

# 2021年云南漾濞 $M_s$ 6.4 地震序列重定位及 发震构造探讨\*

姜金钟, 付虹<sup>✉</sup>, 李涛

(云南省地震局, 云南昆明 650224)

**摘要:** 利用云南地震台网提供的地震编目快报观测报告和地震事件波形数据, 采用联合波形互相关分析的双差地震定位方法, 对2021年5月21日云南漾濞  $M_s$  6.4 地震前3天至震后2天期间发生的地震事件进行了重定位, 并基于两种不同的区域速度模型, 采用CAP方法反演了序列中3次  $M_s \geq 5.0$  地震的震源机制解和矩心深度。结果表明: 双差重定位获得了漾濞地震序列中1012次地震的精确位置, 水平和垂直方向的定位误差分别为1.1 km和3.0 km。3次  $M_s \geq 5.0$  地震的震源机制解和深度均有所不同, 初步分析认为这可能是由断裂深浅部的结构、形态差异或地震破裂后震源区附近的应力调整或流体运移导致的断层成核破裂变化所致。综合地震重定位、震源机制解反演及区域活动构造资料, 初步分析认为漾濞  $M_s$  6.4 地震的发震破裂面走向约为  $140^\circ$ , 倾角约为  $80^\circ$ , 滑动角约为  $-160^\circ$ , 发震断层可能为维西—乔后断裂中段的一条或多条次级断裂, 且具有右旋走滑特征。

**关键词:** 漾濞  $M_s$  6.4 地震; 双差地震定位; 波形互相关分析; 震源机制解; 发震构造

**中图分类号:** P315.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2021)03-0320-10

## 0 引言

2021年5月21日21时48分, 云南省大理州漾濞县发生  $M_s$  6.4 地震, 震中位置 ( $25.67^\circ\text{N}$ ,  $99.87^\circ\text{E}$ ), 震源深度8 km。截至5月22日6时, 地震共造成3人遇难、28人受伤, 以及大量房屋建筑倒塌破坏。自5月18日18时起至  $M_s$  6.4 地震发生前, 震源区发生多次3~4级地震。  $M_s$  6.4 地震发生后1 h内又发生了2次  $M_s \geq 5.0$  地震, 在此期间云南地震台网记录了大量地震事件的波形, 并手动拾取了P、S波震相到时数据。

根据中国历史地震目录和有仪器记录以来的中国地震目录, 以漾濞  $M_s$  6.4 地震震中为圆心, 在半径100 km范围内历史上共发生34次  $M \geq 5.0$  地震, 其中  $M$  5.0~5.9 地震29次,  $M$  6.0~6.9 地

震4次,  $M$  7.0~7.9 地震1次, 最大地震为1925年3月16日大理7.0级地震。近10年来, 漾濞及其附近地区更是中强地震频发, 如2013年洱源  $M_s$  5.5、 $M_s$  5.0 地震, 2016年云龙  $M_s$  5.0 地震及2017年漾濞  $M_s$  5.1 地震等, 多次中强地震的发生引起了地震局和其他科研机构的高度重视, 自2012年起云南省地震局和其他科研机构在该区域布设了大量的临时观测仪器, 不同研究人员也做了大量的地震、地质等方面的研究工作(任俊杰等, 2007; 常祖峰等, 2014; 赵小艳, 付虹, 2014; 李涛等, 2018; Jiang *et al.*, 2019; 潘睿等, 2019; 李姣等, 2020)。

漾濞  $M_s$  6.4 地震震中所在的滇西地区地形起伏较大、地质构造复杂、活动构造发育, 区内主要的活动断裂有NW向的红河断裂、维西—乔后断裂和近NS向的龙蟠—乔后断裂等, 该区还分布有

\* 收稿日期: 2021-06-02.

**基金项目:** 云南省地震局科技专项基金(2018ZX01)、云南省科技计划项目基础研究青年项目(2018FD158)和云南省地震局“地震机理与孕震环境研究”创新团队项目联合资助。

**第一作者简介:** 姜金钟(1987-), 副研究员, 主要从事地震学工作. E-mail: jiojoo@qq.com.

**✉通讯作者简介:** 付虹(1963-), 研究员, 主要从事地震活动性工作. E-mail: 280460086@qq.com.

一些没有断层出露的盲断层和研究较少的次级断层, 如2016年云龙  $M_s5.0$  地震的发震构造 (Jiang *et al.*, 2019)。云南地震台网的初始定位结果显示, 漾濞地震序列震中分布在长约20 km、宽约5 km的NW向的矩形区域内, 震源深度主要分布在5~15 km。由于云南地震台网给出的地震震源位置是基于手动拾取的P、S波震相到时数据, 并采用绝对定位方法针对每个地震事件单独定位得到的, 因此地震定位误差较大, 尤其是在深度方向仅根据台网给出的震源位置很难判定发震断层的倾角以及地震“迁移”活动等要素, 进而影响发震构造精细形态和地震成核过程等研究。

双差地震定位方法 (Waldhauser, Ellsworth, 2000) 作为一种成熟的相对地震定位方法被广泛应用于地震序列发震构造的确定和地震活动性分析等研究之中 (Waldhauser, Schaff, 2008; 李姣等, 2020; Wang *et al.*, 2017; Jiang *et al.*, 2019), 鉴于此, 本文基于云南地震台网提供的地震编目快报观测报告, 并采用结合波形互相关的双差定位方法对2021年5月18—22日发生的漾濞  $M_s6.4$  地震序列中的1 104次事件进行了重定位研究, 还利用宽频带数字波形和两个不同的区域速度模型反演了序列中3次  $M_s \geq 5.0$  (包含  $M_s6.4$  地震) 地震的震源机制解, 综合重定位后的地震序列空间分布、 $M_s6.4$  地震及  $M_s \geq 5.0$  余震的震源机制解以及区域地质资料初步探讨了此次地震的发震构造。

## 1 数据选取和研究方法

### 1.1 台站分布和数据选取

滇西地区是目前云南地区地震台站分布最为密集的地区之一 (李姣等, 2020), 漾濞  $M_s6.4$  地震震中50 km范围内有叉河台 (CHT)、团山台 (TUS)、洱源台 (EYA) 及云龙台 (YUL) 等多个宽频带固定地震台, 震中附近还布设了多个宾川气枪主动源和亚失稳等临时地震台阵进行观测。宽频带固定地震台和加密观测的临时地震台对震源区形成了密集且包围较好的观测台网 (图1), 为地震重定位和震源机制解的反演工作提供了丰富的地震事件波形和观测报告数据, 图1中的断层

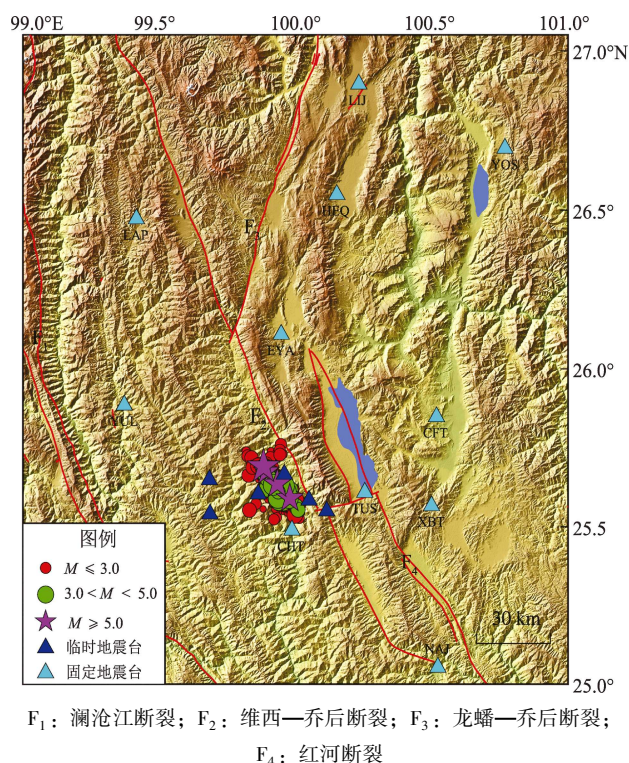


图1 2021年漾濞  $M_s6.4$  地震序列周边台站及断层分布  
Fig. 1 Distribution of the faults, stations and epicenters of the 2021 Yangbi  $M_s6.4$  earthquake sequence in the study area

数据来自安晓文等 (2018) 的研究。

漾濞地震序列发生后, 云南省地震台手动拾取了地震波形信噪比较高的P、S波震相到时并进行了绝对定位。本文在云南地震台网提供的5月18—23日 (即  $M_s6.4$  地震前3天和震后2天) 发生地震的编目快报观测报告、5月18—19日 ( $M_s6.4$  地震前) 发生的142次地震的事件波形以及此次序列中4次  $M_s \geq 5.0$  地震 (表1) 数字地震波形的基础上进行研究分析 (图2)。需要指出的是由于2021年5月21日21时55分发生的  $M_s5.0$  地震发生于  $M_s6.4$  地震后仅7 min, 此次地震的波形受到  $M_s6.4$  地震尾波和后续余震的严重干扰, 导致其波形信噪比较低, 故本文没有反演此次地震的震源机制解。根据云南地震台网地震编目快报观测报告产出的进度和余震活动情况, 本文选取了时间范围为2021年5月18—23日, 空间范围为 (25.5°~25.8°N, 99.7°~100.1°E), 震级范围为-1~6.5级的所有地震事件。经过筛选和剔除少数被重复定位的地震事件, 共获得了1 932次地震事件的初始震源位置 and 不同台站记录到的P、

S 波震相到时数据,用于此次地震前震及早期余震事件的双差重定位及后续分析。

表 1 漾濞  $M_s6.4$  地震序列 4 次  $M_s \geq 5.0$  地震的  
发震时刻和震源位置 (根据云南地震台网)

Tab. 1 Origin time and locations of four  $M_s \geq 5.0$   
earthquakes in the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake sequence  
(from Yunnan Seismic Network)

发震日期	发震时刻	发震位置		震源深度/ km	$M_s$
		$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$		
2021-05-21	21:21:25.56	25.64	99.93	11	5.4
2021-05-21	21:48:35.21	25.69	99.88	10	6.4
2021-05-21	21:55:29.13	25.67	99.89	11	5.0
2021-05-21	22:31:10.77	25.60	99.98	12	5.1

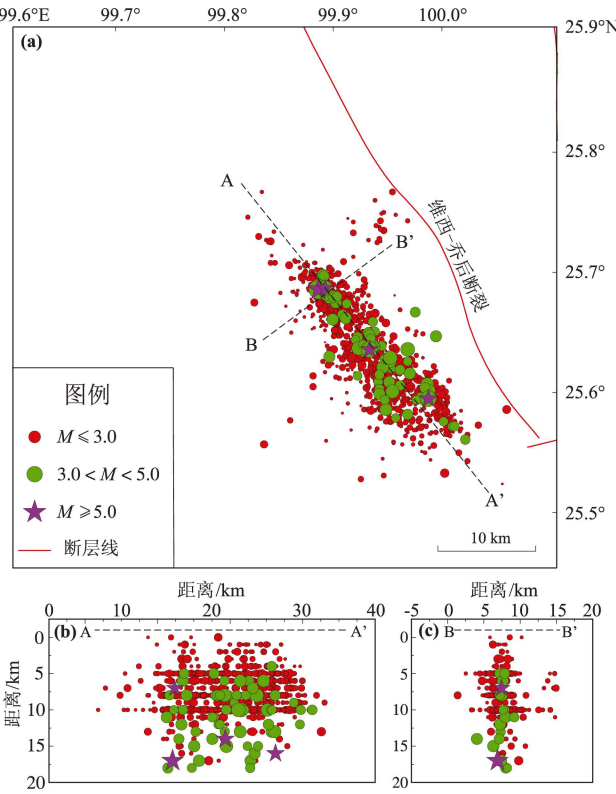


图 2 漾濞  $M_s6.4$  地震序列原始震中分布 (a)  
以及沿 AA' (b) 和 BB' (c) 剖面的  
深度剖面分布图

Fig. 2 Initial epicenter distribution (a), depth  
profiles along AA' (b) and BB' (c) of the  
Yangbi  $M_s6.4$  earthquake sequence

为了检验云南地震台网 P、S 波震相到时拾取数据的可靠性,本文将选取的地震及其 P、S 波震相到时按照震中距-震相走时进行排列 (图 3)。

从图 3 中可以清晰地区分 P、S 波震相的走时曲线,且绝大部分 P、S 波震相均在拟合的走时曲线附近分布,表明人工拾取震相数据的可靠性及准确性。根据图 3 还可以剔除少数明显偏离的拟合走时曲线、即明显存在较大拾取误差的 P、S 波震相走时数据。考虑到人工拾取的震相存在一定的误差,本文还收集了  $M_s6.4$  地震前的 5 月 18—19 日发生的 142 次地震的数字波形用于波形互相关分析,以尽量减小震相拾取误差引起的定位不确定性。

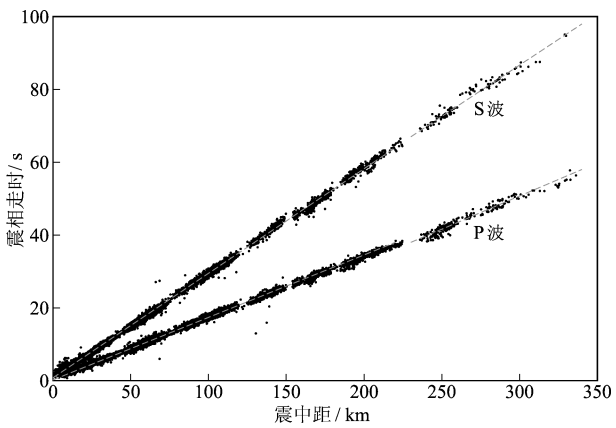


图 3 漾濞  $M_s6.4$  地震序列的 P、S 波震相走时  
Fig. 3 Travel time of P- and S-phases of the  
Yangbi  $M_s6.4$  earthquake sequence

1.2 研究方法和速度模型

目前国内地震台网 (如云南地震台网) 给出的地震事件震源位置一般是基于一维速度模型和人工拾取的 P、S 波震相走时数据,并利用绝对定位方法反演得到的,往往存在较大的定位误差 (李姣等, 2020)。而双差地震定位 (Waldhauser, Ellsworth, 2000) 不仅可以在一定程度上消除由于速度模型不准确而产生的定位误差,还可以结合波形互相关技术以减小人工震相拾取误差,因此基于波形互相关的双差地震定位方法在反演中小地震震源位置、确定地震发震断层的精细结构等研究中得到了广泛应用 (Waldhauser, Schaff, 2008; 姜金钟等, 2016, 2019; Jiang *et al*, 2019; Wang *et al*, 2017)。本文已收集了  $M_s6.4$  地震前的 142 次地震事件的波形数据,利用波形互相关技术可获得两次地震 (地震对) 到同一记录台站更加精确的 P、S 波震相走时差数据,一方面可以增加参与地震重定位的数据量和提高地震定位精度,另一方面也可评估该地区手动拾取的 P、S 波震

相误差大小,进而为定量分析双差定位不确定性提供基本信息(姜金钟等,2016)。针对云南地震台网的手动拾取P、S波震相的波形互相关分析结果显示,有超过91%的P、S波震相的手动拾取误差在 $\pm 0.15$  s以内(图4),表明观测报告中的震相数据比较可靠。

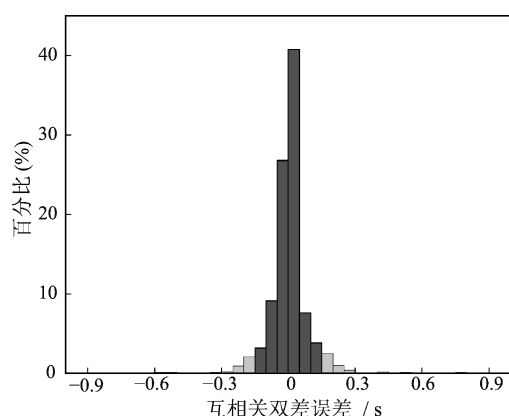


图4 使用波形互相关分析得到漾濞  $M_s 6.4$  地震前142次地震的P、S波震相手动拾取误差分析

Fig. 4 Error distribution of the hand-picked P- and S-phases of 142 pre-shocks before the Yangbi  $M_s 6.4$  mainshock derived from cross-correlation analysis

震源机制解是准确判定地震发震断层几何及运动参数(走向/倾角/滑动角)的最重要的地震学依据之一。Cut - and - Paste 方法(简称CAP)(Zhu, Helmberger, 1996)作为一种基于地震波形的震源机制解反演方法,将地震波形记录分成Pnl(P波及后续波)和S波(或面波)两部分进行反演,并允许两部分波形在反演过程中有一定的时间移动以减小反演结果对区域速度模型的依赖。分别对Pnl和S波(或面波)波形赋予不同权重,在断层走向( $0 \sim 360^\circ$ )、倾角( $0 \sim 90^\circ$ )、滑动角( $-180^\circ \sim 180^\circ$ )及震源深度空间范围内计算不同台站的理论地震图,并和实际观测地面运动进行互相关拟合分析,最终运用网格搜索方法搜索出当理论地震图和实际观测波形拟合误差最小时的地震震源机制解(走向/倾角/滑动角)和对应的震源深度。

不同研究人员(机构)在不同时期利用不同的方法、数据等给出了云南地区不同区域的速度模型(胡鸿翔等,1986;林中洋等,1993;王椿

镛等,2002;Xin *et al*, 2019;Yang *et al*, 2020;Liu *et al*, 2021),而由于印度板块的俯冲挤压作用导致云南地区地下结构横向不均匀性非常显著,因此有必要采用最合适的区域速度模型进行震源机制解反演、地震定位等研究工作。为此本文选用前人在滇西地区应用效果较好的一维速度模型(吴建平等,2004;潘睿等,2019;李姣等,2021),称为模型A(图5),以及根据姚华建教授团队提出的川滇地区1.0版本公共速度模型SWChinaCVM(姚华建,2020;Yang *et al*, 2020;Liu *et al*, 2021)提取的滇西地区的壳幔速度模型,称为模型B(图5),针对序列中3次 $M_s \geq 5.0$ 地震(表1)的宽频带数字波形,分别利用CAP方法反演了其震源机制解,然后选择CAP反演误差较小的速度模型作为后续重定位的定位模型。

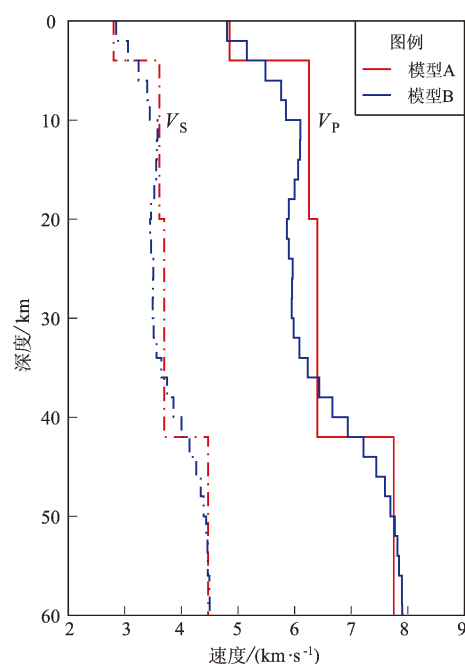


图5 CAP反演中用到的两种一维速度模型

Fig. 5 Two 1-D velocity models used in CAP inversions

## 2 CAP方法反演震源机制解

针对漾濞地震序列中3次 $M_s \geq 5.0$ 地震,选择云南地震台网部分震中距小于300 km、波形信噪比较高且方位角覆盖较为合理的固定台波形记录,并将各台站记录的波形做去均值、去趋势等

预处理, 并去除仪器响应后得到真实地面运动速度, 最后将 E (东西向)、N (南北向) 和 Z (垂直向) 三分量地面运动记录旋转到大圆弧路径上, 即得到  $R$  (径向)、 $T$  (切向) 和  $Z$  (垂直向) 分量用于 CAP 反演。反演过程中首先将三分量波形分为窗长为 30 s 的 Pn1 波和窗长为 60 s 的 S 波或面波波段, 然后对 Pn1 波段以 0.05 ~ 0.2 Hz、对 S (或面波) 波段以 0.05 ~ 0.1 Hz 频率范围进行带通滤波, 并将两种波段的反演权重分别设置为 1 和 0.5, 最后在断层走向 ( $0 \sim 360^\circ$ )、倾角 ( $0 \sim 90^\circ$ )、滑动角 ( $-180^\circ \sim 180^\circ$ ) 和震源深度 (1 ~ 25 km) 空间范围内通过理论波形和观测波形的拟合效果来搜索最佳震源机制解和震源深度。

两个不同速度模型下的 CAP 反演结果 (表 2)

显示, 漾濞  $M_s 6.4$  地震前后的两次地震的断层面倾角、滑动角以及震源深度均有一定程度的变化, 初步分析认为可能是由断层深浅部的结构、形态差异, 或  $M_s 6.4$  地震破裂后震源区附近的应力调整或流体运移导致的断层成核破裂变化所致。综合 3 次  $M_s \geq 5.0$  地震的 CAP 反演拟合误差, 以及对两种不同速度模型下  $M_s 6.4$  地震的理论波形 (图 6 中红色波段) 和实际观测波形 (图 6 中黑色波段) 的互相关系数和不同波段滑移时间量 (图 6) 的分析表明, 模型 B (姚华建, 2020) 更加符合漾濞地区地下实际情况, 因此本文采用该模型用于后续的双差地震定位研究。此外, 由于使用 CAP 方法得到的两个断层面是等效的, 仅根据震源机制解无法判定哪个断层面是真正的发展震断层, 因此

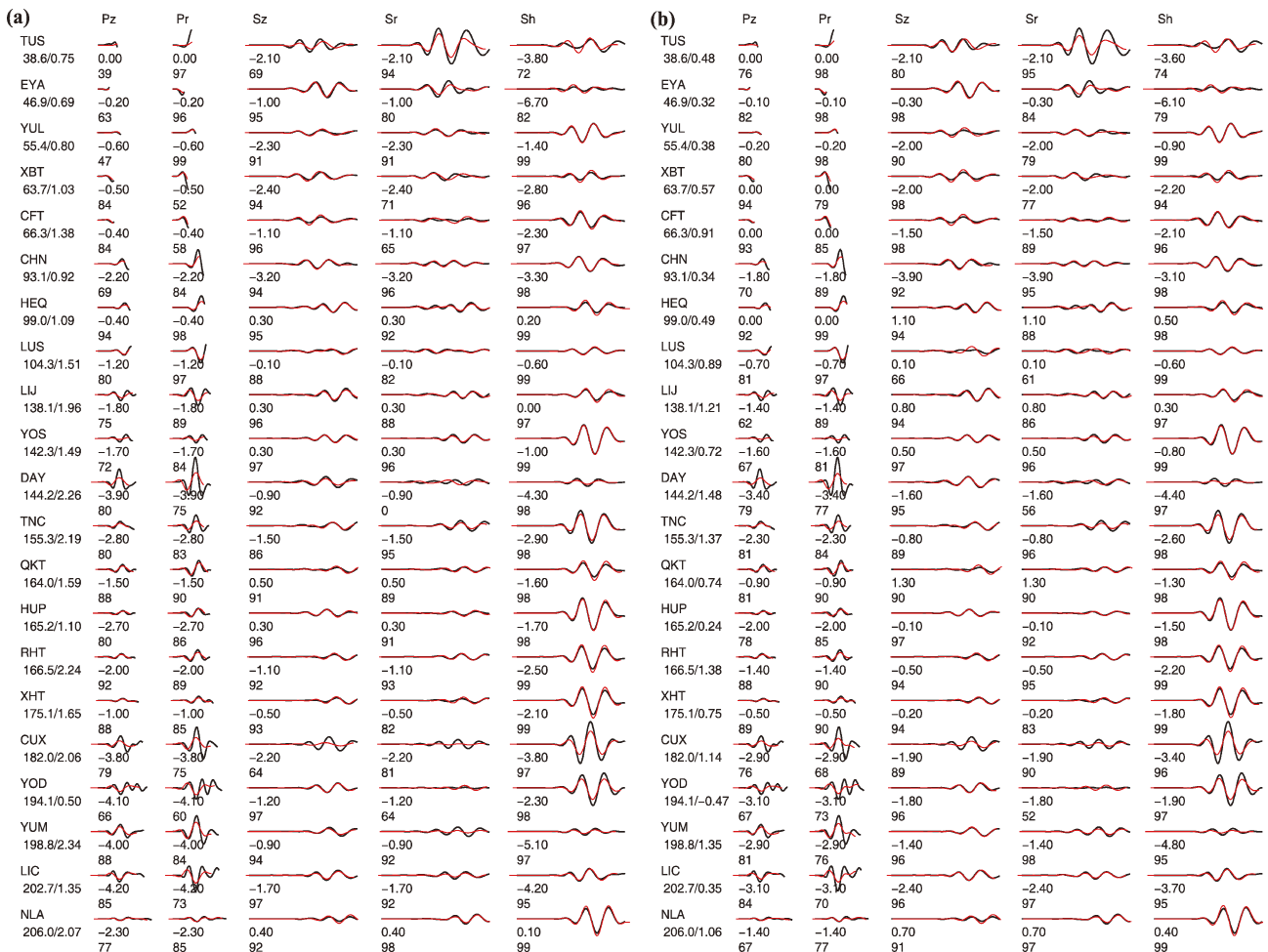


图 6 利用两种速度模型反演得到的漾濞  $M_s 6.4$  地震在震源深度 7 km (a, 模型 A) 和震源深度 5 km (b, 模型 B) 的部分理论 (红线) 和观测波形 (黑线) 的对比图

Fig. 6 Comparison between observed (black line) and synthetic (red line) seismograms of the  $M_s 6.4$  mainshock at 7 km depth (a, model A), and at 5 km depth (b, model B) obtained by using CAP inversion

需要综合其他资料，如地震序列的空间分布和（或）区域地质构造等分析判定地震发震构造。

表2 利用CAP方法反演得到3次  
 $M_s \geq 5.0$  地震的震源机制解  
Tab. 1 Focal mechanisms of three Yangbi  $M_s \geq 5.0$   
earthquakes inverted by using CAP method

地震	速度模型	震源深度/ km	节面 I / (°)			节面 II / (°)		
			走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
$M_s5.4$	模型 A	6	214	76	-26	311	65	-164
	模型 B	5	215	78	-21	310	69	-167
$M_s6.4$	模型 A	6	44	66	-10	138	81	-156
	模型 B	5	44	71	-7	136	83	-161
$M_s5.1$	模型 A	9	44	75	-47	150	45	-159
	模型 B	7	44	76	-47	149	45	-160

3 双差地震定位及不确定性分析

由于此次地震序列的震源区尺度较小，且大部分参与定位的台站震中距小于 100 km，选取CAP反演结果较优的模型B（姚华建，2020；Yang *et al*, 2020；Liu *et al*, 2021）作为双差重定位的介质模型。为保证获得更加准确可靠的地震震源位置，选取震源距小于 10 km 的两次地震事件作为地震对，地震对之间最大距离为 5 km，且地震对与记录台站的最大距离为 300 km，同时设定只有当两次地震的 P、S 波震相“链接”数至少为 8 条时才被定义为“强链接”地震对，只有“强链接”地震对才参与实际双差地震定位。考虑到 S 波的到时拾取误差较相对 P 波更大，定位过程中分别赋予 P 波 1.0、S 波 0.5 的权重，采用 LSQR 算法进

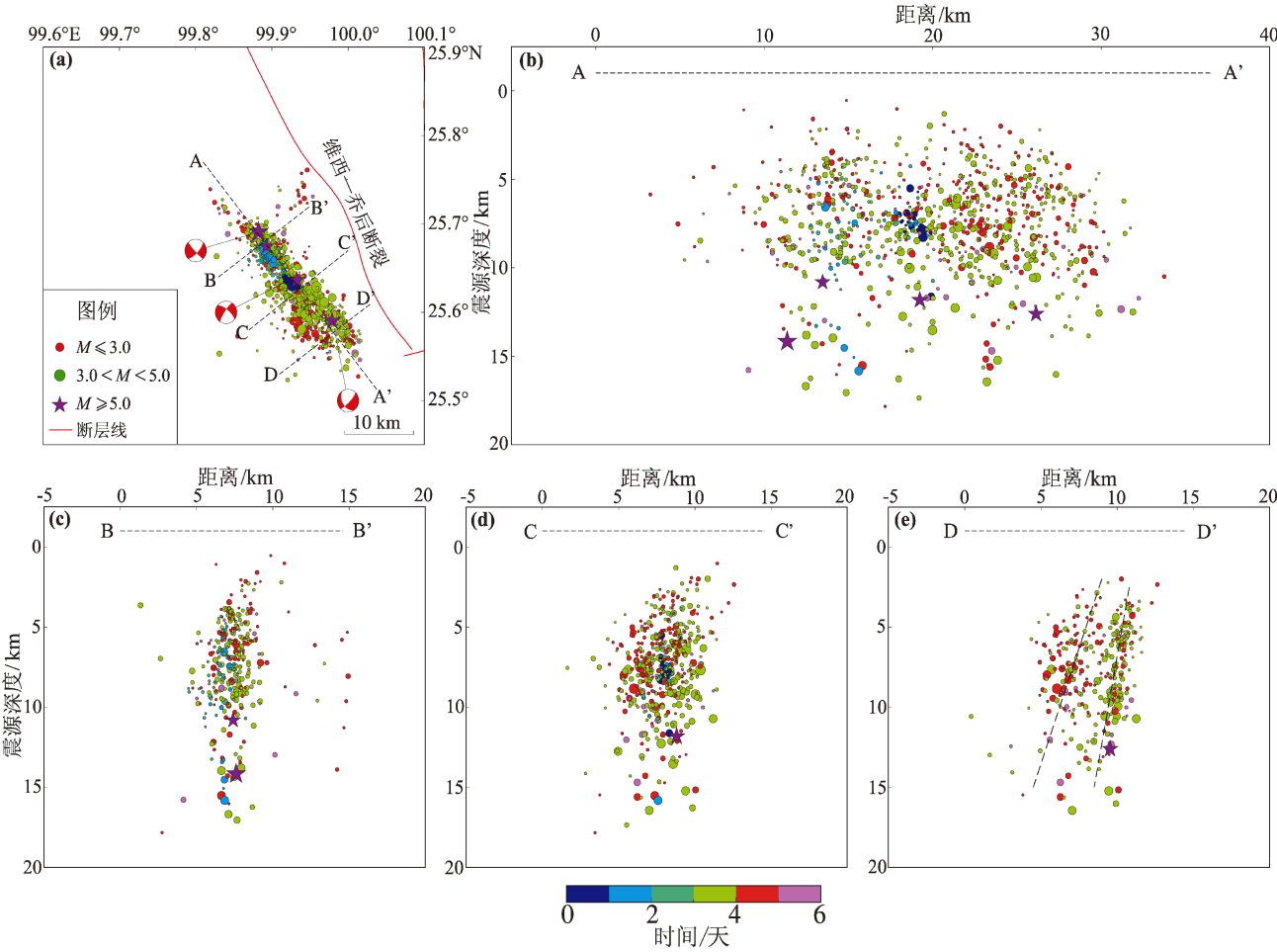


图7 双差重定位后的震中分布 (a) 及震源沿 AA' (b)、BB' (c) CC' (d) 及 DD' (e) 剖面的分布  
Fig. 7 Epicentral distribution (a), and focal depth distribution along AA' (b), BB' (c), CC' (d) and DD' (d) profiles according to double - difference relocation

行 2 轮共 20 次迭代反演。采用上述主要参数进行双差重定位过程中, 由于快报观测报告中的震相数据相对较少且部分地震由于不满足参数设定条件而被舍弃, 最终本文共得到了 1 012 次地震的震源位置。

对比云南地震台网地震编目快报观测报告中的震中位置和震源深度分布 (图 2), 重定位结果 (图 7) 显示整个地震序列的震中分布更加集中, 且近线性地以 NW - SE 向展布, 在深度方向上震源分布更加连续, 且所展示的断层倾角更加清晰可辨 (倾角约为  $80^\circ$ )。从漾濞  $M_s 6.4$  地震序列在深度方向上所展示的断层倾角 (图 7) 以及地震学中关于断层的定义可知, 此次地震发震断层走向为 ES 向 (约为  $140^\circ$ ), 与由地震双差重定位所勾画的断层形态与利用 CAP 方法反演得到的断层面解 ( $140^\circ/80^\circ/-168^\circ$ ) 基本一致, 与地质剖面观察到的维西—乔后断裂中南段的倾角较为一致 (常祖峰等, 2014)。

定位不确定性分析是评价地震定位结果的重要依据, 考虑到 LSQR 算法给出的定位误差可能被严重低估而不具有实际意义 (Waldhauser, Ellsworth, 2000; Hardebeck, 2013), 本文采用 bootstrapping 方法来评估漾濞  $M_s 6.4$  地震序列重定位在统计意义上的不确定性 (具体方法及流程参考姜金钟等, 2016; 李姣等, 2020)。需要指出的是, 考虑到本次地震序列地震事件较多且分布密集, 本文随机选取了地震序列中的 130 次地震事件作为“理论地震”进行双差定位的不确定性分析。图 8 表明 95% 置信水平下定位误差椭圆长轴基本不超过 3.0 km, 水平方向和垂直方向的定位误差均值分别为 1.1 km 和 3.0 km, 垂直方向的定位误差明显大于水平方向的定位误差。初步分析是由于早期的地震快报观测报告中主要包含了震中距较远的固定台记录的 P、S 波震相走时数据, 后续正式发布的观测报告包含更多震中距更小的临时台站记录的 P、S 波震相走时数据, 从而有效提高垂直方向的定位精度。

## 4 讨论

本文分别利用两种介质分层和速度值均有明显不同的一维速度模型 (图 5) 反演得到的 3 次

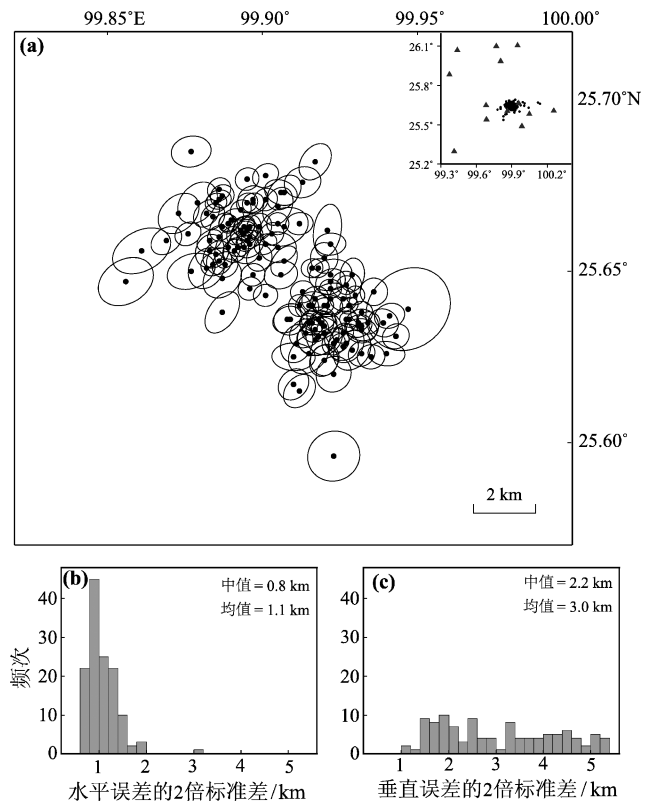


图 8 漾濞  $M_s 6.4$  地震序列双差定位不确定性分析  
Fig. 8 Uncertainty analysis of double-difference relocation of the Yangbi  $M_s 6.4$  earthquake sequence

$M_s \geq 5.0$  地震的断层面解, 每个地震在不同速度模型下的断层面解差异均在  $\pm 5^\circ$  范围之内, 且不同模型反演得到的震源深度差异不超过 2 km (表 2), 这与易桂喜等 (2012) 和郑勇等 (2009) 分别利用不同速度模型反演得到 2008 年汶川地震余震震源深度的差异小于 2 km 的结论一致。分析其原因是由于 CAP 方法将地震波形分为 Pn 波和 S 波 (或面波), 并允许不同波段在反演过程中有一定的时间移动, 可以弥补区域速度模型不准确带来的震相到时误差, 所以不同速度模型得到的震源机制解和震源深度具有较好的稳定性和可靠性。

基于两种速度模型得到 CAP 反演结果, 发现包含  $M_s 6.4$  地震在内的 3 次  $M_s \geq 5.0$  地震的震源机制解均有不同之处, 如 5 月 21 日 21 时 21 分 ( $M_s 6.4$  地震前 27 min) 发生的  $M_s 5.4$  地震的震源机制解走向与  $M_s 6.4$  地震及后续的  $M_s 5.1$  地震的断层面解走向相差约  $180^\circ$  或  $90^\circ$  (表 2); 不同于  $M_s 5.4$  地震和  $M_s 6.4$  地震的纯走滑型震源机制解,

$M_s5.1$  地震具有明显的走滑兼正断层性质的震源机制解, 且其震源深度相对前两次地震更深 (表2)。由于3次  $M_s \geq 5.0$  地震发生时间相隔较长且记录波形质量较好, 本文得到的震源机制解基本可靠, 故3次地震不同的震源机制解是否说明该地区地下存在不同的深浅部断层形态和结构? 又或者是此次地震的成核破裂过程或局部应力加载释放过程非常复杂? 今后还需要更多资料进行约束和开展更加精细的研究工作。在一维速度模型下 CAP 反演中, 少数台站的波形时间滑移量较大 (如图6中 TNC 和 LIC 台), 表明这些台站下方的速度结构更加复杂, 随着川滇地区三维速度模型的构建和完善 (姚华建, 2020; Liu *et al*, 2021), 基于三维速度模型获得更加可靠的震源机制解也是需要后续深入研究的工作。

云南地震台网提供的快报观测报告的重定位结果表明, 此次地震序列水平方向整体呈 NW-SE 走向分布、深度方向上呈高倾角分布 (图7)。 $M_s6.4$  地震之前的5月18—19日发生的地震事件在水平方向和深度方向均非常集中并有“迁移”的趋势 (图7a);  $M_s6.4$  地震发生后1~2天在序列的东南方向的震中及震源深度分布表明该区域似乎存在两条或多条不同倾角的分支断层 (图7e)。需要指出的是, 由于云南地震台网提供的  $M_s6.4$  地震及较多早期地震事件的初始震源深度较深 (超过10 km), 此时利用双差定位也很难“校正”这些地震的震源深度 (图7b~e)。根据 CAP 方法反演结果可知此次地震序列的整体震源深度应该较浅 (5~10 km), 同样的现象在2017年漾濞  $M_s5.1$  地震序列中也存在 (李姣等, 2020), 因此后续需要增加震中距更近的临时台阵和更多地震波形资料进一步测量其震源深度。

综合分析漾濞  $M_s6.4$  地震序列的3次  $M_s \geq 5.0$  地震的震源机制解和1012次地震事件的双差重定位结果, 本文初步认为  $M_s6.4$  主震的发震断层为位于川滇块体东缘、走向约  $140^\circ$ 、倾角约  $80^\circ$  的具有右旋走滑性质的断裂。小比例尺的区域断裂分布显示 (常祖峰等, 2014), 漾濞地震序列震源和距其最近的维西—乔后断裂之间存在约5 km的空间距离, 而安晓文等 (2018) 认为维西—乔后断裂是由4~5条大致平行的断裂组成, 宽达10~15 km, 因此本文初步认为此次地震序列的发

震构造可能是维西—乔后断裂中段的一条或多条次级断裂, 但由于漾濞地震序列所展现出的较为复杂的震源机制解和地震活动过程 (尤其是震区东南段), 也不能排除其发震构造是维西—乔后断裂附近的其它未知断裂, 因此关于此次地震的发震构造、孕震机理等科学问题还需要更多地质和地球物理等资料进一步深入研究。因历史上记载的在维西—乔后断裂上发生的地震不多, 早些年研究者对其关注较少 (常祖峰等, 2016), 但近年来在该断裂上陆续发生了2013年洱源  $M_s5.5$ 、 $M_s5.0$  地震 (赵小艳, 付虹, 2014; 李涛等, 2018) 和2017年漾濞  $M_s5.1$ 、 $M_s4.8$  地震 (潘睿等, 2019; 李姣等, 2020) 等, 这些地震之间存在较大的地震空区, 如2017年发生的漾濞  $M_s5.1$  地震和此次  $M_s6.4$  地震之间存在长约20 km的空区, 这些地震空区将来是否会孕育、发生中强地震, 也是非常值得注意和研究的问题。

## 5 结论

基于2021年5月18—23日云南地震台网记录到的漾濞  $M_s6.4$  地震序列的观测报告和地震波形记录, 本文采用两种不同区域的一维速度模型反演了此次地震序列中3次  $M_s \geq 5.0$  地震的震源机制解, 还采用结合波形互相关的双差地震定位方法得到了1012次地震序列更加精确的震源位置, 最后综合震源机制解、地震序列空间分布和区域地质构造等对此次地震序列的发震构造做了初步分析和判定, 得出以下主要结论:

(1) 本文获得了漾濞地震序列中  $M_s6.4$  地震及其他2次  $M_s \geq 5.0$  地震的震源机制解和矩心深度, 3次地震的震源机制解和深度均有所不同, 初步分析认为可能是由于断裂深浅部的结构、形态差异, 或地震破裂后震源区附近的应力调整或流体运移导致的断层成核破裂变化所致。

(2) 相对于云南地震台网给出的地震目录, 本文获得了漾濞  $M_s6.4$  地震序列中1012次地震更加精确的震源位置, 分析表明水平和垂直方向的定位误差均值分别为1.1 km和3.0 km, 并且定位结果具有较好的稳定性。综合震源机制解、地震重定位和区域活动断裂分布情况等, 初步认为此次  $M_s6.4$  主震的发震断层为走向约  $140^\circ$ 、倾角约

80°、滑动角约 -160° 的右旋走滑型断裂, 维西—乔后断裂中段的一条或多条次级断裂可能是此次地震序列的发震构造, 但关于该地震序列发震构造的最终确定还需要更多深入的研究。

本文根据云南地震台网提供的 2021 年 5 月 21 日漾濞  $M_s 6.4$  地震前 3 d 和震后 2 d 的地震编目快报观测报告和 3 次地震的数字地震波形研究了序列中 3 次  $M_s \geq 5.0$  的震源机制解和部分地震的震源位置, 并综合区域地质构造等对其发震构造做了初步讨论。漾濞  $M_s 6.4$  地震序列作为滇西地区较为少见的一次“前—主—余型”地震序列, 其前震的活动特征、震源参数的变化等所反映的地震成核破裂过程以及维西—乔后断裂的地震危险性等科学问题的解决, 还有赖于更加长期、丰富和密集的观测资料。

本文主要图件由 GMT6 软件绘制而成, 地震波形数据处理主要由 Seismic Analysis Code (SAC) 软件包完成, CAP 程序包由美国圣路易斯大学朱露培教授提供, 云南地震台测震部门提供了及时、可靠的观测报告和波形数据, 审稿人对本文提供了宝贵意见, 在此一并表示感谢。

## 参考文献:

- 安晓文, 常祖峰, 陈宇军, 等. 2018. 云南第四纪活动断裂暨《云南第四纪活动断裂分布图》[M]. 北京: 地震出版社.
- 常祖峰, 常昊, 李鉴林, 等. 2016. 维西—乔后断裂南段正断层活动特征[J]. 地震研究, 39(4): 579–586.
- 常祖峰, 张艳凤, 周青云, 等. 2014. 2013 年洱源  $M_s 5.5$  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.
- 胡鸿翔, 陆涵行, 王椿镛, 等. 1986. 滇西地区地壳结构的爆破地震研究[J]. 地球物理学报, 29(2): 133–144.
- 姜金钟, 陈棋福, 李姣. 2019. 中国东北的深源地震波形匹配检测及定位[J]. 地球物理学报, 62(8): 2930–2945.
- 姜金钟, 付虹, 陈棋福. 2016. 位于构造活跃区的小湾水库地震活动特征——基于地震精定位的分析[J]. 地球物理学报, 59(7): 2468–2485.
- 李姣, 姜金钟, 王光明, 等. 2021. 2018 年云南通海  $M_s 5.0$  双震震源机制解及深度测定研究[J]. 地震研究, 44(2): 76–87.
- 李姣, 姜金钟, 杨晶琼. 2020. 2017 年漾濞  $M_s 4.8$  和  $M_s 5.1$  地震序列的微震检测及重定位[J]. 地震学报, 42(5): 527–542.
- 李涛, 付虹, 姜金钟, 等. 2018. 2013 年云南洱源  $M_s 5.5$  地震序列不同地震观测台网地震定位结果对比分析[J]. 地震研究, 41(1): 55–63.
- 林中洋, 胡鸿翔, 张文彬, 等. 1993. 滇西地区地壳上地幔速度结构特征的研究[J]. 地震学报, 15(4): 427–440.
- 潘睿, 姜金钟, 付虹, 等. 2019. 2017 年云南漾濞  $M_s 5.1$  及  $M_s 4.8$  地震震源机制解和震源深度测定[J]. 地震研究, 42(3): 338–348.
- 任俊杰, 张世民, 侯治华, 等. 2007. 滇西北通甸—巍山断裂中段的晚第四纪滑动速率[J]. 地震地质, 29(4): 756–764.
- 王椿镛, Mooney W D, 王溪莉, 等. 2002. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究[J]. 地震学报, 24(1): 1–16.
- 吴建平, 明跃红, 王椿镛. 2004. 云南地区中小地震震源机制及构造应力场研究[J]. 地震学报, 26(5): 457–465.
- 姚华建. 2020. 中国川滇地区公共速度模型构建: 思路与进展[J]. 中国科学: 地球科学, 50(9): 1319–1322.
- 易桂喜, 龙锋, 张致伟. 2012. 汶川  $M_s 8.0$  地震余震震源机制时空分布特征[J]. 地球物理学报, 55(4): 1213–1227.
- 赵小艳, 付虹. 2014. 2013 年洱源  $M_s 5.5$  和  $M_s 5.0$  地震发震构造识别[J]. 地震学报, 36(4): 640–650.
- 郑勇, 马宏生, 吕坚, 等. 2009. 汶川地震强余震 ( $M_s \geq 5.6$ ) 的震源机制解及其与发震构造[J]. 中国科学: 地球科学, 39(4): 413–426.
- Hardebeck J L. 2013. Geometry and earthquake potential of the Shoreline fault, central California[J]. Bull Seismol Soc Am, 103(1): 447–462.
- Jiang J, Li J, Fu H. 2019. Seismicity analysis of the 2016  $M_s 5.0$  Yunlong Earthquake, Yunnan, China and its tectonic implications[J]. Pure and Applied Geophysics, 176(3): 1225–1241.
- Liu Y, Yao H J, Zhang H J, et al. 2021. The community velocity model V1.0 of southwest China, constructed from joint body-and surface-wave traveltime tomography[J]. Seismological Research Letters, 92(5): 2972–2987.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double difference earthquake location algorithm method and application to the Northern Hayward Fault, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 96(6): 1353–1368.
- Waldhauser F, Schaff D P. 2008. Large-scale relocation of two decades of northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods[J]. J Geophys Res: Solid Earth, 113(B8): B08311.
- Wang X, Wei S, Wu W. 2017. Double-ramp on the Main Himalayan Thrust revealed by broadband waveform modeling of the 2015 Gorkha earthquake sequence[J]. Earth Planet Sci Lett, 473: 83–93.
- Xin H L, Zhang H J, Kang M, et al. 2019. High-resolution lithospheric velocity structure of continental China by double-difference seismic travel-time tomography[J]. Seismological Research Letters, 90(1): 229–241.
- Yang Y, Yao H J, Wu H, et al. 2020. Crustal shear-velocity model in Southwest China from joint seismological inversion and its implications for regional crustal dynamics[J]. Geophys J Int, 220(2): 1379–1393.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 86(5): 1634–1641.

## Relocation of the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ Earthquake Sequence and Discussion of Its Seismogenic Fault

JIANG Jinzhong, FU Hong, LI Tao

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

### Abstract

Using earthquake catalog and seismic waveforms data recorded by the Yunnan Seismic Network, we relocate the Yangbi, Yunnan  $M_s6.4$  earthquake sequence occurring from 18th to 23th May, 2021 through the double – difference relocation algorithm and the cross-correlation analysis. We also invert the focal mechanisms and depths of the three  $M_s \geq 5.0$  events (including the mainshock) in the Yangbi earthquake sequence with the cut – and – paste (CAP) method. Then we obtain epicenters and focal depths of 1 012 events, with median relocation errors about 1.1 km and 3.0 km in horizontal and depth direction, respectively. The focal mechanisms and the depths of each of the three events inverted are slightly different, which could be attributed to the different fault structures between the shallow and the deep part of the seismogenic fault zone, or the stress adjustment or fluid migration after the mainshock. According to the double – difference relocation, CAP inversions and distribution of regional geological structures, we preliminary infer that the Weixi – Qiaohou Fault could be the seismogenic fault of the 2021 Yangbi  $M_s6.4$  earthquake sequence. The parameters of the Fault's fracture surface, strike/dip/slip, could be  $140^\circ/80^\circ/-160^\circ$ .

**Keywords:** the 2021 Yangbi  $M_s6.4$  earthquake; the double – difference relocation; the cross – correlation analysis; focal mechanism solution; seismogenic fault