



维西—乔后断裂带及其周边地区震群和前震序列活动特征

王光明 欧阳鑫 刘自凤 彭关灵 姜金钟

Characteristics of earthquake swarms and foreshock sequences in Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas

Wang Guangming, Ouyang Xin, Liu Zifeng, Peng Guanling, Jiang Jinzhong

引用本文:

王光明, 欧阳鑫, 刘自凤, 彭关灵, 姜金钟. 2024. 维西—乔后断裂带及其周边地区震群和前震序列活动特征. *地震学报*[J], 46(2): 192–207. DOI: 10.11939/jass.20230123

Wang G M, Ou Y X, Liu Z F, Peng G L, Jiang J Z. 2024. Characteristics of earthquake swarms and foreshock sequences in Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas. *Acta Seismologica Sinica*[J], 46(2): 192–207. DOI: 10.11939/jass.20230123

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20230123>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

2017年西藏米林 M_S 6.9地震余震序列重定位和 b 值时空分布特征

Relocation of the aftershock sequence of Milin M_S 6.9 earthquake in 2007 and spatio-temporal variation characteristics of b -value

地震学报. 2019, 41(2): 169–180 <https://doi.org/10.11939/jass.20180077>

震源机制一致性的显著性检验方法

Significance test of focal mechanism consistency: Taking the foreshock sequence of the M_S 5.4 Xiuyan earthquake on November 29, 1999 as an example

地震学报. 2019, 41(6): 709–722 <https://doi.org/10.11939/jass.20190045>

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

Microseismic detection and relocation of the 2017 M_S 4.8 and M_S 5.1 Yangbi earthquake sequence, Yunnan

地震学报. 2020, 42(5): 527–542 <https://doi.org/10.11939/jass.20190161>

关于2021年5月滇西漾濞 M_S 6.4地震序列特征及成因的初步研究

A preliminary study on the characteristics and mechanism of the May 2021 M_S 6.4 Yangbi earthquake sequence, Yunnan, China

地震学报. 2021, 43(3): 261–286 <https://doi.org/10.11939/jass.20210100>

浙江珊溪水库2014年震群活动发震机理研究

Investigation on the seismogenic mechanism of the 2014 earthquake swarm in Shanxi reservoir, Zhejiang Province

地震学报. 2017, 39(5): 648–658 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.002>

2019年四川长宁 M_S 6.0地震序列重定位和震源特征分析

Relocation and source characteristics of the 2019 Changning M_S 6.0 earthquake sequence

地震学报. 2020, 42(4): 377–391 <https://doi.org/10.11939/jass.20190170>

王光明, 欧阳鑫, 刘自凤, 彭关灵, 姜金钟. 2024. 维西一乔后断裂带及其周边地区震群和前震序列活动特征. 地震学报, 46(2): 192-207. doi: 10.11939/jass.20230123.
Wang G M, Ou Y X, Liu Z F, Peng G L, Jiang J Z. 2024. Characteristics of earthquake swarms and foreshock sequences in Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas. Acta Seismologica Sinica, 46(2): 192-207. doi: 10.11939/jass.20230123.

维西一乔后断裂带及其周边地区震群和 前震序列活动特征*

王光明^{1,2)} 欧阳鑫¹⁾ 刘自凤¹⁾ 彭关灵¹⁾ 姜金钟^{1,2)}

1) 中国昆明 650224 云南省地震局

2) 中国昆明 650201 中国地震局昆明地震预报研究所

摘要 使用云南地震台网 2009—2021 年的地震目录和波形数据, 采用双差定位方法、基于 P 波初动极性和 S/P 振幅比的 HASH 方法和最大似然法等, 获取了维西一乔后断裂带及附近地区 $M_L \geq 4.0$ 震群和前震序列精确的震源位置、震源机制解、视应力和 b 值等地震活动参数, 对比分析了维西一乔后断裂带及其周边震群及前震序列的活动特征. 结果显示: 除前震序列频次呈现出反大森定律外, 前震序列与普通震群在空间分布、震源机制一致性、视应力和 b 值等单一参数方面并无明显的差异; 但前震序列同时具备震中优势分布方向与区域主要构造展布方向一致、震源机制一致性较好、低 b 值等特征, 建议综合使用时空演化特征、震群参数识别前震序列.

关键词 前震序列 震群 重定位 震源机制一致性 b 值

doi: 10.11939/jass.20230123 中图分类号: P315.75 文献标识码: A

Characteristics of earthquake swarms and foreshock sequences in Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas

Wang Guangming^{1,2)} Ouyang Xin¹⁾ Liu Zifeng¹⁾ Peng Guanling¹⁾ Jiang Jinzhong^{1,2)}

1) Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China

2) Kunming Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Kunming 650201, China

Abstract: The 2021 $M_S 6.4$ Yangbi earthquake in the Weixi-Qiaohou fault zone is preceded by a prominent foreshock activity, and earthquake swarms are frequently recorded in this area. Thus, it provides a valuable opportunity to study the differences between foreshock sequences and ordinary earthquake swarms and to develop recognition features of foreshocks.

Referring to the specific definition of earthquake swarms in previous studies and the actual seismicity characteristics of the Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas, eight earthquake swarms and two foreshock sequences involving $M_L \geq 4.0$ earthquakes are selected based on the following criteria: ① The epicenters of the earthquake swarm are distributed in a

* 基金项目 震情跟踪定向工作任务(2022010105、2023010507)、国家重点研发计划(2021YFC3000705-08)、地震科技星火计划项目(XH24037YB)共同资助。
收稿日期 2023-09-30 收到初稿, 2024-01-05 决定采用修改稿。
作者简介 王光明, 硕士, 工程师, 主要从事地震重定位、地震活动性方面的研究,
e-mail: gmwang@whu.edu.cn



rectangular area of not more than 2500 km², and there is a clear boundary separated from the distribution of background earthquakes; ② The maximum daily frequency is not less than 3, and the total frequency is not less than 10; ③ The magnitude difference between the largest and second largest earthquakes $\Delta M_L \leq 1.6$; ④ If $M_L \geq 1.0$ earthquakes are not recorded for 15 consecutive days before and after the start and end of the earthquake sequence, the date of the first earthquake is the starting date of the earthquake sequence, and the date of the last earthquake is the ending date of the sequence. ⑤ For the foreshock sequence, the date of the first earthquake is the starting date of the sequence, and the date of the last earthquake before the main shock is the ending date of the sequence. First, we use the double-difference relocation algorithm to obtain precise relative locations of ten earthquake sequences. Secondly, we collect focal mechanism solutions of $M_L \geq 2.5$ earthquakes in these sequences from previous studies and calculate focal mechanism solutions of those missing important earthquakes by HASH. This study use the minimum 3-D rotation angle to present the focal mechanism consistency of the ten earthquake sequences. Thirdly, we calculate the apparent stress of $M_L \geq 3.0$ earthquakes of these sequences using waveform data provided by Yunnan Seismological Network. Finally, we apply the maximum likelihood method to calculate the b values of four earthquake sequences, while the other six sequences did not have enough earthquakes to obtain the b value.

Earthquake swarms and foreshock sequences are analyzed in detail based on spatio-temporal evolution characteristics, focal mechanism and apparent stress of larger earthquakes, and sequence b value. After analysis, we acquire the following characteristics of the earthquake swarms and the foreshock sequences located in the Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas: ① Before the occurrence of the mainshock, the frequency of the foreshock sequence shows a quiet-enhanced evolution characteristic, which is consistent with the anti-Omori law. However, ordinary earthquake swarms show different evolutionary characteristics, that is, rapid attenuation after the occurrence of the largest earthquake of the swarms. ② The epicenters of foreshock sequences show an obvious dominant distribution direction, which is consistent with the strike of the main active fault in the region, and the spatial distribution is relatively concentrated. The spatial distribution characteristics of earthquake swarms are inconsistent. There are both earthquake swarms with obvious dominant distribution direction and circular distribution. ③ The focal mechanism consistency of ten earthquake sequences is complicated. The focal mechanism solutions of the 2017 Yangbi earthquake swarm and the 2021 Yangbi foreshock sequence have good consistency, respectively. However, no stronger earthquake has occurred after the 2017 Yangbi earthquake swarm in the focal area of the swarm. ④ The apparent stress of earthquake swarms and foreshock sequences located in the Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas is the same as that in the northwest of Yunnan, and the apparent stress of the foreshock did not show a prominent characteristic. ⑤ The b values of earthquake swarms and foreshock sequences show that the Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas have a relatively lower b value. There is no significant difference in the b value between foreshock sequences and ordinary earthquake swarms.

In summary, there is no noticeable difference in spatial distribution, focal mechanism consistency, apparent stress, and b value between the foreshock sequences and the common earthquake swarms except for the anti-Omori law of frequency of the foreshock sequences. However, the foreshock sequences have the following three characteristics in spatial distribution and seismic parameters simultaneously: ① The dominant distribution direction of epicen-

ters is consistent with the strike of the main active fault in the region; ② The focal mechanism solutions of the sequence have good consistency; ③ The sequence has a lower b value. It is suggested that spatio-temporal evolution characteristics and seismicity parameters should be used together to identify foreshock sequences in the future.

Key words: foreshock; earthquake swarm; earthquake relocation; consistency of focal mechanism solutions; b -value

引言

全球很多大震发生前都伴随有前震活动,前震活动也是地震研究人员认为的最有效的短临预测指标之一(Jones, Molnar, 1979; Lippiello *et al.*, 2012; Wetzler *et al.*, 2023).然而,在大地震发生前,如何从背景地震活动中识别前震,至今仍是一个世界性的难题(赵小艳等, 2015; 薛艳等, 2021; Wetzler *et al.*, 2023).

为了提高对地震发生机理的认识,进行具有明显减灾实效的地震短临预测预报工作,研究人员对前震现象开展了持续全面的研究(Gomberg, 2018),结果显示前震具有以下特征:①前震序列的地震活动速率呈反大森(Omori)定律的加速趋势(Kagan, Knopoff, 1978; Yabe, Ide, 2018);②相较于余震,前震的震源机制解与主震更加相似,一致性更好(Chen *et al.*, 1999; 郭祥云等, 2019; Wilding, Ross, 2022);③前震具有向主震震中迁移的特征(Kato, Igarashi, 2012; 邓世广, 蒋海昆, 2022; 闫坤等, 2023);④相比于余震和背景地震,前震序列的 b 值更低(Gulia, Wiemer, 2019; 薛艳等, 2021);⑤前震序列的应力降或视应力与背景地震不同(Chen, Shearer, 2013).可见,前震序列在时空分布、震源机制一致性、视应力和 b 值等方面存在与普通震群不同的特征.

2021年5月21日漾濞 $M_S6.4$ 地震发生前,震源区曾连续发生多次 $M_L \geq 4.0$ 地震,形成 $M_L \geq 4.0$ 震群.此次漾濞 $M_S6.4$ 地震所在的维西一乔后断裂带及附近地区,2009年以来发生多次 $M_L \geq 4.0$ 震群活动.在漾濞 $M_S6.4$ 地震的震情跟踪过程中,震源区周边历史震群序列参数结果对震前 $M_L \geq 4.0$ 震群活动性质的判断造成影响,导致未能正确判断漾濞 $M_S6.4$ 地震序列的发展趋势(付虹等, 2021).漾濞 $M_S6.4$ 地震发生后,研究人员采用多种方法从不同的方面对该地震的前震序列进行了研究,如前震序列时空演化特征(雷兴林等, 2021; 龙锋等, 2021; 王光明等, 2021b; 姜金钟等, 2021; 王月等, 2021; Yang *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2021)、震源机制解(段梦乔等, 2021; 郭祥云等, 2021; 刘俊清等, 2021; Li *et al.*, 2022; 赵博等, 2022)、地震成核过程(Liu *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2022)等,得到如下认识:①漾濞前震序列的时空演化过程主要分为三个阶段;②漾濞前震序列的震源机制一致性较好;③漾濞前震序列无法使用单一的级联破裂(cascade-up)或预滑(pre-slip)模型进行解释,是多种机制共同作用的结果.

有关2021年漾濞前震序列的研究主要集中在序列本身及其时空演化机理,关于前震序列与周边震群差异的分析相对较少.鉴于此,本研究拟基于云南地震台网地震目录和事件波形数据,采用双差定位方法、基于P波初动极性和S/P振幅比的HASH方法、最小空间旋转角、最大似然法等方法获取维西一乔后断裂带及附近地区 $M_L \geq 4.0$ 震群序列精确的震源位置和多种震源参数,并结合震群 b 值等地震活动参数,对比分析2021年漾濞 $M_S6.4$ 地震前震序列与其周边 $M_L \geq 4.0$ 震群的活动特征,以期寻找前震序列及其相同构造区普通震群的异同

点, 总结维西—乔后断裂带及周边地区前震震群的识别特征。

1 震群筛选

相较于余震序列, 前震序列的识别因依赖于研究区域最小完整性震级而更加复杂 (Wetzler *et al.*, 2023). 利用云南地震台网 2009—2021 年的地震目录, 首先使用 Zmap 软件计算维西—乔后断裂带及周边地区最小完整性震级 M_C 随时间的演化特征 (图 1). 结果显示该地区 2009 年至 2017 年 M_C 值相对稳定, 约为 1.2; 2018 年至 2021 年 M_C 值明显降低, 约为 1.0. 然后参考陆远忠等 (1984) 和 Schneider 等 (2023) 对震群的具体定义, 根据维西—乔后断裂带及周边地区实际的地震活动特征, 挑选 2009 年以来该地区含有 $M_L \geq 4.0$ 地震的震群活动. 具体挑选准则如下:

1) 震群的震中分布在不大于 2500 km^2 的矩形区域内, 而且与外围地震的分布有较为明显的界限, 最大日频次不少于 3, 总频次不少于 10;

2) 震群中最大地震震级与次大地震震级差 $\Delta M_L \leq 1.6$;

3) 震群开始前和结束后连续 15 天内未记录到 $M_L \geq 1.0$ 地震, 则以第一次地震所在日为震群序列的起始日, 以最后一次地震所在日为序列的终止日;

4) 对于前震序列, 以第一次地震所在日为震群序列的起始日, 以主震前最后一次地震所在日期为序列的终止日。

中强地震序列分类标准中, 将最大地震震级与次大地震震级之差 $\Delta M_L < 0.6$ 的序列称为震群型序列 (蒋海昆等, 2006). 中小地震震群研究中, 将最大地震震级与次大地震震级之差 $\Delta M_L \leq 1.1$ 作为震群的判定标准 (曹凤娟等, 2015). 由于研究区域相对较小, 研究时段较短, 为获取更多样本, 本文将震群最大地震震级与次大地震震级之差设为 $\Delta M_L \leq 1.6$.

按照上述标准, 在维西—乔后断裂带及周边地区共找到 10 组含有 $M_L \geq 4.0$ 地震的震群序列, 分别为: 2009 年 4 月 14 日洱源 $M_S 4.4$ 震群、2010 年 1 月 1 日剑川 $M_S 4.6$ 震群、2011 年 6 月 22 日漾濞 $M_S 3.7$ 震群、2015 年 6 月 5 日洱源 $M_S 3.6$ 震群、2016 年 2 月 8 日洱源 $M_S 4.5$ 震群、2016 年 11 月 17 日漾濞 $M_S 4.4$ 震群、2017 年 3 月 27 日漾濞 $M_S 5.1$ 震群、2019 年 11 月 25 日洱源 $M_S 4.3$ 地震、2021 年 3 月 1 日洱源 $M_S 3.8$ 震群、2021 年 5 月 18 日漾濞前震序列 (后文以年份和发震地点简称). 上述 10 组震群的空间分布如图 2 所示. 10 组震群中, 有两组震群后续在原震区发生更大地震, 属于前震震群或序列 (付虹等, 2021), 分别为 2016 年洱源震群 (主震为 2016 年 5 月 18 日云龙 $M_S 5.0$ 地震, 最大余震与主震相隔 100 天) 和 2021 年漾濞震群 (主震为 2021 年 5 月 21 日漾濞 $M_S 6.4$ 地震, 最大余震与主震相隔 27 分钟)。

维西—乔后断裂带及周边区域的 10 组震群的详细信息列于表 1 (其中地震数量为地震目录中所有符合条件地震的次数), 其持续时间存在较大差异, 处于 3—107 天之间, 持续时间最短的是 2021 年漾濞震群, 最长的是 2016 年洱源震群, 其余震群持续时间主要在 1 个月左

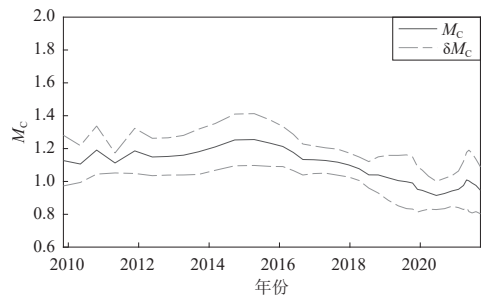


图 1 维西—乔后断裂带及周边地区最小完整性震级随时间变化图

Fig. 1 Variation of M_C with time in Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas

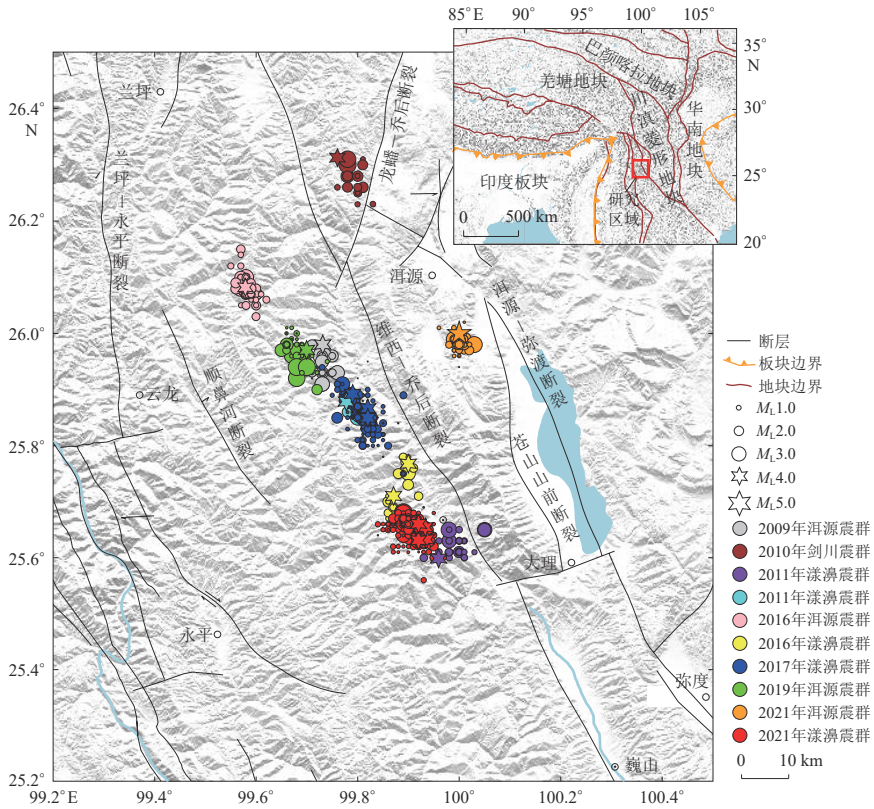


图 2 维西—乔后断裂带周边地区 $M_L \geq 4.0$ 震群分布及研究区周边地块分布

图中断层和活动地块边界数据分别来自安晓文和常祖峰(2018)和张培震等(2003), 地形数据引自 Tozer 等(2019)

Fig. 2 Distribution of $M_L \geq 4.0$ earthquake swarms in Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding blocks
Geological data and boundary data of active-tectonic block are cited from An and Chang (2018) and Zhang *et al* (2003), topographic relief data is from Tozer *et al* (2019)

表 1 维西—乔后断裂带及周边地区 10 组震群基本信息

Table 1 Information of ten earthquake swarms in Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas

震群	最大震级	地震次数	持续时间/d	最大与次大地震的震级差 ΔM_L
2009年洱源震群	4.4	27	5	0.5
2010年剑川震群	4.6	23	27	1.6
2011年漾濞震群	3.7	39	41	0.9
2015年洱源震群	3.6	13	17	0.9
2016年洱源震群	4.5	159	107	0.4
2016年漾濞震群	4.4	24	20	0.1
2017年漾濞震群	5.1	216	45	0.4
2019年洱源震群	4.3	109	22	1.2
2021年洱源震群	3.8	72	12	0.9
2021年漾濞震群	5.6	322	3	0.2

右. 除 2010 年剑川震群、2021 年洱源震群外, 其余 8 组震群均发生在维西—乔后断裂带西侧. 本研究收集了上述 10 组震群序列的地震目录和事件波形数据, 并对其进行格式转化、解

压、滤波等预处理.

2 前震序列和震群对比分析

2.1 震群序列时间演化特征

维西—乔后断裂带及周边地区 10 组震群的 $M-t$ 图和累积频次如图 3 所示, 这些震群在

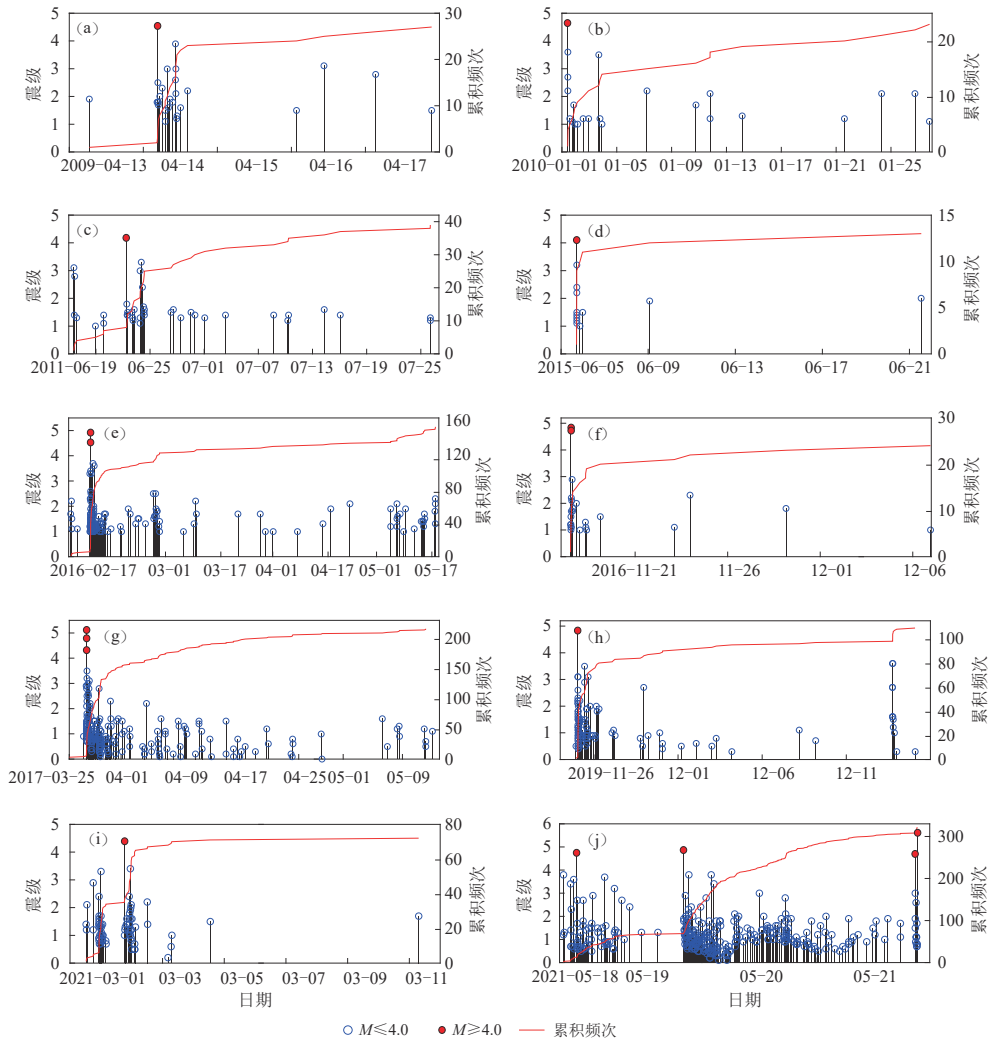


图 3 维西—乔后断裂带及周边 10 组震群 $M-t$ 图(左)和累积频次图(右)

(a) 2009 年洱源震群; (b) 2010 年剑川震群; (c) 2011 年漾濞震群; (d) 2015 年洱源震群; (e) 2016 年洱源震群;
(f) 2016 年漾濞震群; (g) 2017 年漾濞震群; (h) 2019 年洱源震群; (i) 2021 年洱源震群; (j) 2021 年漾濞震群

Fig. 3 $M-t$ diagram (a) and cumulative frequency diagram (b) of 10 earthquake swarms in Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding area

(a) 2009 Eryuan earthquake swarm; (b) 2010 Jianchuan earthquake swarm; (c) 2011 Yangbi earthquake swarm; (d) 2015 Eryuan earthquake swarm; (e) 2016 Eryuan earthquake swarm; (f) 2016 Yangbi earthquake swarm; (g) 2017 Eryuan earthquake swarm; (h) 2019 Eryuan earthquake swarm; (i) 2021 Eryuan earthquake swarm; (j) 2021 Yangbi earthquake swarm

首发地震、衰减特征等方面呈现出多样性的特征：① 3 组震群的首发地震为最大地震，其余 7 组震群的最大地震并非首发地震，其中包括两个前震震群；② 10 组震群中，7 组在最大地震发生后迅速衰减，后续地震活动在震级和累积频次方面无明显起伏，而其余 3 组震群衰减相对较慢，而且出现多次起伏活动，其中：2016 年洱源震群在最大地震发生 20 天后出现第一次起伏活动，之后相对平静，但是在 $M_S5.0$ 主震地震发生前出现累积频次上升的现象；2021 年漾濞震群活动呈现出明显的分段特征(龙锋等, 2021; Zhou *et al.*, 2022)，而且地震频次、震级显示出逐渐上升的演化特征；与两次前震震群相比，2019 年洱源震群最大地震发生后序列迅速衰减，仅在 12 月 13 日出现一次起伏活动。

为详细分析主震发生前的震群序列随时间的演化特征，本文绘制了 2016 年洱源震群序列 5 月 1—18 日和 2021 年漾濞地震序列 5 月 21 日的地震频次图(图 4)。如图所示，主震发生前 2016 年洱源震群和 2021 年漾濞震群的地震频次均呈现加速趋势，符合前震累积个数整体上满足反大森定律的特征(Kagan, Knopoff, 1978; Yabe, Ide, 2018)。

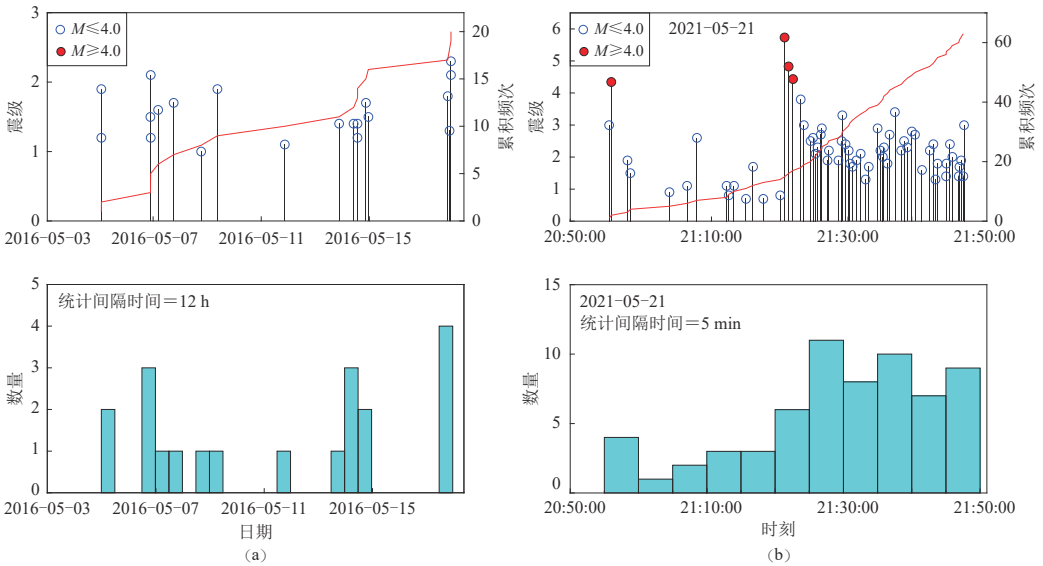


图 4 2016 年云龙 $M_S5.0$ 地震(a)和 2021 年漾濞 $M_S6.4$ 地震(b)前震 $M-t$ 图(上)和频度图(下)

Fig. 4 $M-t$ diagram (upper panels) and frequency diagram (lower panels) of foreshock sequences of 2016 Yunlong $M_S5.0$ (a) and 2021 Yangbi $M_S6.4$ earthquake (b)

2.2 震群精定位

使用双差定位方法对维西—乔后断裂带及周边地区 10 组震群进行重新定位(Waldhauser, Ellsworth, 2000)，获得了 10 组震群序列精确的相对位置。定位采用杨军等(2015)基于云南地区人工地震测深和速度结构反演给出的一维速度模型。由于各震群之间地震数量差异较大，定位过程中通过设置不同的参数求取最优解。得益于维西—乔后断裂带及周边较强的地震监测能力(王光明等, 2021a)，重定位后震群序列的平均定位误差相对较小，东西向、南北向、深度向的定位误差分别为 0.32 km, 0.43 km 和 1.71 km。重定位后各震群震中分布和较大地震震源机制解(见 2.3 节)如图 5 所示。

重定位后，2010 年剑川震群、2011 年漾濞震群和 2021 年洱源震群的震中呈近圆形分

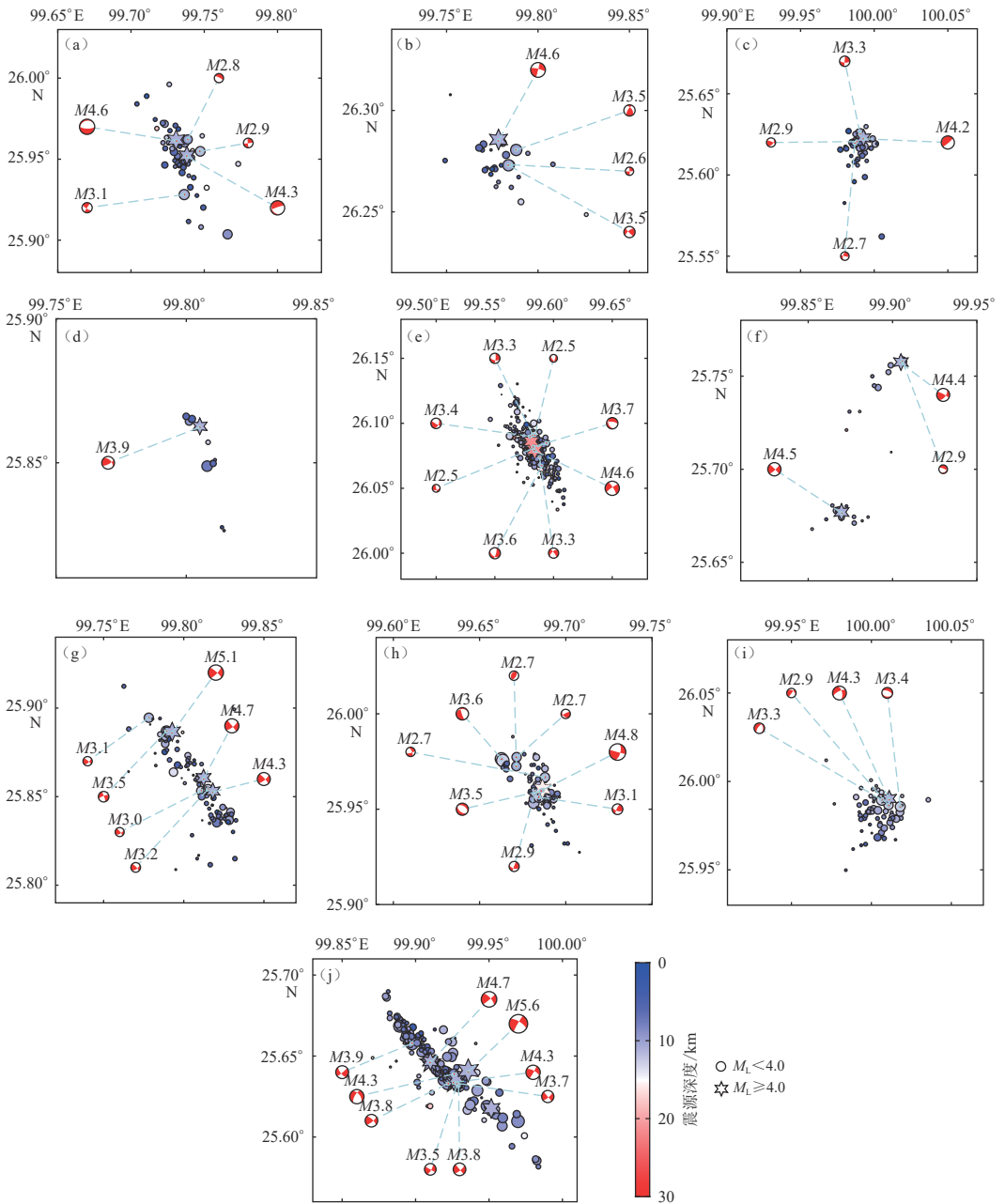


图 5 震群重定位后震中分布

(a) 2009 年洱源震群; (b) 2010 年剑川震群; (c) 2011 年漾濞震群; (d) 2015 年洱源震群; (e) 2016 年洱源震群;
 (f) 2016 年漾濞震群; (g) 2017 年漾濞震群; (h) 2019 年洱源震群; (i) 2021 年洱源震群; (j) 2021 年漾濞震群

Fig. 5 Epicenter distribution of earthquake swarms after relocation

(a) 2009 Eryuan earthquake swarm; (b) 2010 Jianchuan earthquake swarm; (c) 2011 Yangbi earthquake swarm; (d) 2015 Eryuan earthquake swarm; (e) 2016 Eryuan earthquake swarm; (f) 2016 Yangbi earthquake swarm; (g) 2017 Eryuan earthquake swarm; (h) 2019 Eryuan earthquake swarm; (i) 2021 Eryuan earthquake swarm; (j) 2021 Yangbi earthquake swarm

布,最大地震位于圆形边界处,圆形直径约为2—3 km,远大于水平向定位误差.三组震群序列中最大地震的震源机制解节面与维西—乔后断裂带走向存在明显差异(图5b, c, i).基于震中分布特征和最大地震震源机制解分析,上述三组震群的发震构造可能并不是北西向的维西—乔后断裂带.研究认为震群活动主要由外部过程驱动,如流体流动或无震蠕变(Llenos, van der Elst, 2019).Liu等(2023)对云龙震群的研究显示,流体作用可能对该区域的地震活动具有广泛的影响.据此分析,上述三组震群活动可能主要受到深部流体活动的驱动,导致震群震中呈近圆形分布.

2016年漾濞震群的震中呈围绕两个 $M_L \geq 4.0$ 地震分布的特征,其连线为北东向,与维西—乔后断裂带走向垂直(图5f).值得注意的是,两个 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解不同,而且两丛地震的分布特征也不同: $M_S 4.4$ 地震为走滑型兼具正断分量, $M_S 4.5$ 地震为高角度走滑型地震; $M_S 4.4$ 地震周边的中小地震向南西方向呈线性分布, $M_S 4.5$ 地震周边的中小地震无显著的线性分布特征.根据小震空间分布特征及震源机制解分析,尽管两次 $M_L \geq 4.0$ 地震的发震时刻相近(相隔12 min),但是它们的发震构造明显不同, $M_S 4.4$ 地震的发震断层可能是北东向具有正断分量的走滑断层.

其余6组震群震中呈椭圆形或长方形分布,其长轴方向为北西—南东向,与维西—乔后断裂带走向近乎平行,最大地震位于椭圆长轴上(图5a, d, e, g, h, j).除此之外,北西—南东向分布的6组震群均位于维西—乔后断裂带西侧(图2),自北向南逐渐形成一条北西向的小震活跃带.除2009年洱源震群外,其余5组震群最大地震的震源机制解均存在北西—南东走向的节面,与震中分布特征吻合,表明这些震群可能主要受到维西—乔后断裂带或其北西向分支断裂控制.

重定位后震群序列的空间展布特征显示,前震序列(2016年洱源震群和2021年漾濞震群)震中均呈北西—南东向分布,与所在区域的主要活动断裂走向一致.然而这种空间分布特征并非前震序列独有,处于相同构造区的震群序列也会呈现出类似的活动特征,如2009年洱源震群、2017年漾濞震群等.

2.3 震源机制一致性分析

收集整理维西—乔后断裂带及周边地区10组震群序列中 $M_L \geq 2.5$ 地震的震源机制解数据(郭祥云等, 2022),并使用HASH方法计算缺少的相对重要地震的震源机制解,最终得到了53个 $M_L \geq 2.5$ 地震的震源机制解结果,如图5所示.由于不同震群得到的震源机制解数量不同,因此使用对样本量无特殊要求的空间最小旋转角来表征震源机制一致性(万永革, 2019).以震群第一个震源机制解为基准,计算后续地震与该地震震源机制解之间的最小空间旋转角.由于2015年洱源震群仅得到 $M_S 3.9$ 地震的震源机制解,因此无法评估该震群的震源机制一致性.维西—乔后断裂带及周边地区其余9组震群的最小空间旋转角计算结果如图6所示.

维西—乔后断裂带及周边地区的震群中,7组震群震源机制解最小空间旋转角 $>40^\circ$,震源机制一致性差;2017年和2021年漾濞震群震源机制解最小空间旋转角 $\leq 40^\circ$,震源机制一致性好(万永革, 2019).值得注意的是,作为前震序列的2016年洱源震群,其震源机制一致性较差,而2017年漾濞震群并非前震序列,但是其震源机制一致性较好.已有研究表明(Jiang et al, 2019; 王光明等, 2021a),2016年洱源震群的发震构造与后续主震的发震构造共轭,导致震群中较大地震受两条发震断层控制,这可能是该震群震源一致性差的主要原因.

Jones (1985) 研究结果显示, 非前震序列同样可能存在相似的震源机制解, 2017 年漾濞震群震源机制一致性较好的现象与该研究吻合. 据此分析, 震群的震源机制一致性较好, 可能并不是能够判断序列为前震的唯一条件.

2.4 视应力计算

视应力 σ_a 的定义式为 (Wyss, Brune, 1968)

$$\sigma_a = \mu \frac{E_S}{M_0}, \quad (1)$$

式中: E_S 为地震波辐射能量, M_0 为地震矩, μ 为震源区的介质剪切模量 (对于地壳介质, μ 取 3×10^4 MPa).

基于云南区域地震台网事件波形数据, 选择震中距在 200 km (若监测条件较好, 则选择 100 km) 范围以内的台站, 计算震群中 $M_L \geq 3.0$ 地震的视应力, 结果列于表 2.

表 2 维西—乔后断裂带及其周边地区震群序列中 $M_L \geq 3.0$ 地震的视应力

Table 2 Apparent stress of $M_L \geq 3.0$ earthquakes of the earthquake swarms in Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas

震群序号	震群名称	M_L	发震日期	发震时刻	视应力
1	2009年洱源震群	4.6	2009-04-14	04:37:09	0.103 807
		3.1	2009-04-16	10:36:43	0.013 749
2	2010年剑川震群	5.0	2010-01-01	10:08:21	0.126 987
		2.9	2011-06-16	13:30:35	0.040 069
3	2011年漾濞震群	4.2	2011-06-22	09:42:07	0.034 772
		3.3	2011-06-24	00:52:53	0.009 46
4	2015年洱源震群	4.4	2015-06-05	17:06:06	0.041 206
5	2016年洱源震群	4.5	2016-02-08	07:39:09	0.031 483
6	2016年漾濞震群	4.9	2016-11-17	12:22:47	0.130 816
7	2017年漾濞震群	5.5	2017-03-27	07:55:02	0.174 595
		4.8	2019-11-25	01:02:35	0.068 7
8	2019年洱源震群	3.5	2019-11-25	10:33:53	0.026 6
		4.3	2021-03-01	18:13:13	0.086
9	2021年洱源震群	3.4	2021-03-01	22:59:18	0.009 92
		3.6	2021-05-18	20:56:46	0.029 1
		4.7	2021-05-18	21:39:35	0.056 1
		3.2	2021-05-19	05:33:24	0.011 2
		4.8	2021-05-19	20:05:56	0.046 8
		3.8	2021-05-19	21:13:07	0.025 7
10	2021年漾濞震群	3.0	2021-05-20	12:08:41	0.017 9
		3.4	2021-05-21	21:37:33	0.035 1

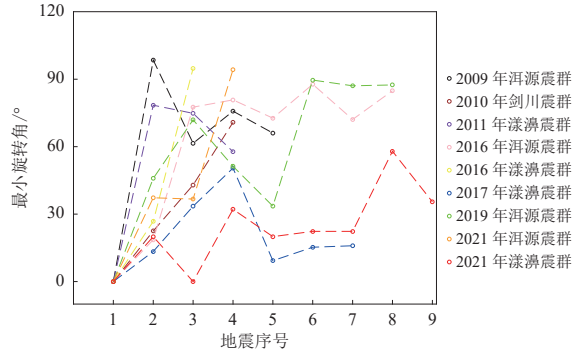


图 6 维西—乔后断裂带及周边震群震源机制解最小旋转角

Fig. 6 The minimum rotation angle of focal mechanism solutions of earthquake swarms in Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas

维西—乔后断裂带位于滇西北地区，将震群中 $M_L \geq 3.0$ 地震的视应力与滇西北地区 $M_L \geq 3.0$ 地震的视应力进行对比分析，结果如图 7 所示。可见震群序列中 $M_L \geq 3.0$ 地震的视应力位于均值线附近，与背景地震相比无明显的偏差。前震序列(2016 年洱源震群和 2021 年漾濞震群)中 $M_L \geq 4.0$ 地震视应力均低于拟合均值，但并未超过一倍均方差的下限；2021 年漾濞震群中 $M_L < 4.0$ 地震的视应力值偏高，部分地震甚至高出一倍均方差的上限。据此分析，震群序列中较大地震视应力的高低，可能并非是识别前震的指标。

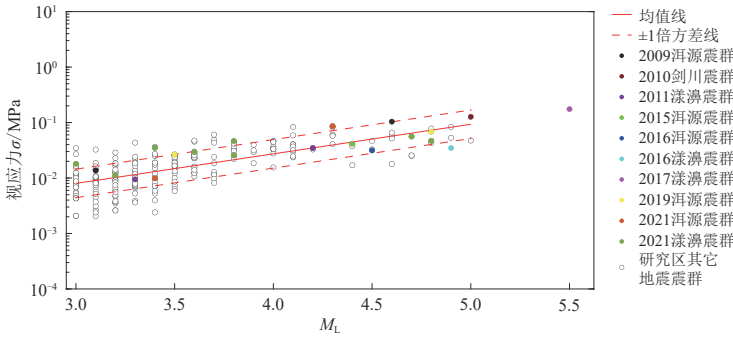


图 7 滇西北地区 $M_L \geq 3.0$ 地震的视应力与震级关系

Fig. 7 Relationship between apparent stress and magnitude of $M_L \geq 3.0$ earthquakes in northwestern Yunnan

2.5 b 值

实验室研究和实际观测均表明 G-R 关系(Gutenberg, Richter, 1944)中的 b 值对应力变化敏感，且它们呈反相关关系，即应力水平越高， b 值越低。考虑到最大似然法具有计算简便、不易受个别较大地震影响、计算结果较为稳定的优点，本研究使用最大似然法计算震群序列的 b 值。具体计算公式和误差估算公式为(冯建刚等, 2016)

$$b = \frac{\lg e}{\bar{M} - \left(M_C - \frac{\Delta M}{2} \right)}, \tag{2}$$

$$\delta b = 2.30b^2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n(n-1)}}, \tag{3}$$

式中： \bar{M} 为平均震级； ΔM 为震级分档，本研究设为 0.1； n 为计算 b 值所用的样本量。

考虑到研究区域 2009—2021 年地震监测能力变化较大，本研究首先使用 ZMAP 软件包

表 3 维西—乔后断裂带及周边地区 $M \geq 4.0$ 震群 b 值

Table 3 b -value of $M \geq 4.0$ earthquake swarms in Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas

序号	震群名称	b 值	M_C
1	2016年洱源震群	0.78	1.3
2	2017年漾濞震群	0.64	1.5
3	2021年洱源震群	0.76	1.4
4	2021年漾濞震群	0.67	0.9

计算 10 组震群序列的最小完整性震级，然后使用完整性震级以上的地震计算序列 b 值。经过计算，仅 4 组震群满足 b 值计算的要求，结果如表 3 所示。

维西—乔后断裂带及周边地区 $M \geq 4.0$ 震群的 b 值计算结果显示，震群 b 值均低于 0.8。雷兴林等(2021)计算得到该区域 2000—2021 年的背景 b 值为 0.64，曾宪伟等

(2022)计算得到该区域 2015—2021 年的背景 b 值为 0.65, 本文结果与其基本吻合, 表明研究区域的应力可能一直处于较高的水平。4 组震群中, 2017 年漾濞震群的 b 值最低(0.64), 但是其后并未发生更大地震; 2021 年漾濞震群 b 值较低(0.67), 与 2017 年漾濞震群接近, 但是同样作为前震的 2016 年洱源震群的 b 值最高(0.78)。据此分析, 单纯的低 b 值特征可能无法作为该区域前震的识别指标。

3 讨论与结论

3.1 讨论

维西—乔后断裂带及周边地区 10 组震群的时空分布、震源机制一致性、 $M_L \geq 3.0$ 地震视应力和 b 值结果显示, 除震前地震频次逐渐增多, 符合反大森定律外, 前震序列无明显的识别特征。而 2017 年漾濞震群与 2021 年漾濞震群, 在空间分布、震源机制一致性和 b 值参数等方面, 具有相似的特征, 但是 2017 年漾濞震群后续并未发生更大震级的地震。那么为什么如此相似的两个震群, 却演化成不同的地震序列?

维西—乔后断裂带及周边地区的震群分布显示, 震群活动在该断裂西侧形成了一条与之斜交的小震活动带, 雷兴林等(2021)将其称作漾濞断层, 认为它是一条包含多级雁列构造和拉张性断层阶区的成熟度很低的断裂带, 且 2013 年以来该区域的中强地震为漾濞断层活动的结果。王光明等(2021a)的重定位结果显示, 2017 年漾濞地震序列发生在 2013 年洱源 $M_S 5.5$ 、 $M_S 5.0$ 地震序列和 2021 年漾濞 $M_S 6.4$ 地震序列的中间, 序列北端与 2013 年洱源地震序列相接, 序列南端位于 2021 年漾濞 $M_S 6.4$ 地震北东侧约 15 km 处, 而 2016 年漾濞震群即发生在两个序列之前, 且其发震构造为北东向断层(见 2.2 节)。雷兴林等(2021)认为漾濞断层以往中强地震序列后无更大地震的现象, 说明漾濞断层在整体上还没有活动, 只是小的凹凸体或者次级断层的活动, 亦或是高压流体驱动的小范围活动。崔华伟等(2022)研究认为, 尽管 2017 年漾濞地震和 2021 年漾濞地震均受控于川滇地块西南边界的右旋走滑运动, 但是它们的发震构造存在差异, 2017 年漾濞地震似乎只受到川滇地块西南边界的右旋走滑构造的控制, 而 2021 年漾濞地震同时受到右旋走滑构造及局部地壳垂向差异运动作用的控制。因此, 震群序列的发震位置、区域动力学机制等因素可能是造成其演化结果差异的原因之一。

3.2 结论

使用云南地震台网 2009—2021 年的地震目录, 筛选出维西—乔后断裂带及周边地区 10 组有 $M_L \geq 4.0$ 地震参与的震群活动, 其中两组为前震序列(2016 年洱源震群和 2021 年漾濞震群), 并收集整理上述震群的序列目录和地震波形数据。使用双差定位方法、最小空间旋转角、最大似然法等方法, 从时间演化特征、空间分布特征、震源机制一致性、视应力和序列 b 值等方面对 10 组震群进行了详细分析, 最终得到以下结论:

- 1) 后续强震发生前, 前震序列的小震频次呈现出平静—增强的演化特征;
- 2) 前震序列的震中分布呈现出明显的优势分布方向(与所在区域的主控断裂走向一致), 而且空间分布较为集中;
- 3) 2017 年漾濞震群和 2021 年漾濞震群的震源机制一致性较好, 但是 2017 年漾濞震群后续并未发生更强地震;
- 4) 视应力结果显示, 维西—乔后断裂带及周边地区震群的视应力与所处的滇西北地区

基本一致,前震的视应力并未显示出较高的水平;

5) 震群序列 b 值结果显示,单纯的震群序列低 b 值特征无法作为漾濞及其周边地区前震的识别指标.

维西—乔后断裂带及其周边 $M_L4.0$ 震群时空分布特征和参数计算结果表明:除主震前频度呈现出反大森定律外,前震序列与普通震群在空间分布、震源机制一致性、视应力和 b 值等单一参数方面无明显的差异,但是前震序列同时具有震中优势分布方向与区域主要构造展布方向一致、震源机制一致性较好、低 b 值等特征,建议综合使用时空演化特征、震群参数识别前震序列.

本研究图件主要使用 GMT6 软件(Wessel *et al*, 2019)绘制完成,拉蒙特-多尔蒂地球观测站的 Felix Waldhuaser 教授为本文研究提供了双差定位程序,云南省地震台网为本文研究提供了地震目录和波形数据,中国地震台网中心孟令媛研究员、甘肃省地震局冯建刚正高级工程师、辽宁省地震局张博高级工程师、云南省地震局赵小艳高级工程师在稿件撰写过程中提出了有益的建议,审稿专家提出了宝贵的修改意见,作者在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 安晓文,常祖峰. 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: 11-19.
- An X W, Chang Z F. 2018. *Quaternary Active Faults in Yunnan: Distribution Map of Quaternary Active Faults in Yunnan*[M]. Beijing: Seismological Press: 11-19 (in Chinese).
- 曹凤娟,翟丽娜,殷轶娜,杨牧萍,张慧,张博. 2015. 辽宁地区震群序列统计特征及预测意义研究[J]. *中国地震*, **31**(1): 45-55.
- Cao F J, Zhai L N, Yin Y N, Yang M P, Zhang H, Zhang B. 2015. The study on the statistical characteristics of the earthquake swarms in Liaoning and the prediction significance[J]. *Earthquake Research in China*, **31**(1): 45-55 (in Chinese).
- 崔华伟,郑建常,万永革,程宇豪,杨帆,孙庆山,赵瑞,许鑫,柴光斌. 2022. 2021年云南漾濞 $M_S6.4$ 地震序列发震构造及其与2013年洱源、2017年漾濞地震的异同[J]. *地球物理学报*, **65**(2): 620-636.
- Cui H W, Zheng J C, Wan Y G, Cheng Y H, Yang F, Sun Q S, Zhao R, Xu X, Chai G B. 2022. The seismogenic structure of the 2021 Yunnan Yangbi $M_S6.4$ earthquake sequence and the difference between the Eryuan earthquake in 2013, Yangbi earthquake in 2017 and 2021[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **65**(2): 620-636 (in Chinese).
- 邓世广,蒋海昆. 2022. 2020年伽师 $M_S6.4$ 地震前震活动研究[J]. *地球物理学报*, **65**(9): 3322-3334.
- Deng S G, Jiang H K. 2022. Investigation of the foreshock activity of the 2020 $M_S6.4$ Jiashi earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **65**(9): 3322-3334 (in Chinese).
- 段梦乔,赵翠萍,周连庆,赵策,左可桢. 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*, (9): 3111-3125.
- Duan M Q, Zhao C P, Zhou L Q, Zhao C, Zuo K Z. 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).
- 冯建刚,张辉,杨萍. 2016. 2013年岷县漳县6.6级地震前地震 b 值异常特征研究[J]. *地震*, **36**(1): 32-37.
- Feng J G, Zhang H, Yang P. 2016. Anomalies of b -value changes before the 2013 Minxian-Zhangxian $M_S6.6$ earthquake[J]. *Earthquake*, **36**(1): 32-37 (in Chinese).
- 付虹,刘自凤,胡小静,李智蓉,洪敏,彭关灵,王光明,倪喆. 2021. 2021年云南漾濞 $M_S6.4$ 地震异常跟踪分析[J]. *地震研究*, **44**(3): 301-308.
- Fu H, Liu Z F, Hu X J, Li Z R, Hong M, Peng G L, Wang G M, Ni Z. 2021. Tracking analysis of seismic anomalies of the 2021 Yangbi, Yunnan $M_S6.4$ earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, **44**(3): 301-308 (in Chinese).
- 郭祥云,陈学忠,李艳娥,隗永刚,陈丽娟. 2019. 震源机制一致性的显著性检验方法:以1999年11月29日辽宁岫岩

- $M_{5.4}$ 地震前震序列为例[J]. *地震学报*, **41**(6): 709–722.
- Guo X Y, Chen X Z, Li Y E, Wei Y G, Chen L J. 2019. Significance test of focal mechanism consistency: Taking the fore-shock sequence of the $M_{5.4}$ Xiuyan earthquake on November 29, 1999 as an example[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **41**(6): 709–722 (in Chinese).
- 郭祥云, 尹海权, 汪贞杰, 杨辉. 2021. 2021年5月21日云南漾濞 $M_{6.4}$ 地震序列的矩心矩张量解及动力环境分析[J]. *地震地质*, **43**(4): 806–826.
- Guo X Y, Yin H Q, Wang Z J, Yang H. 2021. Earthquake centroid, seismic moment tensor and dynamic environment analysis of the $M_{5.4}$ earthquake sequence in Yangbi, Yunnan on May 21, 2021[J]. *Seismology and Geology*, **43**(4): 806–826 (in Chinese).
- 郭祥云, 蒋长胜, 韩立波, 尹海权, 赵志远. 2022. 中国大陆及邻区震源机制数据集(2009—2021年)[DB/OL]. [2022-03-01]. <https://data.earthquake.cn/datashare/report.shtml?PAGEID=datasourcelist&dt=ff8080827e4d6cf5017f1f5b440d0019>.
- Guo X Y, Jiang C S, Han L B, Yin H Q, Zhao Z Y. 2022. Focal mechanism data set in Chinese mainland and its adjacent area (2009–2021)[DB/OL]. [2022-03-01]. <https://data.earthquake.cn/datashare/report.shtml?PAGEID=datasourcelist&dt=ff8080827e4d6cf5017f1f5b440d0019> (in Chinese).
- 蒋海昆, 李永莉, 曲延军, 华爱军, 代磊, 郑建常, 侯海峰. 2006. 中国大陆中强地震序列类型的空间分布特征[J]. *地震学报*, **28**(4): 389–398.
- Jiang H K, Li Y L, Qu Y J, Hua A J, Dai L, Zheng J C, Hou H F. 2006. Spatial distribution features of sequence types of moderate and strong earthquakes in Chinese mainland[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **28**(4): 389–398 (in Chinese).
- 姜金钟, 付虹, 李涛. 2021. 2021年云南漾濞 $M_{5.4}$ 地震序列重定位及发震构造探讨[J]. *地震研究*, **44**(3): 320–329.
- Jiang J Z, Fu H, Li T. 2021. Relocation of the 2021 Yangbi, Yunnan $M_{5.4}$ earthquake sequence and discussion of its seismogenic fault[J]. *Journal of Seismological Research*, **44**(3): 320–329 (in Chinese).
- 雷兴林, 王志伟, 马胜利, 何昌荣. 2021. 关于2021年5月滇西漾濞 $M_{5.4}$ 地震序列特征及成因的初步研究[J]. *地震学报*, **43**(3): 261–286.
- Lei X L, Wang Z W, Ma S L, He C R. 2021. A preliminary study on the characteristics and mechanism of the May 2021 $M_{5.4}$ Yangbi earthquake sequence, Yunnan, China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **43**(3): 261–286 (in Chinese).
- 刘俊清, 甘卫军, 王光明, 王忠礼, 张宇, 蔡宏雷, 李仲巍. 2021. 2021年5月21日云南漾濞 $M_{5.4}$ 地震序列地震矩张量及发震构造[J]. *地球物理学报*, **64**(12): 4475–4487.
- Liu J Q, Gan W J, Wang G M, Wang Z L, Zhang Y, Cai H L, Li Z W. 2021. Seismic moment tensor and seismogenic structure of the Yangbi $M_{5.4}$ earthquake sequence on May 21, 2021 in Yunnan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **64**(12): 4475–4487 (in Chinese).
- 龙锋, 祁玉萍, 易桂喜, 吴微微, 王光明, 赵小艳, 彭关灵. 2021. 2021年5月21日云南漾濞 $M_{5.4}$ 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.
- Long F, Qi Y P, Yi G X, Wu W W, Wang G M, Zhao X Y, Peng G L. 2021. Relocation of the $M_{5.4}$ 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).
- 陆远忠, 宋俊高, 戴维乐. 1984. 一个判断震情的指标: 震群 U 值[J]. *地震学报*, **6**(增刊): 495–508.
- Lu Y Z, Song J G, Dai W L. 1984. An index to judge the earthquake situation: The U value of earthquake swarm[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **6**(S): 495–508 (in Chinese).
- 万永革. 2019. 同一地震多个震源机制中心解的确定[J]. *地球物理学报*, **62**(12): 4718–4728.
- Wan Y G. 2019. Determination of center of several focal mechanisms of the same earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **62**(12): 4718–4728 (in Chinese).
- 王光明, 彭关灵, 赵小艳, 付虹. 2021a. 基于地震序列时空分布特征分析维西—乔后断裂带地震危险性[J]. *地震研究*, **44**(3): 367–379.
- Wang G M, Peng G L, Zhao X Y, Fu H. 2021a. Seismic risk of the Weixi-Qiaohou fault zone based on temporal-spatial distribution characteristics of earthquake sequences[J]. *Journal of Seismological Research*, **44**(3): 367–379 (in Chinese).

- 王光明, 吴中海, 彭关灵, 刘自凤, 罗睿洁, 黄小龙, 陈浩朋. 2021b. 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.
- Wang G M, Wu Z H, Peng G L, Liu Z F, Luo R J, Huang X L, Chen H P. 2021b. Seismogenic fault and its 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).
- 王月, 胡少乾, 何晓慧, 郭凯, 解孟雨, 邓世广, 马亚伟. 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.
- Wang Y, Hu S Q, He X H, Guo K, Xie M Y, Deng S G, Ma Y W. 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).
- 薛艳, 解孟雨, 刘杰, 庄建仓. 2021. 全球 $M_W \geq 8.0$ 浅源地震的前震序列研究[J]. 地震地质, **43**(5): 1233–1249.
- Xue Y, Xie M Y, Liu J, Zhuang J C. 2021. Study on foreshock sequences of the global great shallow-focus earthquakes with $M_W \geq 8.0$ [J]. *Seismology and Geology*, **43**(5): 1233–1249 (in Chinese).
- 闫坤, 王伟君, 冯磊, 彭菲, 寇华东, 袁爱璟, 付广裕. 2023. 2012年以来新疆于田强震前震序列的时空演化模式[J]. 地球物理学报, **66**(1): 245–259.
- Yan K, Wang W J, Feng L, Peng F, Kou H D, Yuan A J, Fu G Y. 2023. The foreshock temporal-spatial evolutionary patterns of the strong earthquakes since 2012 in Yutian, Xinjiang, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **66**(1): 245–259 (in Chinese).
- 杨军, 苏有锦, 李孝宾, 叶泵, 陈佳. 2015. 2013年洱源 $M_S5.5$ 地震序列 $M_L \geq 3.4$ 地震的震源机制解研究[J]. 地震研究, **38**(2): 196–202.
- Yang J, Su Y J, Li X B, Ye B, Chen J. 2015. Research on focal mechanism solutions of $M_L \geq 3.4$ earthquakes of Eryuan $M_S5.5$ earthquake sequence in 2013[J]. *Journal of Seismological Research*, **38**(2): 196–202 (in Chinese).
- 曾宪伟, 赵小艳, 李蒙亚, 李文君, 唐浩, 袁媛. 2022. 2021年5月21日漾濞4次 $M_S \geq 5.0$ 地震前后 b 值变化[J]. 地震学报, **44**(3): 401–412.
- Zeng X W, Zhao X Y, Li M Y, Li W J, Tang H, Yuan Y. 2022. Variation of b -value before and after Yangbi four $M_S \geq 5.0$ earthquakes on May 21, 2021[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **44**(3): 401–412 (in Chinese).
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑), **33**(增刊): 12–20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, Ma J, Gan W J, Min W, Mao F Y, Wang Q. 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. *Science in China: Series D*, **46**(Z2): 13–24.
- 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.
- 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).
- 赵小艳, 孙楠, 苏有锦. 2015. 云南地区前震时空分布及其统计特征研究[J]. 中国地震, **31**(2): 209–217.
- Zhao X Y, Sun N, Su Y J. 2015. Spatial-temporal distribution and their statistical characteristics of foreshocks in the Yunnan region[J]. *Earthquake Research in China*, **31**(2): 209–217 (in Chinese).
- Chen X W, Shearer P M. 2013. California foreshock sequences suggest aseismic triggering process[J]. *Geophys Res Lett*, **40**(11): 2602–2607.
- Chen Y, Liu J, Ge H K. 1999. Pattern characteristics of foreshock sequences[J]. *Pure Appl Geophys*, **155**(2): 395–408.
- Gomberg J. 2018. Unsettled earthquake nucleation[J]. *Nat Geosci*, **11**(7): 463–464.
- Gulia L, Wiemer S. 2019. Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks[J]. *Nature*, **574**(7777): 193–199.
- Gutenberg B, Richter C F. 1944. Frequency of earthquakes in California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **34**(4): 185–188.
- Jiang J Z, Li J, Fu H. 2019. Seismicity analysis of the 2016 $M_S5.0$ Yunlong earthquake, Yunnan, China and its tectonic implications[J]. *Pure Appl Geophys*, **176**(3): 1225–1241.
- Jones L M, Molnar P. 1979. Some characteristics of foreshocks and their possible relationship to earthquake prediction and pre-

- monitory slip on faults[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **84**(B7): 3596–3608.
- Jones L M. 1985. Foreshocks and time-dependent earthquake hazard assessment in southern California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **75**: 1669–1680.
- Kagan Y, Knopoff L. 1978. Statistical study of the occurrence of shallow earthquakes[J]. *Geophys J Int*, **55**(1): 67–86.
- Kato A, Igarashi T. 2012. Regional extent of the large coseismic slip zone of the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki earthquake delineated by on-fault aftershocks[J]. *Geophys Res Lett*, **39**(15): L15301.
- Li X B, Jin M P, Huang Y, Cha W J, Wang J, Li S H. 2022. Temporal evolution of the focal mechanism consistency of the 2021 Yangbi M_s 6.4 earthquake sequence in Yunnan[J]. *Earthq Res Adv*, **2**(2): 100061.
- Lippiello E, Godano C, De Arcangelis L. 2012. The earthquake magnitude is influenced by previous seismicity[J]. *Geophys Res Lett*, **39**(5): L05309.
- Liu M, Li H Y, Li L, Zhang M, Wang W T. 2022. Multistage nucleation of the 2021 Yangbi M_s 6.4 earthquake Yunnan, China and its foreshocks[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **127**(5): e2022JB024091.
- Liu M, Li L, Zhang M, Lei X L, Nedimović M R, Plourde A P, Guo R M, Wang W T, Li H Y. 2023. Complexity of initiation and evolution of the 2013 Yunlong earthquake swarm[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **612**: 118168.
- Llenos A L, van der Elst N J. 2019. Improving earthquake forecasts during swarms with a duration model[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **109**(3): 1148–1155.
- Schneider M, Flury H, Guttorp P, Wright A. 2023. Earthquake catalog processing and swarm identification for the Pacific north-west[J]. *Seismol Res Lett*, **94**(5): 2500–2513.
- Tozer B, Sandwell D T, Smith W H F, Olson C, Beale J R, Wessel P. 2019. Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+[J]. *Earth Space Sci*, **6**(10): 1847–1864.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(6): 1353–1368.
- Wessel P, Luis J F, Uieda L, Scharroo R, Wobbe F, Smith W H F, Tian D D. 2019. The Generic Mapping Tools Version 6[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **20**(11): 5556–5564.
- Wetzler N, Lay T, Brodsky E E. 2023. Global characteristics of observable foreshocks for large earthquakes[J]. *Seismol Res Lett*, **94**(5): 2313–2325.
- Wilding J D, Ross Z E. 2022. Aftershock moment tensor scattering[J]. *Geophys Res Lett*, **49**(9): e2022GL098473.
- Wyss M, Brune J N. 1968. Seismic moment, stress, and source dimensions for earthquakes in the California-Nevada region[J]. *J Geophys Res*, **73**(14): 4681–4694.
- Yabe S, Ide S. 2018. Variations in precursory slip behavior resulting from frictional heterogeneity[J]. *Prog Earth Planet Sci*, **5**(1): 43.
- Yang Z G, Liu J, Zhang X M, Deng W Z, Du G B, Wu X Y. 2021. A preliminary report of the Yangbi, Yunnan, M_s 6.4 earthquake of May 21, 2021[J]. *Earth Planet Phys*, **5**(4): 362–364.
- Zhou Y J, Ghosh A, Fang L H, Yue H, Zhou S Y, Su Y J. 2021. A high-resolution seismic catalog for the 2021 M_s 6.4/ M_w 6.1 Yangbi earthquake sequence, Yunnan, China: Application of AI picker and matched filter[J]. *Earthq Sci*, **34**(5): 390–398.
- Zhou Y J, Ren C M, Ghosh A, Meng H R, Fang L H, Yue H, Zhou S Y, Su Y J. 2022. Seismological characterization of the 2021 Yangbi foreshock-mainshock sequence, Yunnan, China: More than a triggered cascade[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **127**(8): e2022JB024534.
- Zhu G H, Yang H F, Tan Y J, Jin M P, Li X B, Yang W. 2022. The cascading foreshock sequence of the M_s 6.4 Yangbi earthquake in Yunnan, China[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **591**: 117594.