

李莎,袁媛,阎春恒,等. 华南内陆5级以上地震前小震活动增强分析[J]. 华南地震, 2022, 42(4): 145–152. [Li Sha, YUAN Yuan, YAN Chunheng, et al. Analysis on Small Earthquake Activity Enhancement Before Earthquakes with  $M \geq 5$  in Inland South China[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(3): 145–152]

## 华南内陆5级以上地震前小震活动增强分析

李 莎, 袁 媛, 阎春恒, 向 巍

(广西壮族自治区地震局, 南宁 530022)

**摘要:** 对1970年以来华南内陆8次5级以上地震前小震活动增强开展分析, 总结提取震前的小震活动增强的共性特征, 并给出了震前小震增强跟踪策略。1970年以来华南内陆8次5级以上地震前均出现较显著小震活动增强现象, 小震活动增强可作为华南内陆震情跟踪的一项重要预测指标; 震前小震活动以增强—平静—发震为主, 1970—2010年和2011—2021年5级以上地震前分别出现 $M_L \geq 3.0$ 和 $M_L \geq 2.5$ 地震集中增强, 且至少发生一次 $M_L \geq 4.0$ 地震; 东南沿海地震带西段5级以上地震的优势发震时段是增强结束后6.5个月内, 东南沿海地震带东段和右江地震带为19~33个月内; 目标地震一般发生在地震集中增强/活跃区及周边地区; 今后应加强华南内陆 $M_L \geq 2.5$ 地震集中增强/活跃及其时空演化现象的跟踪研判。

**关键词:** 小震增强; 预测指标; 5级以上地震; 华南内陆

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)04-0145-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.04.19

## Analysis on Small Earthquake Activity Enhancement Before Earthquakes with $M \geq 5$ in Inland South China

LI Sha, YUAN Yuan, YAN Chunheng, XIANG Wei

(Earthquake Agency of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China)

**Abstract:** This paper analyzes the enhancement of small earthquakes before 8 earthquakes with  $M \geq 5$  in inland South China since 1970, summarizes and extracts the common characteristics of the enhancement of small earthquakes before earthquakes, and gives the enhancement tracking strategy of small earthquakes before earthquakes. There has been enhancement increase of small earthquakes before 8 earthquakes with  $M \geq 5$  in inland South China since 1970, the enhancement of small earthquakes can be used as an important prediction index for earthquake tracking in inland South China. Before the earthquake, the activity of small earthquakes is mainly enhanced—calm—seismogenic. From 1970 to 2010 and from 2011 to 2021, there were concentrated enhancement of earthquakes with  $M_L \geq 3.0$  and  $M_L \geq 2.5$  before the earthquakes with  $M_L \geq 5.0$ , and at least one earthquake with  $M_L \geq 4.0$  occurred. The dominant period for earthquakes with  $M \geq 5$  in the west section of the southeastern coastal seismic belt is within 6.5 months after the end of enhancement, while that in the east section of the southeastern coastal

收稿日期: 2022-02-10

基金项目: 地震科技星火项目计划(XH22004YA)和广西局科研合同制项目(202102)联合资助。

作者简介: 李莎(1989-), 女, 工程师, 主要从事地震监测预报。

通信作者: 袁媛(1978-), 女, 高级工程师, 主要从事地震监测预报。

E-mail: 554562670@qq.com

seismic belt and the Youjiang seismic belt is within 19–33 months. The target earthquakes generally occur in the earthquake concentrated enhancement or active area and the surrounding areas. In the future, it is necessary to strengthen the tracking research and judgment of the concentrated enhancement or activity and spatio-temporal evolution of earthquakes with  $M_L \geq 2.5$  in inland South China.

**Keywords:** Small earthquakes enhancement; Prediction index; Earthquakes with  $M \geq 5$ ; Inland South China

## 0 引言

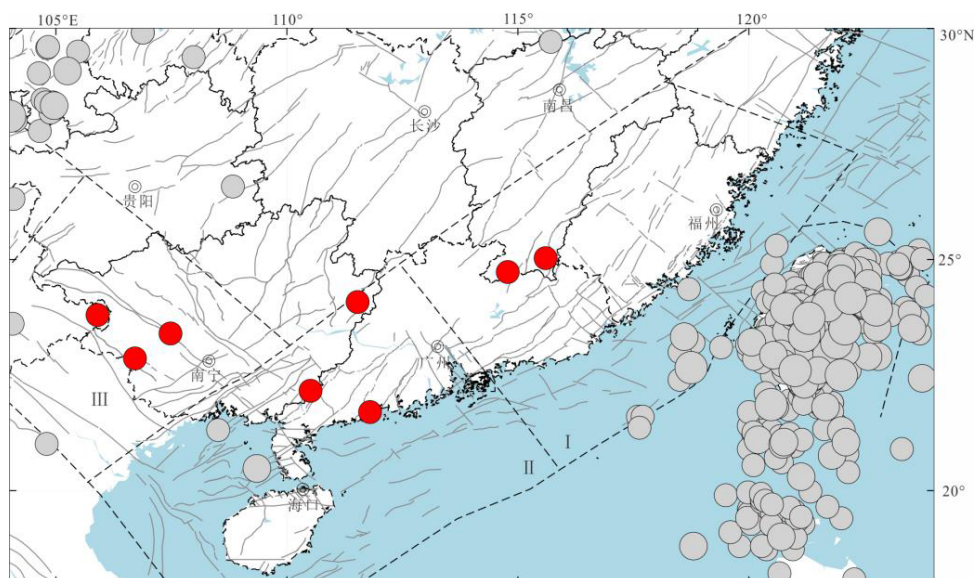
地震活动显著增强是指较大范围(几百公里)出现的中小地震活动水平或频度升高的现象,一般出现在主震前几个月至1~2年内。众多研究发现,较大地震前,未来震中周围200~300 km范围内地震活动出现增强是一种具有普适性的震兆现象<sup>[1-9]</sup>。刘蒲雄等<sup>[10]</sup>研究发现,多数震例中的区域地震活动增强并不延续到主震发生时刻,其中有一明显的地震平静段,这是一种进入短期或中期向短期过渡的预报指标。因此,地震活动显著增强指标已作为地震预报的一个重要手段,在地震预报中所占权重较大,已广泛运用于各类地震趋势会商中。

近年来,华南内陆显著地震频发,受到社会各界的广泛关注。2016年至2019年,华南内陆共记录到的3次5级以上地震(除余震)均发生于广西地区,最大为2016年7月31日广西苍梧5.4级地震,这也是1959年有地震资料记录以来广西内陆

发生的最大地震。这些地震造成了较大的社会影响和损失,如2019年广西靖西5.2级地震造成了1人死亡5人受伤,1.5万余人受灾等<sup>[11-12]</sup>。因此,对华南内陆地区显著地震前各类异常的跟踪分析研判是目前一项重要且急迫的工作。本文在前人研究的基础上,系统分析1970年以来华南内陆5级以上地震(除余震)前地震活动增强特征,提取适合华南内陆的预测指标,为华南内陆地区地震预测工作提供参考和借鉴。

## 1 研究区概况

利用中国地震台网中心发布的全国地震月报正式目录,利用基于 $G-R$ 关系计算的完备性震级 $M_c$ 方法——完整震级范围法EMR<sup>[13]</sup>,计算并获得了华南内陆地区的完备性震级,1970—2010年的完备性震级为 $M_L 3.0$ ,2011—2021年的完备性震级为 $M_L 2.0$ 。本文研究的目标地震为1970年以来华南内陆地区8次5级以上地震,最大地震为1982年云南富宁5.7级地震(图1)。



(I 东南沿海地震带东段、II 东南沿海地震带西段、III 右江地震带,红色地震为华南内陆研究的目标地震)

图1 1970年以来华南及邻区 $M \geq 5.0$ 地震分布及华南地区地震带划分<sup>[14]</sup>

Fig.1 Distribution of earthquakes with  $M \geq 5.0$  in South China and its adjacent areas since 1970 and division of seismic zones in South China<sup>[14]</sup>

## 2 增强选取规则

本文在对8次5级以上地震前开展小震增强回溯分析时,结合目标地震发生时段的区域地震完备性震级、区域地质构造情况、目标地震的震源机制解及区域地震活动背景等情况,对震前小震增强的选取作了如下约定:①分析完备性震级以上小震的增强情况;②小震增强的范围在距离目标地震或目标地震的发震构造200 km范围内,具体范围结合小震空间集中分布和区域断裂构造确定;③区域小震在空间和时间上存在明显的集中增强或活跃,空间集中是指集中区与周围地区有较为明显的界限,时间集中是指选取上述时空间集中区内震前5年及以上稍长时段,集中时段内有较为明显的起始点。

## 3 中强地震前地震活动分析

根据上述增强选取规则,本文开展了1970年以来华南内陆8次5级以上地震前小震活动增强分析,发现震前均出现不同时空尺度的小震活动增强现象,并选取以下5个具有代表性的震例开展详细讨论。

### 3.1 1982年云南富宁5.7级地震

1982年云南富宁5.7级地震是一个典型左旋剪切地震(图2),发生于右江地震带,该带是川滇块体、华南块体和印支块体3个活动块体的结合部位,受川滇菱形块体顺时针压剪作用的影响,区域动力环境和孕震环境非常复杂;断裂构造以北西向为主,次为北东向,少数断裂在第四纪晚期仍有活动,是中强地震活动区<sup>[15]</sup>。富宁地区一直是小震活跃地区,富宁5.7级地震前,从1975年8月至1980年8月增强区出现长达66.1个月小震持续增强,小震的增强强度和频度均超过背景水平,发生 $M_L3.0\sim3.9$ 地震17次、 $M_L4.0\sim4.9$ 地震9次, $M_L5.0$ 以上地震1次,为1977年广西平果 $M_L5.4$ 地震;增强结束后,增强区进入26.4个月的相对平静时段,随后发生富宁5.7级地震(图2)。富宁地震前出现长时间的小震增强,可能是其震级较大,导致孕震时间较长且需要更强的能量聚集过程,且孕震区受川滇菱形块体的旋扭压剪作用,该区域的孕震环境较为复杂。

### 3.2 1982年江西龙南5.2级和1987年江西寻乌5.5级地震

1982年江西龙南5.2级地震和1987年江西寻乌5.5级地震相距仅90 km,均发生于赣南地区,位于东南沿海地震带东段(图1)。龙南和寻乌地区的活动断裂丰富,主要有近北东向的石城—寻乌断裂带和近东西走向的全南—寻乌断裂带及寻乌5.7级的发震断裂——鸡笼嶂—寻乌—八尺近北西向的断裂<sup>[16-17]</sup>,是中强地震多发区<sup>[18]</sup>。从时间序列来看,1970年以来东南沿海地震带东段中强地震活动可以分为2个平静期和2个活跃期,1970—1985年为第一个平静期,1986—1997年为第一个活跃期,1998—2017为第二个平静期,2018年台湾海峡6.2级地震预示着东段进入第二个活跃期。1982年江西龙南5.2级地震发生在第一个平静期末期。龙南5.2级地震前,从1979年1月至1979年6月,震中周围出现北西向矩形的小震增强区,与区域北西向的主要断裂近乎垂直,期间发生 $M_L3.0\sim3.9$ 地震6次、 $M_L4.0\sim4.9$ 地震2次,增强结束后出现长达33.1个月小震相对平静(图3)。1987年江西寻乌5.5级是1970年以来东南沿海地震带东段第一个活跃期的首发地震。1985年4月至1986年1月,9个月内增强区发生 $M_L3.0\sim3.9$ 地震17次、 $M_L4.0\sim4.9$ 地震1次,增强区短时间内小震密集活跃,增强结束后进入19个月小震相对平静时段后发生寻乌5.5级地震(图4)。这两次地震均表现出显著的增强—平静—发震特征。

龙南5.2级和寻乌5.5级地震前,区域地震增强后增强区均出现长期小震相对平静时段,这可能是由于龙南和寻乌地区复杂的地震构造背景,且两个地震分别作为东南沿海地震带东段平静期的结束地震和活跃期的首发地震,孕震时间较长。因此在今后的震情跟踪工作中,应密切关注赣南地区的小震增强后的长时间相对平静。

### 3.3 2016年广西苍梧5.4级地震

2016年广西苍梧5.4级地震是一次发生在关注度较低的少震弱震区的中强地震,它打破了华南沿海地区近17年的5级地震平静。苍梧5.4级地震是左旋走滑地震,控震断裂为近SN向的贺街—夏郢断裂<sup>[19]</sup>。结合震中及邻区的构造断裂和小震分布情况,梳理发现震前3年至4.9个月,如图5出



现北东向矩形区  $M_L2.8$  以上地震显著增强, 发生 2 次  $M_L4.0$  以上地震, 增强—发震的特征非常显著 (图 5)。笔者<sup>[9]</sup>也曾对苍梧 5.4 级地震前地震活动图像演化特征开展分析, 发现其震前存在不同时空尺

度的小震活跃、华南地区的震群活动等。因此, 对少震弱震区的震情跟踪, 应关注更大范围的地震活动情况。

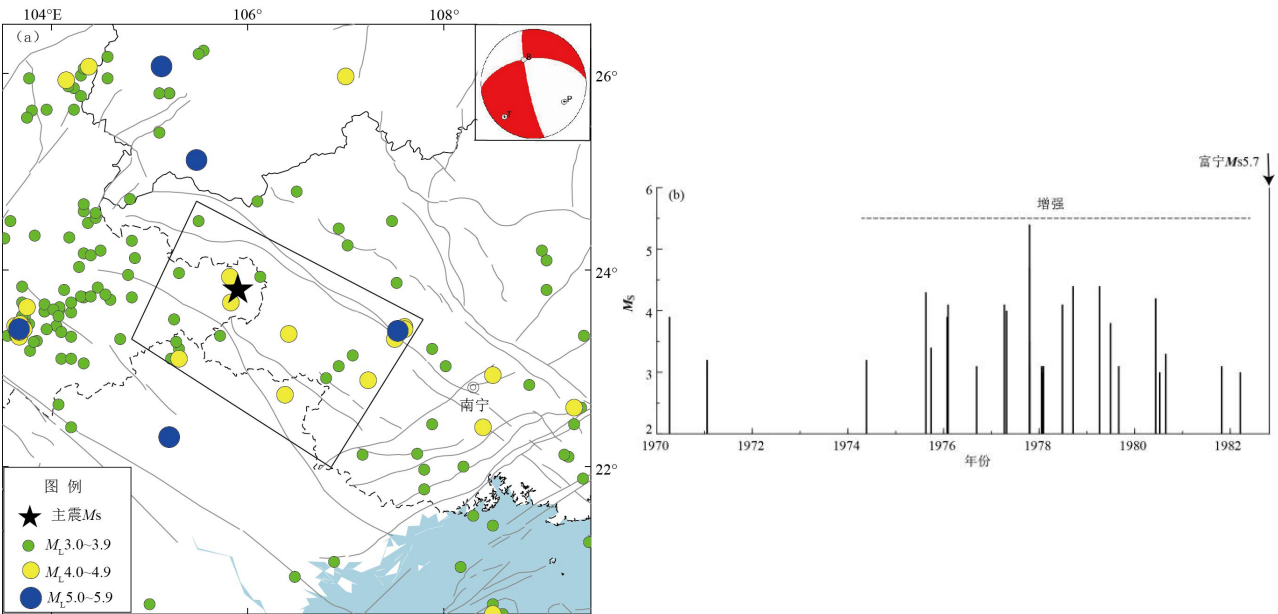


图 2 1982 年云南富宁 5.7 级地震前小震活动图像(a)和增强区  $M-T$  图(b)  
Fig. 2 The seismicity image of small earthquakes before the Funing  $M5.7$  earthquake in Yunnan in 1982(a)and the  $M-T$  map of the enhanced area(b)

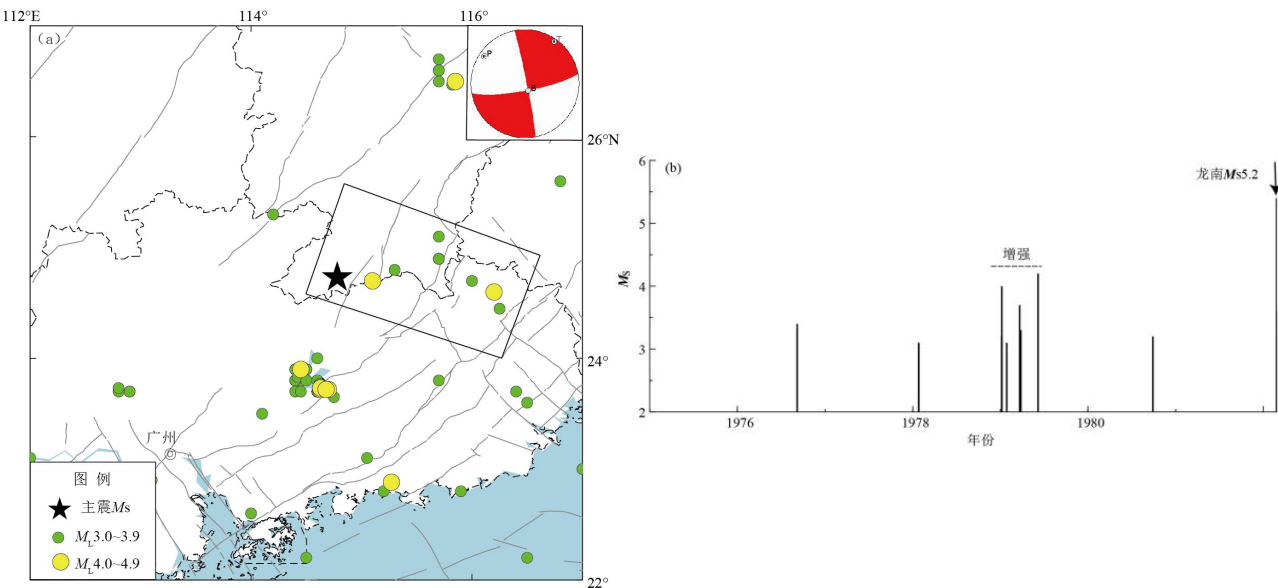


图 3 1982 年江西龙南 5.2 级地震前小震活动图像(a)和增强区  $M-T$  图(b)  
Fig.3 The seismicity image of small earthquakes before the Longnan  $M5.2$  earthquake in Jiangxi in 1982(a)and  $M-T$  map of the enhanced area(b)

3.4 2019 年广西靖西 5.2 级地震

2019 年广西靖西 5.2 级地震也是位于右江地震带 (图 1), 震源机制求解结果显示, 震源深度约 2

km, 是一次典型的极浅源逆冲机制地震 (图 6), 由于其特殊性受到了关注<sup>[20]</sup>。通过梳理, 发现从 2015 年底开始震中 100 km 范围内出现  $M_L \geq 2.5$  小震集中增强, 并于 2017 年 8 月 15 日发生靖西  $M_L4.5$  和

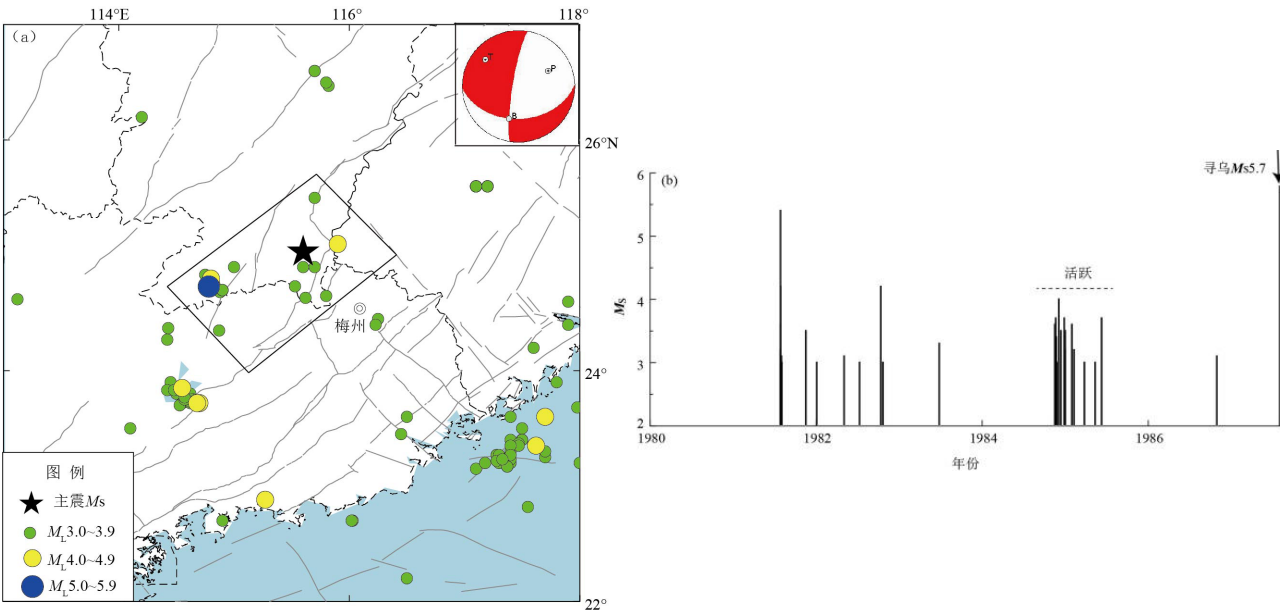


图4 1987年江西寻乌5.5级地震前小震活动图像(a)和增强区  $M-T$  图(b)

Fig. 4 The seismicity image of small earthquakes before the Xunwu  $M5.5$  earthquake in Jiangxi in 1987(a) and the  $M-T$  map of the enhanced area(b)

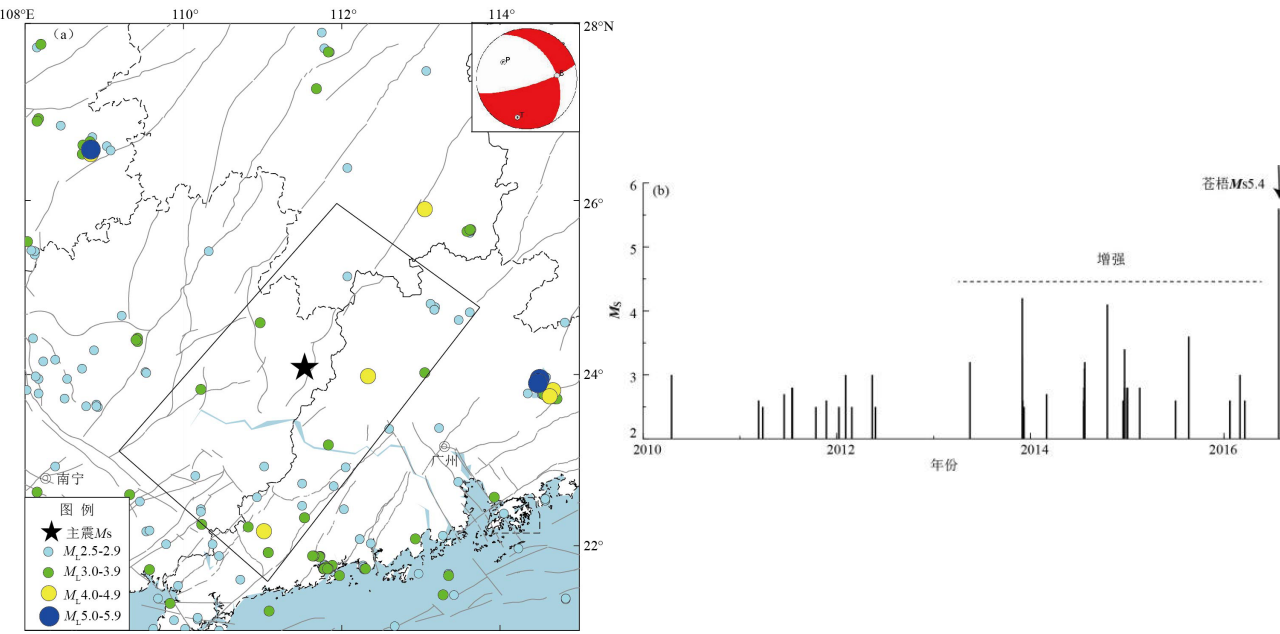


图5 2016年广西苍梧5.4级地震前小震活动图像(a)和增强区  $M-T$  图(b)

Fig.5 The seismicity image of small earthquakes before the Cangwu  $M5.4$  earthquake in Guangxi in 2016(a) and the  $M-T$  map of the enhanced area(b)

2017年10月3日靖西 $M_L 4.6$ 地震,2015年底至2017年增强区表现出显著的增强现象,靖西 $M_L 4.6$ 地震后,增强区进入震前的相对平静时段,2019年7月开始再次出现 $M_L \geq 2.5$ 小震相对活跃,随后发

生2019年11月25日靖西5.2级地震(图6)。靖西5.2级地震前,2018年全国测震学科年度会商中已明确提出该增强现象,因此小震增强值指标对靖西5.2级地震的中期预报较为成功。

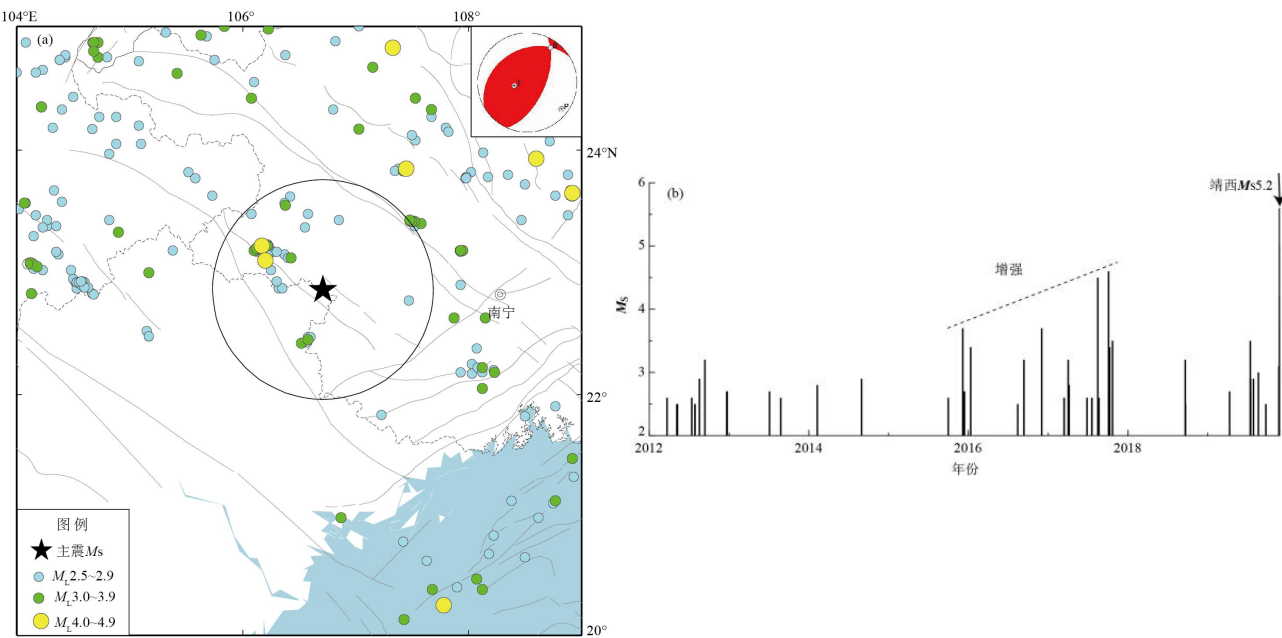


图6 2019年广西靖西5.2级地震前小震活动图像(a)和增强区 $M$ - $T$ 图(b)  
Fig.6 The seismicity image of small earthquakes before the Jingxi  $M5.2$  earthquake  
in Guangxi in 2019(a) and  $M$ - $T$  map of the enhanced area(b)

表1 华南内陆5级以上地震前小震增强情况统计  
Table 1 Statistics on small earthquakes enhancement before earthquakes with  $M \geq 5.0$  in inland South China

序号	震例		震级/ $M_s$	增强开始 时间/ 年-月-日	增强结束 时间/ 年-月-日	增强结 束地震 距主震 时间/月	增强区震级频次 ( $M_L$ /次)				增强期 地震与 主震距 离/km	增强类型	所属地 震带
	时间/ 年-月- 日	地点					2.5 ~ 2.9	3.0~3.9	4.0~4.9	5.0~5.9			
1	1977- 10-19	广西 平果	5.0	1976-07- 29	1977- 04-26	5.9	/	3	3	/	$\leq 130$	增强—平静 —发震	右江地 震带
2	1982- 02-25	江西 龙南	5.0	1979-01- 06	1979- 06-07	33.1	/	6	2	/	$\leq 150$	增强—平静 —发震	东南沿 海地震 带东段
3	1982- 10-27	云南 富宁	5.7	1975-08- 18	1980- 08-25	26.4	/	17	9	1	$\leq 170$	增强—平静 —发震	右江地 震带
4	1986- 01-28	广东 阳江	5.0	1985-09- 04	1985- 12-05	1.8	/	4	1	/	$\leq 150$	增强—发震	东南沿 海地震 带西段
5	1987- 08-02	江西 寻乌	5.5	1985-04- 11	1986- 01-08	19.0	/	17	1	/	$\leq 90$	增强—平静 —发震	东南沿 海地震 带东段
6	2016- 07-31	广西 苍梧	5.4	2013-05- 23	2016- 03-07	4.9	24	16	4	/	$\leq 200$	增强—发震	东南沿 海地震 带西段
7	2019- 10-12	广西 北流	5.2	2018-07- 11	2019- 04-04	6.4	28	13	2	/	$\leq 180$	增强—平静 —发震	东南沿 海地震 带西段
8	2019- 11-25	广西 靖西	5.2	2015-12- 06	2017- 10-21	25.5	9	7	2	/	$\leq 100$	增强—平静 —发震	右江地 震带

4 5级以上地震前小震活动增强共性  
及跟踪策略

4.1 小震活动增强共性特征

1970年以来华南内陆8次5级以上地震前均出现了不同时空尺度的小震集中增强现象,受不同构造环境和孕震环境复杂性的影响,地震前区域小震增强现象略有差异,但也有一些共同的特性(表2)。

受不同时段完备性震级变化的影响,小震集中增强/活跃起始震级不同,1970年到2010年,5

级以上地震前出现 $M_L \geq 3.0$ 小震集中增强;2011年至2021年,随着地震监测能力的提升,小震集中增强的起始震级降低,出现 $M_L 2.5$ 以上小震的增强/活跃。华南内陆5级以上地震前,均出现不同时空尺度的 $M_L \geq 2.5$ 或 $M_L \geq 3.0$ 集中增强/活跃,且至少发生1次 $M_L \geq 4.0$ 地震,这可作为判断发生5级以上地震的判据指标。在时间的预测上,优势发震时段主要关注小震集中增强/活跃结束后6.5个月(东南沿海地震带西段)或19~33个月内(右江地震带和东南沿海地震带东段),发震地点应关注小震集中增强/活跃区及周边地区。

表2 华南内陆5级以上地震前小震增强共性特征

Table 2 Common characteristics of small earthquake enhancement before earthquakes with  $M \geq 5.0$  in inland South China

时间/年	资料及算法	异常判据指标	预测规则			预测效能(地震对应率)
			发震时间	发震地点	发震强度	
1970—2010	$M_L \geq 3.0$ 地震空间分布图和 $M-T$ 图	$M_L \geq 3.0$ 集中增强/活跃且至少发生1次 $M_L \geq 4.0$ 地震	小震集中增强/活跃结束后6.5个月内(东南沿海地震带西段)或19~33个月	小震集中增强/活跃区及周边	$M \geq 5.0$	8/8
2011—2021	$M_L \geq 2.50$ 地震空间分布图和 $M-T$ 图	$M_L \geq 2.5$ 集中增强/活跃且至少发生1次 $M_L \geq 4.0$ 地震	(右江地震带和东南沿海地震带东段)			

4.2 小震增强跟踪策略

通过上述震前小震活动增强特征的总结,整理并给出今后华南内陆5级以上地震前小震活动增强的跟踪策略:

(1)首先,对当前华南内陆地区小震正常的地震活动背景进行全面了解,关注正常地震活动背景下区域 $M_L 2.5$ 以上小震的集中增强/活跃,一般的增强范围是200 km范围内,具体情况应结合区域构造进行详细分析。

(2)当出现 $M_L 2.5$ 以上小震的集中增强/活跃时,关注增强区 $M_L 4.0$ 以上地震的发生,若发生1次 $M_L 4.0$ 以上地震,则可判定该区域出现5级以上地震前的小震集中增强/活跃。

(3)在增强结束后6.5个月内(东南沿海地震带西段)或19~33个月内(右江地震带和东南沿海地震带东段),在增强区或附近地区存在发生5级以上地震的可能。

5 结论和讨论

本文通过对1970年以来华南内陆8次5级地震前区域小震活动进行回溯分析,开展震前小震增强特征研究,总结归纳了研究区中强震前的小震增强特征,并给出震前小震增强的跟踪策略,获得以下认识:

(1)1970年以来华南内陆8次5级以上地震前均出现显著的小震活动增强特征,表明小震活动增强在华南内陆具有较好的预报效能,应作为华南内陆中强地震的震情跟踪中一项重要的预测指标。

(2)8次5级以上地震前,区域地震的活动特征以增强—平静—发震为主(6/8)。东南沿海地震带西段5级以上地震的优势发震时段是增强结束后6.5个月内;东南沿海地震带东段和右江地震带增强的时段相对较长,为19~33个月(除1977年平



果5.0级地震外);但由于每个地震区/带5级以上地震震例较少,目前得到优势发震时段的认识还需更多的震例进行验证和总结。

(3)根据5级以上地震前的小震增强特征和跟踪策略,结合目前华南内陆地区地震目录的完备性特征,今后应重点关注华南内陆正常地震活动背景下 $M_L \geq 2.5$ 集中增强和增强区内 $M_L \geq 4.0$ 地震的发生,增强区及邻近地区是发生5级以上地震的值得注意地区。

(4)结合本文开展震例回溯和近年来震情跟踪工作中遇到的实际问题,发现如何研判小震增强结束是目前存在的较大难题。根据目前获得的认识和经验,笔者初步认为若增强区出现增强/活跃一段时间后,2个月内未发生3次增强/活跃起始震级以上的地震,则表明增强结束,进入临震或震前相对平静时段。受震例较少的影响,其预测效能还需更多的震例进行验证,并给出更适合华南内陆小震增强结束的指标,这可能是今后对华南内陆地区中强地震前小震活动增强现象进行分析的一个重点方向。

## 参考文献

- [1] 梅世蓉. 中国的地震活动性[J]. 地球物理学报, 1960, 9(1): 1-19.
- [2] 张国民. 地震预报引论[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 焦远碧, 丁鉴海. 中等地震活动增强作为强震标志的研究[J]. 地震, 2000, 20(2): 15-19.
- [4] 沈繁鑫, 符干, 袁锡文, 等. 华南中强震前区域区域地震活动增强平静特征[J]. 华南地震, 2003, 23(3): 11-15.
- [5] 杨向东, 刘特培. 中等地震对华南中强地震的指示意义[J]. 地震地磁观测与研究, 2004, 25(3): 42-47.
- [6] 冯建刚, 周龙泉, 杨立明, 等. 青藏块体东北缘中强地震前小震频度异常研究[J]. 地震, 2009, 29(3): 19-26.
- [7] 郑萍, 张慧, 沈凡鑫. 2000年以来华南 $M_L \geq 5$ 级地震前的地震活动特征[J]. 华南地震, 2018, 38(1): 101-107.
- [8] 郑萍, 张慧, 沈繁鑫. 华南已知地点信息的地震活动特征[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(2): 373-380.
- [9] 李莎, 阎春恒, 周斌, 等. 2016年广西苍梧 $M_s 5.4$ 地震前地震活动图像演化特征[J]. 华北地震科学, 2020, 38(3): 19-26.
- [10] 刘蒲雄, 陈兆恩, 张伟, 等. 大震前地震活动图像演变及中期向短期过渡的地震活动性标志[J]. 地震, 1997, 17(2): 113-125.
- [11] 周军学, 聂高众, 谭劲先, 等. 2016年7月31日广西苍梧5.4级地震灾害特征分析[J]. 地震地质, 2017, 39(4): 780-792.
- [12] 袁媛, 聂冠军, 李蕾, 等. 北流 $M_s 5.2$ 和靖西 $M_s 5.2$ 地震震害特征对比[J]. 华北地震科学, 2020, 38(S2): 109-113.
- [13] Woessner J, Wiemer S. Assessing the quality of earthquake catalogs: estimating the magnitude of completeness and its uncertainties[J]. Bull Seism Soc Am, 2005, 95(4): 684-698.
- [14] 周峥嵘, 吕坚, 周斌, 等. 华南地区地震预测指标体系[M]. 北京: 地震出版社, 2021.
- [15] 张忠利. 右江地震带潜在震源区空间分布函数不确定性对地震危险性的影响[J]. 防灾科技学院学报, 2015, 17(3): 30-36.
- [16] 吕坚, 高建华, 刘吉夫, 等. 1987年寻乌地震前的地震活动性异常特征及其相关讨论[J]. 华南地震, 2002, 22(4): 28-33.
- [17] 黄莉菁, 黄昭, 郑师春. 1987年8月2日江西省寻乌 $M_s 5.5$ 级地震的震害与烈度分布[J]. 华南地震, 2002, 22(4): 1-8.
- [18] 汤兰荣, 吕坚, 曾新福. 赣南及邻区的地震活动特征[J]. 华北地震科学, 2017, 35(2): 82-88.
- [19] 周依, 阎春恒, 向巍, 等. 2016年7月31日广西苍梧 $M_s 5.4$ 地震震源参数[J]. 地震地质, 2019, 41(1): 150-161.
- [20] 廖丽霞, 林稚颖, 莫佩婵, 等. 粤桂琼流体台网对区域中强地震的映震能力分析[J]. 地震研究, 2022, 45(2): 110-119.