

高方鸿, 刘志坤, 耿传涛. 2022. 2020年云南东川  $M_L$  4.2 地震序列精定位研究[J]. 地震研究, 45(1): 48–53, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0006.

Gao F H, Liu Z K, Geng C T. 2022. Accurate location of the 2020 Dongchuan, Yunnan  $M_L$  4.2 earthquake sequence[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(1): 48–53, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0006.

## 2020年云南东川 $M_L$ 4.2 地震序列精定位研究<sup>\*</sup>

高方鸿, 刘志坤<sup>✉</sup>, 耿传涛

(中国地质大学(北京) 地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 利用云南东川地区 10 个宽频带流动台站的连续波形数据, 采用基于深度学习的自动震相拾取方法和震相关联技术, 对 2020 年东川  $M_L$  4.2 地震序列分别进行绝对定位和相对定位, 获得了该地震序列的高精度地震定位结果, 得到东川  $M_L$  4.2 地震序列的 212 个余震事件, 约为中国地震台网目录给出的余震数目的 5 倍, 丰富了  $M_L \leq 3.0$  余震; 精定位结果表明东川  $M_L$  4.2 主震震源深度为 5.19 km, 余震震源深度集中在 3~6 km, 余震序列分布长轴呈 NNE 向展布; 此次地震发生在小江断裂带西支, 发震构造与乌龙拉分盆地的构造演化有关。

**关键词:** 地震定位; 微震检测; 小江断裂带; 双差定位法; 拉分盆地; 东川  $M_L$  4.2 地震

**中图分类号:** P315.73      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2022)01-0048-06

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0006

### 0 引言

2020 年 7 月 8 日 10 时 39 分, 在云南省昆明市东川区 (25.995°N, 103.132°E) 发生  $M_L$  4.2 地震, 震源深度为 8 km。该地震震感强烈、影响范围较广, 主震后又发生了一系列余震, 未造成人员伤亡和严重财产损失。中国地震台网测定结果显示, 东川  $M_L$  4.2 主震位于小江断裂带附近, 但由于东川  $M_L$  4.2 地震序列附近仅有一个区域台网固定台站 (DOC), 其它区域台网台站距该地震序列均大于 50 km, 且分布较为稀疏, 不利于精细地震定位, 特别是难以测定地震序列中大量的微震。而精细的微震定位结果 (廖诗荣等, 2021) 不仅可以用来确定发震构造, 揭示隐伏断层 (Xu *et al*, 2009), 还可以理解震源机制 (姜金钟等, 2021)、分析强震危险性 (刘自凤等, 2019)、研究震源区地壳的三维速度结构 (王月等, 2020) 等。因此有必要对东川  $M_L$  4.2 地震序列开展更为精细的地震定位工作。

小江断裂带是我国地震活动最强烈的地震带之一, 自 1500 年以来, 断裂带曾多次发生破坏性地震, 其中 6.0~6.9 级地震 11 次、7.0~7.9 级地震 3 次、8 级地震 1 次 (李乐等, 2013)。小江断裂带作为青藏高原的东边界, 在青藏高原物质逃逸过程中起到了十分重要的作用 (白志明等, 2004; 黄周传等, 2021)。小江断裂带在东川以南分为东、西两支断裂, 在两支断裂内部形成多个不连续段, 次级断层呈左行左阶排列, 在不连续部位形成拉分盆地, 而次级剪切断层从拉分盆地的一侧边界断层拐向另一侧边界断层, 成为能量从拉分盆地一侧边界断层向另一侧边界断层传递的通道 (宋方敏等, 1997)。

现有的地震定位方法主要分为基于到时定位和基于波形定位两种。基于到时的地震定位方法依赖于震相到时拾取的精度, 相对于传统方法的人工挑取震相到时信息和长短时窗比法 (Stevenson, 1976), 近年来发展的基于深度学习 (Zhu, Beroza, 2018; Ross *et al*, 2020) 的定位方法日益受到关注。双差定位法是 Waldhauser 和 Ellsworth

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2021-09-05.

基金项目: 国家自然科学基金 (41774062) 资助.

第一作者简介: 高方鸿 (1996-), 在读硕士研究生, 主要从事微震定位研究工作. E-mail: 2540828667@qq.com.

✉ 通讯作者简介: 刘志坤 (1983-), 副教授, 主要从事地震学研究工作. E-mail: zkliu@cugb.edu.cn.

(2000) 在前人的基础上提出的一种利用走时数据或走时互相关数据进行地震相对定位的方法, 它对速度模型的依赖小且定位误差小, 已在2012年云南彝良5.7级地震(王清东等, 2015)和2021年青海玛多7.4级地震(王未来等, 2021)等精定位研究中展现出优势。

本文利用中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院在2020年云南东川 $M_L4.2$ 地震序列附近布设的云南东川流动台阵观测数据, 采用基于深度学习算法的PhaseNet程序进行震相到时拾取。基于震相关联算法(REAL)、绝对定位算法(VELEST)和双差定位算法(HypoDD), 对东川 $M_L4.2$ 地震序列进行精细地震定位, 分析地震分布特征, 探讨其发震构造。

## 1 数据与研究方法

### 1.1 台站分布和数据概况

2018年中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院在小江断裂带中段布设了一个小孔径宽频带台阵进行连续观测, 图1给出了中国地震科学实验场公共模型提供的小江断裂带及其东、西支位置(刘静等, 2019)和台阵位置分布。台阵包括10台宽频带地震台, 平均台间距约为4 km, 采样率为100 Hz。本文使用2020年3—12月该台阵记录的连续波形数据。

### 1.2 研究方法

本文的主要数据处理流程及所用方法如图2所示。对于宽频带台阵的连续波形数据, 首先去除仪器响应并进行0.02~30 Hz的带通滤波, 然后利用基于深度学习算法的PhaseNet程序(Zhu, Beroza, 2018)进行震相到时拾取, 接着使用震相关联算法(Zhang *et al.*, 2019)进行震相的快速关联与初步定位; 再使用绝对定位算法(Kissling *et al.*, 1994)进行定位, 得到绝对地震定位结果及改进的研究区最小一维速度模型; 最后采用双差定位法(Waldhauser *et al.*, 2000)进行地震精定位。

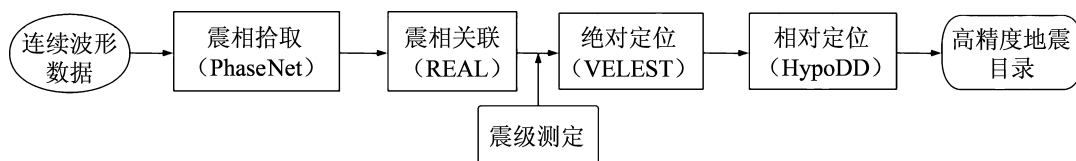


图2 本文数据处理流程和方法

Fig. 2 Data-processing flow and the methods adopted in the study

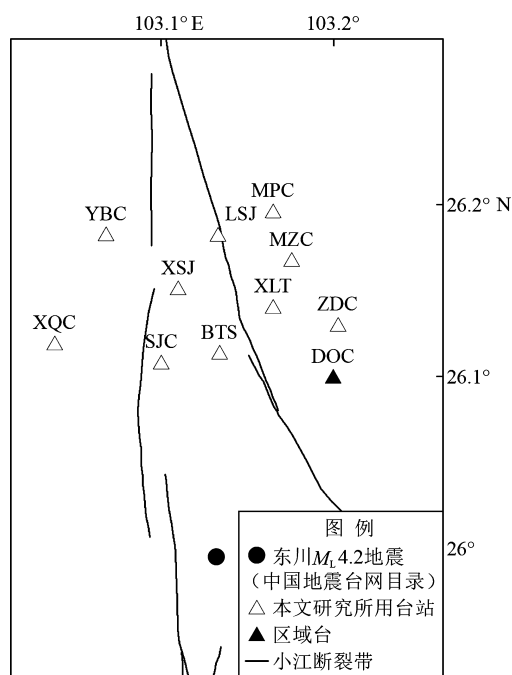


图1 东川 $M_L4.2$ 地震附近区域构造和本文所用台站分布

Fig. 1 Tectonic background of the Dongchuan  $M_L4.2$  earthquake and the distribution of seismic stations in the vicinity

### 1.2.1 基于深度学习的震相拾取

近年来随着天然地震观测与研究的发展, 记录到的连续波形数据呈指数增长, 这使得人工拾取P波和S波震相成本变高, Ross等(2018)提出了基于深度学习的简单、快速地震震相到时拾取方法。其基本思路是: 将大量人工标注的波形数据作为训练集, 通过神经网络算法进行训练, 得到具有与人工经验同等判断力的网络参数, 让算法达到与人工拾取P波和S波相近的效果。近几年来, 基于深度学习的自动震相拾取的误差已与人工拾取相差无几, 其工作效率极高, 且对复杂波形的震相识别有强大的优势。

本文采用深度学习算法(PhaseNet)进行震相到时拾取。为了避免移动窗选取时边界数据间断导致拾取的震相缺失, 本文从每天数据起点开始

将数据每隔 15 s 切割成长为 30 s 的一段, 进行震相识别。选取 PhaseNet 中 P 波和 S 波的经验性拾取概率阈值均为 0.3, 总计拾取到了 737 701 条 P 波和 445 334 条 S 波震相到时。

### 1.2.2 震相快速关联与初步定位

基于各台站 P 波和 S 波震相到时数据, 利用震相关联的方法可以粗略定位地震。本文采用 Zhang 等 (2019) 提出的快速震相关联算法, 通过计算网格点内 P 波和 S 波数目最大、且走时残差最小来确定地震事件的位置。设置水平搜索范围为  $0.3^\circ$ 、步长为  $0.02^\circ$ , 深度搜索范围为  $0 \sim 40$  km、步长为 2 km。考虑到震相拾取时可能存在误拾取, 为了提高定位的可靠性, 将相应的关联阈值设置为: 至少需要 5 条 P 波震相到时、0 条 S 波震相到时, 并且 P 波和 S 波震相到时总数要达到 10 条, 才能定位一个地震。初步定位得到了 1 020 个地震事件, 共计有 8 727 条 P 波和 7 065 条 S 波的震相到时参与了定位, 其 P 波和 S 波震相到时时距图 (图 3) 上有很好的线性分布特征, 并无离散点。

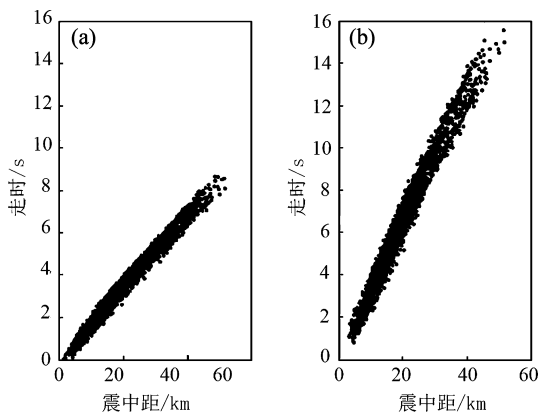


图 3 参与定位的 P 波 (a) 和 S 波 (b) 走时分布图

Fig. 3 Travel-time curves of P-wave (a) and S-wave (b) serving the earthquake location

### 1.2.3 震级测定

本文采用中国地震局发布的《地震震级的规定》(GB 17740—2017), 进行了地方震震级  $M_L$  的测定:

$$M_L = \lg(A) + R(\Delta) \quad (1)$$

式中:  $A$  为南北向和东西向最大振幅的平均值;  $R(\Delta)$  为地方震级的量规函数, 通过查阅《地震震级的规定》(GB17740—2017) 附录 D 获得。先计

算各台站对于同一地震所测得的震级值, 再通过求取其平均值来获得最终震级。

### 1.2.4 地震精定位

精确的壳幔速度模型对于地震定位非常重要, 即便是使用相对地震定位方法, 如双差定位法, 不同的速度模型也会引起一定程度的定位误差 (吕作勇等, 2016; 陈雯, 2018)。本文选用中国地震科学实验场给出的本文研究区地壳速度模型 (Yao *et al.*, 2018) 作为初始速度模型, 通过初始速度模型、震源参数和台站矫正联合反演的 VELEST 算法得到更为精准的最小一维速度模型 (图 4), 然后应用更新后的最小一维速度模型, 对所有地震事件进行了绝对定位 (图 5), 得到绝对定位后的 1 020 个地震事件, 其均方根残差的平均值为 0.3 s。

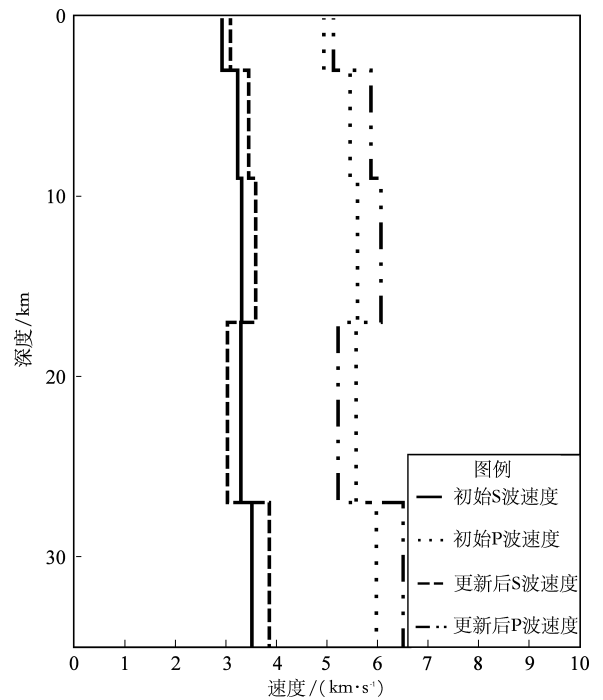


图 4 初始和 VELEST 更新后的一维速度模型

Fig. 4 Initial 1-D velocity model and updated VELEST 1-D velocity model

对上述 1 020 个事件, 使用到时数据和波形互相关数据, 利用 HypoDD 算法进行了相对地震定位。笔者将震中距上限设置为 50 km, 地震对的最大距离为 10 km, 同一个地震事件最多与 10 个地震事件组成地震对, 并且每一个地震对至少包含 8 个相同震相, 最终获得了 678 个事件的高精度相对地震定位结果 (图 5), 其均方根残差平均值为

0.06 s。笔者根据地震发生前后各 5 d 和地震可能影响的范围 (5 km) 对地震事件进行筛选, 最终得到东川  $M_L4.2$  地震主震附近的 212 个地震事件。

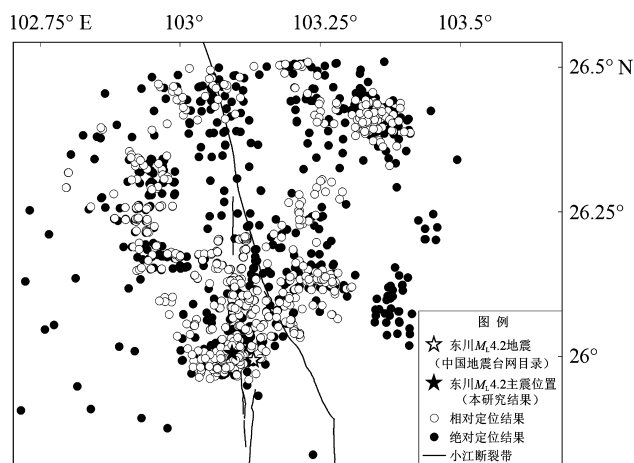


图5 绝对定位和相对定位地震分布图

Fig. 5 Epicenters distribution from the absolute location and the relative location

## 2 结果与讨论

### 2.1 与中国地震台网目录对比

本文获得的东川  $M_L4.2$  地震的精定位位置为 (26.007 0°N, 103.093 1°E), 震中位于中国地震台网定位结果的 NWW 方向约 5 km 处 (图 6)。本文确定的主震震源深度为 5.19 km, 浅于中国地震台网给出的 8 km, 正是由于此次地震震源较浅,

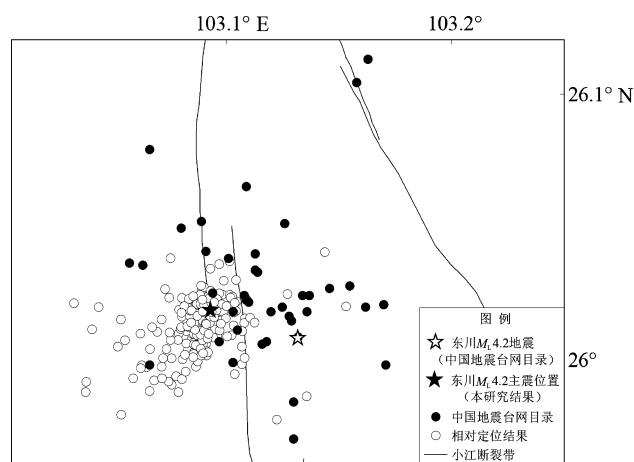


图6 本文地震精定位结果与中国地震台网目录地震分布对比图

Fig. 6 Comparison of epicenters obtained in this study with the epicenters from the CENC catalogue

导致了当地震感较为强烈。东川  $M_L4.2$  地震序列的余震事件共有 212 个, 无前震发生, 为典型的主震-余震型地震。

中国地震台网目录中东川  $M_L4.2$  地震序列共有 41 个地震事件 (图 6), 最小完备性震级为  $M_L1.7$ ; 而本文构建的该地震序列包含 212 个地震事件, 最小完备性震级达到  $M_L0.53$ 。可见, 利用地震序列附近的台阵观测数据可以获得约为中国地震台网目录数量 5 倍的地震事件, 补充了大量漏计的微震事件, 大大提高了地震目录的完备性。

通过对比本文地震精定位结果与中国地震台网目录 (图 6) 可以看出: 中国地震台网目录余震位置较为分散, 东西向分布超过 10 km, 这已经远超过一个 4 级地震的余震带范围 (韩晓飞等, 2017), 而本文定位得到的地震密集分布于一个 NNE 向破裂带内, 其宽度约为 3 km; 中国地震台网目录给出的主震震中位于小江断裂带两支之间, 靠近西支一侧, 而本文得到的主震位置恰好位于小江西支断裂带下方。

### 2.2 发震构造分析

本文得到的东川  $M_L4.2$  地震余震序列总体呈 NNE 向展布。为了更好地研究地震在深度方向的分布, 本文分别沿平行和垂直于余震带长轴方向建立了 AA' 和 BB' 2 个地震深度剖面, 这 2 个剖面均穿过主震的震中位置, 将剖面两侧 2 km 内的地震事件投影到剖面上 (图 7a)。

从剖面 AA' (图 7b) 可以看出, 余震震源深度集中在 3 ~ 6 km 处, 大部分余震都位于主震上方 (图 7b), 说明余震主要是由主震后断层浅部应力调整所致。从剖面 BB' (图 7c) 可以看到, 东川  $M_L4.2$  主震位于小江断裂带西支地表断层的正下方, 余震大体均匀分布于主震两侧, 由此可以推断发震断层是近乎垂直的, 如图 7c 中红色实线所示。

本文得到的东川  $M_L4.2$  地震序列发震构造与小江断裂带的地质特征是一致的。小江断裂带是青藏高原东缘的大型走滑断裂, 断层倾角通常超过 70°, 其中段处于弱剪切挤压的活动特征, 可能存在闭锁特征 (张勇等, 2018; 高原等, 2020)。本文研究区内的小江断裂带西支存在不连续段, 次级断裂呈左行左阶排列, 在不连续部分形成了乌龙拉分盆地 (宋方敏等, 1997)。东川  $M_L4.2$  地震发生在乌龙拉分盆地西南侧, 可能由于沿盆地

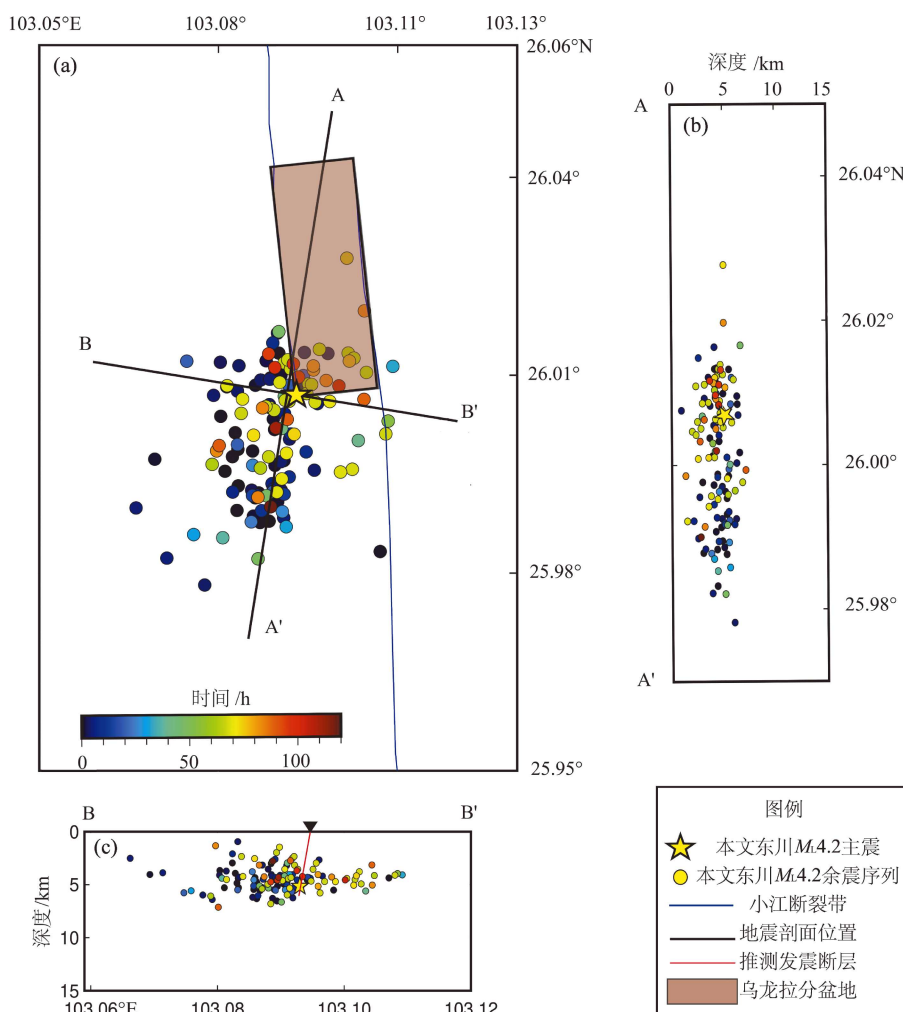


图7 东川  $M_L 4.2$  地震序列空间分布和发震构造

Fig. 7 Spatial distribution of the Dongchuan  $M_L 4.2$  earthquake sequence and its seismogenic structure

边缘的走滑断层和盆地内部张剪切断层的共同作用,导致了这一区域略显复杂的地震空间分布特征,这可能也是东川  $M_L 4.2$  地震余震带长轴走向与小江断裂带西支走向不一致的原因。

### 3 结论

本文基于云南东川流动台阵的10个宽频带地震台的连续波形数据,采用基于深度学习的到时拾取方法和快速震相关联、双差定位方法,对东川  $M_L 4.2$  地震序列进行了高精度的地震定位,得出以下主要认识:

(1) 利用近场的流动台阵观测数据获得了212个地震的精定位结果,约为中国地震台网目录数量的5倍,完备震级由中国地震台网给出的  $M_L 1.7$  下降至  $M_L 0.53$ 。

(2) 东川  $M_L 4.2$  地震为主震-余震型地震,主震震源深度为5.19 km,余震集中在3~6 km深度,余震序列总体呈NNE方向展布。

(3) 东川  $M_L 4.2$  地震序列的发震构造为小江断裂带西支,其成因可能与2个次级断裂间的乌龙江拉分盆地的构造演化有关。

### 参考文献:

- 白志明,王椿镛. 2004. 云南遮放—宾川和孟连—马龙宽角地震剖面的层析成像研究[J]. 地球物理学报, 47(2): 257-267.
- 陈雯. 2018. VELEST 在地震定位中的运用[D]. 昆明: 云南大学.
- 高原,石玉涛,王琼. 2020. 青藏高原东南缘地震各向异性及其深部构造意义[J]. 地球物理学报, 63(3): 802-816.
- 韩晓飞,张龙飞,吕睿,等. 2017. 2016年12月18日清徐县4.3级地震烈度评估及分析[J]. 防灾减灾学报, 33(3): 33-37.
- 黄周传,吉聪,吴寒婷,等. 2021. 青藏高原东南缘地壳结构与变形机制研究进展[J]. 地球与行星物理论评, 52(3): 291-307.

- 姜金钟,付虹,李涛. 2021年云南漾濞  $M_S6.4$  地震序列重定位及发震构造探讨[J]. 地震研究, 44(3): 320–329.
- 李乐,陈棋福,钮凤林,等. 2013. 基于重复微震的小江断裂带深部滑动速率研究[J]. 地球物理学报, 56(10): 3373–3384.
- 廖诗荣,杨婷,张红才,等. 2021年云南双柏  $M_S5.1$  地震序列的快速检测与精定位研究[J]. 地震研究, 44(4): 515–520.
- 刘静,徐心悦,韩龙飞,等. 2020. 实验场区主要活动断裂地表迹线KMZ版[EB/OL]. (2020-01-19) [2021-09-05]. <http://www.cses.ac.cn/sjcp/ggmx/2021/135.shtml>.
- 刘瑞丰,陈运泰,王丽艳. 2018. 新的震级国家标准的技术要点与主要特点[J]. 地震地磁观测与研究, 39(1): 1–11.
- 刘自凤,龙锋,彭关灵,等. 2019. 滇西北地区强震危险性分析[J]. 地震研究, 42(3): 330–337.
- 吕作勇,叶春明,房立华. 2016. 不同一维速度模型的地震定位效果比较——以小江断裂带为例[J]. 华南地震, 36(3): 43–50.
- 宋方敏,汪一鹏,沈军,等. 1997. 小江断裂带中段盆地的发育阶段及其与区域构造运动的关系[J]. 地震地质, 19(3): 20–26.
- 王清东,朱良保,苏有锦,等. 2015. 2012年9月7日彝良地震及余震序列双差定位研究[J]. 地球物理学报, 58(9): 3205–3221.
- 王未来,房立华,吴建平,等. 2021. 2021年青海玛多  $M_S7.4$  地震序列精定位研究[J]. 中国科学:地球科学, 51(7): 1193–1202.
- 王月,孟令媛,韩颜颜,等. 2020. 2018年云南通海  $M_S5.0$  震群序列重定位及震源区速度结构成像[J]. 地震研究, 43(2): 331–339.
- 张勇,洪敏,崔兴平,等. 2018. 小江断裂带近场活动特征分析[J]. 地震研究, 41(3): 375–380.
- Kissling E, Ellsworth W L, Eberhart – Phillips D, et al. 1994. Initial reference models in local earthquake tomography[J]. Journal of Geophysical Research, 99(B10): 19635–19646.
- 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, Meier M A, Egill H. 2018. P Wave arrival picking and first – motion polarity determination with deep learning[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(6): 5120–5129.
- Stevenson P R. 1976. Microearthquakes at Flathead Lake, Montana: A study using automatic earthquake processing[J]. 66(1): 61–80.
- Waldhauser F, Ellsworth W. 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.
- Xu X, Wen X, Yu G, et al. 2009. Coseismic reverse – and oblique – slip surface faulting generated by the 2008  $M_W7.9$  Wenchuan earthquake, China. [J]. Geology, 37(6): 515–513.
- Yao H J, Yang Y, Wu H X, et al. 2019. Crustal shear velocity model in Southwest China from joint seismological inversion[J]. CSES Scientific Products, doi:10.12093/02md.02.2018.01.v1.
- Zhang M, Ellsworth W L, Beroza G C. 2019. Rapid earthquake association and location [J]. Seismological Research Letters, 90(6): 2276–2284.
- Zhu W Q, Beroza G C. 2019. PhaseNet: a deep – neural – network – based seismic arrival – time picking method[J]. Geophysical Journal International, 216(1): 261–273.
- GB 17740—2017, 地震震级的规定[S].

## Accurate Location of the 2020 Dongchuan, Yunnan $M_L4.2$ Earthquake Sequence

GAO Fanghong, LIU Zhikun, GENG Chuantao

(School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

### Abstract

Selecting the continuous waveform data from 10 temporary broadband seismic stations in Dongchuan, Yunnan Province, and using the automatic seismic phase detection and correlation based on deep learning, we conduct absolute and relative locations of the July 8th, 2020 Dongchuan  $M_L4.2$  earthquake sequence, and obtain high – resolution results: the  $M_L4.2$  earthquake sequence contains 212 events, about five times of the events from the catalogue of China Earthquake Networks Center, enriching the  $M_L < 3.0$  aftershocks. The focal depth of the  $M_L4.2$  mainshock is 5.19 km and the aftershock sequence concentrates in the depth of 3–6 km. The Long axis of the aftershock zone is in the NNE direction. The earthquake sequence occurs in the west branch of the Xiaojiang Fault Zone and its seismogenic structure may be related with the tectonic evolution of the pull – apart Wulong Basin.

**Keywords:** earthquake location; microseismic detection; the Xiaojiang Fault Zone; double – difference earthquake location; pull – apart basin; Dongchuan  $M_L4.2$  earthquake