

2021年云南双柏 M_s 5.1 地震序列的快速检测与精定位研究^{*}

廖诗荣¹, 杨 婷², 张红才^{1,3}, 范莉苹^{2,♣}, 秦 敏⁴, 房立华^{2,5,6}

(1. 福建省地震局, 福建 福州 350003; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;
3. 中国地震局厦门海洋地震研究所, 福建 厦门 381000; 4. 云南省地震局, 云南 昆明 650224;
5. 中国地震局震源物理重点实验室, 北京 100081; 6. 防灾科技学院, 河北 三河 065201)

摘要: 2021年6月10日云南双柏发生 M_s 5.1 地震, 6月28日又发生 M_L 4.6 地震。采用基于深度学习的地震检测算法, 对主震及其后 20 d 的连续波形进行检测, 并开展了震相关联、地震绝对定位、震级测定和精定位研究, 获得了此次地震的完整序列目录。共检测到 1 713 个地震, 比人工多检测出 623 个地震, 震级分布范围为 M_L -0.8 ~ 5.1。研究表明: 双柏 M_s 5.1 地震和 M_L 4.6 地震的余震整体呈 NNE 向分布, 两个地震的发震断层较陡, 近直立分布。发震断层北东侧浅、西南侧深, 且断层面较窄。 M_L 4.6 地震的余震整体位于 M_s 5.1 地震余震序列的底部, 显示 2 个地震可能是独立的事件。分析认为这两次地震的发震断层为楚雄—建水断裂西南侧的一条隐伏走滑断层。

关键词: 双柏地震; 深度学习; 地震检测; 双差定位; 发震断层

中图分类号: P315.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2021)04-0515-06

0 引言

2021年6月10日19时46分, 云南省楚雄州双柏县(24.34°N, 101.91°E)发生 M_s 5.1 地震(以下简称双柏地震), 震源深度 14 km。6月28日19时48分在附近又发生 M_L 4.6 地震, 震源深度 13 km。双柏地震震中附近震感强烈, 玉溪、楚雄、昆明和大理等地也均有震感。此次双柏地震是继 2021年5月21日漾濞 M_s 6.4 地震后, 在云南境内发生的又一个震级较大的地震。万永革课题组确定的双柏地震的震源机制为: 节面 I 走向 301.47°、倾角 82.28°、滑动角 177.78°; 节面 II 走向 31.76°、倾角 87.80°、滑动角 7.72°^①。据中国地震台网中心统计, 截至 2021年6月30日24时,

共记录到双柏地区地震 1 090 个。

双柏地震发生在楚雄盆地西南部, 楚雄盆地位于扬子板块西南缘和川滇菱形块体南部的滇中次级块体, 盆地西南边界为哀牢山—红河断裂, 与思茅—印支地块相邻。双柏地震的震中位置介于 NW 走向的哀牢山—红河断裂与楚雄—建水断裂之间, 震中附近并无明显的断裂分布(图 1)。

本文利用震中周边的云南地震台网固定台及流动台连续波形数据, 采用基于深度学习的地震检测算法, 对双柏地震序列进行检测(研究区域范围: 24.28°~24.40°N, 101.82°~101.94°E), 基于区域速度模型对地震序列进行绝对定位, 并利用双差定位方法进行相对定位, 探讨了此次地震序列的分布特征和发震构造。

^{*} 收稿日期: 2021-08-12。

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1503400)、国家自然科学基金(41774067)、地震科技星火计划(XH20029)和中国地震局地球物理研究所基本科研专项(DQJB20X07)联合资助。

第一作者简介: 廖诗荣(1977-), 高级工程师, 主要从事地震数据自动处理研究。

E-mail: liaoshirong@fjga.gov.cn.

♣通讯作者简介: 范莉苹(1988-), 助理研究员, 博士, 主要从事地震数据自动处理研究。

E-mail: fanlipingchampak@163.com.

^① <https://mp.weixin.qq.com/s/07ansgl0sf8a319w7Xq85A>.

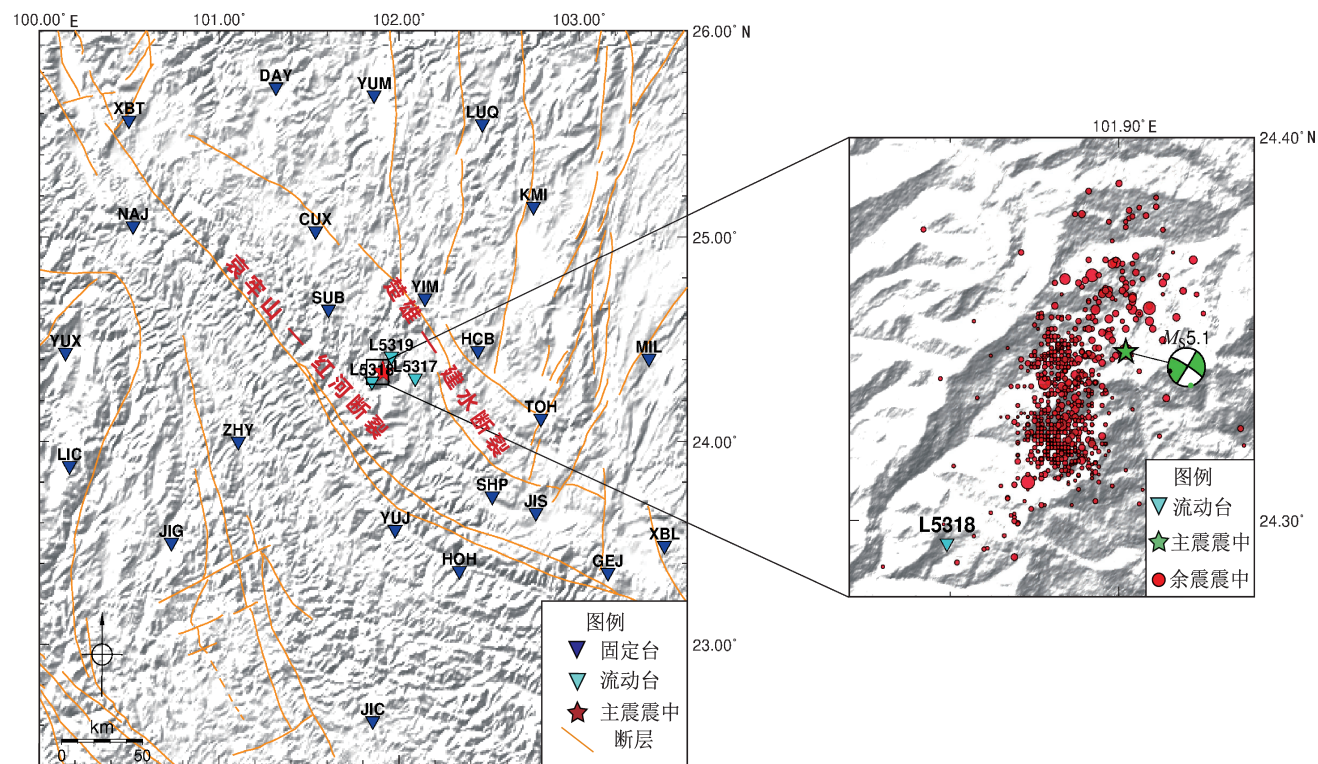


图 1 双柏地震震中及其邻区主要断裂带分布图

Fig. 1 Distribution of the main fault zones around the epicenter of the Shuangbai earthquake

1 数据和方法

本文收集处理了 2021 年 6 月 10 日 19 时至 6 月 30 日 24 时、震中周边 200 km 范围内 27 个台站（其中固定台 24 个、流动台 3 个）的连续波形数据。流动台站布设前，双柏地区地震最大孔隙角为 51°，次大孔隙角为 64°，最近台站震中距 46 km。6 月 11 日 11 时与 12 时，L5318、L5319 两个流动台实现联网观测，6 月 12 日 12 时，L5317 流动台加入观测。3 个流动台实现联网观测后，双柏区域最大孔隙角为 49°，次大孔隙角为 55°，最近台站震中距 8 km。流动台站的布设，显著改善了双柏地区的观测台网布局，提高了定位精度。本文中的台站所使用的均为三分向地震计，采样率均为 100 Hz。本文采用的数据处理过程包括以下 5 个步骤：

（1）地震检测与震相拾取。采用 PhaseNet 算法（Zhu, Beroza, 2019），数据窗长取 30 s，处理步长取 10 s。若同一震相有多个震相到时，则选择概率值较大的震相到时参与后续处理。

（2）震相关联。根据组触发策略（Tamaribuchi, 2018），确定关键震相。随后将关键震相对应台站周边 N 个台站（动态生成）的震相到时，采用“八叉树”搜索方法（Lomax *et al*, 2000）确定最大概率网格点。最后确定残差绝对值小于 1.0 s 的震相到时为关联成功的震相，参与后续绝对地震定位。

（3）绝对地震定位。基于云南地区的一维速度模型（王夫运等, 2014）（表 1），采用 NLLoc 方法进行定位（Lomax *et al*, 2000），获得地震的绝对位置。

表 1 云南地区一维速度模型

Tab. 1 One – dimension velocity model in Yunnan area

顶界面深度/km	0	5	15	24	34	43
P 波速度/（km · s ⁻¹ ）	5.3	6.05	6.2	6.45	6.7	8.0

（4）震级测定。应用实时仿真算法（Kanamori *et al*, 1999；金星等, 2004），将原始速度记录仿真为 DD-1 位移记录，在 S 波或 Lg 波位置附近量取最大振幅，按照《地震震级的规定》（DB

17740—2017)，计算 M_L 震级。

(5) 双差精定位。采用 HypoDD 相对定位方法 (Waldhauser, Ellsworth, 2000; Fang *et al*, 2013; 房立华等, 2018; Wang, Hutko, 2018; Wang *et al*, 2021) 进行精定位, 选择震相走时残差小于 1.0 s、震相数量不少于 7 个的地震事件参与相对定位。相对定位采用与绝对定位相同的速度模型。

2 结果和讨论

应用本文方法共产出 1 713 条地震目录 (以下简称自动目录), 而在相同时间段内, 云南地震台网共产出人工分析地震目录 (以下简称人工目录) 1 090 条 (含单台记录地震 2 条), 自动目录条目数是人工目录的 1.57 倍 (图 2)。

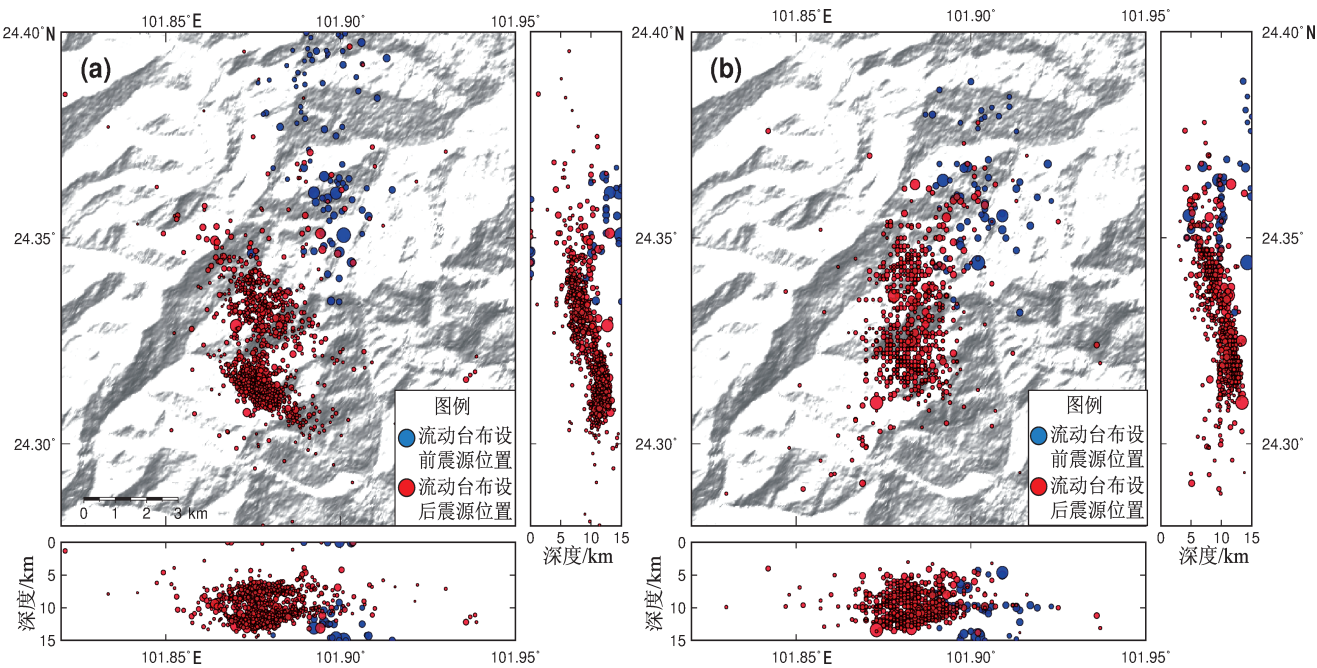


图2 自动目录 (a) 和人工目录 (b) 定位结果对比

Fig. 2 Comparison between the location results from automatic catalog (a) and the ones from the manual catalog (b)

在 6 月 11 日 12 时 2 个流动台布设前后, 云南地震台网对双柏地区地震的监测能力存在显著差异。以此时间点为界, 本文分两个时间段对包含 7 个以上震相的自动目录与人工目录匹配情况进行对比, 并统计漏检拾与多检拾事件数 (表 2), 对比规则参考廖诗荣等 (2021) 的研究。由表 2 可见, 在流动台布设前自动目录条目数是人工目录的 1.31 倍, 但存在 14.9% 的漏检率; 而流动台站并网运行后, 自动目录数量达到人工目录的 1.53 倍, 漏检率降低至 2.5%。图 3 为自动拾取震相的走时分布, 可以看出, Pg 和 Sg 震相的走时与震源距都存在明显的线性关系, 离散程度低, 表明自动拾取的震相到时具有较高的可信度。

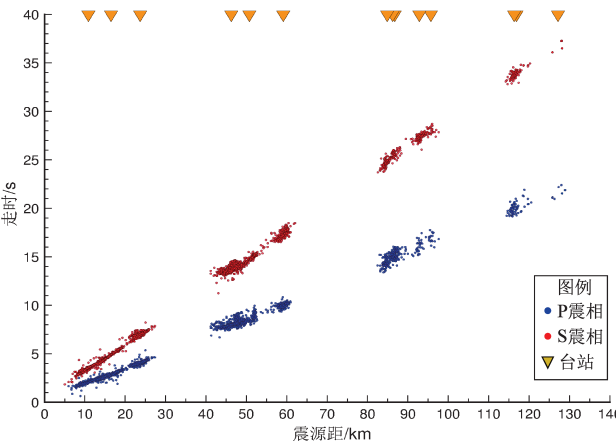


图3 自动拾取震相的走时分布

Fig. 3 Travel – time distribution of the automatically picked phases

表 2 流动台布设前后人工与自动目录匹配情况
Tab. 2 Statistics on the matching of manual and automatic catalogs before and after deploying mobile stations

时间段		事件数量/个	
		人工目录	自动目录
流动台布设前	条目数 (震相数 ≥ 7)	67	88
	匹配数 (震相数不限)	57	83
流动台布设后	条目数 (震相数 ≥ 7)	710	1 089
	匹配数 (震相数不限)	692	791

基于上述自动和人工处理的震相数据,采用双差相对定位方法分别对两个目录中的事件进行精定位,精定位后两个目录中的地震数量分别为 1 023 个和 738 个,其中 6 月 11 日 12 时之后的地震数量分别为 982 个和 689 个,自动目录精定位成功事件数量明显多于人工目录。鉴于在流动台布设前两个目录的震源位置误差较大,分布较为离散,因而本文仅采用布设流动台后的精定位结果,分析双柏地震的发震构造。

图 4 为布设流动台后的地震精定位结果。图 4a 显示了余震震中位置随发震时刻变化情况以及 3 个剖面的位置。AA' 剖面沿地震序列走向方向,长度约 6 km。选择震中距离剖面小于 1.0 km 的地震绘制 AA' 剖面震源深度分布图 (图 4b)。BB' 与 CC' 剖面垂直于地震序列走向方向,长度约 3 km,分别穿过北面与南面两个地震密集区。选择震中距离剖面小于 0.6 km 的地震绘制 BB' 与 CC' 剖面震源深度分布图 (图 4c、d)。从图 4 可以看出,重定位后的余震震中主要呈 NNE 向展布,且表现为南、北两个密集区的特点。双柏 $M_s5.1$ 地震的余震主要分布在北侧密集区,而 $M_L4.6$ 地震的余震主要分布在南侧密集区,北侧的余震较南侧略显分散。与人工地震目录结果相比,自动检测获取的地震目录表现为更明显的两个地震密集区。从震源深度剖面来看 (图 4b~d), $M_s5.1$ 地震的余震震源深度较浅,主要分布在 6~10 km,而 $M_L4.6$ 地震的余震震源深度偏深,主要分布在 11~14 km。地震序列为首先在浅部发生,而后转移到深部。但两个地震的余震都显示发震断层倾角较陡,近直立分布。

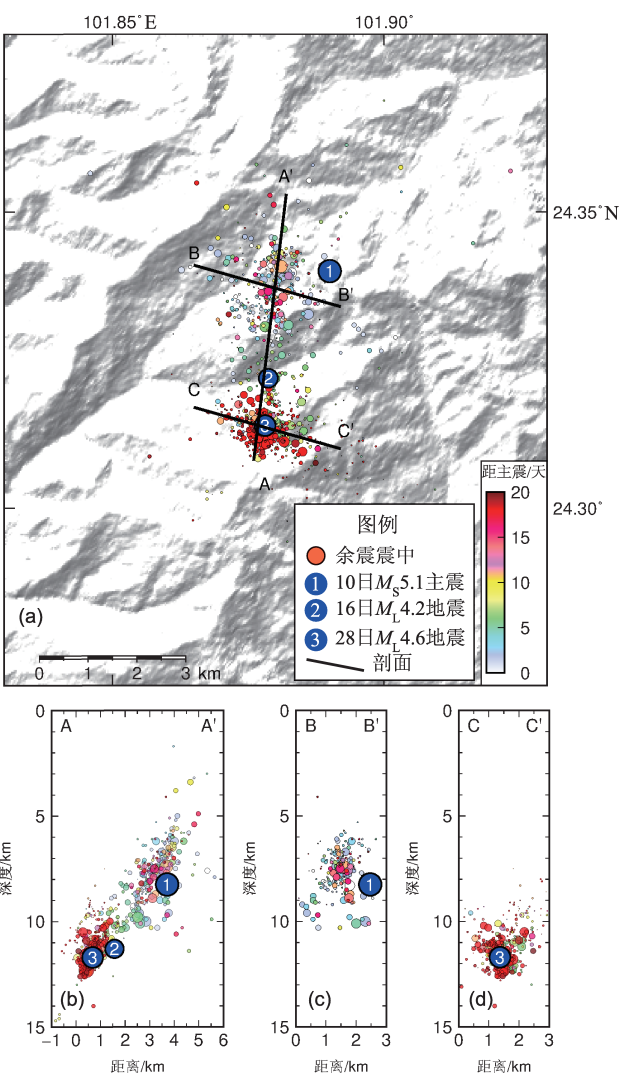


图 4 布设流动台后的地震精定位结果

Fig. 4 Precise location of earthquakes after deploying mobile stations

此次双柏地震序列发生在楚雄—建水断裂西南侧。震中附近既有北西向的断层,也有近南北向的断层 (图 1)。万永革课题组汇总的中国地震局地球物理研究所等反演获得的双柏 $M_s5.1$ 地震的震源机制解^①,都显示发震断层倾角较陡,多数超过了 80° (万永革等, 2008)。但是,双柏地震的余震并未呈明显的线性分布 (图 4),2020 年巧家 $M_s5.0$ 地震也有类似的现象 (Fu *et al.*, 2021)。云南地质构造复杂, $M_s6.5$ 以下的地震很难产生地表破裂,单靠活动断裂分布或震源机制解经常无法识别发震断层。如 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震发生

^① <https://mp.weixin.qq.com/s/07ansglOsf8a319w7Xq85A>.

在以前未知的包谷垭断裂,且为共轭破裂(房立华等,2014)。2021年漾濞 $M_s6.4$ 地震,虽然余震总体呈北西向分布,但也有北东向共轭断层的活动(苏金波等,2021)。图4的余震震源深度剖面也呈现了近直立的分布特征。结合余震分布和震源机制解,推测双柏 $M_s5.1$ 地震的发震断层为一条倾角近直立、走向 NNE 的隐伏走滑断层。

3 结论

本文采用基于深度学习的地震检测算法,检测了双柏 $M_s5.1$ 地震震后 20 d 的连续波形数据,获得了较为完整的余震序列,并根据余震精定位结果,对双柏地震的发震构造进行了分析,得到了以下结论:

(1) 与人工目录相比,自动处理系统检测到 1 713 个地震,比人工多检测出 623 个地震,提高了地震序列处理的效率和目录完备性,为快速确定发震断层,判定地震序列类型提供了重要依据。

(2) 双柏 $M_s5.1$ 地震和 $M_L4.6$ 地震的余震整体呈 NNE 向分布,但 2 个余震区不连续。两个地震的发震断层较陡、近直立分布。发震断层北东侧浅、西南侧深,且断层面较窄。 $M_L4.6$ 地震的余震整体位于 $M_s5.1$ 地震余震序列的底部,显示两个地震可能是独立的事件, $M_L4.6$ 地震不是 $M_s5.1$ 地震的余震。结合震源机制,推测这两次地震的发震断层为楚雄—建水断裂西南侧的一条隐伏走滑断层,走向 NNE。

感谢云南省地震局提供波形数据,中国地震台网中心提供地震观测报告。

参考文献:

房立华,吴建平,苏金蓉,等.2018.四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震主震及其余震序列精定位研究[J].科学通报,63(7):649-662.
房立华,吴建平,王未来,等.2014.云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震余震重定位及其发震构造研究[J].地震地质,36(4):1173-1185.

金星,马强,李山有.2004.利用数字化速度记录实时仿真位移与加速度时程[J].地震工程与工程振动,24(6):9-14.
廖诗荣,张红才,范莉苹,等.2021.实时智能地震处理系统研发及其在2021年云南漾濞 $M_s6.4$ 地震中的应用[J].地球物理学报,64(10):3632-3645,doi:10.6038/cjg202100532.
苏金波,刘敏,张云鹏,等.2021.基于深度学习构建2021年5月21日云南漾濞 $M_s6.4$ 地震序列高分辨率地震目录[J].地球物理学报,64(8):2647-2656.
万永革,沈正康,刁桂苓,等.2008.利用小震分布和区域应力场确定大震断层面参数方法及其在唐山地震序列中的应用[J].地球物理学报,51(3):793-804.
王夫运,潘素珍,刘兰,等.2014.玉溪—临沧剖面宽角地震探测——红河断裂带及滇南地壳结构研究[J].地球物理学报,57(10):3247-3258.
Fang L H, Wu J P, Wang W L, et al. 2013. Relocation of the mainshock and aftershock sequences of $M_s7.0$ Sichuan Lushan earthquake[J]. Chin Sci Bull, 58(28):3451-3459.
Fu Z, Jiang C, Yin F, et al. 2021. Preliminary Report on the 18 May 2020 $M_s5.0$ Qiaojia Earthquake, Yunnan, China[J]. Seismological Research Letters, 92(4):2122-2133.
Kanamori H, Maechling P, Hauksson E. 1999. Continuous monitoring of ground-motion parameters[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 89(1):311-316.
Lomax A, Virieux J, Volant P. 2000. Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations[M]//Advances in Seismic Event Location Amsterdam: Kluwer, 101-134.
Tamaribuchi K. 2018. Evaluation of automatic hypocenter determination in the JMA unified catalog[J]. Earth Planets and Space, 70(1):141.
Waldhauser F, Ellsworth W L. 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(90):1353-1368.
Wang D, Hutko A R. 2018. Relative relocations of the North Korean nuclear tests from 2006 to 2017 using the Hi-Net array in Japan[J]. Geophysical Research Letters, 45(15):7481-7487.
Wang W, Fang L, Wu J, et al. 2021. Aftershock sequence relocation of the 2021 7.4 Maduo Earthquake, Qinghai, China[J]. Science China Earth Sciences, 64(8):1371-1380.
Zhu W, Beroza G C. 2019. Phasenet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method[J]. Geophysical Journal International, 216(1):261-273.
DB 17740—2017,地震震级的规定[S].

Fast Detection and Relocation of the 2021 Shuangbai $M_s5.1$ Earthquake Sequences in Yunnan

LIAO Shirong¹, YANG Ting², ZHANG Hongcai^{1,3}, FAN Liping², QIN Min⁴, FANG Lihua^{2,5,6}

(1. *Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, Fujian, China*)

(2. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

(3. *Xiamen Institute of Marine Seismology, China Earthquake Administration, Xiamen 381000, Fujian, China*)

(4. *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

(5. *Key Laboratory of Earthquake Source Physics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

(6. *Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China*)

Abstract

At 19:46 on June 10, 2021, an $M_s5.1$ earthquake occurred in Shuangbai County, Yunnan Province, and another $M_L4.6$ earthquake succeeded on June 28. In this paper, the earthquake detection algorithm based on deep learning is used to detect the continuous seismic waveforms 20 days after the mainshock. Then, phase association, magnitude measurement, earthquake location and relocation are carried out, and a complete catalog of earthquake sequence is obtained. The sequence contains a total of 1 713 earthquakes, among which 623 more earthquakes are detected than by the manual method. The magnitudes (M_L) ranges from -0.8 to 5.1 . The study shows that the aftershocks of the Shuangbai $M_s5.1$ earthquake and the $M_L4.6$ earthquake are generally distributed in NNE direction, and the seismogenic faults of the two earthquakes are steep and nearly vertical. The seismogenic fault is shallow in the northeast and deep in the southwest, and the fault plane is narrow. The aftershocks of the $M_L4.6$ earthquake are located below the aftershocks of the $M_s5.1$ earthquake; this indicates that the two main earthquakes may be independent events. The seismogenic fault of the two earthquake is a concealed, strike-slip fault located to the southwest of the Chuxiong-Jianshui fault.

Keywords: the Shuangbai earthquake; deep learning earthquake detection; double difference location; seismogenic fault