

2018年云南墨江 M_s 5.9 地震的 InSAR 同震形变机制*

孙 赫, 刘传金

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 采用 D-InSAR 技术得到 2018 年云南墨江 M_s 5.9 地震的同震形变场, 以此为约束, 利用 SDM 程序反演同震形变场和发震断层面的滑动分布, 并讨论了此次地震的发震构造。结果表明: 墨江地震造成地表 LOS 向最大形变量约为 6 cm, 同震形变场呈对称分布。发震断层以右旋走滑运动为主, 符合区域构造的运动性质。断层面的最大滑动量为 0.19 m, 大约分布在沿断层走向 10~13 km、且沿倾向向下 3~6 km 处。断层在近地表处滑动量较小, 同震错动未破裂至地表。

关键词: InSAR; 墨江 M_s 5.9 地震; SDM; 同震形变场; 滑动分布

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)03-0379-06

0 引言

合成孔径雷达干涉测量技术 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, 简称 InSAR) 具有高时空分辨率、高精度、全天候、全天时等优点, 无需地面控制点, 可以获取高空间分辨率的地壳形变速度场, 也可以为反演提供重要约束信息。21 世纪初以来, 随着 SAR 卫星数据影像的丰富及处理技术的推动发展, InSAR 技术被广泛地应用到地质灾害监测中。尤其在近几年, 国内外学者将该技术引入到地震相关研究中, 如大范围、高空间分辨率 InSAR 形变场的获取 (Liu *et al.*, 2018; 洪顺英等, 2009; 邱江涛等, 2018), 发震构造分析 (季灵运等, 2017), 发震断层面的滑动分布与分析 (屈春燕等, 2017; Tong *et al.*, 2013) 以及断层面的闭锁程度研究 (Wang *et al.*, 2009; Sreejith, 2018) 等。InSAR 技术打破了传统大地测量基于离散点的监测局限, 降低了费用、劳动强度等问题, 同时解决了无法在短时间内获取大面积、高空间密度的地表沉陷形变场的难题。

2018 年 9 月 10 日云南墨江发生 M_s 5.9 地震, 震源深度 11 km, 墨江 15 个乡镇、临沧及昆明均有震感, 震中灾区部分老旧房屋倒塌, 造成一定的经济损失。由于墨江地震发震区域的监测

台站比较稀疏, 缺少历史大地测量监测数据, 因此已有研究中并未给出该地震的具体发震构造。鉴于研究区域的地理位置及地表植被特征, 传统的测量技术并不能获得断层面运动的细节特征, 本文利用 InSAR 技术获取 2018 年墨江 M_s 5.9 地震的同震形变场, 并以此为约束, 反演断层面的同震滑动分布, 探讨本次地震的发震构造。

1 构造背景

墨江地震震中位于墨江县通关镇丙蚌村 (图 1), 处于 NW 向红河断裂 (向宏发等, 2004, 2017; 李西等, 2016) 的南边, 近 SN 向把边江断裂 (赵慈平等, 2014) 的东面。红河断裂带横贯云南西部、中部和东南部, 控制着云南地区的主要构造活动 (张建国, 2009), 是一条典型的右旋走滑断裂 (向宏发等, 2006), 全长约 1 000 km (向宏发等, 2004; 李西等, 2016), 其北段强震频发, 历史上曾发生过 9 次 6 级以上地震 (包括 1652 年弥渡 7 级地震和 1925 年大理 7 级地震); 其中段尚无强震和大震记载 (张建国, 2009); 其南段以山前断裂、中谷断裂、双支断裂为主, 没有发生过 6 级以上的地震 (虢顺民等, 2001), 地质与大地测量结果显示南段走滑速率 3 mm/a 左右 (虢顺民等, 2001; Loveless, Meade, 2011; 刘耀

* 收稿日期: 2018-11-21.

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC150051) 和国家自然科学基金——基于三维地壳形变研究黄河断裂灵武段现今活动状态 (41604015) 联合资助。

辉等, 2015; 孙云梅, 李金平, 2018; 陆好健等, 2018), 最大剪应变积累较强, 地震危险性较大 (孙云梅, 李金平, 2018)。红河断裂带是否存在发震危险性存有争议 (邓起东等, 2002; Replumaz *et al*, 2001; 徐锡伟等, 2017)。把边江断裂也是一条右旋走滑断裂带, 走滑速率达 18 mm/a (赵慈平等, 2014), 截至 2014 年, 该断裂尚无发生过强

震和大震的记录。这 2 条断裂的运动速率存在差异性, 可能导致地壳在长期的运动过程中积累能量, 从而发震。

2018 年墨江地震后, 美国地质调查局 (USGS) 与全球矩心矩张量 (GCMT) 利用远场地震波资料计算了此次地震的发震位置和震源机制解 (表 1), 结果均表明此次地震为走滑性质事件。

表 1 墨江 $M_s5.9$ 地震参数

Tab. 1 Parameters of $M_s5.9$ MoJiang earthquake

数据 来源	震中位置		深度/ km	节面 I			节面 II			M_w	断层 性质
	$\lambda_E/(^\circ)$	$\varphi_N/(^\circ)$		走向/ $(^\circ)$	倾向/ $(^\circ)$	滑动角/ $(^\circ)$	走向/ $(^\circ)$	倾向/ $(^\circ)$	滑动角/ $(^\circ)$		
USGS	101.578	23.332	8	219	68	-3	310	88	-158	5.7	走滑
GCMT	101.63	23.24	12	216	89	11	126	79	179	5.7	走滑

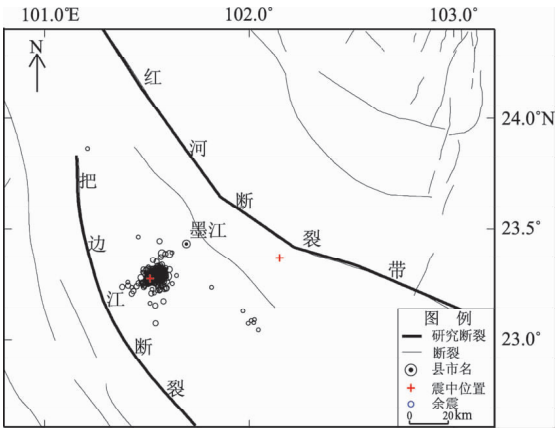


图 1 2018 墨江 $M_s5.9$ 地震区域构造背景
Fig. 1 Tectonic setting of epicenter region
for 2018 Mojiang $M_s5.9$ earthquake

2 D-InSAR 同震形变结果

为得到同震形变场, 分别收集墨江地震前后

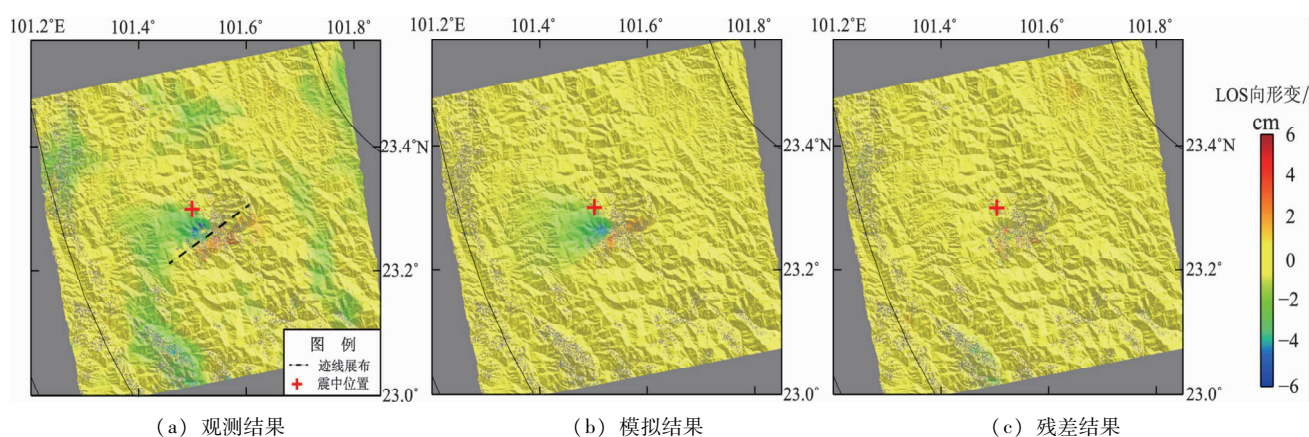
2 个时段 C 波段的 Sentinel-1 卫星影像 (表 2), 基于 GAMMA 软件利用 D-InSAR 技术依次进行多视、干涉、滤波、解缠、大气、地形相位及轨道误差剔除等分析处理, 得到墨江地震同震升降轨数据形变场。由于研究区域内降轨数据的相干性极差, 通过多次调整数据处理参数, 均未得到理想结果, 因此本文只给出了使用升轨数据得到的 InSAR 形变场 (形变方向为 LOS 方向) (图 2a)。从图 2a 可看出, 研究区形变场呈对称分布, 覆盖了墨江地震的震中, 中间存在一条大致呈 NE 向的迹线, 可能是本次地震的发展断层, 迹线两侧形变存在明显差异, 形变场显示断层上盘下降量达 6 cm, 下盘上升约 4 cm。结合 SAR 卫星几何成像方向, 可以判断此次地震为右旋走滑为主的事件。

墨江地震地表破裂不明显, 无法确定具体发震断层位置, 现结合余震序列展布方向进行确定及外部验证。图 3a 为墨江地震余震的总体展布结果, 主要呈圆形分布, 线性展布特征

表 2 SAR 卫星数据参数

Tab. 2 Parameters of SAR images

卫星	轨道号	升降轨	主影像日期	从影像日期	时间基线/d	空间基线/m
Sentinel-1	T99	A	2018-08-28	2018-09-09	12	31
	T62	D	2018-08-01	2018-09-18	48	108.048 3
	T62	D	2018-08-01	2018-09-30	60	75.092 1
	T62	D	2018-08-13	2018-09-18	36	21.124 7
	T62	D	2018-08-13	2018-09-30	48	-11.831 5
	T62	D	2018-09-06	2018-09-18	12	-34.604 3
	T62	D	2018-09-06	2018-09-30	24	-67.560 5

图2 2018年墨江 $M_s5.9$ 地震同震形变场与均匀滑动反演结果Fig. 2 Coseismic deformation and uniform slip inversion of 2018 Mojiang $M_s5.9$ earthquake

不明显。沿 InSAR 形变场中的迹线方向 (图 2a) 选取宽 10 km 的震源深度剖面 (图 3a 中的黑色矩形框), 提取余震展布结果 (图 3b), 同时提取垂直于迹线方向宽 10 km 的震源剖面数据结果 (图 3c) 进行对比分析。由图 3b, c 可以看出, 余震主要分布在主震震中附近, 可能是由于主震震级小,

能量小扩展性弱所致, 但总体上仍能看出 NE 向余震展布比 NW 向长, 说明 NE 向可能为本次地震发震断层的主方向。同时由余震序列得到的主断层方向与 InSAR 结果给出的发震断层方向一致, 说明利用 InSAR 地表形变场得到的发震断层走向是合理的。

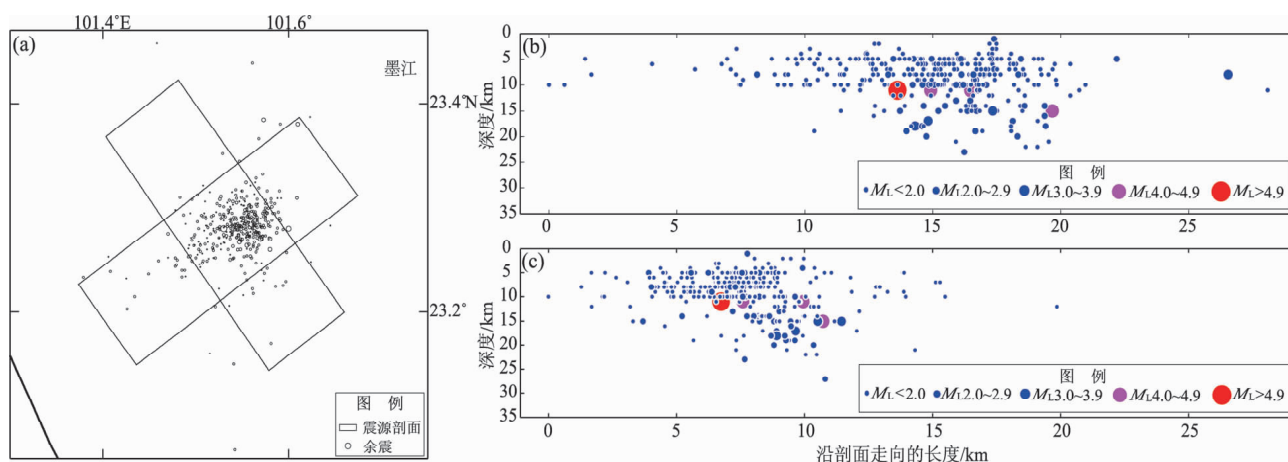
图3 2018年墨江 $M_s5.9$ 余震序列总体展布 (a) 与其在 NE 向 (b) 及 NW 向 (c) 的展布

Fig. 3 The distribution of aftershock sequence (a) and its distribution along the NW (b) and NE (c) directions

如果发震断层走向为 NE 向, 由 USGS, GCMT 等机构给出的震源机制得出墨江地震是左旋走滑事件, 与本文 D-InSAR 结果不符。主要是由于墨江地震主震震级较小, 虽然使用远场地震波资料计算的震源机制解可以作为参考资料, 但是相较 InSAR 近场形变结果的可靠性较低, 尤其是 USGS 解算的震源机制解并没有给出所选用的具体地震台站信息, 稀疏的台站信息解算的结果可靠性相对较低。而 InSAR 技术不仅广泛的应用到地震中, 而且具有高精度, 尤其是在监测困难或缺少大地

测量数据的研究区, 因此本研究采用 InSAR 技术对监测台站稀疏的墨江地震的相关区域进行研究分析, 以便获取墨江地震的发震构造。

3 断层滑动反演及发震构造讨论

利用高精度的 InSAR 形变场进行断层滑动反演, 可以得到可靠性比较高的断层运动方向、深度及空间范围。综合反演计算时间效率, 计算时首先将大数据量的 InSAR 形变场进行降采样处理,

同时保证近场区数据量,远场区在不影响结果精度的前提下可以适当稀疏处理。反演计算时,首先假设发震断层是均匀滑动的,通过蒙特卡洛搜索法不断逼近拟合,得到断层参数 (Parsons *et al*, 2006);其次,在获取的参数基础上利用德国地学中心汪荣江开发的最速下降法 (Steepest Descent Method, 简称 SDM) 程序包 (Wang *et al*, 2004),反演发震断层上每一个单元断层面的滑动情况。

3.1 同震形变场均匀滑动反演

采用均匀滑动模型获取墨江 $M_s5.9$ 地震的断层几何参数,参照表 3 中矩形断层参数 (长度、宽度、深度、走向、倾角、倾向滑动量、走向滑动量、参考点位置),进行均匀滑动反演建模。反演的初始参

数值参考图 2 中给出的大致范围区间,利用蒙特卡洛搜索法求取符合预测标准的最佳参数,反复逼近达到最佳拟合,然后生成 1 000 个均匀分布样本,取其均值作为最优解 (表 3)。结果表明,发震断层以走滑为主,震源深度约 8.38 km,略大于断层宽度,走向约为 223° ,近似为 NE 方向,倾角为 89° 。同震形变场 (图 2a)、均匀滑动反演结果 (图 2b) 与余震序列展布存在高空间相关性。由图 2c 可知,除下盘个别微小区域拟合效果不佳外,整体拟合得到的残差结果较小,可能与单一方向 InSAR 数据、数据失相干等因素有关,说明均匀反演得到的断层参数可靠性较高,因此可以利用得到的断层模型参数进行非均匀反演。

表 3 2018 年墨江 $M_s5.9$ 地震断层参数及其标准误差

Tab. 3 Fault parameters and their standard deviation for 2018 Mojiang $M_s5.9$ earthquake

模型	X/km	Y/km	走向/ $(^\circ)$	倾向/ $(^\circ)$	深度/km	长度/km	宽度/km	走向滑动量/mm	倾向滑动量/mm
均匀滑动模型	37.07	31.52	222.94	89.16	8.38	3.27	7.61	336.01	-12.29
误差	± 0.25	± 0.21	± 2.63	± 1.65	± 0.43	± 0.48	± 0.35	± 15.25	± 4.91

3.2 同震断层面滑动分布反演

基于断层几何模型参数,以 InSAR 形变场为约束,采用反演程序 SDM 进行同震断层面滑动分布反演。为获取断层面的精细滑动分布,参考 Crust2.0 模型将研究区地壳处理成层状介质模型。反演计算时将断层面沿走向和倾向 2 个方向划为离散的 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 近似矩形的小断层片,并将断层的长度与宽度都扩展为 20 km,即划为 400 个小单元断层片。为了保证反演结果稳定性,通过

粗糙度与拟合残差曲线求得最佳滑动因子为 0.03 (图 4)。图 5 为墨江地震分布式滑动反演结果与残差,模拟结果与观测形变场的拟合度达 90%,较均匀滑动反演结果精度有所提高,由图 5b 可见,下盘形变区拟合结果较均匀滑动反演 (图 2b) 结果更佳。

图 6 为同震断层面滑动分布,断层面的滑动分布主要集中在沿断层走向 9~15 km、沿倾向向下 3~9 km 的区域内,平均滑动量与滑动角分别为 0.07 m 与 16.06° 。断层在近地表处滑动量较小,表明此次地震未造成地表破裂;断层面最大滑移量为 0.19 m,大约分布在沿断层走向 10~13 km、沿倾向向下 3~6 km 处。滑动分布结果表明断层面的运动方式以右旋走滑活动为主,与 InSAR 技术判断断层的运动性质一致,表明本次计算结果是合理且可靠的。

3.3 发震构造讨论

利用 InSAR 技术得到墨江地震同震形变场,结果显示,此次地震破裂面大致呈 NE 走向,与震后余震空间分布基本一致,说明本次地震的反演结果是科学合理的;InSAR 形变场及断层面滑动分布,表明此次地震是在以右旋走滑为主的构造背景下发生的事件,符合区域构造的运动性质。

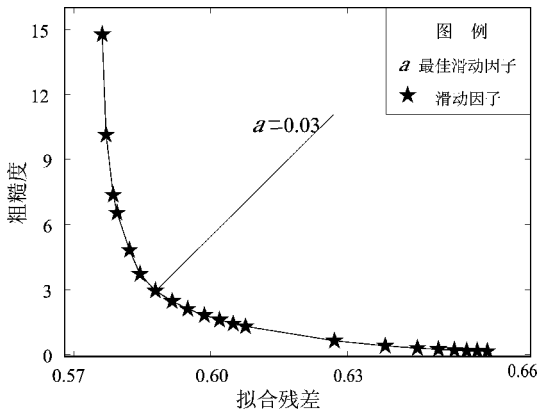


图 4 粗糙度与拟合残差关系

Fig. 4 Relationship between the roughness of the slip model and the model misfit with SAR data

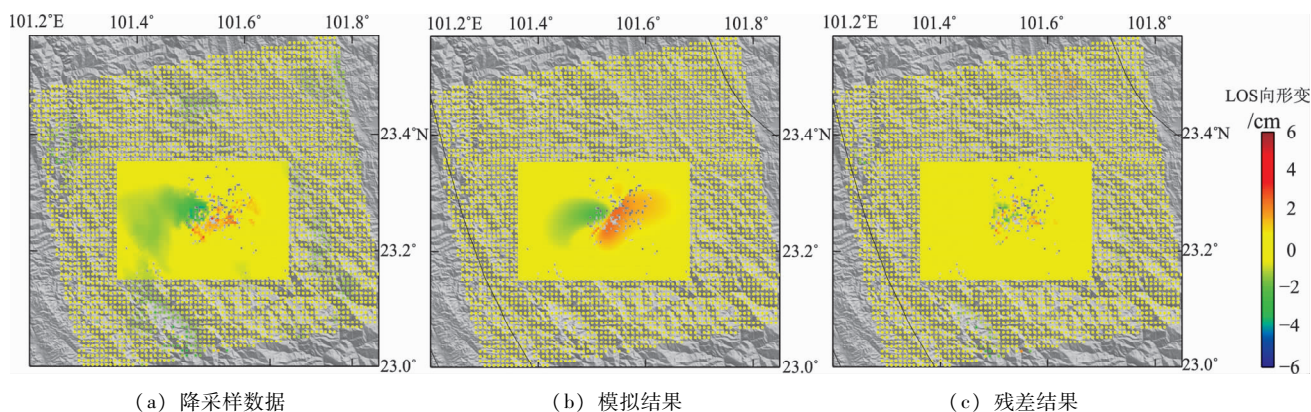


图5 2018 年墨江 $M_s5.9$ 地震同震形变场降采样数据与分布式滑动反演
Fig. 5 Coseismic deformation down sampling data and model for the distributed slip inversion of 2018 Mojiang $M_s5.9$ earthquake

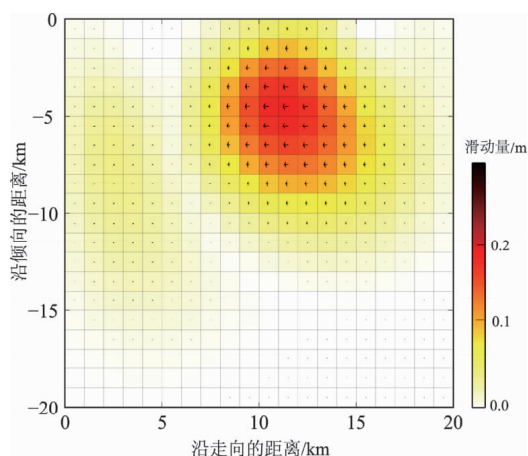


图6 2018 年墨江 $M_s5.9$ 地震同震断层面滑动分布
Fig. 6 Slip distribution of co-seismic fault surface for 2018 Mojiang $M_s5.9$ earthquake

4 结论

基于升轨 Sentinel-1A SAR 数据, 利用 D-InSAR 技术及 SDM 反演程序对 2018 年 9 月 8 日墨江 $M_s5.9$ 地震进行了研究, 获取了地震同震形变场及断层面滑动分布, 主要得到以下结论:

(1) 利用 InSAR 技术得到墨江地震的同震形变场, 升轨数据干涉图相干性较好, 雷达视向上, 上盘下降量达 6 cm, 下盘上升约 4 cm, 表明此次地震事件以右旋走滑为主。

(2) 同震形变场位于红河断裂南段与把边江断裂区域之间, 判断发震断层可能为 2 条断裂带间的一条调节断裂。

(3) 分布式滑动反演结果与观测形变场的拟合度达 90%, 断层最大滑移量为 0.19 m, 大约分布在沿断层走向 10 ~ 13 km、沿倾向向下 3 ~ 6 km 处, 表明此次地震以右旋走滑运动为主, 破裂未延伸至地表, 与区域构造运动背景一致。

参考文献:

- 邓起东, 张培震, 冉永康, 等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学: 地球科学, 32(12): 1020-1030.
- 虢顺民, 计凤桔, 向宏发, 等. 2001. 红河活动断裂带[M]. 北京: 海洋出版社, 120-124.
- 洪顺英, 申旭辉, 单新建, 等. 2009. 基于 D-InSAR 技术的西藏改则地震同震形变场特征分析[J]. 地震, 29(4): 23-31.
- 季灵运, 刘传金, 徐晶, 等. 2017. 九寨沟 $M_s7.0$ 地震的 InSAR 观测及发震构造分析[J]. 地球物理学报, 60(10): 4082.
- 李西, 冉康勇, 陈立春, 等. 2016. 红河断裂带南段全新世地震活动证据[J]. 地震地质, 38(33): 596-604.
- 刘耀辉, 李金平, 王刘伟. 2015. 红河断裂带闭锁程度和滑动亏损分布特征研究[J]. 测绘工程, 24(8): 20-22.
- 陆好健, 李金平, 邵九明, 等. 2018. 基于 SBAS-InSAR 的红河断裂带南段形变特征研究[J]. 测绘工程, 27(9): 16-20.
- 邱江涛, 赵强, 林鹏. 2018. 2016 年新疆阿克陶 $M_s6.7$ 地震 InSAR 同震形变与滑动分布特征[J]. 地震研究, 41(3): 415-422.
- 屈春燕, 左荣虎, 单新建, 等. 2017. 尼泊尔 $MW7.8$ 地震 InSAR 同震形变及断层滑动分布[J]. 地球物理学报, 60(1): 151-162.
- 孙云梅, 李金平. 2018. 红河断裂带不同构造区段的现今滑动速率与应变积累状况[J]. 热带海洋学报, 37(4): 89-96.
- 向宏发, 虢顺民, 张晚霞, 等. 2017. 红河断裂带南段中新世以来大型右旋位错量的定量研究[J]. 地震地质, 29(1): 34-50.
- 向宏发, 韩竹军, 虢顺民, 等. 2004. 红河断裂带大型右旋走滑运动与伴生构造地貌变形[J]. 地震地质, 26(4): 598-610.
- 向宏发, 万景林, 韩竹君, 等. 2006. 红河断裂带大型右旋走滑运动发

- 生时代的地质分析与 FT 测年[J]. 中国科学: 地球科学, 36(11): 977–987.
- 徐锡伟, 吴熙彦, 于贵华, 等. 2017. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用[J]. 地震地质, 39(2): 219–275.
- 张建国. 2009. 中越红河断裂活动性研究[M]. 合肥: 中国科学技术大学.
- 赵慈平, 陈有丽, 王云, 等. 2014. 云南宁洱—通关火山区最上地壳地热场: 构造和岩浆活动意义[J]. 岩石学报, 30(12): 3645–3656.
- Liu C J, Ji L Y, Zhu L Y, *et al.* 2018. InSAR – Constrained Interseismic Deformation and Potential Seismogenic Asperities on the Altyn Tagh Fault at 91.5 ~ 95°E, Northern Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing, 10(6): 943. doi:10.3390/rs10060943.
- Loveless J P, Meade B J. 2011. Partitioning of localized and diffuse deformation in the Tibetan Plateau from joint inversions of geologic and geodetic observations[J]. Earth and Planetary Science Letters, 303(1–2): 11–24.
- Parsons B, Wright T, Rowe P, *et al.* 2006. The 1994 Sefidabeh (eastern Iran) earthquakes revisited: new evidence from satellite radar interferometry and carbonate dating about the growth of an active fold above a blind thrust fault[J]. Geophysical Journal International, 164(1): 202–217.
- Replumaz A, Lacassin R, Tapponnier P, *et al.* 2001. Large river offsets and Plio – Quaternary dextral slip rate on the Red River fault (Yunnan, China) [J]. Journal of Geophysical Research, 106(B1): 819–836.
- Sreejith K M, Sunil P S, Agrawal R, *et al.* 2018. Audit of stored strain energy and extent of future earthquake rupture in central Himalaya[J]. Scientific Reports, 8(1), doi:10.1038/s41598-018-35025-y.
- Tong X, Sandwell D T, Smith-Konter B. 2013. High-resolution interseismic velocity data along the San Andreas fault from GPS and InSAR[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(1): 369–389, doi:10.1029/2012JB009442.
- Wang H, Wright T J, Biggs J. 2009. Interseismic slip rate of the northwestern Xianshuihe fault from InSAR data[J]. Geophysical Research Letters, 36(3): 139–145, doi:10.1029/2008GL036560.
- Wang R, Xia Y, Grosser H, *et al.* 2004. The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: precise source parameters from satellite radar interferometry [J]. Geophysical Journal International, 159(3): 917–922.

InSAR Coseismic Deformation Mechanism of Yunnan Mojiang $M_s5.9$ Earthquake in 2018

SUN He, LIU Chuanjin

(The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract

Taking the coseismic deformation of Yunnan Mojiang $M_s5.9$ earthquake in 2018 obtained from D-InSAR technology as a constraint, we inversed the slip distribution of the fault plane along the region tectonic by the steepest descent method (SDM) and discussed the seismogenic structure of the earthquake. The results indicate that the maximum deformation in LOS-trending caused by the Mojiang earthquake is about 6 cm, and the distribution of co-seismic deformation field is symmetrical. The seismic fault is dominated by right-lateral slip, which is consistent with the dextral tectonic movement background of the regional tectonic. The largest slip achieves 0.19 m, which is distributed about 10 ~ 13 km along the fault strike and 3 ~ 6 km down along the dip direction. The slip of fault near surface is small, and the coseismic displacement does not break to the surface.

Keywords: InSAR; Mojiang $M_s5.9$ earthquake; SDM; coseismic deformation; slip distribution