震进行定位, 震中位置代表地震破裂起始点, 而 Harvard CMT 则是采用矩张量反演法, 震中位置代表地震能量释放最大的地方. 从表 1 可以看出, 三个机构反演出的地震断层倾角均在 87°左右, 断层近乎于直立, 尽管 USGS 反演的滑动角值与 Harvard 以及 CENC 的反演结果有所差异, 但均反映出该地震断层具有左旋走滑性质.

缅甸板块位于欧亚板块和印度洋板块的交界地带, 受印度板块北向运动与欧亚板块相互碰撞与挤压作用的影响, 地震活动比较活跃. 缅甸板块处于印度板块的东部, 印度板块相对于巽他板块以 45 mm/a 的速率向北东东向斜向移动, 形成了缅甸弧形构造区(图 1a). 印度板块与欧亚板块东南亚地区之间的右旋斜滑在缅甸弧形构造地区形成了大量挤压构造和南北向右旋走滑断裂, 同时在金三角地区发育了一系列北东东—南西西走向的左旋走滑活动断层, 从南到北依次为 Mae Chan 断裂、南玛断裂(Nam Ma fault)、勐醒断裂(Meng Xing fault)、孟连断裂

(Menglian fault)、南汀河断裂(Nanting fault)和龙陵—瑞丽断裂(Longling-Ruili fault)等, 这些断裂带彼此平行, 相互作用, 并且在断裂两端形成了拉分盆地, 这是典型的书斜式断裂(bookshelf faults)^[2]. 晚第四纪以来, 这些断裂带活动强烈, 沿这些断裂带区域发生了一系列 6 级以上地震^[3-4]. 这次地震就发生在该地壳运动比较复杂的地区, 南玛活动断裂带上. 南玛断层走向 250°, 倾角较陡, 平均滑移量为 2. 4 mm/a, 近 5 百万年以来错距已达 12 km^[5]. 由于缅甸东北部与中国西南部接壤, 中国云南滇西地区地震活动可能与缅甸地震带有密切的关联^[6]. 如 2011 年 3 月 10 日, 云南盈江(24. 727°N, 97. 597°E)在该断裂带区域发生了 M_w 5. 5 级地震, 震源深度为 10 km, 造成多人伤亡^[7]. 因此, 确定缅甸地震的同震形变场, 并反演其断层滑动分布, 不仅有助于进一步理解缅甸地震的发震机理和断层破裂分布特征, 而且对于认识中国西南部板块的运动特征具有非常重要的意义.

近年来迅速发展的差分雷达干涉技术(Differential Interferometric Synthetic aperture Radar, D-InSAR), 具有高空间分辨率、高精度、以及大范围空间连续覆盖等众多优势, 与传统形变监测方法相比, 可以为地震监测提供更为详尽的破裂信息. 国内已经有许多学者利用 InSAR 资料对地震开展研究, 并取得可靠成果, 如 1997 年玛尼 M_w 7. 5 级地震^[8-9], 2008 年汶川 M_w 7. 9 地震^[10], 以及 2011 年日本东海岸 M_w 9. 0 地震^[11]等, D-InSAR 技术在地震形变监测方面体现出无穷的潜力.

针对地震发生在人烟稀少, 地形起伏较大(最高海拔达 2400 多米), 植被茂盛, 气候比较湿润, 自然环境非常恶劣, 野外变形监测困难等因素, 本文拟选取 L 波段的 ALOS PALSAR 升降轨影像, 来研究缅甸地震的同震形变、空间分布特征以及断层滑动分布等. 我们首先通过对震前震后 InSAR 数据进行差分干涉, 并通过二次多项式模型去除干涉图中残余的轨道相位, 获取更为精确的同震形变场, 接着利

表 1 不同地震机构估计的缅甸地震震源参数表

Table 1 Earthquake mechanisms from different earthquake institutions

信息来源	纬度(°N)	经度(°E)	震源深度(km)	走向(°)	倾角(°)	滑动角(°)	震级 M_w
USGS	20. 687	99. 822	8	250	86	-2	6. 9
Harvard	20. 65	100. 06	12. 6	70	86	10	6. 8
CENC	20. 673	99. 882	8	68	87	10	6. 7
本文结果	20. 66	99. 96	—	70. 5	86	6. 28	6. 8

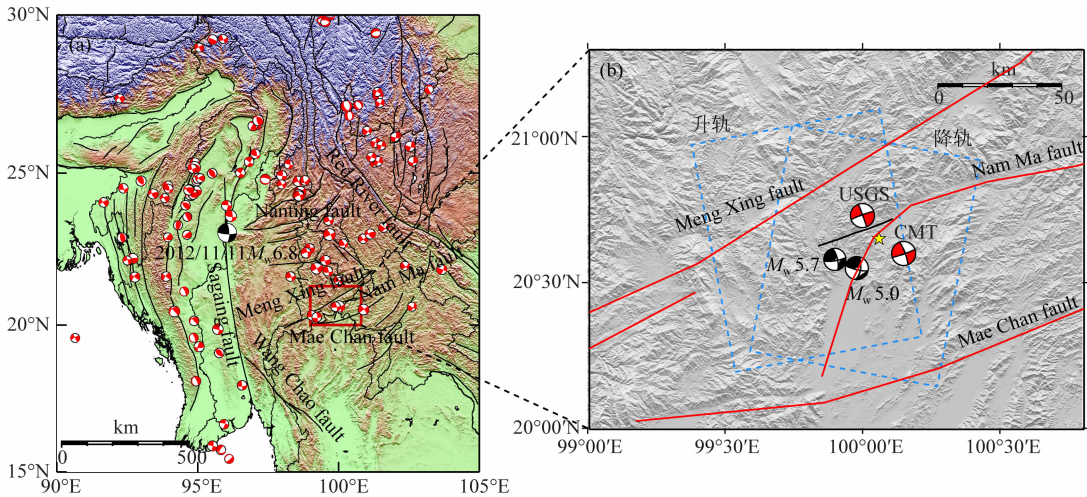


图1 缅甸地震震中地质构造背景

(a) 区域内活动断层分布。图中暗红色方框为发震地区,红白球代表近 35 年内该区域内 5.0 级以上地震的震源机制。黑白球表示 2012 年 11 月 11 日缅甸 M_w 6.8 地震震源机制。(b) 图(a)暗红色方框所指区域地质构造。背景是 90 m 分辨率的 SRTM DEM。蓝色虚线框为 ALOS PALSAR 数据升轨与降轨的覆盖范围(每景覆盖约为 $70 \text{ km} \times 70 \text{ km}$);黄色五角星为 CMT 确定的震中位置;图中黑色实线为本文推测的发震断层。红白圆分别为 USGS 和 CMT 给出的震源机制解,黑白圆则分别为 CMT 给出的 2011 年 3 月 24 日 M_w 5.7 级余震以及 2011 年 3 月 25 日 M_w 5.0 级余震的震源机制解。

Fig. 1 Tectonic background of the Myanmar earthquake

(a) Active faults of the study region. The dark red frame represents the area of the Myanmar earthquake. The red-white balls show the earthquakes with magnitudes equal to or more than 5.0 in recent 35 years. The black-white ball denotes the focal mechanism of the M_w 6.8 earthquake on November 11th, 2012. (b) The tectonic background of the area denoted by the dark red frame in Fig. (a). The topography is 90 m resolution SRTM DEM. Blue dashed frames indicate the coverage of the ascending and descending ALOS PALSAR data (Every scene covers $70 \text{ km} \times 70 \text{ km}$); yellow star is the epicenter from CMT; black line represents the inferred fault rupture. Focal mechanisms from USGS and CMT are shown in red-white circles. Circles in black-white color denote the focal mechanisms of the M_w 5.7 aftershock on March 24th, 2011 and M_w 5.0 aftershock on March 25th, 2011, respectively.

用灰度匹配技术,获取雷达影像距离向和方位向偏移量,确定该地震的断层几何,最后结合 Okada^[12]弹性形变模型,反演该地震的震源参数。从公开发表的文献看,尚未有采用 InSAR 资料对该地震进行反演的结果报道。本文的研究将为该地震和该区域的地壳应力变化和地震灾害评估提供依据,为 InSAR 研究类似地区的地震提供参考。

2 同震形变场

2.1 InSAR 数据处理

地震发生后,日本宇航局 JAXA 迅速提供了覆盖缅甸地震的 ALOS PALSAR(L 波段)升降轨影像数据。L 波段的 SAR 影像数据相较于 C 波段来说波长更长,具有一定的穿透性,受植被等地物影响较小,相干性较好。由于发震地区地处偏远的山区,野外调查和观测比较困难,另外该区域 GPS 覆盖稀疏,可使用的地面数据也很少,同时由于欧洲的 ENVISAT ASAR 卫星自 2010 年 10 月以来轨道下

降,可以利用的影像已经非常有限。综合以上各种因素,这次获取的 ALOS PALSAR 数据就成为该地震的重要研究数据源。本研究用数据如图 1 和表 2 所示,两幅影像的时间间隔相同,均为 46 天。其中 Index-1 为升轨影像对,垂直基线较短,仅 34 m,可以减小外部 DEM 误差对形变结果的影响;Index-2 为降轨影像对,垂直基线较大,它完全覆盖了缅甸地震的同震形变场(图 1)。

表 2 ALOS PALSAR 影像信息表

Table 2 The ALOS PALSAR images used in this study

编号	模式	获取时间		时间基线 (d)	垂直基线 (m)
		震前	震后		
Index-1	升轨	2011-02-16	2011-04-03	46	34
Index-2	降轨	2011-02-14	2011-04-01	46	439

本实验使用瑞士 Gamma^[13] 软件作为 InSAR 数据处理的平台,采用二轨差分干涉技术对两对升降轨影像进行干涉处理。分别对两对数据进行配准、重采样、干涉、基线估计后,实验获取的干涉相位 φ

主要由以下几部分相位组成:

$$\varphi = \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{top}} + \varphi_{\text{orbit}} + \varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{noi}}, \quad (1)$$

其中, φ_{def} 为地表形变引起的相位; φ_{flat} 为平地效应引起的相位; φ_{top} 为与地形相关的相位; φ_{orbit} 为轨道误差引起的相位; φ_{atmo} 为大气延迟相位; φ_{noi} 为噪声. 干涉图生成后, 首先根据轨道信息去除平地相位 φ_{flat} . 本实验所需的外部 DEM 采用的是美国 NASA 提供的 90 m 分辨率的 SRTM 数据, 将其模拟成已解缠的地形相位并从干涉图中减去, 从而去除地形相位 φ_{top} . 地形相位误差主要受到所使用的 DEM 垂直精度以及垂直基线长度的影响, 实验所选数据垂直基线最长约为 450 m, 对于 Index-2 影像来说, 10 m 的 DEM 地形误差仅造成视线方向上约 8 mm 的偏移量, 因此这部分误差可以忽略不计. 去除地形相位后, 由于 ALOS PALSAR 数据轨道信息不够精确, 干涉图中存在非常明显的长波长轨道残余相位 φ_{orbit} , 本文将采用 2.2 节提到的方法将其去除. 为了

减弱噪声影响, 对干涉图中的噪声相位 φ_{noi} 使用经典的 Goldstein 滤波方法进行处理. 同时, 使用最小费用流法对干涉相位进行解缠, 由于地震区域植被覆盖茂密, 且地形起伏较大, 水汽影响明显, 因此解缠后干涉图中与地形相关的大气延迟相位 φ_{atmo} 不能忽略^[14], 本文通过回归分析去除与高程相关的大气延迟相位. 此时, 干涉图中就只存在与地震形变相关的相位了, 将其转换为形变图. 最后将雷达坐标系下的形变图进行地理编码, 转换到地理坐标系下, 即可得到该地震视线向同震形变场.

2.2 轨道和大气误差去除

由于 ALOS PALSAR 数据轨道信息不够精确, 在去除平地相位和地形相位后, 差分干涉图中仍存在明显的轨道残余相位(图 2a—2b).

Wang 等在 2007 年采用基于空间域的双线性多项式模型成功去除了偏移量图中由轨道误差造成的系统偏移量^[15], 在频率域方面中南大学朱琨等于

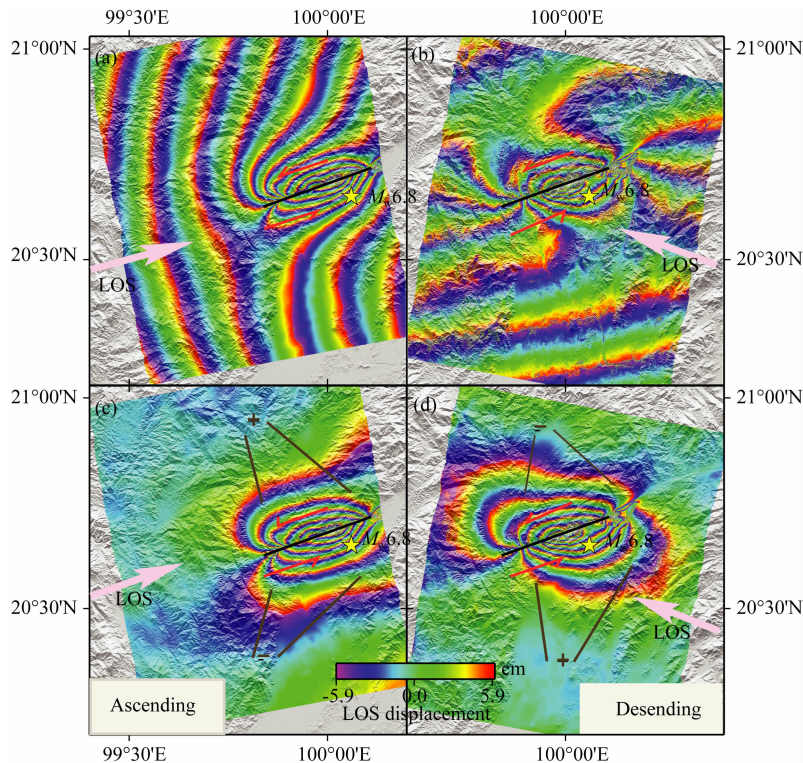


图 2 缅甸地震 InSAR 升降轨同震干涉视线向形变场

(a), (b) 分别为未进行轨道残余相位校正的升降轨方向的同震形变场; (c), (d) 分别为经过轨道残余相位校正之后的升降轨方向的同震形变场. 浅粉色箭头代表卫星视线向方向; 黑色实线为图 1 所表示的断层线; 红色箭头代表断层线两边断层的错动方向; 黄色五角星为 CMT 确定的震中位置; “+”与“-”号分别代表正负视线向形变量. 图中每个色周均代表视线向 11.8 cm 的位移变化.

Fig. 2 The ascending and descending pass coseismic displacement interferogram of the Myanmar earthquake

(a) and (b) indicate before orbit ramp correction; (c) and (d) indicate after orbit ramp correction. Shallow pink arrows denote the look direction from the satellites; Black line represents the fault rupture as shown in Fig. 1; Red arrows imply the movement direction besides the fault; The epicenter from CMT solution is denoted with a yellow star; + and - signs point to positive and negative LOS displacements respectively. Each color cycle represents 11.8 cm of LOS displacement.

2011 年使用条纹频率方法成功移除 SAR 影像中轨道残余相位造成的线性趋势^[16]。然而,这两种方法并不能完全去除轨道残余相位中的非线性信息。针对本研究升轨影像中无法去除的非线性轨道残余信息,本文采用二次多项式拟合法去除残余的轨道相位。在雷达坐标系下,建立以下二次多项式模型:

$$\varphi_{\text{orbit}} = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2, \quad (2)$$

其中 φ_{orbit} 为解缠后的轨道残差相位, x 为距离向坐标, y 为方位向坐标, $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 为待定系数,可通过最小二乘法求得。

首先在干涉图非形变区(远离破裂带)均匀选取若干点,获取这些点的坐标及相位,根据(2)式建立多项式误差模型,并利用最小二乘原理计算出待定系数 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 。然后将这些系数代入(2)式,模拟整幅图像的轨道残差相位,并从干涉图中去除,即可得到去除轨道残差相位后的差分干涉图。在计算过程中,本文同时引入了相干性定权,迭代计算曲面以避免局部误差的影响。从图 2a—2b 可以看出,升降轨差分干涉图中的轨道残余相位都非常明显,通过上述方法建立模型并进行处理后,干涉图中的残余相位基本已去除干净(图 2c—2d)。

由于发震地区气候湿润、地形起伏较大,解缠后的干涉图中存在不可忽略的与高程相关的大气延迟相位,这将影响模型反演的精度,必须借助地形信息进行改正。在雷达坐标系下,本文建立如下模型来削弱这部分相位影响:

$$\varphi_{\text{atmo}} = b_0 + b_1 \times \text{hgt}(x, y), \quad (3)$$

其中, φ_{atmo} 为大气延迟相位, b_0 和 b_1 为待定系数, $\text{hgt}(x, y)$ 为地表高程。运用该模型去除大气延迟相位时,我们首先必须对形变相位进行掩膜处理,以保证选取的样本(即解缠后的干涉图)中只存在大气相位,从而准确估计待定系数 b_0 和 b_1 。

2.3 同震形变分析

在去除长波长轨道和大气误差后,获得了该地震的同震形变图(图 2c—2d)。由图 2c—2d 可以看到,整个形变场的干涉条纹很清晰,震中区域的条纹也很连续光滑。其中降轨影像对完全覆盖了整个同震形变场,形变主要集中在图像的中间部分。两幅影像的干涉条纹以地震造成的 NEE 走向的地表破裂迹线为中心,大致均匀向两边扩展,呈对称分布,且离断层越近,干涉条纹越密集,形变梯度越大,这是走滑型地震的一个显著特征。升降轨影像的条纹部分特点略有不同,这主要是由两者的成像几何关系

不同造成的。升轨影像南北两盘均呈现 6 个色周变化,北盘视线向最大形变达 76 cm,南盘视线向最大形变达 -78 cm。降轨影像北盘干涉条纹向南西方向散射,而南盘向东北方向发散,且发散较慢,整个影像的干涉条纹呈现出左旋扭动的趋势。同时,降轨影像北盘呈现 6 个色周的条纹变化,视线向最大形变达 -77 cm,南盘形变较北盘稍大,呈现出 8 个色周的条纹变化,视线向最大形变量达 90 cm。升降轨影像发震断层两侧视线向形变量差别不大,说明断层倾向近乎直立,这与表 1 中 USGS、Harvard 以及 CENC 给出的震源参数结果吻合。两幅影像中远离形变中心的地方,仍存在少许形变,经分析主要是由于影像中仍存在残余的大气相位或者是余震形变的缘故^[17]。

2.4 Offset-Tracking 确定断层位置

SAR 影像不仅包含了相位信息,同时包含了幅度信息。Offset-tracking 技术利用 SAR 影像的幅度信息,通过配准技术获得 SAR 影像每一个像素距离向偏移量(Range Offset, RO)和方位向偏移量(AZimuth Offset, AZO)^[18]。尽管该技术精度低于采用相位信息的 InSAR 观测结果,但它可以获取到断层附近(即严重失相干区域)的形变信息,弥补相位观测技术的不足。因此,偏移量图可以用来确定断层破裂线的位置^[19]。前面我们使用 SAR 影像的相位信息获取了缅甸地震视线向的位移,这里采用 Offset-tracking 技术分别获取缅甸地震的距离向与方位向偏移量。由于缅甸地区地形起伏较大,降轨数据垂直基线较长,获取的降轨影像距离向偏移量图中存在与地形相关的位移,本文采用 Gamma 软件自带的基于查找表的配准方法^[13]重新对降轨影像进行偏移量估计。经过处理后,降轨影像距离向偏移量图中的地形偏移已基本去除干净(图 3b, 3d)。从图 3a—3d 可以看到,升降轨影像距离向和方位向偏移量图中均存在一条非常明显的断层破裂迹线,与图 2c—2d 进行对照,该破裂迹线正好与升降轨同震形变场中的失相关区域相对应。同时在降轨距离向偏移量图(图 3d)中,破裂迹线上盘接近卫星方向运动,偏移量值为负,下盘远离卫星方向运动,偏移量值为正,升轨距离向偏移量图(图 3b)特征刚好与之相反,这与前面利用相位信息获取的地震同震形变场特征相吻合,断层均表现为左旋走滑运动。最后结合图 2c—2d,在图 3a—3d 中沿破裂迹线进行描点,确定该地震在地表上的破裂位置,并将其作为反演该地震的断层几何。

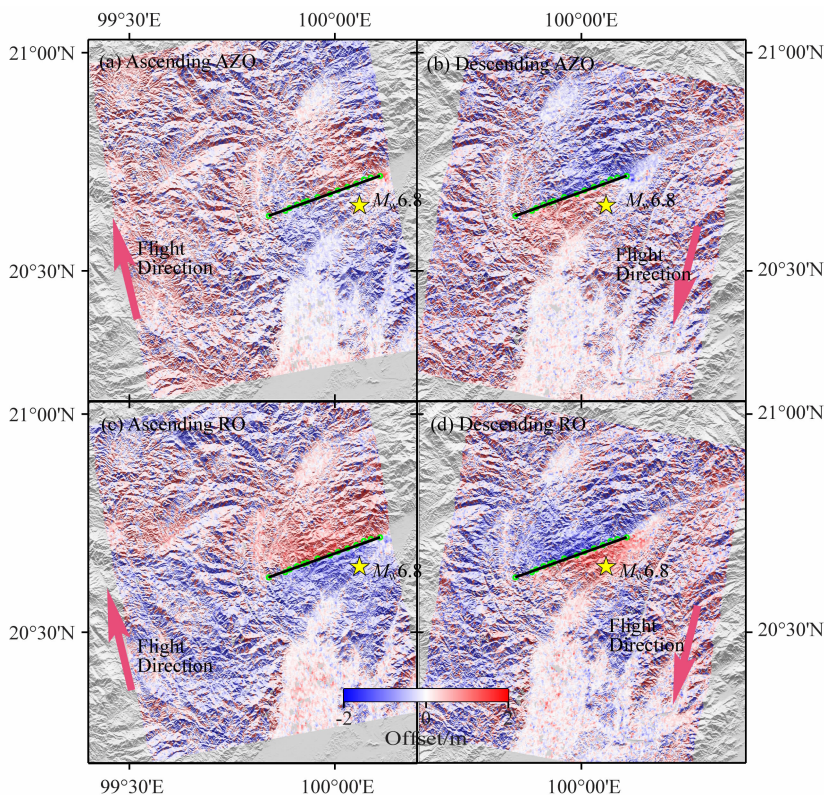


图3 幅度信息估计法估计的升降轨距离向和方位向偏移量

(a), (c) 分别代表升轨影像对方位向和距离向偏移量; (b), (d) 分别表示降轨影像对方位向和距离向偏移量. 黄色五角星为 CMT 确定的震中位置. 图中可以清晰看到由于地震引起的地表破裂迹线. 黑色实线代表推测的发震断层位置; 红色箭头代表卫星的飞行方向. 用幅度信息估计法计算偏移量时, 本文选择了 64×256 的搜索窗口, 以及 6×18 的采样间隔.

Fig. 3 The ascending and descending range and azimuth offsets by Offset tracking technique

(a), (c) The AZO and RO from the ascending orbit; (b), (d) The AZO and RO from the descending orbit. The epicenter from CMT solution is denoted with a yellow star. The surface fracture line caused by the earthquake is obviously shown in the figure. Black line represents the inferred fault rupture; Red arrows denote the flight direction of the satellites. We use a 64×256 search window size and a 6×18 sampling interval to obtain the offsets.

3 断层滑动量反演

根据该地震升降轨同震形变的结果(图 2c—2d), 初步认为该地震规模不大, 断层的滑动分布比较简单. 由于此次地震发生在人烟稀少的“金三角”地区, 且主要是山区, 植被覆盖茂密, 野外形变监测比较困难, 缺乏实地考察数据, 这就使得该地震的断层滑动反演成为第二类反演问题, 即非线性反演问题^[20]. 根据表 1 中研究机构给出的本次地震的震源机制解, 初步认为此次地震大致走向为 70° , 倾角为 86° , 断层具有左旋走滑的性质. 根据以上分析, 本文综合利用上文中获取的缅甸地震同震形变场(图 2c—2d)和方位向偏移量图(图 3a—3b), 确定该地震的断层几何为单一断层类型(图 3a—3d), 并把它作为该地震的断层几何模型, 继而结合 Okada 弹性

形变理论^[12]反演该地震的震源参数.

3.1 数据降采样

由于 InSAR 技术获取的形变信息都是空间连续的, 对于这次地震而言, 仅仅一幅升轨影像数据点个数已达到 10^6 级, 加上降轨影像的数据, 总的数据点个数达到百万个, 全部参与反演, 会大大增加反演的时间, 降低反演效率. 同时, 形变场中的噪声也会造成计算结果很难收敛, 因此有必要对形变场进行数据降采样, 减少数据点个数. 本文采用二叉树算法^[21], 分别对两对影像进行降采样, 既大大减少了数据点个数, 又尽量保留有用的形变信息. 为了防止远场区域采样点数过少, 同时断层附近区域采样过密, 本文设定采样的最大窗口为 128, 最小窗口为 8, 该方法尽管在近场区域会引入一定的误差, 但它使采样结果更为合理(图 4a—4b). 取窗口内的形变均值用于反演, 坐标使用窗口中心的坐标值. 采样结束

后,分别从升降轨影像中提取出 386 和 503 个数据点参与断层滑动分布反演,数据个数仅占原来数据总数的 0.01%。

3.2 反演建模

本文利用单一断层模型初步描述此次地震的震源参数,假定断层出露地表,根据 2.4 节确定的断层几何,利用 9 个参数来描述该地震的断层位移模型,即断层起始点的经纬度、走向、倾角、滑动角、断层的长度、宽度以及分别沿走向、倾向方向的滑动量,其中沿两个方向的滑动量与同震形变位移构成线性关系,有了断层几何模型后,根据 Okada^[12] 线弹性半空间位错理论,建立模型与 InSAR 观测数据之间的线性方程:

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}\mathbf{m} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (4)$$

其中, \mathbf{d} 是 InSAR 视线向观测值, \mathbf{G} 是将模型与滑动量联系起来的格林矩阵, \mathbf{m} 表示每个子断层上分别沿走向和倾向方向的滑动矢量, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 表示 InSAR 数据观测误差。

为了解断层面滑动分布细节,本文根据形变图以及偏移量图确定的单一断层模型,固定断层长度为 36 km,宽度为 20 km,延伸到地表,并把断层按 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 划分为 36×20 个子断层,分别求解每个子断层上的滑动量,最终获取整个断层面的滑动分布。这样就大大增加了待求参数的个数,容易造成结果震荡,为了避免出现这种现象,需要给方程(4)加上一定的光滑约束条件,

$$F(s) = \|\mathbf{d} - \mathbf{G}\mathbf{s}\|^2 + \lambda^2 \|\mathbf{H}\boldsymbol{\tau}\|^2, \quad (5)$$

其中, λ^2 为光滑因子,用来调整模型粗糙度与光滑度之间的折中, \mathbf{H} 为拉普拉斯算子, $\boldsymbol{\tau}$ 为断面上的应力降,表示光滑条件。此时,求解方程(4)的解就变成了求解目标函数(5)的最小值。同时,为了提高反演结果的收敛率,本文参考表 1 中不同机构给出的震源机制解以及本文确定的断层几何模型,固定断层倾角为 86° ,介质泊松比设为 0.25。最后,根据模型粗糙度与光滑度之间的折中曲线,我们确定最终的光滑因子为 0.2。参数设定完成后,反演出缅甸地震的断层滑动分布结果,如图 5 所示。

4 结果与讨论

根据 InSAR 同震形变场和其确定的断层几何模型,反演获得的断层面滑动结果如图 5 所示。由图 5 可以清晰看出,断层面的滑动分布比较集中,主要处于沿走向方向 5~34 km,倾向方向距地表 10 km

以上的区域,断层滑动分布接近地表。在该区域内,断层滑动量存在两个峰值,第一个峰值位于断层面上距地表以下大约 5 km 深处,最大滑动量达 5 m,第二个峰值出现在断层面右侧大约同一深度处,最大滑动量达 3.17 m。在断层面 10 km 以下滑动量值较小的深度范围,还可以清晰看到两个滑动量比较明显的区域,大约在 1 m 左右,这两处滑动量可能是因为本文设定的单一断层模型比较简单而造成的误差。整个断层面滑动量以左旋滑动为主,尤其是在滑动量比较集中的区域,断层滑动几乎呈纯左旋分布,倾滑量主要分布在距地表 8 km 以下比较深的区域,且数值较小,最大倾滑量约为 0.8 m,远远小于最大走滑量 5.0 m。由于对断层深处滑动情况缺乏了解,本文设定滑动角在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内变化,结果显示平均滑动角为 6.28° ,与 Harvard 以及 CENC 给出的 10° 较为接近。

我们上面反演的结果显示断层滑移量主要表现为左旋走滑为主,兼有少许的倾滑运动。为了检验倾滑量是否存在,我们也尝试了纯走滑的模型。将滑动角固定在 0° ,其它参数保持不变,重新反演该地震的断层滑动分布,结果如图 6 所示。与图 5 进行比较,滑动量集中区域并没有发生变化,最大滑动量达 5 m,仍位于断层面距地表约 5 km 深处。在断层面 10 km 以下深度范围,滑动量值要略小于图 5 中同一区域处的滑动量。本文同时分别获取了两种反演情况下升降轨方向形变场的残差图(图 7a—7d),可以清晰看到,残差主要集中在断层两侧区域,远离断层的地方残差较小,且降轨方向上形变场的残差相对大一些,这主要是因为降轨方向垂直基线较大(439 m),外部 DEM 误差对形变结果影响比较严重。分别对比升降轨影像两幅残差图可以看出,在断层附近区域,对模型施加纯左旋走滑约束,对形变场几乎没有影响,残差大小大致相同,但远离形变场中心地区,残差水平有所提高,达到 10 cm,比未对模型施加约束前增加了约 25%。

因此,我们认为这次地震的滑动量主要是以左旋走滑为主,兼具少许的倾滑运动,这也与实际断层的运动状态更为相符。该地震相对于破裂方式比较复杂的汶川地震^[20]来说,断层破裂方式较为简单,数据拟合残差 8 cm 左右,这些误差水平可能是由余震形变、断层模型比较单一以及干涉图中残存的大气误差、轨道误差等因素引起的。参与反演的数据拟合度达 97.3%,这些数据均证明本文得到的断层滑动分布结果具有很好的可靠性。本文选取介质的剪

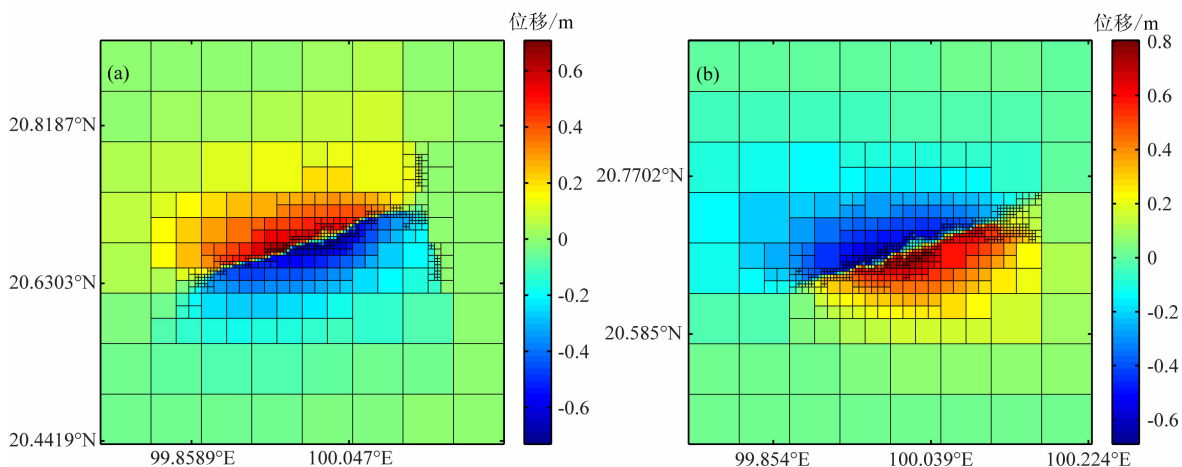


图 4 升降轨同震形变场二叉树采样结果

(a), (b) 分别为升降轨二叉树采样结果。数据所选最小窗口为 8, 最大窗口为 128。经过采样后, 升轨影像对数据点个数降到 386, 降轨影像对数据点个数降到 503, 减少达到原来数据点总数的 0.01%, 大大提高了数据反演的效率。

Fig. 4 The quadtree resampling results of the ascending and descending cosesimic displacement field

(a) The ascending results; (b) The descending results. We choose the minimum window size of 8 and the maximum window size of 128. After resampling the number of datapoints reduced to 386 in the ascending interferogram and 503 in the descending interferogram, 0.01% of the original number, greatly improving the inversion efficiency.

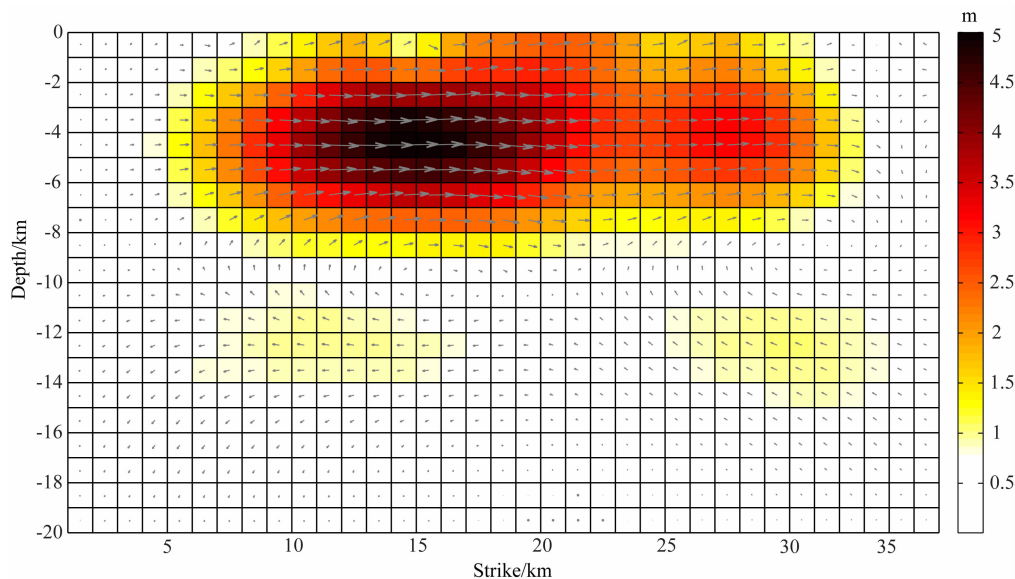


图 5 利用 PALSAR 数据反演的同震滑动分布结果

图中可以清晰看到, 滑动量集中分布在断层面 0~10 km 的深度范围。最大滑动量达 5 m, 位于地表以下 5 km 深处。在同一深度处, 断层面右侧滑动量也有一个峰值, 最大滑动量达 3.14 m。

Fig. 5 The cosesimic slip distribution inferring from the PALSAR data

The slip is primarily concentrated in the depth of 0~10 km of the fault plane. The maximum slip of 5 m is observed at the depth of 5 km. At the same depth there is a another peak of 3.14 m of slip located on the right side of the fault plane.

切模量 $\mu = 32$ GPa, 平均滑动量为 1.08 m, 根据震级计算公式^[22], 计算得到该地震的标量地震矩为 2.49×10^{19} N·m, 震级为 $M_w 6.8$ 级, 比 USGS 给出的矩级略小, 但与 Harvard CMT 给出的矩震级相当一致。

金三角地区主要存在两个走滑断层边界^[23]: 红

河断裂带和 Sagaing 断裂带, 中间又夹持了大量的与南玛断裂性质类似的走滑断层, 这些走滑断层一直保持着强烈的活动性。其中, 南玛断层年平均滑移量 2.4 mm, 近五百万年来错距累积已达 12 km^[5]。2007 年 5 月老挝 $M_s 6.6$ 地震^[24] 也发生在与南玛断层相毗邻的 Mae Chan 断裂带上, 断裂性质为左旋

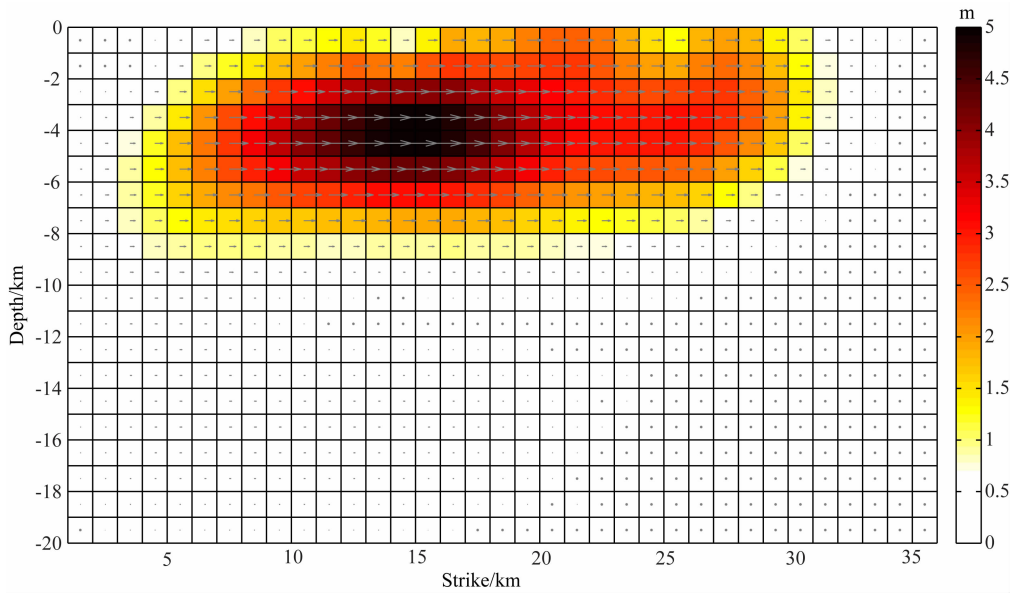


图 6 利用 PALSAR 数据反演的纯左旋滑动分布结果

Fig. 6 The pure left lateral slip distribution result inferring from PALSAR data

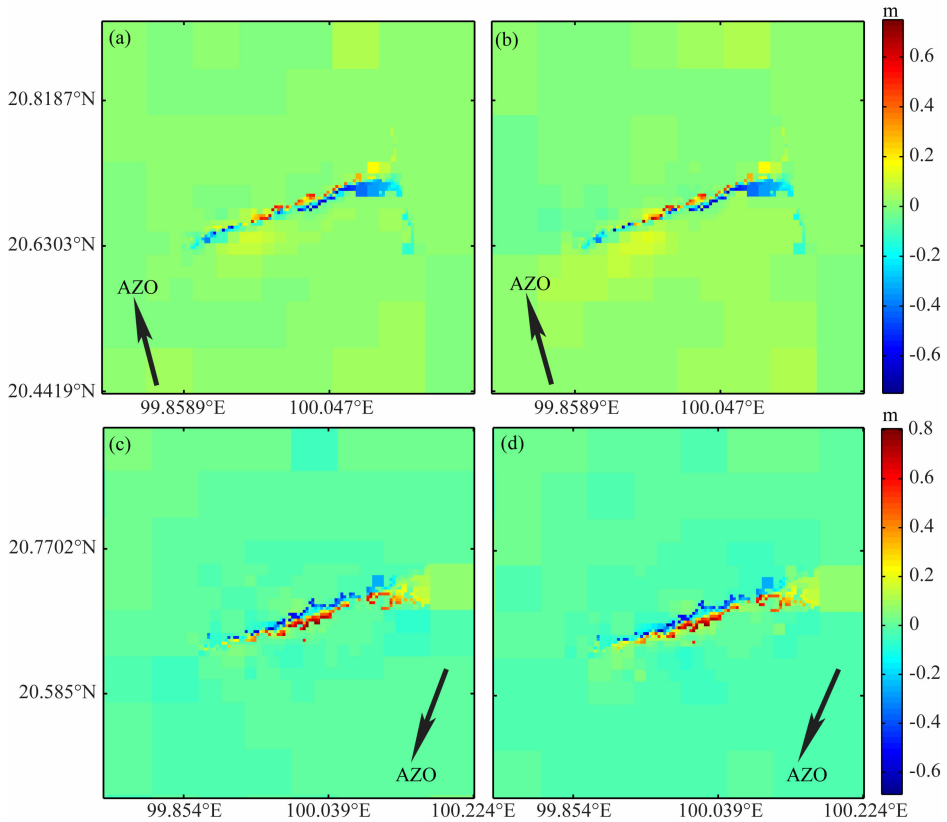


图 7 InSAR 数据拟合残差图

(a), (b) 分别为对模型施加纯左旋走滑约束前后的升轨数据拟合残差图; (c), (d) 分别为对模型施加纯左旋走滑分布前后的降轨数据拟合残差图。图中黑色箭头代表卫星的飞行方向。

Fig. 7 The residuals between the InSAR prediction and observation

The ascending residuals before (a) and after (b) the pure left lateral constriction on the slip model; the descending residuals before (c) and after (d) the pure left lateral constriction on the slip model. The black arrows denote the flight direction of the satellites.

走滑,该地震与本文地震发生位置仅相距 104 km. 红河断裂和 Sagaing 断裂在上新世和第四纪时期,剪切断裂性质发生变化,由原来的左旋剪切断裂变为现在的右行剪切,随之夹持在其中的书斜式断层转为左旋剪切断裂,这又进一步加剧了该区域块体的顺时针旋转运动^[25]. 该地震是南玛断层内部应力积聚到一定程度进行释放的结果,断层出现最大值为 5 m 的左旋错动. 该地震导致区域内部应力格局发生变化,必然会对相邻块体产生拖拽作用,从而对整个区域板块的运动状态产生影响. 2012 年 11 月 11 日缅甸北部(23.009°N, 95.884°E)发生 M_w 6.8 级走滑地震(图 1),震源深度 9.9 km^[26],该地震发生在 Sagaing 断层附近,由于 Sagaing 断层属于右旋剪切断裂,推测该地震为右旋走滑地震,这次地震事件又一次证实了金三角区域板块运动的活跃性,该地区地震活动频繁,需加强观测. 这次地震与本文地震是否存在联系,仍需进一步研究.

5 结 论

本研究利用日本 JAXA 提供的 ALOS PALSAR 升降轨数据作为数据源,首次分析研究了缅甸地震的同震形变大小、空间分布特征,反演了断层滑动分布. 应用二轨差分法和像素配准的方法,获取了缅甸地震视线向的同震形变场和地震破裂位移. 针对影像中非常明显的非线性轨道残差条纹,本文采用二次多项式法将其进行去除,取得较好效果,并通过回归分析去除了影像中与高程相关的大气延迟相位,获取了较精确的同震形变场,最后结合 Okada 弹性形变模型反演了该次地震的断层滑动分布. 结果显示该地震断层滑动以左旋走滑为主,兼具少许的倾滑运动. 滑动主要集中在断层面距地表 10 km 以上区域,最大滑动量达 5 m,位于地表以下 5 km 深处,在同一深度处,断层面右侧滑动量也有一个峰值,最大达 3.17 m. 反演获得的标量地震矩为 $2.49 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$,震级为 M_w 6.8 级. 本文结果是采用 ALOS PALSAR 数据对缅甸地震震源参数的首次反演,反演结果揭示了金三角地区断层活动依然活跃,应采用多种观测手段对震间形变进行观测,提高防震减灾的可行性.

致 谢 本研究所用 ALOS PALSAR 数据来源于日本宇航局. 在此特别感谢德国地学研究中心汪荣江老师提供 SDM 反演程序包以及论文研究过程中中国科学院测量与地球物理研究所刁法启博士给予的热情帮助. 文中部分图件使用 GMT4.5 软件绘制

而成.

参考文献(References)

- [1] USGS Myanmar, Magnitude 6.9 Myanmar March 24, 2011. [Online]. Available: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0002aes/>
- [2] Earth Observatory of Singapore, Myanmar earthquake of March 24, 2011-Magnitude 6.8. [Online]. Available: <http://www.earthobservatory.sg/media/news-and-features/295-myanmar-earthquake-of-march-24th-magnitude-68.html>
- [3] 常祖峰, 安晓文, 陈刚等. 2011 年 3 月 24 日缅甸孟帕亚 $M7.2$ 级地震地震构造浅析. 国际地震动态, 2011, (4): 52-56. Chang Z F, An X W, Chen G, et al. Brief analysis on seismotectonics of Mong Hpayak $M7.2$ Earthquake in Myanmar. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), 2011, (4): 52-56.
- [4] Socquet A, Pubellier M. Cenozoic deformation in western Yunnan (China-Myanmar border). *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24(4): 495-515.
- [5] <http://blog.sciencenet.cn/home.php?mod=space&uid=51597&do=blog&id=426034>
- [6] 李鸿吉, 秦建业. 缅甸弧及其周边地区的震源机制和现代应力场. 地震学报, 1994, 16(4): 463-471. Li H J, Qin J Y. The focal mechanism and recent stress field beneath Burma arc and its surrounding regions. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1994, 16(4): 463-471.
- [7] USGS, Magnitude 5.5 Myanmar China border region March 10, 2011. [Online]. Available: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001wnu/>
- [8] 孙建宝, 徐锡伟, 沈正康等. 基于线弹性位错模型及干涉雷达同震形变场反演 1997 年玛尼 $M_w7.5$ 级地震参数—I: 均匀滑动反演. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1097-1110. Sun J B, Xu X W, Shen Z K, et al. Parameter inversion of the 1997 Mani earthquake from INSAR coseismic deformation field based on linear elastic dislocation model-I: Uniform slip inversion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(4): 1097-1110.
- [9] 孙建宝, 石耀霖, 沈正康等. 基于线弹性位错模型反演 1997 年西藏玛尼 $M_w7.5$ 级地震的干涉雷达同震形变场—II: 滑动分布反演. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1390-1397. Sun J B, Shi Y L, Shen Z K, et al. Parameter inversion of the 1997 Mani earthquake from INSAR co-seismic deformation field based on linear elastic dislocation model-II. Slip distribution inversion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(5): 1390-1397.
- [10] Feng G C, Hetland E A, Ding X L, et al. Coseismic fault slip of the 2008 $M_w7.9$ Wenchuan earthquake estimated from InSAR and GPS measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, 37(1): L01302, doi: 10.1029/2009GL041213.
- [11] Feng G C, Ding X L, Li Z W, et al. Calibration of INSAR-derived coseismic deformation map associated with the 2011 $M_w9.0$ Tohoku-Oki earthquake. *IEEE Geosci. Remote Sens.*

- Lett.*, 2012, 9(2): 302-306.
- [12] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1985, 75(4): 1135-1154.
- [13] Wegmuller U, Werner C. Gamma Sar processor and interferometry software. Proceeding of the 3rdERS Symposium on Space at the Service of Our Environment, Florence, Italy, 1997: 1686-1692.
- [14] Goldstein R. Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, 22(18): 2517-2520.
- [15] Wang H, Ge L L, Xu C J, et al. 3-D coseismic displacement field of the 2005 Kashmir earthquake inferred from satellite radar imagery. *Earth Planets and Space*, 2007, 59(5): 343-349.
- [16] 朱珺, 丁晓利, 许兵等. 基于条纹频率检测的干涉图去线性趋势精化方法. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(3): 138-141.
- Zhu J, Ding X L, Xu B, et al. Refine method for removing the linear trend in interferogram based on fringe frequency test. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2011, 31(3): 138-141.
- [17] Dawson J, Tregoning P. Uncertainty analysis of earthquake source parameters determined from InSAR: a simulation study. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112(B9), B09406, doi: 10.1029/2007JB005209.
- [18] Michel R, Avouac J P. Measuring ground displacements from SAR amplitude images: Application to the Landers earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, 26(7): 875-878.
- [19] Peltzer G, Crampé F, King G, et al. Evidence of nonlinear elasticity of the crust from the M_w 7.6 Manyi (Tibet) earthquake. *Science*, 1999, 286(5438): 272-276.
- [20] 张国宏, 屈春燕, 宋小刚等. 基于 InSAR 同震形变场反演汶川 M_w 7.9 地震断层滑动分布. *地球物理学报*, 2010, 53(2): 269-279.
- Zhang G H, Qu C Y, Song X G, et al. Slip distribution and source parameters inverted from co-seismic deformation derived by InSAR technology of Wenchuan M_w 7.9 earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(2): 269-279.
- [21] Jonsson S, Zebker H, Segall P, et al. Fault slip distribution of the 1999 M_w 7.1 Hector Mine, California Earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002, 92(4): 1377-1389.
- [22] Kanamori H. The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 1997, 82(20): 2981-2987.
- [23] Lacassin R, Replumaz A, Lelou P H. Hairpin river loops and slipsense inversion on southeast Asia strike-slip faults. *Geology*, 1998, 26(8): 703-706.
- [24] Kitazum A, Kosuwan S, Saithong P, et al. Study on the estimation of strong ground motions-case study using Nam Ma fault earthquake. Proceedings of GEOTHAI'07 International Conference on Geology of Thailand, Bangkok, Thailand, 2007: 322-325.
- [25] 杨振宇, 孙知明, 马醒华等. 红河断裂两侧早第三纪古地磁研究及其地质意义. *地质学报*, 2001, 75(1): 35-44.
- Yang Z Y, Sun Z M, Ma X H, et al. Palaeomagnetic study of the early Tertiary on both sides of the Red River Fault and its geological implications. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2001, 75(1): 35-44.
- [26] USGS Myanmar, Magnitude 6.8 Myanmar November 11, 2012. [Online]. Available: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2012/usc000dqww/>

(本文编辑 何 燕)