

杨云存,姜金钟,刘克骧,等.2025.2023年云南芒市 M_L 4.0震群序列研究[J].地震研究,48(1):010-021,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0002.

Yang Y C, Jiang J Z, Liu K X, et al. 2025. Research on the characteristics of the Mangshi M_L 4.0 earthquake sequence in 2023 [J]. *Journal of Seismological Research*, 48(1): 010-021, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0002.

2023年云南芒市 M_L 4.0震群序列研究*

杨云存¹, 姜金钟^{1,2*}, 刘克骧¹, 王华柳¹, 孙自刚¹, 杨铭昌¹

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 中国地震局昆明地震预报研究所, 云南 昆明 650224)

摘要: 基于云南地震台网和腾冲火山台网的宽频带地震波形资料和震相报告文件以及川滇地区高分辨率公共速度模型2.0版, 采用结合波形互相关技术的双差相对定位法对2023年云南芒市 M_L 4.0震群序列中442次地震进行重定位, 利用CAP方法反演了地震序列中 $M_L \geq 3.5$ 地震震源机制解, 研究了芒市 M_L 4.0震群序列的发震机理, 探讨该震群是前震序列还是普通震群。双差定位法获得了363次地震的精定位结果, 震中走向呈NE向, 地震序列呈三角形形态分布。CAP波形反演 M_L 4.0地震最佳双力偶机制解为节面I走向 45° , 倾角 70° , 滑动角 -61° ; 节面II走向 167° , 倾角 35° , 滑动角 -143° , 矩震级为 M_w 3.91, 最佳矩心深度为7 km。综合精定位后地震序列的时空分布特征、震源机制解信息、S-P走时差、区域地质构造和地震活动性探讨此次地震的发震构造及孕震环境, 结果表明: 此次震群不是前震序列, 而是一次普通的3~4级震群活动。地震序列在不同阶段的时空演化过程可能是由至少2条存在一定夹角的断层结构在高应力和区域的温泉地热活动引发。

关键词: 芒市震群; 双差定位; CAP反演; 地震活动性; 流体扩散

中图分类号: P315.72 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2025)01-0010-12
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0002

0 引言

震群是指一组在空间和时间上丛集发生的地震序列, 不同于常见的主-余型地震序列, 震群内主要地震事件的震级大小相当、缺乏明显的主震事件。根据陆远忠等(1984)和《测震分析预测技术方法工作手册》(中国地震局监测预报司, 2020)给出的震群定义, 震群内的地震事件应在空间分布、频度以及震级上满足以下标准: ①半径 ≤ 20 km, 与外围地震的分布有较明显的界限; ②最大日频次 ≥ 3 次, 总次数大于等于10次; ③序列中最大地震的震级 $M_L \leq 5.2$, 最大与次大地

震震级差 ≤ 1.1 ; ④至少有3个震级相差不大(震级差 < 0.6)的主要地震。

已有的观测和研究结果表明, 震群序列通常发生在流体侵入地区(如火山区、水库区、高压注水区等)、断层深部无震滑移形变区和(或)多组断层构造交接复合的地壳介质不均匀且处于高应力状态等构造区域(Chen et al., 2011; Shelly et al., 2016; Dublanchet, De Barros, 2020)。因此针对震群序列的研究可为深入认识震区断层构造、流体运移、应力状态以及地震危险性等问题提供重要科学依据。

震群的孕育发生是震源区及周边区域地壳活动、应力增强的客观反映, 一部分震群活动对周

* 收稿日期: 2024-07-27.

基金项目: 云南省地震局传帮带项目(CQ2-2023-01); 国家防震减灾重点区域减轻地震灾害损失能力建设云南子项目。

第一作者简介: 杨云存(1988-), 工程师, 主要从事地震分析编目工作. E-mail: 526381659@qq.com.

通信作者简介: 姜金钟(1987-), 副研究员, 主要从事地震学研究. E-mail: jiangjz@seis.ac.cn.

边区域中强地震的发生具有一定的中短期指示意义(即“前兆震群”或“前震序列”),在此类震群发生后的一定时空范围内(一般3~12个月、距离震群几十至数百千米)会发生破坏性中强地震(窦喜英等,2020);而另一部分震群活动后周边区域并没有中强地震发生,即震群序列活动一段时间后就逐渐衰减、停止。然而究竟是哪些因素影响、控制震群周边地区的中强地震活动,以及震群活动是否与周边破坏性地震的发生有直接因果关系等问题目前还没有明确定论。

目前针对震群型地震序列与后续大震发生的相关性研究主要有两类:一类是根据震群地震序列从时、空、强表现出来的特征总结了判定震群是属于前震序列还是一般性小震群的特征判断指标,如 U 值(陆远忠等,1984), K 值(朱传镇,王林瑛,1989), ρ 值(王伟,杨德志,1987),震源分布、 b 值和活动频次等参数(王光明等,2024);另一类是对一个大区域较大范围的众多地震,从总体上研究他们的特征(朱传镇等,1981;窦喜英等,2020)。然而,最近针对美国南加州地震目录中的前震与震群地震活动性参数(地震活动频次、时空分布等)的研究结果表明该地区的震群和前震在地震活动性方面可能没有明显区别(Zaccagnino *et al.*, 2024)。

据云南地震台网正式测定,2022年12月12日—2023年7月12日在云南省德宏州芒市发生了一系列 $M_L \geq 3.0$ 中小地震,并伴随发生多次小震活动。截至2023年7月31日该区域共发生地震442次,其中 $M_L < 2.0$ 地震387次, $2.0 \leq M_L < 3.0$ 地震45次, $3.0 \leq M_L < 4.0$ 地震9次, $M_L \geq 4.0$ 地震1次。此次芒市地震序列中最大震级为 $M_L4.0$,次大震级为 $M_L3.9$,两者震级差为0.1级,中间未出现超过15日无 $M_L \geq 1.5$ 地震发生的情况,这些特征符合《测震分析预测技术方法工作手册》(中国地震局监测预报司,2020)中关于震群的定义,为了研究和表述方便本文将其命名为2023年芒市 $M_L4.0$ 震群。

为了深入研究2023年芒市 $M_L4.0$ 震群序列的发震机理,并从震源参数角度探讨该震群是前震序列还是普通震群,本文基于宽频带数字地震波形和区域速度模型,采用结合波形互相关技术的双差相对定位法(Waldhauser, 2000)对此次芒市 $M_L4.0$ 震群地震序列进行重定位,利用CAP方法(Zhao, Helmberger, 1994; Zhu, Helmberger, 1996)反演了地震序列 $M_L \geq 3.5$ 地震震源机制解,综合震源位置、震源机制解等震源参数、震区地质构造特征和历史地震活动,探讨此次 $M_L4.0$ 震群的成因机理,并初步研判其与临近区域未来潜在中强地震的活动关系。

1 数据选取

2023年芒市 $M_L4.0$ 震群震中附近200 km范围内布设有云南地震台网17个固定地震台站(其中有4个火山台网子台)、12个腾冲火山台网子台(图1、图2)。2023年1月9日 $M_L4.0$ 地震发生后,腾冲地震监测中心站在震源区又布设了2个短周期地震台用于加密观测。云南地震台网提供的目录显示,2022年12月24日—2023年3月2日的 $M_L \geq 3.0$ 地震震源深度均接近20 km(表1),与中国地震台网正式测定和公布的10 km震源深度存在明显差异。

本文利用CAP方法反演2022年12月—2023年7月研究区内 $M_L \geq 3.5$ 地震事件(表1)的震源机制解和最佳矩心深度,选取震中距35~300 km的宽频带数字波形,基于给定的2种地壳速度模型进行反演(图3a):①根据Brian Chen和斯坦福大学地壳地球物理实验室分享的Matlab脚本^①,提取(24.5°N, 98.5°E)区域内的全球地壳模型CRUST1.0速度模型,记为模型A(Laske *et al.*, 2013);②川滇地区高分辨率公共速度模型2.0版本(SWChinaCVM-2.0^②,记为模型B(Liu *et al.*, 2024)。

本文收集整理了2022年12月—2023年7月云

① <https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html#smatlab>.

② <https://github.com/liuyingustc/SWChinaCVM-V2.0>.

南地震台网记录到的发生在芒市 $M_L4.0$ 主震震中位置 (24.270°N , 98.632°E) 附近 20 km 范围内

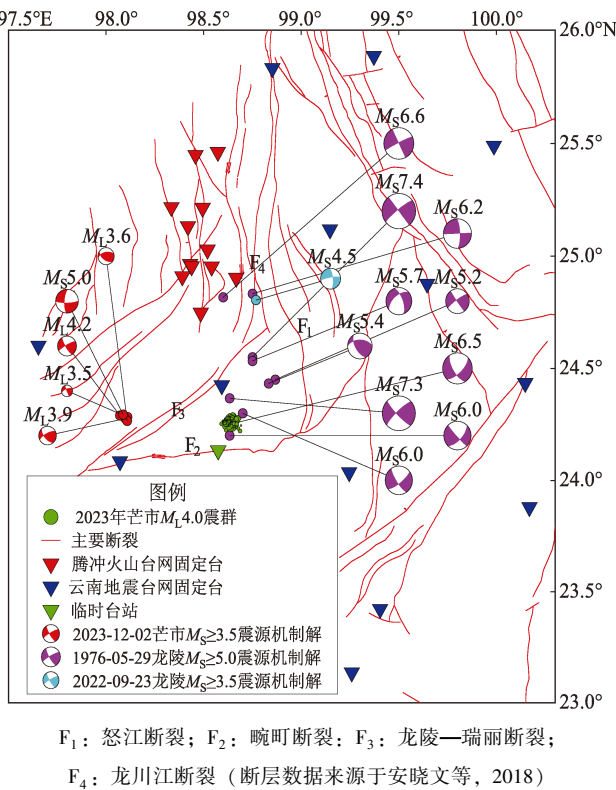


图 1 2023 年芒市 $M_L4.0$ 震群地震序列空间分布、断裂、周边台站和历史强震分布图

Fig. 1 The 2023 Mangshi $M_L4.0$ earthquake swarm, faults, stations, and historical strong earthquakes in the study area

的 442 次地震 (图 2) 的观测报告, 并根据地震观测报告中的发震时刻、震中、震级等信息, 补充了腾冲火山台网正式编目观测报告中的震相到时资料 (图 3b)。同时, 从云南地震台网和腾冲火山台网波形资料中选取至少同时有 3 个台站记录到的地震事件波形用于波形互相关分析, 以进一步提高后续的地震定位精度。

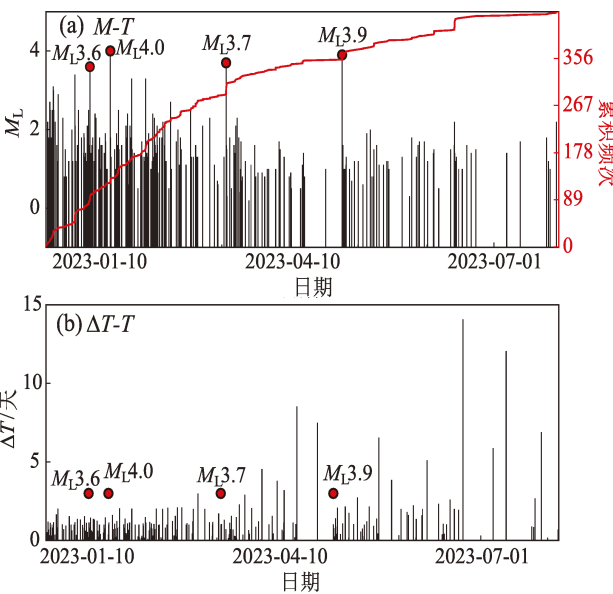


图 2 2023 年芒市 $M_L4.0$ 震群地震序列 $M-T$ (a) 和 $\Delta T-T$ (b) 图

Fig. 2 The $M-T$ (a) and $\Delta T-T$ (b) diagrams of the 2023 Mangshi $M_L4.0$ earthquake swarm

表 1 云南地震台网记录的 2023 年芒市 $M_L4.0$ 震群 $M_L\geq3.0$ 地震目录

震群活动阶段	事件编号	发震日期	发震时间	震中位置		震源深度/km	M_L
				$\varphi_N/(^\circ)$	$\lambda_E/(^\circ)$		
第一阶段	1	2022-12-15	07: 45: 59.00	24. 256	98. 633	10	3. 1
	2	2022-12-15	08: 55: 51.00	24. 272	98. 631	10	3. 0
第二阶段	3	2022-12-24	23: 32: 19.00	24. 263	98. 633	19. 38	3. 4
第三阶段	4	2022-12-31	17: 34: 34.00	24. 262	98. 633	20. 16	3. 6
第四阶段	5	2023-01-09	20: 51: 32.00	24. 270	98. 632	19. 55	4. 0
	6	2023-01-19	11: 36: 32.00	24. 258	98. 626	17. 99	3. 3
	7	2023-01-25	18: 06: 25.00	24. 260	98. 622	17. 96	3. 3
第五阶段	8	2023-03-02	19: 52: 01.00	24. 258	98. 628	18. 68	3. 7
	9	2023-04-23	20: 46: 07.00	24. 248	98. 623	8. 82	3. 3
第六阶段	10	2023-04-23	20: 46: 17.00	24. 266	98. 632	9. 35	3. 9

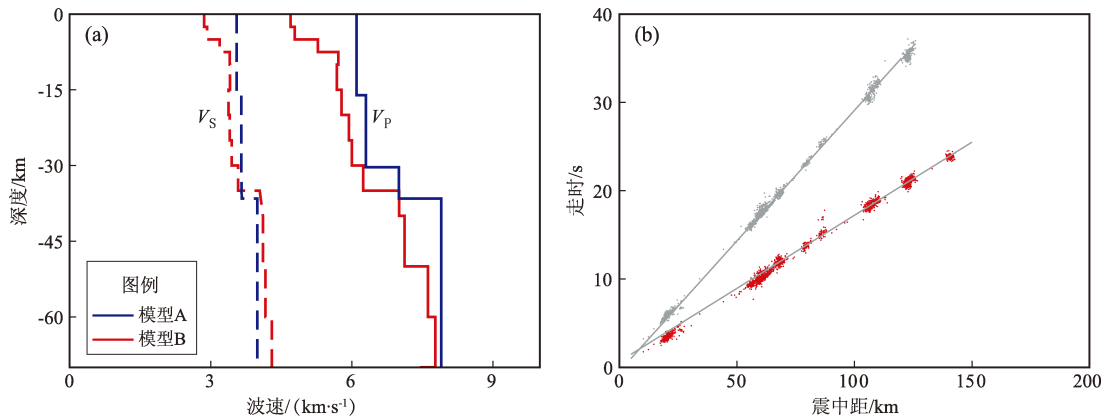


图3 用于CAP反演的P波（实线）、S波（虚线）速度模型（a）和震相观测走时曲线（b）

Fig. 3 P-wave velocity model (solid line), S-wave velocity model (dashed line) (a), and the travel-time curves of the observed seismic phases (b) for CAP inversion

2 研究结果

2.1 CAP 方法反演震源机制解及矩心深度

挑选 2023 年芒市 $M_L4.0$ 震群中 4 次 $M_L \geq 3.5$ 地震（表 1）在震中距 300 km 范围内的宽频带数字波形，利用云南地震台产出的观测报告在地震波形中写入 P、S 震相到时，对其做去均值、去线性趋势及去除仪器响应等数据预处理后，将速度记录从 NS - EW - UD 分量旋转到大圆弧路径上，从而获得 $R - T - Z$ 分量的波形记录；分别利用模型 A 和模型 B，采用 F - K 方法（Zhu, Rivera, 2002）计算 2 种速度模型在震中距 35 ~ 300 km、震源深度 1 ~ 25 km 的格林函数库用于后续的 CAP 反演工作（图 4）。

在 CAP 反演过程中，将 Pnl 波和面波的截取窗长分别设为 30 s 和 70 s，反演权重分别设为 1 和 0.5。为了提高波形信噪比，并考虑到 3 次地震事件的震级均不超过 $M_L4.0$ ，本文在反演过程中采用相对高频的滤波频段（李姣等，2021），即对 Pnl 部分以 0.15 ~ 0.3 Hz、面波部分以 0.08 ~ 0.15 Hz 进行 4 阶 Butterworth 带通滤波，最后在断层走向（ $0^\circ \sim 360^\circ$ ）、倾角（ $0^\circ \sim 90^\circ$ ）、滑动角（ $-90^\circ \sim 90^\circ$ ）和震源深度（1 ~ 25 km）空间范围内搜索最佳的震源机制解和震源矩心深度。经过反演，本文得到了 3 次 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解和震源深度（表 2）。由于 2023 年 4 月 23 日 $M_L3.9$ 地震发生前 10 s 发生了一次 $M_L3.3$ 地震，两次地震波形叠加，故未得到该地震准确可靠的震源机制解反演结果。

表 2 利用 CAP 方法反演 2023 年芒市 $M_L4.0$ 震群 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解和最佳矩心深度
Tab. 2 The source mechanism solution and the optimal moment center depth of the $M_L \geq 3.5$ earthquakes in the 2023 Mangshi $M_L4.0$ earthquake swarm inverted by the CAP method

事件 编号	M_L	目录深度/ km	速度模型	反演深度/ km	节面 I / (°)			节面 II / (°)		
					走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
4	3.6	20.16	模型 A	6	30	60	-90	210	30	-90
			模型 B	7	29	62	-84	196	29	-101
5	4.0	19.55	模型 A	12	54	80	-51	156	40	-164
			模型 B	7	45	70	-61	167	35	-143
8	3.7	18.68	模型 A	5	36	66	-80	193	26	-111
			模型 B	7	40	70	-66	171	33	-134

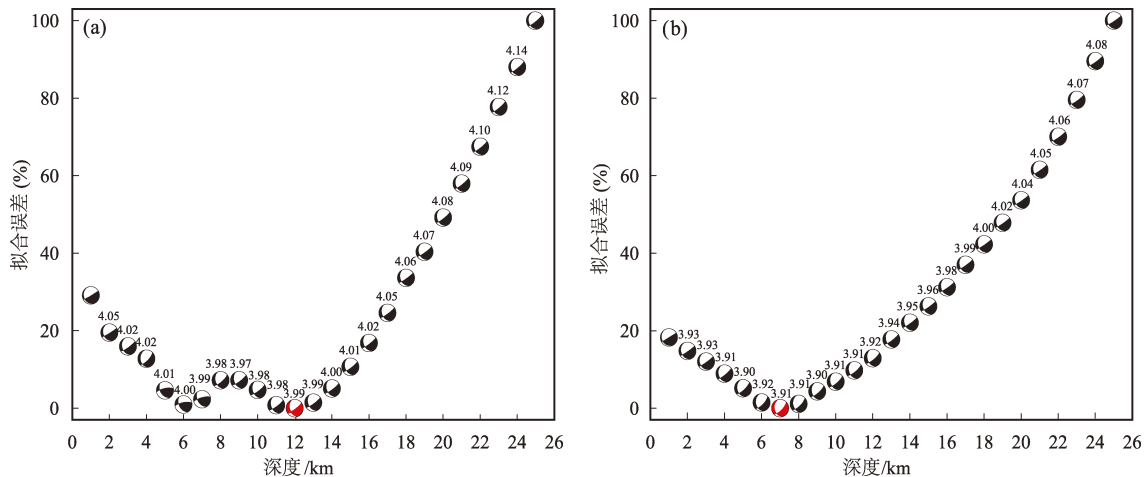


图4 基于区域速度模型 A (a) 和模型 B (b) 的 $M_L 4.0$ 主震 CAP 方法震源深度拟合结果

Fig. 4 Fitted results of the waveform of the $M_L 4.0$ earthquake with CAP method based on regional velocity model A (a) and model B (b)

CAP 方法反演表明, 本文得到的 3 次地震的最佳矩心深度 (5 ~ 12 km), 比云南地震台网地震目录中的震源深度 (20 km 左右) 要浅许多 (表 2), 并且在同一速度模型下反演得到 3 次地震的震源机制解存在一定差异 (最大相差约 20°)。对比分析此次地震在 2 种速度模型下的 CAP 反演拟合误差, 以及对理论波形 (图 5 中红色波段) 和实际观测波形 (图 5 中黑色波段) 的互相关系数、不同波段滑移时间量等表明, 基于模型 B 的反演结果更优, 表明该模型应更接近研究区地下真实速度结构, 故本文采用模型 B 用于后续研究。

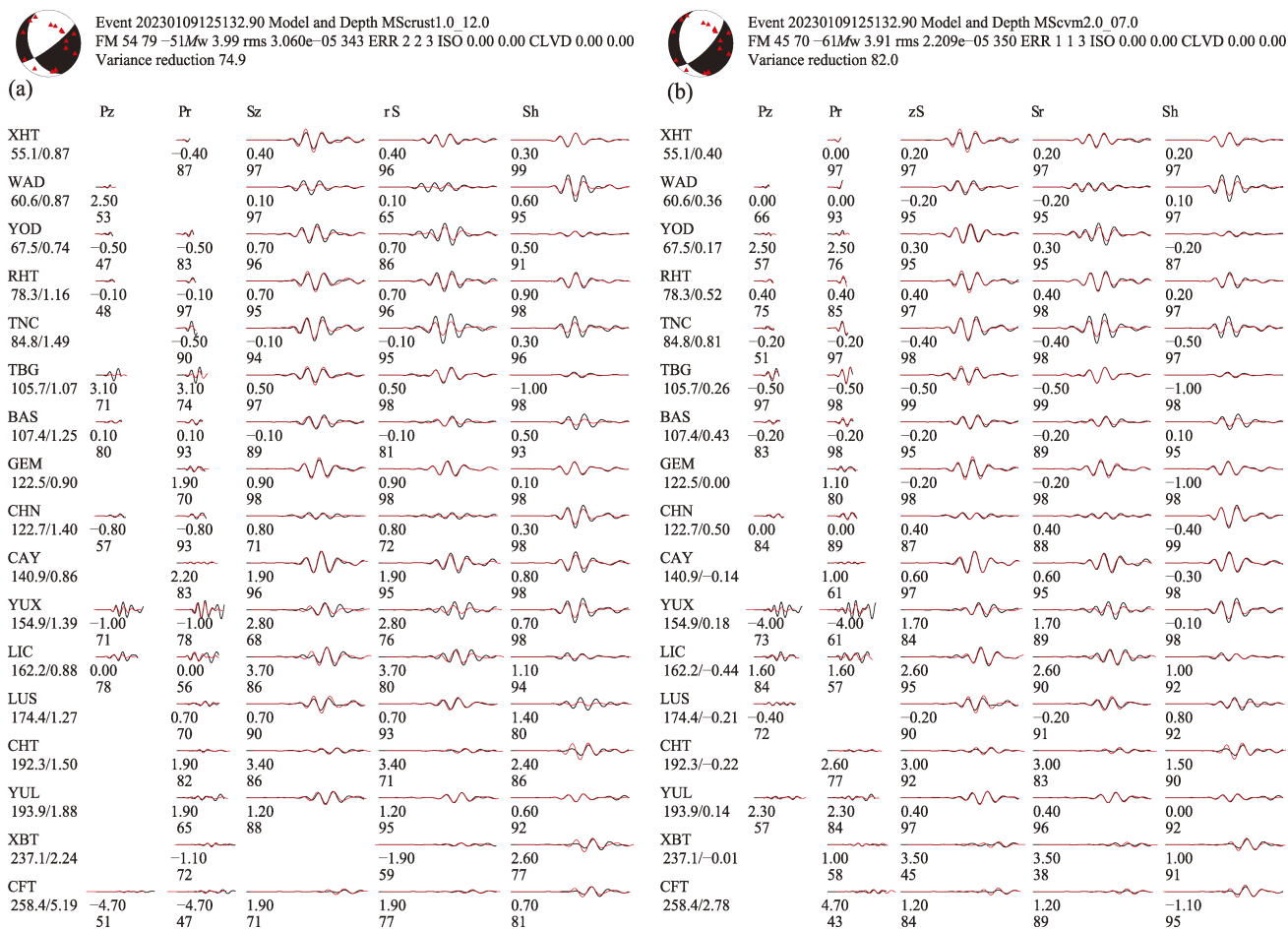
2.2 震群序列的双差重定位

精确的震源位置对于地球内部结构和地震孕育过程认知、断层精细结构探测、地震预警研究、震后预测、救援、资源能源勘探开发等众多科学技术问题至关重要 (侯新荣等, 2024)。目前云南地震台网和腾冲火山台网日常分析使用的地震定位方法是经典的单纯型绝对定位法, 该方法的优点是计算速度快、适用范围广, 缺点是定位结果依赖于区域速度模型的准确性, 且实际工作中震源深度反演结果不稳定。近年来应用广泛的双差定位法, 以观测报告数据和 (或) 波形互相关数据的 P、S 震相走时差作为输入数据, 对速度模型的依赖相对较小; 波形互相关技术可将 P、S 震相走时差精确到毫秒级, 在台站密集区

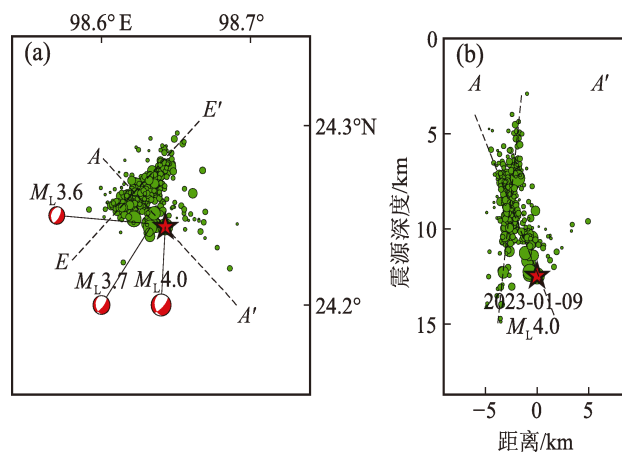
域地震之间的相对定位误差可降低到几十米甚至米级范围 (房立华等, 2013; 王清东, 2015; 李姣等, 2020; 王光明等, 2022; Liu *et al*, 2024)。

考虑到此次震群中有部分地震事件被腾冲火山台网记录编目, 本文将云南地震台网和腾冲火山台网的观测报告合并后再进行重定位研究, 具体原则及流程为: 针对同一地震事件, 在云南地震台网震相到时资料的基础上加入腾冲火山台网震相到时资料, 将 2 个报告中地震事件发震时刻统一后获得火山台站针对该地震事件记录到的 Pg 和 Sg 震相走时, 经过处理得到了 10 406 条 P 波和 8 759 条 S 波走时差数据用于双差定位。本文还根据合并后的地震观测报告整理事件波形用于波形互相关分析, 参考姜金钟等 (2016) 和 Jiang 等 (2019) 在云南地区地震事件波形互相关分析中的参数设置, 选择 P、S 波到时前 0.5 s、后 2.5 s 的窗长波形用于互相关分析, 并挑选互相关系数大于 0.7 的走时差计算结果, 经过互相关分析, 本文得到了 27 003 条 P 波和 12 712 条 S 波走时差数据用于双差定位。

本文选用速度模型 B, 对 2023 年芒市 $M_L 4.0$ 震群 442 个多台记录到的地震事件进行了结合波形互相关的双差定位。考虑到此次震群周边台站分布相对较为稀疏, 双差定位时设置最小连接数和最小观测数为 6, 震源间距小于 10 km, 事件

图 5 基于区域速度模型 A (a) 和模型 B (b) 的 $M_L 4.0$ 主震 CAP 方法波形拟合结果Fig. 5 Waveform fitting results of $M_L 4.0$ earthquake with CAP method based on regional velocity model A (a) and model B (b)

到台站的最大距离小于 200 km；设定 P 波到时的权重为 1.0，S 波震相到时的权重为 0.5，经过 2 轮共 20 次迭代反演，本文最终得到 363 个地震事件精确的相对位置，重定位成功率为 82.1%。图 6 给出了重定位后 2023 年芒市 $M_L 4.0$ 震群的震中及震源深度分布图，并沿震群中最大的 $M_L 4.0$ 地震的震源机制解节面 I 走向 (45°) 绘制了 EE' 剖面线、以节面 II 走向 (135°) 绘制了 AA' 剖面线 (图 6a)，从图中可以看出震中位置以类似三角形的形态分布。根据 AA' 剖面线提取数据绘制了距离随震源深度的分布关系 (图 6b)，震源深度主要集中于 6 ~ 12 km，几次震级较大的地震的震源深度都较深，在 12 ~ 13 km，且震源位置在深度上呈一定角度的交叉线性分布。综合分析认为，此次震群的发震构造可能为至少两条存在一定夹角的断层。

图 6 2023 年芒市 $M_L 4.0$ 震群的时空演化图 (a) 和 AA' 剖面投影 (b)Fig. 6 Spatiotemporal evolution of the Mangshi $M_L 4.0$ earthquake swarm (a) and AA' profile projection (b)

3 讨论

3.1 震群的形成与区域地质构造和中强地震的关系

大量观测和研究表明,震群活动与周边地区中强地震的发生存在一定联系,是地壳活动增强的客观反映(窦喜英等,2020)。芒市 $M_L 4.0$ 震群发生于龙陵—瑞丽断裂、畹町断裂和怒江断裂围限的三角区域内,该区 1976 年发生了龙陵 $M_s 7.3$ 和 $M_s 7.4$ 双震型地震(图 1,紫色震源机制解位置),朱传镇等(1981)和窦喜英等(2020)研究发现中强地震发生后周围区域因应力调整容易诱发震群活动。但查阅云南历史地震目录后发现,截至芒市 $M_L 4.0$ 震群发生前这个区域并没有类似的震群形成过,仅在与怒江断裂交汇的区域偶有 $M_L 3.0$ 左右小地震发生。

在地震活动性研究及地震预报震情跟踪工作

中,前震活动是研究人员认为最有效的短临预测指标之一,并且前震序列通常以震群形式出现,如 1975 年海城 7.3 级地震和 2021 年漾濞 6.4 级地震震前几天至几小时内都有一系列 3~4 级震群活动(Jones, 1982; Zhou *et al.*, 2022)。然而识别前震活动也是一个世界性难题,目前研究人员常用震源机制一致性(陈颙, 1978)、精确的震源时空迁移特征(Zhou *et al.*, 2022)、 b 值(Wetzler *et al.*, 2023)等数字地震学方法研究识别前震活动。本文利用区域宽频带数字波形和最新速度模型得到了 2023 年芒市 $M_L 4.0$ 震群的精确震源位置和较大地震的震源机制解等参数,结果表明此次地震序列中 3 次 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解差异明显(同一反演模型下最大相差约 20°)。

本文根据震群中 5 次 $M_L \geq 3.4$ 地震(表 1)的发震时间将整个震群活动分为 6 个阶段(整个震群持续时间为 213 天,第一阶段为第一个地震至表 1 中 3 号事件开始前,其他 5 个阶段均是根据

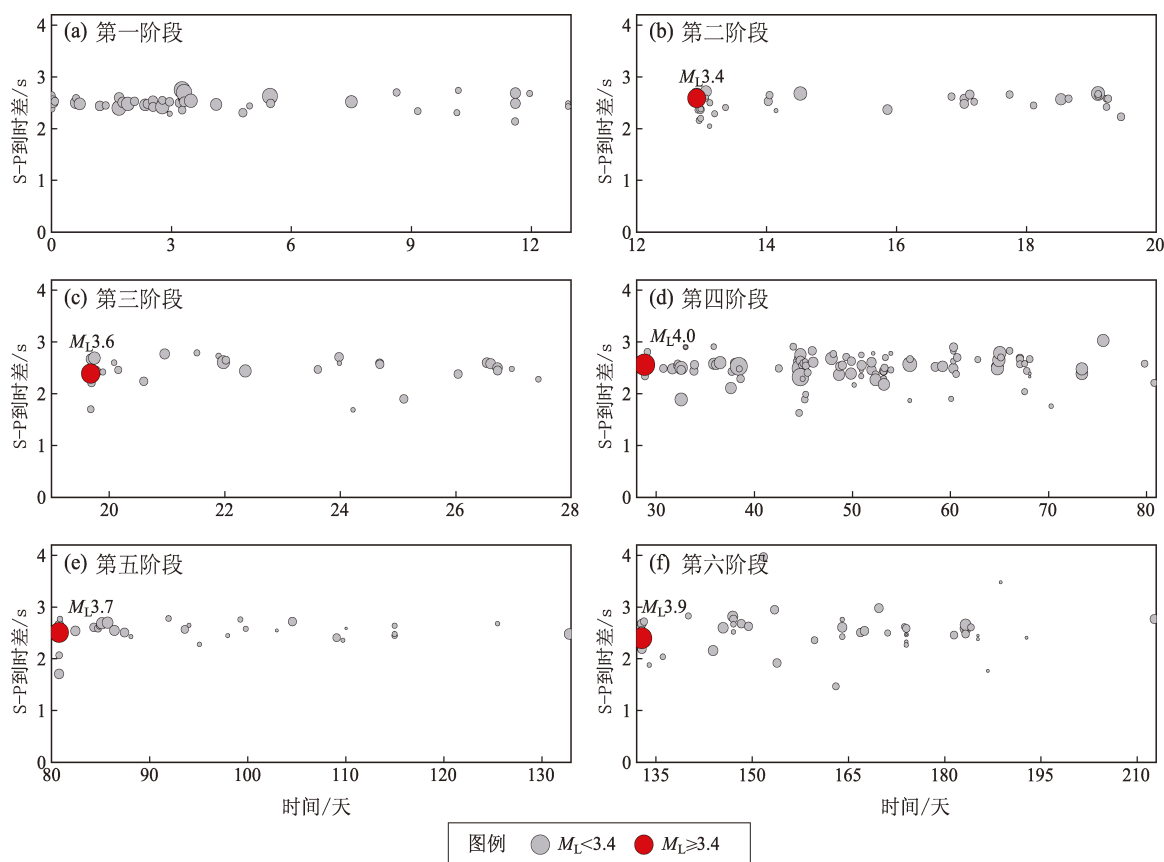


图 7 芒市台 (MAS) 记录的 6 个阶段 S 和 P 震相到时差

Fig. 7 The arrival – time differences between the phases S – phase and P – phase in 6 stages recorded by Mangshi station

表1中编号为3、4、5、8、10的事件作为起始时间进行分段的,图8a~f分段同理),计算每个地震事件被震中距最近的芒市台(MAS)记录到的S震相和P震相的到时差(S-P分布)。结果显示震群中地震事件在空间分布上逐渐分散、一致性逐渐降低(图7),震源机制一致性分析结果表明此次震群是一次普通震群活动,即震源区后续一段时间内发生震级更大的破坏性地震的可能性较低。

尽管2023年芒市 $M_L 4.0$ 震群结束之后119天

(2023年12月2日),在距 $M_L 4.0$ 地震震中位置约55 km处发生了芒市 $M_S 5.0$ 破坏性地震(图1中红色震源机制解根据顾慧冬等(2024)研究结果绘制),震源机制解结果显示该地震主要以走滑型为主,由于该地震震中位置紧邻龙江水库,顾慧冬等(2024)研究认为,流体在库区原有具备发生中强地震潜力断层的裂隙中渗透,促使了该地震的发生;而2023年芒市 $M_L 4.0$ 震群震源机制解以正断为主,同时精定位结果显示此次震群的发震构造可能为至少2条存在一定夹角的断层。因此,

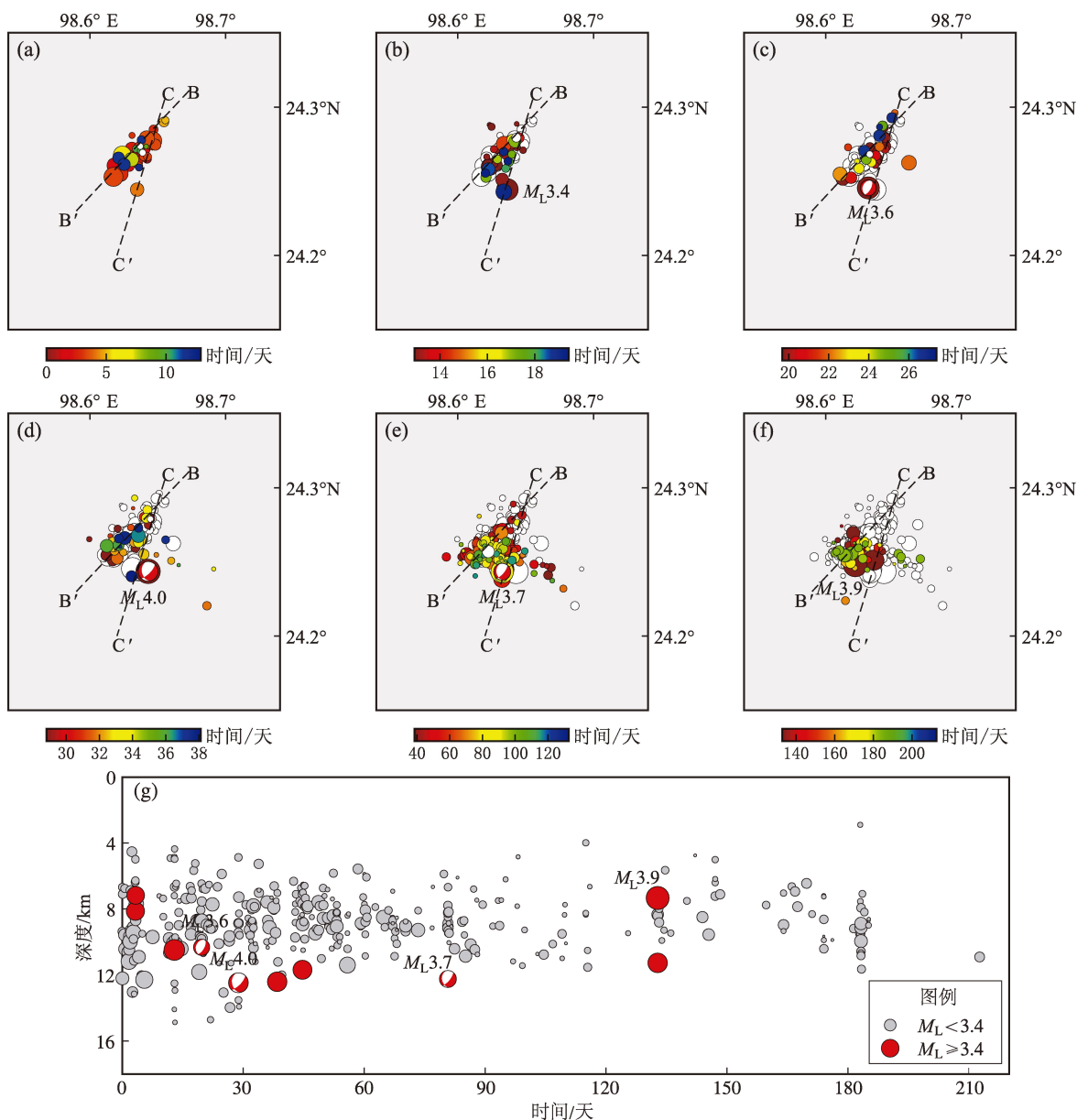


图8 6个阶段 $M_L \geq 3.4$ 地震时空演化 (a~f) 和重定位之后震源深度随时间的变化 (g)

Fig. 8 The spatiotemporal evolution of $M_L \geq 3.4$ earthquakes (a-f) and the variation of source depth with time after relocation (g)

综合对比两次地震的震源机制解和震源位置等信息后初步认为,两次地震序列的发生没有直接关联,但两次地震序列密切的时空关系反映了芒市及其临近区域可能确实处于应力高度集中状态,后续应加强对该区域地震活动的监测研究。

3.2 震群地震序列的迁移与流体的相关性

为了更好地分析此次震群的时空演化特征,对整个震群活动6个阶段重定位后的震源位置分别进行分析(图8a~f),结果显示第一阶段的地震事件主要发生在一条走向为北东方向的发震构造上(BB',图8a);自第二阶段开始,在震源区南部的另一条发震构造(CC')上逐渐有地震活动(图8b);自第四阶段开始,地震在两条发震构造上交替活动,并由震源区北东方向逐渐向震源区西南方向迁移和集中(图8d~f),且5次 $M_L \geq 3.4$ 地震均发生在该区域。综合分析认为,BB'断裂上第一阶段的地震活动,使得与之共轭的CC'断裂应力平衡状态被打破,诱发了CC'断裂上的第一个 $M_L 3.4$ 地震。结合图8g可明显看到 $M_L 3.4$ 地震的震源深度在逐渐加深,随着时间的推移,两条断裂应力不断调整,接着触发了第三阶段和第四阶段地震事件的发生,此时 $M_L \geq 3.0$ 地震的震源深度在12~14 km,在 $M_L 4.0$ 地震发生后,明显看到余震主要在两条断裂之间活动。第五和第六阶段之后震源深度逐渐变浅。震级较大的地震几乎都发生在CC'断裂上,且震源深度比BB'断裂上的地震深,不同阶段的震源时空演化特征表明了该区域复杂的发震构造和应力积累情况。

震群的时空分布与流体的扩散有较强的相关性(Shelly *et al.*, 2016; 肖阳等, 2024),钻孔注水诱发地震和水库诱发地震证实了震群时空分布符合流体孔隙压力扩散特征(Shapiro *et al.*, 1997, 2003; Talwan, Acree, 1984)。本文基于Shapiro等(1997)提出的流体扩散公式($r = \sqrt{4\pi Dt}$, 其中 r 表示距第一个地震事件的距离; t 表示时间; D 表示扩散系数)和双差重定位结果分析了本次震群是否存在流体驱动机制。根据流体扩散公式计算拟合得到的扩散系数 D 为 $0.5787 \text{ m}^2/\text{s}$,该值在地震发生后第3~70天的拟合效果最佳(图9a),表明流体可能参与了芒市 $M_L 4.0$ 震群序列的

时空迁移,是这次震群形成的主要驱动力(Scholz, 2019);在70天以后 $r-t$ 关系不再符合流体扩散公式,拟合曲线更趋于线性(图9b),表明70天之后的地震活动可能没有流体的参与或者流体的影响变得很微弱。

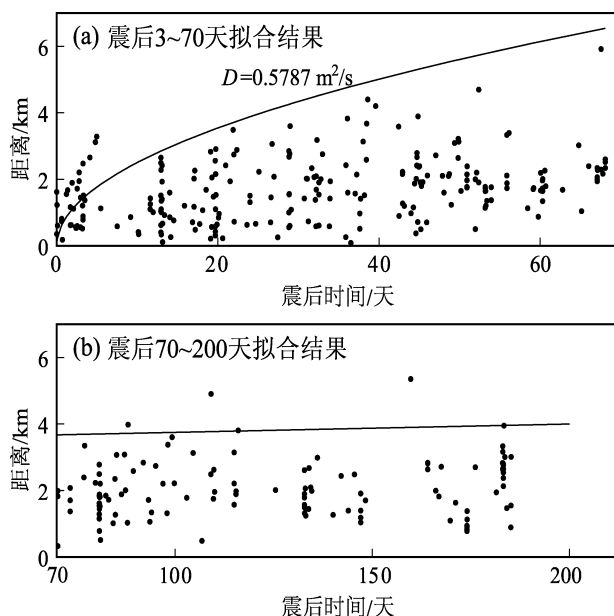


图9 芒市 $M_L 4.0$ 震群的流体扩散模型

Fig. 9 Fluid diffusion model of the Mangshi $M_L 4.0$ earthquake swarm

此次芒市 $M_L 4.0$ 震群震源区及邻近地区(“小滇西”地区)是云南地区震群活动最频繁的地区,自有记录以来该地区就发生了多次震群和(或)双震型地震序列,如1928—1933年发生了腾冲7次6级以上地震和一系列5级以上地震、1976年龙陵7.3级和7.4级地震(王彬,邓瑞生,2021)、2008、2011、2014和2021年在盈江地区陆续发生了4次5级地震和2次6级地震活动。该地区还是中国大陆地区大地热流高值区(汪集旻,黄少鹏,1990),区域内高温温泉和岩浆活动广泛分布,是震群序列活动的典型构造地区(Shelly *et al.*, 2016; Yoshida *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2024)。综合地震震源位置、震源机制解、地震活动的时空演化等研究结果和温泉地热、区域构造特征等资料,本文初步分析认为此次震群发生在至少2条存在一定夹角、处于高应力状态的断层上,地下流体活动可能促使了地震序列在不同阶段的时空演化过程。

4 结论

本文基于云南地震台网和腾冲火山台网的宽频带地震波形资料和震相报告文件, 利用双差定位方法和基于密集流动台阵构建的川滇地区高分辨率公共速度模型 2.0 版本提供的芒市及邻区地壳速度模型, 对 2023 年芒市 $M_L 4.0$ 震群地震序列进行重定位。利用 CAP 方法对序列中 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解及震源深度进行反演, 得到了震源机制解、最优震源深度和矩震级等参数。综合震群序列震源分布、震源机制解和区域地质构造等研究结果和资料, 得出以下主要结论:

(1) CAP 方法反演结果表明, 3 次 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解相差较大 (同一反演模型下最大相差约 20°); 双差定位结果表明震群在水平方向和垂直方向均呈一定角度的线性分布, 表明此次震群的发震构造可能为至少 2 条存在一定夹角的断层。

(2) 重定位结果、震源机制和 S-P 走时差等反映的震源机制一致性表明, 此次震群不是前震序列, 而是一次普通 3~4 级震群活动, 即震源区后续一段时间内不太可能发生震级更大的破坏性地震。

(3) 综合地震震源位置、震源机制解、地震活动的时空演化等研究结果和区域温泉地热、构造特征等资料, 本文初步分析认为此次震群发生在至少 2 条存在一定夹角、处于高应力状态的断层上, 地下流体活动可能促使了地震序列在不同阶段的时空演化过程。

参考文献:

- 安晓文, 常祖峰, 毛先进. 2018. 云南第四纪活动断裂暨《云南第四纪活动断裂分布图》[M]. 北京: 地震出版社.
- An X W, Chang Z F, Mao X J, *et al.* 2018. Quaternary active faults in Yunnan and distribution map of Quaternary active faults in Yunnan [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 陈颙. 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): 146-159.
- Chen Y. 1978. Consistency of focal mechanism as a new parameter in describing seismic activity[J]. Chinese Journal of Geophysics, 21(2): 142-159. (in Chinese)
- 窦喜英, 王恩利, 张辉, 等. 2020. 甘肃地区前兆震群对省内及边邻中强地震的预测意义研究[J]. 地球物理学进展, 35(5): 1651-1658.
- Dou X Y, Wang E L, Zhang H, *et al.* 2020. Study on the prediction significance of the precursory earthquake swarms to mid-strong earthquakes in Gansu and its adjacent area[J]. Progress in Geophysics, 35(5): 1651-1658. (in Chinese)
- 房立华, 吴建平, 王未来. 2013. 四川芦山 $M_S 7.0$ 级地震及其余震序列重定位[J]. 科学通报, 58: 1901-1909.
- Fang L H, Wu J P, Wang W L. 2013. Relocation of the Lushan $M_S 7.0$ earthquake and its aftershock sequence in Sichuan[J]. Chinese Scientific Bulletin, 58: 1901-1909. (in Chinese)
- 顾慧冬, 姜金钟, 李姣, 等. 2024. 2023 年云南芒市 $M_S 5.0$ 地震震源深度测定及其发震机理探讨[J]. 地震学报, 46, doi: 10.11939/jass.20240026.
- Gu H D, Jiang J Z, Li J, *et al.* 2024. Focal depth determination of the 5.0 magnitude earthquake in Mangshi, Yunnan, 2023, and discussion of its seismicity mechanism[J]. Acta Seismologica Sinica, 46, doi: 10.11939/jass.20240026. (in Chinese)
- 侯新荣, 郭振威, 郭大雄, 等. 2024. 地震定位方法最新进展综述[J]. 地球物理学进展, 39(3): 959-974.
- Hou X R, Guo Z W, Guo D X, *et al.* 2024. Review of recent advances in seismic location methods[J]. Progress in Geophysics, 39(3): 959-974. (in Chinese)
- 姜金钟, 付虹, 陈棋福. 2016. 位于构造活跃区的小湾水库地震活动特征——基于地震精定位的分析[J]. 地球物理学报, 59(7): 2468-2485.
- Jiang J Z, Fu H, Chen Q F. 2016. Characteristics of seismicity of the Xiaowan reservoir in an area of active tectonics from double-difference relocation analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(7): 2468-2485. (in Chinese)
- 李姣, 姜金钟, 杨晶琼. 2020. 2017 年漾濞 $M_S 4.8$ 和 $M_S 5.1$ 地震序列的微震检测及重定位[J]. 地震学报, 42(5): 527-542.
- Li J, Jiang J Z, Yang J Q. 2020. Microseismic detection and relocation of the 2017 $M_S 4.8$ and $M_S 5.1$ Yangbi earthquake sequence, Yunnan [J]. Acta Seismologica Sinica, 42(5): 527-542. (in Chinese)
- 李姣, 姜金钟, 王光明, 等. 2021. 2018 年云南通海 2 次 $M_S 5.0$ 地震震源机制解及深度测定[J]. 地震研究, 44(2): 133-144.
- Li J, Jiang J Z, Wang G M, *et al.* 2021. Focal mechanism and focal depth determination of the two Tonghai, Yunnan, $M_S 5.0$ Earthquakes in 2018[J]. Journal of Seismological Research, 44(2): 133-144. (in Chinese)
- 陆远忠, 宋俊高, 戴维乐. 1984. 一个判断震情的指标——震群的 U 值[J]. 地震学报, 6(S1): 495-508.
- Lu Y Z, Song J G, Dai W L. 1984. U -value of earthquake swarms as an indicator for judging earthquake conditions[J]. Acta Seismologica Sinica, 6(S1): 495-508. (in Chinese)
- 汪集旸, 黄少鹏. 1990. 中国大陆地区大地热流数据汇编 (第二版) [J]. 地震地质, 12(4): 351-366.
- Wang J Y, Huang S P. 1990. Compilation of geodetic heat flow data in

- Chinese mainland(second edition)[J]. *Seismology and Geology*, 12(4):351–366. (in Chinese)
- 王彬,邓瑞生. 2021. 云南两千年地震全记录[M]. 昆明:云南科技出版社.
- Wang B, Deng R S. 2021. Complete record of earthquakes in Yunnan province for 2000 years[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press. (in Chinese)
- 王光明,吴中海,刘昌伟,等. 2022. 2022 年 1 月 2 日宁蒗 $M_s 5.5$ 地震序列重定位与发震构造分析[J]. *地震学报*, 44(4):581–593.
- Wang G M, Wu Z H, Liu C W, *et al.* 2022. Relocation and seismogenic structure analysis of the $M_s 5.5$ Ninglang earthquake sequence on January 2, 2022[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 44(4):581–593. (in Chinese)
- 王光明,欧阳鑫,刘自凤,等. 2024. 维西—乔后断裂带及其周边地区震群和前震序列活动特征[J]. *地震学报*, 46(2):192–207.
- Wang G M, Ouyang X, Liu Z F, *et al.* 2024. Characteristics of earthquake swarms and foreshock sequences in Weixi-Qiaohou fault zone and its surrounding areas[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 46(2):192–207. (in Chinese)
- 王清东. 2015. 利用双差定位法研究云南地震分布的活动构造意义[D]. 武汉:武汉大学.
- Wang Q D. 2015. Using double-difference location method to research the active tectonic significance of Yunnan earthquakes distribution[D]. Wuhan: Wuhan University. (in Chinese)
- 王炜,杨德志. 1987. 利用 Weibull 分布研究华北地区前兆震群特征[J]. *中国地震*, 3(4):13–21.
- Wang W, Yang D Z. 1987. A study on the features of precursory seismic swarms in North China by making use of Weibull distribution[J]. *Earthquake Research in China*, 3(4):13–21. (in Chinese)
- 肖阳,单斌,熊熊,等. 2024. 以 2022 年马尔康震群为例研究震群发震机制[J]. *地球物理学报*, 67(6):2159–2174.
- Xiao Y, Shan B, Xiong X. *et al.* 2024. Probing into the mechanism of earthquake swarms: a case study of the 2022 Barkam earthquake swarm[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 67(6):2159–2174. (in Chinese)
- 中国地震局监测预报司. 2020. 地震危险性判定技术方法系列丛书—测震分析预测技术方法操作手册[M]. 北京:地震出版社.
- Department of Monitoring and Forecasting, China Earthquake Administration. 2020. Earthquake hazard determination technical methods series—operation manual of seismic analysis and prediction technical methods[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 朱传镇,傅昌洪,罗胜利. 1981. 震群与大地震关系的研究(华北地区)[J]. *地震学报*, 3(2):105–116.
- Zhu C Z, Fu C H, Luo S L. 1981. Study of earthquake swarms in relation to large earthquakes(North China area)[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 3(2):105–116. (in Chinese)
- 朱传镇,王林瑛. 1989. 震群信息熵异常与地震预测[M]//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). 北京:学术书刊出版社,229–242.
- Zhu C Z, Wang L Y. 1989. Abnormal entropy of earthquake swarm information and earthquake prediction[M]//Xu S X, Lu Y H, Zhu C Z, *et al.* Collection of practical research on earthquake prediction methods (Seismological Album). Beijing: Academic Publishing House, 229–242. (in Chinese)
- Chen X, Shearer P M, Abercrombie R E. 2012. Spatial migration of earthquakes within seismic clusters in Southern California: Evidence for fluid diffusion[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4):1–30.
- Dublanchet P, De Barros L. 2021. Dual seismic migration velocities in seismic swarms[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(1):e2020GL090025.
- Jiang J Z, Li J, Fu H. 2019. Seismicity analysis of the 2016 $M_s 5.0$ Yulong earthquake, Yunnan, China and its tectonic implications[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 176(3):1225–1241.
- Jones M, Wang B Q, Xu S X. 1982. The foreshock sequence of the February 4, 1975, Haicheng Earthquake ($M = 7.3$)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 84(B6):4575–4584.
- Laske G, Masters G, Ma Z T, *et al.* 2013. Update on CRUST1.0 – A 1-degree global model of earth's crust[C]//Proceedings of EGU General Assembly Conference. Vienna: EGU.
- Liu M, Tan Y J, Lei X L, *et al.* 2024. Intersection between tectonic faults and magmatic systems promotes swarms with large-magnitude earthquakes around the Tengchong volcanic field, southeastern Tibetan Plateau[J]. *Geology*, 52(4):302–307.
- Shapiro S A, Huenges E, Borm G. 1997. Estimating the crust permeability from fluid-injection-induced seismic emission at the KTB site[J]. *Geophysical Journal International*, 131(2):15–18.
- Shapiro S A, Patzig R, Rothert E, *et al.* 2003. Triggering of seismicity by pore-pressure perturbations: permeability-related signatures of the phenomenon[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 160(5):1051–1066.
- Scholz C H. 2019. The mechanics of earthquakes and faulting (3rd edition)[M]. New York: Cambridge University Press, 512.
- Shelly D R, Ellsworth W L, Hill D P. 2016. Fluid-faulting evolution in high definition: Connecting fault structure and frequency – magnitude variations during the 2014 Long Valley Caldera, California, earthquake swarm[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3):1776–1795.
- Shelly D R, Hill D P, Massin F, *et al.* 2013. A fluid – driven earthquake swarm on the margin of the Yellowstone caldera[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(9):4872–4886.
- Talwani P, Acree S. 1984. Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity[J]. *Pageoph*, 122(6):947–965.
- Waldhauser F. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault, California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6):1353–1368.
- Wetzler N, Brodsky E E, Chaves E J, *et al.* 2023. Regional characteristics of observable foreshocks[J]. *Bulletin of the Seismological Society of*

- America, 94(1):428–442.
- Yoshida K, Saito T, Urata Y, *et al.* 2017. Temporal changes in stress drop, frictional strength, and earthquake size distribution in the 2011 Yamagata – Fukushima, NE Japan, earthquake swarm, caused by fluid migration[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(12):10–379.
- Zaccagnino D, Vallianatos F, Michas G, *et al.* 2024. Are foreshocks fore-shocks? [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(2):e2023JB027337.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(1):91–104.
- Zhou Y, Ren C, Ghosh A, *et al.* 2022. Seismological characterization of the 2021 Yangbi foreshock – mainshock sequence, Yunnan, China: More than a triggered cascade[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(8):e2022JB024534.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America* 86(5):1634–1641.
- Zhu L P, Rivera L A. 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media[J]. *Geophys J Int*, 148(3):619–627.

Research on the Characteristics of the Mangshi $M_L 4.0$ Earthquake Sequence in 2023

YANG Yuncun¹, JIANG Jinzhong^{1,2}, LIU Kexiang¹, WANG Hualiu¹, SUN Zigang¹, YANG Mingchang¹
(1. *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)
(2. *Kunming Institute of Prediction, China Earthquake Administration, Kunming 650224, Yunnan, China*)

Abstract

Based on the broadband seismic waveform data and seismic phase reports produced by the Yunnan Seismic Network and the Tengchong Volcano Network, as well as the latest developed high – resolution common velocity model (Version 2.0) of the Crust in Sichuan – Yunnan region, the double – difference relative positioning method combined with waveform cross – correlation techniques is used to relocate 442 earthquakes in the Mangshi, Yunnan $M_L 4.0$ earthquake sequence in 2023. The CAP method is used to invert the focal mechanism solution of the $M_L \geq 3.5$ earthquakes in the sequence, and the seismogenic mechanism of the sequence is studied in depth to explore whether this sequence is a foreshock sequence or just an ordinary earthquake swarm. Through the double – difference location method, precise locations of 363 earthquakes are obtained. Their epicenters are distributed in NE direction, and these earthquakes are distributed in a triangular shape. The optimal double – couple mechanism solution of the main shock, the $M_L 4.0$ earthquake, is obtained through CAP waveform inversion: the nodal Plane I strikes 45° , the dip angle is 70° , and the sliding angle is -61° . The nodal Plane II has a strike of 167° , an inclination of 35° , a slip angle of -143° , a moment magnitude (M_w) of 3.91, and an optimal depth of 7 km. The temporal and spatial distribution characteristics of this earthquake sequence, the focal mechanism solution information, the travel time difference (S – P), the regional geological structure and the earthquake activity through the comprehensive precise positioning are used to explore the seismogenic structure and the seismogenic environment of this earthquake swarm. The results show that this earthquake swarm is not a foreshock sequence, but an ordinary earthquake swarm (magnitudes between 3 to 4). This earthquake sequence occurred on at least two faults. The faults are in high stress state and form an angle. The underground fluid affected this earthquake sequence's evolution at different stages.

Keywords: the Mangshi earthquake swarm; double difference positioning; CAP inversion; earthquake activity; fluid diffusion