

# 实时智能地震处理系统在2020年四川石渠 M5.6地震序列中的应用

刘媛<sup>1)</sup>, 颜利君<sup>1)</sup>, 廖诗荣<sup>2)</sup>, 杨佳佳<sup>1)</sup>, 庞瑶<sup>1)</sup>, 蒋策<sup>3)</sup>, 房立华<sup>4)</sup>

1) 四川省地震局, 成都, 610041; 2) 福建省地震局, 福州, 350003;  
3) 广东省地震局, 广州, 510070; 4) 中国地震局地球物理研究所, 北京, 100081



**内容提要:**实时智能地震处理系统(RISP)是一套基于深度学习技术的新型地震实时处理系统,于2021年6月在四川开始试运行。为了评估该系统在四川台网稀疏区域的地震检测和处理能力,笔者等采用RISP系统对2020年4月1日四川甘孜州石渠县发生的M5.6级地震序列进行了回溯性分析,获得了较为可靠的自动处理地震序列目录,并与人工目录进行了对比分析。震后10d内,RISP系统自动处理获得了386个地震信号,地震数量是正式地震目录的1.98倍,匹配率为97.43%。分析显示,发震时刻偏差小于 $\pm 1.0$ s的地震占比71.05%,震中位置偏差小于10km的地震占比96.31%,震级偏差小于 $\pm 0.3$ 级的地震占比99.47%。根据RISP系统检测地震序列分布特征和震源机制解,认为此次地震的发震断层为五道梁—长沙贡玛断裂北东侧的一条未发现的分支断层。研究结果表明,RISP系统的应用可以提升台网稀疏区域的地震检测能力,可快速产出地震序列目录,对大震应急、震后趋势判定和发震构造研究等具有重要意义。

**关键词:**自动处理;深度学习;地震检测;石渠地震

据中国地震台网中心(CENC)测定,北京时间2020年4月1日20时23分27秒,四川省甘孜州石渠县发生了M5.6级地震(简称石渠地震),震中位于北纬33.04°,东经98.92°,震源深度10km。截至2020年4月25日0时,四川台网正式地震目录共收录石渠地震余震序列218次,其中 $M_L 1.0$ 级以下1次、 $M_L 1.0 \sim 1.9$ 级123次、 $M_L 2.0 \sim 2.9$ 级85次、 $M_L 3.0 \sim 3.9$ 级8次、 $M_L 4.0 \sim 4.9$ 级1次,最大余震为主震后112s的 $M_L 4.1$ 地震。

此次地震震中发生在巴颜喀拉块体内部,位于鲜水河断裂带向NW延伸的五道梁—长沙贡玛断裂带附近。五道梁—长沙贡玛断裂为巴颜喀拉块体内部一条大型的左旋走滑断裂,具有明显的全新世活动性。该断裂东起炉霍县侏倭乡附近,向北西经长沙贡玛、石渠县宜牛乡北,逐渐汇于东昆仑断裂,最新的GoogleEarth影像显示,五道梁—长沙贡玛断裂中段在四川石渠县北部控制—新生代盆地的北边界(梁明剑等,2022)。该地震是四川地区继2020年2月3日M5.1青白江地震之后发生在历史弱震区的

又一个显著地震。基于该区域地质构造环境与台站布局的特殊性,笔者等以此次地震为例,采用实时智能地震处理系统软件(简称RISP系统;廖诗荣等,2021)的离线版本对四川地震台网2020年4月1日至4月10日的连续波形数据进行自动处理,产出该地区对应时段的自动处理地震目录,并将自动目录与人工目录进行对比,评估该系统在川西地震监测能力相对较弱区域产出结果的可靠性,并探索系统在该区域实现微小地震自动检测的可行性。

## 1 实时智能地震处理系统简介

实时智能地震处理系统从我国地震台网数据处理的实际需求出发,基于现有的地震编目数据处理流程和评价指标,采用分布式架构、模块化设计,用以实现实时快速产出地震目录、事件类型、震相报告、地震精定位结果和震源机制解等信息,并在此基础上实现正式地震目录与详细震相报告的快速产出(廖诗荣等,2021)。该系统包含7个数据处理模块与4个支撑模块,支持在线处理和离线处理两种工

注:本文为国家重点研发计划(编号:2018YFC1504501-02)和中国地震局地震科技星火计划(编号:XH20029、XH21027)的成果。

收稿日期:2022-01-30;改回日期:2022-04-19;网络首发:2022-05-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.05.021

作者简介:刘媛,女,1993年生,助理工程师,主要从事测震分析工作;Email:ly\_dqwl@163.com。通讯作者:廖诗荣,男,1977年生,正高级工程师,主要从事地震数据自动处理研究;Email:liao Shirong@fjca.gov.cn。

作模式,在线处理时各模块通过 Apache ActiveMQ (<https://activemq.apache.org>) 消息中间件进行数据交换,离线处理时各模块通过文件进行数据传递。目前在四川地震台网已在线部署了 AI 震相拾取、关联与定位、震级测定 3 个数据处理模块,波形共享、消息交换和可视化界面 3 个系统支撑模块。

笔者等采用离线处理模式对石渠地震震后 10 d 的连续波形数据进行处理,涉及的数据处理模块主要包括:

(1) AI 震相拾取。处理连续波形数据文件,对每个时间窗内的数据经过去均值、去倾斜、归一化处理等预处理后,采用基于深度神经网络的 PhaseNet 模型 (Zhu et al., 2019) 进行震相到时拾取,产出每个台站的震相到时、震相类型、预测概率,同时产出信噪比、幅值等震相可靠性指标。

(2) 关联与定位。读取 AI 震相拾取模块产出的震相到时数据,经过组触发 (Tamaribuchi, 2018)、等时差八叉树搜索 (Lomax et al., 2008) 等步骤,将同一事件产生的震相数据关联在一起,关联成功的震相数达到 5 个以上后,调用 NLLoc 定位程序 (Lomax et al., 2008) 进行地震定位。

(3) 震级测定。处理连续波形数据文件,对定位前的连续波形记录仿真为 DD-1 位移记录,量取局部峰值与周期,存入对应震相的振幅列表。定位后,结合定位结果,选择满足走时特征的振幅计算单台震级。获得多个单台震级后,剔除单台震级的异常值,计算多个单台震级的算术平均值为事件震级。目前系统仅产出  $M_L$  震级。

## 2 数据处理

石渠地震震中位于川青藏交界区域,平均海拔约 4600 m,震中 400 km 范围内共有 27 个测震台,青海、西藏地区的台站相对稀疏,震中东南的台站分布相对密集,震中 200 km 范围内有 7 个测震台,震中 100 km 范围内仅有 1 个测震台,震中距约 81 km (图 1)。我们使用 RISP 离线处理模式,对四川台网石渠地震震后 10 d 的连续波形数据进行处理,使用的台站与人工编目完全一致。

2020 年 4 月 1 日至 4 月 10 日,在石渠地震余震区 (98.70°E—99.20°E, 32.70°N—33.20°N),四川地震台网人工分析 195 条地震目录 (简称“人工目录”),RISP 系统产出地震目录 386 条目录 (简称“自动目录”) (图 2)。图 3a 为自动目录与人工目录的震级时间分布图,图 3b 为自动目录与人工目录

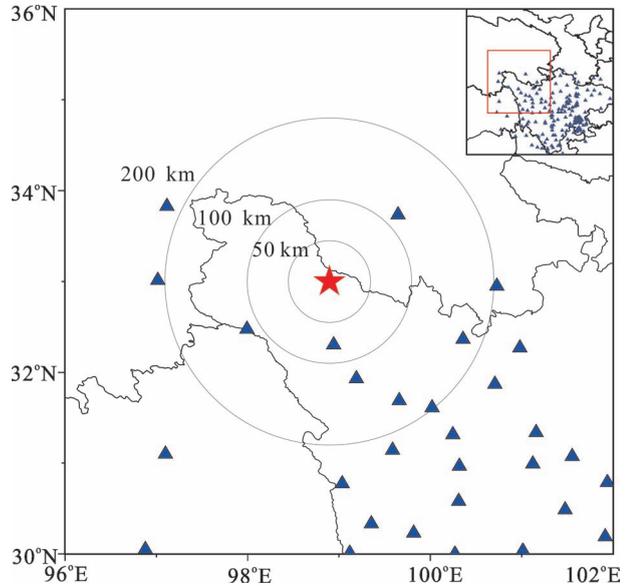


图 1 地震台站分布图 (五角星为主震震中;蓝色三角为地震台站)

Fig. 1 Distribution map of seismic stations (The pentastar is the epicenter of main shock; the blue triangle is the seismic station)

的地震累积数量变化图,由图可知,自动目录的事件数量大致是人工目录的 2 倍,震级下限达  $M_L$  0.7 级左右,相对人工目录来说,多产出的地震事件主要集中在  $M_L$  1.6 级以下。图 4 为自动目录与人工目录在不同震级段的地震数量对比。由图可知,对于  $0.6 < M_L < 1.6$  范围内的地震,自动目录的地震数量明显多于人工目录;对于  $M_L \geq 1.6$  的地震,自动目录与人工目录的地震数量具有较好的一致性。

为了定量分析自动目录的可靠性,我们以人工目录产出的发震时刻为条件,若自动目录的发震时刻与人工目录的发震时刻差异小于 5 s,震中位置差异小于 25 km,则认为匹配成功,为同一地震事件;若人工目录中的事件无法在自动目录中找到,则认为系统漏检测该事件;若自动目录中的事件无法在人工目录中找到,则认为系统多检测该事件。据统计,该时间段内,人工编目共产出地震目录 195 条,RISP 系统产出地震目录 386 条,匹配成功 190 条,漏检测 5 个事件,匹配率达到 97.43%,多检测 196 个事件,自动处理的地震总数量是人工产出结果的 1.98 倍 (图 2)。图 5 分别给出了匹配成功地震的发震时刻、震中位置、震源深度、震级的偏差数量统计图,发震时刻偏差小于  $\pm 1.0$  s 的地震有 135 个,占比 71.05%;震中位置偏差小于 10 km 的地震有 183 个,占比 96.31%;震源深度偏差小于  $\pm 10$  km 的地震

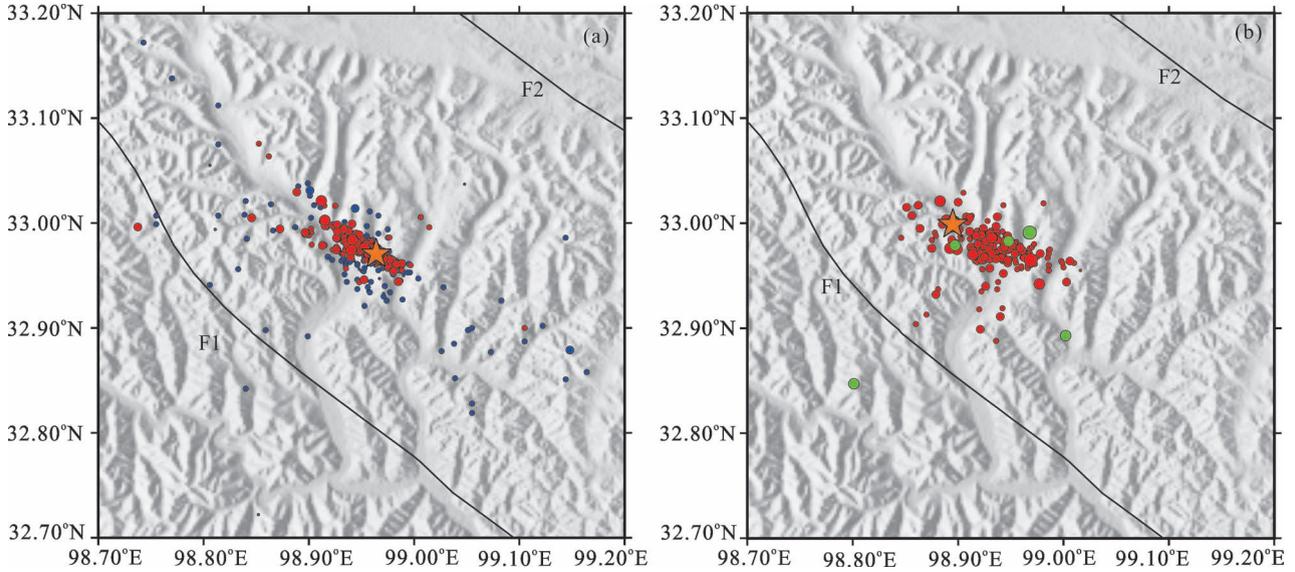


图2 自动目录(a)与人工目录(b)震中分布图

Fig. 2 The epicenter distribution map of the automatic catalogs (a) and manual catalogs (b)

五角星为主震震中;红色圆点为自动目录与人工目录匹配成功的地震震中;图(a)中蓝色圆点为自动目录多检测的地震震中;图(b)中绿色圆点为自动目录匹配失败的人工目录震中

The pentastar is the epicenter of main shock; the red dot is the epicenter of the earthquake that successfully matched the manual catalogs with the automatic catalogs; the blue dot in figure (a) is the earthquake epicenter detected by the automatic catalogue; the green dot in figure (b) is the epicenter of the manual catalogue that failed to match the automatic catalogue

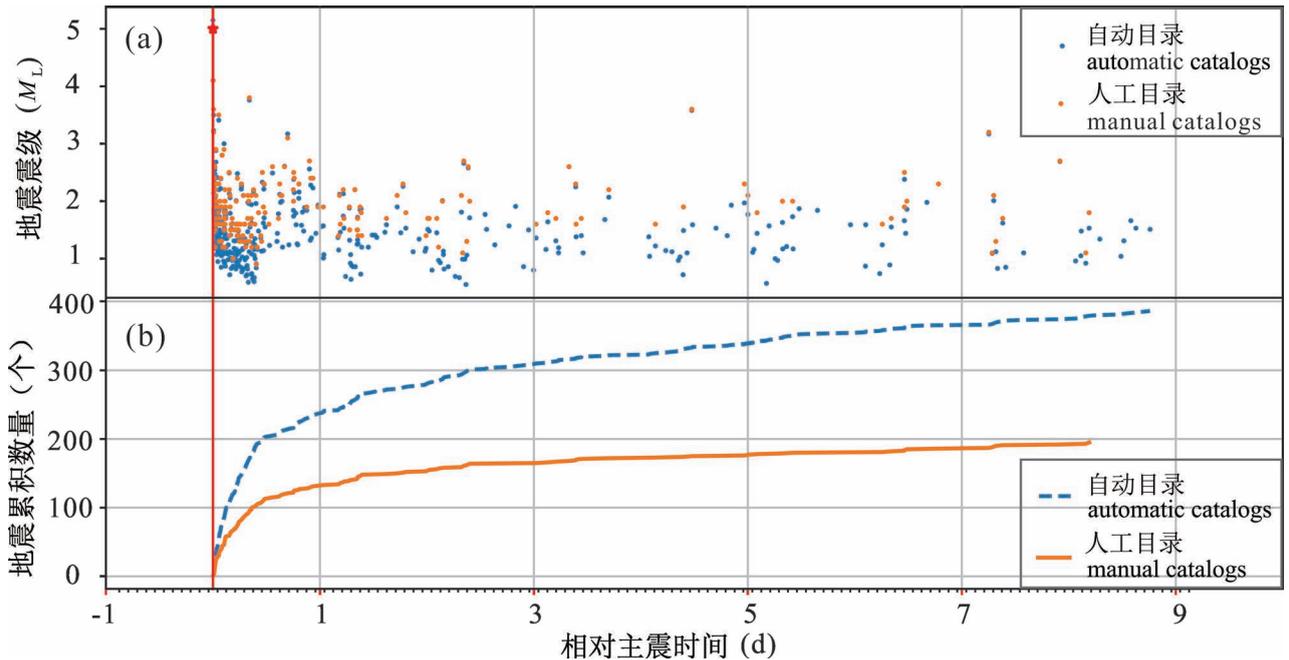


图3 2020年4月1日至2020年4月10日自动目录与人工目录统计图

Fig. 3 Statistical graph of the automatic catalogs and manual catalogs from April 1, 2020 to April 10, 2020

(a) 震级时间分布图;(b) 地震累积数量变化图

(a) Distribution map of magnitude and time;(b) map of the cumulative number of earthquakes

有160个,占比84.21%;震级偏差小于±0.3级的地震为189个,占比99.47%。图6为人工目录与自动

目录P、S震相到时差异统计图。统计表明,自动拾取的震相中有1156个P震相和625个S震相分别

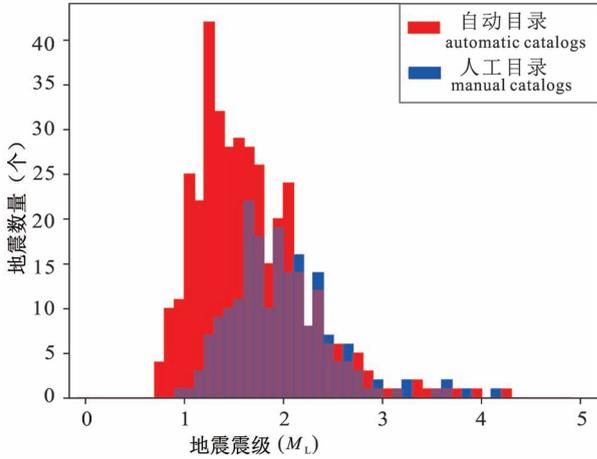


图4 不同震级段的地震数量对比  
Fig. 4 Comparison of the number of earthquakes in different magnitude bins

### 3 讨论

为了进一步评估自动目录的可靠性,笔者等对386个自动检测事件的波形记录进行人工分析,确认所有事件均包含地震信号,无误触发事件。

结合自动拾取的震相到时,将自动目录结果与人工目录结果进行对比分析,发现在匹配成功的190个地震事件中,有7个事件的震中位置偏差大于10 km,其中3个事件的自动目录结果选取的定位台站分布情况明显优于人工目录结果,对震中位置具有较好地约束;另外4个事件震中位置偏差较

与人工拾取的P、S震相匹配,匹配率分别为92.70%和89.41%,P震相到时平均偏差 $-0.05 \pm 0.02$  s,S震相到时平均偏差 $-0.09 \pm 0.04$  s。

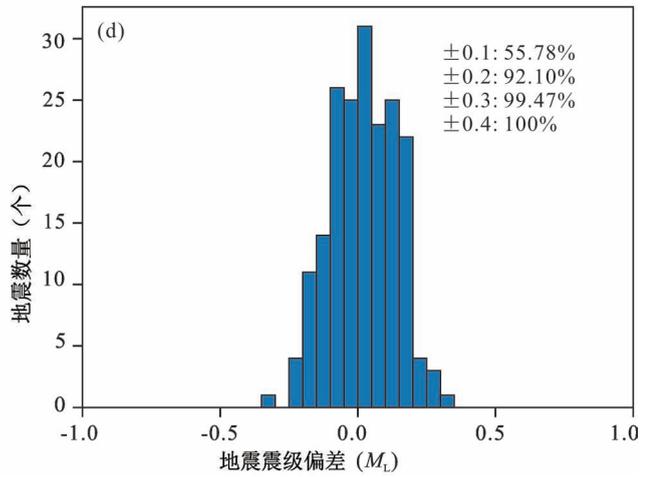
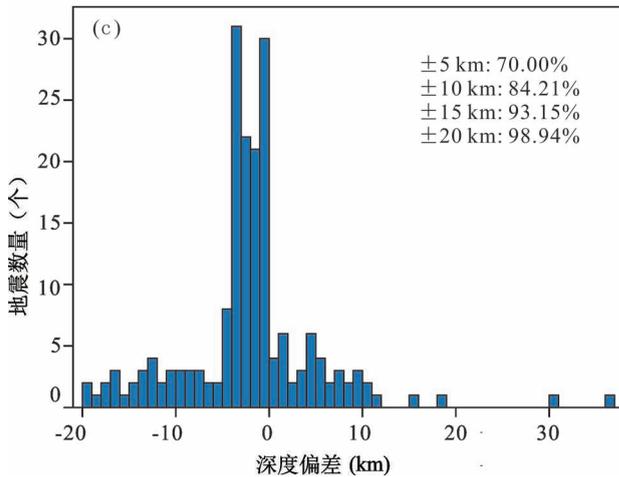
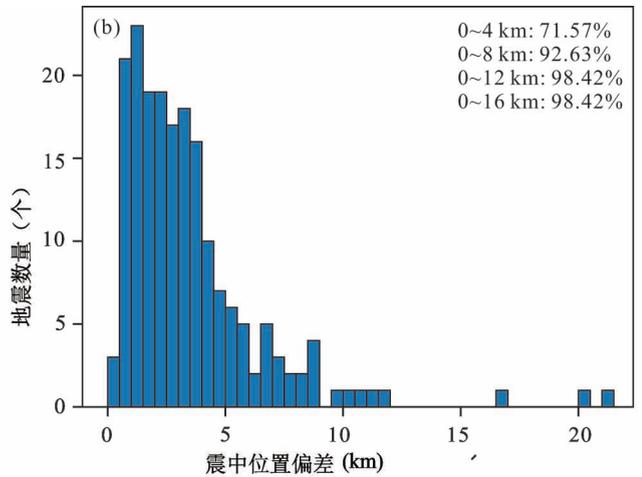
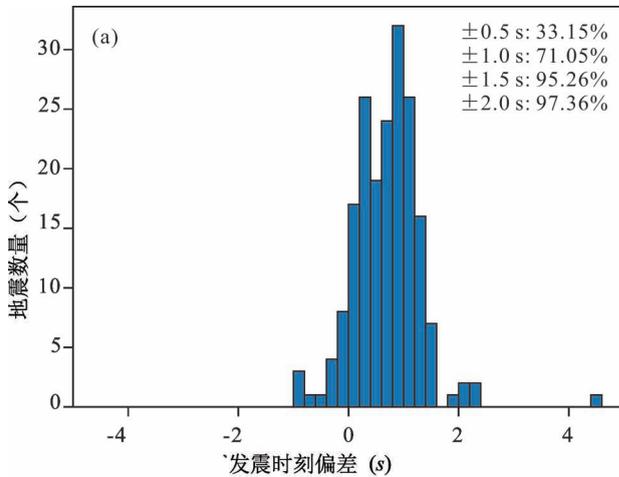


图5 自动目录与人工目录地震参数对比

Fig. 5 Comparison of the seismic parameters between automatic and manual catalogs

(a)、(b)、(c)、(d)分别为自动目录与人工目录发震时刻、震中位置、震源深度和震级的偏差  
(a), (b), (c) and (d) are the differences of the origin time, epicenter location, focal depth, and magnitude between automatic and manual catalogs

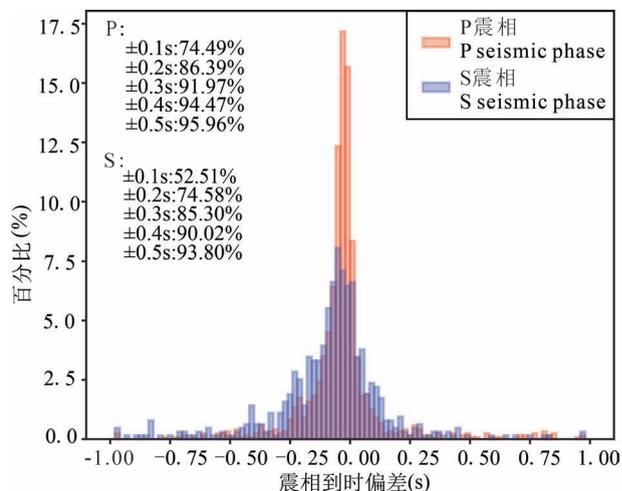


图6 自动目录与人工目录P、S震相到时差异

Fig. 6 The P-phases and S-phases arrival times differences between automatic and manual catalogs

大的主要原因包括:未能有效区分双震叠加事件,混淆选取了参与定位的震相(图7)、远台不清晰震相参与定位、最近台震相被剔除未参与定位等,RISP系统对于叠加地震的震相拾取和震相关联能力还需进一步提升。

对于5个漏检测地震,笔者等查看了人工目录和自动目录的详细数据,发现未匹配成功的5个地震中有2个地震均有自动处理结果,但其发震时刻与震中位置差异超过了匹配阈值;其余3个地震由于信噪比相对较低,不满足地震事件触发条件,没有自动处理结果,初步判定对于该地震序列RISP系统的漏检测率为1.54%,RISP系统对微弱地震信号的检测能力还需进一步提升。

为了验证自动处理石渠序列震中分布是否可用于辅助判定发震断层,笔者等选用美国地质调查局USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us70008kd8/moment-tensor>)给出的本次主震的震源机制解:节面I走向307°,倾向82°,滑动角9°;节面II走向215°,倾向81°,滑动角172°。图8给出了位于断裂带附近的主震震源机制解和自动目录中余震序列震中位置分布。由图可知,余震序列长轴走向与震源机制解节面I方向一致,也与邻近的五道梁—长沙贡玛断裂带平行,距离约11 km,由NW向SE方向展布。黄仕华等(2006)根据石渠县长沙贡玛乡汉布沟构造剖面研究和长达143 km范围的断裂带填图发现,该断裂带为道孚—炉霍

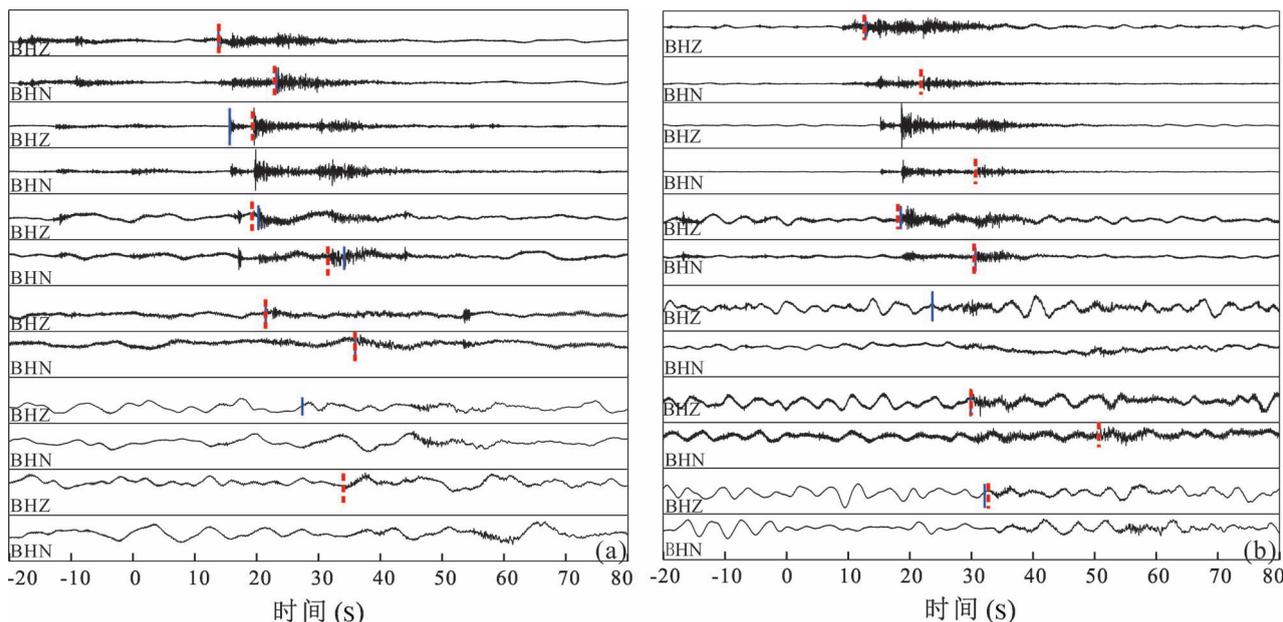


图7 双震叠加地震事件波形记录

Fig. 7 Waveform recording of double-seismic superimposed events

(a)4月1日21时08分地震波形记录图;(b)4月2日05时48分地震波形记录图

红色虚线为人工目录震相;蓝色实线为自动目录震相;P震相标注在BHZ通道;S震相标注在BHN通道

(a) Earthquake waveform recorded at 21:08 on April 1; (b) earthquake waveform recorded at 05:48 on April 2;

the red dotted line is the manual catalogs phase; the blue solid line is the automatic catalogs phase;

the P seismic phase is marked in the BHZ channel; the S seismic phase is marked in the BHN channel

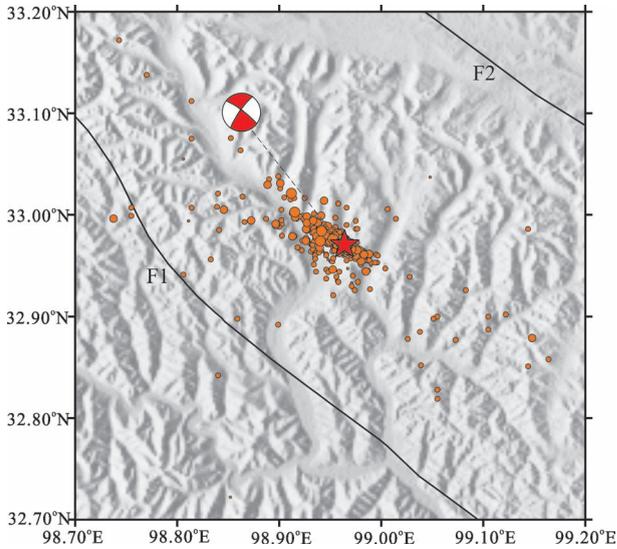


图8 自动目录余震分布及主震震源机制图

Fig. 8 The distribution of aftershocks in automatic catalogs and the focal mechanism of the main shock

五角星为主震震中;F1—五道梁—长沙贡玛断裂;F2—巴颜喀拉山主峰断裂

The pentastar is the main epicenter; F1—Wudaoliang—Changsha Gongma fault; F2—Main Peak fault of Bayan Har Mountain

断裂带的分支次级断裂,带宽 5~12 km,主断面为 NE 倾向的逆冲断层面,平面上由一系列断层分支复合组成稳定延伸的断层系。谢成良等(2012)通过大地电磁测深法研究发现,该区域除发育一组产状向南陡倾的地壳深断层外,其南侧也发现一组向南缓倾的次级断裂带。因此,结合震源区的地质构造特征,综合余震序列优势分布方向和震源机制解认为,节面 I 为本次地震的发震构造,表现为左旋走滑型地震,断层走向为 NW—SE 方向,其发震断层可能为五道梁—长沙贡玛断裂北东侧的一条未发现的分支断层。

## 4 结论

笔者等以 2020 年 4 月 1 日四川甘孜州石渠 M5.6 地震为例,评估了实时智能地震处理系统在四川西北部地震监测能力较弱区域处理结果的可靠性,对人工目录与自动目录进行了对比分析,并对该区域微小地震的自动检测能力进行了初步评估。

评估结果表明,该系统在四川西部台站稀疏地区,识别出的地震数量是人工的 2 倍左右,误检率低。成功匹配的地震事件中,自动目录与人工目录在发震时刻、震中位置、震级、P 和 S 震相到时方面均偏差较小。将自动处理石渠地震序列的震中分布

用于判定发震断层,推测石渠地震发震断层可能为五道梁—长沙贡玛断裂北东侧的一条未发现的分支断层。

系统在四川西北部的应用,可为该地区提供更加丰富的地震目录资料,有助于提升该地区的地震检测能力,实时快速产出地震序列目录,对大震应急、震后趋势判定和发震构造研究等具有重要意义。

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 黄仕华, 刘汉强. 2006. 青海达日县桑日麻地区发现道孚—炉霍断裂带北西延伸踪迹. 四川地质学报, 26(3): 129~137.
- 廖诗荣, 张红才, 范莉苹, 李珀任, 黄珍珠, 房立华, 秦敏. 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. 地球物理学报, 64(10): 3632~3645.
- 梁明剑, 黄飞鹏, 孙凯, 张会平, 吴微微, 张伟佳, 杜方, 周文英. 2022. 巴颜喀拉块体内部五道梁—长沙贡玛断裂中段全新世活动及最新古地震证据. 地球科学, 47(3): 766~778.
- 谢成良, 叶高峰, 魏文博, 金胜. 2012. 藏北高原主要断裂带电性结构特征. 地球物理学报, 55(12): 3991~4002.
- 杨彦明, 胡博, 戴勇, 张小艳. 2021. 2020-01-23 四川石渠 MS4.3 地震震源机制及发震构造研究. 大地测量与地球动力学, 41(2): 167~172.
- Huang shihua, Liu Hanqiang. 2006&. NW-trending extending of the Dawu—Luhuo fracture zone to Sangruma, Darlag, Qinghai. Acta Geologica, 26(3): 129~132.
- Liao Shirong, Zhang Hongcai, Fan Liping, Li Boren, Huang Lingzhu, Fang Lihua, Qin Min. 2021&. Development of a real time intelligent seismic processing system and its application in the 2021 Yunnan Yangbi  $M_s6.4$  earthquake. Chinese Journal of Geophysics, 64(10): 3632~3645.
- Liang Mingjian, Huang Feipeng, Sun Kai, Zhang Huiping, Wu Weiwei, Zhang Jiawei, Du Fang, Zhou Wenying. 2022&. The holocene activity and its evidence from paleoearthquake of the middle segment of Wudaoliang—Changshagongma fault inside the Bayan Har block. Earth Science, 47(3): 766~778.
- Lomax A, Michelini A, Curtis A. 2008. Earthquake Location, Direct, Global-Search Methods. New York: Springer.
- Tamaribuchi K. 2018. Evaluation of automatic hypocenter determination in the JMA unified catalog. Earth Planets and Space, 70(1): 141~141.
- Xie Chengliang, Ye Gaofeng, Wei Wenbo, Jin Sheng. 2012&. Electrical features of the main faults beneath Northern Tibetan Plateau. Chinese Journal of Geophysics, 55(12): 3991~4002.
- Yang Yanming, Hu Bo, Dai Yong, Zhang Xiaoyan. 2021&. Research on the focal mechanism and seismogenic structure of the Sichuan Shiqu MS4.3 earthquake on January 23, 2020. Geodesy and Geodynamics, 41(2): 167~172.
- Zhu W Q, Beroza G C. 2019. PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. Geophysical Journal International, 216(1): 261~273.

## Application of real-time intelligent seismic processing system in the 2020's M5.6 earthquake in Shiqu, Sichuan

LIU Yuan<sup>1)</sup>, YAN Lijun<sup>1)</sup>, LIAO Shirong<sup>2)</sup>, YANG Jiajia<sup>1)</sup>, PANG Yao<sup>1)</sup>, JIANG Ce<sup>3)</sup>, FANG Lihua<sup>4)</sup>

1) *Sichuan Earthquake Agency, Chengdu, 610041;*

2) *Fujian Earthquake Agency, Fuzhou, 350003;*

3) *Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou, 510070;*

4) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, 100081*

**Objectives:** The Real-time Intelligent Seismic Processing (RISP) system is a new type of seismic real-time processing system based on deep learning technology, which was trialed on the Sichuan Network in June 2021. The purpose of this paper is to evaluate the reliability of the system's output in the relatively sparse earthquake monitoring capabilities of western Sichuan, and to explore the feasibility of the system to automatically detect small earthquakes in this region.

**Methods:** Taking the 2020's M5.6 earthquake in Shiqu, Sichuan, as an example, the authors use RISP system to retrospectively analyze the earthquake sequence, and obtains a relatively reliable earthquake sequence catalog, which is compared with the manual catalogs.

**Results:** Within 10 days after the main shock, 386 automatic catalogs were automatically processed by the RISP system. The number of automatic catalogs is 1.98 times that of manual ones, and the matching rate is 97.43%. Compared with the manual catalogs, the 71.05% of origin time differences are less than  $\pm 1.0$  s, the 96.31% of epicentral differences are less than 10 km, and the 99.47% of magnitude differences are less than  $\pm 0.3$ . Based on the distribution characteristics of the earthquake sequence detected by RISP and the focal mechanism solution, the seismogenic fault of this earthquake is considered to be an undiscovered branch fault on the northeast side of the Wudaoliang—Changsha Gongma fault.

**Conclusions:** This study shows that the application of the RISP system can improve the seismic detection capabilities in sparse areas of the seismic network, and it can quickly produce a catalog of earthquake sequences, which is of great significance for major earthquake emergency response, post-earthquake trend determination, and seismogenic structure research.

**Keywords:** automatic processing; deep learning; earthquake detection; Shiqu earthquake

**Acknowledgements:** This study is supported by the National Key Research and Development Program (No. 2018YFC1504501-02) and the Earthquake Science and Technology Spark Program of China Earthquake Administration (Nos. XH20029, XH21027)

**First author:** LIU Yuan, female, born in 1993, assistant engineer, majoring in seismic analysis; Email: ly\_dqwl@163.com

**Correspondence author:** LIAO Shirong, male, born in 1977, professor senior engineer, majoring in seismic data automatic processing research; Email: liaoshirong@fjea.gov.cn

**Manuscript** received on: 2022-01-30; Accepted on: 2022-04-19; Network published on: 2022-05-20

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2022.05.021

**Edited by:** LIU Zhiqiang

