

黎明晓,余怀忠,薛艳,等. 2025. 华南地区震群活动的中短期时空特征研究[J]. 地震研究, 48(2): 289–299, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0031.

Li M X, Yu H Z, Xue Y, et al. 2025. Study on the medium- and short-term, temporal and spatial characteristics of earthquake swarm activities in South China[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2): 289–299, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0031.

华南地区震群活动的中短期时空特征研究^{*}

黎明晓, 余怀忠[♣], 薛艳, 闫伟, 姜祥华

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要: 研究了2010—2023年华南地区 $M_L \geq 2.0$ 震群在不同时间窗的频次与中强地震的关系; 在预测效能评价的基础上, 分析了华南地区震群活动的中短期时空特征; 结合地震活动和地球物理观测异常, 讨论了中强地震的孕震过程。结果表明: ① 华南地区 $M_L \geq 2.0$ 震群2个月频次 $N \geq 4$, 是 $M_S \geq 5.0$ 地震的最优中短期预测指标, 优势预测时间为200 d, 同时 $R = 0.48$, $R_0 = 0.40$; ② 华南地区震群3个月频次 $N \geq 4$, 是 $M_S \geq 5.0$ 地震较好的短期预测指标, 优势预测时间为20 d, 同时 $R = 0.43$, $R_0 = 0.34$; ③ 活跃时段的震群空间分布对 $M_S \geq 5.0$ 地震的发震地点有一定的指示意义, 但震群空间分布范围较大, 在开展地震预测工作时还需结合其它预测方法确定危险区域; ④ 2019年广西北流5.2级和靖西5.2级地震前约8个月(中期), 地球物理观测异常增加, 地震前约6个月(中短期), $M_L \geq 2.0$ 震群活跃, 地震前约3个月(短期), $M_L \geq 3.0$ 小震活跃度增强。地震活动与地球物理观测异常准同步活动, 反映了震前区域应力场的增强。

关键词: 华南震群; 中短期; 时空特征; 效能检验

中图分类号: P315.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)02-0289-11
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0031

0 引言

震群一般发生在一些特殊的区域, 这些区域内介质的裂隙分布较密, 裂隙间隔距离较小, 因而在应力增强的情况下, 极易产生连锁反应式的弱震活动, 形成间歇性的小震群(国家地震局预测预防司, 1997)。低震级的震群活动因局部物质变弱造成应力集中, 在较小区域内发生的微破裂(朱传镇, 1985), 可能是区域应力场变化导致局部薄弱点发生破裂的结果。我国华南地区震群活动较为丰富, 已发生的震群主要有广东地区1993年8—11月连山震群(钟贻军, 1996)、1997年台山震群(康英等, 1998)、2014年6月河源震群

(马晓静等, 2018)、2016年10月乳源震群(王小娜等, 2017)、2013—2014年及2018年阳江震群(王力伟等, 2018); 福建地区2010—2020年仙游震群(关露凝, 江国明, 2023; 秦双龙, 邱毅, 2018)、1999年9—12月福州震群(陈文明等, 2006); 海南地区1992年1月东方震群(高原等, 1996); 广西地区2010年6—7月凌云—凤山震群(蒋海昆等, 2011)和2013年6—7月平果震群(李帅等, 2018); 浙江南部2002—2006年珊溪水库震群等(王鹏等, 2017)。

震群活动是在地壳运动增强的背景下发生的, 丛集的震群活动与大地震的孕育过程有关(李兴才, 冯树文, 1983)。李冬梅等(2011)、薛艳等(2017)和李丽等(2022)对我国华北山东等地区

^{*} 收稿日期: 2024-06-30.

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U2039205); 中国地震局震情跟踪项目(2024020502); 国家重点研发计划(2018YFE0109700).

第一作者简介: 黎明晓(1978-), 高级工程师, 主要从事地震活动和综合预测研究. E-mail: lmx@seis.ac.cn.

通信作者简介: 余怀忠(1975-), 研究员, 主要从事地震孕育机理和预测理论研究. E-mail: yuhz750216@sina.com.

震群活动的时空特征与中强地震的关系研究表明,区域震群活跃是中强地震较好的中短期预测指标。目前,针对华南地区区域震群活动与中强地震关系的研究相对较少(郭培兰等, 2022), 这可能是因为该区域 20 世纪八九十年代地震监测能力有限, 而且 2000—2014 年 $M_s \geq 5.0$ 地震较少。2015—2023 年, 该地区发生了 7 次 $M_s \geq 5.0$ 地震, 最大为 2018 年 11 月 26 日台湾海峡 $M_s 6.2$ 地震, 为研究华南区域震群活动特征提供了震例。本文对 2010—2023 年华南地区 $M_L \geq 2.0$ 震群进行系统梳理, 分析该地区震群活动的时空特征与中强地震的关系, 结合地震活动与地球物理观测异常, 探讨发震机理。

1 研究区域及方法

1.1 研究区域与地震目录完备性分析

华南地区西倚青藏高原, 以龙门山—小江断裂带为界; 北以秦岭—大别造山带为界; 东侧沿东南沿海向北, 经台湾海峡, 至琉球岛弧西部; 南侧从云南的红河断裂向东南, 经北部湾至海南岛(董基恩等, 2022)。研究华南地区震群活动除了考虑构造因素外, 还需考虑小震目录完备性问题。华南地区西侧为四川省和云南省, 当前四川省内最小完备性震级基本达到 $M_L 1.0$, 四川地区东北部地区最小完备性震级为 $M_L 1.5 \sim 2.0$; 云南省内最小完备性震级达到 $M_L 1.8$, 省界附近为 $M_L 2.0$ (中国地震局监测预报司, 2024); 重庆最小完备性震级达到 $M_L 1.5$, 其中南部地区可达到 $M_L 1.0$ 。因此, 综合考虑将华南地区震群的研究区域设定为 30°N 以南、 106°E 以东地区, 其东与南侧沿用华南地块的边界(邓起东等, 2002), 研究区范围如图 1 所示。

1996—2009 年华南地区发生 $M_s \geq 4.0$ 地震共计 27 次, $M_s \geq 5.0$ 地震 3 次, 平均每年约发生 1.9 次 $M_s \geq 4.0$ 地震, 平均约 4.7 年发生 1 次 $M_s \geq 5.0$ 地震; 2010—2023 年华南地区发生 $M_s \geq 4.0$ 地震共计 39 次, $M_s \geq 5.0$ 地震 8 次, 最大为 2018 年 11 月 26 日台湾海峡 $M_s 6.2$ 地震, 平均每年发生约 2.8 次 $M_s \geq 4.0$ 地震, 平均 1.8 年发生 1 次 $M_s \geq 5.0$ 地震。相比较而言, 2010—

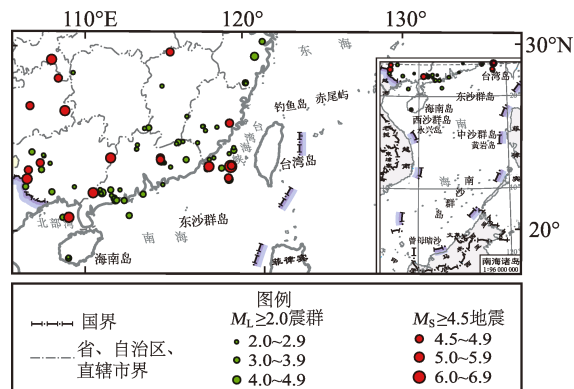


图 1 2010—2023 年华南地区 $M_L \geq 2.0$ 震群与 $M_s \geq 4.5$ 地震分布

Fig. 1 Distribution of $M_L \geq 2.0$ swarms and $M_s \geq 4.5$ earthquakes in South China from 2010 to 2023

2023 年 $M_s \geq 5.0$ 地震更丰富, 故研究时间段定为 2010—2023 年。

地震活动分析结果的可靠性依赖于所选取的地震目录(中国地震台网中心月报目录)的最小完备性, 使用前需计算地震目录的最小完备性震级 M_c , 常用的计算方法主要有最大曲率法、拟合优度测试法和 b 值稳定法等。最大曲率法选取震级—频度曲线中斜率最大值所对应的震级作为 M_c , 在实际应用中, 这个震级往往对应非累积震级—频度分布中拥有最多地震数目的震级(Wiemer, Wyss, 2000)。拟合优度测试法通过比较拟合震级—频度分布和观测震级—频度分布之间的差异来计算 M_c , 用百分比 R 表示拟合优度, 将 M_c 取为第一个使 R 达到设定水平(95% 或 90%)的震级(Wiemer, Wyss, 2000)。本文使用拟合优度测试法时, R 的水平线优先选择 95%, 若达不到则取 90%, 若仍达不到则取 R 的最大值。 b 值稳定法将 b 值的稳定性视为 M_{c0} 的函数, 并假设 b 值将会随着 M_{c0} 接近 M_c 而增大, 当 $M_{c0} \geq M_c$ 时, b 值将保持稳定, 一般用 b 值的不确定度 δb 作为稳定的标准(Cao, Gao, 2002)。图 2 为 2010—2023 年华南地区的震级—频度分布以及分别采用最大曲率法、拟合优度测试法和 b 值稳定法计算的 M_c 值。图中 A 点为最大曲率法计算的 $M_c = 0.1$; B 点为拟合优度测试法计算的 $M_c = 1.0$; C 点为 b 值稳定法计算的 $M_c = 0.8$ 。为尽可能确保分析结果的可靠性, 本文选取最大值 $M_L 1.0$ 作为后续分析的起始震级。

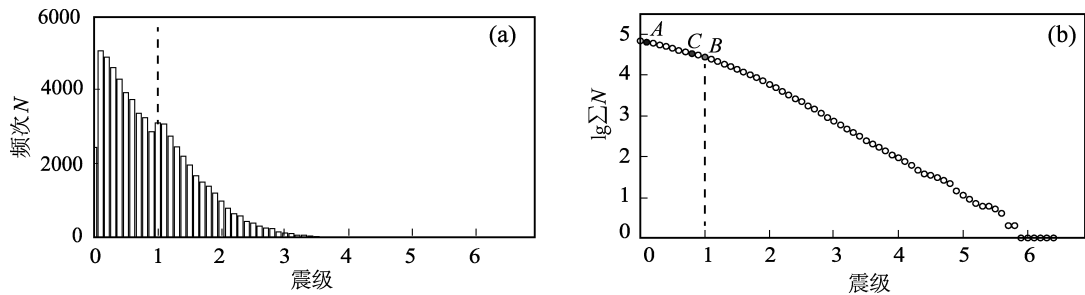


图2 2010—2023年华南地区地震震级-频度分布 (a) 和不同方法估计的最小完备性震级 (b)

Fig. 2 Magnitude - frequency distribution of earthquakes in South China from 2010 to 2023

(a) and the minimum complete magnitudes estimated by different methods (b)

根据华南地区 $M_s \geq 5.0$ 地震活动特点和地震完备性分析结果, 本文将识别震群时段选定为2010—2023年, 识别震群采用的地震数据为中国地震台网中心月报目录 (M_L), 分析中使用的最小震级确定为 $M_L 1.0$ 。目标地震 ($M_s \geq 4.5$) 则采用中国地震台网中心的速报目录 (M_s)。

本文采用的地球物理观测数据为全国各自治区、直辖市地震局每周报送的数据, 其中地球物理短期异常为预测时间至报送的时间间隔在3个月以内的异常。

1.2 震群判定标准

本文采用姜秀娥和陈非比 (1983) 提出的震群判定条件, 具体如下:

(1) 在同一地点 (半径 20 km 范围内) 的一群地震中, 在半个月内至少有 3 次震级最大的地震, 震级满足 $M_1 \geq M_2 \geq M_3$, 且 $\Delta M_{1,2} \leq 1$, $\Delta M_{2,3} \leq 1$, 但 $2.0 \leq M_1 < 6.0$, 其中 $\Delta M_{1,2}$ 、 $\Delta M_{2,3}$ 分别表示 M_1 与 M_2 、 M_2 与 M_3 的震级差。

(2) 震群活动峰值日 (连续 24 小时内) 的地震日频度 N 需满足以下条件之一: $M_L \geq 1.0$, $N \geq 7$; $M_L \geq 1.5$, $N \geq 5$; $M_L \geq 2.0$, $N \geq 4$; $M_L \geq 2.5$, $N \geq 3$, 当这 3 次地震中有 2 次 3 级以上地震时, $M_3 \geq 2.0$ 即可。

(3) 对于持续活动数月至数年的震群点, $M_L \geq 1.0$ 地震月频次高于平均值, 且与前一次峰值间隔 ≥ 6 个月, 同时满足条件 (1) 和 (2), 可记为一次震群。

(4) 对于强震的余震活动区, 地震活动频次衰减至背景地震活动后, 出现高于平均值且满足条件 (1) 和 (2) 的情况, 记为一次震群。

依据上述震群判定条件, 对 2010—2023 年华南地区 5 928 次 $M_L \geq 2.0$ 地震进行震群识别, 得到 109 次 $M_L \geq 2.0$ 震群, 震群空间分布如图 1 所示。识别得到的震群数量约占所有 $M_L \geq 2.0$ 地震的 1.8%, 平均每年发生 $M_L \geq 2.0$ 震群约 4.5 次。震群主要集中于东南沿海地震带, 尤其是闽粤及其近海, 约占华南地区震群总数的 78%。湖南和江西大部分地区震群分布较为稀疏。

2 震群与中强地震时空特征

2.1 华南地区震群频次的预测效能检验

震群频次研究主要取决于时间窗长、频次异常阈值、对应地震震级参数的选取, 因此本文针对不同参数的震群频次开展预测效能检验, 以期获得最优预测效能的华南地区震群频次。

对 2010—2023 年华南地区震群数据, 震群频次统计的时间窗长选取 30、60、120、150、180 和 365 d, 对应的地震震级按 $M_s \geq 4.5$ 、 $M_s \geq 4.8$ 、 $M_s \geq 5.0$ 选取, 频次异常的阈值至少大于平均值的 1 倍方差。2010—2023 年华南地区不同时间窗长的震群频次曲线与 $M_s \geq 4.5$ 地震如图 3 所示, 图中水平直线表示异常阈值; 水平虚线表示 1 倍方差。从图可以看出, 2010—2023 年华南地区震群频次曲线呈起伏变化, 大致在 2010、2013、2014、2015、2019 和 2023 年前后震群较为活跃, 不同时间窗的震群频次与 $M_s \geq 4.5$ 地震的对应关系较为复杂。因此, 无法直接评估震群频次的预测效能优劣, 需对华南地区震群预测效能开展较为系统的检验。

本文采用国家地震局科技监测司(1990)推出的预测效能 R 值方法评价华南地区震群频次效能,

当 $R > 0$ 、 $R \geq R_0$ 时才有一定预报效能, 其中 R_0 为按二项式分布原则保证 97.5% 置信的最低 R 值。

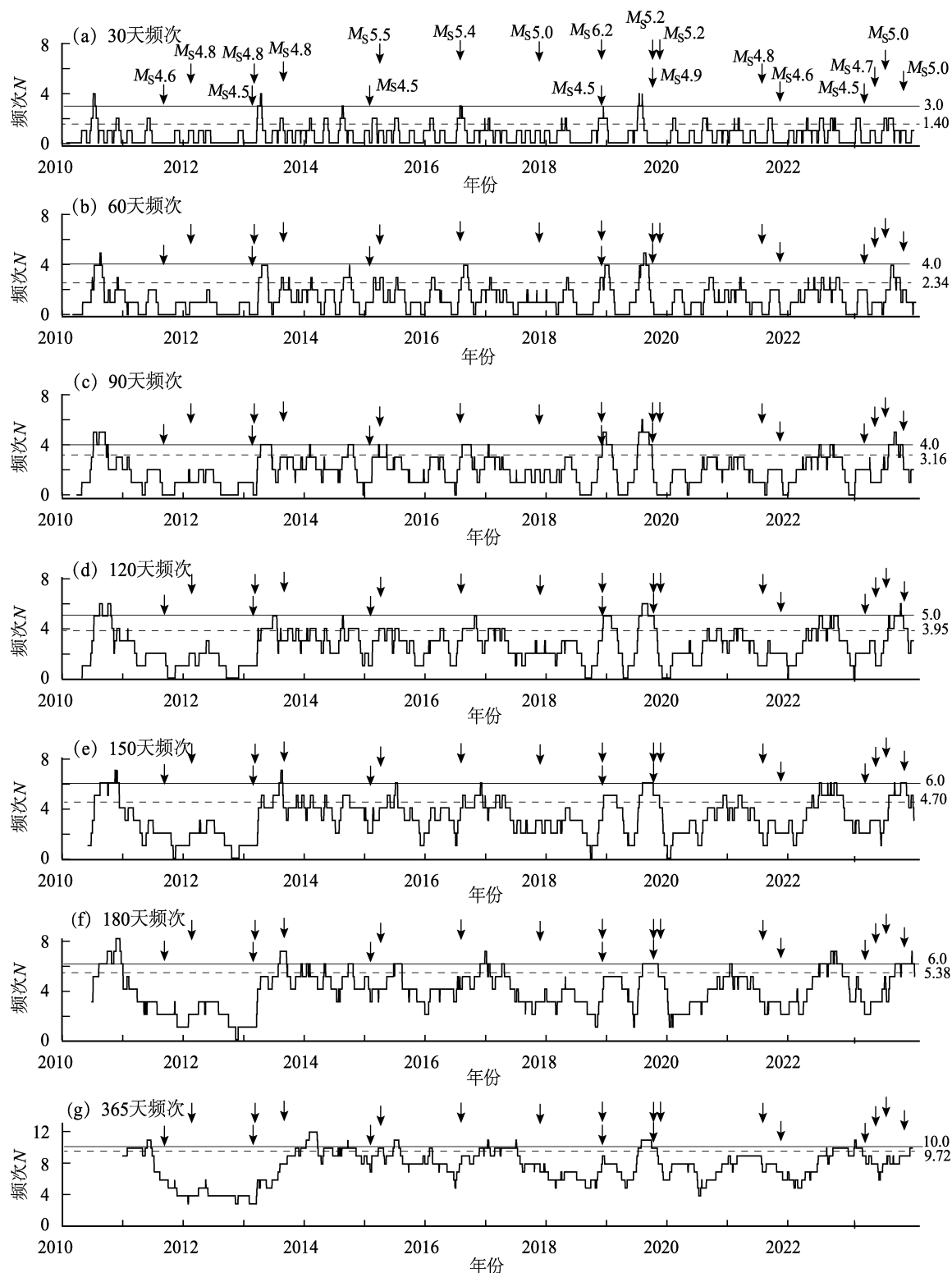
图3 2010—2023年华南地区不同时间窗长(1日滑动)的震群频次与 $M_s \geq 4.5$ 地震

Fig. 3 The frequency of earthquake swarms with different statistical window lengths (1 – day sliding) and earthquakes with $M_s \geq 4.5$ in South China from 2010 to 2023

$$R = \frac{\text{报对的地震次数}}{\text{应预报的地震总次数}} - \frac{\text{预报占用时间}}{\text{预报研究的总时间}} \quad (1)$$

式中： $R = 1$ 表示全部预测正确； $R = -1$ 表示全部预测错误。

通过 R 值方法评估不同统计时间窗长震群频次及其对应地震震级条件下的预测效能见表 1。从表 1 给出的不同时间窗长的震群频次与相对应地震的预测效能结果来看，2 个月和 3 个月的震群频次预测效能相对优于其他时间窗的震群频次预测效能，其他时间窗长的震群频次的预测效能 $R < R_0$ ，未通过检验，预测意义不显著。华南地区 2 个月震

群频次预测 $M_s \geq 5.0$ 地震效果最佳 ($R = 0.48$ 、 $R_0 = 0.40$)。从不同时间窗长的震群频次与相对应地震的优势预测时间结果 (表 1) 来看，3 个月、5 个月震群频次对应统计震级条件下的地震优势预测时间相对较短，其中 5 个月震群频次预测效能 $R < R_0$ ，未通过检验；3 个月震群频次预测效能 $R > R_0$ ，通过了检验，其对华南地区 $M_s \geq 4.5$ 、 $M_s \geq 4.8$ 、 $M_s \geq 5.0$ 地震的优势预测时间均为 20 天 ($M_s \geq 5.0$ 地震的预测效能最好， $R = 0.43$ 、 $R_0 = 0.34$)，具有短期特征。综合来看，2 个月和 3 个月时间窗长的震群频次的优势预测时间相对较短，预测效能较好，异常阈值均为 4 次。

表 1 不同统计时间窗长震群频次及其对应地震震级条件下的预测效能
Tab. 1 Prediction efficiency results of earthquake swarms' frequency in different time windows and corresponding earthquake magnitudes

时间窗长	$M_s \geq 4.5$			$M_s \geq 4.8$			$M_s \geq 5.0$		
	优势预测时间/d	R 值	R_0 值	优势预测时间/d	R 值	R_0 值	优势预测时间/d	R 值	R_0 值
1 个月	180	0.18	0.20	170	0.26	0.27	240	0.35	0.39
2 个月	160	0.23	0.22	200	0.35	0.30	200	0.48	0.40
3 个月	20	0.18	0.16	20	0.24	0.22	20	0.43	0.34
4 个月	240	0.18	0.23	110	0.19	0.24	240	0.45	0.52
5 个月	10	0.10	0.12	250	0.18	0.31	250	0.28	0.41
6 个月	620	0.08	0.22	250	0.13	0.30	410	0.20	0.41
12 个月	310	0.18	0.24	310	0.20	0.31	290	0.32	0.41

2.2 时间特征分析

梳理预测效能检验较好的 2 个月、3 个月震群频次，出现异常后距离 $M_s \geq 5.0$ 地震发生的时间，结果见表 2。其中 2010 年 7 月和 2013 年 4 月，华南 2 个月、3 个月震群频次出现异常，2010 年 10 月、2014 年 1 月和 2015 年 5 月华南 3 个月震群频次出现异常，这些异常发生后 1 年内华南地区均未发生 $M_s \geq 5.0$ 地震，因此，表内未列入这些异常。总体来看，华南 2 个月、3 个月震群频次异常时间大致同步，只有 2017 年、2022 年略有差异。2017 年重庆武隆 $M_s 5.0$ 和 2023 年北部湾 $M_s 5.0$ 地震前仅 3 个月震群频次出现异常。对于 2 个月震群频次，2010—2023 年共出现 8 次异常，其中 6 次异常后 200 天内发生 $M_s \geq 5.0$ 地震，2016 年之后的 5

次异常距离首次 $M_s \geq 5.0$ 地震的时间间隔均在 4 个月内；短期 (≤ 90 d) 发生的地震有 3 次，其中 2 次地震发生在震群出现异常后 3 天内。对于 3 个月震群频次，2010—2023 年共出现 15 次异常，其中 10 次异常后 1 年内华南地区发生 $M_s \geq 5.0$ 地震，200 d 内发生的地震为 7 次，短期 (≤ 90 d) 发生的地震为 5 次，占总异常数的 1/3。因此，华南地区 2 个月和 3 个月 $M_L \geq 2.0$ 震群高频异常对该区 $M_s \geq 5.0$ 地震有中短期预测意义，部分震例有短期特征，尤其是 3 个月震群频次。本文得出的华南地区震群高频异常对中强地震具有较好的预测效果这一结论，与郭培兰等 (2022) 关于华南地区西部震群频度的起伏可以反映区域地震活动水平的强弱的认识一致。

表 2 2010—2023 年华南地区 $M_s \geq 5.0$ 地震前震群高频异常统计

Tab. 2 Statistics of high-frequency anomaly of earthquake swarms before $M_s \geq 5.0$ earthquakes in South China from 2010 to 2023

序号	华南地区 $M_s \geq 5.0$ 地震	2 个月震群频次 $N \geq 4$		3 个月震群频次 $N \geq 4$	
		异常开始日期	发震时间间隔/d	异常开始日期	发震时间间隔/d
1	2015-03-30 贵州剑河 $M_s 5.5$	2014-09-15	196	2014-09-15 2015-03-17	196 13
2	2016-07-31 广西苍梧 $M_s 5.4$	2016-07-30	1	2016-07-30	1
3	2017-11-23 重庆武隆 $M_s 5.0$	无异常	—	2017-01-02	325
4	2018-11-26 台湾海峡 $M_s 6.2$	2018-11-23	3	2018-11-18	8
5	2019-10-12 广西北流 $M_s 5.2$	2019-06-18	116	2019-06-18 *	116
		2019-06-25 *	109		
6	2019-11-25 广西靖西 $M_s 5.2$	2019-06-18	160	2019-06-18 *	160
		2019-06-25 *	153		
7	2023-06-24 北部湾 $M_s 5.0$	无异常	—	2022-08-16	312
				2022-09-07	290
8	2023-10-23 广东南澳海域 $M_s 5.0$	2023-08-02	82	2023-08-02	82
				2023-10-12	11

注：* 表示 2019-10-12 广西北流 $M_s 5.2$ 地震与 2019-11-25 广西靖西 $M_s 5.2$ 地震前震群活跃异常相同。

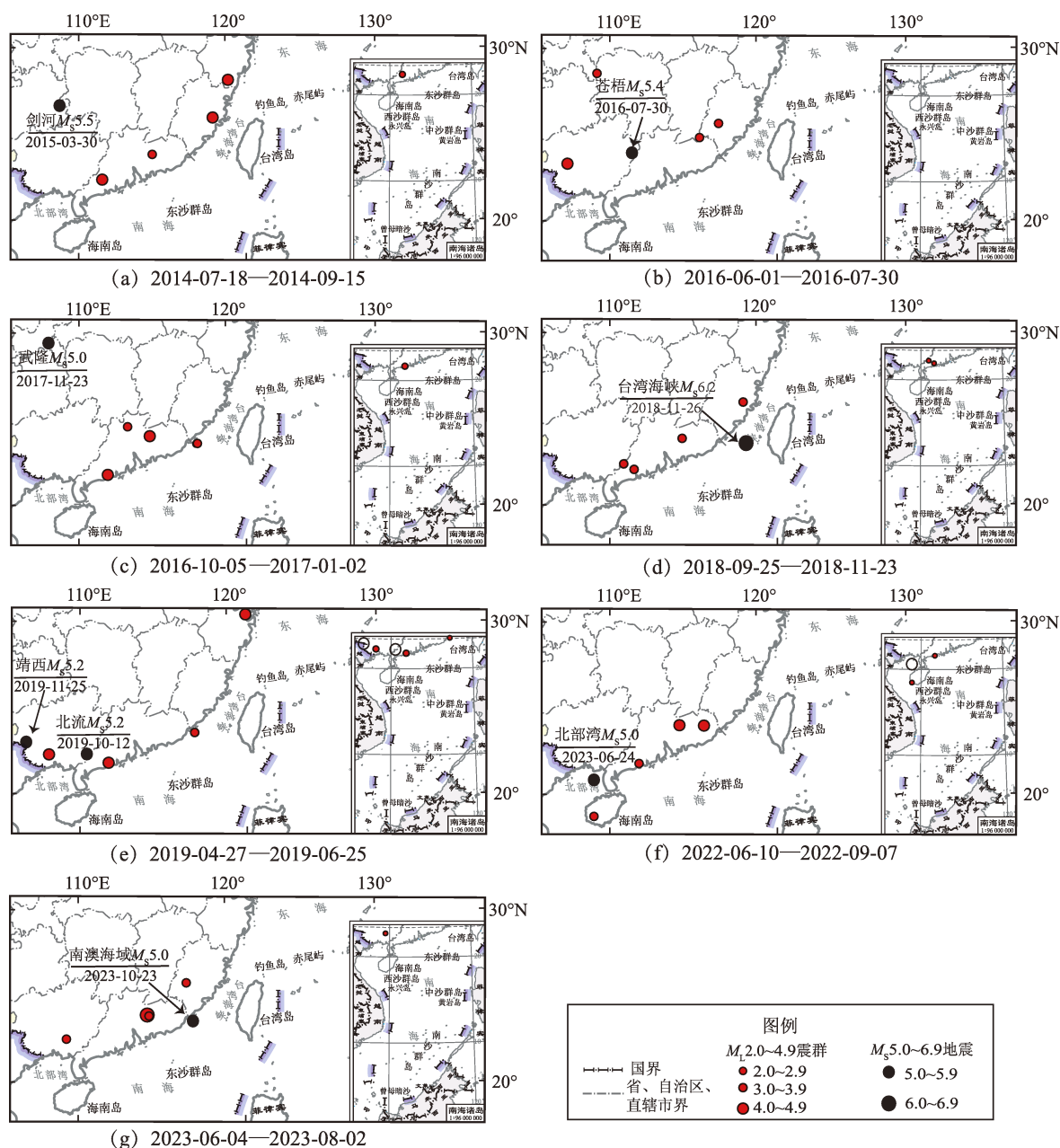
2.3 空间特征分析

从表 2 分析 2010—2023 年华南地区 $M_s \geq 5.0$ 地震前震群与目标地震的空间分布特征。华南地区 2 个月、3 个月震群频次异常时段大致同步，因此，以华南地区 2 个月 $M_L \geq 2.0$ 震群频次为主，补充了 2017 年 11 月 23 日重庆武隆 5.0 级和 2023 年 6 月 24 日北部湾 5.0 级地震前 3 个月震群频次震例，震群频次达到异常阈值 4 次及以上、1 年内发生 $M_s \geq 5.0$ 地震的空间分布如图 4 所示。2010—2023 年华南地区共发生 $M_s \geq 5.0$ 地震 8 次，震前 1 年内均出现震群活跃现象。其中 2015 年贵州剑河 $M_s 5.5$ 、2016 年广西苍梧 $M_s 5.4$ 和 2017 年重庆武隆 $M_s 5.0$ 地震（3 次）与震群空间分布无显著关系（图 4a~c），2018 年台湾海峡 $M_s 6.2$ ，2019 年广西北流 $M_s 5.2$ 、广西靖西 $M_s 5.2$ ，以及 2023 年北部湾 $M_s 5.0$ 、广东南澳海域 $M_s 5.0$ 地震（5 次）与震群空间分布较为密切（图 4d~g），占华南地区 $M_s \geq 5.0$ 地震总数的 5/8。在开展地震预测工作时，震群空间集中尺度可能偏大，可结合其它预测方法，进一步确定危险区域。

3 结果与讨论

在中强地震前，一般会出现小震活动增强、震群活跃等地震活动，以及地球物理观测短期异常增加现象。2010—2023 年华南地区发生的 8 次 $M_s \geq 5.0$ 地震前中短期阶段，出现了地震活动增强（华南地区 $M_L \geq 3.0$ 地震活跃）、震群活跃现象，以及地球物理观测短期异常数量也出现了显著增加，这反映了震前中短期区域应力场增强的特点。

以 2019 年 10 月 12 日北流 $M_s 5.2$ 、11 月 25 日靖西 $M_s 5.2$ 地震为例，在华南地区 $M_L \geq 2.0$ 震群出现活跃的同期或前后，华南地区 $M_L \geq 3.0$ 地震活动开始活跃，地球物理观测短期异常也显著增加。2018 年 12 月—2019 年 11 月华南地区 $M_L \geq 3.0$ 地震累计频次、 $M_L \geq 2.0$ 震群累计频次及地球物理观测短期异常月频次时序变化见图 5。2019 年 4—7 月华南地区 $M_L \geq 2.0$ 震群活跃显著，2019 年 6 月 25 日震群 2 个月频次达到异常阈值 4 次；2019 年 8—9 月 $M_L \geq 3.0$ 地震活跃显著，8 月 20 日—

图4 2014—2023年华南地区 $M_S \geq 5.0$ 地震前 $M_L \geq 2.0$ 震群空间分布Fig. 4 Distribution of the $M_L \geq 2.0$ earthquake swarms before the $M_S \geq 5.0$ earthquakes in South China from 2014 to 2023

9月21日共发生 $M_L \geq 3.0$ 地震12次,明显超过华南 $M_L \geq 3.0$ 地震月平均值水平(4.5次)和1倍方差(9.4次),8月20日海南三亚 $M_L 4.5$ 、9月21日南海 $M_L 4.3$ 地震,10月2日贵州沿河 $M_L 5.1$ 地震相继发生,地震频次与震级增强显著;2019年3—5月地球物理观测短期异常数量增加显著,增加10项,6—9月数量有所减少,也维持在16项左右,高于2019年1月前后。新增异常主要为河

池台、邕宁台、琼中台、泉州台、邵武台、龙岩台、永安台、漳州台、新丰江台等出现地磁异常。华南地区 $M_S \geq 4.9$ 地震前1年内一般出现地磁加卸载响应比、逐日比和地磁低点位移等地磁异常(阎春恒等,2022)。综上所述,在2019年北流5.2级、靖西5.2级地震前8个月地球物理观测短期异常开始增多,震前半年左右 $M_L \geq 2.0$ 震群活跃,震前3个月 $M_L \geq 3.0$ 地震活动增强,2次地震前

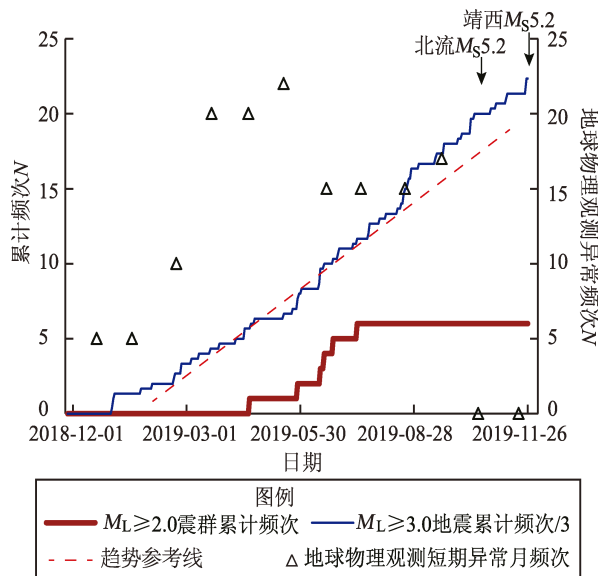


图5 广西北流 $M_s 5.2$ 、靖西 $M_s 5.2$ 地震前 $M_L \geq 2.0$ 震群、 $M_L \geq 3.0$ 地震累计频次和地球物理观测短期异常月频次时序图

Fig. 5 Cumulative frequency of the $M_L \geq 2.0$ earthquake swarms and the $M_L \geq 3.0$ earthquakes, short-term abnormal monthly geophysical observation frequency sequence before the Beiliu $M_s 5.2$ earthquake and the Jingxi $M_s 5.2$ earthquake in Guangxi

华南整体区域应力场由中期至短期逐渐增强,在应力场增强的过程中发生了2019年10月12日北流 $M_s 5.2$ 和11月25日靖西 $M_s 5.2$ 地震。

本文依据震群定义对华南地区小震活动进行识别时,未去除发生在水库地区的震群以及由暴雨引起的震群活动。主要基于以下两点考虑:①华南地区多数水库建成和蓄水时间较早,目前水库地区发生的震群可视作区域地震活动的窗口。水库地区的地震可分为水库诱发地震(一般发生在水库蓄水后6~7年内)和水库构造地震(一般发生在水库蓄水6~7年之后)。水库构造地震受控于区域应力场,与水库蓄水关系不大(杜运连等,2008)。华南地区的多数水库建成和蓄水的时间已远超过水库诱发地震的时间(一般发生在水库蓄水后6~7年内),比如新丰江水库1959年开始蓄水,新湖水库1963年开始蓄水,珊溪水库2000年开始蓄水,龙滩水库2006年开始蓄水(蒋海昆等,2014)等,因此,目前华南

地区水库附近发生的震群活动可能是反映区域地震活动增强的窗口。②华南地区暴雨诱发的震群活动较少,不影响区域震群活动频次分析。2010年6月广西凌云—凤山交界3级震群活动是暴雨触发引起局部地震活动的一个典型例子(蒋海昆等,2011)。2010年以来,华南地区其他类似的暴雨触发的震群活动并不多见,2010年5—8月华南地区2个月(或3个月)震群频次为5次,扣除1次广西凌云—凤山震群,仍达到异常阈值,对本次研究不造成影响。华南地区南澳海域、阳江、新丰江(河源)、海南岛等震群活动可能与地壳结构的强烈非均质性有关,主要受当地局部构造与流体作用的影响(夏少红等,2022),当局部应力扰动时,表现为个别震群活动;当区域整体应力场增强时,则出现多个震群活动,显示深部构造运动与流体作用的增强,通常孕育中强及以上地震。

2010年以来,研究区以北苏皖赣地区发生5.0级以上地震2次,分别为2013年12月16日湖北巴东5.1级和2021年11月17日江苏大丰海域5.0级地震,这两次地震距离研究区北边界的距离分别约为133和393 km。由表2可见,自2013年4月8日开始,华南地区出现2个月、3个月震群频次活跃现象,252天后在研究区外133 km处发生了湖北巴东5.1级地震,但是江苏大丰海域5.0级地震前1年内华南震群无活跃现象。因此,华南地区震群活跃异常除了反映本区内的中强地震活动,也可能反映了华南附近地区的中强地震活动。

4 结论

本文通过华南地区震群活动时空特征、预测效能评价等研究,结合该地区地球物理观测数据异常探讨了华南地区中强地震与 $M_L \geq 2.0$ 震群活动、 $M_L \geq 3.0$ 小震活动及地球物理观测异常的关系,得到以下结论:

(1) 华南地区震群2个月频次 $N \geq 4$ 是 $M_s \geq 5.0$ 地震的最优中短期预测指标,其优势预测时间为200 d,同时 $R = 0.48$ 、 $R_0 = 0.40$ 。

(2) 华南地区震群3个月频次 $N \geq 4$ 是 $M_s \geq$

5.0 地震较好的短期预测指标, 其优势预测时间为 20 d, 同时 $R=0.43$ 、 $R_0=0.34$ 。

(3) 震群活跃时段的空间分布对 $M_s \geq 5.0$ 地震的发震地点有一定的指示意义, 占华南地区 $M_s \geq 5.0$ 地震总数的 $5/8$, 但震群空间分布范围较大, 在开展地震预测工作时可结合其他预测方法判定地震危险区域。

(4) 2019 年广西北流 5.2 级和靖西 5.2 级地震前约 8 个月 (中期), 地球物理观测短期异常增加; 震前约 6 个月 (中短期), $M_L \geq 2.0$ 震群活跃; 震前约 3 个月 (短期), $M_L \geq 3.0$ 地震活动增强。华南地区小震、震群活跃, 地球物理观测异常增多, 反映了震前区域应力场的增强。

本文涉及到国界的插图均已送相关部门审查并获通过, 受理号: 国审字 (2024) 第 05002 号; 审图号: GS (2024) 4615 号。

感谢中国地震台网中心王博博士在绘图方面给予的帮助。

参考文献:

- 陈文明, 杨贵, 陈祥熊. 2006. 1999 年 9 月 24 日福州震群活动与地震构造的关系 [J]. 地震地磁观测与研究, 27 (4): 23–28.
- Chen W M, Yang G, Chen X X. 2006. The relationship between the Sep. 24, 1999 Fuzhou earthquake swarm activity and seismic structure [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 27 (4): 23–28. (in Chinese)
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 2002. 中国活动构造基本特征 [J]. 中国科学: 地球科学, 32 (12): 1020–1030.
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. 2003. Basic characteristics of active tectonics of China [J]. Scientia Sinica Terrae, 32 (12): 1020–1030. (in Chinese)
- 董基恩, 叶高峰, 魏文博, 等. 2022. 华南陆块东北部构造特征、成矿作用与动力学机制—来自大地磁测深的认识 [J]. 地质评论, 68 (3): 921–937.
- Dong J E, Ye G F, Wei W B, et al. 2022. Structural characteristics, mineralization and dynamic mechanism of the northeast South China Block: Understanding from magnetotelluric data [J]. Geological Review, 68 (3): 921–937. (in Chinese)
- 杜运连, 王洪涛, 袁丽文. 2008. 我国水库诱发地震研究 [J]. 地震, 28 (4): 39–51.
- Du Y L, Wang H T, Yuan L W. 2008. Analysis and research of China's reservoir induced seismicity [J]. Earthquake, 28 (4): 39–51. (in Chinese)
- 高原, 郑斯华, 王培德. 1996. 海南省东方地区 1992 年小震群剪切波分裂研究 [J]. 地球物理学报, 39 (2): 221–232.
- Gao Y, Zheng S H, Wang P D. 1996. Research of the shear wave splitting an swarm of small earthquakes in 1992 near Dongfang, Hainan Island [J]. Chinese Journal of Geophysics, 39 (2): 221–232. (in Chinese)
- 关露凝, 江国明. 2023. 福建仙游地区高精度地震震源定位及深部断裂特征 [J]. 现代地质, 37 (1): 40–47.
- Guan L N, Jiang G M. 2023. High-precision earthquake locations and deep fault characteristics beneath Xianyou area, Fujian province [J]. Geoscience, 37 (1): 40–47. (in Chinese)
- 郭培兰, 黄惠宁, 李莎, 等. 2022. 华南西部地区震群活动与中强震关系研究 [J]. 华南地震, 42 (4): 86–93.
- Guo P L, Huang H N, Li S, et al. 2022. Study on the relationship between earthquake swarm activity and moderate-strong earthquakes in Western South China [J]. South China Journal of Seismology, 42 (4): 86–93. (in Chinese)
- 国家地震局科技监测司. 1990. 地震学分析预报方法程式指南 [M]. 北京: 地震出版社.
- Department of Science and Technology Monitoring, National Earthquake Administration. 1990. Program guide for seismological analysis and prediction methods [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 国家地震局预测预防司. 1997. 测震学分析预报方法 [M]. 北京: 地震出版社.
- The Earthquake Prediction and Prevention Department, State Seismological Bureau. 1997. Seismic analysis and prediction methods [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 姜秀娥, 陈非比. 1983. 区域震群与唐山大震 [J]. 地震学报, 5 (2): 145–157.
- Jiang X E, Chen F B. 1983. Regional and earthquake swarms and the 1976 Tangshan earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 5 (2): 145–157. (in Chinese)
- 蒋海昆, 杨马陵, 孙学军, 等. 2011. 暴雨触发局部地震活动的一个典型例子: 2010 年 6 月广西凌云—凤山交界 3 级震群活动 [J]. 地球物理学报, 54 (10): 2606–2619.
- Jiang H K, Yang M L, Sun X J, et al. 2011. A typical example of locally triggered seismicity in the boundary area of Lingyun and Fengshan following the large rainfall event of June 2010 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 54 (10): 2606–2619. (in Chinese)
- 蒋海昆, 张晓东, 单新建, 等. 2014. 中国大陆水库地震统计特征及预测方法研究 [M]. 北京: 地震出版社.
- Jiang H K, Zhang X D, Shan X J, et al. 2014. Study on statistical characteristics and prediction methods of reservoir earthquakes in China [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 康英, 王正尚, 和景琳, 等. 1998. 1997 年广东台山小震群特征 [J]. 华南地震, 18 (4): 64–68.

- Kang Y, Wang Z S, He J L, *et al.* 1998. The Guangdong Taishan earthquake swarm in 1997 [J]. *South China Journal of Seismology*, 18 (4): 64 – 68. (in Chinese)
- 李冬梅, 周翠英, 董翔, 等. 2011. 山东地区震群活动与周围地区中强地震的关系[J]. *华北地震科学*, 29(4): 21 – 26.
- Li D M, Zhou C Y, Dong X, *et al.* 2011. Relationship between earthquake swarms in Shandong area and mid-strong earthquakes in its surrounding area[J]. *North China Earthquake Sciences*, 29(4): 21 – 26. (in Chinese)
- 李丽, 孟令媛, 吴昊昱, 等. 2022. 晋冀蒙交界地区中强地震前地震活动图像异常特征[J]. *地震研究*, 45(4): 581 – 591.
- Li L, Meng L Y, Wu H Y, *et al.* 2022. Characteristics of seismic activity before the medium-strong earthquakes in the bordering region of Shanxi, Hebei and Inner Mongolia[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(4): 581 – 591. (in Chinese)
- 李帅, 潘黎黎, 严小敏, 等. 2018. 流体触发 2013 年广西平果震群活动机理研究[J]. *地震研究*, 41(4): 559 – 567.
- Li S, Pan L L, Yan X M, *et al.* 2018. Research on mechanism of fluid triggering 2013 Pingguo earthquake swarm in Guangxi[J]. *Journal of Seismological Research*, 41(4): 559 – 567. (in Chinese)
- 李兴才, 冯树文. 1983. 震群活动的一种可能触发机制[J]. *地震学报*, 5(3): 44 – 50.
- Li X C, Feng S W. 1983. A possible triggering mechanism for earthquake swarms[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 5(3): 44 – 50. (in Chinese)
- 马晓静, 吕作勇, 龚萱, 等. 2018. 河源地区小震群的检测与定位[J]. *华南地震*, 38(1): 39 – 46.
- Ma X J, Lyu Z Y, Gong X, *et al.* 2018. Detection and location of a small earthquake sequence in Heyuan[J]. *South China Journal of Seismology*, 38(1): 39 – 46. (in Chinese)
- 秦双龙, 邱毅. 2018. 福建仙游震群序列发震构造分析研究[J]. *地震工程学报*, 40(6): 1306 – 1311.
- Qin S L, Qiu Y. 2018. Study of seismogenic structures for Xianyou earthquake swarm sequence[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 40(6): 1306 – 1311. (in Chinese)
- 王力伟, 王小娜, 吴国瑞, 等. 2018. 2018 年 3 月 20 日阳江新湖水库 M_L 4.2 级震群发震机理分析[J]. *华南地震*, 38(S1): 1 – 8.
- Wang L W, Wang X N, Wu G R, *et al.* 2018. Seismological mechanism analysis of M_L 4.2 earthquake swarm on March 20th in Xinhui reservoir Yangjiang[J]. *South China Journal of Seismology*, 38(S1): 1 – 8. (in Chinese)
- 王鹏, 孙冬军, 任烨, 等. 2017. 浙江珊溪水库 2014 年震群活动发震机理研究[J]. *地震学报*, 39(5): 648 – 658.
- Wang P, Sun D J, Ren Y, *et al.* 2017. Investigation on the seismogenic mechanism of the 2014 earthquake swarm in Shanxi reservoir, Zhejiang Province[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 39(5): 648 – 658. (in Chinese)
- 王小娜, 邓志辉, 叶东华, 等. 2017. 2016 年 10 月广东乳源 M_L 2.8 级震群活动特征[J]. *华南地震*, 37(3): 1 – 8.
- Wang X N, Deng Z H, Ye D H, *et al.* 2017. Seismic activity characteristic of Ruyuan M_L 2.8 earthquake swarm in October, 2016 in Guangdong[J]. *South China Journal of Seismology*, 37(3): 1 – 8. (in Chinese)
- 夏少红, 林江南, 曹敬贺. 2022. 南海北部沿海地区地震活动与发震构造[J]. *大地构造与成矿学*, 46(3): 455 – 470.
- Xia S H, Lin J N, Cao J H. 2022. Seismicity and seismogenic structure in the northern coastal area of the South China Sea[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(3): 455 – 470. (in Chinese)
- 薛艳, 陈琳荣, 黎明晓, 等. 2017. 华北地区震群活动与强震[J]. *华北地震科学*, 35(2): 1 – 9.
- Xue Y, Chen L R, Li M X, *et al.* 2017. Relationship between earthquake swarms and the strong earthquake in North China[J]. *North China Earthquake Sciences*, 35(2): 1 – 9. (in Chinese)
- 阎春恒, 李莎, 倪晓寅. 2022. 广西及邻区地磁异常与显著地震关系探讨[J]. *华北地震科学*, 40(1): 84 – 91.
- Yan C H, Li S, Ni X Y. 2022. Discussion on the relationship between recent geomagnetic anomalies and significant earthquakes in Guangxi and its adjacent areas[J]. *North China Earthquake Sciences*, 40(1): 84 – 91. (in Chinese)
- 中国地震局监测预报司. 2024. 全国震情短临跟踪与会商研判技术方案(上册)[M]. 北京: 地震出版社.
- Department of Monitoring and Forecasting, China Earthquake Administration. 2024. Technical scheme for short-term and imminent earthquake tracking and deliberation analysis in China (Volume 1) [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 钟贻军. 1996. 1993 年广东连山小震群活动特征[J]. *华南地震*, 16(4): 56 – 60.
- Zhong Y J. 1996. Features of the 1993's Lianshan small earthquake swarm in Guangdong Province[J]. *South China Journal of Seismology*, 16(4): 56 – 60. (in Chinese)
- 朱传镇. 1985. 震群研究进展和问题[J]. *山西地震*, (1): 14 – 19.
- Zhu C Z. 1985. Progress and problems in seismic swarm research[J]. *Earthquake Research in Shanxi*, (1): 14 – 19. (in Chinese)
- Cao A, Gao S S. 2002. Temporal variation of seismic b -values beneath northeastern Japan island arc[J]. *Geophysical Research Letters*, 29(9): 1334.
- Wierner S, Wyss M. 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(4): 859 – 869.

Study on the Medium- and Short-term, Temporal and Spatial Characteristics of Earthquake Swarm Activities in South China

LI Mingxiao, YU Huaizhong, XUE Yan, YAN Wei, JIANG Xianghua
(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract

This article studies the relationship between the frequency of earthquake swarms ($M_L \geq 2.0$) in different time windows and moderate-and strong-earthquakes in Southern China. After the predictive performance evaluation, we analyze the medium-and short-term, spatial, temporal characteristics of earthquake-swarm activity in South China. In addition, we discuss the seismogenic process based on the seismic activity and geophysical observation anomalies. The results show that: ①The frequency of the earthquake swarms ($M_L \geq 2.0$) in Southern China in 2 months is equal to or greater than 4. This frequency is the optimal indicator predicting earthquakes ($M_S \geq 5.0$) in short-and medium-term. The most probable prediction period is 200 days ($R = 0.48$, $R_0 = 0.40$); ②The frequency of the swarms ($M_L \geq 2.0$) in Southern China in 3 months is equal to or greater than 4. This frequency is the optimal indicator predicting earthquakes ($M_S \geq 5.0$) in short- and medium-term. The most probable prediction period is 20 days ($R = 0.43$, $R_0 = 0.34$); ③The spatial distribution of active earthquake clusters has a certain indication of the epicenter of future earthquakes ($M_S \geq 5.0$) in South China, but the range of seismic clusters is relatively large, so when predicting earthquakes, one should refer to other prediction methods to determine the potential earthquake location; ④The number of short-term geophysical anomalies increased proximately 8 months before the Beiliu $M_S 5.2$ earthquake and the Jingxi $M_S 5.2$ earthquake in Guangxi. The seismic swarm was active about 6 months before the two earthquakes. And small earthquakes were active approximately 3 months before the two earthquakes. Earthquake activity synchronized with the geophysical anomalies, reflecting the enhancement of the regional stress field before the two earthquakes.

Keywords: earthquake swarms in South China; medium- and short-term; spatial and temporal characteristics; efficiency test