

魏云杰,王 婷,杨成生,等. 2021年云南漾濞 M_w 6.4级地震的 InSAR 监测与反演[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(3): 558-567.
WEI Yun-jie, WANG Ting, YANG Cheng-sheng, et al. InSAR Monitoring and Inversion of 2021 Yangbi M_w 6.4 Earthquake in Yunnan, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(3): 558-567.

DOI:10.19814/j.jese.2021.07009

• 庆祝西安地质调查中心组建六十周年专辑 •

2021年云南漾濞 M_w 6.4级地震的 InSAR 监测与反演

魏云杰¹, 王 婷², 杨成生^{2*}, 吕 森²

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 2021年5月21日, 云南漾濞地区发生 M_w 6.4级地震, 然而发震区的活动构造前期研究薄弱。针对此次地震开展监测与震源参数反演研究, 对深入掌握漾濞地区及其邻近区域的孕震及发震机理和构造活动特征具有十分重要的科学意义。利用欧洲航天局两个轨道的 Sentinel-1A SAR 卫星影像获取了升、降轨的同震形变场, 并利用 Okada 矩形弹性位错模型反演了震源参数以及同震的滑动分布。监测结果显示, 同震破裂引发的最大隆升和最大下沉形变均超过 10 cm。同震位错模型反演结果表明: 漾濞 M_w 6.4级地震是由长度 12.2 km、宽度 5.0 km、走向 132° 、倾角 83° 的断层引发的; 此次地震是一次显著的右旋走滑运动的破裂事件, 其平均滑动量为 0.19 m, 平均滑动角为 -153.6° , 矩震级为 M_w 6.1, 与美国地质调查局(USGS)、全球矩心矩张量(GCMT)计划等公布的震源机制解结果一致。同时, 同震库伦应力变化计算结果显示, 同震引发的库伦应力变化为 $4.21 \times 10^{25} \text{ dyne} \cdot \text{cm}^{-1}$, 相当于矩震级 M_w 6.38, 并且库伦应力分布反映出此次地震以应力释放为主, 进一步触发走滑地震的可能性不大。

关键词: 大地测量; 地震; 震源参数; 同震形变场; InSAR; 断层参数; 库伦应力; 漾濞地震

中图分类号: P315; P22

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2022)03-0558-10

InSAR Monitoring and Inversion of 2021 Yangbi M_w 6.4 Earthquake in Yunnan, China

WEI Yun-jie¹, WANG Ting², YANG Cheng-sheng^{2*}, LYU Sen²

(1. China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100081, China; 2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: On May 21, 2021, Yangbi M_w 6.4 earthquake occurred in Dali area of Yunnan, China. However, the pre-research on the geological structure in the seismogenic area of this earthquake is weak. It is scientific significance for the in-depth understanding of the seismogenic, seismogenic mechanism and characteristics of tectonic activity in Yangbi area and its adjacent areas to monitoring and inverting source parameter for this earthquake. The Sentinel-1A SAR satellite images of ESA were used to obtain the co-seismic deformation field of the earthquake from different orbits, and the Okada rectangle elastic dislocation model was used to invert the

收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2021-10-19 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42174032); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190637);

国家重点研发计划项目(2018YFC1504805); 第二次青藏高原综合科学考察研究专题(2019QZKK0904)

作者简介: 魏云杰(1973-), 男, 河南柘城人, 正高级工程师, 工学博士, E-mail: wyj1973@126.com.

* 通讯作者: 杨成生(1982-), 男, 河南新乡人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: yangchengsheng@chd.edu.cn.

earthquake source parameters and the co-seismic slip distribution. The results show that the maximum uplift and maximum subsidence deformation caused by co-seismic rupture are both over 10 cm. The inversion results of the co-seismic show that the earthquake is caused by the rupture of a fault with a length of 12.2 km, a width of 5.0 km, a strike of 132° and a dip angle of 83° ; the earthquake is a significant right-lateral strike-slip movement. The average slip is 0.19 m and the average slip angle is -153.6° , and the magnitude is M_w 6.1, which is consistent with the focal mechanism solution published by USGS and GCMT. At the same time, Coulomb stress of co-seismic is 4.21×10^{25} dyne \cdot cm $^{-1}$, which is equivalent to M_w 6.38; and Coulomb stress distribution reflects that the earthquake is dominated by stress release, which further triggers strike-slip earthquake unlikely.

Key words: geodesy; earthquake; earthquake source parament; co-seismic deformation field; InSAR; fault parameter; Coulomb stress; Yangbi earthquake

0 引 言

北京时间 2021 年 5 月 21 日 21 时 48 分,云南漾濞地区附近发生了 M_w 6.4 级地震。此次地震震中经纬度为(99.87°E , 25.67°N),震源深度为 8 km。根据中国地震台网(CENC)测定,在主震发生前,该地区发生了多次 3~4 级前震。 M_w 6.4 级主震发生后,该地区的地壳活动性并未停止。截至 2021 年 5 月 23 日,漾濞地区附近发生余震 33 次,震级在 M_w 2.5 到 M_w 5.2 范围内,说明此次地震属于前震→主震→余震地震序列。由于距离震中 20 km 范围内人口数约 6.2 万,50 km 范围内约 216 万,而且本次地震位于活动构造的研究空白区域,所以研究此次地震的发震构造及断层活动趋势是非常必要的。

自 Massonnet 在 1993 年最早利用合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术提取了 1992 年 Landers 地震的同震形变场后^[1],InSAR 技术被引入地震监测,并引起了地学界的轰动。之后,该技术以全天时、全天候、大范围、高精度地表形变监测的特点,在地震的震间、同震和震后形变监测以及震源机制研究中得到了广泛的应用。以 InSAR 同震形变场为

约束反演地震运动学参数成为研究地震发震机理和破裂过程的重要手段之一,如 1997 年西藏玛尼 M_w 7.5 级地震^[2]、2001 年青海昆仑地震^[3-4]、2008 年四川汶川地震^[5]、2017 年四川九寨沟 M_s 7.1 级地震^[6-7]以及 2020 年新疆伽师地震^[8]等。

云南漾濞 M_w 6.4 级地震引起了许多学者的广泛关注^[9-12]。美国地质调查局(USGS)、全球矩心矩张量(GCMT)计划和中国地震台网均给出了此次地震的震源机制解(表 1)。王绍俊等以 SAR 影像为数据源,获取了此次地震的同震形变场;同时以 SAR 形变场和 GNSS 数据为约束,设置了两个不同倾向的断层模型,反演了不同倾向模型的滑动分布,并进行了对比分析^[13]。李大虎等采用地震体波层析成像(TOMO3D)方法反演获得川滇区域的地壳速度结构特征,对云南漾濞 M_s 6.4 级地震震区及周边的三维 P 波速度结构进行了剖析;然后获得震区壳内视密度的横向变化特征,最后综合分析漾濞 M_s 6.4 级地震震区地壳结构特征与地震活动关系^[14]。杨九元等利用 Sentinel-1A/B 卫星影像和 InSAR 技术,得到了同震形变和断层的滑动分布,并计算了同震的库伦应力变化^[15]。但是,上述研究关于地震发震断层的详细几何参数并没有给出。由于发震断层

表 1 不同机构给出的震源机制解

Table 1 Focal Mechanism Solution from Different Institutes

机构	震级	震中位置		节面 1	节面 2	深度/km
		经度/($^{\circ}$)	纬度/($^{\circ}$)			
美国地质调查局	M_w 6.1	100.01	25.76	135/82/−165	43/75/−9	9
全球矩心矩张量计划	M_w 6.1	100.02	25.61	46/78/4	315/86/168	15
中国地震台网	M_w 6.4	99.87	25.67	—	—	8
中国地震局	—	—	—	138/80/−170	—	—

注:“—”表示机构未发布该数据。

几何参数对深入掌握云南漾濞地区及其邻近区域的孕震及发震机理和构造活动特征具有十分重要的科学意义,本文利用 InSAR 技术获取了云南漾濞 M_w 6.4 级地震的同震形变场,并对同震的震源参数以及发震断层的滑动分布进行了反演与分析讨论,以期了解此次地震发震机理及区域构造活动特征提供参考。

1 区域构造背景

云南地处印度板块与欧亚板块挤压碰撞带的东北边界。这两大板块长期相对运动,使得区域内新构造运动十分强烈,活动断裂带纵横交错。漾濞彝族自治县位于云南省中西部偏西北,属横断山系滇西纵谷区,云岭山脉南段,地质构造复杂,地质环境条件脆弱。近年来,在极端气候现象和地震活动频繁等因素的影响下,区域内地质灾害的发生呈上升态势,地质灾害类型较为丰富,主要有地震、泥石流、滑坡、崩塌、火山喷发、地裂缝等。

2021 年 5 月发生在云南漾濞地区的又一次 M_w 6.1 级强震,位于川滇块体西南边界。新生代早期以来,青藏高原东缘向东挤出,形成了最强也是最具代表性的川滇菱形块体^[13-14],该区域地质灾害频繁,是研究灾害预报预警的重点关注区域。该区域发育的断裂复杂,有安定河断裂、红河断裂、安宁河—则木河断裂、澜沧江断裂等,断裂较为活跃,地震活动剧烈。例如,2018 年玉溪通海地区的两次 M_s 5.0 级地震,位于川滇菱形地块东端;2019 年 6 月 24 日的楚雄 M 4.7 级地震,位于南华—楚雄断裂附近;2020 年 5 月 18 日的昭通巧家 M_s 5.0 级地震,位于安宁河—则木河断裂等。

从图 1 可以看出,漾濞 M_w 6.4 级地震的震中区域主要有两条断裂,分别是维西—乔后—巍山断裂和红河断裂。其中,维西—乔后—巍山断裂与震中的距离最为接近,大约为 10 km。段梦乔等认为此次地震序列的发震断层以 SE 向高倾角右旋走滑兼正断层为主,兼有多条 NE 向左旋走滑兼正断层的高倾角次级断层^[16]。杨九元等通过一系列研究认为,此次地震可能破裂在维西—乔后—巍山断裂的

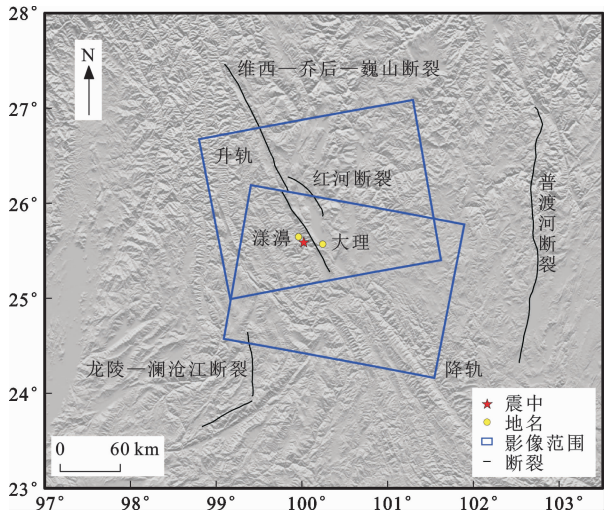


图 1 云南漾濞地区区域地质背景
Fig. 1 Regional Geological Background of Yangbi Area in Yunnan

隐伏分支断层或一个独立的未知隐伏主断层上,需着重注意维西—乔后—巍山断裂的巍山盆地北端^[15]。龙锋等计算的区域构造应力场显示,发震构造受 NNW—SSE 向近水平主压应力作用发生右旋走滑运动,揭示主发震断层产状和错动类型与维西—乔后—巍山断裂基本一致^[17]。根据已有的研究得知,维西—乔后—巍山断裂具有明显的右旋走滑特征,沿线山脊和河流表现为同步右旋位错^[18]。维西—乔后—巍山断裂与红河断裂、金沙江断裂以及德钦—中甸—大具断裂等一起,共同构成了川滇活动块体的西部边界。因此,相关研究认为其发震构造为维西—乔后—巍山断裂的平行伴生断裂,这一构造的形成可能与川滇块体 SE 向滑移和滇西南块体的顺时针旋转有关。

2 数据来源及处理方法

为了获取漾濞 M_w 6.4 级地震的同震形变场,本次研究调查并选取了地震发生前后时间间隔最短的两景欧洲航天局 Sentinel-1A SAR 卫星影像(图 1),影像参数如表 2 所示。数据处理采用瑞士 GAMMA 遥感公司开发的专门用于干涉雷达数据处理的全功能平台 GAMMA 软件^[19]。采用差分干涉测量(D-InSAR)技术进行数据处理,引入美国航

表 2 Sentinel-1A SAR 卫星影像参数

Table 2 Parameters of Sentinel-1A SAR Satellite Image

轨道号	轨道类型	主影像时间	从影像时间	时间基线/d	空间基线/m
Path135,Frame508	降轨	2021-05-10	2021-05-22	12	-48.241 70
Path99,Frame1265	升轨	2021-05-20	2021-06-01	12	18.788 40

空航天局(NASA)发布的 30 m 空间分辨率 SRTM 数字高程模型来消除 InSAR 干涉图中的地形起伏误差。基于加权功率谱算法的自适应滤波算法被用于干涉图的滤波处理^[20],消除干涉图中的噪声相位。利用二次多项式拟合去除干涉图中残余的轨道误差^[21],相位解缠采用最小费用流算法^[22]。为得到精确的形变场,基于大气延迟相位与地形间的相关关系对差分干涉图进行了去除大气影响处理^[23],最后得到了雷达视线方向(Line of Sight, LOS)同震形变场,再进行地理编码便获取了地理坐标系下高精度的同震形变场。

3 结果分析

经过一系列数据处理,获取了漾濞 M_w 6.4 级地震的干涉解缠图和形变场(图 2)。结果显示:此次地震造成断裂东北侧的最大隆升超过 10 cm,西南侧的最大下沉约为 10 cm 以下(雷达视线方向);两个不同方向水平位错的过渡带为发震断层所在的位置。两个形变区域间并没有由于地表破裂造成大面积的失相干,说明此次同震形变并未造成严重的地表破裂。另外,升、降轨影像的形变场上、下盘的地表运动表现为相反的运动趋势,说明同震引起的形变以水平向为主^[8]。同震形变监测结果与王绍俊等的研究结果^[13]较为一致。

3.1 GBIS 均匀滑动反演

基于 InSAR 同震形变场开展发震断层的几何参数和运动学参数反演是认识发震机理的关键^[24]。为此,采用 GBIS 开源软件(<http://comet.nerc.ac.uk/gbis>)^[25]对本次地震同震形变场进行非线性反

演,获取发震断层的几何参数(断层长度、宽度、深度、走向角、倾角等)。GBIS 开源软件是通过断层几何参数的后验概率密度函数和观测值的先验知识确定断层的最优参数。目前,该方法在地震、火山等形变反演中得到了广泛应用^[26]。首先,根据 InSAR 形变监测的先验结果选择 Okada 矩形弹性位错模型,通过设置断层的几何参数(断层长度、宽度、深度、倾角、走向角)和运动学参数(滑动量),并设置一定的搜索范围,对模型参数进行约束反演,迭代次数设置为 3×10^6 。由于 InSAR 监测结果数据量较大,为提高反演计算效率,需要对形变结果进行降采样处理,即在保证形变特征的同时,减少数据点的数量。本文采用四叉树降采样方法^[27],最终升、降轨的形变场分别保留了 2 326、2 655 个数据点。在迭代结束后,去掉前 3×10^4 次迭代的老化周期,最后便得到了断层的最优模拟结果。最优震源参数见表 3,搜索结果范围如图 3 所示,模型模拟结果如图 4 所示。

由断层的后验概率密度函数分别获取了 2.5% 和 97.5% 的最大后验概率解。反演结果(图 3 和表 3)表明:地表同震形变是由一条长度约为 12.2 km、宽度为 5.0 km、深度为 7.5 km、倾角为 83° 、走向角为 132° 的断层滑动引起的。由表 3 可知:发震断层以走滑为主,震中位置深度为 7.48 km,明显大于宽度(约为 5.00 km),说明此次地震没有破裂至地表;漾濞 M_w 6.4 级地震走滑分量为 -0.68 m,倾滑分量为 -0.09 m,表明同震断层活动以走滑为主;其走向角为 132° ,近似为 NWW—SEE 向,可见断层走向与美国地质调查局给出的节面 1 震源机制解基

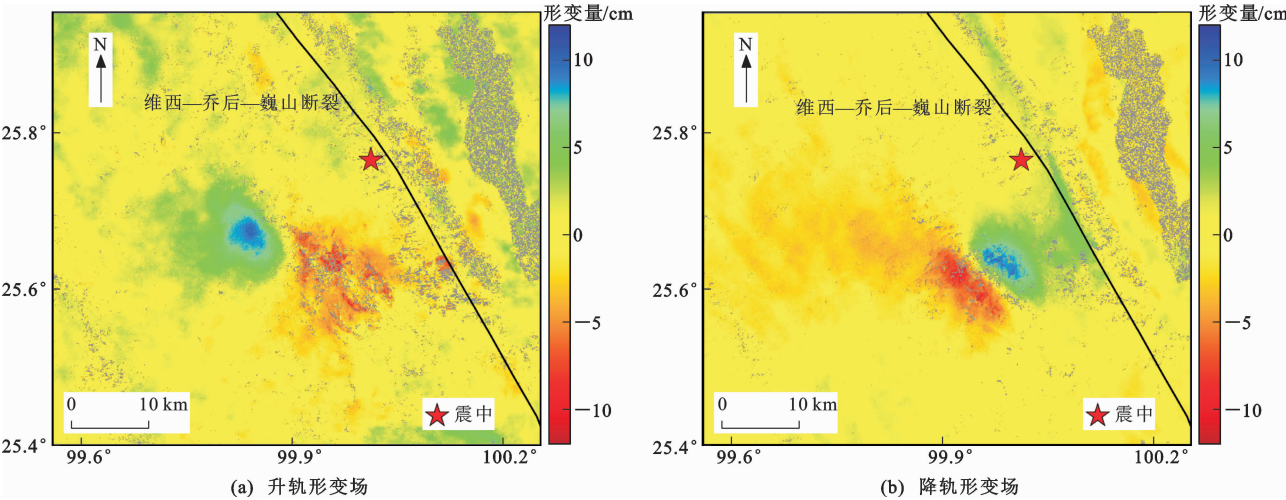


图 2 漾濞 M_w 6.4 级地震升、降轨的同震形变场
Fig. 2 Ascending and Descending Co-seismic Deformation Fields of Yangbi M_w 6.4 Earthquake

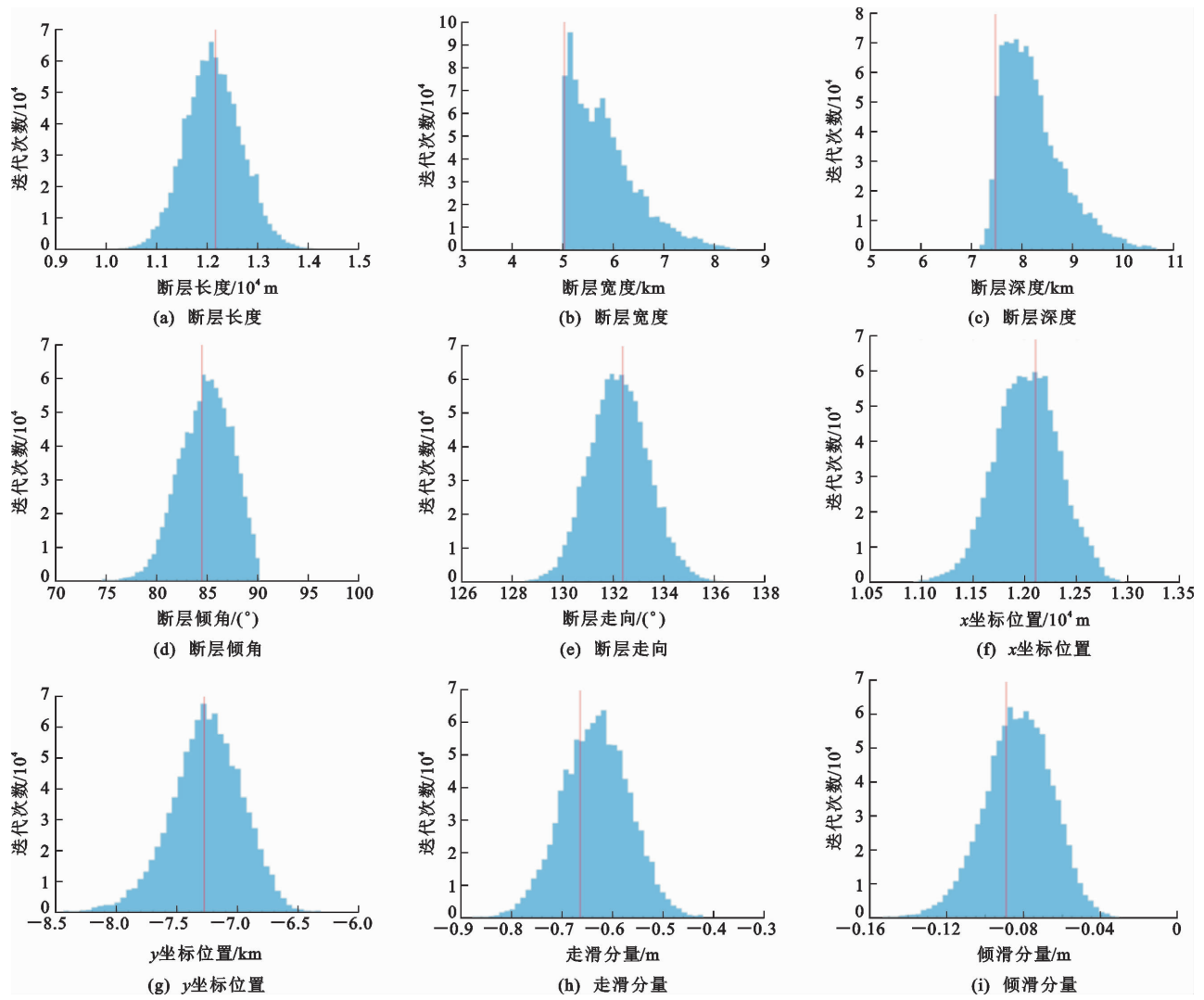


图 3 均匀滑动反演断层参数直方图

Fig. 3 Histograms of Fault Parameters of Uniform Slip Inversion

表 3 均匀滑动反演断层参数

Table 3 Fault Parameters of Uniform Slip Inversion

断层长度/km	断层宽度/km	深度/km	倾角/(°)	走向角/(°)	走滑分量/m	倾滑分量/m
12.2	5.0	7.5	83	132	−0.68	−0.09

本一致,且同震形变观测结果和均匀滑动反演结果存在很好的相关性。

3.2 同震滑动分布反演

基于 GBIS 开源软件反演可以获取地震震源参数,为进一步分析断层的运动特征以及地震成因,还需对断层进行精细化的滑动分布反演。本文利用最速下降法(Steepest Descent Method,SDM)进行滑动分布反演^[28-30]。其主要思想是利用负梯度方向来决定每次迭代的新搜索方向,随着迭代步数的增加使待优化目标函数逐步减小。该方法基于 Okada 矩形弹性位错模型。实验中参考 GBIS 开源软件计

算得到的震源参数,进行最初的参数设置。为更全面地获取整个断层的滑动分布结果,将断层长度和宽度分别沿走向和倾向进行延长,沿走向延长至 40 km,沿倾向延长至 20 km,分为 2 km×2 km 的小块,共 200 个小块。根据震源机制解和均匀滑动分布结果可知,漾濞 M_w 6.4 级地震是以走滑为主,故将断层滑动角区间设置为−180°~0°,然后计算每一小块的滑动情况。为进一步保证反演结果的稳定性,引入滑动因子(α)进行约束,最优滑动因子通过权衡模型粗糙度和拟合残差的折中曲线求得,本次反演的最优滑动因子为 0.025(图 5)。

基于最速下降法反演的结果如图 6、7 所示。断层模型的反演结果很好地反映了地震同震形变场,断层模型拟合度为 80%,不能拟合的形变主要是由形变场 NE 向地形起伏引起的误差造成。分布式滑动反演得到同震滑动分布结果如图 7 所示。断层的

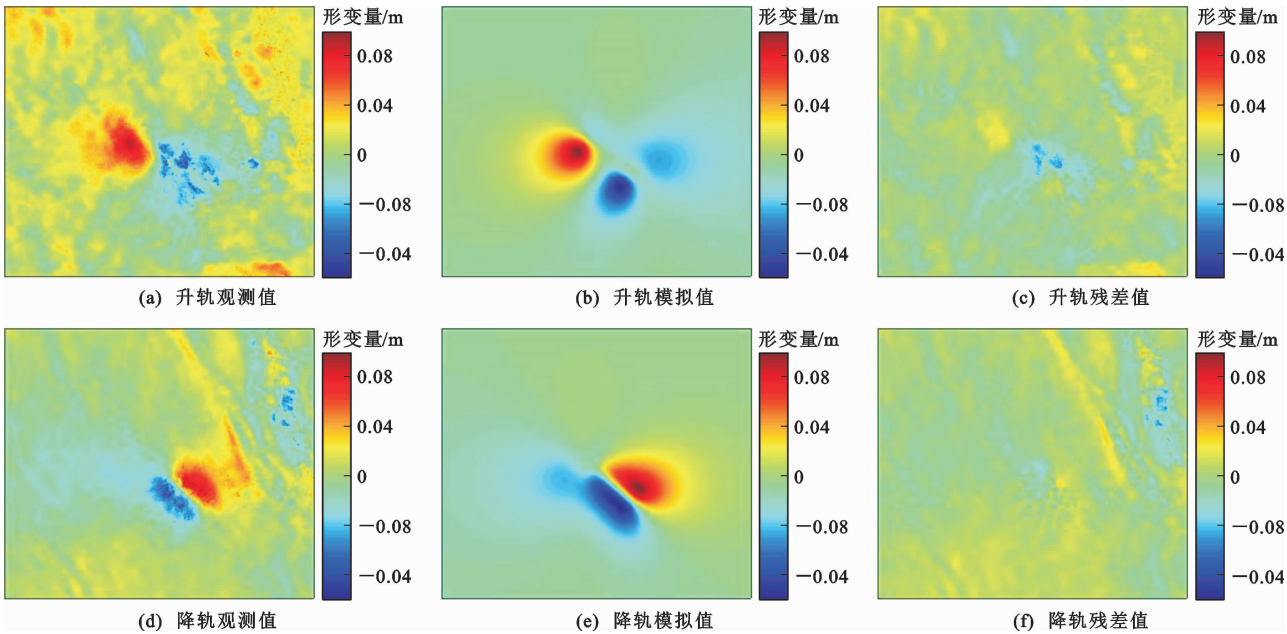


图 4 均匀滑动反演结果对比

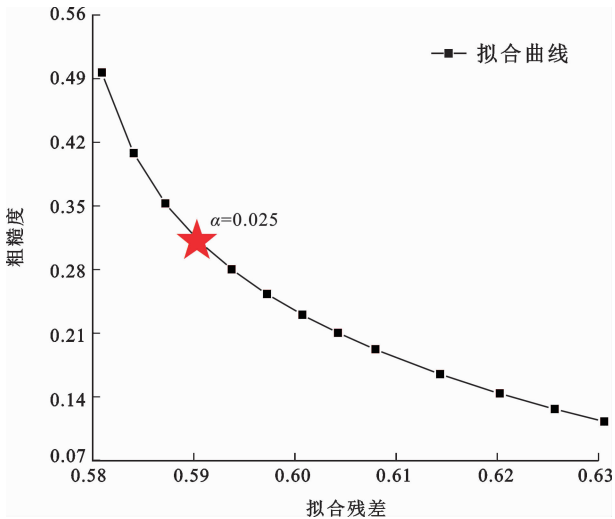
Fig. 4 Comparisons of Uniform Slip Inversion Results

滑动分布主要集中在沿走向 8~24 km 和沿倾向 2~10 km,平均滑动量为 0.19 m,平均滑动角为一 153.6°,平均矩震级为 M_w 6.1(表 4)。通过分析滑动分布结果,再一次判定此次地震是一次典型的走滑断层破裂事件。

表 4 滑动分布结果

Table 4 Sliding Distribution Results

震级	经度/(°)	纬度/(°)	深度/km	平均滑动角/(°)	平均滑动量/m
M_w 6.1	99.9	25.7	6.9	-153.6	0.19



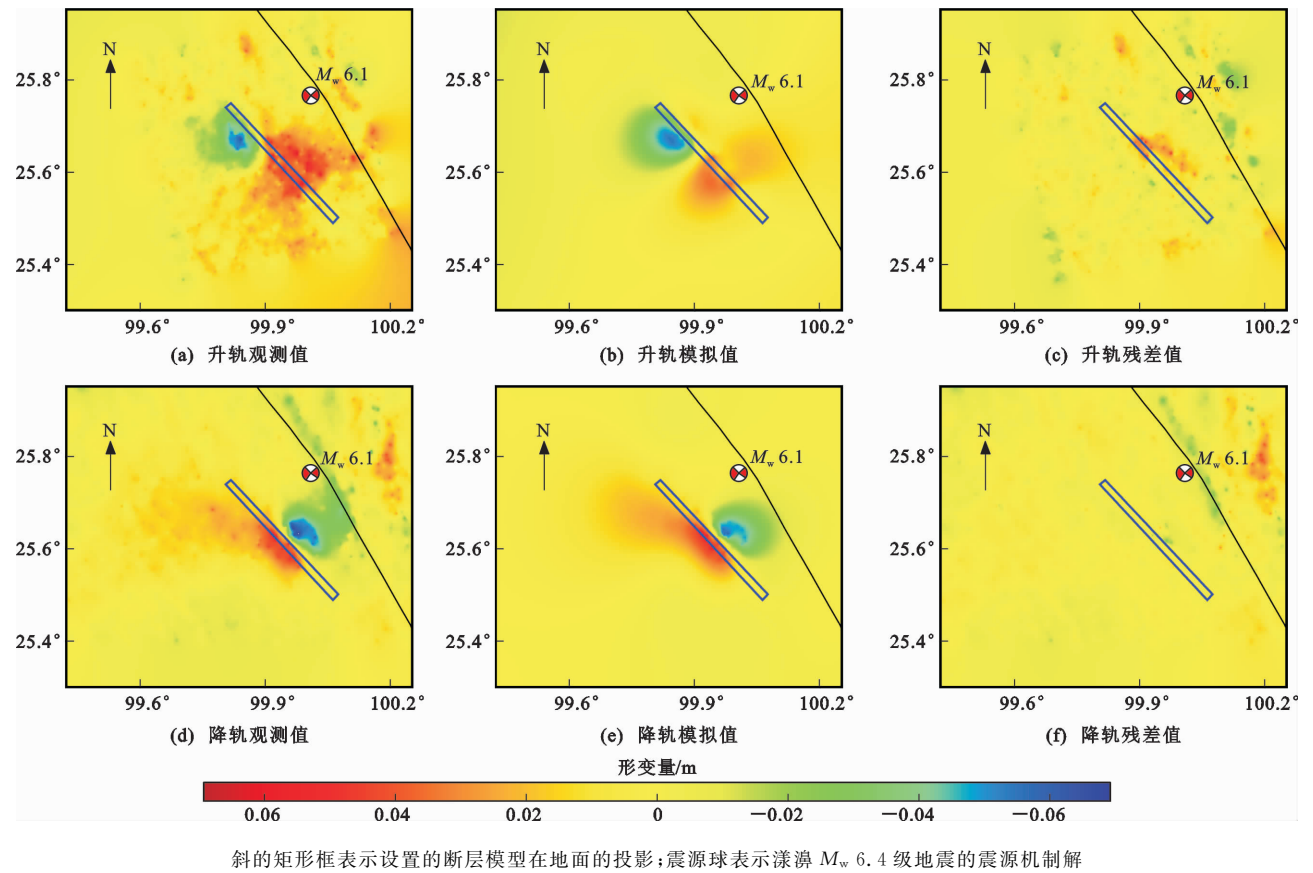
五角星表示最优滑动因子

图 5 模型粗糙度与拟合残差的折中曲线

Fig. 5 Tradeoff Curve of Model Roughness and Fitting Residuals

4 讨论

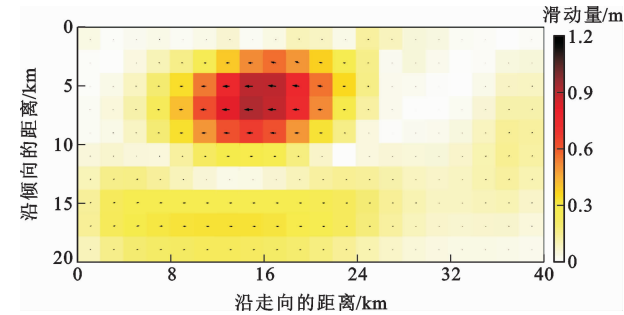
同震的破裂往往会引起周围应力场的变化,从而驱动或者抑制余震的发生^[31-32]。为了进一步揭示漾濞 M_w 6.4 级地震对周围地质构造产生的影响,本文分析了同震破裂对区域应力场的变化。以分布式滑动反演的断层滑动分布结果为依据,基于 Coulomb3.3 软件^[33-35],摩擦系数设置为 0.4,剪切模量设置为 30 GPa,分别计算深度为 7.5 km 和 10.0 km 的库伦应力分布;另外,收集了从 2021 年 5 月 21 日至 25 日的震级大于 M_w 3 的余震结果进行联合分析。基于 Coulomb3.3 软件得到的漾濞 M_w 6.4 级地震同震库伦应力变化结果如图 8 所示。将滑动分布结果、库伦应力结果以及地质构造进行联合分析可以发现:余震的分布区域与断层模型迹线走向一致;余震分布区域与断层主破裂区地面 7.5 km 深度以下的库伦应力减小的展布一致;库伦应力为正值区域,在地震发生后容易发生余震,余震的发生使得区域构造应力逐渐释放。漾濞 M_w 6.4 级地震在发震断层的主破裂区处于应力调节状态,在维西—乔后—巍山断裂附近造成了明显的应力加载,库伦应力在同震滑动分布量最大的区域处于应力加载状态。余震大部分分布在发震断层周围,但是远离主震震中,说明在主震后较短时间内,断层处于应力调节状态。同震形变场、同震滑动分布和库伦应力计算结果均显示,震中附近没有出现明显的形变



斜的矩形框表示设置的断层模型在地面的投影；震源球表示漾濞 M_w 6.4 级地震的震源机制解

图 6 同震形变观测结果与滑动分布结果对比

Fig. 6 Comparisons Between Co-seismic Deformation Observations and Sliding Distribution Results



图中箭头表示块体的运动方向

图 7 断层的二维滑动分布结果

Fig. 7 Two-dimensional Sliding Distribution Results of Fault

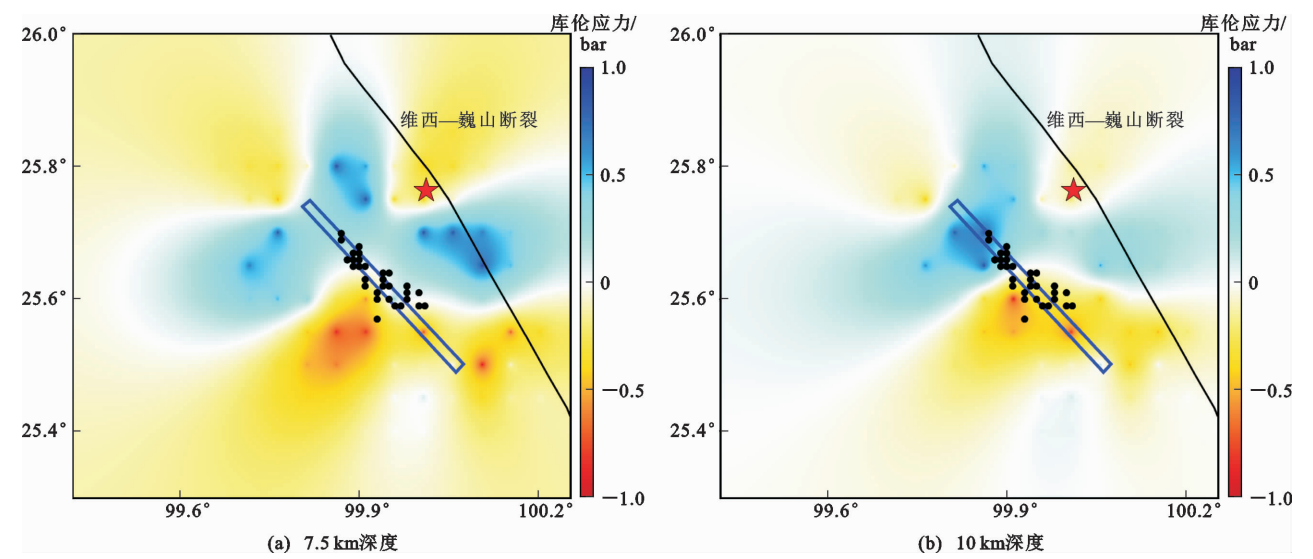
特征和较大的滑动量，并且库伦应力状态显示为负值。震中与维西—乔后—巍山断裂距离较近，因此，附近地区仍然需要持续关注。

本文基于 SAR 卫星影像开展了对漾濞 M_w 6.4 级地震的研究，并利用 Okada 矩形弹性位错模型对地震进行了构造反演，主要采用的是 GBIS 开源软件和最速下降法反演方法。反演和计算结果表明，发震断层属于右旋走滑类型，与周围的维西—乔后—巍山断裂的运动学性质相同。根据同震破裂的运动特征分析，发震断层可能属于维西—乔后—巍山断裂的次级断层，与周边断层的运动学关系还需

进一步的探索。本文所采用的 GBIS 开源软件反演为非线性反演方法，是通过假定断层面上的滑动量和滑动角是均匀的，对断层的几何参数进行蒙特卡洛搜索法迭代计算，最后得到几何参数的最优解。而最速下降法反演属于线性反演，通过 GBIS 开源软件反演获取的断层长度、宽度、走向角、倾角等参数建立断层模型，将断层沿走向和倾向进行划分，然后进行搜索，最后得到地震的滑动角、滑动量以及断层面上的滑动分布，对地震类型进行判定。根据 GBIS 开源软件反演得到的走向和倾向滑动量，可以对断层类型进行判断；同时根据最速下降法反演计算得到的滑动角和滑动分布，也可以判断断层的类型。因此，可以认为 GBIS 开源软件和最速下降法两种反演方法是可以相互进行补充和验证的。

5 结 语

- (1)2021 年 5 月 21 日发生的云南漾濞 M_w 6.4 级地震，其同震形变是由一条长度为 12.2 km、宽度为 5.0 km、深度为 7.5 km、走向角为 132° 、倾角为 83° 的断层引起的。
- (2)发震断层的滑动主要分布在沿走向 4~28



斜的矩形框表示断层在平面上的投影;圆点表示从 2021 年 5 月 21 日至 25 日的震级大于 M_w 3 的余震

图 8 库伦应力变化

Fig. 8 Changes of Coulomb Stress

km 和沿倾向 2~12 km,平均滑动角为 -153.6° ,平均滑动量为 0.19 m,且此次地震是以右旋走滑为主。

(3)基于滑动分布结果,利用 Coulomb3.3 软件计算了库伦应力分布变化。本次实验中建立的断层模型是理想状态的矩形模型,与真实的断层模型还有一些差距;在反演中也假定地壳介质在不同深度是均匀分布的,但实际地壳介质分布并不是均匀的,一般需采用全球地壳模型 Crust1.0 对地层介质进行分类,从而更好地模拟地震发生时不同地层介质对地震演化的影响。这些工作都将是下一步需要开展的工作。

“六十年激情岁月,我们共同走过;六十年创业诗篇,我们共同谱写;六十年喜怒哀乐,我们共同分享;六十年我们手拉手,跨越雄关漫道!”谨以此文祝贺西安地质调查中心组建六十周年!西安地质调查中心与中国地质环境监测院同为中国地质调查局直属单位,在水文地质、工程地质、环境调查、地质灾害等领域相互协作,共同发展。在西安地质调查中心组建六十年之际,感谢西安地质调查中心同行专家在工作中对本人的长期支持和帮助!

参考文献:

References:

[1] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. Nature, 1993, 364:138-142.

[2] 单新建,马 瑾,王长林,等. 利用星载 D-InSAR 技术获取的地表形变场提取玛尼地震震源断层参数[J]. 中国科学: D 辑,地球科学,2002,32(10):837-844. SHAN Xin-jian, MA Jin, WANG Chang-lin, et al. Co-seismic Ground Deformation and Source Parameters of Mani M 7.9 Earthquake Inferred from Spaceborne D-InSAR Observation Data[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2002, 32(10):837-844.

[3] 万永革,沈正康,王 敏,等. 根据 GPS 和 InSAR 数据反演 2001 年昆仑山口西地震同震破裂分布[J]. 地球物理学报,2008,51(4):1074-1084. WAN Yong-ge, SHEN Zheng-kang, WANG Min, et al. Co-seismic Slip Distribution of the 2001 Kunlun Mountain Pass West Earthquake Constrained Using GPS and InSAR Data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(4):1074-1084.

[4] 屠泓为,汪荣江,刁法启,等. 运用 SDM 方法研究 2001 年昆仑山口西 M_s 8.1 地震破裂分布:GPS 和 InSAR 联合反演的结果[J]. 地球物理学报,2016,59(6):2103-2112. TU Hong-wei, WANG Rong-jiang, DIAO Fa-qi, et al. Slip Model of the 2001 Kunlun Mountain M_s 8.1 Earthquake by SDM: Joint Inversion from GPS and InSAR Data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(6):2103-2112.

[5] 单新建,屈春燕,宋小刚,等. 汶川 M_s 8.0 级地震 InSAR 同震形变场观测与研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2):496-504. SHAN Xin-jian, QU Chun-yan, SONG Xiao-gang, et al. Co-seismic Surface Deformation Caused by the

- Wenchuan M_s 8.0 Earthquake from InSAR Data Analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(2): 496-504.
- [6] 季灵运, 刘传金, 徐 晶, 等. 九寨沟 M_s 7.0 地震的 InSAR 观测及发震构造分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4069-4082.
- JI Ling-yun, LIU Chuan-jin, XU Jing, et al. InSAR Observation and Inversion of the Seismogenic Fault for the 2017 Jiuzhaigou M_s 7.0 Earthquake in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4069-4082.
- [7] 单新建, 屈春燕, 龚文瑜, 等. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 M_s 7.0 级地震 InSAR 同震形变场及断层滑动分布反演[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12): 4527-4536.
- SHAN Xin-jian, QU Chun-yan, GONG Wen-yu, et al. Co-seismic Deformation Field of the Jiuzhaigou M_s 7.0 Earthquake from Sentinel-1A InSAR Data and Fault Slip Inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(12): 4527-4536.
- [8] 温少妍, 李成龙, 李 金. 2020 年 1 月 19 日新疆伽师 M_s 6.4 地震 InSAR 同震形变场特征及发震构造初步探讨[J]. 内陆地震, 2020, 34(1): 1-9.
- WEN Shao-yan, LI Cheng-long, LI Jin. Preliminary Discussion on Characteristics of Co-seismic Deformation Field and InSAR Seismogenic Structure for Xinjiang Jiashi M_s 6.4 Earthquake on January 19th, 2020 [J]. Inland Earthquake, 2020, 34(1): 1-9.
- [9] 于书媛, 骆佳骥, 杨源源, 等. InSAR 数据约束的 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 M_s 6.4 地震发震构造研究[J]. 地震工程学报, 2021, 43(4): 777-783.
- YU Shu-yuan, LUO Jia-ji, YANG Yuan-yuan, et al. Seismogenic Structure of the Yangbi, Yunnan M_s 6.4 Earthquake on May 21, 2021 Constrained by InSAR Data [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(4): 777-783.
- [10] 朱俊文, 姚赞胜, 张 波. 基于 Sentinel-1A 数据反演漾濞 M_s 6.4 地震的同震形变场及断层几何参数[J]. 地震工程学报, 2021, 43(4): 784-790.
- ZHU Jun-wen, YAO Yun-sheng, ZHANG Bo. Inversion of the Coseismic Deformation Field and Fault Geometric Parameters of the Yangbi M_s 6.4 Earthquake Based on Sentinel-1A Data [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(4): 784-790.
- [11] 张克亮, 甘卫军, 梁诗明, 等. 2021 年 5 月 21 日 M_s 6.4 漾濞地震 GNSS 同震变形场及其约束反演的破裂滑动分布[J]. 地球物理学报, 2021, 64(7): 2253-2266.
- ZHANG Ke-liang, GAN Wei-jun, LIANG Shi-ming, et al. Coseismic Displacement and Slip Distribution of the 2021 May 21, M_s 6.4, Yangbi Earthquake Derived from GNSS Observations[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(7): 2253-2266.
- [12] 王光明, 吴中海, 彭关灵, 等. 2021 年 5 月 21 日漾濞 M_s 6.4 地震的发震断层及其破裂特征: 地震序列的重定位分析结果[J]. 地质力学学报, 2021, 27(4): 662-678.
- WANG Guang-ming, WU Zhong-hai, PENG Guan-ling, et al. Seismogenic Fault and Its Rupture Characteristics of the 21 May, 2021 Yangbi M_s 6.4 Earthquake: Analysis Results from the Relocation of the Earthquake Sequence [J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(4): 662-678.
- [13] 王绍俊, 刘云华, 单新建, 等. 2021 年云南漾濞 M_s 6.4 地震同震地表形变与断层滑动分布[J]. 地震地质, 2021, 43(3): 692-705.
- WANG Shao-jun, LIU Yun-hua, SHAN Xin-jian, et al. Co-seismic Surface Deformation and Slip Models of the 2021 M_s 6.4 Yangbi (Yunnan, China) Earthquake [J]. Seismology and Geology, 2021, 43(3): 692-705.
- [14] 李大虎, 丁志峰, 吴萍萍, 等. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 M_s 6.4 地震震区地壳结构特征与孕震背景[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 3083-3100.
- LI Da-hu, DING Zhi-feng, WU Ping-ping, et al. The Characteristics of Crustal Structure and Seismogenic Background of Yangbi M_s 6.4 Earthquake on May 21, 2021 in Yunnan Province [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(9): 3083-3100.
- [15] 杨九元, 温扬茂, 许才军. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 M_s 6.4 地震: 一次破裂在隐伏断层上的潜走滑事件[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 3101-3110.
- YANG Jiu-yuan, WEN Yang-mao, XU Cai-jun. The 21 May 2021 M_s 6.4 Yangbi (Yunnan) Earthquake: A Shallow Strike-slip Event Rupturing in a Blind Fault [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(9): 3101-3110.
- [16] 段梦乔, 赵翠萍, 周连庆, 等. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 M_s 6.4 地震序列发震构造[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 3111-3125.
- DUAN Meng-qiao, ZHAO Cui-ping, ZHOU Lian-qing, et al. Seismogenic Structure of the 21 May 2021 M_s 6.4 Yunnan Yangbi Earthquake Sequence [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(9): 3111-3125.
- [17] 龙 锋, 祁玉萍, 易桂喜, 等. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 M_s 6.4 地震序列重新定位与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 2021, 64(8): 2631-2646.

- LONG Feng, QI Yu-ping, YI Gui-xi, et al. Relocation of the M_s 6.4 Yangbi Earthquake Sequence on May 21, 2021 in Yunnan Province and Its Seismogenic Structure Analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(8): 2631-2646.
- [18] 常祖峰, 常 昊, 臧 阳, 等. 维西—乔后断裂新活动特征及其与红河断裂的关系[J]. 地质力学学报, 2016, 22(3): 517-530.
- CHANG Zu-feng, CHANG Hao, ZANG Yang, et al. New Activity Characteristics of Weixi-Qiaohou Fault and Its Relationship with Honghe Fault[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(3): 517-530.
- [19] WERNER C, WEGMULLER U, STROZZI T, et al. Gamma SAR and Interferometric Processing Software [J]. ESA Bulletin, 2000, 104: 15-23.
- [20] GOLDSTEIN R M, WERNER C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications[J]. Geophysics Resource Letter, 1998, 25: 4035-4038.
- [21] ROSEN P A, HENSLEY S, ZEBKER H A, et al. Surface Deformation and Coherence Measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C Radar Interferometry[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 1996, 101(E10): 23109-23125.
- [22] EINEDER M, HUBIG M, MILCKE B. Unwrapping Large Interferograms Using the Minimum Cost Flow Algorithm[C]// IEEE. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seattle: IEEE, 1998: 187-199.
- [23] 杨成生, 张 勤, 曲菲霏, 等. 基于相位回归性分析的 SAR 差分干涉图大气延迟改正研究[J]. 上海国土资源, 2012, 33(3): 11-15.
- YANG Cheng-sheng, ZHANG Qin, QU Fei-fei, et al. Obtaining an Atmospheric Delay Correction for Differential SAR Interferograms Based on Regression Analysis of the Atmospheric Delay Phase[J]. Shanghai Land Resource, 2012, 33(3): 11-15.
- [24] 季灵运, 朱良玉, 刘传金, 等. InSAR 同震形变场及其在震源参数确定中的应用研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(3): 604-620.
- JI Ling-yun, ZHU Liang-yu, LIU Chuan-jin, et al. Review on InSAR-derived Coseismic Deformation and the Determination of Earthquake Source Parameters [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(3): 604-620.
- [25] BAGNARD I M, HOOPER A. Inversion of Surface Deformation Data for Rapid Estimates of Source Parameters and Uncertainties: A Bayesian Approach[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2018, 19(7): 2194-2211.
- [26] YANG C S, HAN B Q, ZHAO C Y, et al. Co- and Post-seismic Deformation Mechanisms of the M_w 7.3 Iran Earthquake(2017) Revealed by Sentinel-1 InSAR Observations [J]. Remote Sensing, 2019, 11(4): 11040418.
- [27] LOHMAN R B, SIMONS M. Some Thoughts on the Use of InSAR Data to Constrain Models of Surface Deformation; Noise Structure and Data Downsampling [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2005, 6(1): Q01007.
- [28] WANG R J, DIAO F Q, HOECHNER A. SDM: A Geodetic Inversion Code Incorporating with Layered Crust Structure and Curved Fault Geometry[R]. Vienna: EGU, 2013.
- [29] WANG R J, PAROLAI S, ZSCHAU J, et al. The 2011 M_w 9.0 Tohoku Earthquake: Comparison of GPS and Strong-motion Data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103: 1336-1347.
- [30] MOTAGH M, BAHROUDI A, HAGHIGHI M H, et al. The 18 August 2014 M_w 6.2 Marmori, Iran, Earthquake: A Thin-skinned Faulting in the Zagros Mountain Inferred from InSAR Measurements [J]. Seismological Research Letters, 2015, 86(3): 775-782.
- [31] SCHOLZ C H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting[M]. New York: Cambridge University Press, 1990.
- [32] PINAR A, HONKURA Y, KUGE K. Seismic Activity Triggered by the 1999 Izmit Earthquake and Its Implications for the Assessment of Future Seismic Risk[J]. Geophysical Journal International, 2001, 146(1): F1-F7.
- [33] TODA S J, STEIN R S, RICHARDS-DINGER K, et al. Forecasting the Evolution of Seismicity in Southern California: Animations Built on Earthquake Stress Transfer[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2005, 110(B5): B05S16.
- [34] LIN J, STEIN R S. Stress Triggering in Thrust and Subduction Earthquakes, and Stress Interaction Between the Southern San Andreas and Nearby Thrust and Strike-slip Faults[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, 109(B2): B02303.
- [35] WESSEL P, LUIS J, UIEDA L, et al. The Generic Mapping Tools Version 6[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2019, 20(11): 5556-5564.