

张燕明,张红才,陈惠芳,等.实时智能地震处理系统在2013年福建仙游 $M_L5.0$ 地震序列中的应用研究[J].华南地震,2023,43(4):64-74.
[ZHANG Yanming, ZHANG Hongcai, CHEN Huifang, et al. Application of Real-time Intelligent Seismic Processor in Xianyou $M_L5.0$ Earthquake Sequence in Fujian Province in 2013 [J]. South China journal of seismology, 2023,43(4):64-74]

实时智能地震处理系统在2013年福建仙游 $M_L5.0$ 地震序列中的应用研究

张燕明¹, 张红才^{1, 2}, 陈惠芳¹, 廖诗荣¹

(1.福建省地震局,福州 350003; 2.中国地震局厦门海洋地震研究所,福建 厦门 361000)

摘要:文中将实时智能地震处理系统(RISP)应用于福建仙游地震序列,处理了2013年8月至12月福建台网的连续波形数据。自动处理结果与人工编目结果进行了深入对比,全面评估了RISP系统对该地震序列的自动处理能力。RISP系统共产出615个地震,与人工编目匹配事件462个,对于 $M_L \geq 1.0$ 的地震,匹配率达到96.4%;漏检测事件282个,其中 $M_L < 1.0$ 占比为94.7%;多检测事件162个,均为仙游序列地震事件。匹配事件地震参数统计结果表明:发震时刻偏差 ≤ 1 s占比99.13%;震中位置偏差 < 5 km占比98.69%;震源深度偏差在5km内占比91.5%;震级偏差 ≤ 0.5 占比89.54%。通过该实例测试表明:现有观测条件下,利用RISP系统可以快速产出仙游地区 $M_L \geq 1.0$ 地震序列目录,地震目录完备性高,RISP系统产出地震参数精度与人工处理结果相当,可应用于大震应急、震后趋势判定等工作。

关键词:福建仙游地震;自动编目;RISP;深度学习

中图分类号: P315.78

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)04-0064-11

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.04.09

Application of Real-time Intelligent Seismic Processor in Xianyou $M_L5.0$ Earthquake Sequence in Fujian Province in 2013

ZHANG Yanming¹, ZHANG Hongcai^{1, 2}, CHEN Huifang¹, LIAO Shirong¹

(1. Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China; 2. Institute of Xiamen Marine Seismology, Xiamen 361000, China)

Abstract: In this paper, the Real-time Intelligent Seismic Processor (RISP), an artificial intelligence (AI) based processing system was applied to the Xianyou earthquake sequence in Fujian to process the continuous waveform data of the Fujian network from August to December 2013. The automatic results were compared with the manual seismic catalogs to evaluate the processing capacities of the RISP system. During the period, a total of 615 earthquakes were processed by the system, fewer than the number of manual results. Among the automatic results, 462 events were matched with manual results, the matching rate reached 96.4% for events with $M_L \geq 1.0$; 282

收稿日期: 2023-05-10

基金项目: 地震科技星火计划(XH21026Y)

作者简介: 张燕明(1993-),女,硕士,工程师,主要从事测震分析与地震自动编目方面工作。

Email: 674257016@qq.com

通信作者: 廖诗荣(1977-),男,正高级工程师,主要从事地震数据实时处理算法研究与软件系统研发。

E-mail: liaoshirong@fjea.gov.cn

events were missed and 94.7% of them with $M_L < 1.0$; 162 more events were detected, which were all belonged to Xianyou earthquake sequence. The statistical results of the source parameters showed that the proportion of data with the earthquake origin time deviation less than 1.0 s was 99.13%; the proportion of data with epicenter position deviation less than 5 km was 98.69%; the proportion of data with a depth deviation of the focal point less than 5 km was 91.5%; the proportion of data with a magnitude deviation less than 0.5 was 89.54%. This result shows that under the existing observation conditions, the RISP system can quickly produce catalogs of earthquake sequences with $M_L \geq 1.0$, and the completeness of the earthquake catalogue is high. The accuracy of seismic parameters produced by RISP system is equivalent to that of manual processing, which can be applied to emergency response of large earthquake and post-earthquake trend determination

Keywords: Xianyou earthquake sequence in Fujian; Automatic cataloging; RISP; Deep learning

0 引言

随着我国地震监测预警台网的建设,区域地震监测能力显著提升。以福建地区为例,目前可用于地震编目的台站总数已超过1100个,全省大部分区域监测震级下限已达到 $M_L 1.0$ 左右,随之而来的是人工地震编目的工作量成倍增加,传统以人工分析为主的地震事件编目产出模式已越来越难以维系。为此,应用自动化智能地震处理系统辅助于日常编目工作,将有效提升中强地震发生后地震目录产出的完备性和时效性。

为了提高地震事件目录的完备性,国际上很多学者也已研发了多种自动化处理算法或软件。在台站分布确定情况下,将区域已知地震事件波形作为模板,同连续观测波形数据进行互相关是一种检测微地震的有效方法,即模板匹配(或匹配滤波)技术(matching filter technique, MFT)^[1]。模板匹配技术因为其对微弱信号的强大检测能力,已被广泛应用于慢地震识别^[2]、动态触发地震识别^[3]、微地震识别建立完整地震目录^[4]及余震和前震识别^[5]等地震学研究中。为了克服模板匹配滤波计算量巨大的不足, Yoon等^[6]提出了指纹相似性搜索(Fingerprint and Similarity Threshold, FAST)算法。该算法根据事件波形的不同特征生成地震指纹,进行局部敏感哈希搜索,将相似波形分类到相同的哈希表中,进而实现对地震的检测。近年来,随着机器学习与大数据挖掘技术的快速发展,多种基于深度学习的地震震相自动拾取算法也相继提出,如GPD(Generalized Seismic Phase Detection)^[7]、PhaseNet^[8]、基于CNN的地震波形自动分类与识别^[9]、EQTransformer^[10]、USTC-picker^[11]等,这些算法也极大地提升了震相拾取的能力。在地震目录自动产出流程化方面,Zhang等^[12]提出了一种“端到端”式地震目录自动检测流

程LOC-Flow,实现了从原始记录波形的输入到地震目录产出的完整处理链条。与之类似,Zhu等^[13]提出了一种基于云计算的可扩展深度学习地震监测系统QuakeFlow,该系统中集成了数据降噪、震相拾取、震相关联及定位等多个基于机器学习的算法模块,实现了地震目录的自动产出。廖诗荣等^[14]研发完成了一套实时智能地震处理系统(Real-time Intelligent Seismic Processor, RISP),并逐步实现了日常业务化运行。该系统结合我国台网实际,整合了PhaseNet和EQTransformer两种AI震相拾取算法,发展了基于组触发^[15]和等时差八叉树搜索^[16]的震相关联与地震定位算法,实现地震震级的准实时量算,并在2021年云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震^[14]、2022年青海门源 $M_s 6.9$ 地震^[17]、2022年四川马尔康 $M_s 6.0$ 地震^[18]的处理中均实时产出高质量的自动地震序列目录。

为全面分析RISP系统对仙游地震序列的处理能力,我们采用RISP离线处理模块对2013年9月4日福建仙游 $M_L 5.0$ 主震前后5个月的连续波形记录进行了处理,并与人工编目结果进行对比,分析RISP系统在定位精度、震相拾取精度、震级量取精度等方面的表现。并结合RISP系统漏检测、多检测事件及处理结果中与人工地震定位、量取震级偏差较大的事件进行深入分析。

1 数据和方法

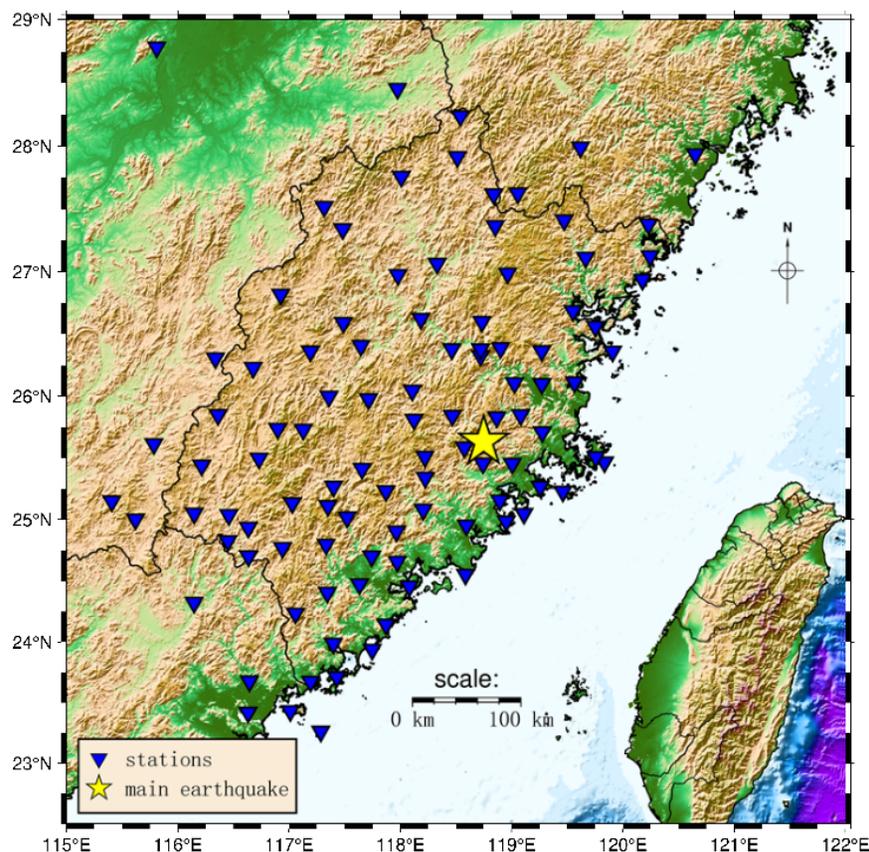
本文收集处理了福建台网2013年8月1日至2013年12月31日共5个月的连续波形数据,台站总数为113个(图1)。仙游地震序列发生于金钟水库及周边较小区域内($25.58^\circ \sim 25.70^\circ \text{N}$, $118.66^\circ \sim 118.83^\circ \text{E}$),震中区台站分布条件较好,主震震中最大孔隙角 41.2° ,次大孔隙角 66.8° ,最近台震中距18 km,次近台震中距32 km。在此时间段内,福建台网人工产出可多台定位的仙游地震序列目

录共745条,其中 M_L 5.0地震1次、 M_L 4.0~4.9地震3次、 M_L 3.0~3.9地震9次、 M_L 2.0~2.9地震23次、 M_L 1.0~1.9地震129次、 M_L <1.0地震571次。 M_L <1.0的微震占比达76.6%,这些事件的震级接近福建台网的监测震级下限,信噪比普遍较低,大多数地震记录台站低于5个,清晰震相数少于5个,绝大部分事件不会在JOPENS系统中生成自动触发事件,因此大都通过人工浏览连续波形将这些微小震逐一检出并进行分析。此外,仙游地震序列中还有一定数量的重叠事件(约占18.4%),这些事件即使人工识别也难度较大,人工编目产出结果的精确度也不高。此外,在主震事件发生前后24 h内共发生111次地震,编目人员须在规定时间内产出较为完整的快报目录,工作量陡增,人工目录极易发生遗漏地震的情况。

本文采用RISP系统的离线工作模式对5个月的连续波形数据进行处理,涉及的三个数据处理模块分别为:①AI震相拾取模块,分别利用PhaseNet和EQTransformer两种神经网络进行震相到实时检测;②震相关联和地震定位模块,采用基于组触发和等时差二叉树搜索相结合的方法

法进行震相关联,再利用NLLoc定位程序^[14]进行地震定位;③震级自动量算模块,按照我国现行的震级国家标准(GB17740-2017)的规定,在仿真DD-1位移记录上自动量取S波列的最大振幅,并计算震级。

本文设置RISP系统事件触发震相数阈值为5,即关联成功的P与S震相个数之和达到5个时则产生一个地震事件。人工目录与自动目录匹配条件为:若自动地震目录中某一事件与人工目录中的事件发震时刻偏差小于3 s且震中位置偏差小于15 km则定义二者为匹配事件对;若某一事件与多个事件匹配,则根据二者发震时刻选取偏差最小结果为匹配事件对。以人工目录为基准,对于某一事件,若自动目录中没有事件与之匹配,则认为其为漏检测事件;反之,以自动目录为基准,对于某一事件,如果人工目录中没有事件与之相匹配,则认为其为多检测事件。对于多检测事件,本文通过人机交互软件接口写入MSDP人机交互地震分析软件^[19],并进行人工校核检查其是否为误检测事件。



蓝色三角为地震台站,黄色五角星为 M_L 5.0仙游主震震中

图1 台站分布图

Fig.1 Distribution map of seismic stations

2 处理结果

应用RISP系统对5个月的连续波形进行离线处理,共产出615条仙游序列地震目录(以下简称自动目录),而同期福建台网人工编目仙游序列地

震目录(以下简称人工目录)745条。图2为福建仙游地震序列人工与自动编目震源分布图,自动目录与人工目录震中分布基本一致,自动目录震源深度集中分布区间为7~15 km,而人工目录的事件深度大多集中于5~10 km。

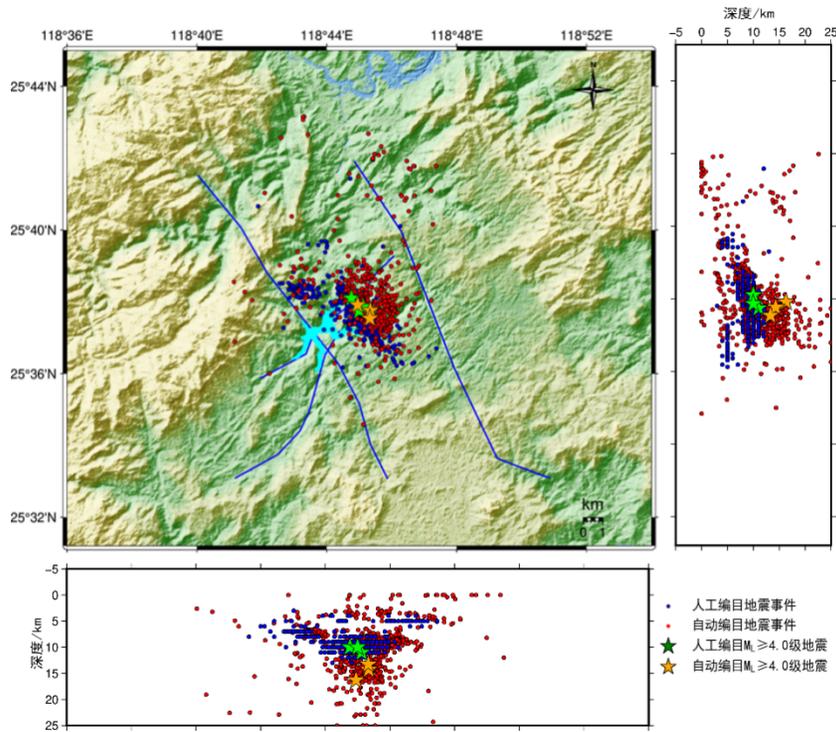


图2 仙游地震序列人工与自动编目震源分布图

Fig.2 Source location distribution map of manual catalog and automatic catalog of the Xianyou earthquake sequence

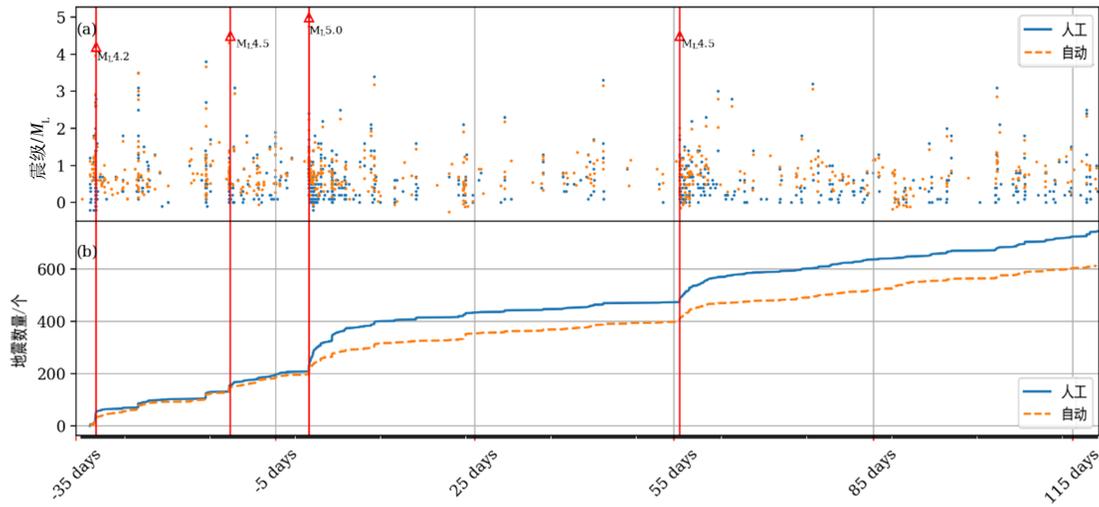
图3为自动目录与人工目录的震级—时间分布图及地震累积数量变化图,由图3(a)可见,在仙游 $M_L5.0$ 主震发生前,库区地震活动性持续增强,期间发生的最大地震为8月23日05时02分 $M_L4.5$ 地震。在主震发生当天,人工目录与自动目录均产出了大量地震事件,之后随时间推移数量逐渐减少。主震发生后55天,2013年10月30日01时50分发生 $M_L4.5$ 强余震,该事件为仙游序列震级最大余震。图3(b)为人工目录与自动目录的地震累积数量变化图,如图所示,仙游 $M_L5.0$ 主震发生后,人工编目人员针对该地区的地震分析变得更为细致,因此人工目录中事件数量略多于自动目录,多出的人工目录主要为主震发生前后一天时间内所产出的大量 $M_L<1.0$ 地震,如图4所示,这些微小地震中有较大比例事件(共251个,约占 $M_L<1.0$ 的地震总数的44%)清晰震相数不足5个,波形信噪比较低,自动编目系统对于此类事件的处

理能力不足。

图5为仙游地震序列人工目录与自动目录不同震级段地震数量对比。可见,在 $0.7 \leq M_L \leq 1.7$ 范围内,自动目录的事件数量要明显多于人工目录事件数量;对于 $M_L < 0.7$ 的地震,人工目录事件数量则多于自动目录事件数量;自动目录漏检测事件的平均震级为 $M_L0.3$,多检测事件的平均震级为 $M_L0.7$ 。经人工逐一核实,RISP系统多检测事件均包含地震信号,无误触发事件,全部为属于仙游序列的天然地震,均为人工漏编报事件。

3 定量分析

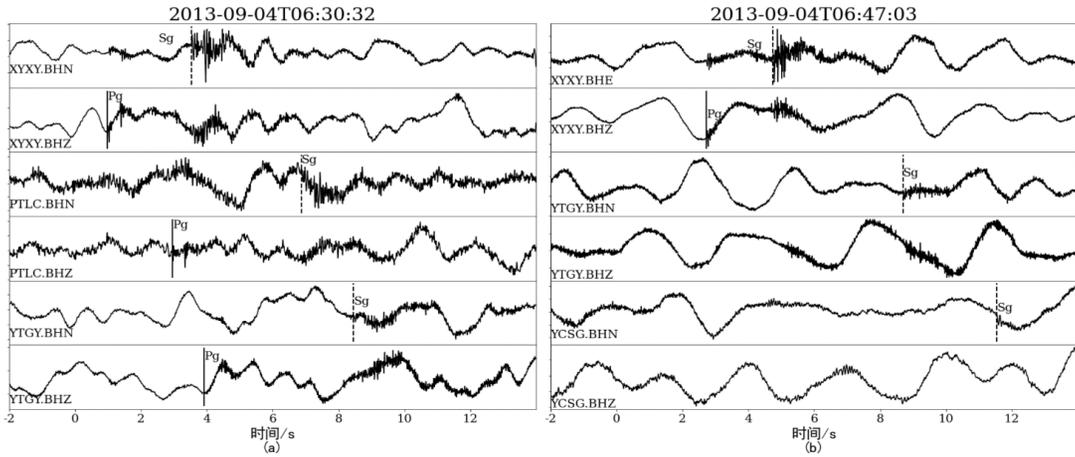
为全面分析RISP系统对仙游地震序列的处理能力,本文对匹配事件的精准率进行了详细分析,还对系统漏检测、多检测事件及处理结果中与人工地震定位、量取震级偏差较大的事件进行深入分析。



蓝色圆点与蓝色折线代表人工目录地震事件,黄色圆点与黄色折线代表自动目录地震事件
 (a)自动目录与人工目录的震级—时间分布图;(b)自动目录与人工目录地震累积数量变化图

图3 仙游地震序列自动目录与人工目录的震级—时间分布图及地震累积数量变化图

Fig.3 $M-T$ map distribution map and earthquake cumulative number map of automatic catalog and manual catalog of Xianyou earthquake sequence



实线为人工目录P震相位置,虚线为人工目录S震相位置

(a)2013-09-04T06:30:32 M_L 0.4地震;(b)2013-09-04T06:47:03 M_L 0地震

图4 人工检测出的 $M_L < 1.0$ 地震事件波形记录

Fig.4 Waveforms of earthquakes with $M_L < 1.0$ which are manually detected

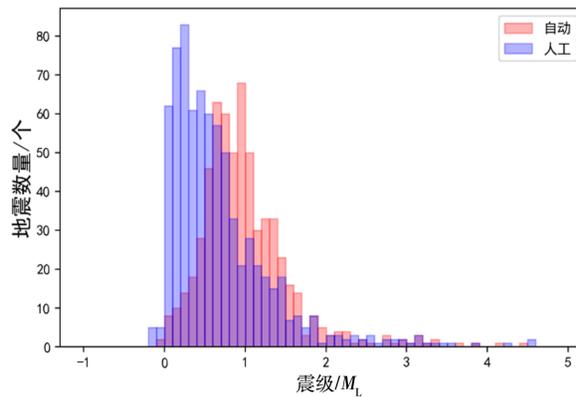


图5 福建仙游 M_L 5.0地震序列人工与自动目录不同震级段地震数量对比

Fig.5 Comparison of the number of earthquakes with different magnitudes in manual catalogue and automatic catalogue of the Xianyou M_L 5.0 earthquake sequence in Fujian

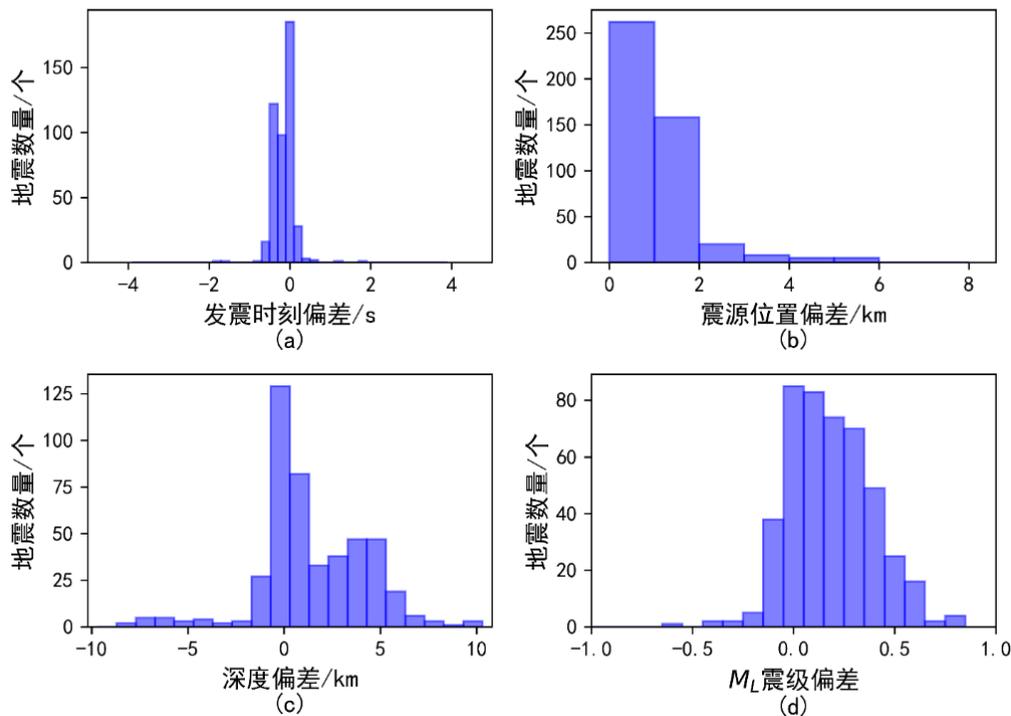
3.1 匹配事件精准率分析

自动目录与人工目录匹配成功事件462个,其中 $M_L \geq 2.0$ 以上地震事件匹配率为100%, $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震事件匹配率为94.57%, $M_L < 1.0$ 地震事件匹配率为53.4%。图6分别为自动目录与人工目录匹配事件的发震时刻,震源位置,震源深度和震级偏差的统计图,其中发震时刻偏差不超过1s的地震有455个,占比99.13%;震源位置偏差小于5km的地震有453个,占比98.69%;震源深度偏差在5km内的地震有420个,占比91.5%;震级偏差不超过0.5的地震有411个,占比89.54%。

通过对匹配成功的462个事件的分析可见(图6),RISP系统产出事件的发震时刻与震中位置偏差均在合理范围内。震源深度的偏差较大,震源深度偏差在5~10km范围内的事件共39个,无深度偏差大于10km的事件。造成深度偏差的原因为仙游地震序列中有较大比例事件清晰震相数不足5个,这些事件无法提供可靠的震源深度,因此人工

编目大多采用人工设定的固定深度,如5km、10km;而自动目录的事件震源深度分布在0~20km之间,集中分布区间为7~15km。已有研究显示,仙游地震序列的震源深度主要分布于7~17km^[20],排除因拾取震相数较少无法有效约束震源深度的部分事件外,整体而言,自动目录震源深度分布较人工目录更为合理。

从震级偏差统计图(图6d)可以看出,自动目录震级比人工目录震级偏大的地震比例较高,其主要原因为:主震发生后,为尽可能在短时间内产出较为完备的余震目录,对于可多台定位但震相不清晰且 $M_L < 1.0$ 的事件,人工分析时只量算最近台的单台震级,而RISP系统则会自动量算所有参与定位台站,包括一些较远台站的单台震级。根据蔡杏辉等^[21]针对福建台站单台震级偏差的研究,震中距小于50km的台站,单台震级普遍偏小,而震中距大于100km的台站,单台震级会偏大。如果人工仅采用震中距小于50km的单台震级来计算事件震级,会造成 $M_L < 1.0$ 匹配目录震级偏差较大。



(a)发震时刻;(b)震源位置;(c)震源深度;(d)震级偏差统计

图6 地震参数偏差统计图

Fig.6 Deviation statistics of earthquake parameters of matching events between manual catalog and automatic matched catalog

$M_L \geq 1.0$ 人工目录与自动目录匹配事件的震级偏差基本呈正态分布(图7),震级偏差超过0.5的事件有1个,为8月3日03时00分01秒 $M_L 1.0$ 级地震,如图8所示,人工目录在量算这个地震事件时

所使用的清晰台站数少于自动目录,RISP系统除了使用与人工目录相同的台站外,还量算了其它几个较远台的单台震级,最远台站震中距约80km,因此本文认为自动目录产出的事件震级更为合理。

图9为人工目录与自动目录匹配事件的Pg震相与Sg震相到时偏差,自动目录中共5531个Pg震相和6057个Sg震相与人工目录相匹配,匹配率分别为78.3%和65.9%。统计结果呈正态分布,且峰

值均为0.0s, Pg震相到时误差在0.1s和0.5s以内占比分别为78.92%和94.18%; Sg震相到时误差在0.1s和0.5s以内占比分别为73.02%和92.12%。

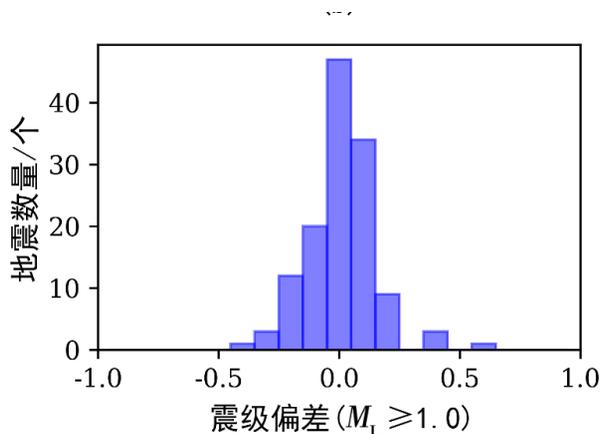
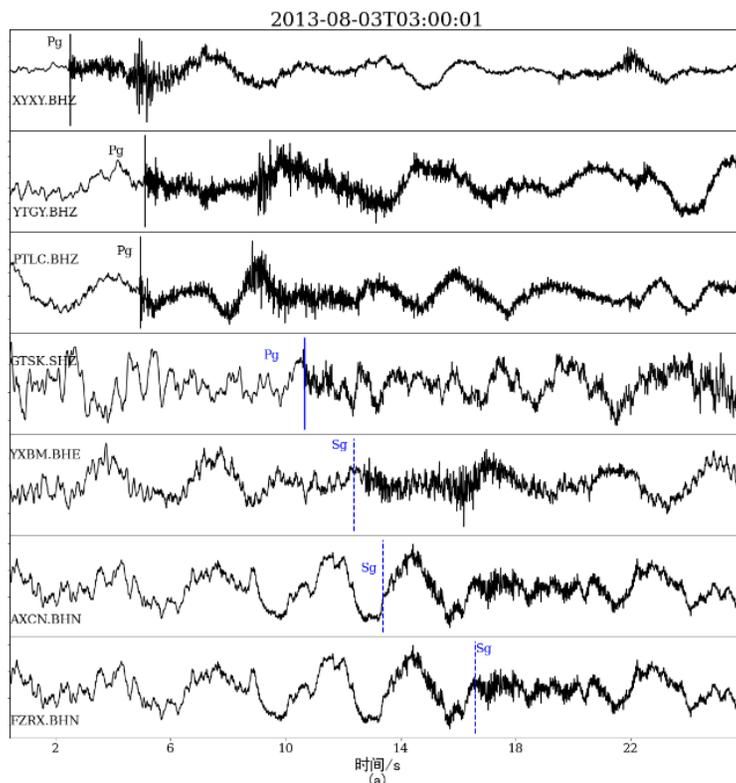


图7 人工目录 $M_L \geq 1.0$ 事件的震级偏差统计图

Fig.7 Magnitude deviation statistics of matching events with $M_L \geq 1.0$ between manual catalog and automatic catalog



黑色标注为人工目录震相位置,蓝色标注为自动目录多拾取震相位置

图8 震级偏差大于0.5地震事件波形图

Fig.8 Waveforms of earthquakes with magnitude deviation larger than 0.5

3.2 漏检测事件分析

RISP系统漏检测事件共282个,均为 $M_L < 2.0$ 地震事件,其中 $1.0 \leq M_L < 2.0$ 事件7个,占比为

2.5%; $M_L < 1.0$ 事件269个,占比为94.7%。对于 $M_L < 1.0$ 事件,人工目录所用台站数较少,有些台站波形信噪比较低,震相不清晰,导致RISP系统难以识别,从而无法满足事件关联所需最少震相数为5

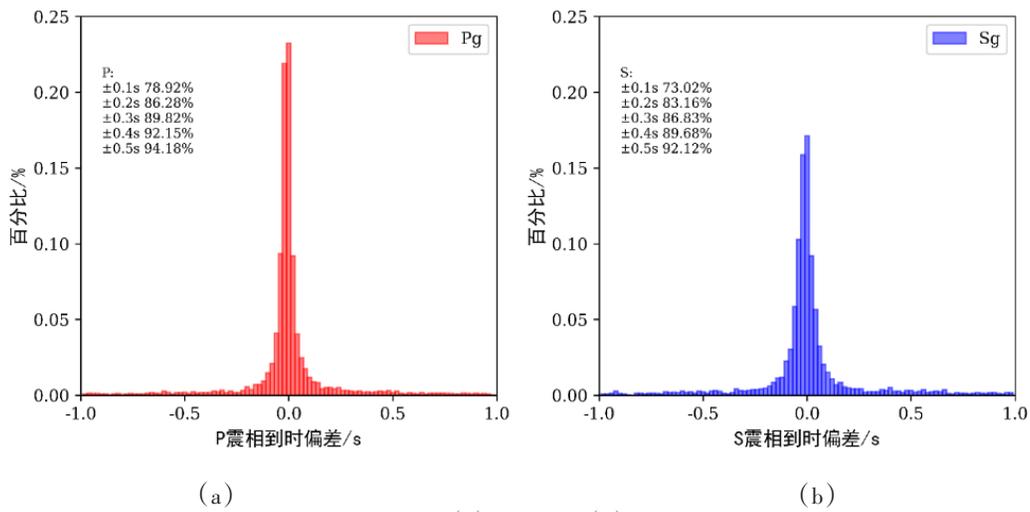
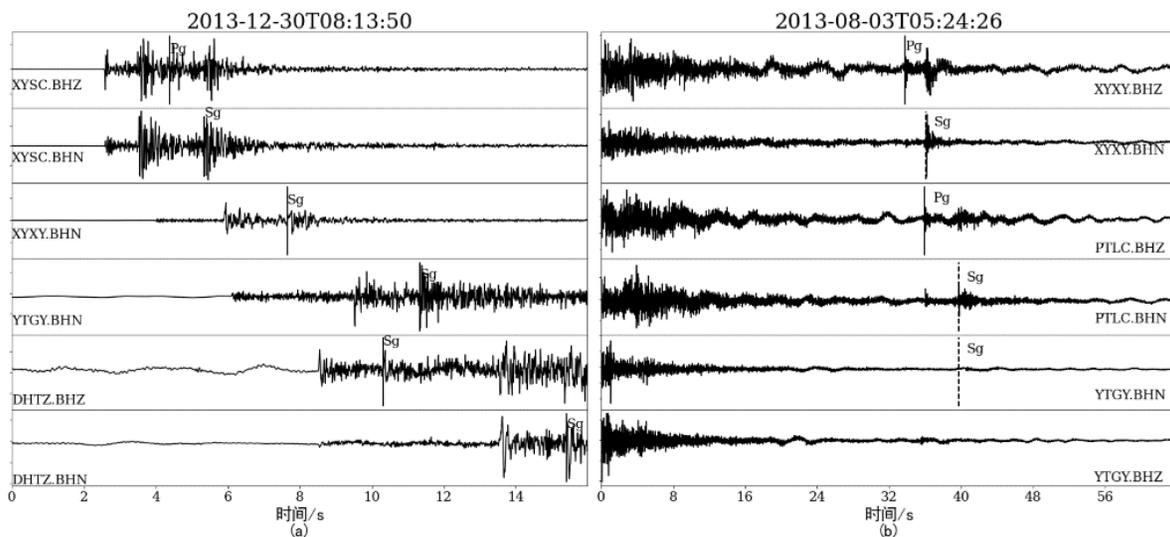


图9 Pg震相(a)与Sg震相(b)到时偏差
 Fig.9 The arrival time deviation of Pg phase(a)and Sg phase(b)of manual catalog and automatic catalog of the aftershocks sequences

个的条件。本文研究认为，对于此类清晰震相数较少的事件，可以考虑采用FAST等针对微小震的事件检测算法来提高RISP对此类事件的处理能力。

自动目录漏检测 $M_L \geq 1.0$ 事件有7个，原因均为RISP系统在处理重叠事件或密集事件时出现错误。仙游地震序列中存在一定比例的重叠事件(约占18.4%)，RISP系统在处理重叠事件时，可能会出现震相到时拾取偏差增大，或者震相类型识别错误的情况，导致定位结果偏差较大，无法与人工目录匹配成功，以12月30日8时13分 M_L 1.3地震

(图10(a))为例，就是系统误将前一个地震的Sg震相识别为后一个地震的Pg震相，导致该事件无法与人工目录匹配。对于较大地震发生后的密集地震事件，RISP系统往往会漏分析后续的事件，以8月3日5时24分 M_L 1.4地震(图10(b))为例，在该事件发生前50s另一个 M_L 2.8地震发生，而该事件初至波形被湮没于前一个地震的尾波中，人工目录产出时也只分析了最近的3个台站，使用5个震相进行地震定位，清晰震相仅为3个，导致RISP系统震相关联失败。



实线为人工目录P震相位置,虚线为人工目录S震相位置
 (a)2013-12-30T08:13:50 M_L 1.3地震;(b)2013-08-03T05:24:26 M_L 1.4地震

图10 漏检测地震事件波形图
 Fig.10 Waveforms of earthquakes which are undetected by RISP system

表1 系统多检测震级 $M_L > 1.0$ 地震事件Table 1 Earthquakes with $M_L > 1.0$ which were undetected by manual catalog

序号	自动目录事件发震时刻/ 年-月-日 h:min:s	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	震级/ M_L	识别震相数 (P&S)	事件类型
1	2013-08-02 14:49:37.709	25.627	118.749	11	1.2	30	天然地震
2	2013-08-02 15:22:22.091	25.629	118.751	9	1.1	16	天然地震
3	2013-08-04 11:04:02.792	25.676	118.766	16	1.2	42	天然地震
4	2013-08-07 11:33:54.894	25.676	118.772	14	1.1	27	天然地震
5	2013-08-09 02:17:33.936	25.634	118.742	17	1.1	53	天然地震
6	2013-08-17 11:56:40.834	25.626	118.751	14	1.6	85	天然地震
7	2013-08-17 11:59:27.047	25.627	118.751	14	1.3	68	天然地震
8	2013-08-19 17:36:49.443	25.625	118.754	10	2.2	15	天然地震
9	2013-08-20 18:13:42.486	25.627	118.75	14	1.3	52	天然地震
10	2013-08-21 17:43:34.681	25.674	118.772	15	1.8	56	天然地震
11	2013-08-27 11:54:20.483	25.619	118.757	14	1.1	46	天然地震
12	2013-08-27 16:39:14.661	25.628	118.757	14	1.1	46	天然地震
13	2013-09-03 13:51:24.392	25.602	118.758	21	1.3	12	天然地震
14	2013-09-09 17:48:23.786	25.674	118.773	15	1.1	33	天然地震
15	2013-09-18 16:16:09.513	25.68	118.79	1	1.3	23	天然地震
16	2013-09-25 18:11:11.960	25.609	118.763	14	1.2	12	天然地震
17	2013-09-27 11:40:31.227	25.622	118.76	11	1.2	40	天然地震
18	2013-09-27 16:45:14.657	25.677	118.778	13	1.4	44	天然地震
19	2013-10-04 17:46:43.330	25.673	118.773	16	1.3	28	天然地震
20	2013-10-14 15:51:06.386	25.677	118.774	15	1.5	37	天然地震
21	2013-10-17 15:51:07.747	25.673	118.75	16	1.3	23	天然地震
22	2013-10-22 17:10:34.117	25.681	118.747	4	1.3	29	天然地震
23	2013-10-26 16:36:49.321	25.679	118.775	14	1.1	18	天然地震
24	2013-10-29 14:23:34.856	25.681	118.756	13	1.3	42	天然地震
25	2013-10-31 14:27:01.001	25.688	118.769	0	1.3	25	天然地震
26	2013-11-03 00:54:24.250	25.646	118.756	8	1.2	16	天然地震
27	2013-11-12 17:28:46.076	25.62	118.757	14	1.4	40	天然地震
28	2013-11-16 20:03:56.442	25.636	118.744	16	1.1	44	天然地震
29	2013-11-18 19:46:42.146	25.618	118.758	13	1.1	22	天然地震
30	2013-11-18 19:47:00.917	25.618	118.757	14	1.3	40	天然地震
31	2013-11-19 11:35:19.936	25.682	118.754	14	1.4	35	天然地震
32	2013-11-20 11:57:15.293	25.674	118.766	16	1.3	32	天然地震
33	2013-11-21 04:28:45.244	25.617	118.76	14	1.1	37	天然地震
34	2013-11-28 10:07:59.258	25.681	118.753	15	1.3	19	天然地震
35	2013-11-28 11:07:51.820	25.678	118.752	14	1.3	39	天然地震
36	2013-11-29 14:54:38.390	25.675	118.778	14	1.1	19	天然地震
37	2013-12-16 19:03:41.044	25.646	118.746	9	1.3	14	天然地震
38	2013-12-16 19:10:02.416	25.635	118.738	13	1.3	23	天然地震
39	2013-12-16 19:24:05.689	25.648	118.755	8	1.2	12	天然地震
40	2013-12-16 19:25:14.456	25.634	118.743	14	1.5	44	天然地震

(转下表)

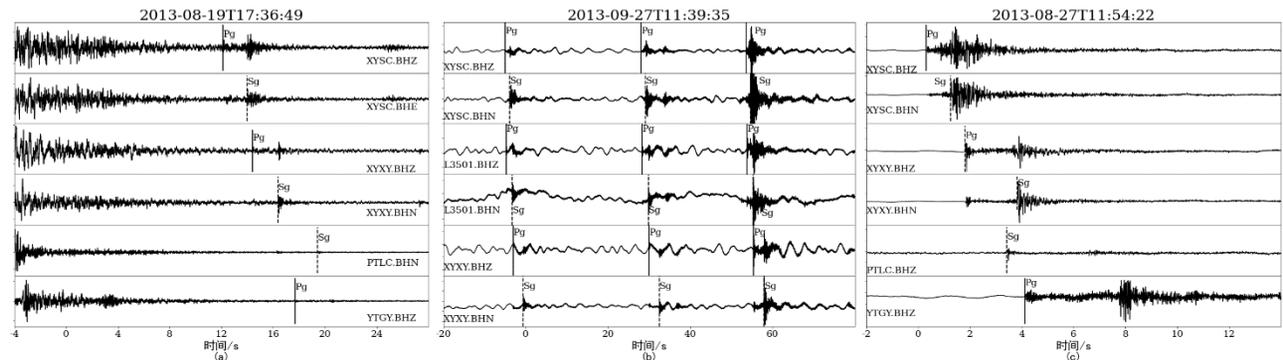
(接表1)

序号	自动目录事件发震时刻/ 年-月-日 h:min:s	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	震级/ M_L	识别震相数 (P&S)	事件类型
41	2013-12-22 18:38:12.487	25.614	118.76	13	1.3	36	天然地震
42	2013-12-28 10:32:56.997	25.684	118.773	11	1.1	10	天然地震
43	2013-12-29 13:45:34.648	25.675	118.742	8	1.3	32	天然地震

3.3 多检测事件分析

相较于人工目录，RISP系统多检测事件162个，本文通过人机交互方式对多检测事件逐一进行分析，确认162个多检测事件均为人工漏分析的仙游地震事件。多检测事件的震级主要分布于 M_L 0.7~1.7之间(图5)，其中多检测事件的最小震级为 M_L 0.2，最大震级为 M_L 2.2。多检测事件中，震级大于 M_L 1.0的事件有43个，全部为仙游序列地震事件，触发台站数均大于5个且震相清晰，详见表1。人工漏分析的最大地震事件为8月19日17时36

分49秒 M_L 2.2地震，该事件前29s发生了 M_L 3.8地震，致使后续事件震相信噪比降低，人工拾取难度较大(图11a)。通常情况下，密集余震序列往往伴随主震在较短时间内发生，由于人工编目产出的时效性要求，现有工作模式下人工分析会优先处理JOPENS编目管理中已自动触发的事件，或者人工从连续波形中检出的较大的地震事件来产出快报目录，可能会出现一定数量的漏分析事件，如图11(b)为3个连续的RISP系统多检测事件，人工优先分析了其后6min的 M_L 2.1地震事件，未能及时返回检拾这3个事件，造成漏分析。



实线为自动目录P震相位置,虚线为自动目录S震相位置

(a) 2013-08-19T17:36:49 M_L 3.8地震;(b) 2013-09-27T11:39:35 M_L 0.6、0.5、0.7地震;(c) 2013-08-27T11:54:22 M_L 1.0地震

图11 多检测地震事件波形图

Fig.11 Waveforms of earthquakes undetected by manual catalog

除此之外，还有一些漏分析事件则是编目人员在日常浏览波形记录时未检出的事件，这些事件的震级甚至超过 M_L 1.0且多台震相清晰(图11c)。

4 结论

本文以福建仙游地震序列为研究对象，通过RISP系统离线处理功能，处理了2013年9月4日 M_L 5.0主震前后5个月的连续波形数据，并通过将自动处理结果与人工编目结果进行深入对比，全面评估了RISP系统对该地震序列的自动处理能力。

RISP系统共产出615个地震，与人工编目匹配

事件462个，对于 $M_L \geq 1.0$ 的地震，匹配率达到96.4%。系统漏检测事件282个，其中 $M_L > 1.0$ 的地震有7个，原因均为系统在处理重叠事件时出现震相类型识别错误以及震相到时拾取偏差较大，从而导致定位结果出现偏差，无法与人工目录匹配成功。系统多检测事件162个，全部为仙游序列地震事件，其中 $M_L > 1.0$ 的地震有43个。匹配事件地震参数统计结果表明，发震时刻偏差不超过1s占比99.13%；震中位置偏差小于5km占比98.69%；震源深度偏差5km内占比91.5%；震级偏差不超过0.5级占比89.54%。本文研究结果表明，利用RISP系统可以快速产出仙游地区 $M_L \geq 1.0$ 地震序列目录，

地震目录完备性高,地震参数精度与人工处理结果相当,可应用于大震应急、震后趋势判定等工作,但系统对于重叠事件的处理能力仍待改进,建议自动编目系统能够尽快与人工协同工作,互相查漏补缺,则可明显提升地震目录的完整性。

致谢:福建省地震局提供连续波形数据与人工编目处理结果数据,广东省地震局蒋策博士提供部分数据统计与绘图程序,审稿专家给出宝贵的修改意见,在此一并感谢。

参考文献

- [1] Gibbons S J, Ringdal F. The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation [J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 165 (1): 149-166.
- [2] Shelly D R, Beroza G C, Ide S. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms[J]. *Nature*, 2007, 446 (7133): 305-307.
- [3] Han L, Peng Z, Johnson C W, et al. Shallow microearthquakes near Chongqing, China triggered by the Rayleigh waves of the 2015 $M_{7.8}$ Gorkha, Nepal earthquake[J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 2017(497): 231-240.
- [4] Ross Z E, Trugman D T, Hauksson E, et al. Searching for hidden earthquakes in Southern California[J]. *Science*, 2019, 364(6442): 767-771.
- [5] Peng Z, Zhao P. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake[J]. *Nature Geoscience*, 2009(2): 877-881.
- [6] Yoon C E, O'Reilly O, Bergen K J, et al. Earthquake detection through computationally efficient similarity search[J]. *Science Advances*, 2015, 1(11): e1501057. DOI: 10.1126/sciadv.1501057
- [7] E. Ross Z, Meier M A, Hauksson E, et al. Generalized Seismic Phase Detection with Deep Learning[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2018, 108 (5A): 2894-2901.
- [8] Zhu W Q, Beroza G C. PhaseNet: A deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method[J/OL]. *Geophysical Journal International*, 2018[2023-05-20]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:4957653>
- [9] 赵明,陈石, Dave Yuen. 基于深度学习卷积神经网络的地震波形自动分类与识别[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(01): 374-382.
- [10] Mousavi S M, Ellsworth W L, Zhu W Q, et al. Earthquake transformer —an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking[J/OL]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 39521[2023-05-20]. https://www.researchgate.net/publication/343503437_Earthquake_transformer—an_attentive_deep-learning_model_for_simultaneous_earthquake_detection_and_phase_picking.
- [11] Zhu J, Li Z, Fang L. USTC-Pickers: a unified Set of seismic phase pickers transfer learned for China[J]. *Earthquake Science*, 2023, 36(02): 95-112.
- [12] Zhang M, Liu M, Feng T, et al. LOC-FLOW: an end-to-end machine learning-based high-precision earthquake location workflow[J/OL]. *Seismological Research Letters*, 2022 [2023-05-20]. https://www.researchgate.net/publication/359116402_LOC-FLOW_An_End-to-End_Machine_Learning-Based_High-Precision_Earthquake_Location_Workflow
- [13] Zhu W Q, Hou A B, Yang R, et al. QuakeFlow: a scalable machine-learning-based earthquake monitoring workflow with cloud computing[J/OL]. *Geophysical Journal International*, 2022[2023-05-20]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:251953419>
- [14] 廖诗荣,张红才,范莉苹,等. 实时智能地震处理系统研发及其在2021年云南漾濞 $M_{6.4}$ 地震中的应用[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(10): 3632-3645.
- [15] Tamaribuchi K. Evaluation of automatic hypocenter determination in the JMA unified catalog[J/OL]. *Earth, planets & space*, 2018 (70): 141[2023-05-20]. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0915-4>
- [16] Lomax A, Michelini A, Curtis A. Earthquake location, direct, global-search methods[C]//*Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. New York: Springer, 2009.
- [17] 王祖东,杨晓鹏,尹欣欣,等. 2022年1月8日青海门源 $M_{6.9}$ 地震余震序列自动处理结果探讨[J]. *地震工程学报*, 2022, 44(2): 408-414
- [18] 颜利君,刘媛,廖诗荣,等. 2022年6月10日四川马尔康地震序列实时智能检测结果分析与研究[J]. *地震工程学报*, 2022, 44(6): 1450-1458.
- [19] 苏柱金,黄文辉. MSDP软件震相自动识别技术实现[J]. *地震地磁观测与研究*, 2015, 36(05): 121-127.
- [20] 秦双龙,李强,邱毅,等. 福建仙游震群重定位及序列特征分析[J]. *地震地磁观测与研究*, 2015, 36(3): 67-71.
- [21] 蔡杏辉,段刚,黄其昌. 福建数字遥测台网单台震级偏差研究[J]. *福建地震*, 2006(Z2): 56-60.