

2021年云南漾濞 M_s 6.4 地震前测震学异常回顾*

刘自凤, 孙楠, 王光明, 彭关灵, 李永莉, 张天宇, 毛慧玲, 赵小艳

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 为了完善云南地区测震学预测指标体系, 对2021年云南漾濞 M_s 6.4 地震前平静类、增强类、条带类、参数类测震学异常和前震活动特征进行回顾总结, 得到以下主要认识: ①地震前测震学异常以不同时空尺度、不同震级档地震的平静为主, 条带交汇现象也十分显著, 震中附近震源机制趋于一致, 2012—2017年滇西北地区5级地震丛集发生, 且自2020年以来小滇西及邻区4级地震出现增强活动, 以中长期异常为主, 临震阶段震源区中小地震密集发生构成前震。②根据震前提出的测震学异常做出的中长期、较大区域的震情趋势判定是正确的, 但临震前的前震识别工作因过多依赖以往震例经验而存在不足。

关键词: 测震学异常; 震源机制一致性; 地震条带; 前震序列; 漾濞 M_s 6.4 地震

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2021)03-0348-09

0 引言

广义的地震预报包含地震预测与预报两个方面。地震预报研究一直是全世界关注的问题, 虽然人们对“地震能否预报”争论不休, 但多次大地震的震例研究表明, 前兆异常会或多或少地出现在地震孕育过程的不同阶段。国内外学者针对活动断裂的行为方式、大地震复发规律、活断层分段与大地震活动、大地震复发的概率预测和地震孕育过程与机理等都提出了不同的理论模型, 促进了地震预报的发展(吴中海, 赵根模, 2013)。目前, 地震预测仍然处于经验预测阶段, 概率预测模型应用甚广, 从模型建立到检验, 众多学者做了大量研究(Swets, 1973; Molchan, 1990; Jordan, 2006; Petersen *et al.*, 2007; Holliday *et al.*, 2007; 蒋长胜, 赵屹喆, 2009), 获得了许多重要认识。付虹等(2020)通过震例回溯提出在强震跟踪过程中, 未来震中未知时, 用测震学异常方法追踪危险区的可信度较高。在云南日常震情跟踪中, 测震学异常方法在多次强震危险

地点预测实践中发挥了积极作用(刘丽芳, 付虹, 2005; 李永莉等, 2007; 曹晓丽, 毛德培, 2012; 付虹等, 2015; 刘月, 邵志刚, 2016)。

2021年5月21日云南漾濞 M_s 6.4 地震前, 多项测震学异常均表明滇西地区存在发生6级左右地震的危险性。为深入认识漾濞地震前的测震学异常, 完善云南地区测震学预测指标体系, 本文根据测震学资料, 结合已初步建成的云南地区测震学预测指标体系, 对漾濞 M_s 6.4 地震前出现的测震学异常进行回顾分析。

1 资料选取及方法简介

1.1 资料选取

1.1.1 地震目录选取及最小完备性震级分析

本文选用的地震目录分为两部分: 中国地震局监测预报司预报管理处整编的中国 $M_s \geq 5.0$ 地震目录和云南地震台网提供的小震目录。考虑到全国5级地震目录完备性, 本文采用1965年以来的地震目录计算中国大陆5级地震平静时间。皇甫岗和李忠华(2010)提出, 在1900年以前

* 收稿日期: 2021-07-10.

基金项目: 云南省地震局科技专项(2020ZX02)和地震预测预警运维子课题——2021年全国地震大形势跟踪研判联合资助。

第一作者简介: 刘自凤(1986-), 高级工程师, 主要从事地震活动性分析和数字地震学研究。

E-mail: annefine@126.com.

云南地区历史地震记载有大量的遗漏, 而从 20 世纪 30 年代开始 5 级中等地震记录比较完整, 因此云南 5 级地震活动分析可采用 1930 年以来的 5 级地震目录; 但历史地震记载主要遗漏地区是滇西南地区, 在经济发达、人口稠密的昆明、通海和大理一带的历史地震记载相对较早, 20 世纪以来 5 级地震遗漏相对也较少, 因此除滇西南外其它区域的 5 级地震活动分析可选取 1900 年以来的 5 级地震目录。通过计算得知 1985 年 7 月以来云南小震目录最小完备性震级为 2.2, 随着地震监测能力的提升, 目前漾濞地区的最小完备性震级可达 1.0。后续开展的各类异常分析资料的选取时段均充分考虑了云南不同地区、不同时段的最小完备性震级。

1.1.2 震源机制解

本文采用的震源机制解由 CAP 方法反演所得。为了保证震源机制结果的可靠性, 选取 $M_s \geq 3.0$ 地震的震源机制进行一致性参数反演。为了排除序列余震对震源机制一致性参数的影响, 剔除了 5 级地震序列余震的震源机制解, 最终获得 2012 年 1 月 1 日至 2021 年 5 月 18 日云南及其邻区 541 次中小地震的震源机制节面解, 其中 3.0 ~ 3.9 级地震 334 次, 4.0 ~ 4.9 级地震 182 次, 5.0 ~ 5.9 级地震 22 次, 6.0 ~ 6.9 级地震 3 次。

1.2 计算方法原理简介

震源机制一致性可作为描述地震活动性的新参数 (陈鵬, 1978), 是衡量震源释放应力场与区域应力场一致性程度的定量指标, 也是判断地震危险性的重要判据之一 (Michael, 1984, 1987)。日常震情跟踪中, 主要采用 Michael 等 (1990) 提出的叠加应力场反演方法 (Superposition Stress In-

version, 简称 SSI) 反演震源机制一致性。该方法通过在均匀应力场上叠加扰动来模拟非均匀应力场的分布, 并获得 3 个主应力轴 S_1 、 S_2 、 S_3 (分别代表压应力轴、中等应力轴和张应力轴) 的空间分布及相对大小 $\varphi = (S_2 - S_3)/(S_1 - S_3)$ 以及反演方差。其反演方差是 misfit 角度 (单个地震的滑动矢量与在假设应力张量作用下产生的理论滑动矢量之间的夹角) 与其平均数之差的平方和的平均数。当方差 < 0.1 时, 意味着可以用 1 个统一的应力张量来解释观测到的震源机制解, 也可以理解为该区域的应力场是均匀的, 震源机制趋于一致; 当方差 > 0.2 时, 表明该区域的应力场在时间和空间上具有非均匀性, 或者说该区域的震源机制比较紊乱 (Lu *et al*, 1997)。实际震情跟踪结果证明, 通过上述方法获得的区域应力张量是符合观测事实的, 国内外众多学者基于该方法在强震危险性判断、序列跟踪工作中, 开展了大量的研究 (Michael *et al*, 1990; 张致伟等, 2015a, b; 李金等, 2015; 段梦乔, 赵翠萍, 2019; 刘自凤等, 2019, 2020; 张华英等, 2021; Liu *et al*, 2019), 获得了更要认识。因此, 日常震情跟踪中我们采用 Zmap 软件包 (Weimer, Malone, 2001) 集成的叠加应力场反演方法计算震源机制一致性参数, 进一步分析震源机制一致性参数的时空演化特征。

2 中长期异常分析

2.1 平静类异常

2.1.1 中国大陆 5 级地震平静打破

本文统计了 1965 年以来中国大陆 5 级地震显著平静打破后云南的首发 6 级强震, 见表 1。

表 1 中国大陆 5 级地震显著平静打破后云南首发 6 级地震统计

Tab. 1 Statistics for the first $M_s \geq 6.0$ earthquakes in Yunnan after breaking significant seismic quiescence of $M_s \geq 5.0$ earthquakes in Chinese mainland

平静时间段	平静时间/d	打破地震	云南首发 6 级地震	时间间隔/d
1968-05-15—1968-12-22	221	1968-12-22 青海 5.4 级地震	1970-01-05 通海 7.8 级地震	379
1969-02-12—1969-07-26	164	1969-07-26 广东 6.4 级地震	1970-01-05 通海 7.8 级地震	163
1984-04-16—1984-11-23	221	1984-11-23 宁夏 5.3 级地震	1985-04-18 禄劝 6.2 级地震	146
2001-12-08—2002-06-04	178	2002-06-04 西藏 5.7 级地震	2003-07-21 大姚 6.2 级地震	412
2007-07-20—2008-01-09	173	2008-01-09 西藏 6.9 级地震	2009-07-09 姚安 6.0 级地震	547
2020-07-23—2021-03-19	239	2021-03-19 西藏 6.1 级地震	2021-05-21 漾濞 6.4 级地震	63

由表 1 可见, 中国大陆 5 级地震显著平静打破后 1 年半内, 云南发生 $M_s \geq 6.0$ 地震的概率为 100%, 而且 2000 年以来的 2 组平静打破地震均发生在西藏, 云南后续首发 6 级地震均发生在滇西地区, 这可能是因为滇西北与西藏属于同一活动地块, 所以地震活动增强具有准同步性。2021 年 3 月 19 日西藏那曲市比如县 $M_s 6.1$ 地震打破了自 2020 年 7 月 23 日西藏那曲市尼玛县 $M_s 6.6$ 地震以来中国大陆长达 239 d 的 5 级地震显著平静。而 1965 年以来中国大陆 5 级地震平均时间间隔仅为 16 d, 可见此次平静异常显著。因此, 分析认为云南及邻区 1 年半内存在发生 6 级以上地震危险, 其中滇西地区发震危险性更大。

2.1.2 云南 6 级地震平静 6.6 a

自 1900 年以来, 云南 6 级地震平静时间超过 5 a 的震例仅有 6 组 (图 1)。6 组显著平静异常中, 平静打破地震的震级范围为 6.0 ~ 6.5, 震级不高, 这可能表明 6 级地震长期平静是云南中强地震弱活动的一种表现; 平静打破地震分布地区分段特征明显, 1945 年以前的 3 组平静打破地震均发生在滇南—滇西南地区, 而 1945 年以后的 3 组打破地震则全部发生在滇西地区, 这可能与 1945 年前后云南地区强震活动主体区域有关。在中国大陆 5 级地震长期平静打破的背景下, 自 2014 年 10 月 7 日景谷 6.6 级地震以来云南 6 级地震平静时间已经长达 6.6 a, 而云南 6 级地震平静异常指标为 3 a, 达到此异常指标后云南省地震局对此项异常进行持续跟踪, 平静超过 5 年仍未打破, 我们分析认为此次平静异常较为显著。因此, 我们认为此次 6 级地震平静由 6.5 级以上地震打破的可能性不大, 打破地震发生在滇西地区的可能性较大。

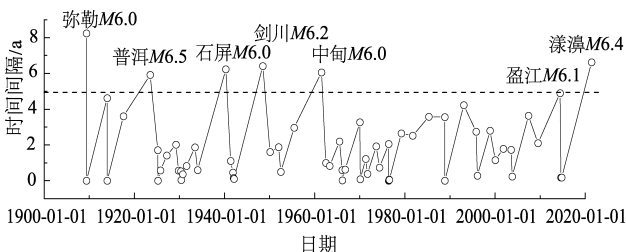


图 1 1900 年以来云南 $M_s \geq 6.0$ 地震时间间隔

Fig. 1 Time interval of $M_s \geq 6.0$ earthquakes in Yunnan since 1900

2.1.3 滇西北地区 4 级地震平静打破

中国大陆 5 级地震平静打破和云南 6 级地震长期平静的统计结果均表明滇西地区存在发生强震的背景, 与此同时滇西北地区也出现了 4 级地震长期平静打破的显著现象。滇西北地区 4 级地震平静时间超过 235 d 常作为该地区中强地震预测指标之一, 因此笔者对该地区 4 级地震平静时间超过 235 d 后发生的 5 级地震进行统计 (表 2), 结果显示 1985 年 7 月 1 日至 2019 年 11 月 30 日, 研究区平静时间超过 235 d 的异常共出现 15 次, 其中有 8 次平静打破后 1 a 内发生 $M_s \geq 5.0$ 地震, 对应率为 53%, 8 组对应地震中, 7 组包含 5.5 ~ 6.5 级地震 (即 6 级左右地震)。滇西北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震频繁发生, 但 2019 年 11 月 30 日四川盐源 $M_L 4.0$ 地震后迪庆至楚雄一带出现了长时间 4 级地震平静现象 (图 2)。2021 年 3 月 1 日洱源 $M_L 4.3$ 地震的发生打破了该地区 457 d 的 4 级地震长期平静, 专家分析认为滇西北地区发生 5 级以上地震的紧迫性增强, 并且发生 6 级左右地震的可能性大。平静打破 81 d 后, 5 月 21 日在平静区域内发生漾濞 $M_s 6.4$ 地震。

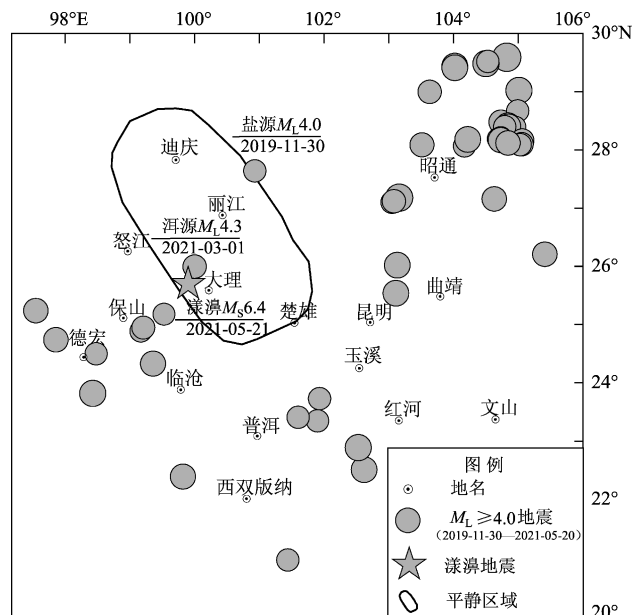


图 2 2019 年 11 月 30 日以来云南地区 $M_L \geq 4.0$ 地震震中分布及滇西北地区平静区域示意图

Fig. 2 Epicentral distribution of $M_L \geq 4.0$ earthquakes in Yunnan since Nov. 30, 2019 and the quiescent region in northwestern Yunnan

表2 滇西北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震平静时间超过 235 d 后对应 5 级地震统计

Tab. 2 Subsequent $M_s \geq 5$ earthquakes in northwestern Yunnan after more than 235 days of quiescence of the $M_L \geq 4.0$ earthquakes

编号	平静开始	平静结束	平静时间/d	对应地震	时间间隔/d
1	1987-05-18 5.5 级地震	1988-01-10 宁蒗 5.4 级地震	237	—	—
				1992-12-18 永胜 5.4 级地震	13
				1992-12-22 永胜 5.1 级地震	17
2	1992-04-10 4.2 级地震	1992-12-04 4.3 级地震	238	1993-02-01 大姚 5.3 级地震	59
				1993-07-17 中甸 5.6 级地震	225
3	1995-03-14 4.3 级地震	1996-02-03 丽江 7.0 级地震	326	—	—
4	1996-08-29 4.1 级地震	1997-06-04 4.0 级地震	279	1997-10-23 丽江 5.3 级地震	141
5	1999-05-01 4.2 级地震	2000-01-15 姚安 5.9 级地震	259	2000-01-15 姚安 6.5 级地震	—
6	2000-06-30 4.1 级地震	2001-03-13 4.0 级地震	328	2001-05-24 宁蒗—盐源 5.8 级地震	72
				2001-10-27 永胜 6.0 级地震	228
				2003-07-21 大姚 6.2 级地震	38
7	2002-07-25 4.0 级地震	2003-06-13 4.1 级地震	356	2003-10-16 大姚 6.1 级地震	125
				2003-08-21 盐源 5.0 级地震	69
8	2004-02-09 4.6 级地震	2004-12-26 双柏 5.0 级地震	321	—	—
9	2004-12-30 4.0 级地震	2006-01-28 4.8 级地震	394	—	—
10	2008-02-18 4.8 级地震	2009-04-14 4.4 级地震	323	2009-07-10 姚安 6.0 级地震	87
11	2010-01-01 4.6 级地震	2011-06-22 4.2 级地震	537	—	—
12	2011-10-16 4.0 级地震	2012-06-24 宁蒗 5.7 级地震	252	2013-03-03 洱源 5.5 级地震	266
				2013-04-17 洱源 5.0 级地震	297
				2013-03-03 洱源 5.5 级地震	9
13	2012-06-24 5.7 级地震	2013-02-22 4.3 级地震	243	2013-04-17 洱源 5.0 级地震	54
				2013-08-28 香格里拉 5.1 级地震	187
				2013-08-31 香格里拉 5.9 级地震	190
14	2017-03-27 5.1 级地震	2018-02-15 4.0 级地震	325	—	—
15	2018-02-15 4.0 级地震	2019-01-08 4.1 级地震	326	—	—
16	2019-11-30 4.8 级地震	2021-03-01 4.3 级地震	457	2021-05-21 漾濞 6.4 级地震	81

2.2 增强类异常

2.2.1 滇西北地区 5 级地震丛集活动

滇西北地区 4 级地震平静前，出现 5 级地震丛集活动。图 3 显示，1920 年以来滇西北地区 $M_s \geq 5.0$ 地震存在明显的平静—丛集的韵律特征，出现过 3 次超过 9 a 的平静时段后进入较长时间的丛集活动状态，丛集时段持续时间最短 8 a、最长 28 a，期间至少发生 3 次 $M_s \geq 6.0$ 地震，且每次丛集活动均以 $M_s \geq 6.0$ 地震结束。2001 年 10 月 27 日永胜 $M_s6.0$ 地震后，该地区 5 级地震就处于弱活动状态，期间零星发生 1 次 $M_s5.0$ 地震，10.7 年后，于 2012 年 6 月 24 日发生宁蒗 $M_s5.7$ 地震，之后又连续发生了 6 次 $M_s \geq 5.0$ 地震，最大震级为 5.9。

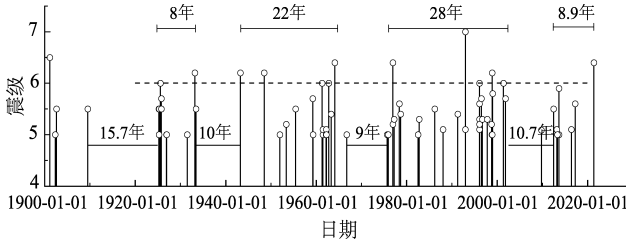


图3 1900年以来滇西北地区 $M_s \geq 5.0$ 地震 $M-t$ 图
Fig. 3 $M-t$ map of $M_s \geq 5.0$ earthquakes in northwestern Yunnan since 1900

这表明自 2012 年以来该地区进入了中强震丛集活动时段。2017 年 3 月 27 日漾濞 $M_s5.1$ 地震后研究区一直无 $M_s \geq 5.0$ 地震发生，但考虑到该地区 5

级地震丛集活动均以 $M_s \geq 6.0$ 地震结束以及此次丛集无 $M_s \geq 6.0$ 地震参与的特征,我们判定此次地震丛集活动还将持续,并且后续 6 级地震参与丛集活动的可能性大,最终在 4 a 多后发生此次漾濞 $M_s 6.4$ 地震。

2.2.2 小滇西及邻区 4 级地震活动增强

强震前地震活动增强是一种地震活动异常现象(贾潔昭等, 2020),小震集中活动或显著增强是区域应力增强的一种表现。2021 年初,我们注意到 2020 年以来小滇西及邻区 ($23.6^\circ \sim 26.1^\circ \text{N}$, $97.4^\circ \sim 100.2^\circ \text{E}$) 4 级地震活动增强,为了回溯分

析震例,我们以 12 个月为窗长、1 个月为步长统计了 1990 年以来小滇西及邻区 4 级地震频次,结果如图 4 所示。由图可见,即使小滇西及邻区出现 4 级地震增强,滇西地区不一定会发生 6 级以上地震。但 1990 年以来滇西地区 7 组 6 级地震前小滇西地区均出现 4 级地震增强,无一漏报。笔者结合王兰兰和刘丽芳(2004)、付虹等(2020)的研究结果,分析认为 4 级地震增强区域未来 1~3 a 内存在发生 6 级地震的危险性。本次漾濞地震发生在小滇西及邻区 4 级地震增强活动时段和增强区域边缘。

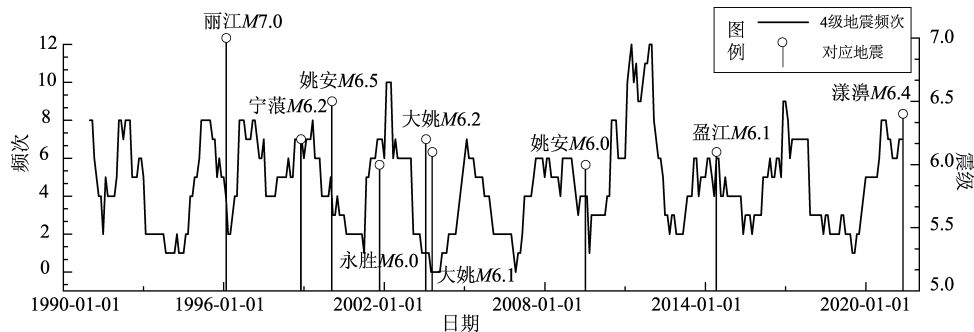


图 4 1990 年以来小滇西及邻区 $M_L \geq 4.0$ 地震滑动频次图 (窗长 12 个月、步长 1 个月)

Fig. 4 Sliding frequency of $M_L \geq 4.0$ earthquakes in the sub-area of western Yunnan and its adjacent areas since 1990 (window length is 12 months, step length is 1 month)

2.3 条带类异常

2019 年 7 月 21 日以来,滇西地区 $M_L \geq 4.0$ 地震震中沿盐源—大理—保山—德宏地区分布,形成 4 级地震条带,另外,2020 年 11 月 21 日至 2021 年 2 月 21 日 3 个月时间内 $M_s \geq 3.0$ 地震从滇东北至小滇西快速形成 3 级地震条带,两组条带在大理—保山—德宏地区交汇现象尤为显著(图 5)。据刘蒲雄和陈章立(1989)的研究结果可知,地震条带的形成可能反映了断裂带发生了幅度较大的定向运动或整体变形,断裂带的这种异常活动可能与强震的孕育直接有关,也可能反映了构造活动异常,据此分析认为两组条带及周边地区存在发生强震的背景。震例回溯结果表明,若条带发生交汇,则在交汇部位发生目标地震的情况较多,因此认为上述两组条带交汇区域发生强震的可能性较大。结合震例回溯结果和条带起始震级、长度和持续时间的定量计算结果,认为目标地震震级为 6 级左右。由图 5 可见,漾濞 $M_s 6.4$ 地震确实发生在条带交汇部位。

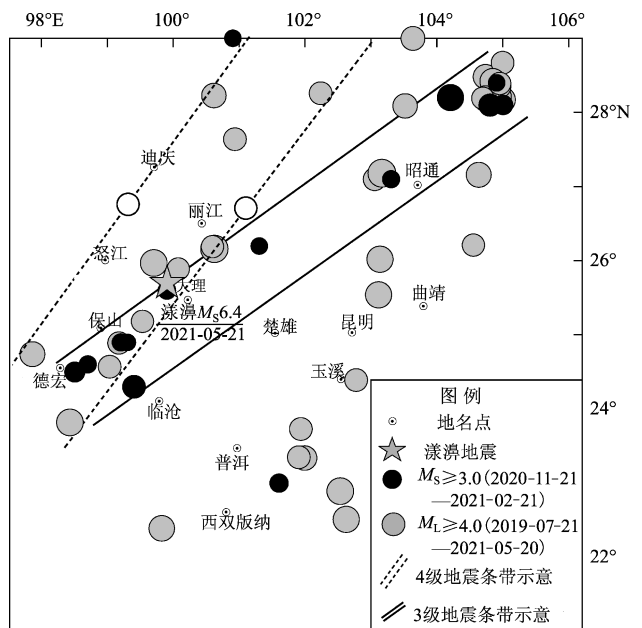


图 5 云南地区 $M_s \geq 3.0$ 、 $M_L \geq 4.0$ 地震震中分布和地震条带示意图

Fig. 5 Epicentral distribution and seismic belts of the $M_s \geq 3.0$ and $M_L \geq 4.0$ earthquakes in Yunnan

2.4 参数类异常

刘自凤等(2019)通过对滇西北地区震源机制一致性参数和 b 值研究后提出该地区程海断裂、龙蟠—乔后断裂及维西—乔后断裂南段及邻区可能是未来发生强震的潜在危险区。2015—2019年云南地区中小地震震源机制解应力张量方差空间反演结果(图6)显示,滇西地区的保山—大理—怒江一带、滇南—滇西南地区的玉溪—墨江—普洱一带震源机制一致性程度较高,表明这两个区域应力水平较高,仍然存在发生破坏性地震的危险(刘自凤等,2020)。在后续跟踪过程中,笔者发现滇西地区和滇南—滇西南地区的震源机制一致性参数异常区域持续发展。2015年1月至2021年4月云南地区震源机制一致性参数空间分布如图6所示。由图明显可见,漾濞地震前云南地区存在3个应力张量方差相对偏低的区域,分别为滇西地区的大理—保山—临沧一带、滇南—滇西南地区的普洱—玉溪—红河交界一带和滇东北昭通一带,应力张量方差越低则表示震源机制一致性程度越高(Michael, 1987; Michael *et al*, 1990)。上述3个地区震源机制一致性程度相对偏高,其中滇西地区异常尤为显著,震中附近小范围内应力张量方差低于0.05。根据以往震例回溯结果分析,认为上述3个区域存在发生6级以上地震的危险,震前震源一致性程度表明滇西异常区域的发震危险性更大。

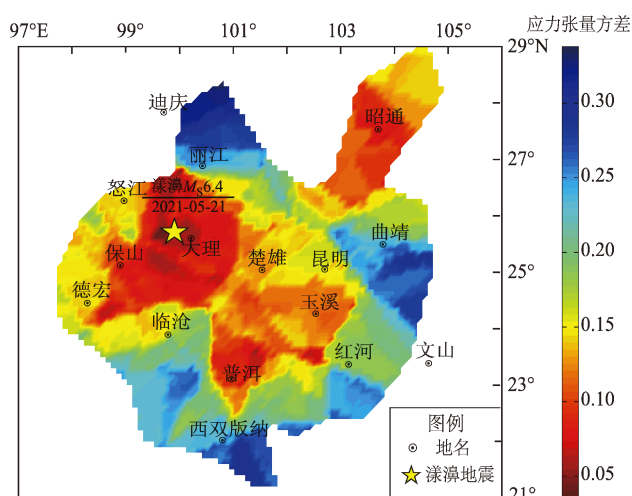


图6 云南地区中小地震震源机制一致性参数空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of the consistent parameters of focal mechanism of small and medium earthquakes in Yunnan

应力张量方差空间分布是研究时段震源机制一致性的总体反映,为了分析震源机制一致性参数随时间的演化特征,笔者计算了滇西异常区域震源机制一致性参数的时序变化(图7)。由图7可见,2020年6月以来该地区应力张量方差持续下降,反映了该区域震源机制从紊乱到一致的变化过程(李金等,2015)。2021年4月应力张量方差达阈值0.1,表明此时震源机制已经高度一致。根据对震源机制一致性与应力水平的关系,笔者认为此时该异常区的区域应力水平很高,有利于强震发生。图7显示,类似大幅下降变化在2017年3月27日漾濞 $M_s5.1$ 地震前出现过,两次地震前应力张量方差下降幅度大体相当,但是此次 $M_s6.4$ 地震前下降速率明显比2017年 $M_s5.1$ 地震前快。另外, $M_s6.4$ 地震前,应力张量方差下降到最低点之后,又出现转折回升趋势,万永革(2008)计算的1992年 Landers $M_w7.3$ 和1999年 Hector Mine $M_w7.1$ 地震前震中附近震源机制一致性参数时序变化也存在同样的现象,且刘自凤等(2020)指出2014年云南3次强震震源区及附近区域应力张量方差震前共性变化特征也是下降到最低点后转折回升。可见,强震前震源机制高度一致后又出现转折的现象较为常见。

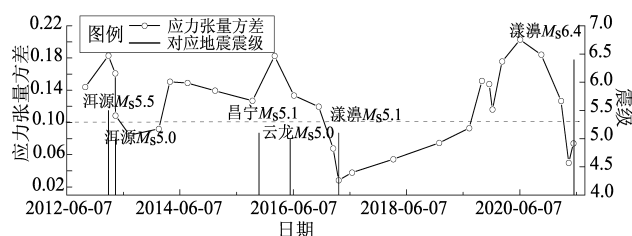


图7 滇西异常区域震源机制一致性参数时序图
Fig. 7 Time sequence of the consistent parameters of focal mechanism in the abnormal region of western Yunnan

3 短临异常分析

3.1 云南5级地震平静超过300 d

平静一般只作为背景异常,笔者分析云南5级地震达平均异常指标后打破地震的发震时间特征后发现,平静打破地震的优势发震时段为异常指标达标后3个月。因此认为,云南5级地震平静达标到异常指可作为短期异常进行跟踪,平静指标

为 300 d。2020 年 5 月 18 日巧家 $M_s 5.0$ 地震打破了云南 618 d 的 5 级地震平静, 之后又持续平静, 至 2021 年 3 月 14 日再次达到异常指标。笔者对 1930 年以来云南 5 级地震时间间隔进行统计发现, 超过 300 d 的 5 级地震平静共 36 组 (图 8), 其中 19 组平静达异常指标后在 3 个月内被打破, 概率为 53%; $M_s \geq 5.5$ 震例有 18 组 (图 8), 概率为 50%。因此, 我们认为云南 5 级地震平静在 6 月 14 日前由 $M_s \geq 5.5$ 地震打破的可能性较大。在平静异常持续 68 d 后, 由漾濞 $M_s 6.4$ 地震打破。

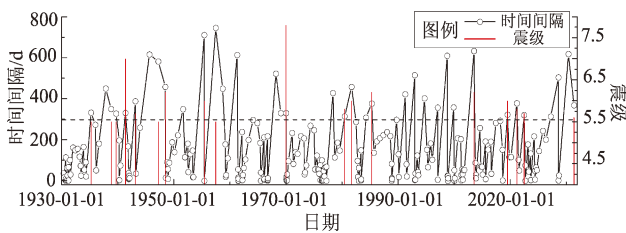


图 8 1930 年以来云南 $M_s \geq 5.0$ 地震时间间隔及打破地震 $M-t$ 图 ($M_s \geq 5.5$)

Fig. 8 Time intervals of $M_s \geq 5.0$ earthquakes in Yunnan since 1930 and $M-t$ map of breaking earthquakes ($M_s \geq 5.5$)

3.2 前震活动

根据云南地震台网提供的地震目录绘制的漾濞 $M_s 6.4$ 地震的前震震中分布图 (图 9) 和 $M-t$ 图 (图 10) 显示, 5 月 18 日以来漾濞中小地震时空丛集现象明显, 构成直接前震序列。图 9 显示, 前震发生在主震东南方向, 呈现出明显的空间迁移特征; 5 月 18 日在中小地震集中区 (下称集中区) 区中部发生一组小震, 最大震级达 $M_L 4.7$ ($M_s 4.2$), 之后 2 级以上地震强度迅速衰减; 5 月 19 日再次在集中区靠近主震一端发生 1 组小震, 最大震级达 $M_L 4.8$ ($M_s 4.4$)。图 10 显示, $M_L 4.8$ 地震后 3 级以上地震强度总体出现衰减, 但 1、2 级地震间歇性的丛集和平静现象比较显著且无衰减迹象, 5 月 20 日 9 时开始小震减少, 5 月 20 日 17 时 37 分开始 2 级地震平静近 29 h 后, 于 5 月 21 日 20 时 55 分开始密集发生 1 组中小地震, 震级不断增大。5 月 21 日至主震之前发生的小震向东南方向扩展, 主要分布在密集区中部及东南端, 在中小地震密集发生过程中发生了主震。

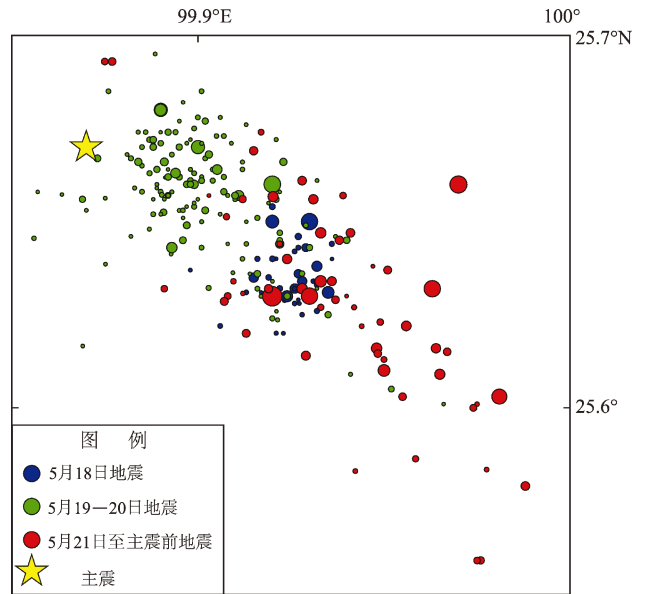


图 9 漾濞序列前震及主震震中分布

Fig. 9 Epicentral distribution of the foreshocks and the main shock of the Yangbi sequence

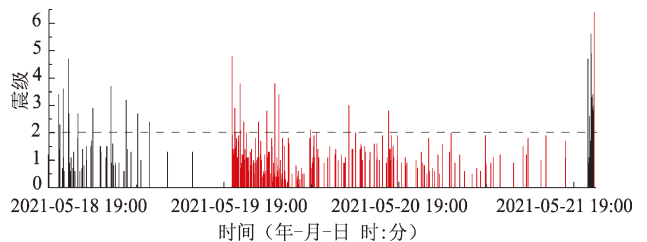


图 10 漾濞序列前震及主震 $M-t$ 图

Fig. 10 $M-t$ map of the foreshocks and the main shock of the Yangbi sequence

4 结论与讨论

本文通过回顾总结 2021 年 5 月 21 日漾濞地震前测震学异常和前震活动特征, 获得以下结论:

(1) 漾濞 $M_s 6.4$ 地震前, 云南地区的测震学异常以中长期为主, 在危险地点追踪方面发挥了积极作用。通过分析中国大陆 5 级地震长期平静被打破后云南首发 6 级地震和云南省内 6 级地震长期平静的打破地震的优势分布范围, 认为滇西地区存在发生 6 级以上地震的背景; 依据滇西北地区先后出现 5 级地震丛集、4 级地震长期平静打破的现象, 认为滇西北地区强震背景强烈; 云南地区 3 级和 4 级地震条带在大理—保山—德宏地区交汇, 条带交汇区域震源机制一致性程度高, 且在 2020 年

以来还出现4级地震增强,这些现象表明条带交汇区域应力水平高,有利于强震发生。漾濞 $M_s6.4$ 地震发生在同时出现4级地震增强、条带交汇和震源机制高度一致的地方,说明在具备强震背景的较大区域内,通过追踪能明确表征区域应力水平变化的异常集中区域,可以在一定程度上缩小危险地点预测范围。

(2) 短临阶段测震学异常往往不多,漾濞 $M_s6.4$ 地震前仅出现2项。震前云南省内5级地震平静达到异常指标,分析认为达标后3个月内地震平静被6级左右地震打破的可能性大,因此将5级地震平静达到异常指标作为短期异常进行跟踪,但该异常对地点指示意义不明确。前震是主震前发生在主震震中附近较小范围的中小地震,因此震后很容易识别,但主震发生前对前震还没有统一、规范的识别方法。据回溯性研究,漾濞 $M_s6.4$ 地震前震中附近发生多次中小地震丛集,构成前震序列,属于临震异常。因此,若能在漾濞 $M_s6.4$ 地震前准确识别出前震,则在中长期预测基础上能将预测范围再进一步缩小,因此,寻求准确识别前震的方法,是利用测震学方法突破前震-主震-余震型地震短临预报亟待解决的关键问题和努力方向。

(3) 从依据震前提出的测震学异常所做的趋势判定来看,中长期、较大区域的震情趋势判定是准确的,这也说明多年来总结的经验和使用的测震学方法是正确有效的,但临震前的直接前震识别工作明显存在不足,对前震的分析过多地依赖区域内小震群类比结果和以往震例经验。漾濞 $M_s6.4$ 地震具有特殊性,值得我们深入反思,今后对显著强震异常背景下发生的显著地震事件是否为前震应该重点研究,应重新认识前震,不能只局限于震例经验。在目前地震预报难题仍未被攻克的情况下,每一次地震都为我们提供了研究素材,只有通过不断积累和总结,剖析每一次地震,才能为后续震情研判和指标体系建设等工作提供可借鉴的经验,才能在特定的地区和特定的条件下实现短临预报。

(4) 近年来,随着数字地震学方法的推广和应用,震源机制一致性参数在云南强震地点判定中较好地发挥了作用。震源机制一致性参数空间分布特征显示,目前,在滇南—滇西南、滇东北

地区存在震源机制参数一致性程度相对偏高的区域,这两个地区近年来均无强震发生,因此它们的强震危险性值得关注。

本研究基于中国地震局监测预报司预报管理处整编的中国 $M_s \geq 5.0$ 地震目录和云南地震台网提供的小震目录开展地震活动性分析,震源机制反演过程中使用了云南台网提供的事件波形,审稿专家对本文提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

参考文献:

- 曹晓丽,毛德培. 2012. 2009年7月9日姚安6.0级地震前兆异常特征分析[J]. 高原地震,24(2):30-35.
- 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.
- 段梦乔,赵翠萍. 2019. 海城、盖州地区地震震源机制及一致性参数特征研究[J]. 地震,39(4):39-53.
- 付虹,洪敏,王光明,等. 2020. 云南区域强震活动中短期异常的共性特征及应用研究[J]. 地震研究,43(2):241-252.
- 付虹,钱晓东,毛玉平,等. 2015. 2014年云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震异常及预测[J]. 地震研究,38(2):181-188.
- 皇甫岗,李忠华. 2010. 20世纪云南地区地震记录完全性评价[J]. 地震研究,33(1):1-6.
- 贾潔昭,宋美琴,谢健健,等. 2020. 华北块体地震活动显著增强预测效能评估[J]. 地震,40(2):38-48.
- 蒋长胜,赵屹喆. 2009. 地震可预测性研究的CSEP计划及其启示[J]. 地震地磁观测与研究,30(5):34-40.
- 李金,周龙泉,龙海英,等. 2015. 天山地震带(中国境内)震源机制一致性参数的时空特征[J]. 地震地质,37(3):792-803.
- 李永莉,毛慧玲,付虹. 2007. 2007年宁洱6.4级地震前地震学异常的动态演化[J]. 地震研究,30(4):318-323.
- 刘丽芳,付虹. 2005. 2003年云南大姚6.2级、6.1级地震中短期地震学异常演化特征[J]. 地震地磁观测与研究,26(5):33-38.
- 刘蒲雄,陈章立. 1989. 地震条带及其在地震预报中的作用[J]. 中国地震,5(1):25-34.
- 刘月,邵志刚. 2016. 2014年云南景谷 $M_s6.6$ 地震前地震活动变化分析[J]. 地震地质,38(4):1070-1081.
- 刘自凤,付虹,彭关灵,等. 2020. 2014年云南3次强震前后震源机制一致性时空演化特征[J]. 地震研究,43(2):348-354.
- 刘自凤,龙锋,彭关灵,等. 2019. 滇西北地区强震危险性分析[J]. 地震研究,42(3):330-337.
- 万永革. 2008. 美国Landers地震和Hector Mine地震前震源机制与主震机制一致现象的研究[J]. 中国地震,24(3):216-225.
- 王兰兰,刘丽芳. 2004. 云南地区4级地震频度异常特征与强震关系研究[J]. 内陆地震,18(4):359-364.
- 吴中海,赵根模. 2013. 地震预报现状及相关问题综述[J]. 地质通报,32(10):1493-1512.

- 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.
- 张致伟,周龙泉,程万正,等. 2015a. 芦山 $M_w6.6$ 地震序列的震源机制及震源区应力场[J]. 中国地质大学学报(地球科学), 40(10): 1710–1722.
- 张致伟,周龙泉,龙锋,等. 2015b. 汶川 8.0 和芦山 7.0 级地震序列应力场时空特征[J]. 地震地质, 37(3): 804–817.
- Holliday J R, Chen C C, Tiampo K F, *et al.* 2007. A RELM earthquake forecast based on pattern informatics[J]. Seismological Research Letters, 78(1): 87–93.
- Jordan T H. 2006. Earthquake predictability, brick by brick[J]. Seismological Research Letters, 77(1): 3–6.
- Liu Z F, Ye B, Chen J, *et al.* 2019. Study of the change in wave velocity ratio before and after two strong earthquakes using airgun source Data[J]. Earthquake Research in China, 33(2): 305–319.
- Lu Z, Wyss M, Pulpan H. 1997. Detail of stress directions in the Alaska subduction zone from fault plane solutions[J]. J Geophys Res, 102(B3): 5383–5402.
- Michael A J, Ellsworth W L, Oppenheimer D H. 1990. Coseismic stress changes induced by the 1989 Loma Prieta, California earthquake[J]. Geophys Res Lett, 17(9): 1441–1444.
- Michael A J. 1984. Determination of stress from slip data: Faults and folds[J]. J Geophys Res, 89(B13): 11517–11526.
- Michael A J. 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: A control study[J]. J Geophys Res, 92(B1): 357–368.
- Molchan G M. 1990. Strategies in strong earthquake prediction[J]. Phys Earth Planet Inter, 61(1/2): 84–98.
- Petersen M D, Cao T Q, Campbell K W, *et al.* 2007. Time – independent and time – dependent seismic hazard assessment for the state of California: Uniform California earthquake rupture forecast model 1.0[J]. Seismological Research Letters, 78(1): 99–109.
- Swets J A. 1973. The relative operating characteristic in psychology[J]. Science, 182(4116): 990–1000.
- Wiemer S, Malone S. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP[J]. Seism Res Lett, 72(2): 374–383.

Retrospective Analysis of Seismometric Anomalies before the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ Earthquake

LIU Zifeng, SUN Nan, WANG Guangming, PENG Guanling, LI Yongli,
ZHANG Tianyu, MAO Huiling, ZHAO Xiaoyan
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

In order to improve the seismometric prediction index system in Yunnan, we review the seismometric anomalies which we had tracked and analyzed before the 2021 Yangbi $M_s6.4$ earthquake, including earthquake quiescence, intensified earthquake activity, earthquake strips, seismic parameters, and the characteristics of the foreshocks' activity. Then we draw the following conclusions: ① the seismometric anomalies before the Yangbi earthquake contained mainly the quiescence of earthquakes in different periods and spaces and of different magnitudes. The earthquake strips intersected significantly. A cluster of 5-magnitude earthquakes occurred in northwestern Yunnan from 2012 to 2017, and the activity of 4-magnitude earthquakes intensified in the sub-region of western Yunnan and its neighboring regions since 2020. The anomaly of the activity of foreshocks mainly featured as in medium-and long-term. The small-and medium-foreshocks intensively occurred in the source area of the Yangbi earthquake. ② Our judgment on the seismic tendency in middle-and long-term and in large area in West Yunnan based on the seismometric anomalies we put forward before the Yangbi earthquake is correct. However, as we depend much on the experience of the past earthquake cases, our identification of the impending foreshocks before the Yangbi earthquake has some disadvantages.

Keywords: seismometric anomalies; focal mechanism consistency; seismic belt; intensified earthquake activities; foreshock sequence; the Yangbi $M_s6.4$ earthquake