

张演,姜金钟,王光明,等. 2024. 云南盐津地区两种地震序列的地震活动性分析[J]. 地震研究, 47(2): 178–190, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2024.0023.

Zhang Y, Jiang J Z, Wang G M, et al. 2024. Analysis of the seismicity of two types of earthquake sequences in Yanjin, Yunnan[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(2): 178–190, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2024.0023.

云南盐津地区两种地震序列的地震活动性分析*

张演^{1,2}, 姜金钟^{1,2,✱}, 王光明^{1,2}, 张帅^{1,2}, 何德强³, 周青云^{1,2}

(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;
3. 昭通市防震减灾局, 云南 昭通 657000)

摘要: 2020年9月—2021年1月, 云南盐津地区出现了密集中小地震活动。为获取更完备的地震目录和更准确的震源参数, 利用2020年1月—2021年2月云南及其邻区地震台网记录到地震事件的观测报告和连续波形, 采用匹配定位方法检测到了1 340次地震事件。利用联合波形互相关的双差地震定位方法进行重定位, 获得了检测目录中351次地震的精确位置, 对精定位后的地震活动时空分布特征进行分析研究, 结果表明: 盐津地区发生的密集中小地震活动为先后发生的2种不同类型的地震序列, 沿两条不同走向和倾角的断裂分布, 其中2020年9—10月的 $M_L3.9$ 震群型地震序列发生在NNW走向、倾角约为 75° 的盐津—筠连断裂; 2021年1月的 $M_L5.2$ 孤立型地震序列发生在近SN走向、断层线与盐津—筠连断裂呈约 30° 夹角且倾角约为 50° 的隐伏断裂。

关键词: 盐津地区; 地震检测; 匹配定位方法; 双差重定位; 地震序列; 发震构造

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–0666(2024)02–0178–13

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2024.0023

0 引言

地震序列一般是指一次较显著地震发生前后, 在震源区及附近发生的一系列地震的时空集群(蒋海昆等, 2015)。在实际工作和科学研究中常将地震序列划分为不同类型, 不同地震序列类型的性质及特征存在显著差异, 其划分根据不同的研究重点有所差异, 从地震活动特点来看, 地震序列通常被划分为主余型、前主余型、震群(多震)型和孤立型4类(Utsu, 2002; 吴开统等, 1990; 蒋海昆等, 2006)。快速判别地震序列类型并研究其活动特征, 有助于减轻地震灾害和维护社会稳定, 同时对认识地球内部介质演化、地震孕育和发生、流体与地震的关系等问题具有重要

意义(Shelly et al, 2007; Peng, Zhao, 2009; 崔子健等, 2012; 谭毅培等, 2016; Ross et al, 2020)。

丰富的中小地震记录和准确的震源参数可以为研究地震序列的地震活动性、发震断层及破裂特征, 震情趋势判定, 探索地震成核及触发机制等提供地震学依据(Ross et al, 2019; Jiang et al, 2019; 李姣等, 2020; 王光明等, 2021)。然而, 在实际台网地震目录的产出过程中, 由于大地震后持续并衰减缓慢的尾波能量、台站间距及观测数据记录质量、降雨和人类活动等造成的环境背景噪声等因素, 导致相当数量的地震事件因其震级较小而被漏检, 从而造成地震目录的缺失。此外, 当前台网地震目录主要是基于一维速度模型和人工拾取震相走时, 利用绝对定位方法得到的

* 收稿日期: 2023–03–01.

基金项目: 云南省地震局传帮带项目(CQ3–2021003); 中国地震局地震科技星火计划项目(XH212502Y); 云南省地震局“地震机理与孕震环境研究”创新团队。

第一作者简介: 张演(1988–), 工程师, 主要从事地震学工作. E-mail: 2354680472@qq.com.

✱通信作者简介: 姜金钟(1987–), 副研究员, 云南省地震局青年骨干人员培养导师, 主要从事地震学工作.
E-mail: jz_jiang@foxmail.com.

震源位置及震源深度，与实际震源位置相比往往存在较大误差（Jiang *et al.*, 2019）。

云南盐津地区位于云贵高原和四川盆地构造结合部位，区域内重峦叠嶂、山势陡峭，境内水系支流众多，具有丰富的页岩气资源和煤矿资源。因地形沟壑纵横、山高谷深，当地居民往往沿河岸开挖坡脚修路建房，房屋结构多为砌体结构，抗震性能较差，且地震活动普遍诱发震区滑坡、滚石、崩塌、泥石流等次生灾害，极易造成“小震大灾”的现象。如2006年7月22日—8月25日，盐津县发生2次5.1级地震，地震活动诱发的地质灾害造成24人死亡，铁路公路多处受损，通信中断（向小龙等，2015）^①，因此有必要对盐津地区的地震活动性进行深入研究分析。

本文采用模板匹配定位方法（Match & Locate，以下简称“M&L方法”）（Zhang, Wen, 2015），对盐津近场区域记录到的连续波形进行微小地震检测，同时采用基于波形互相关技术的双差地震定位方法（Waldhauser, Ellsworth, 2000）对检测目录中同时被2个以上台站记录到的地震事件进行重定位，利用获得的丰富的微小地震数据和准确的震源位置，对2020年9月—2021年1月盐津地区2个地震序列时空演化特征进行分析研究。

1 盐津地区地质和地震活动背景

盐津地区地处扬子准地台滇东台褶带滇东北台褶束，区内地质结构复杂，发育有关村断裂、五莲峰断裂、华莹山断裂和盐津—筠连断裂等，这些断裂主要沿NW和NE方向展布（图1）。其中，关村断裂是马边—盐津断裂带的组成部分，五莲峰断裂为华莹山断裂带的西南分支断裂，断裂结构复杂，由多条断层组合成2~5 km宽的断裂带；华莹山断裂由一组沿一系列NE向背斜轴部延伸的数条呈羽状排列的压性或压扭性断层所组成，以挤压逆冲为主^②。历史上盐津地区曾发生过多次 $M_{\text{s}}5.0$ 以上地震，1974年在距离盐津县35 km的云南大关发生过7.1级地震。

云南“十五”期间在滇东北昭通地区建设的固定地震台分布稀疏，仅有昭通台和盐津台两个

地震台站（张演等，2016）。2018年，由于“云南测震台网示范工程”建设，在昭通地区增建永善台、威信台和镇雄台，台站间距由原来的100 km缩小至50 km左右（曹舸斌等，2019）。2019年，为了监测盐津地区因页岩气开采等工业活动可能诱发的地震活动，云南地震台网在盐津地区布设3套短周期地震仪。根据云南地震台网观测报告，2020年1月1日—2021年2月7日，共记录到1.0级以上地震117次，其中 $M_{\text{L}}1.0 \sim 1.9$ 地震101次， $M_{\text{L}}2.0 \sim 2.9$ 地震11次， $M_{\text{L}} \geq 3.0$ 地震5次。本文收集了2020年1月1日—2021年2月7日云南地震台网和四川地震台网11个台站（连续记录台站）记录的连续地震波形和同时期在震源区（ $28.00^{\circ} \sim 28.30^{\circ} \text{N}$ ， $104.00^{\circ} \sim 104.30^{\circ} \text{E}$ ，图1中虚线框）发生的199次地震（包括1.0级以下）的观测报告和事件波形数据用于研究区域的微小地震检测及定位研究。此外本文还收集整理邻近的四川台站和昭通区域台站（事件记录台站）的观测报告数据用于后续的双差重定位等研究。

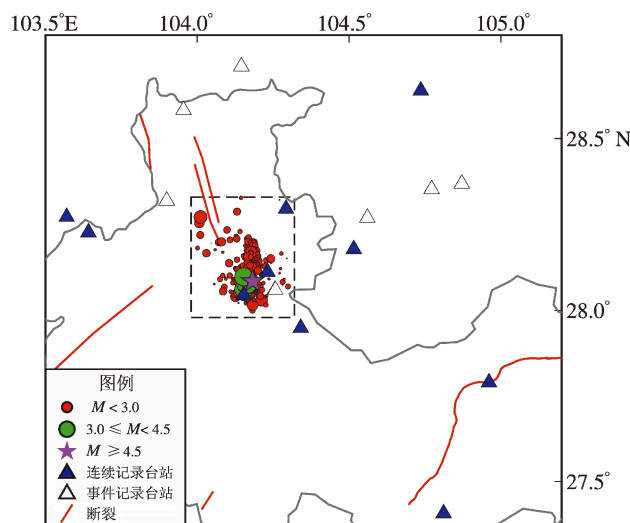


图1 2020年1月1日—2021年2月7日盐津地区1.0级以上地震震中及记录台站分布

Fig. 1 Distribution of the faults, stations and epicenters in Yanjin area during Jan. 1, 2020 – Feb. 7, 2021

① 《中国震例》（2003–2007）。2006年7月22日、8月25日云南省盐津5.1、5.1级地震。

② 第一次全国地震灾害综合风险普查工作。2022. 盐津县1:250 000地震构造图说明书。

2020 年 9 月 29 日, 盐津地区发生 3 次 $M_L 3.0$ 以上地震, 10 月 2 日发生 1 次 $M_L 3.0$ 以上地震, 最大地震震级为 $M_L 3.9$; 随后的 2021 年 1 月 23 日, 该区域又发生了 $M_L 5.2$ (面波震级 $M_S 4.7$) 地震, 为方便比较研究, 本文将所有地震的震级统一为地方震级 M_L (表 1)。短时间内密集的中小地震活动引起了社会广泛关注和区域地震危险性评估的需求, 而完整且准确的地震目录是分析研究的基础。

表 1 云南地震台网给出的盐津地区 $M_L 3.0$ 以上地震目录 (2020-01—2021-02)

Tab. 1 The catalogue of the earthquakes over $M_L 3.0$ in Yanjin area from the Yunnan Seismic Network during Jan., 2020 – Feb., 2021

发震日期	发震时刻	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	深度/km	M_L
2020-09-29	00:22:01.60	28.089	104.163	5.0	3.2
2020-09-29	05:40:43.60	28.062	104.150	7.0	3.5
2020-09-29	18:49:11.60	28.078	104.163	13.0	3.9
2020-10-21	06:46:09.00	28.098	104.153	8.0	3.5
2021-01-23	01:59:10.26	28.180	104.182	10.0	5.2

2 研究方法

鉴于盐津地区复杂的构造地质条件和有限的地震监测能力, 且仅依靠云南地震台网采用传统的基于人工拾取震相和一维速度模型的地震检测、定位方法获得地震观测报告不足以深入分析该地区的发展断层精细结构、地震序列时空演化特征等问题。本文首先根据云南地震台网提供的 199 次地震观测报告选取波形记录质量较好的地震事件作为模板事件, 采用基于波形互相关的 M&L 方法扫描连续波形以获得常规方法无法识别、定位的微小地震事件, 然后手动拾取检测出地震事件的 P、S 震相到时; 采用联合波形互相关的双差地震定位方法 (Waldhauser, Ellsworth, 2000) 对检测目录中同时被 2 个以上台站记录到的地震事件进行重定位, 获得所有地震事件更加精确的震源位置等参数, 从而获得盐津地区更加完备的地震目录和更加准确的震源参数, 进而为分析研究该地区的发展断层、孕震机理和地震活动性特征等工作提供基础资料。

2.1 模板匹配定位方法

本文采用 M&L 方法进行微小地震检测, 该方法利用地震模板事件的 P、S 震相波形与连续波形做滑动互相关分析, 并通过叠加互相关函数来探测微震事件。在叠加之前, 对模板地震周围的三维空间 (经度、纬度和深度) 进行扫描搜索, 计算被检测地震位置与模板地震之间在同一个台站上的相对走时差, 根据走时差来对互相关波形进行矫正叠加, 叠加后的互相关函数最大值所对应的格点位置即为被检测地震事件的震源位置。相对于其它微震检测方法如震源扫描叠加 (Kao, Shan, 2004) 和波形模板匹配技术 (Gibbons, Ringdal, 2006), M&L 方法不仅可以检测到模板事件附近更小震级的地震事件以及距离模板事件较远的微震, 还能给出检测地震的空间位置信息, 并且对于速度模型的精度依赖较小。目前, M&L 方法在区域地震活动性、地震序列时空演化、小当量核试验的检测等研究中得到了广泛应用 (Zhang, Wen, 2013, 2015; Jiang *et al*, 2019; 李姣等, 2020)。

为了获得盐津地区两次地震序列更加完整的地震目录, 本文选取云南地震台网地震目录中 2020 年 1 月 1 日—2021 年 2 月 7 日的 199 次地震作为模板事件, 与同一时间段盐津地区 11 个连续记录台站记录到的三分量连续波形进行互相关叠加。由于目前盐津地区尚未有精细的壳幔速度模型, 本文采用盐津地区附近的四川长宁地区速度模型 (易桂喜等, 2019), 用于计算被检测地震位置与模板地震之间在同一个台站上的相对走时差, 见表 2。互相关函数经过走时差校正及叠加后, 为确定平均相关系数的阈值, 通过多次人工测试最终选取了平均相关系数阈值为 0.45, 同时设定信噪比阈值为 8.0, 即当平均相关系数和信噪比超过设定阈值时, 则认为成功检测到一次与模板事件空间距离接近、震源机制相似的地震事件, 在此基础上根据检测事件与模板事件 S 波的振幅比来确定震级 (Zhang, Wen, 2015)。图 2 展示了利用 2020 年 4 月 16 日发生的一次 $M_L 1.3$ 模板事件波形 (图 2a 中红色和蓝色波段分别为匹配定位检测中用到的 P 波和 S 波, 记录后站为 YAJ 台) 成功检测出 2020 年 5 月 9 日发生的一次 $M_L 1.0$ 地震事件 (图 2b, 记录台站为

L5312 台), 此次检测的叠加最大互相关函数为 0.54 (图 2c), 表明两次地震事件的记录波形具有一定的相似性 (图 2d)。另外, 需要指出的是由于 YAJ 台、L5312 台记录到的这两次地震事件的 P、S 震相到时非常接近, 故只选取振幅相对较大的 S 波 (蓝色波段) 作为参考震相。

经过 M&L 方法检测, 共得到了 2 次地震序列、1 402 次地震的发震时刻、震源位置及震级, 包括 198 次模板地震事件自检结果, 其中一个模板地震事件发生在 2020 年 12 月 2 日 23 时 59 分 42 秒, 处于相邻 2 天的分界线, 按日截取的模板地震事件波形不完整, 因此未能成功自检。考虑到被检测地震事件数量有限以及后续研究需要, 本文对 1 402 次被检测地震事件进行人工复核 (检查被检测地震事件的波形是否是真实地震事件波形) 和 P、S 震相拾取, 最终得到了 1 340 个检测事件的 2 343 个 P、S 震相, 事件数量是云南地震台网地震

表 2 匹配定位和双差定位所使用的速度结构

Tab. 2 Velocity structure used in the match-and-locate detection and the double-difference relocation

深度/km	P 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	S 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
2.0	4.93	2.85
4.0	5.29	3.06
10.0	5.55	3.21
12.0	5.72	3.30
14.0	5.80	3.35
16.0	5.93	3.43
18.0	6.10	3.52
20.0	6.16	3.56
22.0	6.40	3.70
25.0	6.54	3.78
34.0	6.72	3.88
43.0	6.76	3.91
61.0	7.62	4.40
61.0	7.86	4.54

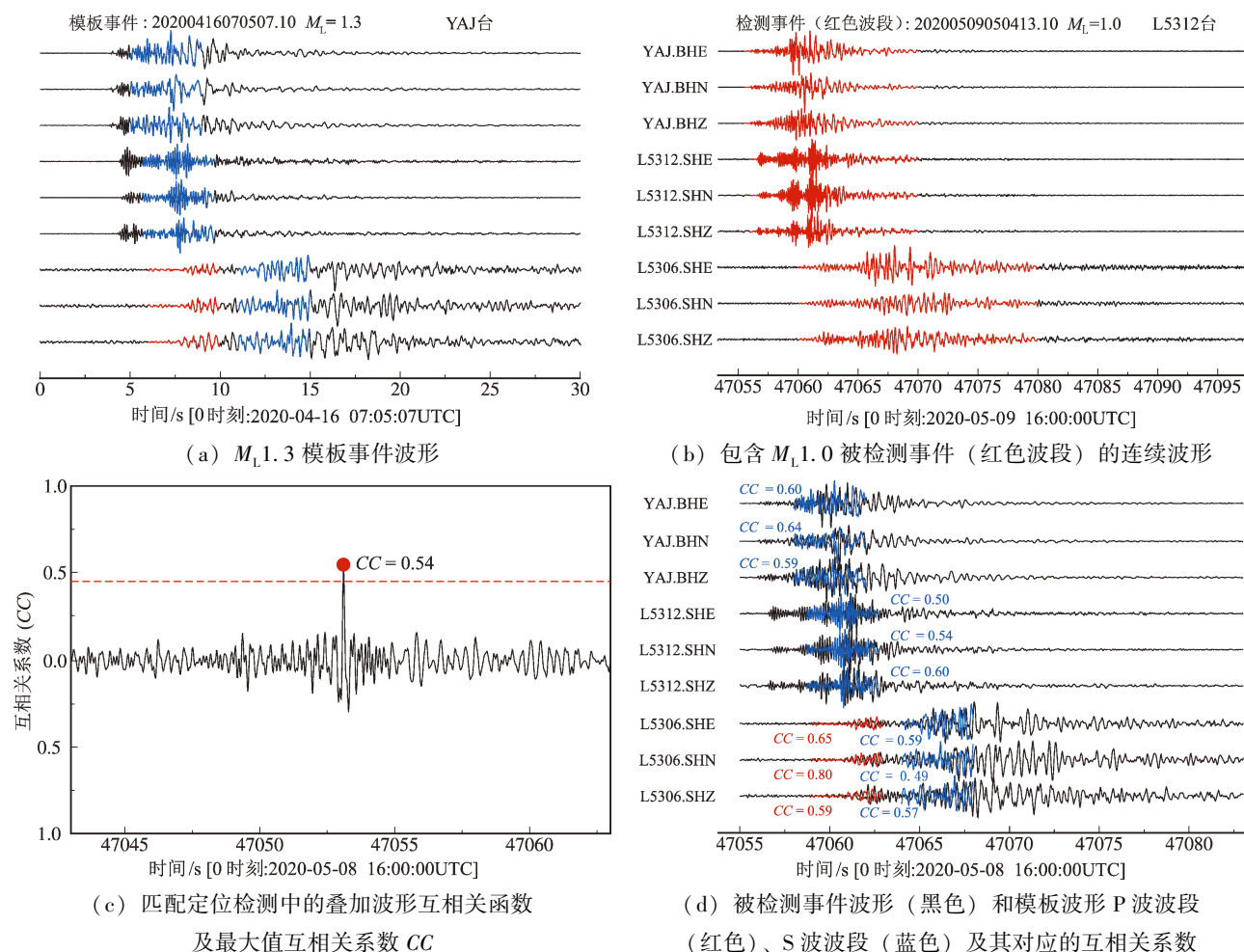


图 2 以 $M_L 1.3$ 地震事件为模板事件使用匹配定位方法检测地震事件实例

Fig. 2 A sample of the match & locate detection using template seismograms of an $M_L 1.3$ event

目录 (199 次) 的 6.7 倍 (图 3), 完备震级 (M_c) 由云南地震台网目录的 $M_L 0.7$ 降低到本文最终获得地震目录的 $M_L 0.1$ 。需要说明的是, 由于盐津周边的临时台站记录质量和数据完整率均较差 (如 L5306 等临时台自 2020 年 8 月以后就无波形数据记录), 导致将近占总地震数量一半 (653 次) 的被检测地震事件为单台 (即盐津台) 记录事件。此外, 经过复核的检测事件数量与 M&L 检测事件数量误差在 5% 以内, 可见本文选取的检测阈值 (平均相关系数 0.45 和波形信噪比 8.0) 的准确性和可靠性。

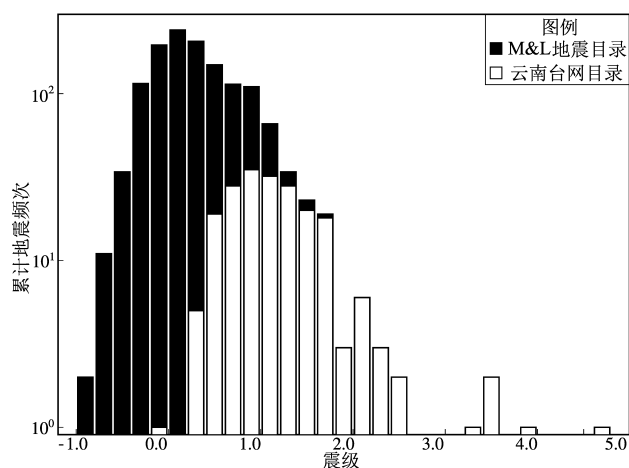


图 3 M&L 方法检测的和云南地震台网记录的地震目录数量直方图对比

Fig. 3 Comparison of the number of events between the match-and-locate catalogue (blue) and the Yun Seismic Network catalogue (red)

2.2 基于波形互相关的双差定位方法

虽然 M&L 方法在检测地震事件的同时能对被检测地震事件进行相对定位, 但其定位结果还存在一定局限性, 主要体现在: ①为了降低计算量, 通常采用 1 km 或更低精度的网格搜索, 导致其相对定位误差精度较低; ②该方法仅测量被检测地震事件与模板事件的相对位置, 相对多事件相对定位方法约束较差, 导致相对定位可能存在一定的随机偏差。为了获得更加准确的震源位置, 本文综合云南地震台网和昭通台网提供的观测报告以及基于 M&L 方法和人工拾取 P、S 震相得到的观测报告, 采用联合波形互相关的双差地震定位

方法对所有地震事件重新定位, 以期得到更加准确可靠的震源位置、震源深度等参数。

人工拾取 P、S 震相受工作人员经验和波形质量等因素影响而不可避免地存在一定误差, 利用波形互相关技术对人工拾取的 P、S 震相走时差进行校正, 不仅能较好地减小震相拾取误差以提高地震定位精度, 还能增加参与地震定位的震相数据, 进而提高地震定位的可靠性 (Waldhauser, Ellsworth, 2000; Waldhauser, Schaff, 2008; Zhang, Wen, 2015; 姜金钟等, 2016; 王光明等, 2018a, b; 李姣等, 2020)。鉴于云南地震台网目录和本文 M&L 检测目录中地震事件的 P、S 震相走时均由人工拾取获得, 采用波形互相关技术对 1 340 次地震的 P 波和 S 波走时差分别进行计算分析, 具体计算流程和参数选取与李姣等 (2020) 的方法相同。最终, 获得了互相关系数大于 0.7 的 2 299 条 P 波和 5 824 条 S 波走时差数据用于后续的双差地震定位。

使用表 2 采用 M&L 检测所使用的速度模型进行双差重定位。为了保证双差定位的准确性和可靠性, 选取震源距小于 10 km 的地震事件作为地震对, 地震对之间最大距离为 5 km, 地震对与台站之间的最大距离为 300 km。由于本文最终获得的地震观测报告中有相当数量 (1 047 次) 的地震事件被 3 个以下的台站数记录, 因此本文设置的震相观测数等参数较为宽松, 即在双差定位过程中设定地震对震相“链接”数量大于 4 时 (至少有 4 条 P、S 震相走时差数据) 才被定义为“强链接”地震对, 实际反演中只有“强链接”地震对才参与双差定位, 故有部分地震事件在定位过程中被舍弃。在定位过程中, 对 P、S 震相走时差数据分别赋予 1.0 和 0.5 的权重, 采用最小平方 QR 分解法 (LSQR) 进行两轮共 20 次迭代反演, 人工拾取观测报告震相走时差均方根残差 ($RMSCT$) 平均值由重定位前的 189 ms 下降为迭代后的 34 ms, 波形互相关走时差均方根残差 ($RMSCC$) 平均值由重定位前的 148 ms 下降为迭代后的 46 ms, 并在第 12 次迭代反演开始稳定 (图 4), 最终获得了 351 次地震重定位后的震源位置。为评估重定位结果的不确定性, 本文采用 Bootstrapping 方法 (Hardebeck, 2013; Jiang *et al*, 2019; 李姣等, 2020) 分

析相对定位误差,结果显示在 95% 置信水平下定位误差椭圆的东西、南北、垂直向定位误差均值分别为 1.2、2.0、2.3 km,定位结果具有较好稳定性。

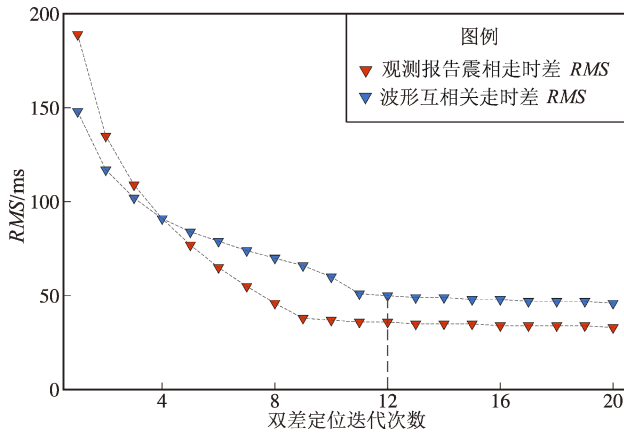


图4 双差定位迭代过程中的走时差均方根残差变化
Fig. 4 The RMSCT and RMSCC values of different irritations in double-difference relocation

3 研究结果

地震目录是地震活动性分析、地震预测和地震危险性评估的重要基础资料(徐伟进,高孟潭,2014),其中基于更加完整地震目录分析得到的 b 值等参数、更加准确的震源参数和地震活动时空特征是深入分析震源区构造应力特征、发震断层判定及潜在地震危险性评估等工作的重要研究手段。本文利用由 M&L 方法和双差重定位得到的地震目录和区域构造地质等资料,对 2020 年 1 月—2021 年 2 月盐津地区两次地震序列震源区的应力状态、地震活动特征等问题进行探讨分析。

3.1 盐津地震序列统计关系

古登堡-里克特关系式($G-R$ 关系式)描述地震数量随震级变化的关系:

$$\log_{10} N = a - bM \quad (1)$$

式中: M 表示震级; N 表示震级大于等于 M 的累计地震数量; a 表示背景地震活动性; b 表示大地震和小地震之间的相对比率。在岩石变形实验中发现,不同类型的断层 (Schorlemmer *et al.*, 2005)

和岩石的应力状态 (Scholz, 1968) 会导致 b 值的变化,大量地震学观测也表明破坏性地震成核、破裂前震源区的 b 值通常要明显小于地震发生后的 b 值 (Gulia, Wiemer, 2019)。因此, b 值大小对于理解震源区在主震前后的应力演化、区域相对应力状态等问题具有重要意义 (黄亦磊等, 2016; Zhang, Zhou, 2016; 刘雁冰, 裴顺平, 2017)。

完整的地震目录对准确评估 b 值至关重要,本文首先采用最大曲率法评估了云南地震台网 (YSN) 地震目录和 M&L 方法检测目录的完备震级 M_c ,然后基于两种地震目录分别采用最小二乘法拟合了 2020 年 1 月—2021 年 2 月研究区的 b 值 (图 5)。分析结果表明相对于云南地震台网 $M_L 0.7$ 的完备震级,本文利用 M&L 方法得到的地震目录完备震级降低到 $M_L 0.1$ 左右,而拟合的 b 值由 0.7 左右升高到 0.8 左右,一方面说明经过 M&L 方法检测后 $M_L < 1.0$ 微小地震的比例有所增加,另一方面基于两种目录得到的 b 值大小与李涛等 (2010) 利用 1970—2009 年的地震目录获得的 b 值 (0.75 左右) 较为一致,相对较低的 b 值可能反映了该地区具有较高的应力状态。

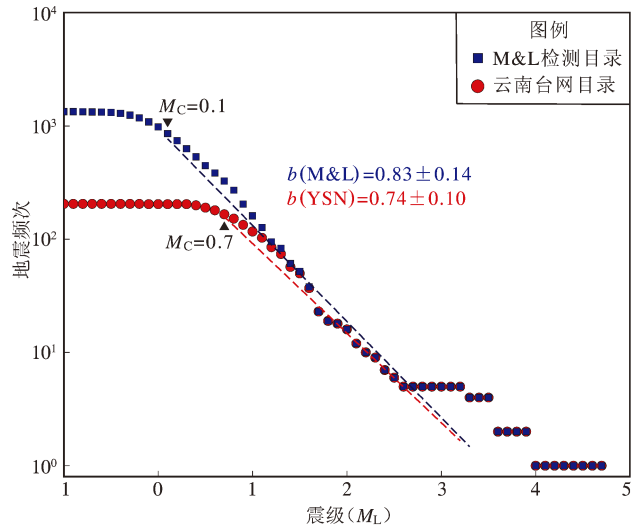


图5 基于 M&L 和云南地震台网两种地震目录的 b 值分析

Fig. 5 b -values estimated from the match- and -locate catalogue (blue squares) and the Yunnan Seismic Network Catalogue (red circles)

3.2 区域地震活动时空分布特征

丰富的地震目录是判定地震序列类型、探究

地震序列时空演化特征的基本前提。云南地震台网提供的地震目录和本文利用 M&L 方法获得的地震目录均显示 2020 年 1—8 月研究区的背景地震活动较为平静,月平均发震频次不超过 10 次且没有出现明显的地震活动加速现象(图 6a)。但在两次地震序列活动期间,利用 M&L 方法获得的地震数量明显多于云南地震台网目录中的地震事件数量(图 6a),表明基于模板事件波形互相关的 M&L 方法可以有效检测、定位地震序列中震级更低、波形信噪比较低的微震事件。

根据 M&L 地震目录,可将该地区的地震活动

初步分为两个时间阶段:第一阶段是 2020 年 9 月 29 日发生 $M_L 3.2$ 地震后至 2021 年 1 月 23 日发生 $M_L 5.2$ 地震之前,该区域地震活动开始显著增强,且在 $M_L 3.2$ 地震之后 1 个月内陆续发生了多次 $M_L 3.0$ 以上的地震事件(图 6b), $M_L 3.9$ 地震后区域地震活动逐渐衰减;第二阶段是 2021 年 1 月 23 日 $M_L 5.2$ 地震后至 2021 年 2 月 7 日,发生的地震事件数量相对第一阶段明显较少,且自 $M_L 5.2$ 地震后没有较大余震事件发生,后续最大地震事件为 2021 年 1 月 31 日发生的一次 $M_L 2.2$ 地震,两者震级相差达 3.0(图 6c)。

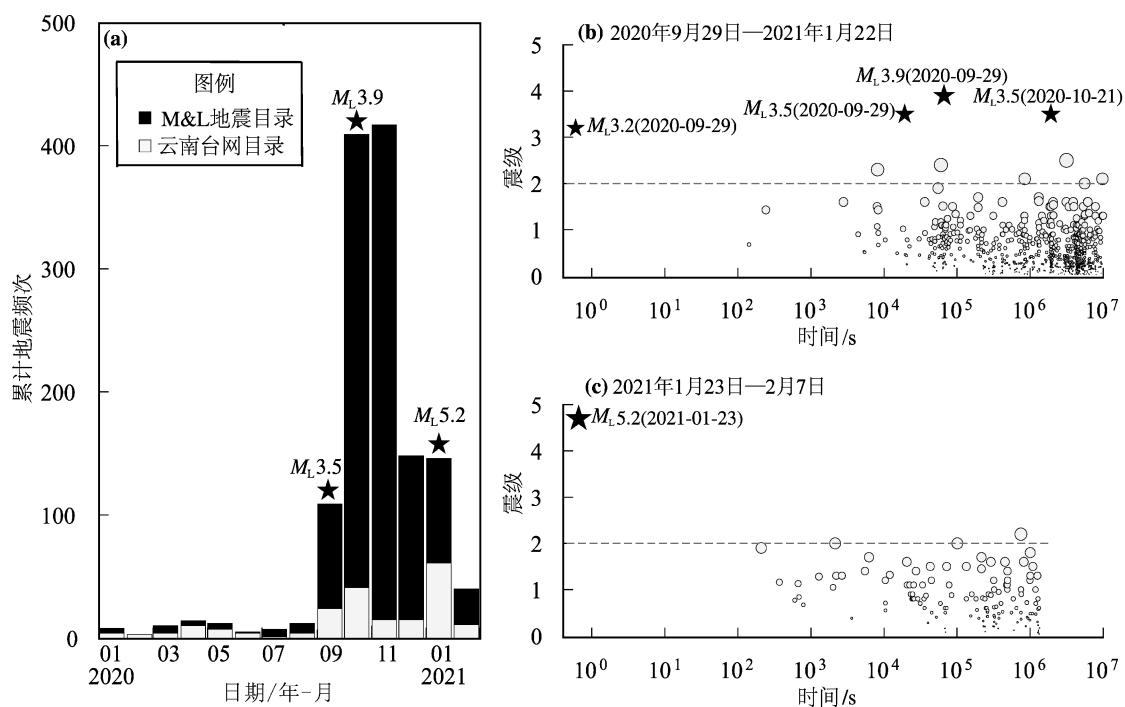


图 6 研究区地震时间-地震频次分布图 (a) 及两个阶段的时间-震级分布 (b-c)

Fig. 6 The monthly accumulated number of events during Jan., 2020. 1 – Feb., 2021 (a) and the magnitude versus logarithmic times during Sep. 29, 2020 – Jan. 23, 2021 (b) and Jan. 23, 2020 – Jan. 27, 2021 (c)

地震震源位置的空间展布是勾画发震断层几何形态(包含走向和倾角等参数)的重要依据。对比云南地震台网地震目录(图 7a)和双差重定位结果(图 7b)中相同地震事件的震中分布可知,经过对 M&L 地震目录进行双差重定位之后研究区内绝大部分地震事件主要沿两条不同走向的断裂分布(图 7b):一条为 NNW 走向、倾角约为 75° 的盐津—筠连断裂(图 7b 中 F_3 断层及图 7c),双差定位结果显示研究区发生的 $M_L \geq 3.0$ 的地震均

发生在此断裂附近;另一条为走向近 SN 向、断层线与盐津—筠连断裂呈约 30° 夹角且倾角约为 50° 的未标注断层(图 7d,下文以“隐伏断层”代指),少数震级较小的地震事件发生在该断层附近。此外,双差重定位结果显示除两条较为明显的断层之外,研究区似乎还存在一条近 EW 向的小断层(图 7b),但由于在该局部区域参与和成功重定位的地震数量较少,还有待进一步研究分析以得到关于该断层更加准确可靠的结论。

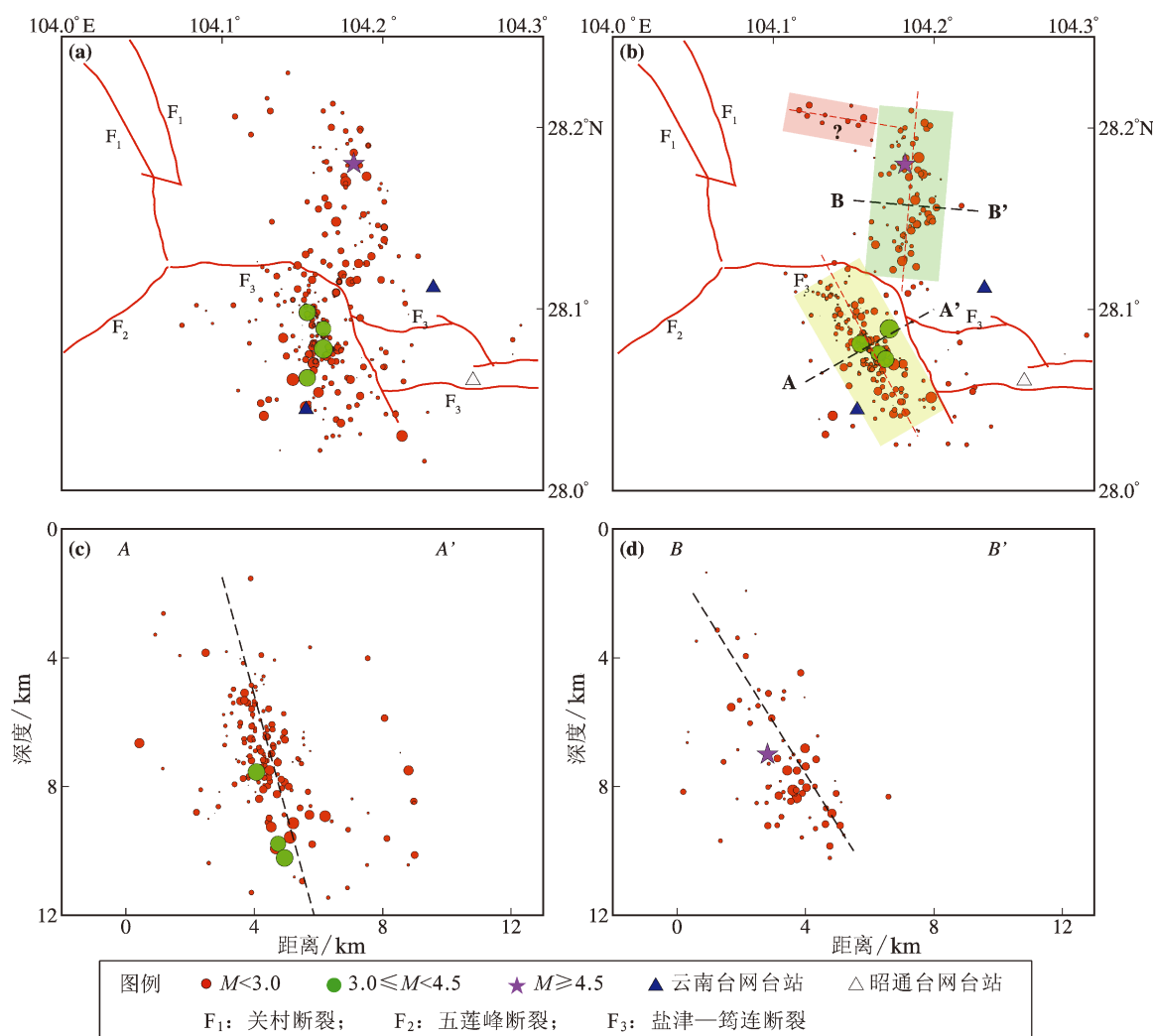


图7 双差重定位前 (a)、后 (b) 的震中分布图及地震事件沿 AA' (c) 和 BB' (d) 剖面的震源深度分布
 Fig. 7 Distribution of the epicenters of the earthquakes before (a) and after (b) DD relocation and cross - section view of hypocenters after DD relocation along profile AA' (c) and BB' (d)

为了进一步确认发生于2020年9月和2021年1月的两次地震序列的发震断层,本文分别基于M&L地震目录和双差重定位结果,绘制了研究区第一发震阶段(2020年9月29日—2021年1月22日,红色圆圈)和第二发震阶段(2021年1月22日—2月7日,蓝色圆圈)的地震事件(图8)。结果显示第一阶段的地震(包括4次 $M_L > 3.0$ 地震事件)基本发生在NNW走向的盐津—筠连断层附近(以下称A区域),而随着最大的 $M_L 5.2$ 地震的发生,后续的余震事件则基本发生在走向近SN向的隐伏断层附近(以下称B区域)。从时间和空间维度上再次证明了研究区内存在两条不同走向和倾角的发震断层。此外,我们分别计算了A、B两区的 b 值,A区域 b

值较低,约为0.85,B区域 b 值较高,约为0.99。根据本文获得研究区两个阶段的地震活动的时空分布,初步分析认为可能是由于A区域较高的局部应力导致了2020年9月开始发生的大量中小地震活动,进而加速了断层B区域上的 $M_L 5.2$ 地震的成核、破裂,并引发了近南北向断层上后续数量较少的余震事件。

4 讨论

不同研究者根据研究重点的不同对地震序列类型的命名及划分也有所差异,蒋海昆等(2006, 2015)基于震级差的序列分类思路,依据主震与

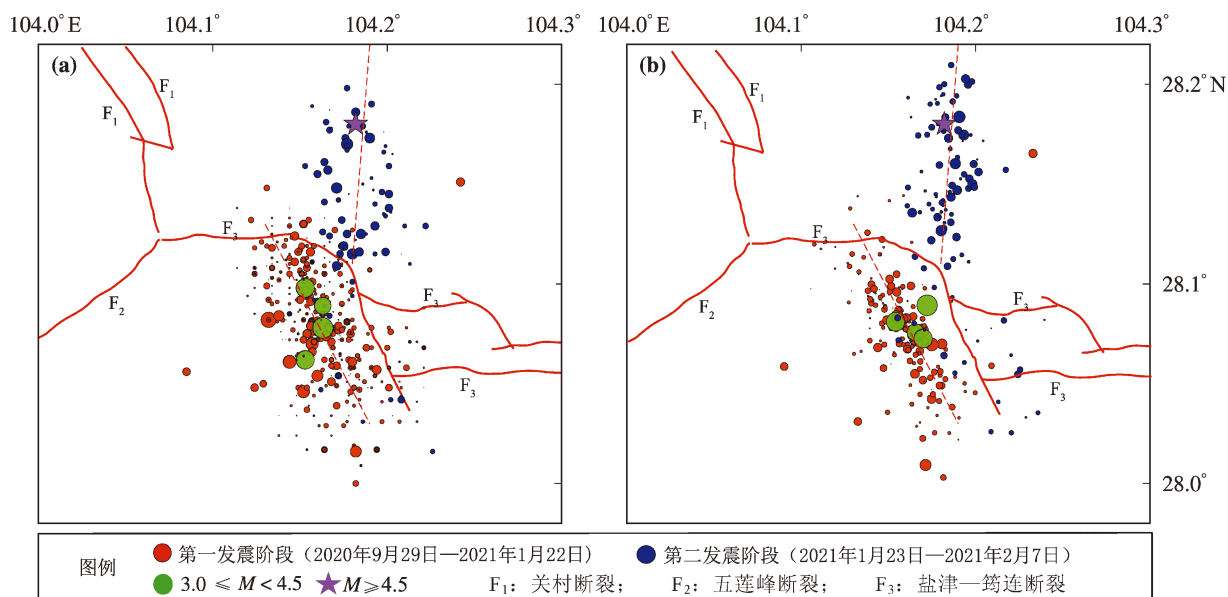


图8 基于 M&L 地震目录 (a) 和双差重定位结果 (b) 得到的两阶段地震震中分布

Fig. 8 Distribution of the epicenters of earthquakes occurring during the first stage (Sep. 29, 2020 – Jan. 23, 2021) and the second stage (Jan. 23, 2021 – Feb. 7, 2021) from the M&L catalogue (a) and DD relocation catalogue (b)

地震序列中最大余震之间的震级差 ΔM 值进行序列类型划分: ①当 $\Delta M \geq 2.5$ 且余震次数较少时, 序列类型为孤立型; ②当 $0.6 \leq \Delta M < 2.5$ 时, 序列类型为主余型; ③当 $\Delta M < 0.6$ 时, 序列类型为多震型 (包括双震型和震群型)。根据本文获得的 M&L 地震目录及双差重定位结果可以推断, 2020 年 9 月—2021 年 1 月盐津地区发生了两种不同类型的地震序列, 即 2020 年 9 月 29 日、10 月 21 日的 4 次 $M_L > 3.0$ 地震事件 (表 1) 及其后续数量较多的余震事件构成了一个最大震级为 $M_L 3.9$ 的震群型地震序列, 初步推测其发震构造应为该地区的盐津—筠连断裂; 而 2021 年 1 月 23 日的 $M_L 5.2$ 地震及其后续数量较少的余震事件 (震级差 $\Delta M = 3.0$, 图 6c 和图 7) 则可能是一次发生在近 SN 走向的隐伏断层上的孤立型地震序列。

需要指出的是, 本文的研究时段截止时间为 $M_L 5.2$ 地震后 15 d, 此时 $M_L 5.2$ 地震序列的余震活动尚未完全平息, 考虑到后续可能会有较强的余震事件发生, 因此该时间尺度可能不足以准确判定 $M_L 5.2$ 地震的序列类型。为此, 根据云南地震台网提供的 2021 年 2 月—2022 年 2 月的正式地震目录数据, 搜索在研究区发生的所有 $M_L \geq 2.0$

地震事件 (表 3)。结果表明在 $M_L 5.2$ 地震发生之后的 1 年内 $M_L \geq 2.0$ 地震事件仍然分别发生在 A、B 两个区域, 且在 B 区的最大余震事件为 2021 年 12 月 5 日发生的 $M_L 2.5$ 地震, 与主震震级相差达 2.7 级, 因此综合本文及后续的余震发展情况可以判定在 B 区发生的 $M_L 5.2$ 地震及其余震事件可能确实是一次孤立型地震序列。

1970 年以来的地震记录表明, 云南地区发生的地震序列类型以主余型为主, 多震型次之, 而很少发生孤立型地震序列, 研究表明不同地震序列类型的发震机理与区域构造运动形式和深部介质环境等因素有一定关系 (蒋海昆等, 2006)。本文通过精确地震定位发现了在盐津地区前后发生的孤立型和多震型序列, 表明 $M_L 5.2$ 地震发震构造可能是一段比较完整的凹凸体 (其空间尺度大约为 5 km), 地震发生后破裂得比较充分。而发生 $M_L 3.9$ 震群型地震序列的盐津—筠连断裂则可能存在尺度不等、较为分散的凹凸体, 一方面说明了该地区复杂的地质构造环境, 不能排除将来在附近区域发生同等或更大级别的破坏性地震; 另一方面表明地震发震机理的复杂性, 有必要采用地震检测与定位等方法对地震序列进行深入

表3 云南地震台网记录的2021年2月—2022年2月研究区 $M_L \geq 2.0$ 地震事件

Tab. 3 The catalogue of the earthquakes over $M_L 2.0$ in Yanjin area from the Yunnan Seismic Network during Feb., 2021 – Feb., 2022)

发震日期	发震时刻	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	震源深度/km	M_L	断层区域
2021-03-09	18:03:16.6	28.087	104.151	9.0	2.2	A
2021-03-09	18:05:26.0	28.080	104.163	10.0	2.3	A
2021-03-13	19:11:04.7	28.093	104.153	8.0	3.0	A
2021-12-05	09:14:08.8	28.176	104.171	5.0	2.5	B
2021-12-11	11:37:27.5	28.174	104.160	6.0	2.2	B
2022-02-19	13:02:53.0	28.092	104.068	6.0	2.0	A

研究，明确其发震机理和地震活动特征。

早期学界更多关注主要活动断层上发生的破坏性大地震，但近年来的观测实践表明还有相当数量的中强地震发生在盲断层或者未引起重视的断层上，这些地震的发生也可能会造成严重的人员财产损失，而此类地震发震频次更高、分布更广，针对此类地震的研究有利于深入认识发震机理、探索强震孕震环境等科学问题。本文利用基于模板波形的M&L方法和基于波形互相关分析的双差地震定位方法获得了2020年1月—2021年2月盐津地区数量更加丰富、震源参数更加精确的地震目录，相对于云南地震台网目录可以更加清晰地勾画区域发震断层的精细结构，同时可以补充由于没有断层出露而未进行地质调查、记录的断层信息，更好地丰富区域地震灾害风险评估等工作的基础数据。

5 结论

基于云南和周边区域地震台网记录到的盐津地区的地震目录及连续波形，本文采用匹配定位方法获得了2020年1月—2021年2月盐津地区更加完整的地震目录，并利用联合波形互相关的双差地震定位方法获得了记录质量较好的地震事件震源位置，结合区域地质构造等资料，得出以下主要结论：

(1) 本文获得了研究区1340次地震的地震目录，地震事件数量约为云南台网目录中的6.7倍，并利用双差定位方法得到其中351次地震更加精确的震源位置，微震检测及双差重定位结果表明这

些地震发生在两条夹角约为 30° 的断层上，其中 $M_L 5.2$ 地震发生于走向近SN向、倾角约 50° 的隐伏断层。

(2) 研究区地震事件主要可分为两次不同类型的地震序列活动，即2020年9月29日、10月21日的4次 $M_L > 3.0$ 地震事件及其后续余震事件构成的一个最大震级为 $M_L 3.9$ 震群型的地震序列；2021年1月23日 $M_L 5.2$ 地震及其后续数量较少的余震事件构成的一次孤立型地震序列。

(3) 在较短时间尺度内在两条空间距离很近的断层上先后发生了两种不同类型的地震序列，表明了盐津地区复杂的构造地质条件以及断层不同的孕震环境（引起地震的凹凸体尺寸和空间分布等特征），初步推测 $M_L 3.9$ 震群型地震序列的发生可能为 $M_L 5.2$ 地震所在的另一条断层上的凹凸体的破裂提供了有利条件。

限于台站密度、观测数据时段和区域台站的记录质量，关于该区域发震断层更加精细的结构和 $M_L 5.2$ 地震成核、破裂过程等科学问题还有待积累更加丰富的记录资料进行深入研究。

本文图件主要用GMT6软件绘制完成，地震波形数据处理主要由Seismic Analysis Code (SAC)软件包完成，张森博士提供了MatchLocate2程序包，常祖峰研究员提供了盐津地区断层数据，云南地震台信息与网络技术部为本文的数据提供了存储和计算环境，云南地震台数据产品部、云南省地震灾害综合风险普查项目组和昭通市防震减灾局为本文提供了观测报告和地震波形数据，在此深表谢意。

参考文献:

- 曹舸斌,蔡明军,李文涛,等. 2019. 云南测震台网地震监测能力分析[J]. 地震地磁观测与研究,40(2):71-76.
- Cao G B, Cai M J, Li W T, *et al.* 2019. Analysis of seismic monitoring capacity of Yunnan Seismic Network[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 40(2):71-76. (in Chinese)
- 崔子健,李志雄,陈章立,等. 2012. 判别小震群序列类型的新方法研究——谱振幅相关分析法[J]. 地球物理学报,55(5):1718-1724.
- Cui Z J, Li Z X, Chen Z L, *et al.* 2012. A study on the new method for determining small earthquake sequence type: Correlation analysis of spectral amplitude[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(5):1718-1724. (in Chinese)
- 黄亦磊,周仕勇,庄建仓. 2016. 基于地震目录估计完备震级方法的数值实验[J]. 地球物理学报,59(4):1350-1358.
- Huang Y L, Zhou S Y, Zhuang J C. 2016. Numerical tests on catalog-based methods to estimate magnitude of completeness[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(4):1350-1358. (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)
- 蒋海昆,曲延军,李永莉,等. 2006. 中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征[J]. 地球物理学报,49(4):1110-1117.
- Jiang H K, Qu Y J, Li Y L, *et al.* 2006. Some statistic features of aftershock sequences in Chinese mainland[J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(4):1110-1117. (in Chinese)
- 蒋海昆,杨马陵,付虹,等. 2015. 震后趋势判定参考指南[M]. 北京:地震出版社.
- Jiang H K, Yang M L, Fu H, *et al.* 2015. Reference guide for estimating post-earthquake trend[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 李姣,姜金钟,杨晶琼. 2020. 2017年漾濞 $M_s4.8$ 和 $M_s5.1$ 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 $M_s4.8$ and $M_s5.1$ Yangbi earthquake sequence, Yunnan[J]. Acta Seismologica Sinica, 42(5):527-542. (in Chinese)
- 李涛,吴小平,王莹. 2010. 基于分区空间扫描研究云南地区 b 值分布特征[J]. 云南大学学报(自然科学版),32(6):670-675.
- Li T, Wu X P, Wang Y. 2010. Study on b -value distributions in Yunnan based on regional spatial scanning[J]. Journal of Yunnan University (Natural science), 32(6):670-675. (in Chinese)
- 刘雁冰,裴顺平. 2017. 汶川地震前后 b 值的时空变化及构造意义[J]. 地球物理学报,60(6):2104-2112.
- Liu Y B, Pei S P. 2017. Temporal and spatial variation of b -value before and after Wenchuan earthquake and its tectonic implication[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(6):2104-2112.
- 谭毅培,邓莉,曹井泉,等. 2016. 2015年河北滦县震群发震机理分析[J]. 地球物理学报,59(11):4113-4125.
- Tan Y P, Deng L, Cao J Q, *et al.* 2016. Seismological mechanism analysis of 2015 Luanxian swarm, Hebei province[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(11):4113-4125. (in Chinese)
- 王光明,刘自凤,赵小艳,等. 2018a. 2018年云南通海 $M_s5.0$ 地震序列重定位及发震构造讨论[J]. 地震研究,41(4):503-510.
- Wang G M, Liu Z F, Zhao X Y, *et al.* 2018a. Relocation of Tonghai $M_s5.0$ earthquake sequence in 2018 and discussion of its seismogenic fault[J]. Journal of Seismological Research, 41(4):503-510. (in Chinese)
- 王光明,吴中海,彭关灵,等. 2021. 2021年5月21日漾濞 $M_s6.4$ 地震的发震断层及其破裂特征:地震序列的重定位分析结果[J]. 地质力学学报,27(4):662-678.
- Wang G M, Wu Z H, Peng G L, *et al.* 2021. Seismogenic fault and its rupture characteristics of the 21 May, 2021 Yangbi $M_s6.4$ earthquake: Analysis results from the relocation of the earthquake sequence[J]. Journal of Geomechanics, 27(4):662-678. (in Chinese)
- 王光明,赵小艳,付虹,等. 2018b. 2014年鲁甸 $M_s6.5$ 地震及其强余震序列重定位[J]. 地震学报,40(5):582-594.
- Wang G M, Zhao X Y, Fu H, *et al.* 2018b. Relocation of the 2014 Ludian $M_s6.5$ earthquake and its large aftershock sequence[J]. Acta Seismologica Sinica, 40(5):582-594. (in Chinese)
- 吴开统,焦远碧,吕培冬,等. 1990. 地震序列概论[M]. 北京:北京大学出版社.
- Wu K T, Jiao Y B, Lyu P L, *et al.* 1990. Generality of earthquake sequences[M]. Beijing: Peking University Press. (in Chinese)
- 向小龙,孙炜锋,李国伟,等. 2015. 云南盐津地区地质灾害发育特征及影响因素分析[J]. 地质力学学报,21(1):97-107.
- Xiang X L, Sun W F, Li G W, *et al.* 2015. Analysis on development characteristics and factors of geological disasters in Yanjin county, Yunnan Province[J]. Journal of Geomechanics, 21(1):97-107. (in Chinese)
- 徐伟进,高孟潭. 2014. 中国大陆及周缘地震目录完整性统计分析[J]. 地球物理学报,57(9):2802-2812.
- Xu W J, Gao M T. 2014. Statistical analysis of the completeness of earthquake catalogs in China mainland[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(9):2802-2812. (in Chinese)
- 易桂喜,龙锋,梁明剑,等. 2019. 2019年6月17日四川长宁 $M_s6.0$ 地震序列震源机制解与发震构造分析[J]. 地球物理学报,62(9):3432-3447.
- Yi G X, Long F, Liang M J, *et al.* 2019. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 17 June 2019 $M_s6.0$ Sichuan Changning

- ing earthquake sequence [J]. Chinese Journal of Geophysics, 62 (9): 3432–3447. (in Chinese)
- 张演, 杨周胜, 字承柱. 2016. 云南数字地震台网监测能力[J]. 地震地磁观测与研究, 37(4): 62–65.
- Zhang Y, Yang Z S, Zi C Z. 2016. Monitoring capacity of Yunnan Digital Seismic Network [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 37(4): 62–65. (in Chinese)
- Gibbons S J, Ringdal F. 2006. The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation [J]. Geophysical Journal International, 165(1): 149–166.
- Gulia L, Wiemer S. 2019. Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks [J]. Nature, 574: 193–200.
- Hardebeck J L. 2013. Geometry and earthquake potential of the Shoreline fault, central California [J]. Bull Seismol Soc Am, 103(1): 447–462.
- Jiang J Z, Li J, Fu H. 2019. Seismicity analysis of the 2016 $M_s 5.0$ Yunnan earthquake, Yunnan, China and its tectonic implications [J]. Pure Appl Geophys, 176(3): 1225–1241.
- Kao H, Shan S J. 2004. The Source-Scanning Algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space [J]. Geophysical Journal International, 157(2): 589–594.
- Peng Z G, Zhao P. 2009. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake [J]. Nature Geoscience, 2: 877–881.
- Ross Z E, Cochran E S, Trugman D T, *et al.* 2020. 3D fault architecture controls the dynamism of earthquake swarms [J]. Science, 368(6497): 1357–1361.
- Ross Z E, Trugman D T, Hauksson E, *et al.* 2019. Searching for hidden earthquakes in southern California [J]. Science, 364(6442): 767–771.
- Scholz C H. 1968. The frequency–magnitude relation of micro fracturing in rock and its relation to earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 58(1): 399–415.
- Schorlemmer D, Wiemer S, Wyss M. 2005. Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes [J]. Nature, 437(7058): 539.
- Shelly D R, Beroza G C, Ide S. 2007. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms [J]. Nature, 446(7133): 305–307.
- Utsu T. 2002. Statistical Features of Seismicity [J]. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, 81: 719–731.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California [J]. Bull Seismol Soc Am, 96(6): 1353–1368.
- Waldhauser F, Schaff D P. 2008. Large-scale relocation of two decades of northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods [J]. J Geophys Res: Solid Earth, 113(B8): B08311.
- Zhang M, Wen L X. 2013. High-precision location and yield of North Korea's 2013 nuclear test [J]. Geophys Res Lett, 40(12): 2941–2946.
- Zhang M, Wen L X. 2015. An effective method for small event detection: Match and locate (M&L) [J]. Geophys J Int, 200(3): 1523–1537.
- Zhang S, Zhou S. 2016. Spatial and temporal variation of b values in southwest China [J]. Pure and Applied Geophysics, 173(1): 85–96.

Analysis of the Seismicity of Two Types of Earthquake Sequences in Yanjin, Yunnan

ZHANG Yan^{1,2}, JIANG Jinzhong^{1,2}, WANG Guangming^{1,2},

ZHANG Shuai^{1,2}, HE Deqiang³, ZHOU Qingyun^{1,2}

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Kunming Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Kunming 650224, Yunnan, China)

(3. Zhaotong Earthquake Preparedness and Disaster Reduction Agency, Zhaotong 657000, Yunnan, China)

Abstract

Based on the catalogue and waveforms of moderate- and small-earthquakes occurring in Yanjin area during September 2020 to January 2021, we use the Match and Locate (M&L) method to detect and locate weak events. A total of 1 340 events are detected by the M&L method, which are about 6.7 times the number of events listed in the *Yunnan Seismic Networks Catalogue*. We then obtain refined hypocenters of 351 detected earthquakes by simultaneously using P and S travel times and waveform cross-correlation data in the double-difference relocation algorithm. We also investigate the spatial-temporal characteristics of the detected earthquakes after double-difference relocation. Our results indicate that the moderate- and small-earthquakes occurring in Yanjin area during September 2020 to January 2021 could be categorized as two different types earthquake sequences: the $M_L3.9$ swarm mainshock type, and the $M_L5.2$ isolated earthquake. These two types of earthquake sequences occurred along two different faults with different strike and dip angles. The $M_L3.9$ swam sequence occurred on the Yanjin-Junlian fault with a strike of NNW direction and dip angle of about 75° , and the $M_L5.2$ isolated sequence occurred on a blind fault with a strike of near NS direction and a dip angle of about 50° .

Keywords: Yanjin area; earthquake detection; the Match and Locate method; the double-difference relocation; earthquake sequence; seismogenic structure