

郭培兰, 黄惠宁, 李莎, 等. 华南西部地区震群活动与中强震关系研究[J]. 华南地震, 2022, 42(4): 86–93. [GUO Peilan, HUANG Huining, LI Sha, et al. Study on the Relationship Between Earthquake Swarm Activity and Moderate–strong Earthquakes in Western South China[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(4): 86–93]

华南西部地区震群活动与中强震关系研究

郭培兰, 黄惠宁, 李莎, 苏珊

(广西壮族自治区地震局, 南宁 530022)

摘要: 通过系统研究华南西部地区震群活动与中强震的关系, 发现华南西部地区震群活动主震震级在 $M_L 3$ 左右; 震群活动与区域强震关系密切, 小震群频度的起伏可以反映区域地震活动水平的强弱; 华南西部地区震群频次超阈值2为异常, 可做中短期预测, 通过预测效能检验。区域震群对中强震地点的预测有积极意义: 震前2年, 震群呈条带状分布, 中强震发生在震群条带上, 震群时间和地点距中强震都是由远到近, 时间跨度超1年, 最远距离380 km, 中强震震级比震群高2~3级。

关键词: 广西地区; 震群; 中强震; 统计检验; 预测效能

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)04-0086-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.04.12

Study on the Relationship Between Earthquake Swarm Activity and Moderate–strong Earthquakes in Western South China

GUO Peilan, HUANG Huining, LI Sha, SU Shan

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

Abstract: The relationship between earthquake swarm activity and moderate–strong earthquakes in Guangxi is systematically studied. The results show that the magnitude of the main earthquake of earthquake swarm activity in Guangxi is not high, about $M_L 3$; the activity of earthquake swarm is closely related to regional strong earthquakes, and the fluctuation of the frequency of small earthquake swarm can reflect the strength of regional seismicity; the earthquake swarm frequency in Guangxi exceeding the threshold 2 is regarded as anomaly, which can be predicted in the medium and short term, and passes the prediction efficiency test. Regional earthquake swarm is of positive significance to the prediction of moderate and strong earthquake sites: Two years before the earthquake, the earthquake swarm is distributed in strips, and moderate–strong earthquakes occurred in the earthquake swarm strips; the time and location of the earthquake swarm are from far to near, with a time span of more than one year

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 广西科技攻关计划项目红水河流域水库地震特征的精细研究以天峨至大化段为例(桂科AB1850042); 地震科技星火项目计划(XH22004YA); 广西局科研合同制项目(202102)联合资助。

作者简介: 郭培兰(1974–), 女, 高级工程师, 主要从事地震编目及地震活动性分析工作。

E-mail: 550531839@qq.com

通信作者: 黄惠宁(1985–), 女, 工程师, 硕士, 主要从事GPS数据解算及地壳形变分析研究。

E-mail: lingbing226@163.com

and the maximum distance of 380 km; the magnitude of moderate-strong earthquakes is 2–3 higher than that of earthquake swarm.

Keywords: Guangxi region; Earthquake swarm; Moderate-strong earthquake; Statistical inspection; Prediction efficiency

0 引言

震群是地震活动的一种形式,震群类型或性质的判定,即科学地识别前兆震群,是地震预测预报研究的重要内容之一,国内外对震群的性质或类型判别方法及其相关研究已有大量的成果,主要有三方面:一是震群序列类型判别的地震活动图像方法研究;二是基于数字化地震波形的震群序列判别方法研究;三是震群序列形成机理的研究等。在上述针对单个震群的各种研究基础上,还可以开展研究较大区域范围内震群时间演化的群体特征,寻找与强震孕育和发生的时间关系,区域震群活动的时间变化表明了震群活动和大震发生之间有显著的关系,姜秀娥等^[1-4]研究认为强震前的区域震群活动增强可能是一个共性特征。同时也开展研究震群空间演化的群体特征,寻找震群的空间分布与强震位置的关系,将陆续发生的震群或序列标在震中分布图上,看是否成条带状分布,如果呈条带分布,则未来主震可能发生的部位是:条带上震群时间集中活动频繁的一端;两条带的相交之处;条带的两端等处^[5]。薛艳等^[4]认为大范围区域内的多个小震群活动是强震(一组强震)的一种“场兆”,这是由于在大区域应力场扰动增强时,某些对应力场扰动敏感的特殊区域,容易形成应力集中点,且以频繁的小震活动来释放应变能,从而形成多点震群活动。本文作者在日常震情跟踪工作中积累了2010—2021年华南地区西部($20^{\circ} \sim 27^{\circ} \text{N}$, $104^{\circ} \sim 113^{\circ} \text{E}$)的震群资料,应用震群频次的起伏变化预测该区中强以上地震,应用震群有序分布的特征寻找发震地点。本文将系统研究区域震群活动与中强以上地震的关系,同时提炼震群预测指标,为震情跟踪提供判定依据。

1 华南西部地区2010年至2021年地震目录最小完整性震级

地震目录是进行地震活动性研究的基础资料,完整的地震目录是地震活动性研究结果可靠性的

保证。1973年1月至1973年8月 $M_L 2.6$ 地震基本完整^[6];1973年9月后至2001年12月,监控能力逐渐提高,2002年1月至2007年5月,柳州数字地震台网及南宁数字地震台网相继建成, $M_L 2.1$ 地震基本完整,2007年6月后,广西数字地震台网通过验收,并与广东、海南、贵州、云南、湖南等省份进行联网,发展成拥有75个台站的测震台网, $M_L 1.8$ 地震基本完整;至2010年,又增建了较多地震台站,使得地震观测技术有了重要进步,大大加强了地震观测的灵活性和可靠性, $M_L 1.0$ 地震基本完整^[7]。

2 资料

采用2010至2021年广西地震台网记录的资料,在参考陆远忠等^[8]、宋俊高等^[9]对震群的定义的同时,充分考虑广西地区中小地震活动特点,将广西地区的震群统计约定为:地震序列的震中分布在 $20 \times 20 \text{ km}$ 的矩形区域内,与外围地震有较明显的分界线;序列总次数 $M_L \geq 1.0$ 地震不少于8或序列总次数 $M_L \geq 2.0$ 地震不少于3;序列中最大震级满足 $2.0 \leq M_L \leq 4.0$,且最大震震级与次大震级之差 ≤ 1.1 ;序列开始前与结束后连续15天内未记录到 $M_L \geq 1.0$ 地震,则以第1个地震开始日为震群序列的起始日,以最后1个地震所在日为该序列的终止日。根据以上震群统计约定,选取2010至2021年来发生在华南西部地区的记录相对较完整的25次震群序列,各震群序列的具体情况详见表1。选取的25次震群空间分布主要集中在桂东南与桂西北地区。表2是2010年至2021年广西地区 $M_s \geq 4.5$ 地震,分析中强地震与震群活动在时间空间上的对应关系。

3 震群特征

3.1 统计特征

由表1可见,震群中最大地震的震级较低,3级左右,没有超过4级。地震频次不丰富,最大地震的震级越大,相应地2至3级地震频次也较多,

表 1 2010 年至 2021 年华南西部地区震群序列基本信息

Table 1 Basic information of earthquake swarm sequence in western South China from 2010 to 2021

震群名称	起止日期	持续 时间/d	最大地震		地震频次 ($M_L\geq 1.0$)	地震频次 ($M_L\geq 2.0$)
			主震时间	震级		
2011-07 广西靖西	2011-06-25—2011-07-12	17	2011-07-02	2.5	12	
2012-11 广西柳州	2012-10-29—2013-04-08	161	2013-03-01	3.5	26	
2015-06 广西大化	2015-06-11—2015-06-17	6	2015-06-23	2.7	8	
2015-08 广西都安	2015-08-16—2015-08-21	5	2015-06-14	2.8	4	4
2015-09 广西合山	2015-09-08—2015-10-07	29	2015-08-18	2.6	8	
2015-12 广西合山	2015-12-18—2016-02-20	64	2015-09-08	2.4	22	
2016-01 广西平果	2016-01-15—2016-01-31	16	2016-01-06	2.7	8	
2016-07 广西平果	2016-07-16—2016-07-17	1	2016-01-21	3.0	5	4
2018-03 广东阳江	2018-02-08—2018-03-31	43	2018-03-20	4.2	172	
2018-06 广东茂名	2018-06-21—2018-08-21	61	2018-06-21	2.9	32	
2018-10 广东高州	2018-09-10—2018-10-24	44	2018-09-14	2.4	17	
2018-10 广东信宜	2018-06-11—2015-06-17	6	2018-10-28	2.4	24	
2019-01 广西陆川	2019-01-05—2019-02-26	52	2019-01-15	2.7	19	
2019-03 广东高州	2019-03-16—2019-04-20	35	2019-03-16	3.0	10	
2019-06 广东阳江	2019-06-15—2019-06-15	1	2019-06-15	3.5	17	
2019-06 广西上思	2019-06-25—2019-06-25	1	2019-06-25	3.3	4	4
2019-07 广西龙州	2019-07-14—2019-07-21	7	2019-07-14	3.5	10	
2019-07 广东阳江	2019-07-24—2019-07-30	6	2019-07-24	3.7	19	
2019-09 广东阳江	2019-09-14—2019-09-15	1	2019-09-14	3.5	26	
2019-10 贵州安龙	2019-10-15—2019-12-14	60	2019-10-19	3.2	24	
2019-11 广西靖西	2019-10-29—2019-11-24	26	2019-11-22	3.1	7	4
2020-04 北部湾	2020-04-4—2020-04-15	11	2020-04-15	3.1		3
2021-03 贵州安龙	2021-03-18—2021-03-25	7	2021-03-18	3.5	17	
2021-04 贵州安龙	2021-04-13—2021-04-19	6	2021-04-47	3.2	15	
2021-07 广西崇左	2021-07-19—2021-07-24	5	2021-07-24	2.9		3

表 2 广西地区 $M_S\geq 4.5$ 级地震目录(2010—2021)

Table 2 Earthquake catalogue with $M_S\geq 4.5$ in Guangxi from 2010 to 2021

编号	发震日期/ 年-月-日	发震时刻 h:min:s	震中位置		震级		震源深度 /km	震中地名
			φ_N	λ_E	M_S	M_L		
1	2013-02-20	03:21:13.1	23.85°	107.45°	4.5		10	广西平果
2	2016-07-31	17:18:10.2	24.08°	111.53°	5.4		10	广西苍梧
3	2019-10-12	22:55:26.0	22.16°	110.51°	5.2		10	广西北流
4	2019-11-25	09:18:19.9	22.86°	106.71°	5.2		10	广西靖西
5	2021-08-04	19:12:52.0	23.38°	106.68°	4.8		19	广西德保

最大地震震级与地震频次没有正比关系。震群的持续活动时间较短,一般20 d以内。

3.2 前兆震群识别

使用前兆震群定量判定指标 U 值、 K 值、 ρ 值、 h 值、 b 值判定震群的前兆性质,判定前兆震群单项指标规定为: $U>0.5$; $K>0.7$; $\rho<0.55$; $b>0.65$; $h<1.0$, 凡满足其中一项,即判断该震群为

前兆震群^[10-11], 利用多项指标判定前兆震群的效果一般要优于单项指标。典型的UK ρ 型前兆震群只有4次占19%, UK、 $U\rho$ 型前兆震群5次占24%, 单项指标前兆震群只有11次占52%, 不能计算参数的震群序列2次5%, 为2015年8月都安震群与2019年6月上思震群, 华南西部地区震群一般是单项指标前兆震群(表3)。

表3 华南西部地区震群参数表
Table 3 Parameters of earthquake swarm in western South China

震群	U 值	K 值	ρ 值	b 值	震群性质
2011-07广西靖西	0.99	0.8075	0.70	0.4498	UK型前兆震群
2012-11广西柳州	0.84	0.5983	0.6696	0.61	U型前兆震群
2015-06广西大化	0.512	0.7572	0.3816	0.2141	UK ρ 型前兆震群
2015-09广西合山	0.9061	0.7052	0.5770	0.4069	UK型前兆震群
2015-12广西合山	0.7260	0.7384	0.5670	0.8303	UK型前兆震群
2016-01广西平果			0.2525		ρ 型前兆震群
2016-07广西平果	0.0272	0.1065			一般震群
2018-03广东阳江					
2018-06广东茂名	1.00	0.7537	0.3666	0.5534	UK ρ 型前兆震群
2018-10广东高州	0.7968	0.7537	0.3840	0.6768	UK ρ 型前兆震群
2018-10广东信宜	0.4089	0.6253	0.3721	0.7846	ρ 值型前兆震群
2019-01广西陆川	0.6668	0.6299	0.4544	0.7846	$U\rho$ 型前兆震群
2019-03广东高州	0.8248	0.3994	0.4422	0.5443	$U\rho$ 型前兆震群
2019-06广东阳江	0.0077	0.6714	0.5172	0.4553	ρ 值型前兆震群
2019-07广西龙州	0.0209	0.3241	0.4367	0.4921	ρ 值型前兆震群
2019-07广东阳江	0.2022	0.0070	0.3930	0.8310	ρ 值型前兆震群
2019-09广东阳江	0.3684	0.0882	0.4890	0.7365	ρ 值型前兆震群
2019-10贵州安龙	0.8139	0.5477	0.5509	0.7015	U型前兆震群
2019-11广西靖西	0.9988	0.4468	0.1000		$U\rho$ 型前兆震群
2021-03贵州安龙	0.2597	0.1304	0.5384	0.8924	ρ 值型前兆震群
2021-04贵州安龙	0.9655	0.5858	0.9039	0.5839	U 值型前兆震群
2021-09贵州望谟	0.9656	0.2002	0.6490	0.5872	U 值型前兆震群

4 震群与主震的时间关系

4.1 地震活动增强后有震群活动

不少震例表明,大震前出现地震活动性增强,是人们观测到的一种震前地震活动异常变化的普遍现象。伴随着地震活动增强,地震活动在时、

空、强等方面将表现出一系列异常特征。如在空间分布上将可能出现孕震空区、异常地震条带、中小地震集中分布、区域震群活动以及地震空间集中度 C 值升高等^[5]。利用震中分布图、地震 $M-T$ 图、地震 $\Delta T-T$ 、蠕变曲线找出区域地震活动开始增强时间,区域地震活动开始增强后,首次发生的震群为第一次震群。表4是第1次震群与中强地震对应表,通过对2010年至2021年我区的 $M4.5$ 以

上地震进行分析,地震活动平静时段,较少震群发生,我区中强震的活动方式是3.0级地震活动逐渐增强过程中,发生多次小震群活动后,然后发生中强地震^[12]。

表 4 第 1 次震群时间与中强地震对应表
Table 4 Correspondence table between the time of the first earthquake swarm and moderate-strong earthquakes

地震活动 平静持续时间	地震活动 增强持续时间	第一次震群时间	中强地震
2011-01-01—2011-05-31	2011-06-01—2013-02-20	2011-07 广西靖西	2013-02-20 平果 $M_s4.5$ 级地震
2014-01-01—2014-06-30	2014-07-01—2016-07-31	2014-11 广西隆安	2016-07-31 苍梧 $M_s5.4$ 级地震
2017-01-01—2017-12-31	2018-01-01—2019-10-12	2018-02 广东阳江	2019-10-12 北流 $M_s5.2$ 级地震
2017-10-24—2018-02-28	2018-03-01—2019-10-12	2019-07 广西龙州	2019-11-25 靖西 $M_s5.2$ 级地震
2020-01-01—2020-03-31	2020-04-01—2021-08-31	2021-03 贵州安龙	2021-08-04 德保 $M_s4.8$ 级地震

4.2 震群活动的群体性

2011 年 6 月至 2013 年 2 月广西及邻区出现 3 级地震异常增强,发生了 3 次震群,2013 年 2 月 20 日平果 4.5 地震后震群频次下降(图 1),2014 年 7 月至 2016 年 7 月广西及邻区出现 3 级地震异常增强,发生了 6 次震群^[13],2016 年 7 月 31 日苍梧 5.4 地震后震群频次下降。2018 年 1 月至 2019 年 10 月广西及邻区出现 3 级地震异常增强,发生了 10 次震群^[14],震群发生在粤桂交界地区,2019 年 10 月 12 日发生北流 5.2 地震,2019 年 11 月 25 日靖西 5.2 级地震前半年内在靖西附近发生 4 次震群活动,分别为 2019 年 6 月上思震群、2019 年 7 月龙州震群、2019 年 10 月贵州安龙震群、2019 年 11 月靖西震群。2020 年 4 月至 2021 年 8 月广西及邻区出现 3 级地震异常增强,发生了 4 次震群,均在桂西地区附近。分析广

西地区震群进行频次(月频次半年滑动)异常,震群频次超阈值 2 为异常(图 1)。表 5 是广西地区震群频次异常与中强地震对应表。

判别震群频次异常是否具有统计上的预测意义,必须严格遵循一定的预测规则,进行预测评分 R 检验。预测评分通常采用内符检验方法,即利用已有震例进行评价。2010 年 1 月至 2021 年 12 月共 132 个月内,出现 4 次震群频次异常,华南地区西部共发生 $M\geq4.5$ 地震 5 次,4 次异常全部对应了地震,漏报 1 次地震。预测时间为 1 年,4 次异常占用时间 48 个月,异常研究时间 132 个月。

根据地震预报清理攻关研究所提出的地震预报能力评分公式^[15]:

$$R = \frac{\text{报对的地震次数}}{\text{应预报的地震总次数}} - \frac{\text{预报占用时间}}{\text{预报研究的总时间}}$$

(1)

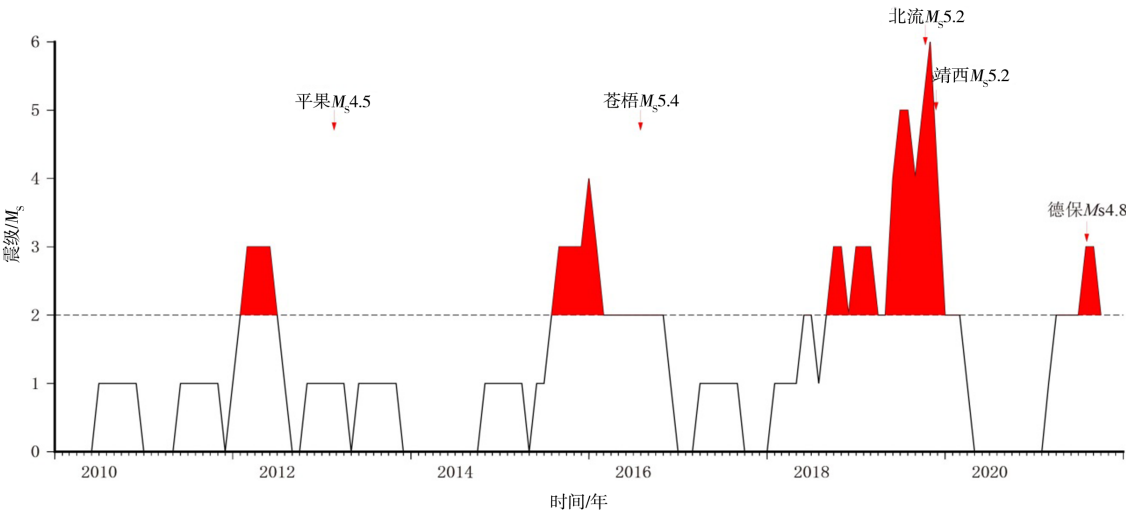


图 1 华南西部地区震群频次(月频次半年滑动)
Fig.1 Earthquake swarm frequency in western South China (monthly frequency sliding half a year)

表5 华南西部地区震群频次异常与中强地震对应表

Table 5 Correspondence table of earthquake swarm frequency anomalies and moderate-strong earthquakes in western South China

序号	异常出现时间	异常结束时间	异常持续时间/月	出现异常至发生中强地震时间/月	中强地震
1	2012-02	2012-07	5	12	2013-02-20平果4.5级地震
2	2015-08	2016-11	15	11	2016-07-31苍梧5.4级地震
3	2018-06	2020-03	21	16	2019-10-12北流5.2级地震
	2018-06	2020-03	21	17	2019-11-25靖西5.2级地震
4	2021-04			4	2021-08-04德保4.8级地震

对震群频次异常与中强地震关系预测效果进行内符检验^[16]。预测评分 R 值为: $R=4/5-48/132=0.4095$, $R<R_0=0.453$, 未通过统计检验。但是5次4.5级以上地震, 4次地震前均出现震群频次异常, 出现异常至发生中强地震时间在16个月以内, 地震对应率80%, 对应率较高, 对1年半时间的中期预测还是可以参考使用。

5 震群与主震的空间关系

5.1 震群成条带状分布

2010—2021年, 华南西部地区发生了 $M\geq 4.5$ 地震5次, 分别为2013年2月平果4.5、2016年7月广西苍梧5.4、2019年10月北流5.2、2019年11月靖西5.2、2021年8月德保4.8级地震。5次地震前均出现小震群活动, 随着区域应力增强, 震群的分布呈现有序条带状分布^[5], 中强地震发生在震群

条带上, 震群的空间分布对地震危险区具有指示意义。2014年7月至2016年7月广西及邻区地震活动增强, 发生6次震群活动, 呈近东西向条带状分布(图2), 2016年7月31日苍梧5.4级地震发生在震群条带。2018年1月至2019年10月广西及邻区地震活动增强, 发生10次震群活动, 呈北西向条带状分布(图3), 2019年10月12日北流5.2级地震发生在震群条带端部。2018年3月至2019年11月广西及邻区地震活动增强, 发生4次震群活动, 震群空间分布呈北北西向, 靖西5.2级地震发生在北北西向震群条带中部(图4)。2021年3月18日至2021年10月25日, 广西及邻区发生了4次震群活动, 分别为2020年4月北部湾震群、2021年3月18日贵州安龙、2021年4月17日贵州安龙、2021年7月广西崇左震群, 4次震群均发生在桂西地区与北部湾地区, 4次震群呈北北西带状分布, 2021年8月德保4.8级地震发生在震群连线中部(图5)。

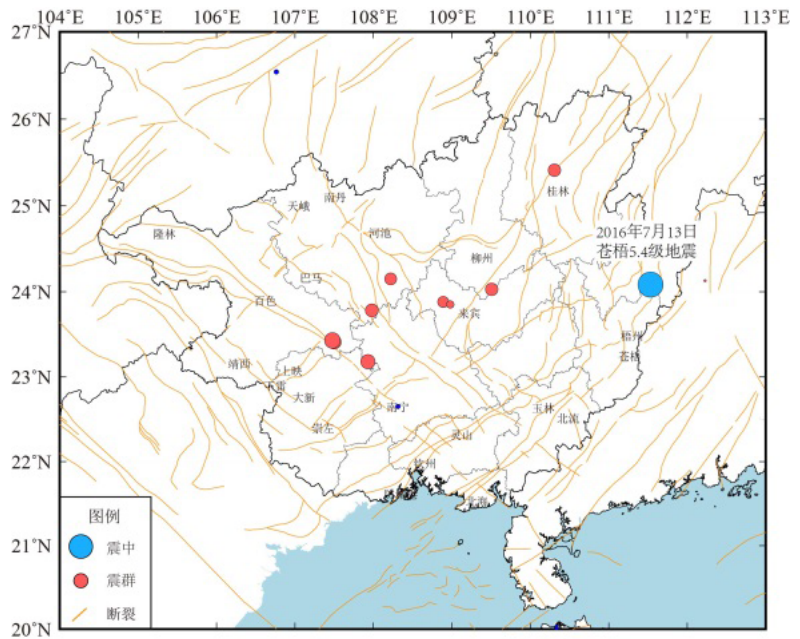


图2 2014年8月至2016年7月震群分布图

Fig.2 Earthquake swarm distribution from August 2014 to July 2016

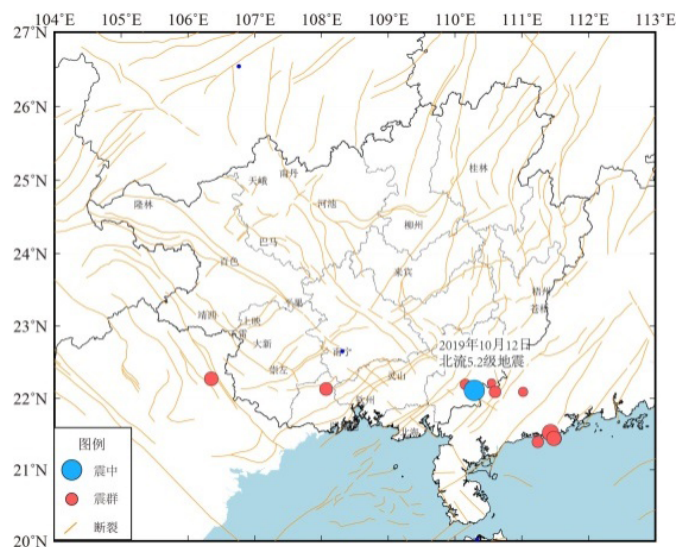


图3 2018年8月至2019年10月震群分布图

Fig.3 Earthquake swarm distribution from August 2018 to October 2019

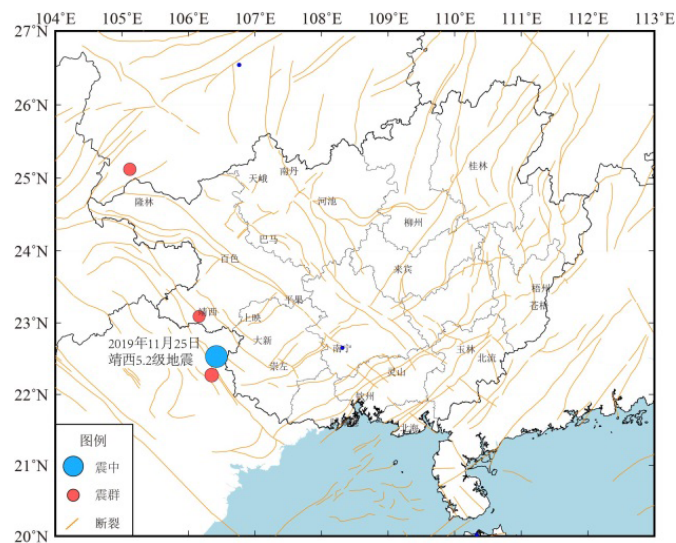


图4 2019年10月至2019年11月震群分布图

Fig.4 Earthquake swarm distribution from October 2019 to November 2019

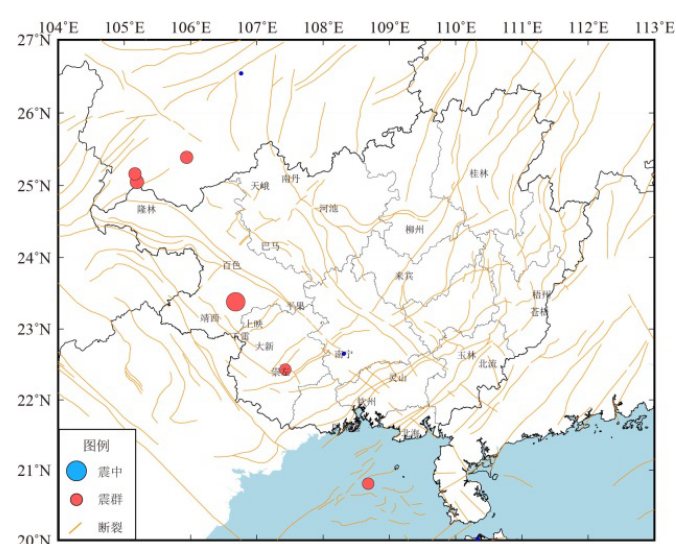


图5 2020年4月至2021年10月震群分布图

Fig.5 Earthquake swarm distribution from April 2020 to October 2021

5.2 震群由远到近分布

通过对表1的分析,可以看出:①平果地震前震群及地震序列主要有2011年6月广西靖西2.5震群(150 km),2012年11月柳州3.2震群(200 km),平果地震前只记录到2个前兆震群,在位置变化上无法找出规律性,时间跨度超1年,最远距离200 km,主震震级比震群高2.4级;但在时间上和震级比例上符合规律。前兆震群可以发生在未来主震的周围一定空间范围或距主震有一定距离的地方;②苍梧地震前震群有2014年10月广西隆安3.1震群(380 km),2015年6月广西大化2.7震群(370 km),2015年8月广西都安2.6震群(340 km),2015年9月广西合山2.4震群(270 km),2016年1月广西合山1.6震群(270 km),2016年1月广西灵川2.7震群(190 km),时间和地点都是由远到近,时间跨度超1年,最远距离380 km,主震震级比震群高2.6级^[17];③北流地震前震群有2018年2月广东阳江4.2震群(140 km),2018年6月广东茂名2.9震群(120 km),2018年10月广东高州2.4震群(60 km),2018年10月广东信宜2.4震群(40 km),2019年3月广东高州3.0震群(60 km),2019年1月广西陆川2.7震群(30 km),时间和地点都是由远到近,时间跨度超1年,最远距离140 km,主震震级比震群高2.4级;④靖西地震前有2019年6月广西上思3.3震群(160 km),2019年7月广西龙州3.5震群(50 km),2019年10月贵州安龙3.2震群(300 km,水库震群),2019年11月22日广西靖西3.1震群(50 km),时间和地点都是由远到近,时间跨度约1年,最远距离160 km,主震震级比震群高2.4级,主震震级比震群高2.1级;⑤德保地震前震群有2020年4月北部湾3.0震群(360 km),2021年3月贵州安龙3.5震群(240 km),2021年4月贵州安龙 M_L 3.2震群(240 km),2021年7月广西崇左 M_L 2.9震群(130 km),时间和地点都是由远到近,时间跨度超1年,最远距离360 km,主震震级比震群高2.2级。

6 结论

(1)华南西部地区震群活动与区域强震关系密切,小震群频度的起伏可以反映区域地震活动水平的强弱。华南西部地区震群主震震级3级左右,震群的持续活动时间较短,一般20天以内。

(2)华南西部地区震群频次(月频次半年滑动)超阈值2为异常,计算得到 $R=0.4095$, $R<R=$

0.453,未通过统计检验。但是地震对应率80%,对应率较高,对1年半时间的中期预测还是可以参考使用。

(3)中强震前发生多次震群活动,震群空间分布呈条带状分布,中强震发生在震群条带,震群时间和地点距中强震都是由远到近,时间跨度超1年,最远距离380 km,主震震级比震群高2~3级;

参考文献

- [1] 姜秀娥,陈非比.区域震群与唐山大震[J].地震学报,1983,5(2):145-157.
- [2] 薛艳,梅世蓉.唐山大震前后一般震群与前兆震群时空演化特征研究[J].地震,1999,19(2):183-189.
- [3] 薛艳,陈琳荣,黎明晓,等.华北地区震群活动与强震[J].华北地震科学,2017,35(2):1-9.
- [4] 敖雪明,龙海英,王桂岭.新疆天山近7级地震前震群活动的时空分布演化特征[J].地震,2010,30(4):124-132.
- [5] 孙其政.测震学分析预报方法[M].北京:地震出版社,1997:69-78.
- [6] 郭培兰,徐宁.广西白龙核电厂址近区域小地震精确定位报告[R].南宁:广西壮族自治区地震局,2008.
- [7] 龙政强,周琦杰.广西数字地震台网观测报告[R].南宁:广西壮族自治区地震局,2015.
- [8] 陆远忠,宋俊高,戴维乐.一个判断震情的指标——震群的 U 值[J].地震学报,1984,6(S1):495-508.
- [9] 宋俊高,王炜.震群活动和地震预报综述[J].国际地震动态,1998(9):6-11.
- [10] 李京锦,关晓明,王亮,等.华北地区震群与强震的空间分布关系研究[J].防灾减灾学报,2016,32(2):52-57.
- [11] 王炜,戴维乐,周云好,等.地震强度因子在华北中强以上地震前的短期异常变化[J].地震,1997,17(3):241-248.
- [12] 郭培兰,苏珊,李莎,等.2022年度测震学科广西地震趋势分析报告[R].南宁:广西壮族自治区地震局,2021.
- [13] 郭培兰,李莎,阎春恒,等.2016年苍梧 M_s 5.4地震活动、震害特征及应急对策[J].地震地磁观测与研究,2019,40(1):64-71.
- [14] 郭培兰,向巍,阎春恒,等.广西北流 M_s 5.2地震测震学异常研究[J].华北地震科学,2019,37(S1):47-55.
- [15] 许绍燮,陆远忠,朱传镇,等.地震预报方法实用化研究文集—地震学专辑[M].北京:学术书刊出版社,1989:586-590.
- [16] 吸永清.大同一阳高地震的余震窗口[J].山西地震,1995,80(1):20-24.
- [17] 薛艳,陈琳荣,黎明晓,等.华北地区震群活动与强震[J].华北地震科学,2017,35(2):1-9.