引用格式：周民婷，何骁慧，刘智良，等，2026. 2021年漾濞 M_S 6.4地震序列震源特征及发震构造研究[J]. 地质力学学报，32（3）：545−562. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025183

Citation: ZHOU M T，HE X H，LIU Z L，et al.，2026. Study on the source characteristics and seismogenic structure of the 2021 Yangbi M_S 6.4 earthquake sequence[J]. Journal of Geomechanics，32（3）：545−562. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025183

2021 年漾濞 M_S 6.4 地震序列震源特征及发震构造研究

周民婷[1,2]，何骁慧[1,2,3]，刘智良[1,2]，王伟涛[4]

ZHOU Minting[1,2]，HE Xiaohui[1,2,3]，LIU Zhiliang[1,2]，WANG Weitao[4]

1. 中山大学地球科学与工程学院，广东 珠海 519082；
2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室，广东 珠海 519082；
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海），广东 珠海 519082；
4. 中国地震局地球物理研究所，北京 100081

1. *School of Earth Sciences and Engineering*, *Sun Yat-sen University*, *Zhuhai* 519082, *Guangdong*, *China*;
2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards*, *Zhuhai* 519082, *Guangdong*, *China*;
3. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory* (*Zhuhai*), *Zhuhai* 519082, *Guangdong*, *China*;
4. *Institute of Geophysics*, *China Earthquake Administration*, *Beijing* 100081, *China*

Study on the source characteristics and seismogenic structure of the 2021 Yangbi M_S 6.4 earthquake sequence

Abstract: ［**Objective**］On 21 May 2021, an M_S 6.4 earthquake struck Yangbi County, Dali Prefecture, Yunnan Province — the largest event near the Weishan Basin segment of the Weixi–Qiaohou fault since 1976. The mainshock produced no surface rupture and did not occur on any known active fault. Despite numerous previous studies, the precise seismogenic structure and causative faults of this typical foreshock–mainshock–aftershock sequence (including seven $M_S \geqslant 4.0$ foreshocks and 22 $M_S \geqslant 4.0$ aftershocks) remain controversial; some results are poorly constrained or even mutually contradictory. Furthermore, the occurrence of moderate-to-strong earthquakes surrounding the source area has increased significantly in recent years. This study thus aims to elucidate the rupture behaviour and seismogenic environment of the entire earthquake sequence. ［**Methods**］Using pre-existing focal mechanism solutions of minor earthquakes as reference events, we adopted the relative centroid relocation method and time–frequency source characterisation method to calculate rupture directivity parameters for ten $M_S \geqslant 4.0$ events. In addition, we calculated the radiation efficiency for all $M_S \geqslant 3.0$ earthquakes based on waveform recording from local seismic station. ［**Results**］Our results demonstrate distinct along-strike segmentation of rupture directivity across the Yangbi sequence. On the northwestern segment of the sequence, five earthquakes feature NW-striking fault planes. On the southeastern segment, four earthquakes exhibit faults either NW or NE. The largest foreshock (M_S 5.6) and the largest aftershock (M_S 5.2) both rupture toward the NE, indicating that they did not occur on the same fault as the M_S 6.4 mainshock. Combined with previous relocation and geodetic results, we interpret that these two events occurred on conjugate faults. The M_S 6.4 mainshock ruptured toward the NW, consistent with the dominant rupture azimuth of the NW segment, suggesting that the mainshock primarily ruptured the NW-trending master fault, whereas conjugate faulting in the SE segment constitutes an important component of the entire sequence. For the M_S 4.4 foreshock, the relative centroid method yields a rupture direction toward the NW, while the time–frequency source method gives a direction

基金项目：国家自然科学基金项目（42494913，42474070）

This research was financially supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant Nos. 42494913 and 42474070).

第一作者：周民婷（2004—），女，在读硕士，地球物理专业。Email：zhoumt7@mail2.sysu.edu.cn

通信作者：何骁慧（1991—），女，博士，副教授，主要从事地震学的研究。Email：hexiaoh5@mail.sysu.edu.cn

收稿日期：2025−12−18；**修回日期**：2026−05−12；**录用日期**：2026−05−27；**网络出版日期**：2026−06−10；**责任编辑**：王婧

Received：2025−12−18；Revised：2026−05−12；Accepted：2026−05−27；Available Online：2026−06−10；Handling Editor：WANG Jing

toward the SE. This event is therefore interpreted as a frequency-dependent bilateral rupture. We further calculated and corrected the radiation efficiency values for all $M_S \geqslant 3.0$ events. The efficiency results show a similar along-strike segmentation: the radiation efficiency differs systematically between the NW and SE segments. Integrating rupture directivity patterns, radiation efficiency measurements and regional geological constraints, we infer that the segmentation in rupture directivity is primarily caused by differences in fault frictional properties between the NW and SE segments. [**Conclusions**] The Yangbi earthquake sequence exhibits distinct segmentation in rupture directivity, with the NW segment dominated by NW-striking master fault rupture and the SE segment characterized by conjugate faulting. The M_S 4.4 foreshock corresponds to a frequency-dependent bilateral rupture event. The segmentation in radiation efficiency further supports the interpretation of different fault frictional regimes along the fault strike. [**Significance**] These findings deliver new constraints on the source characteristics and seismogenic structure of the Yangbi earthquake sequence. They improve our knowledge of the regional tectonic setting and earthquake nucleation cycle, and offer valuable seismological evidence for future seismic hazard assessment across the study area.

Keywords: Yangbi M_S 6.4 earthquake; earthquake sequence; source mechanism; seismogenic structure; rupture directionality

摘　要：为明确2021年云南漾濞M_S 6.4地震序列的发震构造与破裂特征，解决已有研究在孕震断层认识上的争议，文章采用相对质心定位法和震源时频特征法，选取已知机制解的小震作为参考事件，对序列中10次$M_S \geqslant 4.0$地震开展了破裂方向性参数测定；同时基于近震台站记录，估算了$M_S \geqslant 3.0$地震能量的辐射效率。结果表明：漾濞地震序列的破裂方向呈现显著的空间分段特征，北西段5次地震的发震断层均为北西向，南东段4次地震兼有北西向和北东向。M_S 5.6最大前震与M_S 5.2最大余震的破裂方向均指向北东向，且发生在共轭断层上；而M_S 6.4主震破裂方向为北西向，与北西段主断层一致，表明南东段共轭断层活动是序列的重要组成部分。M_S 4.4前震具有频率依赖的双侧破裂特征，其中相对质心法测得结果为北西向，时频法测得结果为南东向。辐射效率同样存在分段差异，结合区域地质背景，推测该差异由北西段与南东段的断层摩擦性质不同所致。研究结果深化了对该区构造背景和地震孕育过程的认识，可为未来地震危险性评估提供地震学参考。

关键词：漾濞M_S 6.4地震；地震序列；震源机制；发震构造；破裂方向性

中图分类号：P315; P546　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)03−0545−18

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025183

0　引言

北京时间2021年5月21日21时48分36秒，云南省大理州漾濞县(25.68°N、99.88°E)发生M_S 6.4地震，震源深度8 km，地震活动表现为典型的前震−主震−余震序列。作为川滇菱形地块西南缘近十年来发生的最大地震，此次事件发生后，该地区的地震危险性备受关注(孙庆山等，2023)。

此次地震序列发生于川滇块体西南边界，该区域因地处多条板块边界交汇带，构造背景复杂，周边发育有红河、怒江、澜沧江等多条大型活动断裂带。距离该次地震序列最近的是北西向的维西−乔后断裂带(纪志伟等，2022)。过去十年来，维西−乔后断裂带邻近区域地震活动显著增强，中强度地震事件频发(2013年先后发生洱源M_S 5.5、M_S 5.0地震，2017年又发生漾濞M_S 5.1、M_S 4.7地震)。此次漾濞M_S 6.4地震作为该断裂带周边有记录以来的最强震级事件，吸引了学术界的广泛关注。维西−乔后断裂带南端与红河断裂相接，二者共同构成了青藏高原东南缘川滇菱形块体的西边界(常祖峰等，2016)。该块体的形成与青藏高原物质运动密切相关：青藏高原向东的物质运移受到刚性华南块体的阻挡，在应力作用下逐渐形成这一菱形构造，且整体围绕喜马拉雅东构造结呈顺时针旋转运动(张培震等，2003)。值得注意的是，虽然川滇菱形块体整体构造活动强烈，但不同边界的研究程度存在显著差异：其东边界因构造特征清晰、地震活动频繁，相关断裂带研究已较为深入(徐锡伟等，2005)；而西边界除红河断裂外，其余区域的构造研究仍显薄弱。受复杂地质条件影响，川滇块体西边界的结构形态尚未得到充分揭示，亟待进一步开展系统性研究(Liu et al., 2022; 李心怡等，2024)。

已有研究表明，漾濞M_S 6.4地震序列主体沿北

西—南东向展布，震源深度集中于 5～10 km（段梦乔等，2021；龙锋等，2021；王月等，2021；Yan et al.，2022），呈现北西窄、南东宽的空间差异，主震南东侧余震更密集且震级更高，推测主震具有南东向单侧破裂特征且发震断层未出露地表（雷兴林等，2021；赵博等，2022）。序列空间分布与上地壳速度结构密切相关。震区上地壳速度横向不均：北侧以低速异常为主，南侧为高速异常，地震活动集中于高低速转换带及西支通道流低速通道上部。这种地壳不均引发的应力集中，与构造块体南东向运动共同驱动断裂活动，为地震孕育提供拉张动力（胡景等，2021；李大虎等，2021；高家乙等，2022）。

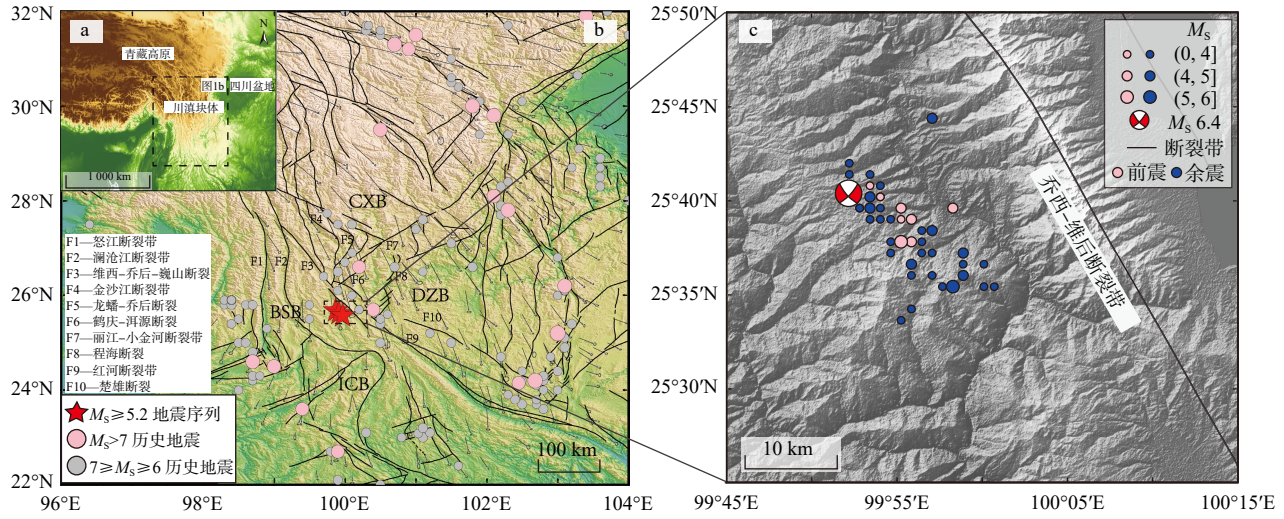
震源机制与应力场研究显示，主震为北西向右旋走滑型地震，矩震级约 M_W 6.0，前震震源机制以走滑型为主，与主震应力类型高度吻合，仅单个前震表现为正断型（段梦乔等，2021；龙锋等，2021；Tian et al.，2023）。主震主压应力轴近南北向，主张应力轴近东西向，与区域构造应力场一致（Zhao et al.，2013；樊文杰等，2022），区域构造应力是部分地震呈现正断性质的关键（龙锋等，2021；赵博等，2022；Zhou et al.，2022；Tian et al.，2023）。值得注意的是，主震后余震震源机制逐渐多样化，正断型及不确定型地震比例增加。樊文杰（2023）通过最小空间旋转角分析发现，前震与主震震源机制一致性较高，而余震与主震差异显著。

大地测量学研究进一步揭示，主震破裂于西南倾向的右旋走滑断层（杨九元等，2021；张克亮等，2021）。尽管主震破裂断层整体走向与滑动形式同维西−乔后断裂带近乎一致，但是反演结果直观显示出两者仍相距有数千米，主震发震断层并不在维西−乔后断裂带（Liu et al.，2022，2025）。该断层破裂未达地表，集中于 2～12 km 深度，最大滑动量 0.45 m（地下 7 km），以右旋走滑为主，含少量正断及逆冲分量，与震源机制解结果相符（Chen et al.，2022）。

然而，漾濞地震的相关研究中仍存在显著争议，突出表现在以下 2 个方面。一是地震破裂方向方面，不同方法测定结果不一致：主震推测为南东向单向破裂（Gong et al.，2022），而 M_S 5.6 最大前震破裂方向存在北西、北东等多解性，部分地震还呈现双侧破裂特征（雷兴林等，2021；Zhou et al.，2022；杨苗等，2023）。二是发震构造方面，主震孕震断层推测结论不一：部分研究认为其为维西−乔后断裂带的一条平行盲断层（雷兴林等，2021；杨九元等，2021），也有研究将其归因于次级走滑断层（段梦乔等，2021；赵博等，2022），还有学者将其指向兰坪−思茅地块内部北西向的早期逆左旋走滑断层——草坪断裂（王光明等，2021；孙庆山等，2023）。此外，次级发震构造研究不足，导致地震整体破裂过程与构造复杂性尚未厘清。这些争议与不足充分反映了此次地震序列的复杂性，也表明当前针对其破裂方向性及发震构造的研究仍不够系统深入。基于上述研究现状，文章采用相对质心定位法与震源时频特征法，对 2021 年漾濞地震序列部分地震开展破裂方向性参数测定，重点探讨漾濞 M_S 6.4 地震序列的精细发震构造及震源特征，旨在为区域强震孕育机制与地震灾害风险评估提供科学依据。

1　数据与方法

研究区域为漾濞 M_S 6.4 地震序列的分布范围（99°45'—100°15'E、25°25'—25°50'N），其构造背景及地震分布如图 1 所示。文章从地震科学国际数据中心收集了 2021 年漾濞地震序列在 400 km 范围内的宽频地震台站数据（地震科学国际数据中心，2021），以及中国地震局地球物理研究所主动源团队布设的短周期台阵数据（图 2）。首先，对地震波形进行预处理，包括去仪器响应、剔除质量较差的波形（保留三分量完整的高信噪比波形）、对 N−E−Z 三分量数据进行旋转处理等。其次，统一采用王月等（2021）针对漾濞地震序列的系统性震源参数研究成果作为震源机制解。为评估其在此研究中的适用性，以 M_S 6.4 主震为例进行验证：将其与其他研究团队（段梦乔等，2021；龙锋等，2021；赵博等，2022；Tian et al.，2023）的震源机制解结果进行定量对比，计算得到的 Kagan 角（用于衡量震源机制解差异的角度）介于 3.16°～10.44°，其中绝大部分小于 8°，表明王月等（2021）的结果与国内主流研究结论一致性较高。对于序列中结构复杂的最大前震，尽管部分研究在倾角、滑动角上存在约 10°的分歧，但王月等（2021）的结果在序列整体参数的系统性与内部一致性上表现更优。根据 He et al.（2018）的结论，震源机制解在 30°内的不确定性不会对破裂面与破裂方向的判定产生显著影响，仅可能对破裂尺度估算产生一定偏差。为此，文章采用多个参考事件计算破裂长度并取平均值，以降低震源参数差异可能带来的影响。



CXB—川西北次级块体; DZB—滇中次级块体; BSB—保山次级块体; ICB—印支块体; 地震数据引自地震科学国际数据中心 (地震科学国际数据中心, 2021), 断裂数据引自中国活动构造图(邓起东, 2007)

a—青藏高原及邻区大地构造位置; b—川滇块体主要断裂带及历史地震分布图(1900 年以来); c—2021 年 5 月 21 日漾濞 M_S 6.4 地震序列中 M_S ≥3.0 事件空间分布图(2021 年 5 月 18 日—2021 年 5 月 28 日)

图 1 研究区周缘主要断裂带及地震分布图

Fig. 1 Distribution of major fault zones and earthquakes in the study area and its periphery

(a) Tectonic setting of the Tibetan Plateau and adjacent regions; (b) Distribution of major fault zones and historical earthquakes since 1900 within the Sichuan–Yunnan block; (c) Spatial distribution of M_S≥ 3.0 events (18–28 May, 2021) within the 21 May, 2021 Yangbi M_S 6.4 earthquake sequence

CXB—northwestern Sichuan sub-block; DZB—central Yunnan sub-block; BSB—Baoshan sub-block; ICB—Indochina block; earthquake data from the National Earthquake Science Data Center(International Earthquake Science Data Center, 2021), and fault data from *Active Tectonic Map of China* (Deng, 2007)

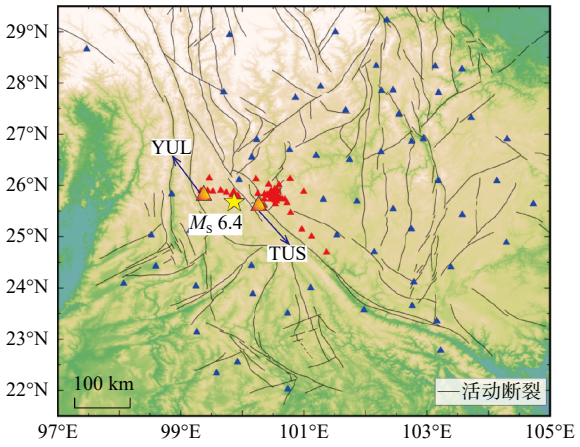
1.1 相对质心定位法

震源破裂方向性是揭示震源破裂过程与判定发震构造的关键参数, 可通过起始震中与质心震中的相对位置判定。然而, 地球三维结构导致的定位误差会影响中等强度地震的测定精度(Boatwright, 2007; Zha et al., 2009)。秦刘冰等(2014)与 He et al.(2015)提出了一种基于区域波形的走滑地震破裂方向性分析方法, 选取主震邻近的小震作为参考事件, 依次进行相对定位校正、路径效应消除, 最终通过比较质心与起始震中位置差异来判定破裂方向。文章采用上述相对质心定位法, 对漾濞地震序列开展了破裂方向性分析。

该方法基于 CAP(cut and paste)方法实现, 采用宽频带数据中的体波与面波联合反演, 获取震源机制解及事件间相对位置。针对漾濞 M_S 6.4 主震(节面 1 走向 138°, 节面 2 走向 44°; 王月等, 2021), 选取数量充足、波形质量良好的近震中台站(图 3), 以削弱地下结构各向异性对波形传播的影响。基于这些台站的波形数据, 筛选出 19 次 M_S 3.0～5.6 的地震作为参考事件。这些参考事件需满足 2 点要求: 一是震级适中, 既足够小以忽略自身破裂尺度, 又足够大以保证震源机制解精度; 二是震源机制相似且空间距离近, 便于相对位置计算。

根据事件震级差异采用分段滤波策略: 对于 M_S< 5.0 的地震, 体波和面波均使用 0.05～0.10 Hz 带通滤波; 对于 M_S≥5.0 的地震, 体波使用 0.05～0.20 Hz 带通滤波, 面波仍采用 0.05～0.10 Hz 带通滤波。波形拾取与反演时窗设置为: Pnl 波时窗长度 20 s, 体波时窗长度 60 s, Pnl 波与面波权重比取 2:1, 以兼顾近场高频信息与远场波形约束。

对预处理后的波形数据, 统一手动识别各台站 Z 分量 P 波初始到达时刻(附图 1)。基于主震与参考事件间 P 波到达时间差, 利用最小二乘法对参考事件进行重定位, 得到起始震中的确切位置。采用重定位后的地震目录, 参照 He et al.(2018)的数值实验结果, 当定位误差小于 25% 的破裂长度时, 破裂面与破裂方向均可得到正确判定。考虑到 Love 波振幅大于 P 波和 Rayleigh 波, 其时移拟合效果更优



蓝色三角形为国家地震科学数据中心长周期宽频带数字记录台站；红色三角形为中国地震局地球物理研究所主动源团队短周期数字记录台阵；黄色五角星为 M_S 6.4 主震；橙红色三角形分别为 YUL 台站和 TUS 台站

图 2　漾濞地震区域台站分布图

Fig. 2　Distribution of seismic stations around the Yangbi earthquake region

Blue triangles represent long-period broadband digital recording stations from the National Center for Seismic Data Backup of the China National Seismic Network; Red triangles represent the short-period digital recording array of the Active Source Team, Institute of Geophysics, China Earthquake Administration; The yellow five-pointed star marks the M_S 6.4 mainshock; Orange-red triangles indicate the YUL station and the TUS station, respectively.

(He et al., 2018)，文章筛选出互相关系数超过 0.9 的 Love 波，用于计算主震与参考事件之间的震相时移差异。

基于不同方位角台站记录的主震与参考事件的 P 波到时差，计算两者震中相对位置及相对起始时刻，并以主震为基准校正参考事件的位置与发震时刻。通过 CAP 方法反演，获取精确的震源机制参数及 Pnl 波、Rayleigh 波、Love 波的震相时移；结合波形互相关计算震相时移差，分析其随方位角的变化，进而推断发震断层的走向、破裂方向及破裂长度。当地震沿震源机制解的某一节面发生单侧破裂时，时移随方位角的分布遵循以下公式(秦刘冰等, 2014; He et al., 2015)：

$$dt = t_0 - \frac{L}{2V} \times \cos(az - stk) \qquad (1)$$

式中，dt—主震与参考事件的时移差；V—地震波速度；az—台站方位角；stk—主震节面走向角度；t_0—2 次地震事件震源持续时间之差；$L/2$—主震质心震中到起始震中的距离。假定地震为单侧破裂时，L 代表破裂长度；L 的正负表示破裂是否沿当前假定的节面走向发生(正值表示沿当前走向破裂)。然后，通过下述公式分别计算 2 个节面的波形时移拟合程度，拟合效果更好的节面为实际发震断层(He et al., 2018)：

$$\text{Misfit} = \sum\nolimits_n \left\| t_0 + \frac{L}{2V} \times \cos(az - stk) - dt \right\| \qquad (2)$$

式中，Misfit—残差；n—使用的台站个数；其余变量含义同上。

将 Love 波时移数据代入公式(1)，得到 2 个节面的波形时移随方位角的分布特征；再利用公式(2)评估 2 个节面的拟合程度，最终实现对发震断层及其破裂长度的准确判定。

1.2　震源时频特征法

震源时频特征法基于台站方位角拟合，实现破裂方向性判定。该方法对地震位置精度具有一定敏感性。经估算，对震中距约 100 km 的台站，5 km 的位置偏差仅产生约 2.9°的方位角偏差。该偏差较小，对破裂方向性结果的影响可以忽略，因此文章采用未重新定位的原始目录开展分析。该方法通过震源时间函数随方位角的变化特征来约束破裂方向性。受地震波形多普勒效应影响：当地震波沿破裂传播方向时，震源时间函数的持续时间缩短、拐角频率升高；而在破裂传播的反方向上，震源时间函数的持续时间变长、拐角频率降低(Calderoni et al., 2015)。假设走滑型主震事件沿某一节面破裂，震源相对持续时间的方位角变化可近似表示为公式(3)：

$$t_{d(az)} = 2t_r + \frac{L}{v_f} - \frac{L}{v_p}\cos(az - stk) \qquad (3)$$

式中，$t_{d(az)}$—方位角为 az 的台站的相对震源持续时间；t_r—主震与参考事件的差分上升时间；v_f—破裂速度；v_p—纵波速度；其余变量含义同上。

针对漾濞 M_S 6.4 地震序列中的 8 次地震开展破裂方向性求解。这 8 次地震并非全部为走滑型，但都具有一定的走滑分量(倾滑分量不影响计算结果，可忽略)。以 M_S 5.2 最大余震的处理过程为例，选择 150 km 内 34 次 M_S 3.0～4.4 的走滑型地震作为参考事件，主震与参考事件的震源参数均来自王月等(2021)。为保证反演精度与数据信噪比，对地震波形数据依次进行去仪器响应、去线性趋势、剔除异常数据及三分量旋转(转换为 R-T-Z 分量)。后续统一选取高信噪比垂直分量数据，采用 5 Hz 低通滤波抑制小尺度速度异常干扰，手动拾取 P 波初至时刻。

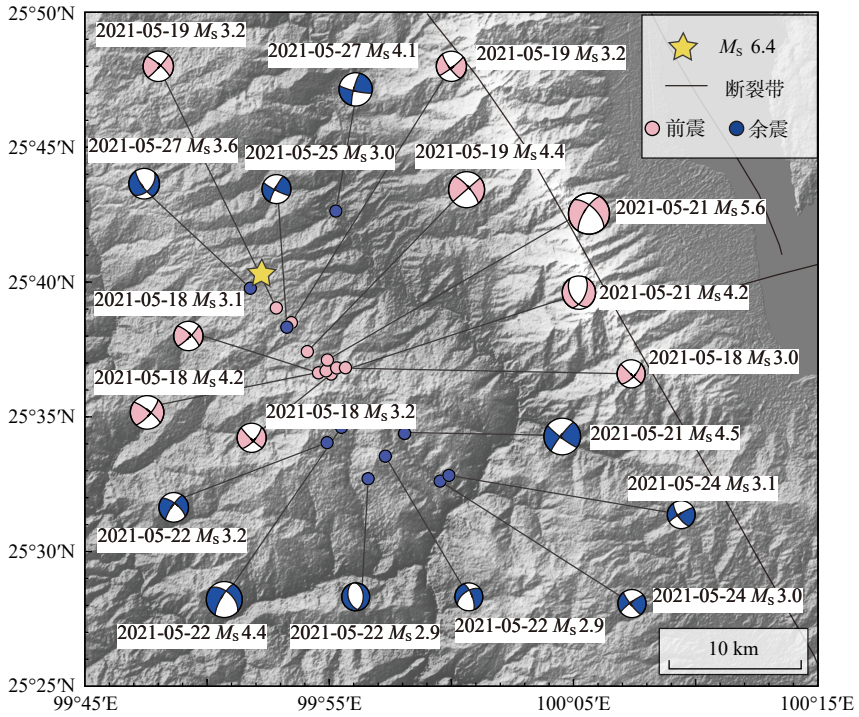


图 3 重定位后的主事件与参考事件的空间分布图及震源机制解对比图

Fig. 3 Spatial distribution and comparison of focal mechanism solutions for the relocated main event and reference events

将参考事件的波形作为经验格林函数，减轻传播路径的影响。建立不同持续时间的标准震源时间函数库，将标准震源时间函数与经验格林函数进行卷积，得到合成的主事件波形；再将主事件的观测波形与合成波形进行互相关，取互相关系数最大时所对应的持续时间为该台站的相对震源持续时间。利用最小二乘法对公式(3)进行拟合，得到破裂方向和破裂长度，并利用相对上升时间的非负性判断反演结果的可靠性。

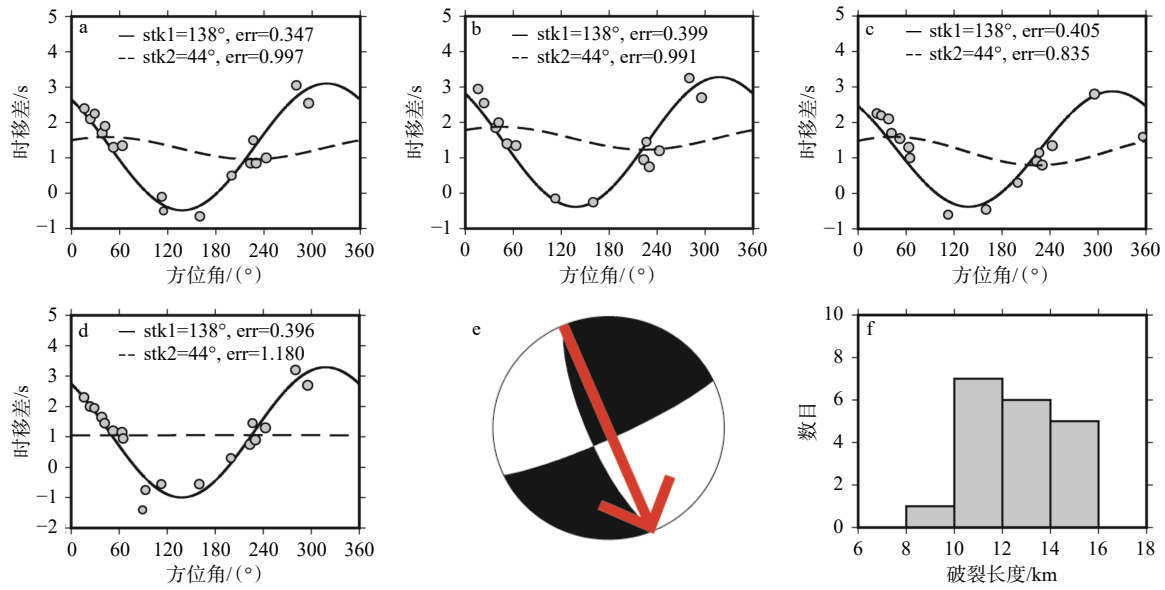
基于修正后的余弦函数，设置 0.05 s 的计算间隔步长，生成震源持续时间 0.1～2.0 s 范围内的标准震源时间函数。将参考地震数据与这些标准震源时间函数进行卷积，生成合成地震图。通过计算合成地震图与 M_S 5.2 余震实际波形的互相关系数，结合网格搜索法确定各台站的最佳震源持续时间。计算过程中，时间窗对准 P 波起始点并设为 2 s，以确保完整覆盖 P 波且避免其他震相干扰。

在破裂方向性参数反演阶段，设定互相关系数阈值为 0.85。将满足条件台站的最佳震源持续时间，与 M_S 5.2 余震震源机制解对应的 2 个候选节面（节面 1 走向 148°，节面 2 走向 44°；王月等，2021）的理论震源持续时间，按公式(3)采用最小二乘法拟合。拟合效果更优的节面判定为实际破裂面，其余弦函数最低点对应破裂方向，而后反演获取破裂长度。反演中设定的破裂速度(2.5 km/s)与 P 波速度(6 km/s)均参考滇西地区地壳速度结构研究结果(Zhou et al., 2022)。

2 研究结果

2.1 相对质心定位法结果

针对序列中 5 次 M_S ≥4.4 的地震开展相对质心定位法分析，其中 3 次地震获取了可靠结果，包括 2021 年 5 月 21 日 13:48 M_S 6.4 主震(简称“漾濞 M_S 6.4 主震”)、2021 年 5 月 21 日 13:21 M_S 5.6前震(简称“2021-05-21 M_S5.6 前震”)和2021 年5 月 19 日 12:05 M_S 4.4 前震(简称“2021-05-19 M_S4.4 前震”)。其余 2 次地震——2021 年 5 月 21 日 14:31 M_S 5.2 余震(简称“2021-05-21 M_S 5.2余震”)与2021 年5 月 21 日 15:23 M_S 4.5 前震(简称“2021-05-21 M_S 4.5 前震”)，在 2 个可能节面上的拟合结果较为接近，难以区分优势破裂面。M_S 6.4 主震的分析结果显示，在 19 个参考事件中，节面 1(走向 138°)的拟合效果均优于节面 2(走向 44°)，指示地震破裂主要沿节面 1 自北西向南东方向扩展，部分参考事件结果见图 4。基于上述 19 个参考事件求得的平均破裂长度约为 12.8 km，



stk1—漾濞 M_S 6.4 主震节面 1 走向；stk2—漾濞 M_S 6.4 主震节面 2 走向；err—拟合误差；图 a—d 中的余弦曲线分别为震源机制解的 2 个可能节面的理论走向拟合曲线；灰色圆点为不同展台观测波形与理论波形之间的时移差

a—以 2021-05-18 M_S 3.2 作为参考事件所得的破裂方向性拟合结果；b—以 2021-05-18 M_S 3.0 作为参考事件所得的破裂方向性拟合结果；c—以 2021-05-18 M_S 4.2 作为参考事件所得的破裂方向性拟合结果；d—以 2021-05-18 M_S 3.1 作为参考事件所得的破裂方向性拟合结果；e—漾濞 M_S 6.4 主震破裂方向示意图；f—漾濞 M_S 6.4 主震破裂尺度

图 4　漾濞 M_S 6.4 主震破裂方向性反演结果

Fig. 4　Rupture directivity inversion results of the Yangbi M_S 6.4 mainshock

(a) Rupture directivity fitting results using event 2021-05-18 M_S 3.2 as the reference; (b) Rupture directivity fitting results using event 2021-05-18 M_S 3.0 as the reference; (c) Rupture directivity fitting results using event 2021-05-18 M_S 4.2 as the reference; (d) Rupture directivity fitting results using event 2021-05-18 M_S 3.1 as the reference; (e) Schematic diagram of the rupture directivity of the Yangbi M_S 6.4 mainshock; (f) Rupture scale of the Yangbi M_S 6.4 mainshock

stk1—strike of nodal plane 1 of the Yangbi M_S 6.4 mainshock; stk2—strike of nodal plane 2 of the Yangbi M_S 6.4 mainshock; err—fitting error; In panels a to d, the cosine curves are the theoretical strike fitting curves for the two possible nodal planes of the focal mechanism solution, respectively; The gray dots represent the time shift differences between the observed waveforms and the synthetic waveforms at different stations.

该结果与现有研究中基于地震余震分布、大地测量等数据得到的研究结论相吻合(龙锋等, 2021; 杨九元等, 2021; 张克亮等, 2021)。

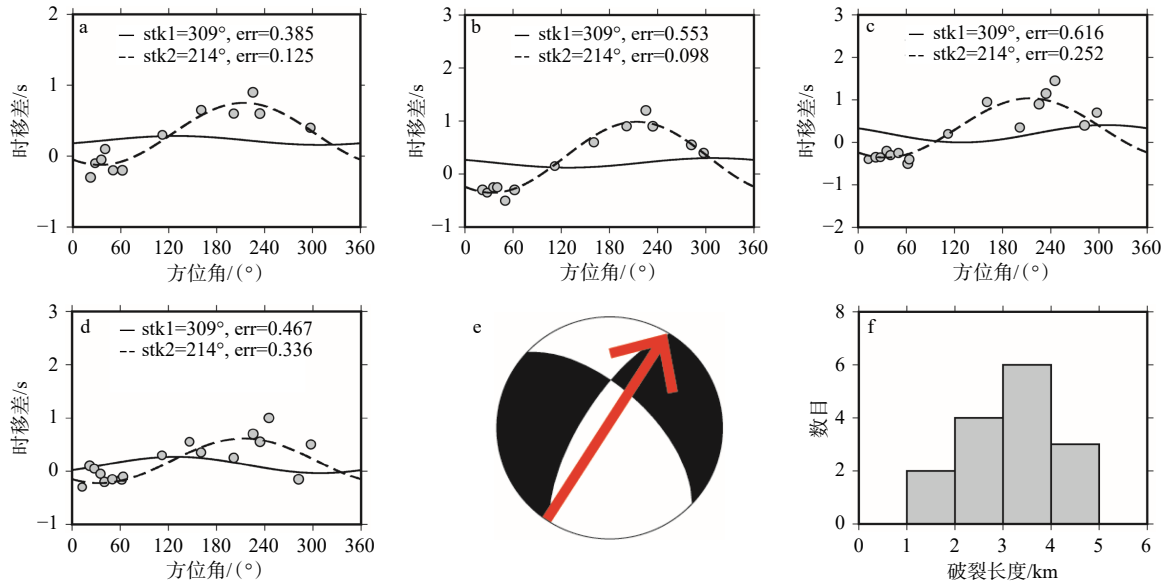
其余 4 次地震的处理步骤与主震相同。2021-05-21M_S 5.6 前震：采用震源参数(节面 1 走向 309°, 节面 2 走向 214°), 选取 15 次 M_S 2.9～4.4 地震为参考事件, 得到的破裂方向指向北东向; 由这 15 次参考事件计算得到的平均破裂长度仅约 3 km, 相较于同震级地震偏小(图 5)。2021-05-19 M_S 4.4 前震：选用王月等(2021)获取的震源参数(节面 1 走向 229°, 节面 2 走向 319°), 选取 10 次 M_S2.9～3.6 地震作为参考事件, 得到的破裂方向指向北西向; 其平均破裂长度同样约为 3 km(图 6), 具体测定破裂方向性参数如表所示。

2.2　震源时频特征法结果

对漾濞 M_S 6.4 地震序列中的 8 次地震开展破裂方向性求解, 均获取了可靠结果, 具体分析如下。

2021-05-21 M_S 5.2 余震：选取 34 次 M_S 3.0～4.4 地震作为参考事件(150 km 内的短周期台阵数据); 设定相关系数阈值为 0.85、破裂速度为 2.5 km/s、P 波速度为 6 km/s; 基于 CAP 方法求解其断层面、破裂方向和破裂长度。对 2 个节面(走向 148°和 40°)进行拟合, 结果表明优势节面走向为 40°, 破裂方向为北东向。该余震产生了北东向破裂, 破裂尺度约 1.8 km。这一特征表明, 该 M_S 5.2 余震并未发生在主震断层上, 推测其发生在一个共轭断层上, 与 2021-05-21 M_S 5.6 前震的情况类似(图 7)。

2021-05-19 M_S 4.4 前震：选取 13 次 M_S 2.9～3.6



stk1—2021-05-21 M_S 5.6 前震节面 1 走向；stk2—2021-05-21 M_S 5.6 前震节面 2 走向；err—拟合误差；图 a—d 中的余弦曲线分别为震源机制解的 2 个可能节面的理论走向拟合曲线；灰色圆点为不同展台观测波形与理论波形之间的时移差

a—以 2021-05-18 M_S 3.2 作为参考事件所得的破裂方向性拟合结果；b—以 2021-05-18 M_S 3.0 作为参考事件所得的破裂方向性拟合结果；c—以 2021-05-18 M_S 3.1 作为参考事件所得的破裂方向性拟合结果；d—以 2021-05-18 M_S 3.6 作为参考事件所得的破裂方向性拟合结果；e—漾濞 2021-05-21 M_S 5.6 前震破裂方向示意；f—漾濞 2021-05-21 M_S 5.6 前震破裂尺度

图 5 漾濞 2021-05-21 M_S 5.6 前震破裂方向性反演结果

Fig. 5 Rupture directivity inversion results of the Yangbi 2021-05-21M_S 5.6 foreshock

(a) Rupture directivity fitting results using event 2021-05-18 M_S 3.2 as the reference; (b) Rupture directivity fitting results using event 2021-05-18 M_S 3.0 as the reference; (c) Rupture directivity fitting results using event 2021-05-18 M_S 3.1 as the reference; (d) Rupture directivity fitting results using event 2021-05-18 M_S 3.6 as the reference; (e) Schematic diagram of rupture direction for the Yangbi 2021-05-21M_S 5.6 foreshock; (f) Rupture scale of the Yangbi 2021-05-21M_S 5.6 foreshock

stk1—strike of nodal plane 1 of the 2021-05-21 M_S 5.6 foreshock; stk2—strike of nodal plane 2 of the 2021-05-21 M_S 5.6 foreshock; err—fitting error; In panels a to d, the cosine curves are the theoretical strike fitting curves for the two possible nodal planes of the focal mechanism solution, respectively; the gray dots represent the time shift differences between the observed waveforms and the synthetic waveforms at different stations.

地震作为参考事件(100 km 内的短周期台阵数据)，设定相关系数阈值为 0.8，处理步骤与 2021-05-21 M_S 5.2 余震相同。结果显示破裂方向为南东向，与上文通过相对质心定位法测得的破裂方向(北西)相反。结合杨苗等(2023)的研究，表明该地震为双侧破裂事件(图 8)。

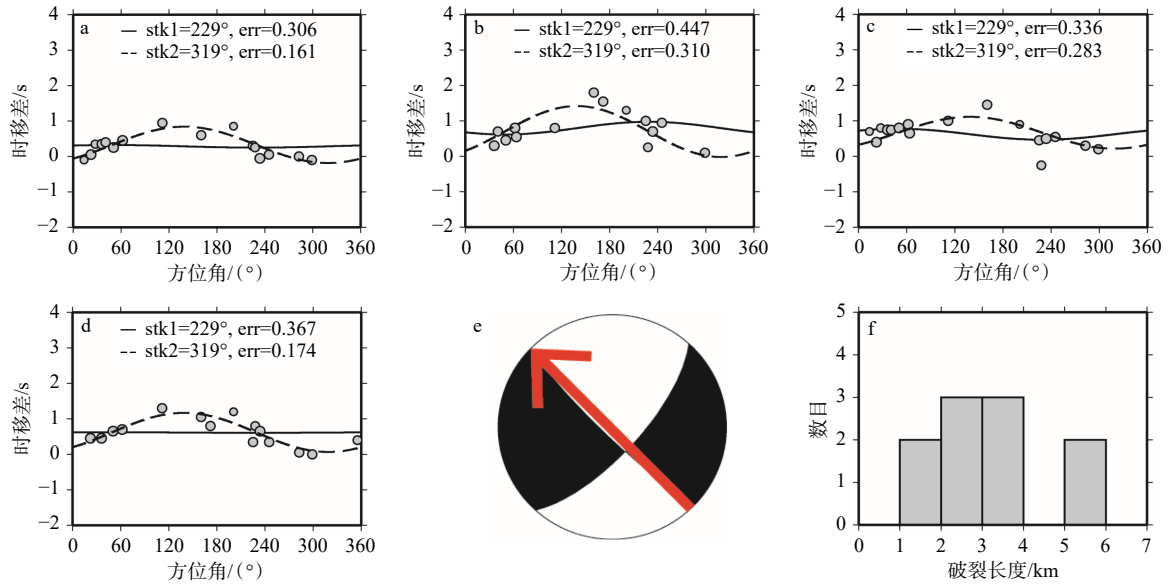
2021-05-18 M_S 4.2 前震：选取 24 次 M_S 2.9～3.8 地震作为参考事件(150 km 内的宽频固定台站数据)，设定相关系数阈值为 0.85，进行破裂方向性测定。结果显示，其中有 17 次参考事件支持北西向破裂，表明该前震发生了北西向破裂(附图 2)。

2021-05-21 M_S 4.2 前震：选取了 27 次 M_S 2.6～3.5 地震作为参考事件(100 km 内的短周期台阵数据)，设定相关系数阈值为 0.8，进行破裂方向性测定。结果显示，其中有 20 次参考事件支持南西向破裂，表明该前震发生了南西向破裂。

2021-05-21 M_S 4.1 余震、2021-05-22 M_S 4.0 余震：分别选取 35 次 M_S 2.6～3.5 地震作为参考事件(100 km 内的短周期台阵数据)，设定相关系数阈值为 0.85，进行破裂方向性测定。结果显示，其中有 31 次参考事件支持 2021-05-21 M_S 4.1 余震为北西向破裂，30 次参考事件支持 2021-05-22 M_S 4.0 余震为北西向破裂。

2021-05-21 M_S 4.5 前震、2021-05-21 M_S 4.0 余震：分别选取了 18 次和 24 次 M_S 2.6～3.5 地震作为参考事件(150 km 内的宽频固定台站数据)，设定相关系数阈值为 0.8，进行破裂方向性测定。结果显示，分别有 13 个和 18 个参考事件支持两者为北西向破裂。具体测定破裂方向性参数如表 2 所示。

基于上述研究，2 种方法一共获取了包括主震在内的 10 次地震的破裂方向性。其中，2021-05-19



stk1—2021-05-19 M_S 4.4 前震节面 1 走向；stk2—2021-05-19 M_S 4.4 前震节面 2 走向；err—拟合误差；图 a—d 中的余弦曲线分别为震源机制解的 2 个可能节面的理论走向拟合曲线；灰色圆点为不同台站观测波形与理论波形之间的时移差

a—以 2021-05-18 M_S 3.2 作为参考事件所得的破裂方向性拟合结果；b—以 2021-05-22 M_S 2.9 作为参考事件所得的破裂方向性拟合结果；c—以 2021-05-21 M_S 3.2 作为参考事件所得的破裂方向性拟合结果；d—以 2021-05-24 M_S 3.0 作为参考事件所得的破裂方向性拟合结果；e—漾濞 2021-05-19 M_S 4.4 前震破裂方向示意；f—漾濞 2021-05-19 M_S 4.4 前震破裂尺度

图 6　漾濞 2021-05-19 M_S 4.4 前震破裂方向性反演结果

Fig. 6　Rupture directivity inversion results of the Yangbi 2021-05-19 M_S 4.4 foreshock

(a) Rupture directivity fitting results using event 2021-05-18 M_S 3.2 as the reference; (b) Rupture directivity fitting results using event 2021-05-22 M_S 2.9 as the reference; (c) Rupture directivity fitting results using event 2021-05-21 M_S 3.2 as the reference; (d) Rupture directivity fitting results using event 2021-05-24 M_S 3.0 as the reference; (e) Schematic diagram of rupture direction for the Yangbi 2021-05-19 M_S 4.4 foreshock; (f) Rupture scale of the Yangbi 2021-05-19 M_S 4.4 foreshock

stk1—strike of nodal plane 1 of the 2021-05-19 M_S 4.4 foreshock; stk2—strike of nodal plane 2 of the 2021-05-19 M_S 4.4 foreshock; err—fitting error; In panels a to d, the cosine curves are the theoretical strike fitting curves for the two possible nodal planes of the focal mechanism solution, respectively; the gray dots represent the time shift differences between the observed waveforms and the synthetic waveforms at different stations.

表 1　相对质心定位测定破裂方向性结果（震源机制解引自王月等，2021）

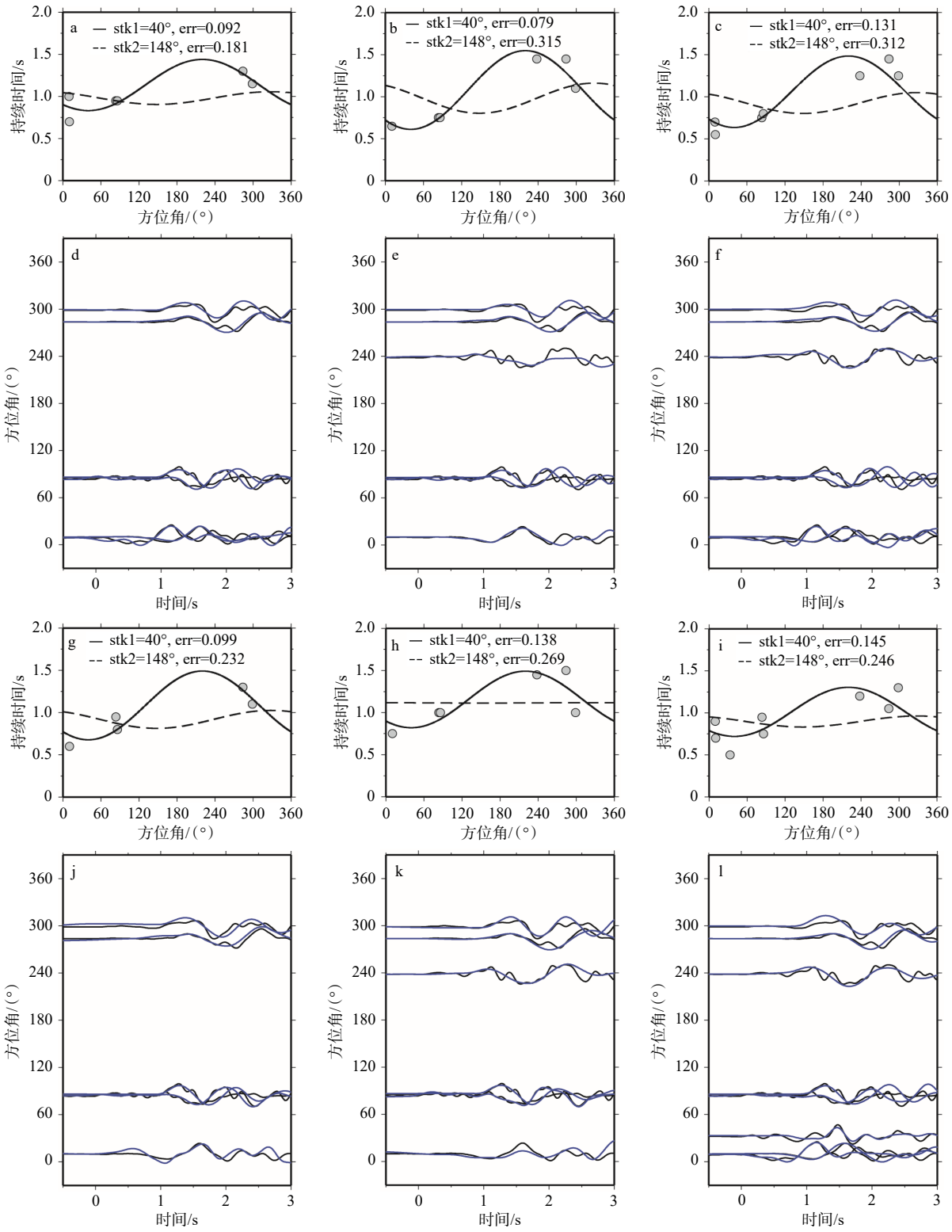
Table 1　Results of rupture directivity determined by relative centroid location (Focal mechanism solution from Wang et al., 2021)

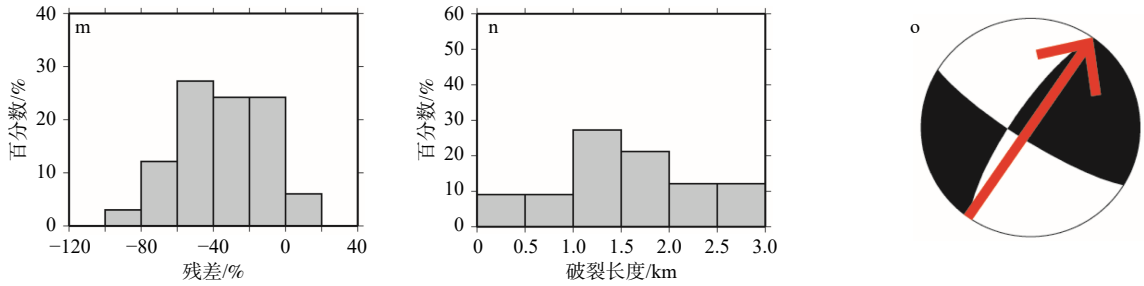
地震名	节面1 （走向/倾角/滑动角）	节面2 （走向/倾角/滑动角）	破裂方向	破裂长度	参考事件数	支持同一破裂方向的参考事件数
2021-05-19 M_S 4.4前震	229°/90°/−14°	319°/76°/−180°	NW	3.0 km	10	10
2021-05-21 M_S 5.6前震	214°/77°/−20°	309°/70°/−167°	NE	3.0 km	15	15
2021-05-21 M_S 6.4主震	44°/78°/16°	138°/74°/168°	SE	12.8 km	19	19

M_S 4.4 前震作为地震序列级联破裂第二阶段的首次事件，呈现出频率依赖的双侧破裂特征。对其余 9 次具有明确破裂方向的地震进行分析后发现，以 2021-05-19 M_S 4.4 前震为空间分界，序列北西段与南东段地震的破裂方向存在显著分段差异：北西段（包括主震及其余 4 次地震）的发震断层均为北西走向；南东段（包括最大前震以及最大余震在内的 4 次地震）的发震断层兼有北西和北东走向，反映了震源区发震构造几何结构的复杂程度（图 9）。2021-05-21 M_S 5.6 前震以及 2021-05-21 M_S 5.2 余震破裂方向由南西向指向北东向。同时，已有的重定位结果也分别在两者之间勾勒出了不同于主震的断层走向，因此推测这 2 次地震并非发生在主震断层上，而是分别发生在不同的次级共轭断层上。对比区域地震构造图中的断层展布特征可以看出，以 2021-05-19 M_S 4.4 前震为界，序列南东段发育多条分支断

层，构造结构明显较北西段更为复杂。综上，文章合理推测该地震序列北西段与南东段具有比较明显的断层摩擦性质差异，将在后文对此观点展开验证。

相对质心定位法与震源时频特征法在破裂方向性约束方面各具优势，但二者在波形频段与适用事件尺度上存在显著差异，因此难以进行直接的定量对比。相对质心定位法基于宽频带体波和面波波形反演，依据 He et al.(2018)的数值实验结果，该方法对破裂尺度的分辨下限约为 2 km，通常适用于中等及以上震级的地震事件。震源时频特征法则





stk1—2021-05-21 M_S 5.2 余震节面 1 走向；stk2—2021-05-21 M_S 5.2 余震节面 2 走向；err—拟合误差；图 a、b、c、g、h、i 中的余弦曲线分别为震源机制解的 2 个可能节面的理论走向拟合曲线；灰色圆点代表各个台站的方位角所对应的最佳震源持续时间，震源持续时间最小的点所对应的方位角即为地震破裂方向

a—以 2021-05-18 M_S 3.2 作为参考事件所得的震源持续时间随方位角的变化；b—以 2021-05-19 M_S 2.9 作为参考事件所得的震源持续时间随方位角的变化；c—以 2021-05-21 M_S 4.0 作为参考事件所得的震源持续时间随方位角的变化；d—以 2021-05-18 M_S 3.2 作为参考事件所得的波形拟合结果；e—以 2021-05-18 M_S 2.9 作为参考事件所得的波形拟合结果；f—以 2021-05-21 M_S 4.0 作为参考事件所得的波形拟合结果；g—以 2021-05-21 M_S 3.2 作为参考事件所得的震源持续时间随方位角的变化；h—以 2021-05-22 M_S 2.9 作为参考事件所得的震源持续时间随方位角的变化；i—以 2021-05-27 M_S 3.6 作为参考事件所得的震源持续时间随方位角的变化；j—以 2021-05-21 M_S 3.2 作为参考事件所得的波形拟合结果；k—以 2021-05-22 M_S 2.9 作为参考事件所得的波形拟合结果；l—以 2021-05-27 M_S3.6 作为参考事件所得的波形拟合结果；m—节面 1 与节面 2 拟合残差统计直方图；n—破裂长度统计；o—2021-05-21 M_S 5.2 余震破裂方向示意

图 7　漾濞 2021-05-21 M_S 5.2 余震破裂方向性反演结果

Fig. 7　Inversion results of the rupture directivity of the Yangbi M_S 5.2 aftershock

(a) Variation of source duration with azimuth obtained using event 2021-05-18 M_S 3.2 as the reference; (b) Variation of source duration with azimuth obtained using event 2021-05-19 M_S 2.9 as the reference; (c) Variation of source duration with azimuth obtained using event 2021-05-21 M_S 4.0 as the reference; (d) Waveform fitting obtained using event 2021-05-18 M_S 3.2 as the reference; (e) Waveform fitting obtained using event 2021-05-18 M_S 2.9 as the reference; (f) Waveform fitting obtained using event 2021-05-21 M_S 4.0 as the reference; (g) Variation of source duration with azimuth obtained using event 2021-05-21 M_S 3.2 as the reference; (h) Variation of source duration with azimuth obtained using event 2021-05-22 M_S 2.9 as the reference; (i) Variation of source duration with azimuth obtained using event 2021-05-27 M_S 3.6 as the reference; (k) Waveform fitting obtained using event 2021-05-22 M_S 2.9 as the reference; (l) Waveform fitting obtained using event 2021-05-27 M_S 3.6 as the reference; (m) Histogram of residuals between nodal plane 1 and nodal plane 2; (n) Statistics of rupture lengths; (o) Schematic diagram of rupture direction of the 2021-05-19 M_S 4.4 foreshock

stk1—strike of nodal plane 1 of the 2021-05-21 M_S 5.2 aftershock; stk2—strike of nodal plane 2 of the 2021-05-21 M_S 5.2 aftershock; err—fitting error; In panels a, b, c, g, h, and i, the cosine curves represent the fitting results corresponding to the two nodal planes of the focal mechanism solution, respectively; and the gray circles represent the optimal source duration at the azimuths of individual stations, the azimuth corresponding to the minimum source duration indicates the earthquake rupture direction.

主要利用高频 P 波信息开展方位角拟合，对震源时间函数较短、破裂过程相对简单的小震事件具有更好的适用性，而当震源持续时间较长、破裂过程较为复杂时，波形拟合效果会受到一定限制。

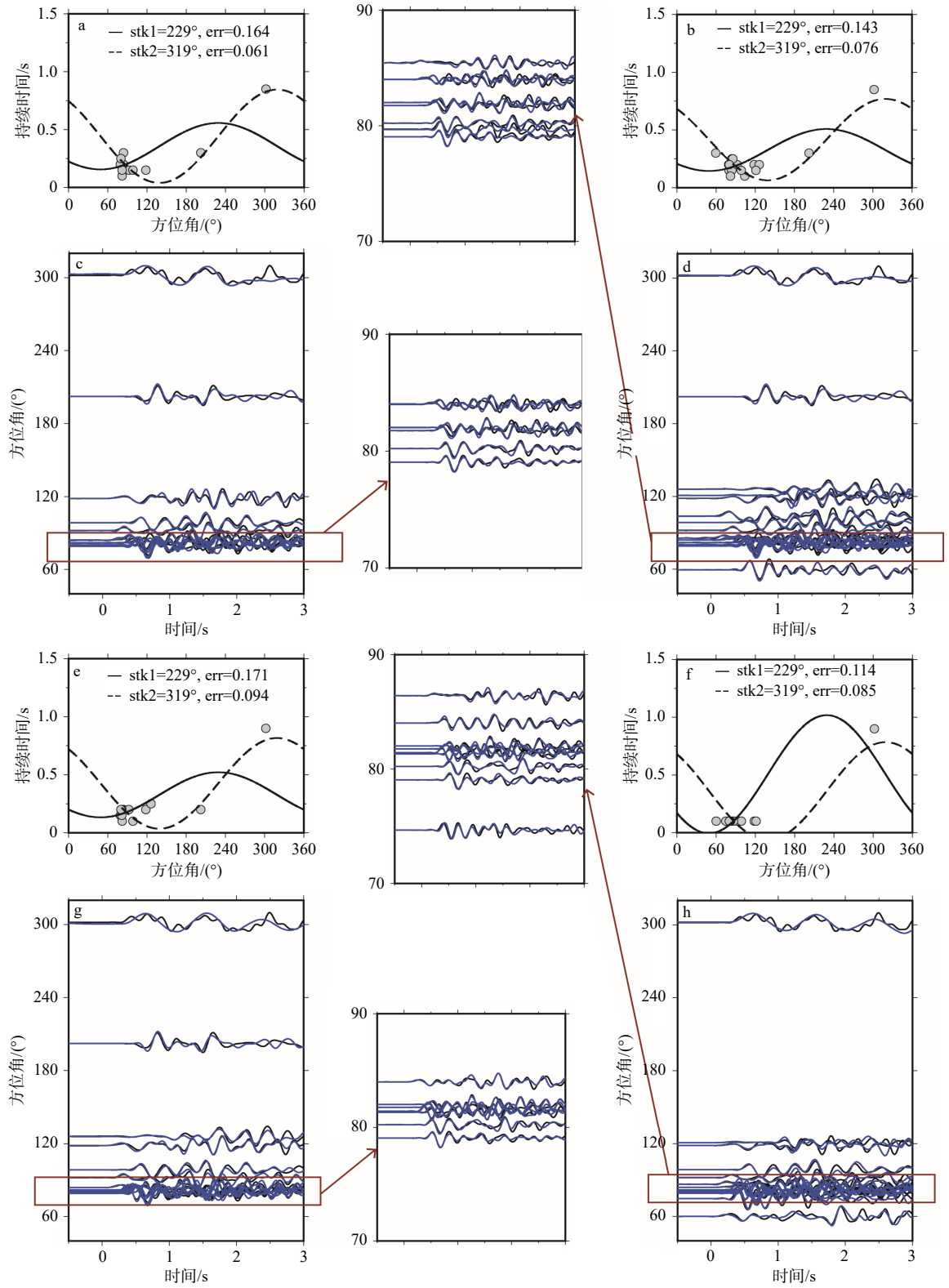
以 2021-05-21 M_S 5.2 余震为例，相对质心定位法对 2 个可能节面的拟合结果较为接近，受测定误差影响，难以有效区分优势破裂面；而震源时频特征法给出的破裂尺度约为 1.8 km，低于相对质心定位法的有效分辨下限。这进一步印证了两种方法在适用震级与破裂尺度上的互补性。总体而言，两种方法分别适用于不同规模与破裂特征的地震事件，其结果差异主要源于频段选择、分辨能力及适用条件的不同，在合理认识不确定性的前提下，二者可从不同角度为地震破裂方向性提供约束。

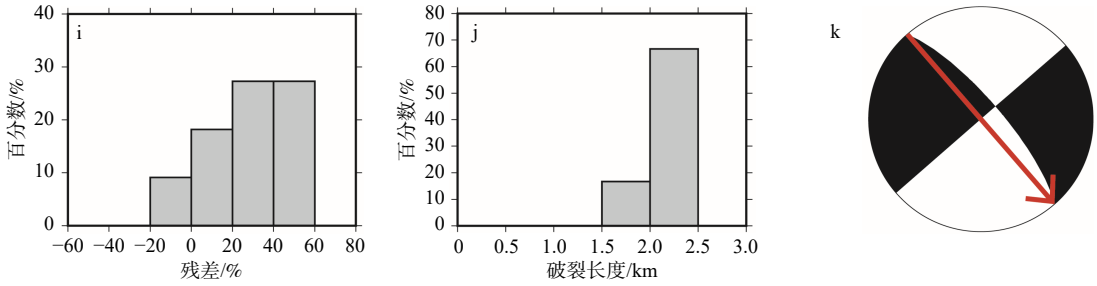
3　讨论

3.1　特殊事件

2021 年 5 月 19 日发生的漾濞 M_S 4.4 前震，相对质心定位法测得其破裂方向为北西，震源时频特征法测得结果为南东。2 种方法结果相反，表明该地震的破裂过程较为复杂。从地震序列研究成果震级−时间图（龙锋等，2021）中亦可看出，该地震是地震序列级联破裂第二阶段的首个地震事件，具有独特的时空位置。因此，文章定义其为整个地震序列的特殊事件。

为分析该事件的破裂特征，选取 2 个台站开展波形频谱对比观测：TUS 台站布设于 2021-05-19 M_S 4.4 前震南东侧，YUL 台站布设于其北西侧；通过 2 个台站的波形记录及 P 波振幅谱，对特殊事件与参考事件开展对比分析（图 10）。统一选取 P 波初动后 2 s 的有效波形段：TUS 台 P 波初动到时约 6.5 s，分析窗口取 6.5～8.5 s；YUL 台 P 波初动到时约 11.5 s，分析窗口取 11.5～13.5 s。先通过 0.5～5.0 Hz 带通滤波压制低频噪声与高频干扰，再经快速傅里叶变换（FFT）得到振幅谱，以振幅谱峰值频率作为波形





stk1—2021-05-19 M_S 4.4 前震节面 1 走向；stk2—2021-05-19 M_S 4.4 前震节面 2 走向；err—拟合误差；图 a、b、e、f 中的余弦曲线分别代表震源机制解的两个节面对应的拟合结果；灰色圆点代表各个台站的方位角所对应的最佳震源持续时间，震源持续时间最小的点所对应的方位角即为地震破裂方向

a—以 2021-05-18 M_S 2.8 作为参考事件所得的震源持续时间随方位角的变化；b—以 2021-05-18 M_S 3.2 作为参考事件所得的震源持续时间随方位角的变化；c—以 2021-05-18 M_S 2.8 作为参考事件所得的波形拟合结果；d—以 2021-05-18 M_S 3.2 作为参考事件所得的波形拟合结果；e—以 2021-05-18 M_S 2.5 作为参考事件所得的震源持续时间随方位角的变化；f—以 2021-05-19 M_S 3.2 作为参考事件所得的震源持续时间随方位角的变化；g—以 2021-05-18 M_S 2.5 作为参考事件所得的波形拟合结果；h—以 2021-05-19 M_S 3.2 作为参考事件所得的波形拟合结果；i—节面 1 与节面 2 拟合残差统计直方图；j—破裂长度统计；k—2021-05-19 M_S 4.4 前震破裂方向示意

图 8　漾濞 2021-05-19 M_S 4.4 前震破裂方向性反演结果

Fig. 8　Inversion results of the rupture directivity of the Yangbi M_S 4.4 foreshock

(a) Variation of source duration with azimuth obtained using event 2021-05-18 M_S 2.8 as the reference; (b) Variation of source duration with azimuth obtained using event 2021-05-18 M_S 3.2 as the reference; (c) Waveform fitting obtained using event 2021-05-18 M_S 2.8 as the reference; (d) Waveform fitting obtained using event 2021-05-18 M_S 3.2 as the reference; (e) Variation of source duration with azimuth obtained using event 2021-05-18 M_S 2.5 as the reference; (f) Variation of source duration with azimuth obtained using event 2021-05-19 M_S 3.2 as the reference; (g) Waveform fitting obtained using event 2021-05-18 M_S 2.5 as the reference; (h) Waveform fitting obtained using event 2021-05-19 M_S 3.2 as the reference; (i) Histogram of residuals between nodal plane 1 and nodal plane 2; (j) Statistics of rupture lengths; (k) Schematic diagram of rupture direction of the 2021-05-19 M_S 4.4 foreshock

stk1—strike of nodal plane 1 of the 2021-05-19 M_S 4.4 foreshock; stk2—strike of nodal plane 2 of the 2021-05-19 M_S 4.4 foreshock; err—fitting error; In panels a, b, e, and f, the cosine curves represent the fitting results corresponding to the two nodal planes of the focal mechanism solution, respectively; and the gray circles represent the optimal source duration at the azimuths of individual stations, the azimuth corresponding to the minimum source duration indicates the earthquake rupture direction.

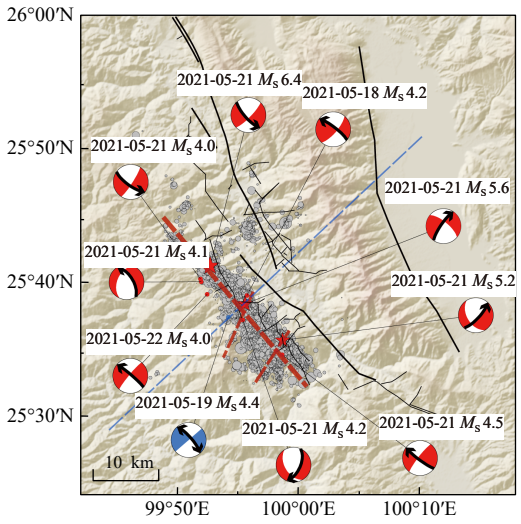
表 2　震源时频特征法测定破裂方向性统计表（震源机制解引自王月等，2021）

Table 2　Statistical table of rupture directivity determined by the source time-frequency characteristic method

地震名	节面1(走向/倾角/滑动角)	节面2(走向/倾角/滑动角)	破裂方向	破裂长度	参考事件数	支持同一破裂方向参考事件数
2021-05-18 M_S 4.2前震	41°/75°/11°	308°/79°/164°	NW	1.0 km	24	17
2021-05-19 M_S 4.4前震	229°/90°/−14°	319°/76°/−180°	SE	2.2 km	13	12
2021-05-21 M_S 4.2前震	23°/57°/−52°	149°/48°/−133°	SW	1.5 km	27	20
2021-05-21 M_S 4.5前震	218°/83°/8°	127°/82°/172°	NW	1.0 km	18	13
2021-05-21 M_S 4.1余震	203°/45°/−44°	328°/60°/−126°	NW	1.8 km	35	31
2021-05-21 M_S 4.0余震	210°/73°/10°	117°/80°/162°	NW	1.5 km	24	18
2021-05-21 M_S 5.2余震	40°/71°/−46°	148°/47°/−153°	NE	1.8 km	34	30
2021-05-22 M_S 4.0余震	34°/80°/−17°	127°/73°/−170°	NW	1.5 km	35	30

主频。

频谱分析结果显示，南东侧 TUS 台站记录的特殊事件 P 波主频约 2.3 Hz，显著高于参考事件的 1.1 Hz，且 P 波能量衰减更缓、波形持续时间延长，反映破裂向南东方向扩展。已有研究指出，高频能量源于破裂前端的小尺度快速滑移（Kaneko and Shearer, 2014），该南东向高频破裂对应级联破裂第一阶段的动力学过程。北西侧 YUL 台站观测结果则完全不同：特殊事件 P 波主频约 2.6 Hz，显著低于参考事件的 4.3 Hz，且 P 波能量衰减更快、波形持续时间缩



蓝色震源球代表具有双侧破裂的特殊地震事件，红色震源球代表其余求得准确破裂方向性参数的地震事件，均已标记出文中研究所得断层破裂方向；红色虚线代表根据文中破裂方向性测定结果结合已有研究成果推测的发震断层；灰色圆点代表地震序列重定位分布（Tian et al., 2023）；蓝色虚线代表破裂分段示意线，用于直观划分北西与南东方向的破裂分段特征；红色五角星代表漾濞地震序列 M_S >5.2 的地震；黑色实线代表震源区断层分布（引自李传友等, 2021; 龙锋等, 2021）

图 9 漾濞 M_S 6.4 地震破裂方向性示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the rupture directivity of the Yangbi earthquake

Blue beach balls represent special seismic events with bilateral rupture; red beach balls represent the remaining events for which accurate rupture directivity parameters were obtained; the fault rupture direction determined in this study is marked for all of them. The red dashed line indicates the inferred seismogenic fault based on the rupture directivity results from this study combined with previous research; gray dots show the relocated distribution of the earthquake sequence (Tian et al., 2023); the blue dashed line is a schematic line for rupture segmentation, used to visually delineate the segmentation characteristics in the NW and SE directions; red five-pointed stars represent earthquakes with M_S > 5.2 in the Yangbi sequence; black solid lines show the fault distribution in the source area (from the regional seismotectonic map of the Yangbi swarm – overlay mapping, Li et al., 2021; Long et al., 2021).

短。结合非对称破裂模型的理论预测（Kaneko and Shearer, 2015），可判定北西向为该事件的主破裂方向，低频能量对应主破裂阶段的缓慢滑移。综合震源时频特征法分析结果与两台站频谱差异观测，可证实该事件为频率依赖的双侧破裂事件：南东向高频破裂对应级联破裂第一阶段，北西向低频破裂构成震源破裂主体。该认识与 Kaneko and Shearer（2015）提出的“非对称破裂导致台站时频响应差异”的核心结论一致。

3.2 漾濞地震序列能量辐射效率估算

基于已有的研究成果，地震能量辐射的频率依赖现象已在不同强度地震中得到证实。Yao et al.（2011）对 2011 年日本东北 M_W 9.0 地震的研究发现，高频与低频能量辐射在不同区域占主导，推测与非均匀摩擦特性导致的破裂差异相关。Yin et al.（2017）通过压缩传感方法分析 2015 年尼泊尔 M_W 7.8 地震，揭示同震辐射的频率依赖性规律：低频辐射源于破裂面浅层，高频辐射来自深部，且该特征与断层面应力变化及摩擦性质密切相关。研究进一步提出地震凹凸体模型，解释其孕震机制与板块界面摩擦性质的深度变化关系。Liu et al.（2021）对 2016 年意大利诺尔恰 M_W 6.5 地震的研究表明，中等强度地震同样存在频率依赖破裂特征：低频滑动集中于断层浅层，高频滑动分布在低频滑动区域边缘，断层复杂性与不均匀流体分布可能是主要诱因。Goebel et al.（2023）的花岗岩摩擦实验进一步证实，断层粗糙度对地震序列的滑动稳定性及能量分配具有控制作用。为此，文章以漾濞地震序列中特殊事件的频率依赖双侧破裂现象为切入点，选取 $M_S \geq 3.0$ 地震测定能量辐射效率，探究发震断层动力学关系。具体方法如下：选取同一近震 TUS 台站记录的波形，规避地下三维结构导致的方位角差异；同步合成理论波形，校正震源辐射花样的影响；手动拾取观测波形与理论波形 T 分量的 S 波，统一设置 2 s 分析时窗；依据 Kanamori et al.（1993）的方法，对速度波形振幅的平方积分，求取 S 波能量：

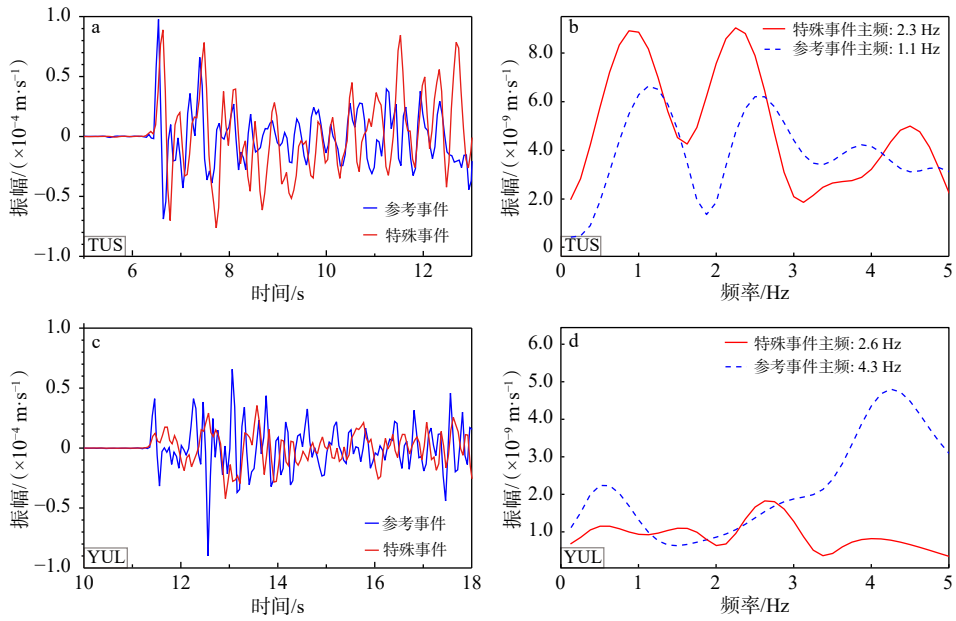
$$E_\beta = \int \sum v_s^2 dt \tag{4}$$

式中，E_β—辐射的 S 波总能量；v_s^2—台站记录的 S 波质点运动速度；其余变量含义同上。

当近震台站接收到质量较好的波形时，可用公式（4）来近似计算 S 波辐射能量（Kanamori et al., 1993）：

$$E_\beta = \rho_0 \beta_0 \int_{S_0} \int \sum v_0^2 dt \mathrm{d}S \tag{5}$$

式中，ρ_0—震源球面上介质的密度；β_0—S 波速度；$\sum v_0^2$—垂直、径向、横向三分量 S 波质点运动速度的平方和；dS–对震源球表面 S_0 进行曲面积分；其余变量含义同上。



a—TUS 台站记录的特殊事件及参考事件的波形对比；b—TUS 台站记录的特殊事件与参考事件的 P 波振幅谱对比；c—YUL 台站所记录的特殊事件与参考事件的波形对比；d—YUL 台站记录的特殊事件与参考事件的 P 波振幅谱对比

图 10　2 个台站记录的特殊事件与参考事件的波形及振幅谱对比

Fig. 10　Comparison of waveforms and amplitude spectra of the special event and reference earthquake recorded at two stations

(a) Waveforms of the special event and the reference earthquake recorded at station TUS; (b) Comparison of P-wave amplitude spectra of the special event and the reference earthquake at station TUS; (c) Waveforms of the special event and the reference earthquake recorded at station YUL; (d) Comparison of P-wave amplitude spectra of the special event and the reference earthquake at station YUL

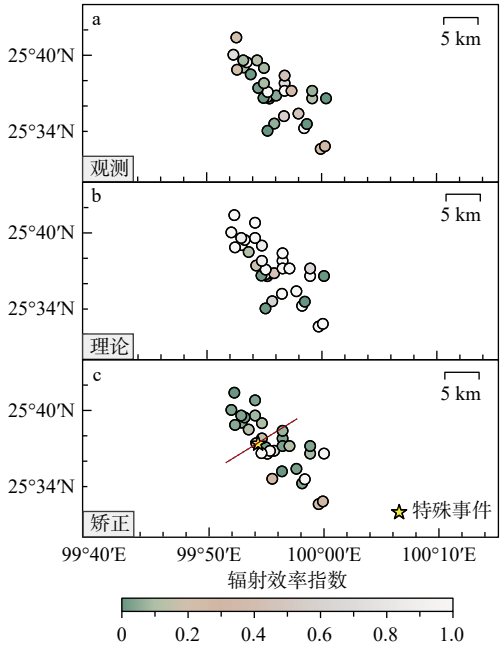
利用 CAP 法获取各次地震的矩震级，根据标度律计算出对应地震矩，由此求取近似辐射能量与地震矩的比值。再基于 CAP 法反演输出的震源机制解合成理论地震图，对理论波形重复相同计算流程，求解震源机制辐射花样对近似辐射能量/地震矩的调制系数。最后根据调制系数，对近似辐射能量进行校正，得到各次地震最终的辐射能量/地震矩的分布。为了更清晰地展示能量辐射效率的差异性并方便绘制图例，对矫正后的比值开展相应的比例变换，并将其定义为辐射效率指数，分别绘制出了此次地震序列的观测波形、理论波形以及校正后的能量辐射效率分布图(图 11)。结果显示，漾濞地震序列以上文定义的特殊事件为空间分界，断层北西段与南东段能量辐射效率存在显著差异：北西段辐射效率指数普遍不超过 0.2，而南东段指数大部分超过 0.2，部分可达 0.8 以上。这种分段式效率差异，应源于断层摩擦性质的空间差异性。

4　结论

(1)漾濞 M_S 6.4 地震序列的破裂方向呈现出明显的空间分段特征，以 2021-05-19 M_S 4.4 前震为界，两侧存在显著差异。序列北西段 5 次地震的发震断层均为北西走向；南东段 4 次地震的发震断层兼具北西与北东走向。其中，2021-05-21 M_S 5.6 最大前震与 2021-05-21 M_S 5.2 最大余震的破裂方向均为北东向，与漾濞 M_S 6.4 主震并非同一发震断层。结合地震重定位、大地测量学等已有研究结果，判定两者均发生于共轭断层，揭示了此次地震序列发震断层的复杂性。

(2)针对 2021-05-19 M_S 4.4 前震，相对质心破裂法测得其断层破裂方向为北西向，而震源时频特征法得到的破裂方向为南东向。结合多台站波形记录及 P 波振幅谱对比分析结果，推断该地震为频率依赖的双侧破裂地震。

(3)辐射效率估算结果显示，漾濞 M_S 6.4 地震序列能量辐射效率同样存在分段性差异：北西段辐射效率指数普遍不超过 0.2，南东段多数震例超过 0.2，部分震例可达 0.8 以上。综合破裂方向性、辐射效率特征及区域地质背景分析，推测该分段性差异主要由序列北西段与南东段的断层摩擦性质差异所致。



黄色五角星为地震序列特殊事件 2021-05-19 M_S 4.4; 红色虚线为破裂分段示意线, 用于直观划分北西与南东方向的破裂分段特征
a—观测地震波形能量辐射效率; b—理论地震波形能量辐射效率; c—校正后地震波形能量辐射效率

图 11 能量辐射效率图

Fig. 11 Energy radiation efficiency diagram

(a) Observed seismic waveform radiated energy efficiency; (b) Synthetic seismic waveform radiated energy efficiency; (c) Corrected seismic waveform radiated energy efficiency

The yellow five-pointed star represents the special event 2021-05-19 M_S 4.4 in the earthquake sequence; the red dashed line is a schematic line for rupture segmentation, used to visually delineate the rupture segmentation characteristics in the northwest and southeast directions

致谢：感谢审稿人的宝贵意见；感谢国家地震科学数据中心提供地震波形数据；感谢中国地震局地球物理研究所主动源团队提供的短周期台阵数据。

附加材料：附图由作者提供，数据真实性由作者负责，在线查看网址：https://journal.geomech.ac.cn/cn/article/doi/10.12090/j.issn.1006-6616.2025183

作者贡献声明：何骁慧、周民婷负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；周民婷、刘智良参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；何骁慧、王伟涛参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: HE Xiaohui and ZHOU Minting conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; ZHOU Minting and LIU Zhiliang participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; HE Xiaohui and WANG Weitao were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

BOATWRIGHT J, 2007. The persistence of directivity in small earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 97(6): 1850-1861.

CALDERONI G, ROVELLI A, BEN-ZION Y, et al., 2015. Along-strike rupture directivity of earthquakes of the 2009 L'Aquila, central Italy, seismic sequence[J]. Geophysical Journal International, 203(1): 399-415.

CHANG Z F, CHANG H, ZANG Y, et al., 2016. Recent active features of Weixi-Qiaohou fault and its relationship with the Honghe fault[J]. Journal of Geomechanics, 22(3): 517-530. (in Chinese with English abstract)

CHEN J L, HAO J L, WANG Z, et al., 2022. The 21 May 2021 M_W 6.1 Yangbi earthquake: a unilateral rupture event with conjugately distributed aftershocks[J]. Seismological Research Letters, 93(3): 1382-1399.

DENG Q D, 2007. Map of active tectonics in China[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese with English abstract)

DUAN M Q, ZHAO C P, ZHOU L Q, et al., 2021. Seismogenic structure of the 21 May 2021 M_S6.4 Yunnan Yangbi earthquake sequence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(9): 3111-3125. (in Chinese with English abstract)

FAN W J, CUI X F, ZHAO X Y, 2022. Current state of tectonic stress in northwestern Yunnan and its relationship with earthquakes[J]. Acta Seismologica Sinica, 44(4): 632-643. (in Chinese with English abstract)

FAN W J, 2023. Evolutionary characteristics of the focal mechanism consistency parameter before the Yangbi M_S6.4 earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 43(1): 82-88. (in Chinese with English abstract)

GAO J Y, LI Y H, WANG Z S, et al., 2022. Crustal velocity structure of the southeastern Tibetan Plateau and its geological implications for the Yunnan Yangbi M_S6.4 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(2): 604-619. (in Chinese with English abstract)

GOEBEL T H W, BRODSKY E E, DRESEN G, 2023. Fault roughness promotes earthquake-like aftershock clustering in the lab[J]. Geophysical Research Letters, 50(8): e2022GL101241.

GONG W Z, YE L L, QIU Y X, et al., 2022. Rupture directivity of the 2021 M_W 6.0 Yangbi, Yunnan earthquake[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127(9): e2022JB024321.

HE X H, NI S D, LIU J, 2015. Rupture directivity of the August 3rd, 2014

Ludian earthquake (Yunan, China)[J]. Science China Earth Sciences, 58(5): 795-804.

HE X H, ZHAN Z W, ZHANG P Z, et al., 2018. Rupture directivity of the 18 April 2008 Mt. Carmel, Illinois, earthquake from modeling of local seismic waveforms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 108(6): 3278-3288.

HU J, ZHAO T, BAI C Y, et al., 2021. Three-dimensional P and S wave velocity structure and earthquake relocation of the May 21, 2021 Yangbi M_S6.4 source region[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(12): 4488-4509. (in Chinese with English abstract)

International Earthquake Science Data Center. Broadband Seismic Station Data of the 2021 Yangbi M_S 6.4 Earthquake Sequence[DS]. Beijing: International Data Center for Earthquake Science, 2021. DOI:10.11998/IESDC

JI Z W, CHEN X L, ZHANG B, 2022. Preliminary finite difference simulation of long-period strong ground motions for the Yangbi M_S6.4 earthquake[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 53(1): 85-91. (in Chinese with English abstract)

KANAMORI H, MORI J, HAUKSSON E, et al., 1993. Determination of earthquake energy release and M_L using TERRAscope[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 83(2): 330-346.

KANEKO Y, SHEARER P M, 2014. Seismic source spectra and estimated stress drop derived from cohesive-zone models of circular subshear rupture[J]. Geophysical Journal International, 197(2): 1002-1015.

KANEKO Y, SHEARER P M, 2015. Variability of seismic source spectra, estimated stress drop, and radiated energy, derived from cohesive-zone models of symmetrical and asymmetrical circular and elliptical ruptures[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(2): 1053-1079.

LEI X L, WANG Z W, MA S L, et al., 2021. A preliminary study on the characteristics and mechanism of the May 2021 M_S6.4 Yangbi earthquake sequence, Yunnan, China[J]. Acta Seismologica Sinica, 43(3): 261-286. (in Chinese with English abstract)

LI C Y, ZHANG J Y, WANG W, et al. The seismogenic fault of the 2021 Yunnan Yangbi M_S 6.4 earthquake [J]. Seismology and Geology, 43(3): 706-721.(in Chinese with English abstract)

LI D H, DING Z F, WU P P, et al., 2021. The characteristics of crustal structure and seismogenic background of Yangbi M_S6.4 earthquake on May 21, 2021 in Yunnan Province, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(9): 3083-3100. (in Chinese with English abstract)

LI X Y, LI S Y, GAO Y, et al., 2024. Advancements in deep tectonics and dynamic mechanisms beneath the eastern Tibetan Plateau: inspirations from the 9th and 10th WTGTP workshops[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(2): 205-216. (in Chinese with English abstract)

LIU M, LI H Y, LI L, et al., 2022. Multistage nucleation of the 2021 Yangbi M_S 6.4 earthquake, Yunnan, China and its foreshocks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127(5): e2022JB024091.

LIU M, TAN Y J, GUO H, et al., 2025. Fluids and fault structures underlying the complex foreshock sequence of the 2021 Mw 6.1 Yangbi earthquake[J]. Earth and Planetary Science Letters, 651: 119173.

LIU W, YAO H J, WEI S J, 2021. Frequency-dependent rupture characteristics of the 30 October 2016 Mw 6.5 Norcia, Italy earthquake inferred from joint multi-scale slip inversion[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(5): e2020JB020706.

LONG F, QI Y P, YI G X, et al., 2021. Relocation of the M_S6.4 Yangbi earthquake sequence on May 21, 2021 in Yunnan Province and its seismogenic structure analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(8): 2631-2646. (in Chinese with English abstract)

QIN L B, CHEN W W, NI S D, et al., 2014. A method of resolving earthquake rupture directivity with relative centroid location and it's application to the 2008 Yingjiang M_S6.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(10): 3259-3269. (in Chinese with English abstract)

SUN Q S, ZHANG W H, GUO X Y, et al., 2023. Preliminary study of seismogenic structure and rupture process of the Yangbi M_S 6.4 earthquake sequence from May 2021[J]. ActaGeologicaSinica, 97(2): 349-363. (in Chinese with English abstract)

TIAN J H, GAO Y, LUO Y, 2023. Deep seismogenic tectonics of Yangbi M_S6.4 on 21 may 2021 in the SE margin of the Tibetan Plateau from earthquake sequence relocation, stress field and seismic anisotropy[J]. Tectonophysics, 851: 229768.

WANG G M, WU Z H, PENG G L, et al., 2021. Seismogenic fault and it's rupture characteristics of the 21 May, 2021 Yangbi M_S6.4 earthquake: analysis results from the relocation of the earthquake sequence[J]. Journal of Geomechanics, 27(4): 662-678. (in Chinese with English abstract)

WANG Y, HU S Q, HE X H, et al., 2021. Relocation and focal mechanism solutions of the 21 May 2021 M_S6.4 Yunnan Yangbi earthquake sequence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(12): 4510-4525. (in Chinese with English abstract)

XU X W, ZHANG P Z, WEN X Z, et al., 2005. Features of active tectonics and recurrence behaviors of strong earthquakes in the western Sichuan Province and its adjacent regions[J]. Seismology and Geology, 27(3): 446-461. (in Chinese with English abstract)

YAN K, WANG W J, PENG F, et al., 2022. The seismogenic structures and migration characteristics of the 2021 Yangbi M6.4 earthquake sequence in Yunnan, China[J]. Science China Earth Sciences, 65(8): 1522-1537.

YANG J Y, WEN Y M, XU C J, 2021. The 21 May 2021 M_S6.4 Yangbi (Yunnan) earthquake: a shallow strike-slip event rupturing in a blind fault[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(9): 3101-3110. (in Chinese with English abstract)

YANG M, WANG H W, WEN R Z, et al., 2023. Study on the rupture directivity of the 2021 Yangbi earthquake sequence[J]. Acta Seismologica Sinica, 45(5): 836-848. (in Chinese with English abstract)

YAO H J, GERSTOFT P, SHEARER P M, et al., 2011. Compressive sensing of the Tohoku-Oki Mw 9.0 earthquake: Frequency-dependent rupture modes[J]. Geophysical Research Letters, 38(20): L20310.

YIN J X, YAO H J, YANG H F, et al., 2017. Frequency-dependent rupture process, stress change, and seismogenic mechanism of the 25 April 2015 Nepal Gorkha M_W7.8 earthquake[J]. Science China Earth Sciences, 60(4): 796-808.

ZHA X, FU R S, DAI Z Y, et al., 2009. Applying InSAR technique to accurately relocate the epicentre for the 1999 M_S = 5.6 Kuqa earthquake in Xinjiang Province, China[J]. Geophysical Journal International, 176(1): 107-112.

ZHANG K L, GAN W J, LIANG S M, et al., 2021. Coseismic displacement

and slip distribution of the 2021 May 21, M_S6.4, Yangbi Earthquake derived from GNSS observations[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(7): 2253-2266. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG G M, et al., 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(2): 13-24.

ZHAO B, GAO Y, MA Y L, 2022. Relocations, focal mechanisms and stress inversion of the May 21th 2021 Yangbi M_S6.4 earthquake sequence in Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(3): 1006-1020. (in Chinese with English abstract)

ZHAO L, LUO Y, LIU T Y, et al., 2013. Earthquake focal mechanisms in Yunnan and their inference on the regional stress field[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 103(4): 2498-2507.

ZHOU Y J, REN C M, GHOSH A, et al., 2022. Seismological characterization of the 2021 Yangbi foreshock-mainshock sequence, Yunnan, China: more than a triggered cascade[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127(8): e2022JB024534.

International Data Center for Earthquake Science. Broadband Seismic Station Data of the 2021 Yangbi MS 6.4 Earthquake Sequence[DS]. Beijing: International Data Center for Earthquake Science, 2021.

LI C Y, ZHANG J Y, WANG W, et al. The seismogenic fault of the 2021 Yunnan Yangbi MS 6.4 earthquake [J]. Seismology and Geology, 43(3): 706— 721.

附中文参考文献

常祖峰, 常昊, 臧阳, 等, 2016. 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, 22(3): 517-530.

邓起东, 2007. 中国活动构造图(1: 400 万)[M]. 北京: 地震出版社.

地震科学国际数据中心. 2021 年漾濞 MS 6.4 地震序列宽频地震台站数据[DS/OL]. 北京: 地震科学国际数据中心, 2021.

段梦乔, 赵翠萍, 周连庆, 等, 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 M_S6.4 地震序列发震构造[J]. 地球物理学报, 64(9): 3111-3125.

樊文杰, 崔效锋, 赵小艳, 2022. 滇西北地区现今构造应力状态及其与地震的关系[J]. 地震学报, 44(4): 632-643.

樊文杰, 2023. 漾濞 M_S6.4 地震前震源机制一致性参数演化特征[J]. 大地测量与地球动力学, 43(1): 82-88.

高家乙, 李永华, 王志铄, 等, 2022. 青藏高原东南缘地壳速度结构及云南漾濞 M_S6.4 地震深部孕震环境[J]. 地球物理学报, 65(2): 604-619.

胡景, 赵韬, 白超英, 等, 2021. 2021 年 5 月 21 日漾濞 M_S6.4 地震震源区三维 P 和 S 波速度结构与地震重定位研究[J]. 地球物理学报, 64(12): 4488-4509.

纪志伟, 陈学良, 张波, 2022. 漾濞 M_S6.4 地震长周期强地震动的有限差分初步模拟[J]. 地球与行星物理论评, 53(1): 85-91.

雷兴林, 王志伟, 马胜利, 等, 2021. 关于 2021 年 5 月滇西漾濞 M_S6.4 地震序列特征及成因的初步研究[J]. 地震学报, 43(3): 261-286.

李传友, 张金玉, 王伟, 等, 2021. 2021 年云南漾濞 6.4 级地震发震构造分析[J]. 地震地质. 43(3): 706.

李大虎, 丁志峰, 吴萍萍, 等, 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 M_S6.4 地震震区地壳结构特征与孕震背景[J]. 地球物理学报, 64(9): 3083-3100.

李心怡, 李抒予, 高原, 等, 2024. 青藏高原东部深部构造与动力学机制研究进展: 来自第 9 届与第 10 届 WTGTP 研讨会的启示[J]. 地球与行星物理论评, 55(2): 205-216.

龙锋, 祁玉萍, 易桂喜, 等, 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 M_S6.4 地震序列重新定位与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 64(8): 2631-2646.

秦刘冰, 陈伟文, 倪四道, 等, 2014. 基于相对质心震中的地震破裂方向性测定方法研究: 以 2008 年云南盈江 M_S6.0 地震为例[J]. 地球物理学报, 57(10): 3259-3269.

孙庆山, 张伟恒, 郭忻怡, 等, 2023. 2021 年 5 月云南漾濞 M_S6.4 地震序列发震构造及破裂过程初探[J]. 地质学报, 97(2): 349-363.

王光明, 吴中海, 彭关灵, 等, 2021. 2021 年 5 月 21 日漾濞 M_S6.4 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, 27(4): 662-678.

王月, 胡少乾, 何骁慧, 等, 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 6.4 级地震序列重定位及震源机制研究[J]. 地球物理学报, 64(12): 4510-4525.

徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 等, 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型[J]. 地震地质, 27(3): 446.

杨九元, 温扬茂, 许才军, 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 M_S6.4 地震: 一次破裂在隐伏断层上的浅源走滑事件[J]. 地球物理学报, 64(9): 3101-3110.

杨苗, 王宏伟, 温瑞智, 等, 2023. 2021 年漾濞地震序列破裂方向性研究[J]. 地震学报, 45(5): 836-848.

张克亮, 甘卫军, 梁诗明, 等, 2021. 2021 年 5 月 21 日 M_S6.4 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, 64(7): 2253-2266.

张培震, 邓起东, 张国民, 等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D 辑), 33(S1): 12-20.

赵博, 高原, 马延路, 2022. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 M_S6.4 地震序列重新定位、震源机制及应力场反演[J]. 地球物理学报, 65(3): 1006-1020.