

# 2021年云南漾濞 $M_s$ 6.4 地震同震位移场 和震源滑动模型反演\*

黎朕灵, 金明培\*, 廖素秋

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 基于2021年云南漾濞  $M_s$  6.4 地震震中周围40 km范围内仅有的2个强震台近场强震记录进行基线校正并给出同震位移。同时分析强震和GPS资料呈现的永久位移场特征, 利用快速获取的GPS同震位移场和InSAR升、降轨资料分别独立和联合反演该地震的震源滑动模型, 并进一步展现全空间预测位移场分布。结果表明: ①漾濞地震水平同震位移场呈现以右旋走滑为主的错动。②GPS和InSAR独立和联合反演所得的震源静态滑动范围基本一致, 均呈现单侧破裂的总体特征, 即主要滑动均发生在震中东南部。6种模型的最大滑动量分别为0.74 m、0.66 m、0.44 m、0.45 m、0.47 m和0.47 m, 反演的矩震级为  $M_w$  5.9~6.3。③根据震源滑动模型正演所得的漾濞地震全空间预测水平同震位移场与实际观测位移场一致性较好, 震中南、北两侧向内挤压, 东、西两侧向外拉伸, 符合走滑型地震所产生的四象限位移场分布特征。

**关键词:** 近场强震记录; 基线校正; GPS; 同震位移场; InSAR; 震源滑动模型; 漾濞  $M_s$  6.4 地震

**中图分类号:** P315.72

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2021)03-0330-08

## 0 引言

2021年5月21日21时48分34秒, 云南省大理白族自治州漾濞县(25.67°N, 99.87°E)发生  $M_s$  6.4 地震, 震源深度8 km。地震造成漾濞县、永平县、洱源县、大理市不同程度的房屋破坏和人员伤亡。据统计, 地震共造成3人死亡, 34人受伤。

在震后及时解算和分析多种资料的同震位移场、探讨震源滑动模型与孕震机理, 能更好地认识地震的成因、了解地震的运动学特征, 对地壳构造运动、地震动力学特征及震后快速应急响应、工程抗震设计和震后趋势判定等工作有重要指导意义。同震位移场可通过空间—大地测量方法获得, 例如InSAR和连续GPS观测(Ge *et al.*, 2008; Ozawa *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2013; 温少妍等, 2018; 黄星, 2020; 张华英等, 2021), 或由近断层强震记录解算获得。但由于地震发生时观测点

地面的倾斜和旋转、仪器效应和低频干扰等原因, 强震记录客观存在基线漂移, 直接积分得到的速度和位移时程会出现严重的非物理漂移, 因此需要对基线漂移进行校正处理, 以便估计出较准确的同震位移。目前已有许多针对基线漂移的校正方法, 如Iwan(1985)采用特征时间点的方法来定义基线漂移的开始和结束时间, 以连续函数的形式表示速度时程的基线校正; Wu(2007)采用双线性校正, 以迭代的方式确定特征时间点, 使校正后的位移呈现斜坡函数的形式; Chao等(2010)在Wu等(2007)研究基础上, 采用加速度图中的能量分布比作为基线校正的依据; Wang等(2011)在上述研究基础上, 提出改进的经验基线校正的自动化方案SMBLOC, 该方法能够在震后快速获取较准确的强震同震位移, 已在多个地震震例中取得了较好的结果(金明培等, 2014, 2017; 申文豪, 2019; 黎朕灵, 2020)。目前震源反演研究主要表现出两大发展趋势: 一是快速获取有价值的单一地震资料以便在震后快速反演得

\* 收稿日期: 2021-06-16.

基金项目: 国家重点研发计划子专题(2018YFC150330303)资助.

第一作者简介: 黎朕灵(1993-), 助理工程师, 主要从事强震动模拟研究. E-mail: Lzlzmey@163.com.

✪ 通讯作者简介: 金明培(1969-), 研究员, 主要从事强震动模拟、接收函数等数字地震学研究.

E-mail: jmp69@263.net.

到震源模型;二是采用多种资料进行联合反演。仅使用单一的数据难以保证对震中区域的空间全覆盖,多种数据的联合反演能确保信号覆盖得更全面,提高数据的覆盖率,且联合反演也可以看作是不同的数据之间的相互约束条件(张勇, 2010)。强震和 GPS 给出的近场永久位移都是一些有限测点的信息,而永久位移常随测点间距的增大呈非线性变化,且虽然 GPS 观测资料在水平方向上精度较高,但在垂直向上精度不足。Wang (2012) 认为 GPS 数据可以对断层的滑动量提供更丰富的约束;Feng 等 (2012) 利用 GPS 数据对 InSAR 形变结果进行校正,以消除大气和轨道的影响;王永哲 (2015) 通过联合 GPS 和 InSAR 数据反演 2011 年日本东北  $M_w9.0$  地震同震滑动分布,认为 InSAR 数据可以很好地弥补 GPS 数据空间分辨率的不足。

为了提高数据的约束和覆盖率,本文基于 GPS 和 InSAR 数据分别独立和联合反演漾濞地震的震源滑动模型,采用 Wang 等 (2008) 基于牛顿最速下降法编写的 SDM (Steepest Decent Method) 程序进行反演,利用 SMBLOC 程序对漾濞地震近场质量较好的强震数据进行基线校正,对强震和 GPS 观测同震位移场特征进行分析,探讨此次地震的位移分布特征及断层错动方式。同时,基于快速获取的 GPS 永久位移和 InSAR 升降轨视线向 LOS 位移数据资料分别独立和联合反演震源滑动模型,并根据滑动模型计算漾濞地震全空间预测同震位移场。

## 1 研究区概况及资料选取与处理

漾濞  $M_s6.4$  地震发生在多震的滇西北地区,该地区的强震危险性一直是地震地质领域关注的焦点之一(毛玉平等, 2003),震中附近发育有 NW 向的维西—乔后断裂。根据云南地震台观测资料,漾濞地震的前—主—余震序列大致沿该断裂的西侧呈北西向条带状分布,余震集中分布于主震的东南方向。维西—乔后断裂是红河断裂带向北弥散延伸的分支断裂,全长约 280 km。总体走向北西,倾向北东或南西,倾角为  $50^\circ \sim 70^\circ$ 。早期该断裂的活动性质以挤压为主,晚第四纪以来则以右旋走滑为主,兼张性正断(常祖峰等, 2014)。近十余年来,该区域中小地震活动呈持续

增强态势,例如 2013 年洱源 5.5 级地震(常祖峰等, 2014) 和 2017 年漾濞 5.1 级地震(潘睿等, 2019)。

因漾濞地震震源尺度较小,近场强震台站稀疏,仅 53YBX 和 53YPX 强震台数据质量较好,所以选取这两个强震台进行基线校正;在震中 40 km 范围内共有 35 个 GPS 观测站记录到同震位移,选取其中水平位移大于 0.3 cm 的观测站进行分析,选取的台站如图 1 所示。采用 Sentinel-1A 哨兵卫星的 InSAR 资料,其中 InSAR 升轨数据为 2021 年 5 月 20—26 日的影像资料;降轨数据为 2021 年 5 月 10—22 日的影像资料。

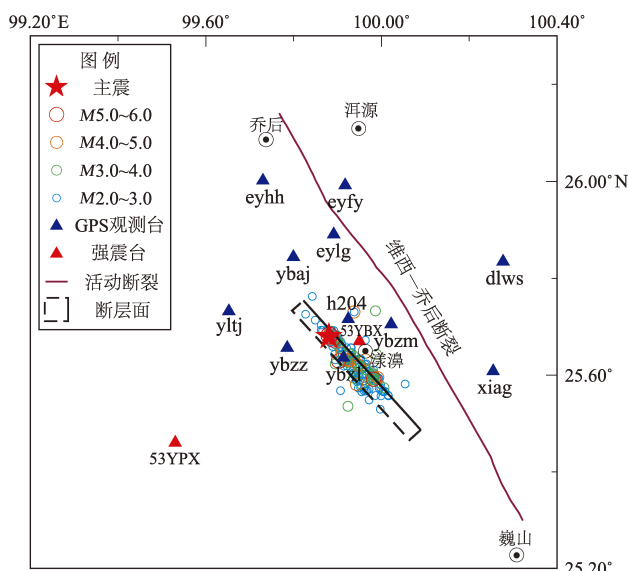


图 1 2021 年云南漾濞  $M_s6.4$  地震震中周边台站空间分布及余震震中分布

Fig. 1 Distribution of stations around the epicenter of the  $M_s6.4$  Yangbi earthquake and the aftershock epicenters

本文采用 SMBLOC 方法(Wang *et al.*, 2011)对强震资料进行基线校正。一般来说,基线校正通常基于积分之后未校正的速度或未校正的位移来估计基线漂移。使用由 Wang 等 (2008, 2009) 根据约束条件下最小二乘原理、基于牛顿最速下降法编写的 SDM 程序进行反演,目前该程序已被广泛应用于同震或震后的滑动分布反演(Diao *et al.*, 2010, 2011; Xu *et al.*, 2010; 金明培等, 2013, 2014, 2017; 屠泓为等, 2016; 黎联灵等, 2020)。漾濞地震震中经纬度 ( $25.67^\circ \text{N}$ ,  $99.87^\circ \text{E}$ ) 选取自云南地震台结果,震源机制解采

用张迎峰基于 InSAR 资料得到的结果,即走向  $138^\circ$ 、倾角  $80^\circ$ 、滑动角  $170^\circ$ 、参照  $M > 2.0$  的余震分布取断层面的长为 40 km、宽为 20 km。

## 2 同震位移场特征

此次地震造成的地面位移较小,为了更好地

探究震后地表运动特征,笔者选取水平位移大于 0.3 cm 的 11 个 GPS 观测站和数据质量较好的 53YBX 和 53YPX 强震台数据进行分析(图 1)。图 2 给出了采用 SMBLOC 程序校正后距离震中最近的强震台 53YBX 三分量的加速度、速度和位移时程图。此次地震使 53YBX 台向西移动了 3.7 cm,向北移动 2.8 cm,向下移动 1.8 cm。

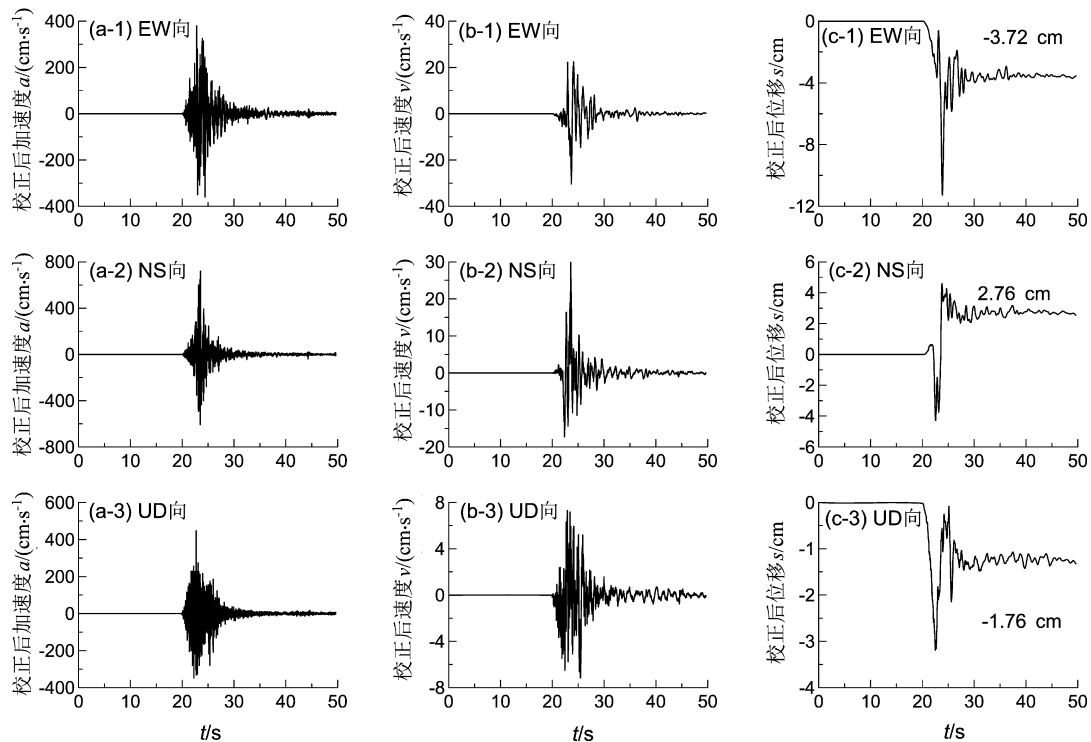


图 2 53YBX 台经基线校正后的加速度 (a)、速度 (b) 和位移 (c) 时程

Fig. 2 The time-history of acceleration (a), velocity (b) and displacement (c) at 53YBX station after baseline correction

图 3 为基于强震和 GPS 数据得到的漾濞  $M_s 6.4$  地震的同震位移场,主要有以下特征:

(1) 同震位移分布范围与幅度。GPS 能检测到的同震位移场主要分布在震中 40 km 范围内, GPS 观测站主要分布在震中北部,在震中南部分布稀疏。53YPX 强震台位于震中东南部,能在一定程度上弥补该方向上 GPS 测点不足。从图 3a 的水平同震位移场来看,强震最大水平位移出现在震中东南部约 7.7 km 的 53YBX 台, GPS 最大水平位移出现在震中东北部约 5.4 km 的 h204 台,其东西、南北、垂直向位移分别为 4.6 cm、0.5 cm、-0.2 cm。

(2) 位移场反映的断层错动方式。从较大范围来看,同震位移场反映断层错动以右旋走滑为主。水平同震位移场(图 3a)特征表现为:以断

层面为界,其西部的 GPS 观测站和 53YPX 强震台水平位移均向外拉张,西北部和西南部分别表现为西北向和西南向位移;距断层面较远的东部台站均表现为东南向位移;断层面北向 GPS 观测站密集,大多表现为正南向位移;位于断层面西南盘、震中南侧的 ybx1 台位移方向为 NNW,与位于断层面东北盘、震中东北方向的 h204 台的位移方向基本相反,表明震中南、北侧位移为向内压缩。虽然此次地震周边台站分布不均匀,震中南部观测点较少,但从整体上看,其水平向同震位移场呈现出相对较好的四象限对称分布。从垂直向位移场(图 3b)来看,在震中北部表现为向上的位移,在南部多表现为向下的位移。

从同震位移场还可以看出,最大永久位移主

要发生在断层面内震中东侧和东南端, 结合图1的余震空间展布, 余震大致沿震源机制解给出的走向  $138^\circ$  分布。地震造成的最大地表永久位移和震后余震展布均距离维西—乔后断裂较远, 且断层走向与该断裂走向存在  $10^\circ$  左右差距, 因此, 推测此次地震未发生在维西—乔后断裂的主干断裂上, 发震断层有可能是该断裂的次级断裂, 该结论也得到现场科考结果的证实 (李传友等, 2021)。

(3) 强震与 GPS 位移场比较。震中附近强震台站稀少, 相距最近的 GPS 观测站和强震台仅有一对: 53YPX 和 h204 台, 分别位于震中的南北两

端, 其南北方向上位移相反, 与震源机制解反映的断层错动相符合。但在震中东西方向, 因 53YBX 台接近所选取的断层线, 导致其虽位于东北盘, 但位移方向却为北西向。由于强震台站数量较少, 在滑动模型反演中仅使用 GPS 位移场和 InSAR 资料进行计算。

基于 InSAR 升降轨数据绘制同震形变场, 如图4所示。从 InSAR 降轨形变场看, 形变主要发生在断层两侧, 且两侧形变存在明显差异 (图4a)。InSAR 升轨形变场因包含震后5天大量余震影响, 断层两侧的形变特征不明显 (图4b)。

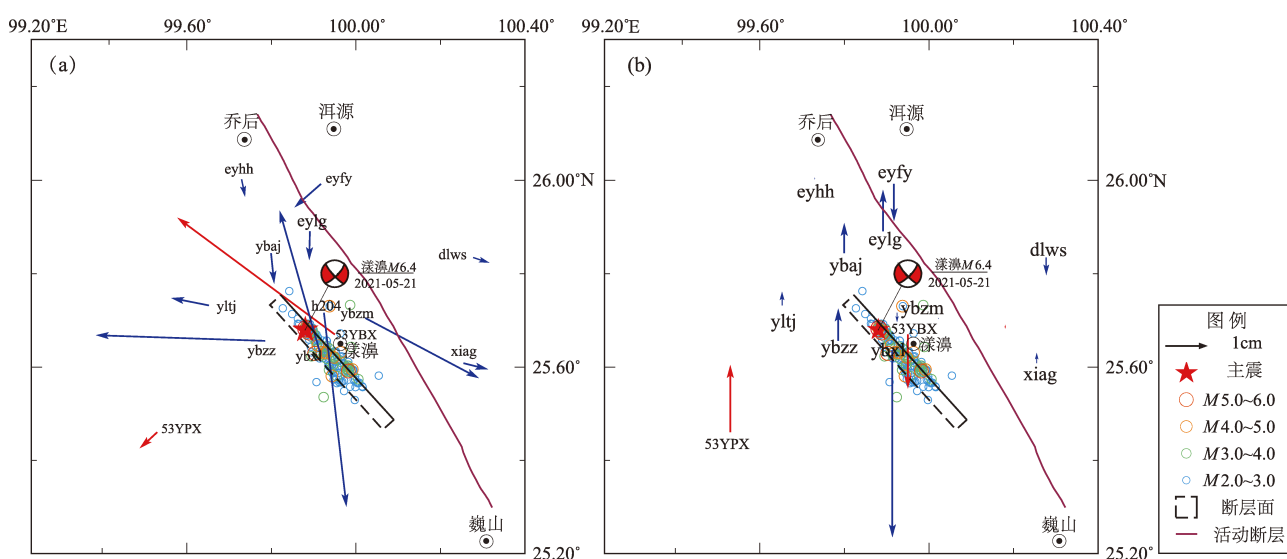


图3 基于强震 (红色) 和 GPS (蓝色) 观测数据所得的漾濞  $M_s 6.4$  地震水平向 (a) 和垂直向 (b) 同震位移场 (断裂同图1)

Fig. 3 Comparison of horizontal (a) and vertical (b) co-seismic displacement fields derived from the strong motion observation (red) with the ones derived from GPS observation (blue)

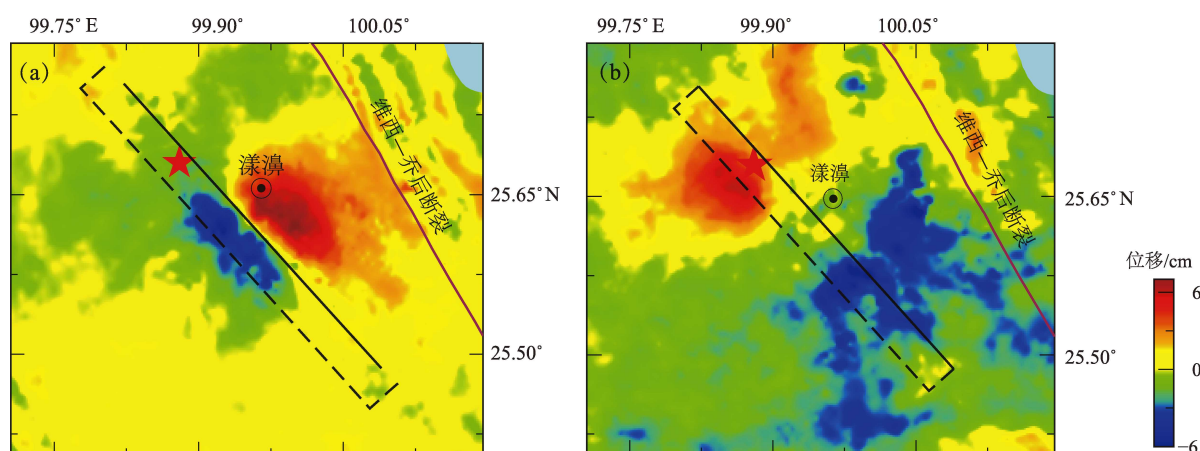


图4 漾濞地震 InSAR 降轨 (a)、升轨 (b) 同震位移场 (视线向)

Fig. 4 The co-seismic LOS displacement field of InSAR - descending (a) and InSAR - ascending (b) in the Yangbi  $M_s 6.4$  earthquake event



3 震源滑动模型反演

地壳速度结构模型采用杨军等（2014）反演云南地区中小地震震源机制解所采用的莫霍面深度为 55 km 的模型（表 1）。

表 1 反演所用地壳速度模型			
Tab. 1 Crustal velocity model near the epicenter for inversion			
地壳分层/km	$V_p/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$V_s/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
0.00 ~ 3.00	5.50	2.50	2.50
3.00 ~ 18.00	6.10	3.45	2.81
18.00 ~ 25.00	6.35	3.55	2.88
25.00 ~ 39.00	5.70	3.35	2.61
39.00 ~ 55.00	6.65	3.65	2.97
$\geq 55.00$	7.80	4.30	3.28

根据震源和断层参数可快速计算出断层参考点的位置为 (99.82°E, 25.75°N)，深度取 0 km，断层共分为 800 个子断层，每个断层子单元为

1 km × 1 km，由于 GPS 垂直位移场的解算精度不及水平向，因此在反演时赋予较小的权重。图 5 给出最终的反演结果，表 2 为各个模型参数对比。

图 5a ~ c 使用单一数据反演震源滑动模型，各个模型主要特征有：（1）基于 GPS 资料滑动模型（以下简称 GPS 模型）最大滑动量为 0.74 m，滑动主要分布在震中东南部 25 km 范围内，最大破裂发生在沿倾向 2 ~ 10 km，走向 11 ~ 22 km 的断层面上。（2）基于 InSAR 降轨资料的滑动模型（以下简称 InSAR 降轨模型）最大滑动量为 0.44 m，相对 GPS 模型的滑动量较小，滑动分布集中在震中东南部 15 km 范围内，最大破裂发生在沿倾向 2 ~ 9 km、走向 12 ~ 22 km 的断层面内。相对于 GPS 模型，InSAR 降轨模型的滑动量分布更为集中，最大破裂更接近地面。（3）基于 InSAR 升轨资料的滑动模型（以下简称 InSAR 升轨模型）最大滑动量为 0.66 m，滑动主要分布在震中东南部 25 km 范围内，且在断层底部也分布有约 0.2 m 的滑动，最大破裂发生在断层沿倾向 0 ~ 9 km、走向 11 ~ 30 km 处，因为漾濞  $M_s 6.4$  地震后又发生多次

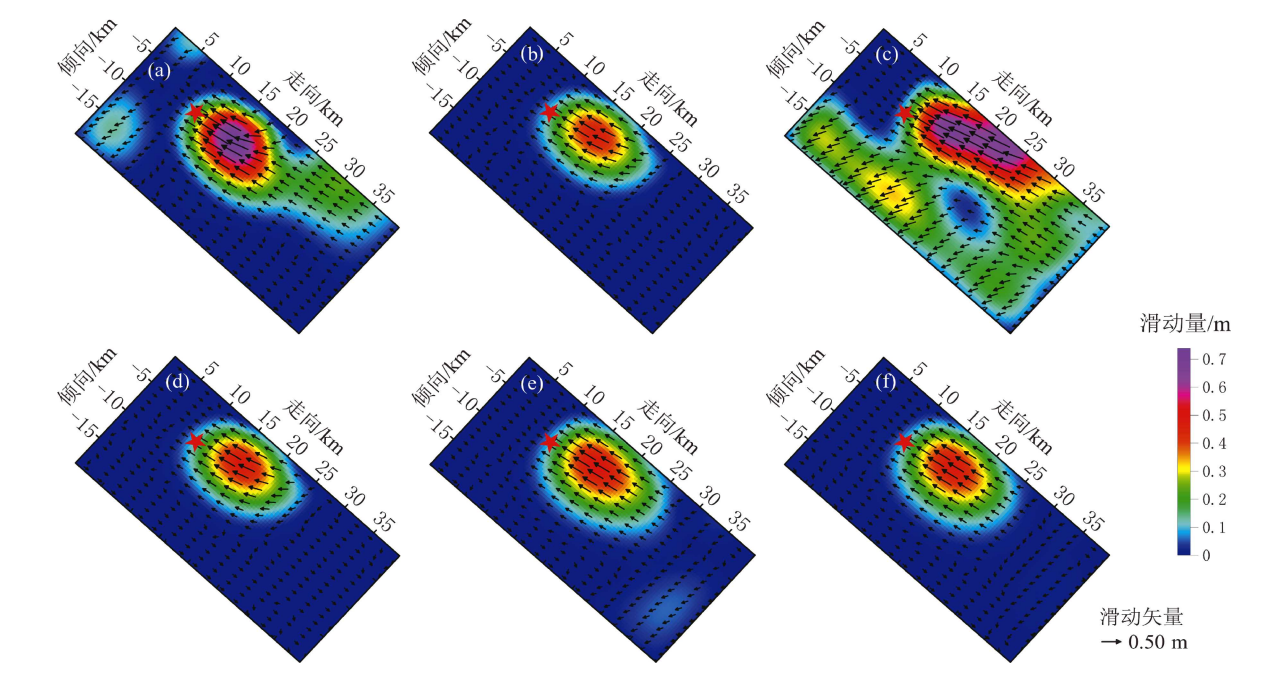


图 5 基于 GPS (a)、InSAR 降轨 (b) 和升轨 (c) 资料独立反演所得的震源滑动模型，GPS 分别联合 InSAR 降轨资料 (d)、升降轨资料 (升轨模型权重为 1) (e) 以及升降轨资料 (升轨模型权重为 0.5) (f) 反演所得的震源滑动模型

Fig. 5 Slip models obtained by inversion of GPS data (a), InSAR – descending data (b), and InSAR – ascending data (c) repectively; Slip models obtained by inversion of GPS data combined with InSAR – descending data (d), GPS data combined with InSAR – ascending data (weight=1) (e); A slip model obtained by inversion of GPS data combined with InSAR – descending data and InSAR – ascending data (weight=0.5) (f)

表2 基于相同断面使用不同资料反演所得滑动模型结果比较

Tab. 2 Slip model parameters obtained by GPS and InSAR based on the same of fault parameters

资料	$M_w$	数 - 模相关系数	平均滑动位移/m	最大滑动位移/m	平均应力降/MPa	最大应力降/MPa
GPS	6.2	0.97	0.10	0.74	1.25	4.6
InSAR 升轨	6.3	0.86	0.20	0.66	0.97	3.38
InSAR 降轨	5.9	0.86	0.04	0.44	0.95	2.81
GPS + InSAR 降轨	5.9	0.86	0.04	0.45	0.95	2.81
GPS + InSAR 升降轨 (升轨权重为 1)	6.0	0.74	0.06	0.47	0.85	2.65
GPS + InSAR 升降轨 (升轨权重 0.5)	6.0	0.77	0.05	0.47	0.82	2.70

余震，而 InSAR 升轨数据包含大量余震干扰，导致其滑动分布与 GPS 和 InSAR 降轨模型的范围略有不同，滑动量比 InSAR 降轨模型较大，反演所得的震级为  $M_w6.3$ ，相较其它模型偏大。

因 InSAR 升轨数据包括主震后 5 日的观测结果易受余震数据干扰，反演时可能会造成一定的误差，所以在反演滑动模型时，对该资料给予较小的权重，主要采用 3 种联合反演方式：GPS + InSAR 降轨（图 5d）、GPS + InSAR 升降轨（图 5e，升轨权重为 1）和 GPS + InSAR 升降轨模型（图 5f，其中升轨权重为 0.5）。使用这 3 种联合反演模型得到的最大滑动量为 0.43 ~ 0.45 m，滑动主要分布在沿走向 10 ~ 25 km、沿倾向 0 ~ 12 km 的断层面内，最大破裂发生在沿走向 12 ~ 22 km、沿倾向 2 ~ 9 km 的断层面内，与 GPS 和 InSAR 降轨模型基本一致，与 InSAR 升轨模型略有差异。

本文所使用的 6 种模型均显示漾濞地震的断层错动以右旋走滑为主。最大破裂均发生在距离震中约 3 km 的东南侧，呈现出明显的单侧破裂特征。可能因为数据的不同，造成各个模型的滑动范围及最大滑动量存在一定的差异。但除 InSAR 升轨模型外，其余 5 种模型的最大破裂范围基本一致，各个模型滑动量均在一个量级内。因此，6 种模型整体具有较好的一致性。

漾濞  $M_s6.4$  地震前震和余震均较为丰富，其中包括 1 次 5.6 级前震和 2 次 5 级以上余震，截至 5 月 21 日 24 时和 25 日 24 时共记录到  $M_L \geq 1.0$  余震多达 206 次和 1 590 次。前震和余震，特别是震级较大的前震和余震对 InSAR 升降轨解算的同震位移场均有一定的影响，而且，InSAR 往往只能给出视线向 (LOS) 位移场，而非传统意义上的水平和垂直位移场。因此，根据联合反演的滑动模型，我们计算了震中周围 (99.3° ~ 100.4°E, 25.2° ~ 26.2°N) 全空

间的预测地表静态水平位移分布（图 6），取位移点的间隔约为 8 km，以便更为直观地了解此次地震的影响。从图 6 可以看出，断层线东西两侧的位移向外扩张，震中南北两端的位移向内挤压，在震中的东南部位移达到最大值，反映断层错动以右旋走滑为主，与由观测值计算所得的同震位移场所反映的震源机制基本一致。对于台站分布不均匀的地区，全空间预测同震位移分布图可提供密集的地表位移分布，为震后的物质运输、救援力量分配等提供有价值的参考。

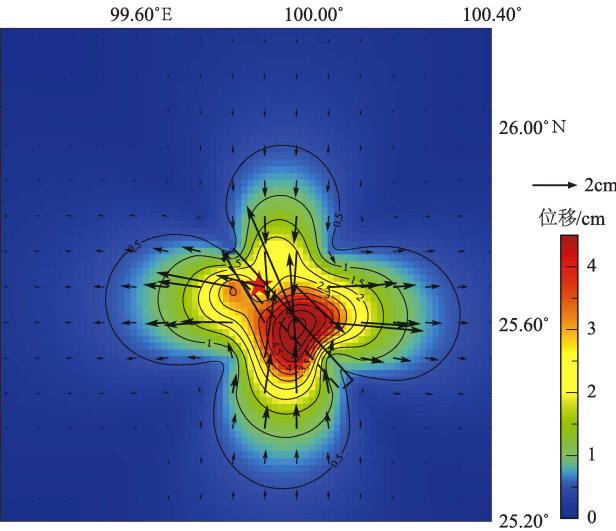


图6 漾濞  $M_s6.4$  地震的全空间预测水平同震位移场  
Fig. 6 The full - space prediction of the horizontal co - seismic displacement field of the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake

4 结论

本文基于 2021 年漾濞  $M_s6.4$  地震后震中周围 2 个强震台三分量加速度记录，利用经验基线校正

自动化方案 (SMBLOC) 对强震记录进行基线校正后估算其同震位移。利用快速获取的 GPS 同震位移场、InSAR 升、降轨数据分别独立和联合反演漾濞地震的震源滑动模型, 并根据滑动模型进一步给出了震中周围全空间预测水平同震位移场, 主要得出以下结论:

(1) 漾濞地震的同震位移场呈现较好的四象限分布, 震中东、西两侧位移向外拉, 而震中南、北两侧位移向内挤压, 永久位移在震中的东南端达到最大值。从基于 GPS 同震位移场、InSAR 升、降轨数据分别独立和联合反演的震源滑动模型来看, 6 种模型的滑动范围大致相同, 最大破裂均发生在震中东南侧, 西北侧滑动较小或基本没有滑动, 呈现出单侧破裂的总体特征。结合余震分布和 InSAR 降轨干涉图像, 推测此次地震未发生在维西—乔后主干断裂上, 发震构造可能为维西—乔后断裂的次级断裂。

(2) 全空间预测水平同震位移场与实际观测的同震位移场呈现出较好的一致性。对于观测台站较为稀疏的地区或是震源尺度较小的地震, 通过全空间预测水平同震位移场可更全面地了解震中附近更大范围内受地震影响的情况, 为了解地震的孕育、发生、发展和震后的应急救援, 提供有价值的参考。

感谢中国地震局地质研究所甘卫军研究团队提供的 GPS 同震位移资料; 感谢中国地震局地质研究所张迎峰博士分享 Sentinel-1A 哨兵卫星 InSAR 解算资料。

## 参考文献:

常祖峰, 张艳凤, 周青云, 等. 2014. 2013 年洱源  $M_s5.5$  地震烈度分布及震区活动构造背景研究[J]. 中国地震, 30(4): 560–570.

黄星. 2020. InSAR 和 GPS 技术在震间和同震形变领域的应用研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所.

金明培, 黎联灵, 汪荣江. 2017. 日本熊本  $M_w7.0$  地震同震位移场和震源滑动模型反演[J]. 地震学报, 39(6): 819–830.

金明培, 汪荣江, 屠泓为. 2014. 芦山 7 级地震的同震位移估计和震源滑动模型反演尝试[J]. 地球物理学报, 57(1): 129–137.

金明培, 汪荣江. 2013. 用近场强震动记录快速估计同震位移并反演震源滑动分布[J]. 地球物理学报, 56(4): 1207–1215.

黎联灵, 金明培, 缪素秋. 2020. 2016 年 8 月 24 日意大利佩鲁贾  $M_w6.2$  级地震同震位移场估计和震源滑动模型反演[J]. 地球物理学进展, 35(1): 32–39.

李传友, 张金玉, 王伟. 2021. 2021 年云南漾濞  $M_s6.4$  地震发震构造

分析[J]. 地震地质, 43(3): 706–721.

毛玉平, 韩新民, 谷一山, 等. 2003. 云南地区强震 ( $M \geq 6$ ) 研究[M]. 昆明: 云南科技出版社.

潘睿, 姜金钟, 付虹, 等. 2019. 2017 年云南漾濞  $M_s5.1$  及  $M_s4.8$  地震震源机制解和震源深度测定[J]. 地震研究, 42(3): 338–348.

申文豪, 李永生, 焦其松, 等. 2019. 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, 62(1): 115–129.

屠泓为, 汪荣江, 刁法启, 等. 2016. 运用 SDM 方法研究 2001 年昆甸山口西  $M_s8.1$  地震破裂分布: GPS 和 InSAR 联合反演的结果[J]. 地球物理学报, 59(6): 2103–2112.

王永哲. 2015. 利用 GPS 和 InSAR 数据反演 2011 年日本东北  $M_w9.0$  地震断层的同震滑动分布[J]. 地震学报, 37(5): 796–805, 885.

温少妍, 单新建, 张国宏, 等. 2018. 基于 InSAR 和远场地震波联合反演 2008 年  $M_w6.3$  大柴旦地震震源破裂过程[J]. 地球物理学报, 61(6): 2301–2309.

杨军, 苏有锦, 陈佳, 等. 2014. 利用 CAP 方法快速计算云南地区中小地震震源机制解[J]. 中国地震, 30(4): 551–559.

张华英, 杨建文, 高琼. 2021. 2021 年漾濞  $M_s6.4$  级地震前兆异常分析[J]. 华南地震, 41(2): 176–182.

张勇. 2010. 地震破裂过程反演及其在大地震应急中的应用研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.

Chao W A, Wu Y M, Zhao L. 2010. An automatic scheme for baseline correction of strong-motion records in coseismic deformation determination[J]. Journal of Seismology, 14(3): 495–504.

Diao F, Xiong X, Wang R J. 2011. Mechanisms of transient postseismic deformation following the 2001  $M_w7.8$  Kunlun (China) Earthquake[J]. Pure and Applied Geophysics, 168(5): 767–779.

Diao F, Xiong X, Wang R, et al. 2010. Slip model of the 2008  $M_w7.9$  Wenchuan (China) earthquake derived from co-seismic GPS data[J]. Earth Planets & Space, 62(11): 869–874.

Feng G, Ding X, Li Z, et al. 2012. Calibration of an InSAR-derived coseismic deformation map associated with the 2011  $M_w9.0$  Tohoku–Oki Earthquake[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 9(2): 302–306.

Ge L, Zhang K, Ng A H, et al. 2008. Preliminary results of satellite radar differential interferometry for the Co-seismic Deformation of the 12 May 2008  $M_s8.0$  Wenchuan earthquake[J]. Geographic Information Sciences, 14(1): 12–19.

Hu J, Li Z W, Ding X L, et al. 2013. Derivation of 3-D coseismic surface displacement fields for the 2011  $M_w9.0$  Tohoku–Oki earthquake from InSAR and GPS measurements[J]. Geophysical Journal International, 192(2): 573–585.

Iwan W D, Moser M A, Peng C Y. 1985. Some observations on strong-motion earthquake measurement using a digital accelerograph[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 75(5): 1225–1246.

Ozawa S, Nishimura T, Suito H, et al. 2011. Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude 9 Tohoku–Oki earthquake[J]. Na-

- ture.
- Wang C, Ding X, Shan X, *et al.* 2012. Slip distribution of the 2011 Tohoku earthquake derived from joint inversion of GPS, InSAR and seafloor GPS/acoustic measurements[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 57(6): 128–136.
- Wang L, Wang R, Roth F, *et al.* 2009. Afterslip and viscoelastic relaxation following the 1999  $M7.4$  Izmit earthquake from GPS measurements [J]. *Geophysical Journal International*, 178(3): 1220–1237.
- Wang R J, Motagh M, Walter T R. 2008. Inversion of slip distribution from coseismic deformation data by a sensitivity – based iterative fitting (SBIF) method//EGU General Assembly 2008. Vienna, Austria; EGU.
- Wang R J, Schurr B, Milkereit C, *et al.* 2011. An improved automatic scheme for empirical baseline correction of digital strong – motion records[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(5): 2029–2044.
- Wu Y M, Wu C F. 2007. Approximate recovery of coseismic deformation from Taiwan strong – motion records[J]. *Journal of Seismology*, 11(2): 159–170.
- Xu C, Liu Y, Wen Y, *et al.* 2010. Coseismic slip distribution of the 2008  $M_w7.9$  Wenchuan earthquake from joint inversion of GPS and InSAR data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5B): 2736–2749.

## Slip Model and Co – seismic Displacement Field of the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ Earthquake

LI Zhenling, JIN Mingpei, MIAO Suqiu

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

On the basis of the near – field strong motion records within 40 km around the epicenter of the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake in Yunnan on May 21, 2021, we used an improved automatic empirical baseline correction method to estimate the co – seismic displacement. We analyzed the characteristics of strong motion and GPS co – seismic displacement field. We inverted independently and jointly the source slip model using GPS data and InSAR ascending – and descending – orbit data, and further proposed the distribution of the predicted, full – space, co – seismic displacement field based on the slip model. The results showed that: (1) The horizontal co – seismic displacement field showed that the fault dislocation was dominated by right – lateral strike – slip. (2) The static slip range of the source obtained by independent – and joint – inversion of GPS and InSAR was basically the same. The maximum slip occurred in the south of the epicenter. The maximum slips of the source by the 6 models were respectively 0.74 m, 0.66 m, 0.44 m, 0.45 m, 0.47 m and 0.47 m. The inverted  $M_w$  ranged from 5.9 to 6.3. (3) The predicted, full – space, horizontal, co – seismic displacement field of the Yangbi earthquake by the slip model was in good agreement with the observed, horizontal, co – seismic displacement field. The north and south parts of the epicenter were compressing inward, while the east and west parts were stretching outward. This was consistent with the characteristics of the co – seismic displacement field produced by a strike – slip earthquake.

**Keywords:** near – source strong motion; automatic empirical baseline correction; GPS; co – seismic displacement; slip model; InSAR; the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake