

2021年云南漾濞 M_s 6.4 地震亚失稳阶段的地震活动性特征分析*

黄雅, 陈佳[✉], 金明培, 李孝宾, 茶文剑, 王军, 李四海

(中国地震科学实验场大理中心, 云南 大理 671000)

摘要: 使用亚失稳台阵和固定台站组成的密集台网观测资料, 对2021年漾濞 M_s 6.4地震前滇西北地区完备震级以上地震的频度、断层总面积和 b 值等地震活动性参数进行时空扫描分析, 发现研究区4级以上地震失稳前均有较为明显的增频、增总面积、低 b 值等共性特征, 漾濞 M_s 6.4地震前以小震活动为指针的断层协同演化进程大致可分为3个阶段: 2020年5—12月为应变释放点产生阶段, 小震频次缓慢增加; 2021年1月至5月17日为应变释放点扩展和增多阶段, 小震频次逐步增多, 3级以上地震释放点明显增强, 且有向主震震中迁移现象, 后期成带状扩展; 2021年5月18—21日为应变释放连接段, 中小地震活动快速增长并最终连接成片, 甚至重叠, 且4级以上地震集中释放。而亚失稳过程则应是从2021年1月至5月17日为准静态阶段, 2021年5月18—20日为准动态阶段。最后, 讨论了出现明显的亚失稳过程的原因和断层协同演化进程划分存在的问题和不足。

关键词: 断层亚失稳阶段; 协同化进程; 地震活动性; 漾濞 M_s 6.4地震; 亚失稳密集台阵; 滇西北地区

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2021)03-0357-10

0 引言

2021年5月21日21时48分, 云南省大理州漾濞县 (25.67°N , 99.87°E) 发生 M_s 6.4地震, 震源深度8 km。本次地震邻近的断裂是维西—乔后—巍山断裂, 微观震中位于该断裂西南侧约12 km处。任俊杰等(2007)研究表明, 该断裂为北西—南东走向的右旋走滑断裂。震中附近构造较为复杂, 除了苍山西侧的维西—乔后—巍山断裂外, 在苍山东侧还有一条与之近乎平行的深大断裂带——红河断裂带。此外, 还有多条北东—南西走向的与乔后—巍山断裂和红河断裂交错的次级断裂, 如西洱河断裂、石门关断裂、周城断裂和龙蟠—乔后断裂等。因此, 该区域断层纵横交错、构造复杂、中小地震易发多发。

地震是一个地壳内应力累积并最终快速释放的过程, 识别地震前断层所处的应力状态对于地

震活动的研究极为关键。断层应力积累过程大致可以分为稳态、亚稳态、亚失稳态和失稳态, 依次对应断层失稳过程中的线性、偏离线性、亚失稳和失稳4个阶段。断层的应力状态进入亚失稳的准动态阶段后, 地震失稳将不可逆转地到来。因此, 研究断层的亚失稳阶段特征, 对于地震的短、临预测具有重要意义(王凯英等, 2018; 李世念等, 2021; 张华英等, 2021)。马瑾(2016)在室内岩石实验基础上提出了断层亚失稳理论, 并证明在室内岩石实验中可以准确识别亚失稳阶段。如何把室内简单岩样、清晰应力、可测参数的实验和研究成果, 推广至构造应力多源、断层体系复杂、观测台站稀疏的天然野外环境中, 如何识别断层亚失稳态的响应特征, 给出具有可操作性的指标或判据, 是地震工作者正在探索 and 实验的工作(宋春燕, 2017)。

本文对漾濞 M_s 6.4地震前滇西北地区 ($25^\circ \sim 27^\circ\text{N}$, $99^\circ \sim 101^\circ\text{E}$) 地震活动性特征进行时

* 收稿日期: 2021-06-18.

基金项目: 云南省地震局科研专项课题(2021YBZX10)、云南省地震局科研专项课题(2018ZX04)和国家重点研发计划子专题(2018YFC15033030)联合资助。

第一作者简介: 黄雅(1993-), 硕士, 主要从事数字地震学分析与研究. E-mail: 1812496909@qq.com.

✉ 通讯作者简介: 陈佳(1982-), 高级工程师, 硕士, 主要从事数字地震学分析与研究. E-mail: sarmar88@163.com.

空扫描分析, 计算研究区密集台阵观测编目结果的完备震级, 分析漾濞 $M_s 6.4$ 地震前断层面总面积、 b 值、 $M_L \geq 2$ 地震频度和 $M_L \geq 3$ 地震空间迁移等地震活动性特征, 研究前震序列时空演化和震源机制解一致性等, 以期探索漾濞 $M_s 6.4$ 地震前亚失稳过程的判定提出了地震活动参考依据。

1 数据来源及记录

1.1 台站分布情况

自 2010 年以来, 维西—乔后—巍山断裂带附近发生了一系列中强地震, 如 2013 年洱源 $M_s 5.5$ 和 $M_s 5.0$ 地震, 2016 年云龙 $M_s 5.0$ 地震, 2017 年漾濞 $M_s 5.1$ 地震。基于实验室的研究和识别结果, 经过全国范围内的筛选和排查, 马瑾院士研究团队最终选定滇西北地区包含维西—乔后—巍山断裂、红河断裂在内的显著应力释放区域作为断层亚失稳理论研究的天然野外观测实验区, 并在此布设了由 30 个短周期台站组成的亚失稳野外观测研究台阵, 结合该区已有的云南区域台网宽频带地震台站, 在 2021 年漾濞 $M_s 6.4$ 地震震中周围形成了包含 42 个台站、台间距约 15 km 的密集台阵。此密集台阵自 2018 年 4 月组网运行以来, 记录了漾濞 $M_s 6.4$ 地震序列孕育、发生和发展全过程, 尤其是地震前 3 a 开始编目的大量微震 ($M_L \geq -1.4$) 数据, 为本文的研究提供了详实、丰富的第一手地震活动性资料, 为亚失稳态的地震活动性响应特征研究提供了不可多得的机会。

本文使用亚失稳密集台阵和固定台站共 42 个台组成监测网 (图 1), 包括亚失稳密集台阵的观测站 30 个、云南地震台网固定观测台站 12 个。该观测区域是云南地区地震台站较为密集的区域之一, 记录到了大量的微地震事件, 人工地震编目最小震级可达 $M_L - 1.4$, 为漾濞 $M_s 6.4$ 地震前地震活动性时空演化分析提供了宝贵的第一手资料。2021 年 5 月 18 日和 19 日在主震震中附近相继发生 4.2 和 4.4 级地震序列, 中国地震科学实验场大理中心在震区 15 km 范围内, 架设了 YSW34、YSW35 和 YSW36 等 3 个临时台站, 使得震区周围台站分布更为均匀, 且台间距与震源

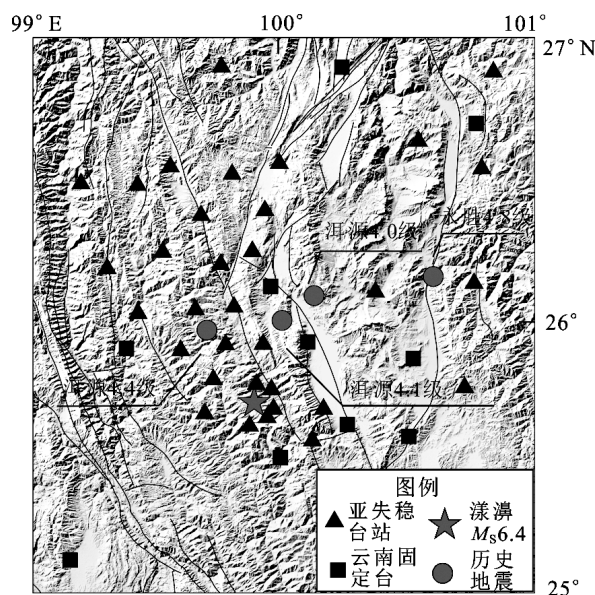


图 1 滇西北亚失稳密集台站与 $M_L \geq 4.0$ 地震空间分布 (2018-04—2021-05)

Fig. 1 Distribution of the observation stations and $M_L \geq 4.0$ earthquakes in northwest Yunnan (2018-04—2021-05)

深度接近同一数量级, 极大地提高了事件的观测精度和小震检测能力。

亚失稳密集台阵的观测站配备了英国 GUALP 公司生产的 CMG-40T 短周期地震计, 其动态范围大于 145 dB, 频带宽度为 2 s ~ 100 Hz, 配置有高精度时间和观测台点定位的 GPS 服务系统, 该系统提供的最佳授时精度达 1 μ s, 与地震计配套的数据采集器为 REFTEK-130B。

1.2 地震目录完备性分析

最小完备震级是国际上普遍采用的评估地震台网检测能力的定量标准, 即地震台网能以 100% 的概率检测到的地震的最小震级 (Rydelek, Sacks, 1989)。震级低于最小完备震级的地震可能会被台网漏检, 从而导致地震目录不完备, 进而可能会影响基于地震目录的相关研究结果的可信度 (Huang *et al.*, 2001)。本文采用两种估算方法来综合估计研究区最小完备震级 (M_c), 一是基于 G-R 关系 (Gutenberg, Richter, 1945) 的震级-频度分布 (FMD) 方法, 二是最大曲率法 (冯建刚等, 2012; 侯金欣, 王宝善, 2017)。

本文选取 2018 年 4 月至 2021 年 5 月亚失稳密集台阵的地震目录, 统计区域为滇西北地区 (25°

$\sim 27^\circ\text{N}$, $99^\circ \sim 101^\circ\text{E}$) 的最小完备震级 (M_c)。刘丽芳等 (2012) 计算的大理—丽江—盐源地区 M_c 可控制在 $M_L1.0 \sim 1.5$, 本文综合两种方法给出研究区 M_c 为 $M_L0.8$ (图2), 可见亚失稳密集台阵和固定台组网明显提升了下限震级的检测能力。

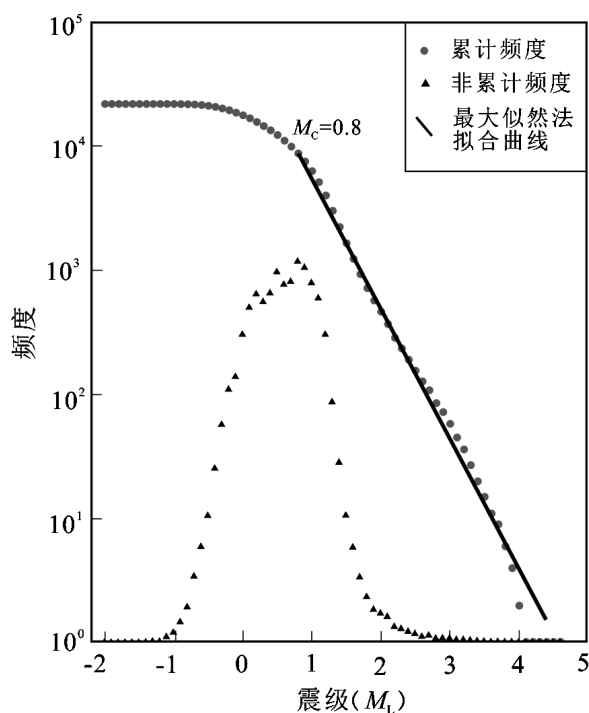
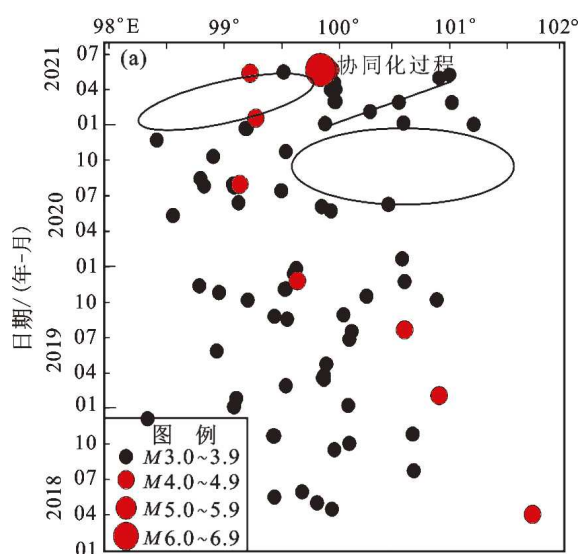


图2 研究区震级-频度关系

Fig. 2 Magnitude-frequency relationship and the complete magnitude in the study area



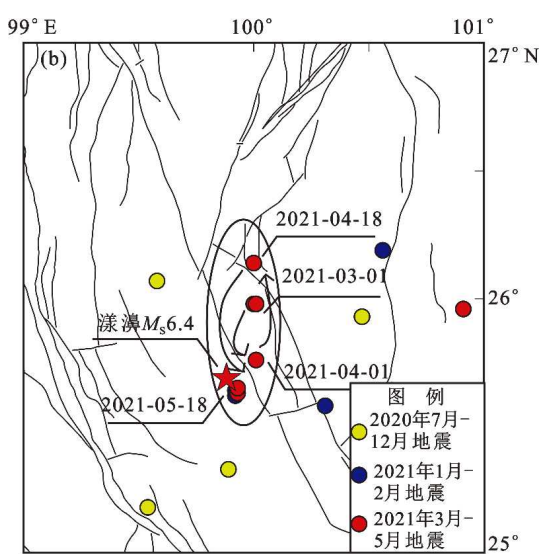
(a) 2018年4月—2021年5月 $M_L \geq 3.0$ 地震

2 漾濞 $M_s6.4$ 地震前亚失稳过程地震活动性响应特征

在实验室内观察到的断层失稳前的“协同化”进程, 即应变释放区的扩展、加速扩展和连接的现象, 能否在野外观测中重现, 是检验实验过程和成果的重要手段。漾濞 $M_s6.4$ 地震发生在马瑾院士预先选定的地震重点危险区, 本文尝试分析地震前滇西北地区中小震活动呈现的断层亚失稳过程响应。

2.1 滇西北地区 $M_L \geq 3.0$ 地震随时间迁移

选取2018年以来亚失稳密集台阵和固定台组网记录的研究区 $M_L \geq 3.0$ 地震, 沿 $98^\circ \sim 102^\circ\text{E}$ 做时空迁移图 (图3a), 可以看出2018—2019年地震分布较均匀, 2020年1—4月有短暂平静。2020年5—12月, 99.5°E 以东地区3、4级地震平静, 该地段形成应变积累区, 从2021年1月开始, 100°E 以西3、4级地震平静, 该地段也形成应变积累区域, 特别是2021年2月该区域3、4级地震加速活动。从图3b可以看到, 2021年3—5月 $M_L \geq 3.0$ 地震有向主震震中收缩的现象, 且呈现南北向条带状扩展, 断层出现加速协同化过程, 是应变主释放区。实验室结果显示失稳发生在应变积累区, 漾濞 $M_s6.4$ 主震前的地震活动情况与其一致。



(b) 2020年7月—2021年5月 $M_L \geq 3.0$ 地震

图3 2018年以来研究区 $M_L \geq 3.0$ 地震时空迁移图

Fig. 3 Spatial and temporal migration of $M_L \geq 3.0$ earthquakes in the study area

2.2 漾濞 $M_s6.4$ 地震前研究区地震活动情况

一个地区地震活动的频度和强度可以直观反映该区地震应变释放水平。本文对研究区 $M_L \geq 2.0$ 地震频度随时间演化特征进行分析, 总结研究区漾濞 $M_s6.4$ 地震前 4 次 $M_L \geq 4.0$ 中强震 (表 1) 失稳前共性特征。

表 1 2018 年以来滇西北地区 4 次中强地震参数

Tab. 1 Parameters of four moderate – strong earthquakes in northwest Yunnan since 2018

序号	发震日期	地点	震级 (M_L)	震中位置	
				$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$
1	2019-01-08	洱源	4.0	26.07	100.12
2	2019-07-21	永胜	4.8	26.14	100.60
3	2019-11-25	洱源	4.4	25.95	99.69
4	2021-03-01	洱源	4.1	25.99	99.99

图 4 给出了 2018 年 4 月至 2021 年漾濞 $M_s6.4$ 主震前研究区 $M_L \geq 2.0$ 地震频度图 (统计窗长 60 d, 步长 15 d)。从图中可以看出, 滇西北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震失稳前均出现 $M_L \geq 2.0$ 地震的显著增频现象, $M_L \geq 4.0$ 地震前统计频次均超过均值线, $M_L \geq 4.0$ 地震一般在上述频度超过均值线 15 ~ 30 d 内发生。可见 $M_L \geq 2.0$ 地震频次超过均值线可能是该地区开始以地震应变释放为主的一个重要判据。

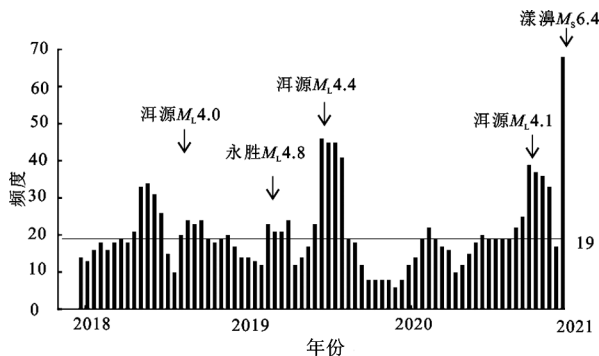


图 4 2018 年以来研究区 $M_L \geq 2.0$ 地震频度 (步长 15 d, 窗长 60 d)

Fig. 4 Frequency diagram of $M_L \geq 2.0$ earthquakes in the study area since 2018 (Step = 15 days, window = 60 days)

2020 年下半年至漾濞 $M_s6.4$ 地震前, $M_L \geq 2.0$ 地震的频度已经多次超过均值线, 至 2021 年 1 月前均未有失稳地震发生; 从 2021 年 1 月开始, 该

区应变释放水平明显增强, 随后发生了洱源 $M_L4.1$ 地震以及图 3 所示的多次 $M_L \geq 3.0$ 地震。

通常用地震频度和地震能量这两个参量作为地震带或地震区地震活动性高低的标志。由于小震的数目远远多于大震, 所以地震频度实际上是由较小地震决定的, 而地震的总能量却是由为数不多的几个较大地震所决定的, 而小震的贡献往往被忽略了。为了克服这一矛盾, 前人特定义了 1 个介于频度和能量之间的活动性参数: 断层总面积 $A(t)$, 它既反映了小地震的频度, 也包含了地震的能量, 从而能更全面地反映地震活动的强弱特征 (宋德熹, 时文勇, 2005)。断层总面积的计算如下:

$$A(t) = \sum_{k=k_0}^{k-1} N(k) L^{k-k_0} \quad (L = 4.5) \quad (1)$$

式中: k_0 为所统计地震的能级下限; k 为每个地震的能级。

本文对研究区的 $A(t)$ 值进行了时间扫描, 为便于同频度比较, 窗长取 60 d, 滑动步长取 15 d, 同时为避免失稳地震对结果的影响, 震级区间都取 $M_L0.8 \sim 3.5$ 。图 5 是断层总面积时间扫描曲线, 本文取高于 2 250 作为异常起始指标, 可得到 4 次震例中有 3 次出现了异常峰值超过 2 250, 占比 75%, 而永胜 $M_L4.8$ 地震前也有应变释放显示, 但因偏离研究核心区, 不如洱源—漾濞一带的特征显著。可见 $A(t)$ 值具有比较好的预测效能。漾濞 $M_s6.4$ 地震前, 从 2021 年 1 月开始 $A(t)$ 曲线开始快速上升并高于指标值, 虽然随后发生了洱

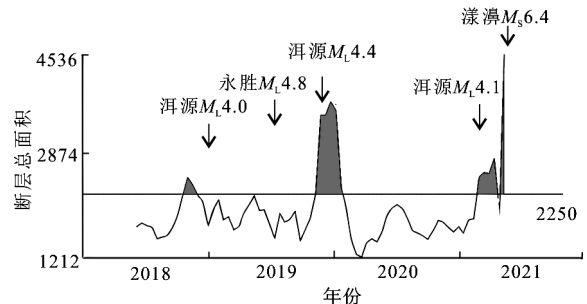


图 5 2018 年以来研究区 $M_L0.8 \sim 3.5$ 地震滑动断层总面积曲线 (步长 15 d, 窗长 60 d)

Fig. 5 $A(t)$ curve of the $M_L0.8 \sim 3.5$ earthquakes in the study area since 2018 (step = 15 days, window = 60 days)

源4.1级地震,但此次地震后曲线小幅回落又急剧上升,异常值高达4 536。结合地震频度和断层总面积的异常现象分析,漾濞 $M_s6.4$ 地震前,从2020年下半年失稳过程中应变释放协同化的标志开始呈现,即应变释放点开始产生(频度开始超过均值、 $A(t)$ 值开始抬升),2021年1月底两参数均明显增大。

2.3 漾濞 $M_s6.4$ 地震前 b 值

地震是地壳应力累积到一定程度,能量快速释放的一个力学过程(尹祥础等,1987)。识别地震前断层所处的应力状态是研究地震发生过程的关键。而 b 值变化可以反应地下介质的应力状态变化(Scholtz, 1968)。Scholtz (1968) 和 Mogi (1962) 研究岩石破裂实验时提出,当介质的应力积累水平高时 b 值呈现低值,特别是岩石破裂前 b 值下降趋势显著,高应力闭锁断层是强震孕育的重要条件。一些室内试验也表明在岩石最终破裂前, b 值会出现一个系统性的下降(Lei, Masuda, 2004)。天然地震前同样观测到 b 值降低的现象(李全林, 1979; Smith, 1981; Nanjo *et al.*, 2012)。

最常用的 b 值计算方法有线性最小二乘拟合和最大似然估计,考虑到后者计算简便,不易受个别较大地震影响,且计算结果较为稳定,本文采用最大似然估计法求取 b 值,计算公式如下(Aki, 1965):

$$b = \frac{1}{\lg(\bar{M} - M_c)} \quad (2)$$

式中: \bar{M} 为研究区域时间窗内的平均震级; M_c 为下限震级。 b 值计算误差可用以下公式评估:

$$\sigma_b = \frac{b}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

式中: σ_b 为 b 值的标准差; N 为时间窗内地震样本的个数。

图6给出了滇西北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震前 b 值扫描情况(统计时间窗长为60 d,步长为15 d,震级取 $M_L 0.8 \sim 3.5$),漾濞 $M_s6.4$ 地震前的4次地震事件,有3次 $M_L \geq 4.0$ 地震发生前1个月内都出现低 b 值的现象,永胜 $M_L4.8$ 地震前出现时间大于3个月(表2), $M_L \geq 4.0$ 地震失稳前均出现低 b 值现象,根据地震对应情况给出0.94的指标线。从2020年5月至震前, b 值出现趋势性下降,特别

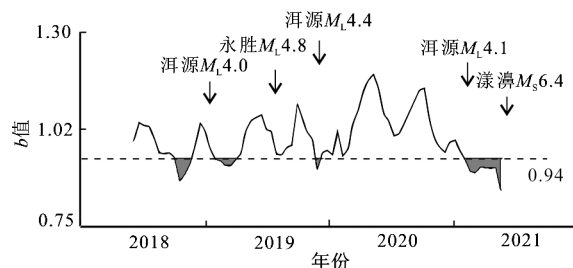


图6 2018年以来研究区 $M_L 0.8 \sim 3.5$ 地震滑动 b 值(步长15 d,窗长60 d)

Fig. 6 b -values of $M_L 0.8 \sim 3.5$ earthquakes in the study area since 2018 (step = 15 days, window = 60 days)

表2 2018年以来研究区低 b 值时段与 $M_L \geq 4.0$ 失稳地震事件

Tab. 2 Periods of low b values and seismic events of $M_L \geq 4.0$ in the study area since 2018

低 b 值时段	$M_L \geq 4.0$ 失稳地震事件
2018-10-18—2018-12-02	2019-01-08 洱源 $M_L 4.0$
2019-01-31—2019-04-01	2019-07-21 永胜 $M_L 4.8$
2019-11-12—2019-12-12	2019-11-25 洱源 $M_L 4.4$
2021-02-04—2021-02-28	2021-03-01 洱源 $M_L 4.1$
2021-02-04—2021-05-20	2021-05-21 漾濞 $M_s 6.4$

从2021年1月开始,连续出现低 b 值情况,虽然其间发生了洱源 $M_L 4.1$ 地震,但低 b 值仍然持续,直到发生漾濞 $M_s6.4$ 地震。说明2021年1月是漾濞 $M_s6.4$ 地震亚失稳过程的大致起始时段(对应图7中的O点),这和图3a中研究区 $M_L 3$ 地震呈现协同化的时段相吻合,也与 $M_L \geq 2.0$ 增频和 $A(t)$ 快速增加时段相吻合。

3 漾濞 $M_s6.4$ 地震亚失稳过程分析

由图7可知,从差应力时间上看:LM是应力积累为主阶段,地震活动呈现随机性,称作稳态;MO转为区域开始产生释放,地震开始活跃,称作亚稳态;OAB是应力释放为主阶段,也称为亚失稳阶段,其中OA段是准静态释放阶段,表现为应变释放扩展和增加,AB段是准动态释放阶段,表现为应变释放区的联结(马瑾等,2012;马瑾,郭彦双,2014;马瑾,2016)。

由图3~6可以看出漾濞 $M_s6.4$ 地震前存在断层亚失稳过程的地震活动性响应特征。断层变形

的协同化过程一般包括应变释放区产生、释放区扩展和增加以及释放区的连接 3 个阶段。2020 年 5—12 月是漾濞 $M_s6.4$ 地震前应变释放区产生的时段,体现在 $M_L \geq 2.0$ 地震的 60 日频度多次超过 19 次;2021 年 1 月起,进入应变释放区扩展和增加阶段,持续 4 个月。在偏离线性阶段开始时(图 7 中 M 时刻),孕震区域出现应变释放区和应变积累区;应变释放区的平稳扩展和增加与亚失稳初期阶段的准静态失稳有关;当孕震释放区足够多、已有释放区扩展足够大后,释放区间的相互作用就增强了,这时释放区加速扩展,断层进入亚失稳后期,即准动态阶段。

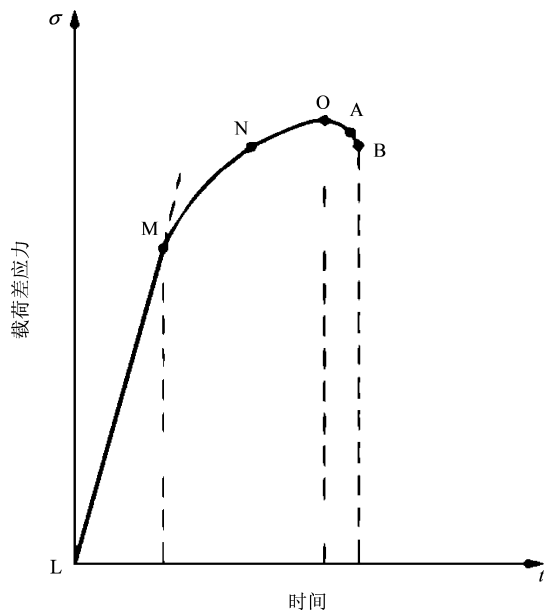


图 7 断层失稳过程的剪应力-时间曲线
(据马瑾等, 1995, 2012)

Fig. 7 Shear stress-time curve of fault instability process (based on Ma *et al.*, 1995, 2012)

2021 年 5 月 18 日开始,漾濞 $M_s6.4$ 地震的震断层进入亚失稳阶段的准动态阶段,准动态阶段特征如下:

3.1 准动态阶段地震活动性特征

2021 年 5 月 18—21 日漾濞 $M_s6.4$ 地震发生前,亚失稳密集台阵共记录到漾濞 $M_s6.4$ 地震前震 1 906 次,其中 0 级以下 521 次,0.0~0.9 级 1 009 次,1.0~1.9 级 287 次,2.0~2.9 级 69 次,3.0~3.9 级 15 次,4 级以上 3 次,5 级以上 1 次,如图 8 所示。

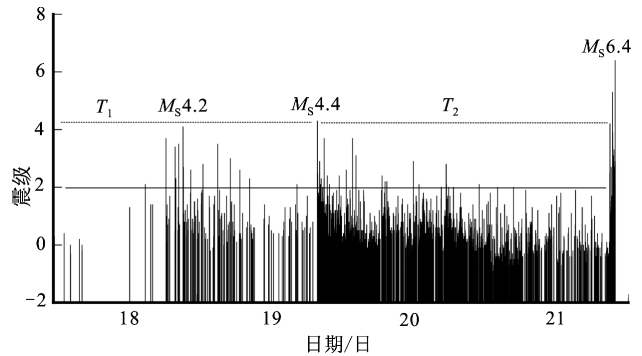


图 8 漾濞 $M_s6.4$ 主震前 3 d 地震 $M-T$ 图

Fig. 8 $M-T$ diagram of the earthquakes 3 days before the Yangbi $M_s6.4$ earthquake

本文将 2021 年 5 月 19 日漾濞 $M_s4.4$ 地震前后分别称为 T_1 和 T_2 阶段, T_1 阶段地震时间分布较为稀疏, T_2 阶段地震频次明显增多。两个时段 $M_L \geq 2.0$ 地震频次明显增强,特别是漾濞 $M_s6.4$ 地震前半小时,接连发生 1 次 $M_s4.2$ 和 1 次 $M_s5.6$ 地震。而在每个阶段的中后期地震数目明显减少, $M_L \geq 2.0$ 地震频次总体表现为持续增强—短暂平静过程。从以往研究看,许多主震的前震随时间有一个明显的持续增强—短暂平静过程,即前震频次一般在临近主震前加速增长,在主震前数小时则暂时平静(宇津德治, 1981)。漾濞前震序列在经历持续增强—短暂平静后,短时间内地震震级和频度同时加速升高是主震随即发生的主要特征,表明此时已经进入图 7 中的 AB 段,地震过程已经不可逆。另一个有前兆意义的现象是 $M_L \geq 4.0$ 前震均发生在 20—22 时之间,调制作用十分明显。那么这一阶段的前震活动是否在空间上也能呈现快速连接的重要标志特征呢?

图 9 给出漾濞 $M_s6.4$ 地震两个典型前震序列,即 5 月 18 日 $M_s4.2$ 地震序列和 5 月 19 日 $M_s4.4$ 地震序列的时空展布、快速扩展和连接情况。从图 9 可以看出 5 月 18 日 $M_s4.2$ 地震序列(蓝色)高度集中在 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的范围内,而 5 月 19 日 $M_s4.4$ 地震序列(红色)则朝着主震震中方向快速扩展,且展布范围无论在长度和宽度上都远超 1 个 $M_s4.4$ 的破裂尺度,呈现明确的加快扩展异常,且与前一释放区形成连接,甚至出现了重叠现象。这是亚失稳过程准动态阶段的典型空间特征。因此,5 月 18—19 日,应该对应亚失稳过程的 AB 段,地震已经进入不可逆阶段。

另一个不可逆的现象，是图9中5月19日 $M_s4.4$ 地震序列的破裂范围达 $8\text{ km} \times 4\text{ km}$ ，展布面积是18日 $M_s4.2$ 的8倍。根据Wells和Coppersmith(1994)建立的矩震级和破裂面积之间的经验关系式：

$$\lg(RA) = a + b * M_w \tag{4}$$

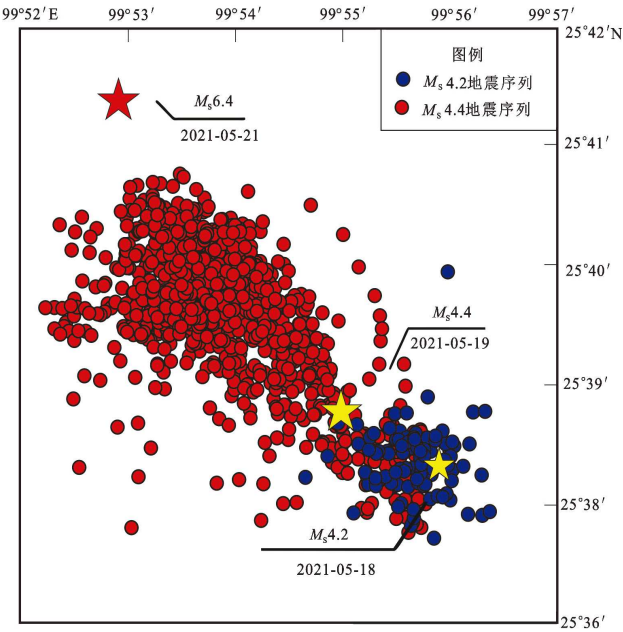


图9 $M_s4.2$ 和 $M_s4.4$ 前震序列时空展布和快速连接情况

Fig. 9 Temporal and spatial distribution and connection of the $M_s4.2$ and the $M_s4.4$ earthquake sequence

式中： RA 表示断层面面积；对走滑型地震 a 取 -3.42 ± 0.18 、 b 取 0.90 ± 0.03 ；推算矩震级 M_w 可达5.5左右，已经具备了前震的响应尺度特征。

3.2 准动态阶段震源机制一致性特征

地震是地下介质受到应力作用产生破裂的自然现象，震源机制解是研究构造应力场的重要基础资料，它反映了震源断层的力学特征，可以揭示地震破裂的力学机制，反映出地震等效释放应力场。陈鵬(1978)研究一些强震震例发现，强震前震源机制解趋于一致的现象时有发生，于是提出用前震震源机制的一致性来描述地震活动性异常。强震受到构造应力场的制约，一般情况下震源机制与应力场的方向吻合(李钦祖等，1982)。

本文选取2021年5月18—20日 $M_L \geq 3.0$ 的7次地震事件，采用CAP方法(Zhu, Helmberger, 1996)反演出震源机制解的结果(表3)，7次前震矩心深度均在4~7 km范围内，断层节面I的走向都是北西向，且走向最大差异均在 10° 以内，从滑动角($-163^\circ \sim 166^\circ$)可以判断这7次地震都是以走滑型为主。P轴显示了主压应力轴方位。图10中给出了7次前震的主压应力优势方向，结果表明这7次地震主压应力轴方向一致性较高，偏差在 10° 以内，并且仰角较小，接近水平方向。大震发生前孕震区内多个中小地震震源机制参数一致性反映了孕震区内变化应力场与背景应力场的关系(泽仁志玛等，

表3 漾濞主震前3 d内 $M \geq 3.0$ 地震震源机制解

Tab. 3 Focal mechanism solutions of the $M \geq 3.0$ earthquakes 3 days before the main shock

发震时间		震中位置		矩震级	矩心深度	节面I			P轴		T轴		震源球
年-月-日	时:分:秒	$\lambda_E/$ ($^\circ$)	$\varphi_N/$ ($^\circ$)	(M_w)	深度/ km	走向/ ($^\circ$)	倾角/ ($^\circ$)	滑动角/ ($^\circ$)	方位/ ($^\circ$)	仰角/ ($^\circ$)	方位/ ($^\circ$)	仰角/ ($^\circ$)	
2021-05-18	18:49:30	99.90	25.60	3.8	6.1	137.0	81.0	-166.0	1.40	16.23	270.4	3.34	
2021-05-18	20:56:46	99.90	25.60	3.7	6.8	133.6	88.1	-163.0	359.57	13.32	267.0	10.55	
2021-05-18	21:39:35	99.90	25.60	4.4	6.4	311.0	82.0	166.0	357.54	4.07	266.4	15.53	
2021-05-19	03:27:56	99.92	25.65	3.8	4.3	319.0	74.0	180.0	182.90	11.20	275.1	11.20	
2021-05-19	20:05:56	99.92	25.66	4.7	4.4	322.0	71.0	-180.0	185.40	13.30	278.6	13.30	
2021-05-19	21:13:07	99.90	25.68	4.0	4.5	319.0	77.0	-171.0	182.60	15.50	273.4	2.90	
2021-05-20	01:58:59	99.90	25.67	3.9	4.3	146.0	82.0	180.0	10.70	5.60	101.3	5.60	

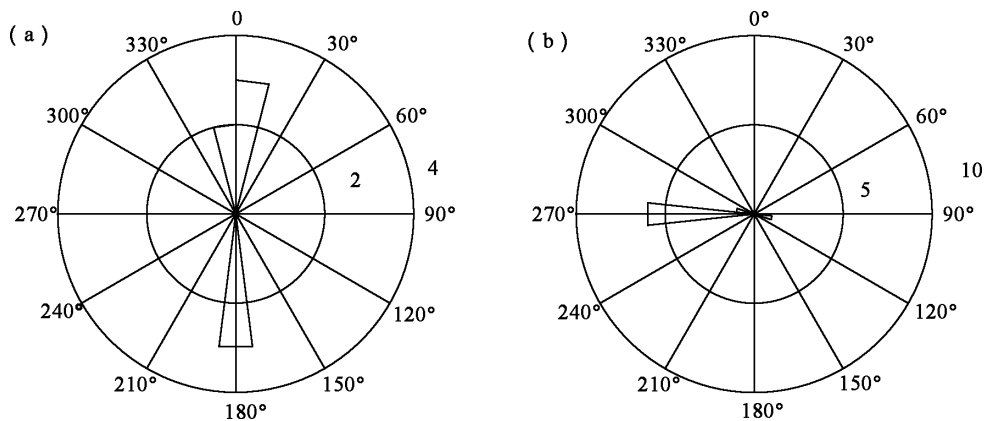


图 10 前震序列 P 轴 (a) 和 T 轴 (b) 优势方向

Fig. 10 The dominant direction of the P -axis (a) and T -axis (b) of the foreshock sequence

2010)。这 7 次地震震源机制一致性较好, 显示了构造应力场控制作用增强, 是判定前震序列的参考判据之一, 其后是否有更大地震还需要结合其它资料综合研判, 但至少已经提供了 1 个临震的辅助判据。

4 结论与讨论

本文使用架设在滇西北地区的亚失稳密集台阵积累的观测资料, 对漾濞 $M_s6.4$ 地震前亚失稳过程的地震活动性响应特征进行综合分析, 得出以下结论:

通过对漾濞地震前 $M_L \geq 3.0$ 地震时空迁移、 $M_L \geq 2.0$ 地震频度、 $M_L 0.8 \sim 3.5$ 地震的断层总面积和 b 值时间演化特征分析, 发现漾濞 $M_s6.4$ 地震前呈现了较为明显的断层亚失稳演化过程。断层变形的协同化进程一般包括应变释放区产生、释放区扩展和增加以及释放区的连接 3 个阶段。2020 年 5 月 (对应 M 点) 至 2020 年底是漾濞 $M_s6.4$ 地震发震断层应变释放区产生的时段, 2021 年 1 月 (对应 O 点) 至 5 月中旬, 为应变释放区扩展和增加阶段, 也是进入亚失稳的准静态阶段, 持续约 4 个月, 而应变释放区的连接则从 2021 年 5 月 18 日开始 (对应 A 点) 至 21 日, 进入亚失稳阶段的准动态阶段。协同化进程特征如下:

(1) 从时间扫描结果看, 从 2020 年 5 月开始, 研究区小震 b 值出现趋势性下降, 至 2021 年 1 月小于 0.94, 漾濞 $M_s6.4$ 地震前, 连续 4 个月出现多次 b 值低于 0.94 的现象; 同期地震活动频度开始逐步增强, 经历多次起伏后, 于 2021 年 1 月

呈现频次增加、震级增大现象; 断层总面积从 2021 年 1 月开始持续上升, 并于 2 月出现异常高值。

(2) 从空间扫描结果看, 漾濞 $M_s6.4$ 地震前一年, 研究区内 $M_L \geq 3.0$ 地震呈现朝震中收缩和迁移现象, 随着失稳临近, 2021 年 1 月起, 地震活动越来越密集, 3—5 月总体成南北向条状展布 (与主震震源机制解 P 轴方向吻合)。2021 年 5 月 18—20 日, 两次 4 级前震序列在时间上加速释放, 空间上快速扩展并最终连结甚至部分重叠, 且 5 月 19 日 $M_s4.4$ 地震序列的尺度远超其应有的破裂尺度, 具有了一定的前震预警功能。

(3) 5 月 18—20 日发生的 7 次 $M \geq 3.0$ 前震震源机制解一致性较好, 体现为走向、倾角、滑动角均在较小范围内波动, 也为断层即将进入失稳阶段提供了重要的参考指标。

综上所述, 本文依据马瑾院士团队在室内岩石实验得出的亚失稳阶段特征和断层协同化理论, 以中小地震活动强弱为应变释放的主要标志, 初步将 2021 年漾濞 $M_s6.4$ 地震的协同化进程分为 3 个阶段: 2020 年 5—12 月为 MO 段, 应变释放点产生, 小震频次缓慢增加; 2021 年 1—5 月 17 日为 OA 段, 应变释放点扩展和增多, 小震频次逐步增多, 地震活动性增强, 且 3 级以上主释放点明显增加, 且向主震震中收拢, 后期成南北向带状扩展; 5 月 18—21 日为 AB 段, 中小地震活动快速增长并最终连接, 甚至重叠, 且出现 4 级以上地震集中和快速释放。其亚失稳过程则应是从 2021 年 1 月至 5 月 17 日为准静态阶段, 而 5 月 18 至 21 日为准动态阶段。

漾濞 $M_s6.4$ 地震之所以呈现出较为明显的亚失稳演化特征, 可能与其为走滑型震源机制为主有关, 这与室内实验条件和马瑾等 (2014) 研究过的老虎山—毛毛山也属走滑机制相同, 其余类型的地震能否识别到这一过程还需进一步观测和研究。

需要说明的是, 本文研判仅仅依据地震活动性参数, 加之时间较为仓促, 因而还只是一个初步尝试和探索, 今后还需综合同期部署的 GNSS、基岩地温和其它地球物理前兆开展分析, 给出更为可信的结果或佐证。

参考文献:

- 陈鵬. 1978. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数[J]. 地球物理学报, 21(2): 142–159.
- 冯建刚, 蒋长胜, 韩立波, 等. 2012. 甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析[J]. 地震学报, 34(5): 646–658 + 727.
- 侯金欣, 王宝善. 2017. 2014年鲁甸 $M_s6.5$ 地震前后地震活动性[J]. 地球物理学报, 60(4): 1446–1456.
- 李钦祖, 靳雅敏, 于新昌. 1982. 华北地区的震源机制与地壳应力场[J]. 地震学报, 4(1): 55–61.
- 李全林. 1979. 地震频度—震级关系的时空扫描[M]. 北京: 地震出版社.
- 李世念, 马瑾, 汲云涛, 等. 2021. 亚失稳准动态及同震过程变形场时空演化特征——实验与分析[J]. 地震地质, 43(1): 1–19.
- 刘丽芳, 李志海, 蒋长胜. 2012. 云南地区地震目录最小完整性震级研究[J]. 地震研究, 35(4): 491–499.
- 马瑾, SHERMAN S I, 郭彦双. 2012. 地震前亚失稳应力状态的识别——以 5° 拐折断层变形温度场演化的实验为例[J]. 中国科学: 地球科学, 42(5): 633–645.
- 马瑾, 郭彦双. 2014. 失稳前断层加速协同化的实验室证据和地震实例[J]. 地震地质, 36(3): 547–561.
- 马瑾, 马胜利, 刘力强. 1995. 地震前异常的阶段性及其空间分布特征[J]. 地震地质, 17(4): 363–371.
- 马瑾. 2016. 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起[J]. 科学通报, 61(S1): 409–414.
- 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.
- 宋春燕. 2017. 断裂亚失稳阶段及失稳部位特征的初步研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 宋德熹, 时文勇. 2005. 断层总面积理论在中强地震预测中的应用[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), (3): 200–204.
- 王凯英, 郭彦双, 冯向东. 2018. 应力时空演化揭示出的汶川地震前亚失稳过程[J]. 地球物理学报, 61(5): 1883–1890.
- 尹祥础, 李世恩, 李红, 等. 1987. 从断裂力学观点探讨 b 值的物理实质[J]. 地震学报, 4(4): 364–374 + 444.
- 宇津德治. 1981. 地震学[M]. 北京: 地震出版社.
- 泽仁志玛, 刁桂苓, 李志雄, 等. 2020. 大震前显示的地震震源机制趋于一致的变化[J]. 地震, 30(1): 108–114.
- 张华英, 杨建文, 高琼. 2021. 2021年漾濞 $M_s6.4$ 地震前兆异常分析[J]. 华南地震, 41(2): 176–182.
- Aki K. 1965. Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\log N = a - bM$ and its Confidence Limits[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 43: 237–239.
- Gutenberg B, Richter C F. 1945. Frequency of earthquake in California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 34(4): 185–188.
- Huang Q, Sobolev G A, Nagao T. 2001. Characteristics of the seismic quiescence and activation patterns before the $M = 7.2$ Kobe earthquake, January 17, 1995[J]. Tectonophysics, 337(1): 99–116.
- Lei X I, Masuda K. 2004. Detailed analysis of acoustic emission activity during catastrophic fracture of faults in rock[J]. Journal of Structural Geology, 26(2): 247–258.
- Mogi K. 1962. Study of the elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquakes phenomena [J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 40: 125–173.
- Nanjo K Z, Hirata N, Obara K, et al. 2012. Decade – scale decrease in b value prior to the $M9$ – class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes [J]. Geophysical Research Letters, 39(20): 20304.
- Rydelek P A, Sacks I S. 1989. Testing the completeness of earthquake catalogues and the hypothesis of self – similarity [J]. Nature, 337(6204): 251–253.
- Scholtz C H. 1968. The frequency – magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 58(1): 1909–1911.
- Smith W. 1981. The b – value as an earthquake precursor[J]. Nature, 289(5794): 136–139.
- Wells B D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974–1002.
- Zhu L, 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.

Seismic Characteristics in the Meta – instability Stage of the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ Earthquake

HUANG Ya, CHEN Jia, JIN Mingpei, LI Xiaobin, CHA Wenjian, WANG Jun, LI Sihai
(Dali Center of China Earthquake Science Experimental Site, Dali 671000, Yunnan, China)

Abstract

In this paper, using the observation data of the dense network composed of meta – instability array and 10 fixed stations, we carry out the temporal and spatial scanning of seismic parameters such as frequency, total fault area, and b – value of the complete magnitude before the Yangbi $M_s6.4$ earthquake in northwest Yunnan province. We find that there are obvious common characteristics such as increasing frequency, increasing total fault area and low b – value before the instability of the $M > 4.0$ earthquakes in the study area. The coordinated evolution of faults with small-earthquake activity as the indication before the Yangbi $M_s6.4$ earthquake can be roughly divided into three stages: ①the period from May to December 2020, in which strain-release points appeared, and the frequency of small earthquakes increased slowly; ②the period from January to May 17, 2021, in which the strain-release points increased and extended, and the frequency of small earthquakes increased, and the number of $M > 3.0$ earthquakes increased significantly, and their epicenters migrated to the epicenter of the main earthquake. At the end of the stage, the strain-release points expanded into a belt. ③the period from May 18 to 21, 2021, in which the strain-release points linked together and even overlapped. And small and medium earthquakes increased rapidly, and the $M > 4.0$ earthquakes concentrated. We conclude that the meta – instability process should consist of the static phase (from January to May 17, 2021), and the dynamic phase (from May 18 to 20, 2021). Finally we discuss the causes of the meta – instability and the questions in the division of the meta – instability process.

Keywords: fault meta – instability stage; synergism process; seismicity; the Yangbi $M_s6.4$ earthquake; meta – instability dense array; northwest Yunnan