

# 2021年云南漾濞 $M_s$ 6.4地震序列特征及 强余震判定\*

赵小艳, 王光明, 张 潜, 贺素歌, 樊文杰, 刘自凤

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 利用云南地震台网观测资料, 对2021年漾濞 $M_s$ 6.4地震序列的时空演化特征进行分析, 结果表明: 漾濞地震序列的空间展布可分为4段, 且余震活动衰减非常迅速。通过分析历史地震序列类型、 $h$ 值、等待时间法、累计频次曲线、初动方向等, 判断漾濞 $M_s$ 6.4地震序列为前震-主震-余震型。利用云南地区6级地震最大余震发震时间统计和震级差分布特征分析, 认为漾濞 $M_s$ 6.4地震最大余震已经发生。最后讨论了漾濞地震序列4级余震偏多的现象及可能的原因。

**关键词:** 漾濞 $M_s$ 6.4地震; 地震序列; 强余震

**中图分类号:** P315.72      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2021)03-0309-11

## 0 引言

2021年5月21日21时48分在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。在漾濞 $M_s$ 6.4地震前, 5月18、19日漾濞地区接连发生2次 $M_L \geq 4.0$ 地震, 并伴随发生一些 $M_L < 4.0$ 小震活动。尤其是在5月21日晚上, 接连发生 $M_L$ 4.7(20时56分)、 $M_s$ 5.6(21时21分)、 $M_s$ 6.4(21时48分)地震。根据地震序列类型定义(蒋海昆等, 2015), 漾濞 $M_s$ 6.4地震序列为典型的前震-主震-余震型地震。但是对于震前的4级震群, 目前还没有一个科学手段可以前瞻性地区分其为普通震群还是前震震群(Trugman, Ross, 2019)。蒋海昆和周少辉(2016, 2020)对比了不同前震定义条件下前震序列的共性特征, 对几种主要的前震机理及主要的前震识别方法进行了简要综述, 认为尽管前震的比例可能比我们已知或预想的要多, 针对前震已开展了许多研究, 但迄今为止尚无有效的前震识别方法。

漾濞地震序列4级前震震群发生后, 序列最大地震震级快速升级,  $M_s$ 6.4地震后, 震区是否会有更大地震发生或震区后续地震趋势将如何发展,

引人关注。本文介绍了2021年漾濞 $M_s$ 6.4地震的基本参数、序列时空展布特征, 并根据《震后趋势判定参考指南》(蒋海昆等, 2015), 基于构造及历史地震活动类比、地震目录、序列活动特征和数字地震波形数据等, 对地震序列类型及其强余震活动特征进行分析。根据震级定义, 面波震级 $M_s$ 是用基式中长周期地震仪器记录的两水平向地震面波质点运动最大值测定, 并将该面波震级作为对外发布的震级, 因此本文对于 $M_L \geq 4.5$ 地震, 采用 $M_s$ 。但由于历史地震序列中绝大部分地震震级较小, 地震目录给出的震级为地方性震级 $M_L$ , 因此为了对比分析的一致性, 对于 $M_L \leq 4.5$ 地震, 采用 $M_L$ 。

## 1 漾濞 $M_s$ 6.4地震序列基本概况

### 1.1 地震序列概况

漾濞 $M_s$ 6.4地震是滇西北丽江、大理地区自1996年丽江7.0级地震之后截至目前发生的最大地震。大理地区监测能力相对较强, 漾濞地震震中50 km范围内有3个测震台, 100 km范围内有9个测震台。据云南地震台提供的全省监控能力分布情况, 震区基本可保证 $M_L \geq 1.2$ 地震的完整性。

\* 收稿日期: 2021-07-01.

基金项目: 2019-2023年预防和处置地震灾害能力建设重点任务和地震局震情跟踪项目联合资助.

第一作者简介: 赵小艳(1982-), 副研究员, 主要从事地震活动性工作. E-mail: 47535120@qq.com.

为了改善余震监测与定位能力,漾濞  $M_s6.4$  地震后,云南省地震局和中国地震局第一监测中心在漾濞地震序列周边增设了 5 个流动测震台(图 1),并于 5 月 23 日相继投入运行。

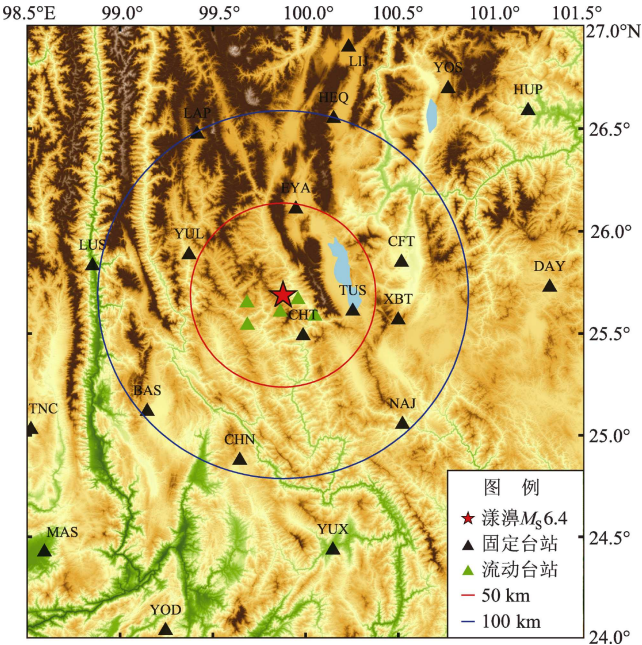


图 1 漾濞  $M_s6.4$  地震序列震中及其附近地震台站分布图

Fig. 1 Distribution of earthquake – monitoring stations around the epicenter of the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake

根据云南地震台网定位结果,漾濞  $M_s6.4$  地震序列从 2021 年 5 月 18 日 21 时 39 分的  $M_L4.7$  地震开始,截至 6 月 30 日,共发生  $M_L\geq 4.0$  地震 31 次(表 1),其中  $M_L4.0\sim 4.9$  地震 26 次,  $M_s5.0\sim 5.9$  地震 4 次,  $M_s\geq 6.0$  地震 1 次。 $M_s6.4$  主震后,共发生  $M_L\geq 4.0$  余震 23 次,余震次数较多。漾濞  $M_s6.4$  地震的前震序列最大强度为  $M_s5.6$ ,截至 6 月 30 日最大强余震为  $M_s5.2$ ,与主震震级差为 1.2。

1.2 最小完整性震级  $M_c$

根据  $h$  值计算要求(蒋海昆等, 2015),大震后第一个 24 h 内发生地震的最小完备性震级  $M_c$  的确定最为重要。因此取 5 月 21 日 21 时 48 分  $M_s6.4$  地震后 24 h 内的地震计算  $M_c$ 。计算方法采用最大似然法计算得到  $G-R$  关系的震级-频度分布(FMD),以 0.1 级为震级间隔,统计不同震级档的地震频次  $N$ 。使用 Zmap 程序(Wiemer, 2001; Woessner, Wiemer, 2005)中内置的 GFT

表 1 漾濞  $M_s6.4$  地震序列目录 ( $M_L\geq 4.0$ )

Tab. 1 Catalogue of the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake sequence ( $M_L\geq 4.0$ )

编号	发震时间			震中位置/(°)		$M_L$	$M_S$	震源深度/km
	年-月-日	时:分:秒		$\varphi_N$	$\lambda_E$			
1	2021-05-18	21:39:35		25.65	99.93	4.7	4.2	8
2	2021-05-19	20:05:56		25.66	99.92	4.8	4.4	8
3	2021-05-21	20:56:02		25.63	99.93	4.7	4.2	8
4	2021-05-21	21:21:25		25.63	99.92	5.9	5.6	10
5	2021-05-21	21:21:57		25.63	99.96	4.7	4.2	10
6	2021-05-21	21:22:35		25.60	99.98	4.3	3.7	10
7	2021-05-21	21:23:43		25.66	99.97	4.9	4.5	8
8	2021-05-21	21:48:34		25.67	99.87	6.6	6.4	8
9	2021-05-21	21:53:47		25.62	99.98	4.6	4.1	9
10	2021-05-21	21:55:28		25.67	99.89	5.4	5.0	8
11	2021-05-21	21:56:37		25.64	99.95	5.3	4.9	8
12	2021-05-21	22:02:00		25.66	99.89	4.6	4.1	8
13	2021-05-21	22:03:36		25.57	99.93	4.4	3.9	8
14	2021-05-21	22:15:16		25.59	99.96	4.5	4.0	8
15	2021-05-21	22:31:10		25.59	99.97	5.6	5.2	8
16	2021-05-21	22:59:37		25.63	99.94	4.1	3.5	8
17	2021-05-21	23:13:53		25.64	99.94	4.3	3.8	8
18	2021-05-21	23:22:49		25.66	99.88	4.1	3.5	8
19	2021-05-21	23:23:34		25.60	99.98	4.9	4.5	8
20	2021-05-22	00:51:41		25.70	99.87	4.5	4.0	8
21	2021-05-22	01:36:06		25.62	99.94	4.1	3.5	9
22	2021-05-22	02:28:43		25.62	99.91	4.4	3.9	10
23	2021-05-22	04:10:57		25.62	99.95	4.0	3.4	12
23	2021-05-22	08:36:46		25.68	99.90	4.0	3.4	12
25	2021-05-22	09:48:00		25.67	99.90	4.5	4.0	12
26	2021-05-22	20:14:36		25.61	99.93	4.8	4.4	10
27	2021-05-27	19:52:46		25.74	99.95	4.6	4.1	12
28	2021-05-27	23:03:57		25.69	99.89	4.1	3.6	12
29	2021-05-28	20:43:18		25.56	99.92	4.0	3.4	13
30	2021-06-05	06:12:22		25.59	99.98	4.0	3.4	11
31	2021-06-29	06:41:28		25.75	99.99	4.1	3.6	9

方法(Wiemer, Wyss, 2000) 计算得到主震发生后 24 h 内的  $M_c$  为 1.2 (图 2), 与云南地震台网提供的全省监控能力分布情况相符。

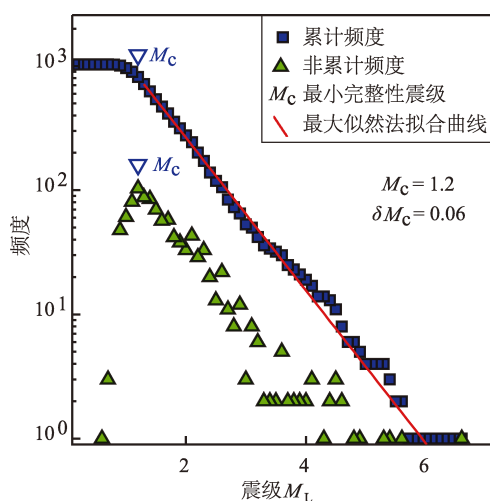


图2 漾濞  $M_s6.4$  地震后 24 h 内  
震级-频度关系曲线

Fig. 2 Magnitude-frequency curve of earthquakes  
in 24 hours after the  $M_s6.4$  mainshock

从图3中  $M_c$  随时间变化可以看出,在主震发生后的数小时内,由于余震的丛集造成波形的叠加,  $M_c$  处于相对不稳定状态,直至5月23日,由于震区5个流动测震台的相继加入台网定位后,  $M_c$  大幅下降。5月26日以后,  $M_c$  相对稳定在0.45,之后略有下降,6月以后相对稳定在0.43左右,且其误差范围大幅缩小(图3)。

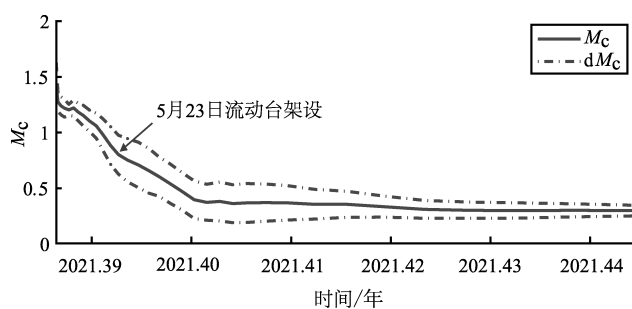


图3 漾濞  $M_s6.4$  地震序列最小完整性  
震级随时间变化

Fig. 3  $M_c$  - time curve of the Yangbi  
 $M_s6.4$  earthquake sequence

## 2 漾濞 $M_s6.4$ 地震序列时空统计特征

### 2.1 空间展布特征

漾濞地震序列位于维西—乔后断裂的SW侧,重定位后整体呈北西—东南向展布,长轴走向约

为  $135^\circ$ ,全长约 25 km。但从西北往东南,震中分布呈现西北端窄、东南端宽的扫帚状展布,最窄处约 3 km,最宽处约 8 km (图4)。从几个较大地震的震中分布看,  $M_s5.6$  前震位于整个地震序列的中部,  $M_s6.4$  主震位于序列的北西端,而随后的2个主要余震都先后发生在主震东南侧,  $M_s5.0$  余震位于  $M_s5.6$  前震位置附近,  $M_s5.2$  余震距离主震最远,位于整个地震序列靠东南端。主震之后绝大多数  $M_L \geq 3.5$  余震都发生在整个序列的东南端。因此,漾濞地震的主震震源破裂具有主要从北西端向东南方向单侧扩展的破裂特征。

以  $M_s6.4$  主震、 $M_s5.6$  前震和  $M_s5.2$  余震位置为界,可将整个漾濞地震序列的空间分布划分为特征明显不同的4段(图4):①  $M_s6.4$  主震西北侧的段落长约 9 km,以主震发生后的零散余震为主,地震活动强度不高,称为零散余震段;②  $M_s6.4$  主震和  $M_s5.6$  前震之间的地震序列长约 7.5 km,是地震数量相对多且分布最为集中的段落,主要集中在走向约  $135^\circ$  的北西—东南向条带上,5月18日至  $M_s5.6$  前震及同震阶段的地震都主要分布在该段,为此次地震序列发震断层能量集中释放的段落,震源机制显示为走滑运动为主,称为前震集中段;③  $M_s5.6$  前震和  $M_s5.2$  余震之间的地

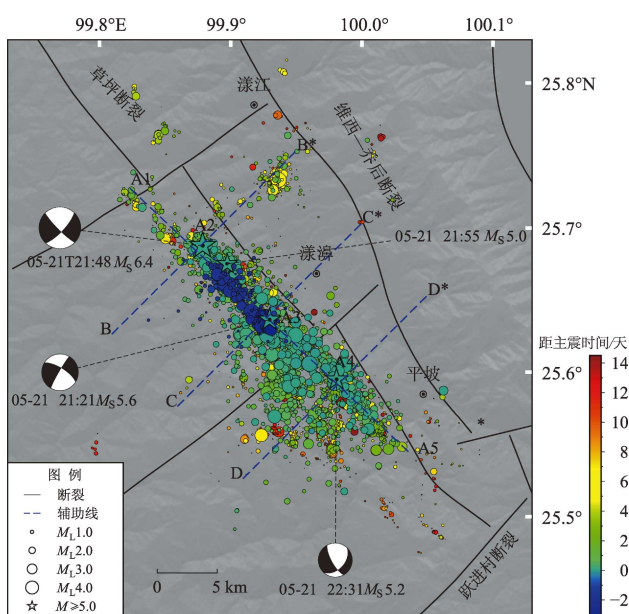


图4 漾濞地震序列重定位后的震中分布图

Fig. 4 Epicenter distribution of the relocated  
Yangbi earthquake sequence

震序列段落长约 7 km, 主要出现在同震与震后阶段, 地震由北西向东南扩展, 可能是发震断层进一步向东南破裂的反映, 震中在该段出现了向南的分支和发散现象, 震源机制显示出兼具明显正断层成分的走滑性质, 称为余震集中段; ④ $M_s5.2$  余震东南侧的地震序列长约 7 km, 主要出现在同震与震后阶段, 同样具有向南和东南发散的特点, 称为余震发散区。值得注意的是, 在主震后 6~7 d, 主震北东侧偏离序列主活跃区约 7 km 的位置, 还发生一组长轴走向约  $190^\circ$  相对独立的余震序列, 最大地震为 5 月 27 日  $M_L4.6$  地震。

## 2.2 时间分布特征

漾濞  $M_s6.4$  地震前有明显的前震活动, 其前震序列活动大致可以分为 3 个阶段 (图 5a): I 阶段从 5 月 18 日 21 时  $M_s4.2$  地震开始, 持续时间约 6 h, 表现为地震相对稀疏; II 阶段从 5 月 19 日 20 时  $M_s4.4$  地震开始, 持续约 30 h, 地震次数相比 I 阶段明显增多; III 阶段从 5 月 21 日 20 时  $M_s4.4$  地震开始, 到主震发生, 共计约 52 min, 时间短, 震级上升, 累计频度呈近似垂线上升 (图 5b)。

从上述序列完整性分析可知, 在分析该地震序列时至少采用  $M_L \geq 1.2$  地震才能客观刻画序列的时空特征, 因此采用云南地震台网 (含流动测

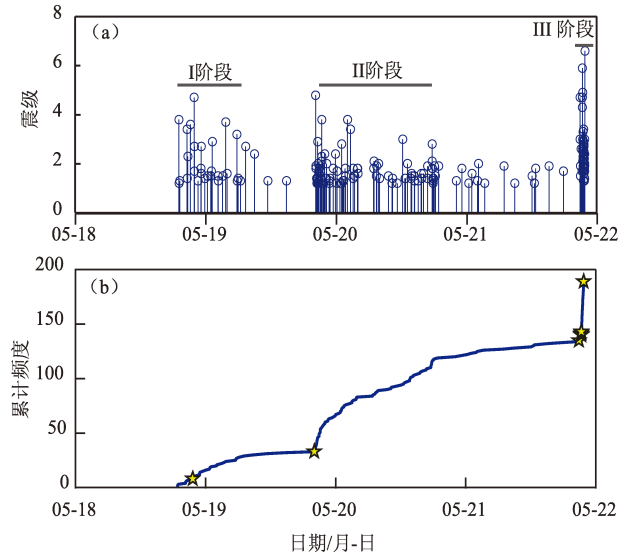


图 5 漾濞  $M_s6.4$  地震前震序列  $M-t$  (a) 和累计频度曲线 (b)

Fig. 5  $M-t$  curve (a) and cumulative number (b) of foreshocks before the Yangbi  $M_s6.4$  mainshock

震台) 获得的漾濞地震序列  $M_L \geq 1.2$  地震序列目录。由图 6 可见, 漾濞地震的余震活动衰减非常迅速, 2 次  $M_s \geq 5.0$  余震集中发生在主震后 1 h 内, 其中最大余震  $M_s5.2$  发生在主震后 43 min。绝大多数  $M_L \geq 4.0$  余震发生在主震后 2 d 内。

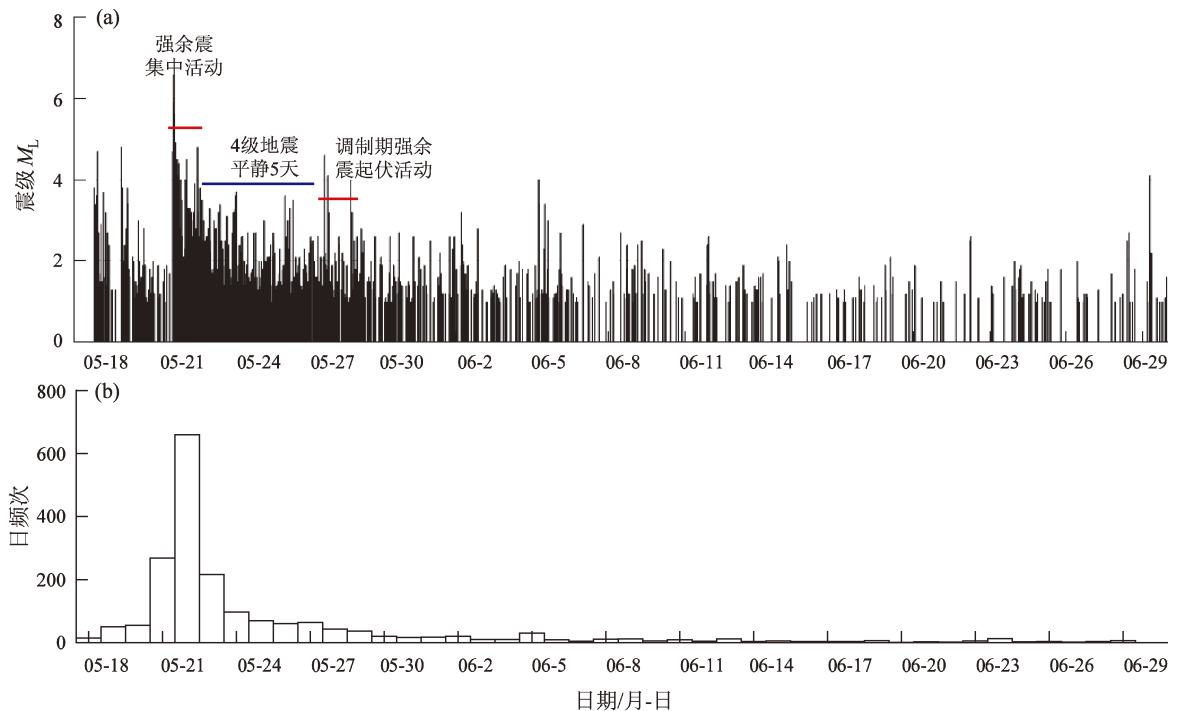


图 6 漾濞  $M_s6.4$  地震序列余震  $M-t$  (a) 和日频度曲线 (b)

Fig. 6  $M-t$  (a) and daily frequency (b) of aftershocks of the Yangbi  $M_s6.4$  sequence



5月23—26日,以 $M_L\leq 4.0$ 地震活动为主,小震活动频度依然较高,维持在80~100次。 $M_L\geq 4.0$ 地震平静约5 d后,在5月27日在月潮调制期内(秦保燕等,1986),发生了3次 $M_L\geq 4.0$ 地震,之后震级及频度迅速降低, $M_L\geq 4.0$ 地震零星发生(图6)。

3 地震序列类型、强余震的早期趋势判断

3.1 地震序列类型判定

地震序列类型判定是震后趋势预测的重要内容和基础性工作,根据蒋海昆等(2015)提出的序列类型判断方法,本文从构造及历史地震活动类比、地震目录、序列活动特征和数字地震波形资料等方面,对漾濞地震序列进行研判。

3.1.1 构造及历史地震活动类比

地震序列类型可能与区域构造运动形式和深部介质环境有关,其空间分布往往具有一定的区

域稳定性,因而历史地震活动类比是确定序列类型的重要方法之一。漾濞 $M_s6.4$ 地震发生在中甸—大理地震带,从1965年至今该地震带共发生23组31次5级以上地震,其中主震—余震型18次,占78%;多震型5组10次,占22%。从不同地震序列类型的空间分布看,以 $26^\circ\text{N}$ 为界,其南北地震序列类型完全不同,北段均为主震—余震型,南段为维西—乔后断裂和红河断裂北段,地震序列类型较为复杂,多震型序列较多。

1965年以来维西—乔后断裂和红河断裂北段附近共发生7组5级以上地震,可分为两个时间丛:1975—1978年和2013—2021年,地震序列类型非常复杂,主震—余震型地震仅有1次,多震型有5组,7组地震中有2组地震有前震序列。该构造的地震序列类型随时间几乎没有发生改变。类比该构造的历史地震序列,给漾濞 $M_s6.4$ 地震序列类型判断带来了巨大的挑战。但整体而言,整个中甸—大理地震带、维西—乔后断裂和红河断裂北段附近没有6级多震型历史地震序列。

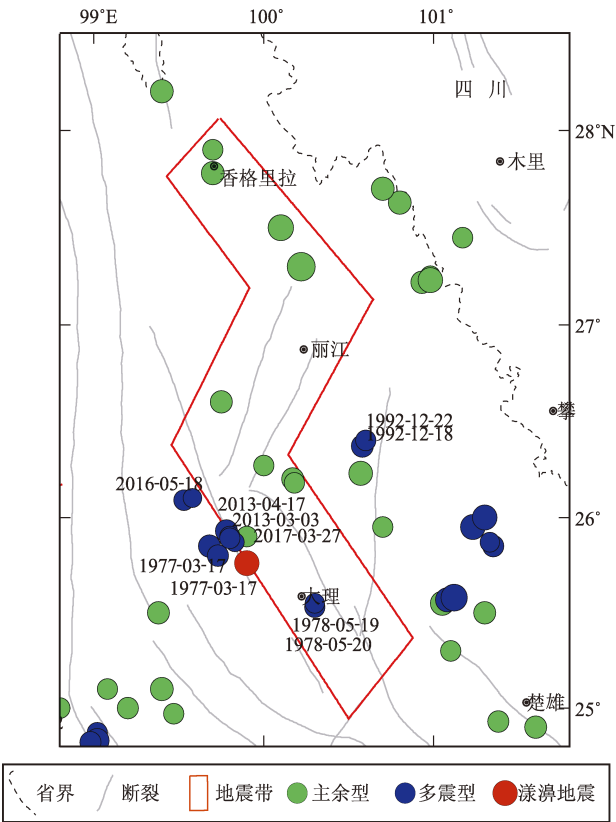


图7 中甸—大理地震带历史地震序列类型分布图  
Fig. 7 Sequence types in the Zhongdian - Dali earthquake zone

表2 维西—乔后断裂带附近历史地震序列类型				
Tab. 2 Sequence types near the Weixi - Qiaohou fault				
编号	发震日期	参考地名	震级	地震序列类型
1	1975-09-04	漾濞北	5.0	主震—余震型
2	1977-03-17	漾濞西北	5.4	多震型
	1977-03-17		5.2	
3	1978-05-19	下关	5.0	前震—多震型
	1978-05-20		4.8	
4	2013-03-03	洱源	5.5	多震型
	2013-04-17		5.0	
5	2016-05-18	云龙	5.0	多震型
	2016-05-18		4.6	
6	2017-03-27	漾濞	4.7	多震型
	2017-03-27		5.1	
7	2021-05-21	漾濞	6.4	前震—主震—余震型

3.1.2 基于地震目录的序列类型判定

地震序列类型判定更多的是从序列自身及其频次或能量演化特征入手,进行定性或半定量的判定。主要方法有 $h$ 值、等待时间法、蠕变曲线、显著地震频次随时间变化等。

(1)  $h$ 值。根据余震频度衰减呈指数函数的大

森公式, 计算衰减系数  $h$  值是大于 1、等于、或小于 1, 据此判断地震序列是余震序列还是前震序列, 前者还可进一步计算后续最大强余震震级 (刘正荣等, 1979, 1984)。采用漾濞  $M_s 6.4$  地震后 24 h 内地震的最小完整性震级  $M_L \geq 1.2$ , 计算余震  $h$  值。震后 3 d 由于资料长度有限, 以数小时为最小时间单位计算  $h$  值, 再将其折算到以“日”为单位的  $h$  值。图 8 计算结果显示: 震后 3 d  $h$  值为 1.70, 4~9 d  $h$  值为 1.87, 其后略有下降, 12~18 d  $h$  值稳定在 1.72, 之后一直为 1.67。 $M_s 6.4$  地震发生后 37 d 的  $h$  值结果显示, 其波动特征与中国大陆 75 次地震序列“前几天波动较大, 一般 4~8 天之后趋于稳定”的特征一致 (蒋海昆, 周少辉, 2020), 但总体变化不大,  $h$  值相对稳定。根据  $h$  值定义, 第一天的频度对其计算结果起决定作用, 表明  $M_s 6.4$  地震后第一天的小震频度足够高, 较大余震均在震后当天发生。根据不同时段平均  $h$  值的序列类型分类判据表 (蒋海昆等, 2015), 可判断漾濞  $M_s 6.4$  地震序列为主震-余震型。

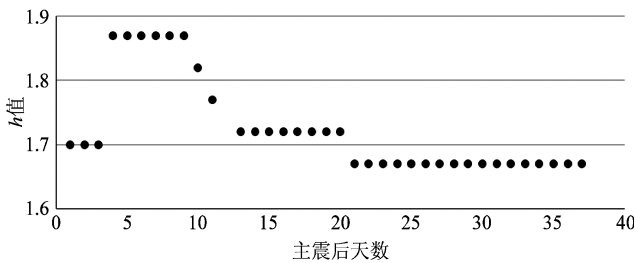


图 8 漾濞  $M_s 6.4$  地震序列  $h$  值  
Fig. 8  $h$ -value of the Yangbi  $M_s 6.4$  earthquake sequence

(2) 等待时间法。设每组中的强余震震级按发震先后为  $M_1, M_2, \dots, M_n$ , 其相应发震时间为  $t_1, t_2, \dots, t_n$ 。计算  $\Delta t_i = t_{(i+1)} - t_i$ , 在双对数坐标 ( $\lg t, \lg \Delta t$ ) 中给出各强余震位置, 通过最小二乘法计算其线性拟合, 如果数据点大体上呈直线分布, 则地震序列类型为主震-余震型; 如果双对数坐标图上的点分布紊乱, 很难甚至不可能成直线分布, 则应注意后续存在发生另一次或几次大震的可能 (谷继成等, 1979, 1987)。

利用漾濞  $M_s 6.4$  地震后  $M_L \geq 4.0$  地震, 根据发震时间及其时间间隔, 得到如图 9 所示结果,

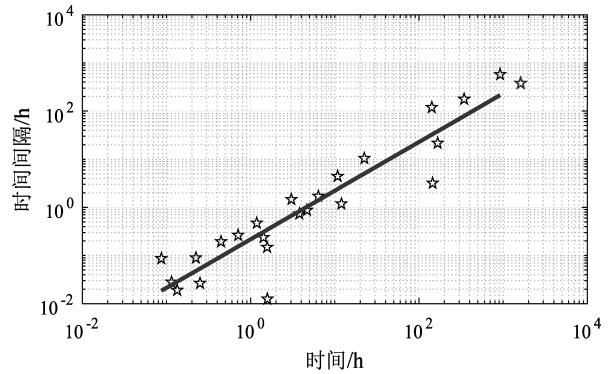


图 9 漾濞  $M_s 6.4$  地震  $dt-t$  曲线 ( $M_L \geq 4.0$ )  
Fig. 9  $dt-t$  curve of the Yangbi  $M_s 6.4$  earthquake sequence ( $M_L \geq 4.0$ )

数据点大体上呈直线分布, 表明漾濞  $M_s 6.4$  地震后  $M_L \geq 4.0$  地震时间间隔正常, 序列为主震-余震型。

(3) 显著地震频次随时间变化。序列中显著地震的累计频次  $\sum N$  随时间  $t$  的变化大致可分为 3 种形态: 幂函数、指数函数及线性函数。若  $\sum N - t$  为幂函数和线性函数, 则序列可能为主震-余震型; 若  $\sum N - t$  为指数函数, 则序列可能为多震型 (刁守中等, 1995)。由于 5 月 29 日以后序列 3 级以上余震时间间隔越来越长 (图 10), 因此选取 5 月 21—28 日  $M_L \geq 3.0$  地震累计频次曲线, 结果显示其为幂函数, 表明漾濞  $M_s 6.4$  地震序列为主震-余震型。

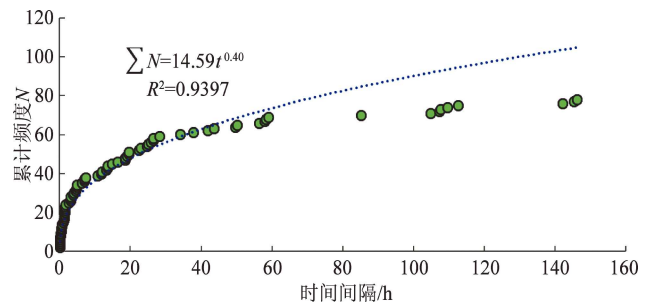


图 10 2021 年 5 月 21—28 日漾濞  $M_s 6.4$  地震  $M_L \geq 3.0$  地震序列累计频度曲线

Fig. 10 Cumulative frequency of the Yangbi  $M_s 6.4$  earthquake sequence ( $M_L \geq 3.0$ , 21-28 May)

### 3.1.3 基于数字地震波形资料的序列类型判定

数字地震波方法能直接获得震源信息, 近年

来数字地震学用于序列类型判断的震例和经验越来越多 (Wiemer, 2001; 崔子健等, 2012; 黄浩, 付虹, 2014), 最简单而有效的方法是持续考察某个或某几个地震台记录的地震波垂直向初动方向是否一致。初动方向反映了一个区域小震应力场的特征, 一般无明显规律。但随着大震前应力的集中, 会出现小震应力场有规律的分布, 初动方向趋于一致。大震过后, 小震应力场的规律性消失, 初动呈现紊乱状态 (陈鵬, 1978)。因此, 利用初动矛盾符号一致性, 可以作为判定序列后面

是否还有较大地震的指标。

利用 2021 年 5 月 18 日以来全国编目网观测报告, 分析了位于漾濞  $M_s6.4$  地震序列东南侧的岔河台 (CHT, 距离主震 23 km) 和东侧的团山台 (TUS, 距离主震 40 km) 记录的垂直向波形的初动和到时 (图 11)。结果显示: 地震前, 2 个台站记录的初动方向一致, 岔河台均向下, 团山台均向上; 地震后, 2 个台站记录的初动一致性变差, 表明序列发生更大地震的可能性不大, 序列类型为主震-余震型。

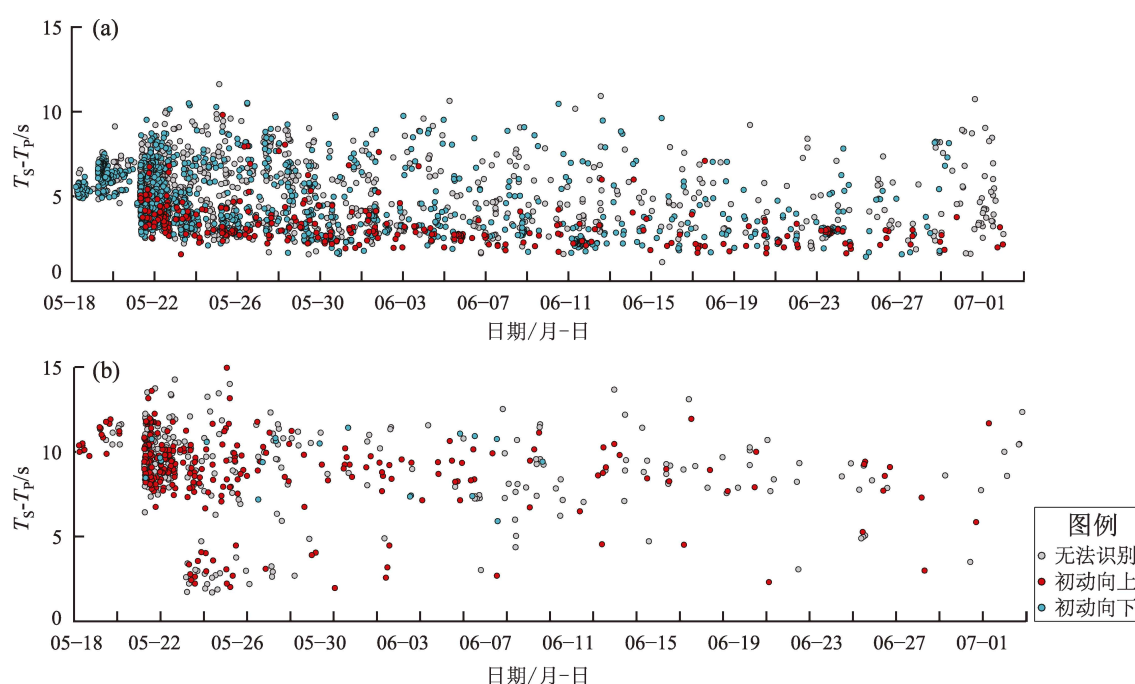


图 11 岔河台 (a) 和团山台 (b) 记录的序列 P 波初动方向和 S-P 到时差

Fig. 11 Directions of P-wave first motion signs, time-diff. of S-wave recorded by CHT (a) and TUS (b) Stations

### 3.2 地震最大余震判定

一般而言, 序列最大余震震级  $M_1$  与主震震级  $M_0$  大致成正比。根据巴特定律 (Bath, 1965), 序列主震震级  $M_0$  与最大余震震级  $M_1$  的震级差  $\Delta M = M_0 - M_1$  为一个常数, 即  $\Delta M = 1.2$ , 但  $\Delta M$  有一定的区域差异。苏有锦和赵小艳 (2008) 对全球 8 级地震序列  $\Delta M$  研究结果认为, 板内地震  $\Delta M$  高于板缘地震。如果已知一个地区地震序列的  $\Delta M$ , 当该区发生主震震级为  $M_0$ , 可用  $\Delta M$  值对该序列的最大余震震级作出基本估计。

表 3 给出 1966 年以来云南地区 23 次 6.0 ~ 6.9

级地震序列最大余震及其发生时间, 结果显示,  $\Delta M$  波动范围较大, 在 0.7 ~ 2.4,  $\Delta M = 1.34 \pm 0.27$ , 但区域特征并不明确。61% 的最大余震发生在主震后 1 d 内、1 ~ 7 d、7 ~ 30 d 和超过 30 天时间段内的概率相等, 均为 13% (图 12), 可见最大余震发生在主震当天的概率最高。 $M_s6.4$  地震后至 6 月 30 日, 序列最大  $M_s5.2$ , 余震为发生在主震后 47 min, 震级差  $\Delta M$  为 1.2。根据历史震例类比和序列自身活动特征, 分析认为漾濞  $M_s6.4$  地震最大余震已经发生, 即为 5 月 21 日 22 时 31 分的  $M_s5.2$  地震。

表 3 云南地区 6.0 ~ 6.9 级地震序列参数

Tab. 3 Parameters of the  $M6.0 \sim 6.9$  earthquake sequences in Yunnan

编号	发震日期	震中	$M_0$	主震震源机制	余震区长宽比	$M_L$	时间间隔/d	$\Delta M$	4 级频度
1	1966-02-05	东川	6.5	—	—	5.3	0.75	1.2	7
2	1966-02-13	东川	6.2	—	—	5.2	4.71	1.0	2
3	1966-09-28	中甸	6.4	—	—	4.6	0.41	1.8	8
4	1970-02-07	普洱	6.2	—	—	5.5	0.02	0.7	6
5	1971-04-28	普洱	6.7	—	—	4.5	47.87	2.2	4
6	1971-09-14	普洱	6.2	—	—	3.8	1.16	2.4	0
7	1973-08-16	普洱	6.3	—	—	5.2	0.09	1.1	7
8	1979-03-15	普洱	6.8	右旋逆断	—	4.7	1.09	2.1	9
9	1981-09-19	普洱	6.0	—	—	4.1	0.00	1.9	1
10	1984-04-24	孟连	6.3	左旋走滑	1.3	5.4	0.21	0.9	27
11	1985-04-18	禄劝	6.2	右旋走滑	—	5.1	13.13	1.1	15
12	1993-01-27	普洱	6.3	右旋走滑	3.2	5.3	0.35	1.0	3
13	1995/10-24	武定	6.5	左旋走滑	1.3	5.6	0.79	0.9	100
14	1998/11-19	宁蒗	6.2	右旋走滑	3.0	5.4	44.20	0.8	1
15	2000-01-15	姚安	6.5	右旋走滑	3.1	4.6	0.00	1.9	4
16	2001-10-27	永胜	6.0	右旋走滑	2.8	4.1	0.02	1.9	1
17	2003-07-21	大姚	6.2	右旋走滑	7.5	4.9	22.03	1.3	7
18	2003-10-16	大姚	6.1	右旋走滑	4.0	5.1	15.24	1.0	10
19	2007-06-03	宁洱	6.4	右旋走滑	5.2	5.1	0.22	1.3	5
20	2009-07-09	姚安	6.0	右旋走滑	6.5	5.2	0.90	0.8	5
21	2014-05-30	盈江	6.1	右旋走滑	1.8	5.0	0.00	1.1	5
22	2014-08-03	鲁甸	6.5	左旋走滑	2.1	4.7	0.46	1.8	8
23	2014-10-07	景谷	6.6	右旋走滑	6.0	5.9	59.85	0.7	9
24	2021-05-21	漾濞	6.4	右旋走滑	2.5	5.2	0.02	1.2	22

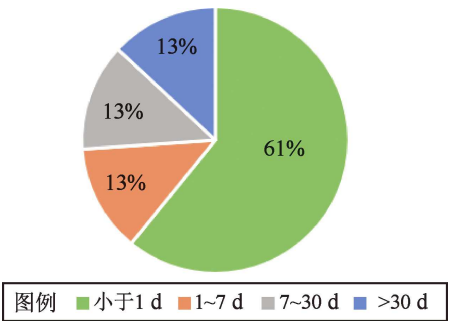


图 12 云南地区 6.0 ~ 6.9 级地震最大余震发生时间统计

Fig. 12 Statistics of the occurrence time of the biggest aftershocks of the  $M6.0 \sim 6.9$  mainshocks in Yunnan

4 讨论

漾濞  $M_s6.4$  地震序列在主震后发生  $M_L \geq 4.0$  余震 22 次, 余震次数较多。吕晓健等 (2010) 年对中国大陆 7.0 ~ 7.9 级地震序列强余震频次进行研究时, 定义  $M_s \geq 5.0$  余震为强余震。漾濞地震主震震级为  $M_s6.4$ , 因此定义其强余震为  $M_L \geq 4.0$  地震。

目前关于余震趋势跟踪, 其研究重点在序列类型判定、强余震发生时间预测、地点判定和震级估计等 4 个方面, 关于强余震频度的研究主要集中在余震随时间的衰减规律, 即修正的大森公式。



对余震频度的研究及其解释相对较少, 缺乏一定的震例积累。

已有研究表明, 余震活动水平具有区域差异, 如果主震震级相同, 板间地震的余震比板内地震的多得多, 余震发生的可能性也高, 衰减速度可能受震源区细微条件的影响, 而活动度的高低则受宏观应变积累速率大小的影响 (松浦律子, 1995)。

余震频度与主震震源深度有一定关系, 浅源地震的强余震频度比中、深源地震的显著偏多 (苏有锦等, 2014)。Persh 和 Houston (2004) 研究认为余震发生率与主震深度存在明显的依赖关系, 在 350 ~ 550 km 深度上主震的余震发生率特别低。但由于云南地震均发生在上地壳, 震源深度对余震频度的影响研究意义不大。

余震频度和强度与余震区的展布特征有一定关系。苏有锦等 (2014) 分析全球 7 级地震时认为, 余震分布很规则、余震区长轴方向很明显、余震区长宽比值  $L/W$  较大, 即余震区或震源破裂区线性度较高, 其余震活动频度和最大余震水平较低, 反之, 余震分布很不规则、余震区长轴方向不明显、余震区长宽比值  $L/W$  比值较小, 其余震活动频度和最大余震水平较高。李保昆等 (2009) 对比研究 1970 年通海地震序列与 1976 年唐山地震序列的余震强度和频度, 认为余震分布区域的长宽比越大, 则震源体越接近于一个面, 余震的衰减比较快, 强余震比较少而小。

本文利用云南地区地震目录粗略估算了部分地震序列余震区的长宽比 (表 3), 20 世纪七八十年代由于单台无经纬度地震较多, 无法计算其长宽比, 2003 年以后的地震余震区的长宽比根据已发表文献精定位的结果进行估算。结果表明, 云南 6 级地震序列余震区的长宽比最小为 1.3 (1984 年孟连西 6.3 级、1995 年武定 6.5 级地震), 2014 年盈江、鲁甸 6.5 级地震序列余震区的长宽比也比较小, 但主要由余震呈共轭分布所致 (赵小艳等, 2014, 徐甫坤等, 2015)。余震区的长宽比较小的 1984 年孟连西 6.3 级、1995 年武定 6.5 级地震序列, 强余震频次较高, 与李保昆等 (2009)、苏有锦等 (2014) 的研究结果一致。重定位后漾濞地震序列震中整体余震相对集中的段落长约 20 km、

最宽约 8 km, 长宽比约为 2.5, 相比云南大多数地震序列, 余震区长宽比值较小。这可能是漾濞地震强余震频度较高的可能原因之一。

吕晓健等 (2010) 对中国大陆 7 级地震及其强余震频次研究结果显示, 强余震频次与地震类型有关, 与走滑型地震相比非走滑型的强余震偏多。表 3 中给出了 16 次地震的震源机制错动类型, 13 次地震为右旋走滑, 仅有 3 次为左旋走滑 (1984 孟连西 6.3 级、1995 武定 6.5 级和 2014 鲁甸 6.5 级地震), 统计样本偏少。这可能是由云南特殊的构造应力场造成的, 云南地区 67% 的地震为走滑型地震 (孙业君等, 2017)。3 次左旋走滑地震中, 1984 孟连西 6.3 级和 1995 武定 6.5 级地震强余震明显偏多, 但云南余震频次较多是否与主震错断类型有关, 尚待更多震例积累以进一步研究。

对于苏有锦等 (2014) 研究全球 7 级地震余震频次发现, 浅源主震 - 余震型序列有较高强余震频次的序列只占少数 (不到 20%)。云南地区 24 个 6 级地震序列中有 3 个序列强余震频次较高, 占 12.5%, 比例不高, 可能与强余震的定义有一定的关系。

在日常短临跟踪过程中, 有地震预报工作者认为余震次数偏多可能是区域应力较高的表现之一, 对区域后续强震预测有一定指示意义。如 1995 年 10 月 24 日武定 6.5 级地震后, 5 级以上余震多达 10 次, 3 个月后发生了 1997 年丽江 7.0 级地震。针对漾濞  $M_s6.4$  地震序列较大震级余震偏多的问题, 可能需要结合地震错断类型、区域应力场、地震静态及动态库仑破裂应力随时间变化特征等综合分析。

## 5 结论

(1) 本文对漾濞  $M_s6.4$  地震后序列 24 h 地震完整性震级的评估结果显示, 余震序列的最小完整性震级为  $M_L1.2$ , 随着震区 5 个流动测震台的相继加入台网定位后,  $M_c$  大幅的下降。

(2) 重定位后漾濞地震序列震中整体呈北西—东南向展布, 长轴走向约为  $135^\circ$ , 全长约 25 km。从西北往东南, 震中分布呈现西北端窄、

东南端宽的扫帚状展布, 将其空间分布划分为特征明显不同的 4 段: 零散余震段、前震集中段、余震集中段和余震发散区。

(3) 漾濞  $M_s6.4$  地震前震序列活动持续 3 d, 但余震活动衰减非常迅速, 2 次  $M \geq 5.0$  余震集中活动在震后 1 h, 绝大多数  $M_L \geq 4.0$  余震发生在主震后 2 d。主震 7 d 后, 震群小震频度即衰减到 10 次以下。

(4) 基于构造及历史地震活动类比、地震目录、序列活动特征和数字地震波形资料, 对漾濞  $M_s6.4$  地震序列类型进行了分析判断。结果显示, 中甸—大理地震带以及维西—乔后断裂和红河断裂北段地震序列类型非常复杂, 以多震型地震序列为主, 但并没有 6 级多震型历史震例; 漾濞  $M_s6.4$  地震后  $h$  值  $\geq 1$  且相对稳定, 整体波动不大, 表明  $M_s6.4$  地震后第一天的小震频度足够高; 等待时间法显示漾濞  $M_s6.4$  地震后  $M_L \geq 4.0$  地震发震时间和时间间隔呈直线分布, 表明漾濞  $M_s6.4$  地震后  $M_L \geq 4.0$  地震时间间隔正常, 为主震—余震型; 漾濞  $M_s6.4$  地震后  $M_L \geq 3.0$  地震累计频次曲线显示其为幂函数; 震中附近岔河台和团山台记录的垂直向波形的初动显示漾濞  $M_s6.4$  地震后, 初动一致性变差, 表明序列发生更大地震的可能性不大, 以上分析均表明漾濞  $M_s6.4$  地震的序列类型为主震—余震型。

(5) 根据云南地区 6 级地震最大余震发生时间统计和震级差分布特征, 分析认为漾濞  $M_s6.4$  地震最大余震已经发生, 即为 5 月 21 日 22 时 31 分  $M_s5.2$  地震。

本文主要图件和绘图程序来自 Zmap 程序包, 地震重定位使用了拉蒙特—多尔蒂地球观测站 Felix Waldhuaser 教授的双差定位程序。中国地震局测震预报学科组、中国地震台网中心孟令媛研究员、张小涛高级工程师、四川省地震局龙锋高级工程师以及中国地震台网中心预报部对本次地震序列跟踪研判及后续序列趋势分析的帮助和指导, 在此一并表示衷心感谢。

## 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.

崔子健, 李志雄, 陈章立, 等. 2012. 判别小震群序列类型的新方法研究——谱振幅相关分析法[J]. 地球物理学报, 55(5): 1718—1724.

刁守中, 王红卫, 华爱军. 1995. 中国大陆地区地震序列显著地震的时间分布特征[J]. 中国地震, 11(3): 315—326.

谷继成, 谢小碧, 赵莉. 1979. 强余震的时间分布特征及其理论解释[J]. 地球物理学报, 22(1): 32—46.

谷继成. 1987. 地震类型的判别与强余震的预测[J]. 地震, 7(6): 1—9.

黄浩, 付虹. 2014. 2018 年以来滇西地区地震序列的谱振幅相关系数变化特征[J]. 地震学报, 36(4): 631—639.

蒋海昆, 杨马陵, 付虹, 等. 2015. 震后趋势判定参考指南[M]. 北京: 地震出版社, 2—3.

蒋海昆, 周少辉. 2020. 前震: 预测意义及识别方法[J]. 地震地磁观测与研究, 41(5): 222—225.

李保昆, 刁桂苓, Avi Shapira, 等. 2009. 唐山与通海两大地震的强余震的差别及其原因探讨[J]. 西北地震学报, 31(2): 161—166.

刘正荣, 钱兆霞, 王维清. 1979. 前震的一个标志——地震频度的衰减[J]. 地震研究, 2(4): 1—9.

刘正荣. 1984. 根据地震频度衰减预报地震的工作细则[J]. 地震, 4(1): 35—38.

吕晓健, 高孟潭, 郝平, 等. 2010. 中国大陆 7 级大地震强余震震级和空间分布特征[J]. 地震, 30(2): 61—70.

秦保燕, 汪进, 姚立珣, 等. 1986. 由调制小震法初探中、强地震时空强预报[J]. 地壳变形与地震, 6(4): 293—304.

松浦律子. 1997. 有关余震衰减的研究[J]. 国际地震动态, (6): 27—34.

苏有锦, 李忠华, 赵小艳, 等. 2014. 全球 7 级以上地震序列研究[M]. 昆明: 云南大学出版社.

苏有锦, 赵小艳. 2008. 全球 8 级地震序列的特征研究[J]. 地震研究, 31(4): 408—416.

孙业君, 赵小艳, 黄耘, 等. 2017. 云南地区震源机制及应力场特征[J]. 地震地质, 39(2): 390—407.

徐甫坤, 张彦琪, 苏有锦. 2015. 2014 年云南盈江  $M_s6.1$  地震前后序列分布差异研究[J]. 地震研究, 38(4): 525—534.

赵小艳, 韩立波, 徐甫坤. 2014. 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震序列跟踪分析研究[J]. 地震研究, 37(4): 508—514.

周少辉, 蒋海昆. 2016. 前震研究进展综述[J]. 地震, 36(3): 1—13.

Bath M. 1965. Lateral inhomogeneities of the upper mantle[J]. Tectonophysics, 2(6): 483—514.

Persh S E, Houston H. 2004. Strongly depth—dependent aftershock production in deeper earthquakes[J]. Bull Seis Soc Am, 94(5): 1808—1816.

Trugman D T, Ross Z E. 2019. Pervasive foreshock activity across southern California[J]. Geophysical Research Letters, 46(15): 8772—8781.

Wiemer S, Wyss M. 2000. Minimum magnitude of complete reporting in

- earthquake catalogs; examples from Alaska, the Western United States, and Japan[J]. Bull Seis Soc Am, 90(4):859–869.
- Wiemer S. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP[J]. Seismological Research Letters, 72(3):373–382.
- Woessner J, Wiemer S. 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty [J]. Bull Seis Soc Am, 95(2):684–698.

## Characteristics of the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ Earthquake Sequence and Prediction of Its Strong Aftershocks

ZHAO Xiaoyan, WANG Guangming, ZHANG Qian, HE Suge, FAN Wenjie, LIU Zifeng  
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

On the basis of the data of the 2021 Yangbi  $M_s6.4$  earthquake sequence recorded by the Yunnan Earthquake Observation Network, we analyze the temporal and spatial evolution characteristics of the sequence. The spatial distribution of the sequence can be divided into 4 sections and the aftershock – activity attenuate rapidly. Through the analysis of the type of the historical earthquake sequences in this area, the method of  $h$  – value, the method of  $dt$  –  $t$ , the method of the cumulative frequency, and first – motion signs of the earthquake wave, we determine that the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake sequence belongs to foreshock – mainshock – aftershock type. According to the statistics of the original time of the historical strongest aftershocks in Yunnan, and the distribution characteristics of the magnitude differences, we conclude that the strongest aftershock of the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake has occurred. Finally we discuss the high frequency of  $M_L \geq 4.0$  aftershocks in the sequence and the possible reasons.

**Keywords:** the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake; seismic sequences; strong aftershocks