

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231129005

RISP系统在2018年台湾海峡 $M_s6.2$ 地震序列中的应用研究*

张燕明, 廖诗荣, 陈惠芳, 胡淑芳

(福建省地震局, 福建 福州 350003)

摘要: 为评估实时智能地震处理系统(RISP)对台网条件较差海域地震序列的处理能力, 离线处理了2018年11月26日台湾海峡 $M_s6.2$ 地震前后21天的连续波形数据, 对比分析了自动处理结果与人工编目结果, 定量评估了系统产出自动地震目录的完备性以及震源位置、震级大小、震相到时等信息的可靠性。系统共产出407条台湾海峡地震目录, 与人工多台目录匹配93条, 匹配率为100%; 与人工单台目录匹配200条, 匹配率为93.9%; 其余114条地震目录均为人工漏分析的台湾海峡地震序列事件。匹配事件地震参数统计结果表明, 发震时刻偏差小于1.0 s占比96.77%; 震中位置偏差小于10 km占比100%; 震源深度偏差小于10 km占比50.54%; 震级偏差小于0.5占比98.92%。RISP系统可快速产出台湾海峡地震序列目录, 目录完备性明显优于人工目录, 地震参数的精度与人工目录相当。利用系统自动处理结果反演主震震源机制解, 并对 $M_L \geq 3.0$ 的地震进行精定位, 认为台湾海峡 $M_s6.2$ 地震发震构造可能为一条近东西向的隐伏断裂。RISP系统自动处理结果可用于快速判断发震断层, 服务于地震预测预报、地震应急处置等工作。根据RISP系统产出地震序列分布特征以及主震震源机制解对于了解本次地震序列发震构造等研究具有重要意义。

关键词: 台湾海峡地震序列; 自动编目; RISP; 深度学习

中图分类号: P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0357-08

Application of RISP System to $M_s6.2$ Taiwan Strait Earthquake Sequence in 2018

ZHANG Yanming, LIAO Shirong, CHEN Huifang, HU Shufang

(Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China)

Abstract: To evaluate the performance of the Real-Time Intelligent Seismic Processing (RISP) system in processing earthquake sequences in marine areas with poor seismic station coverage, continuous waveform data for 21 days before and after the $M_s6.2$ earthquake in the Taiwan Strait on November 26, 2018, were processed offline. A comparative analysis was conducted between the automated processing results and manual cataloging results. The completeness of the automated earthquake catalogs generated by the system and the reliability of parameters, including hypocenter location, magnitude, and seismic phase arrival time, were quantitatively evaluated. A total of 407 earthquake catalogs

* 收稿日期:2023-11-29;修回日期:2024-04-04

基金项目:地震科技星火计划(XH21026Y)资助

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

E-mail: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

were generated by the RISP system. Among these, 93 matched the multi-station manual catalogs (100% matching rate), and 200 matched the single-station manual catalogs (93.9% matching rate). The remaining 114 catalogs were events of the Taiwan Strait earthquake sequence that were undetected by manual cataloging. Statistical results of the matched events showed that 96.77% had origin time deviations less than 1.0 s, 100% showed epicenter location deviations less than 10 km, 50.54% had focal depth deviations less than 10 km, and 98.92% exhibited magnitude deviations less than 0.5. The RISP system could rapidly generate earthquake sequence catalogs for the Taiwan strait, with significantly better completeness than manual cataloging and comparable accuracy of seismic parameters to manual cataloging. Using the automated processing results, this study inverted the focal mechanism solution of the mainshock and performed precise relocation for earthquakes with $M_L \geq 3.0$. It was believed that the seismogenic structure of $M_s 6.2$ Taiwan Strait earthquake was likely an east-west trending blind fault. The automated processing results of the RISP system enable rapid identification of seismogenic faults, providing support for earthquake prediction and forecasting, along with emergency response operations. The distribution characteristics of the earthquake sequence and the focal mechanism of the mainshock generated by the RISP are of great significance for understanding the seismogenic structure of this earthquake sequence.

Keywords: Taiwan Strait earthquake sequence; automated cataloging; RISP; deep learning

0 引言

经中国地震台网中心测定,北京时间2018年11月26日7时57分,台湾海峡(23.28°N,118.60°E)发生 $M_s 6.2$ 地震,震源深度20 km,该地震距台湾澎湖县约100 km,福建金门县约119 km,福建沿海地区及台湾西部沿海地区普遍震感强烈。台湾海峡 $M_s 6.2$ 地震发生在澎湖列岛西南的台湾浅滩北部,是继1995年北部湾6.2级地震后东南沿海地震带第二个超过6级的地震。台湾海峡 $M_s 6.2$ 地震序列主震震中位于台湾海峡南部,最近台震中距110 km,台站分布偏一侧,相较于陆域地震,地震台网对于海域地震的监测能力较差。对于类似台网监测能力较差的海域地震,为了确保能够获得可靠的定位结果,福建地震台网地震编目人员只对信噪比较高的地震事件进行地震定位处理,产出包括震源位置信息的多台定位地震目录,而对于信噪比较低的地震事件,不进行地震定位,只产出单台记录地震目录。相对于福建陆域地震,该地震序列多台定位地震目录的完备性偏低。

廖诗荣等^[1]研发了实时智能地震处理系统(Real-time Intelligent Seismic Processor, RISP),并在多个陆域密集地震序列中应用效果良好,均能获得比正式地震目录完备性更高的自动地震目录^[2-5]。我国地震台网对上述陆域密集地震序列的震中包

围相对较好,最近台震中距均小于50 km,地震台网条件均优于本文研究的海域地震序列。本文将RISP系统应用于台湾海峡 $M_s 6.2$ 地震序列的自动处理,评估系统对台网条件较差海域地震序列的处理能力,分析系统产出自动地震目录的完备性,定量评估系统产出的震源位置、震级大小、震相到同等信息的可靠性,并尝试将系统自动处理结果应用于发震断层的判定。

1 数据和方法

本文收集处理了福建台网2018年11月20日0时至2018年12月10日23时共21天的连续波形数据,所用台站与人工编目完全一致,总数为113个(图1)。台湾海峡地震序列发生于台湾海峡南部(23.2°~23.5°N,118.4°~118.8°E),震中周围地震台网布局相对较差,主震震中最大孔隙角138.3°,次大孔隙角170.7°,最近台震中距110 km,次近台震中距123 km。在此时间段内,福建台网人工编目产出台湾海峡地震序列多台定位地震目录(以下简称“多台目录”)93条,其中 $M_L 6.0$ 以上地震1次、 $M_L 5.0 \sim 5.9$ 地震0次、 $M_L 4.0 \sim 4.9$ 地震9次、 $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震31次、 $M_L 2.5 \sim 2.9$ 地震52次。此外,人工编目还产出台湾海峡地震序列不包含震源位置的213条单台记录地震目录(以下简称“单台目录”),其中 $M_L 2.0 \sim 2.4$ 地震102次、 $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震110次、

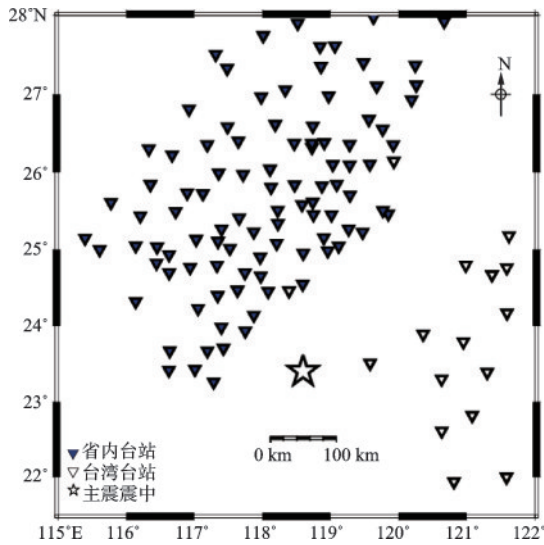


图1 台站分布

Fig.1 Distribution map of seismic stations

M_L 1.0以下地震1次。本文采用RISP系统(以下简称“系统”)的离线处理功能对台湾海峡地震序列21天的连续波形数据进行处理。系统采用PhaseNet^[6]进行震相到时自动拾取;采用基于组触发与等时差八叉树搜索相结合的算法进行震相关联;采用NL-Loc^[7]地震定位程序进行地震定位;按照我国现行的震级国家标准(GB17740-2017)^[8]的规定,进行 M_L 震级的自动量算。系统可将定位成功的事件波形数据写入EVT格式事件波形文件,将参与定位的震相数据写入震相文件,进而通过MSDP人机交互地震分析软件^[9]对系统自动处理结果的可靠性进行分析。

本文设置系统事件定位成功的阈值为5个,即参与事件定位的P与S震相数之和不少于5个。设置多台目录与自动目录的匹配条件为:发震时刻偏差小于3s且震中位置偏差小于15km;单台目录与自动目录的匹配条件为:发震时刻偏差小于3s。若有多个自动目录与人工目录相匹配,系统选取发震时刻偏差最小的自动目录为匹配事件。以人工目录为基准,对于某一事件,如果没有自动目录与之匹配,则认为系统漏检测该事件;以自动目录为基准,对于某一事件,如果没有人工目录与之匹配,则认为系统多检测该事件。

2 处理结果

系统对21天的连续波形数据进行离线处理,共产出407条台湾海峡序列地震目录(以下简称“自动目录”),而同期福建台网人工编目台湾海峡序列地

震目录(以下简称“人工目录”)306条(含单台目录)。图2为台湾海峡地震序列人工与自动目录的震源位置分布图,由图可见自动目录与人工目录震中分布的优势方向基本一致,均为近东西走向,余震序列在东西向展布距离约15km,在南北向展布距离约10km;自动目录震源深度集中分布区间为0~20km,人工目录为5~20km。

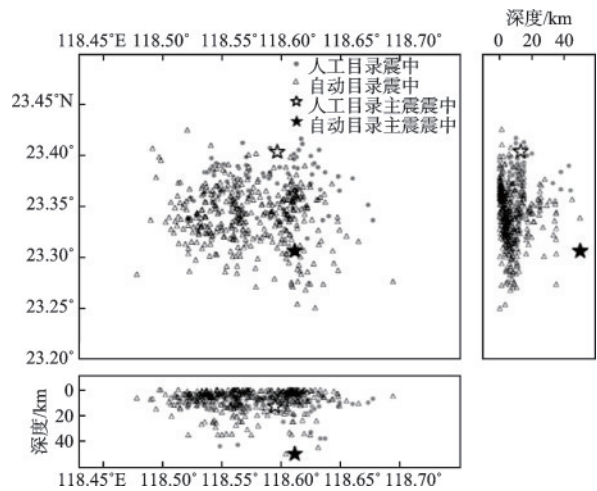


图2 台湾海峡地震序列人工与自动目录震源位置分布

Fig.2 Epicenter distributions from manual and automated cataloging for Taiwan Strait earthquake sequence

图3为自动目录与人工目录的震级时间分布及地震累积数量变化。由图3可见,台湾海峡 M_S 6.2地震前1周没有发生前震。在主震发生当天,人工目录与自动目录均产出了大量台湾海峡地震序列事件,之后随时间推移数量逐渐减少;主震13小时后(2018年11月26日20时50分)的 M_L 4.9余震为该地震序列的最大余震,自动目录事件数量从震后第一天开始就明显多于人工目录。

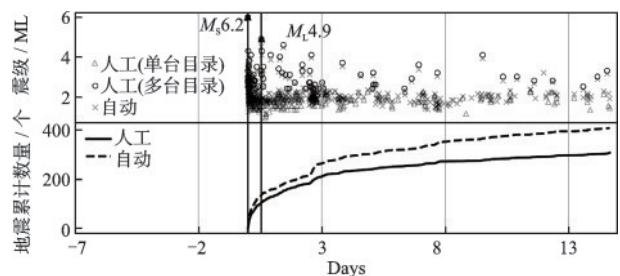


图3 台湾海峡地震序列自动目录与人工目录震级时间分布与地震累积数量变化

Fig.3 Time-magnitude distributions and cumulative number of earthquakes from automated and manual cataloging for Taiwan Strait earthquake sequence

图4(a)为台湾海峡地震序列人工目录与自动目录不同震级段地震数量对比。人工编目产出93条多台目录,213条单台目录;系统产出407条多台目录,是人工多台目录的4.39倍,是全部人工目录的1.33倍。图4(b)为人工目录与自动目录的G-R关系图,自动目录完备震级下限约 $M_L 1.9$,人工多台目录完备震级下限约 $M_L 2.3$;全部人工目录完备震级下限约 $M_L 1.5$,考虑到单台目录的震级来自最近台的单台震级,近台的单台震级通常小于事件震级^[10-11],因此该完备震级存在低估的可能。

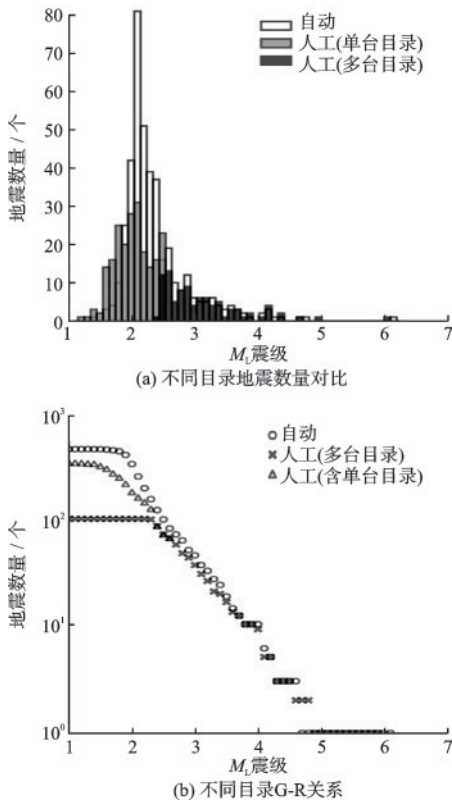


图4 台湾海峡 $M_s 6.2$ 地震序列人工与自动目录不同震级段地震数量对比与G-R关系

Fig.4 Comparison of earthquake counts by magnitude segment and G-R relationship between manual and automated cataloging for Taiwan Strait $M_s 6.2$ earthquake sequence

3 分析与讨论

系统对21天的连续波形数据进行离线处理,共产出407条台湾海峡序列地震目录,多于人工编目产出的306条地震目录(含单台目录213条),也多于胡淑芳等^[12]利用基于模板匹配定位(Match and

Locate)方法^[13]产出的242条地震目录。下文对匹配事件的精准率,多检测事件的可靠性,以及自动目录应用于发震断层判定等进行分析与讨论。

3.1 匹配事件精准率分析

以人工编目多台定位结果为参考,所有93条人工目录均有自动目录相匹配,匹配率为100%。图5

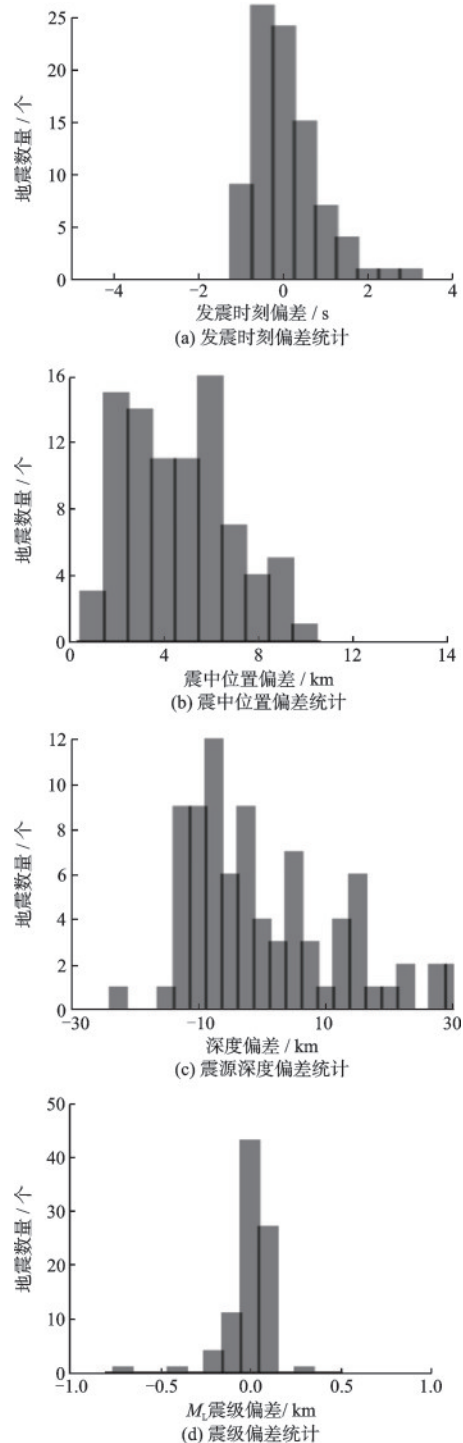


图5 地震参数偏差统计

Fig.5 Statistics of deviations in seismic parameters

分别为自动目录与人工目录匹配事件的发震时刻、震中位置、震源深度和震级偏差的统计图,其中发震时刻偏差小于 1.0 s 的地震有 90 个,占比 96.77%;震中位置偏差小于 10 km 的地震占比 100%;震源深度偏差在 10 km 内的地震有 47 个,占比 50.54%;震级偏差小于 0.5 的地震有 92 个,占比 98.92%。

自动目录与人工目录的震源深度偏差大于 10 km 的地震占比较大,主要由于地震台网布局相对较差造成。震级偏差超过 0.5 的事件仅 1 个,为发生在 26 日 8 时 4 分 M_L 2.8 地震,自动编目震级为 M_L 3.5。该事件的信噪比较低(图 6),人工在量算这个地震事件震级时所使用的台站数为 6 个,最远台漳州九湖(ZZJH)震中距为 159 km;系统除了使用与人工目录相同的台站外,还量算了另外 5 个台的单台震级,最远台南靖金山(NJJS)震中距为 206 km。经人工分析认为系统自动拾取的最大振幅合理,自动目录的事件震级更为合理。图 7 为自动目录与人工目录匹配成功事件的 Pg 震相与 Sg 震相到时偏差统计图。自动产出震相中有 2 056 个 Pg 震相和 1 651 个

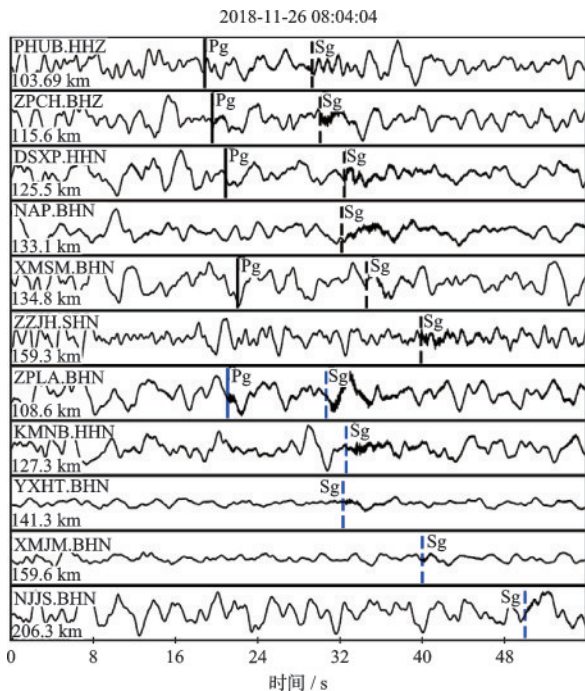


图 6 震级偏差大于 0.5 地震事件波形

Fig.6 Waveforms of earthquakes with magnitude deviations greater than 0.5

注: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

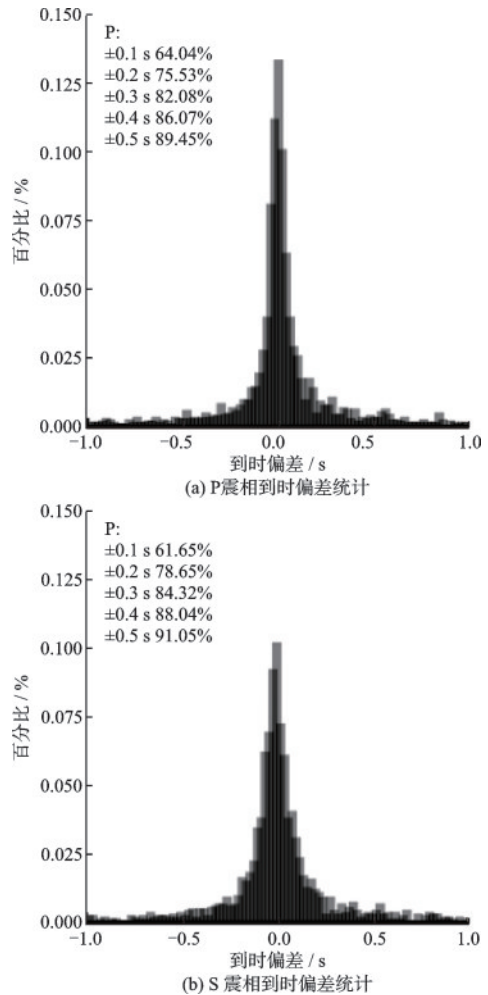


图 7 Pg 震相与 Sg 震相到时偏差统计

Fig.7 Statistics of arrival time deviations for Pg and Sg phases

Sg 震相与人工产出震相相匹配,匹配率分别为 78.3% 和 65.9%。到时偏差统计结果呈正态分布,且峰值均为 0.0 s, Pg 震相到时偏差小于 0.2 s 占 75.53%, 小于 0.5 s 占 89.45%; Sg 震相到时偏差小于 0.2 s 占 78.65%, 小于 0.5 s 占 91.05%。

3.2 多检测事件可靠性分析

本文通过人机交互方式对多检测事件逐一进行分析,确认 114 个多检测事件均为人工漏分析的台湾海峡地震序列事件,其中 M_L 2.5~2.9 地震 5 次、 M_L 2.0~2.5 地震 48 次、 M_L 2.0 以下地震 61 次,最小震级为 M_L 1.4,最大震级为 M_L 2.9。图 8 为 3 个人工漏分析的信噪比较高地震事件波形;图 9 为人工漏分析的信噪比较低地震序列事件波形。自动编目系统能够快速准确识别人工遗漏的低信噪比事件,若与人工协同工作,则可显著提升地震目录的完备性。

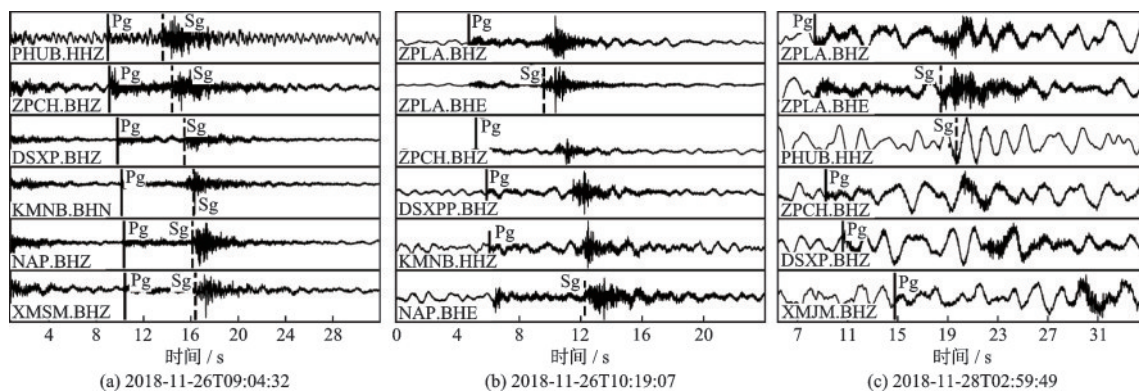


图8 人工漏分析的信噪比较高地震事件波形

Fig.8 Waveforms of high signal-to-noise-ratio earthquakes undetected by manual cataloging

注:实线为自动目录P震相位置,虚线为自动目录S震相位置

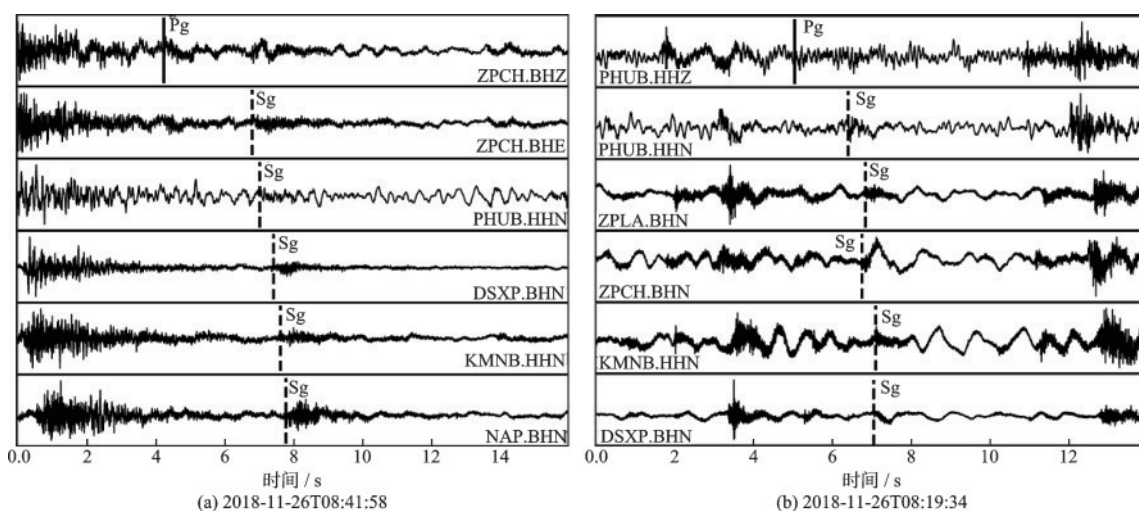


图9 人工漏分析的信噪比较低地震序列事件波形

Fig.9 Waveforms of low signal-to-noise-ratio earthquakes undetected by manual cataloging

注:实线为自动目录P震相位置,虚线为自动目录S震相位置

3.3 自动目录应用于发震断层判定

自动目录结果在时效性上明显优于人工目录结果,对于密集地震序列,其在完备性上也具有明显的优势^[3-5]。本文尝试利用自动目录震相到时数据结合地震波形信息快速反演震源机制解,并通过余震精定位结果进一步判定发震断层,了解震源附近应力分布状况;二者均为地震趋势分析与灾害快速评估的重要基础性数据。

本文使用RISP自动处理的震相到时数据,采用CAP^[14-15]方法,选取震中距300 km范围内宽频带地震波形记录,反演台湾海峡M6.2地震主震的震源机制解。计算出的震源机制解为:节面I走向84.2°,倾角79.1°,滑动角-173.9°;节面II走向353°,倾角84°,滑动角-11°;误差最小的拟合深度为11.9 km。本文获得的震源机制解与其他研究人员使用人工编目结果所得的震源机制解^[16-17]相近(表1),均为走滑型,有近东西向与近南北向两组节面。

表1 不同数据来源所得台湾海峡主震震源机制解

Table 1 Focal mechanism solution of mainshock in Taiwan Strait obtained from different data sources

数据来源	节面 I			节面 II			拟合深度/km
	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	
陈惠芳等(2021) ^[17]	87	82	-163	354.6	73.2	-8.4	14.9
王小娜等(2019) ^[16]	89	82	-173	385	84	-7	14
本文	84.2	79.1	-173.9	353	84	-11	11.9

本文采用双差地震定位程序^[18],分别对自动目录与人工目录进行重定位。为保证定位精度,本文只对 $M_L \geq 3.0$ 的41个地震事件进行重定位,这些地震记录台站数均超过10个,震相清晰,震相到时可靠。双差地震定位程序使用的速度模型采用金震等^[19]推荐的福建及台湾海峡一维速度模型。另外由于台湾海峡地震最近台震中距超过100 km,人工目录与自动目录的震源深度的准确度都很低,因此采用CAP反演主震得到的震源机制解的震源深度作为这41个地震的初始震源深度进行双差精定位。图10为双差定位前与双差定位后的震中位置分布图,自动目录与人工目录双差定位后的震中位置分布特征基本一致,震中沿东西向展布的特征更为明显,东西向展布距离约15 km,南北向展布距离约4 km。

结合余震序列震中分布特征和震源机制解,本文认为节面I为本次地震的发震构造,表现为右旋

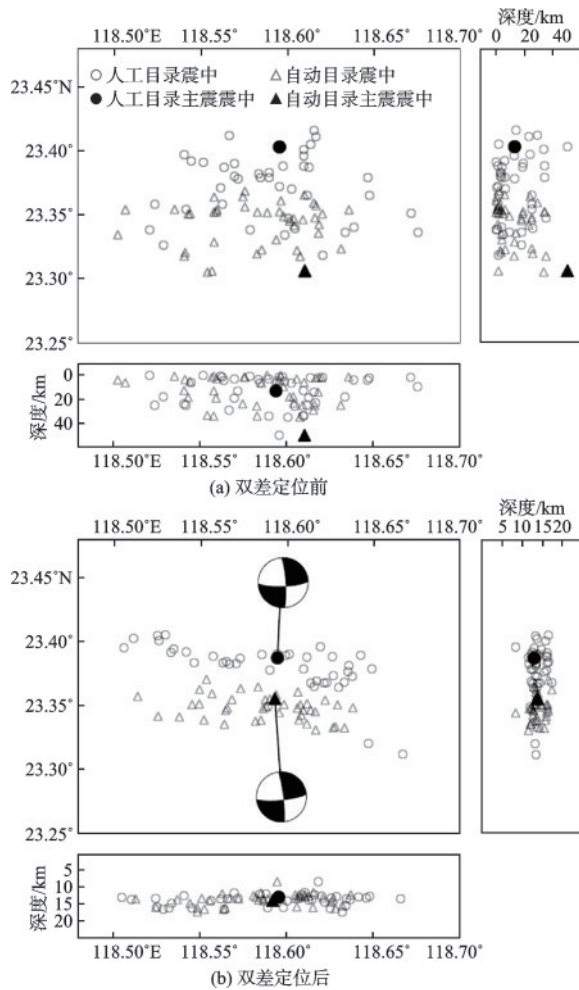


图10 双差精定位前后自动目录与人工目录余震分布
Fig.10 Aftershock distributions from automated and manual cataloging before and after double-difference precise relocation

走滑型地震,断层走向为近东西方向,与已知的近南北向东山东缘隆起断裂以及主震附近的北西向巴士断裂均不相符,本文推测台湾海峡6.2级地震发震构造可能为南海北部断裂系内的一条近东西向的台湾浅滩隐伏断裂,这与王小娜等^[16]利用人工编目数据判定结果一致。

4 结 论

为评估实时智能地震处理系统(RISP)对台网条件较差海域地震序列的处理能力,本文以台湾海峡地震序列为研究对象。通过RISP系统离线处理功能,处理了2018年11月26日 $M_s 6.2$ 主震前后21天的连续波形数据,并将自动处理结果与人工编目结果进行深入对比,全面评估了系统对该地震序列的自动处理能力。

(1) 系统共产出407条台湾海峡地震目录,与人工多台目录匹配93条,匹配率为100%;与人工单台目录匹配200条,匹配率为93.9%;其余114条地震目录均为人工漏分析的台湾海峡地震序列事件。以人工多台目录为标准,自动目录发震时刻偏差小于1.0 s占比96.77%;震中位置偏差小于10 km占比100%;震源深度偏差在10 km内占比50.54%;震级偏差小于0.5占比98.92%。

(2) 本文使用系统自动处理结果对主震震源机制解进行了反演,对 $M_L \geq 3.0$ 的地震进行精定位,认为台湾海峡6.2级地震发震构造可能为一条近东西向的隐伏断裂,结果与其它研究人员使用人工编目数据判定结果一致。

(3) 本文研究结果表明,利用RISP系统可快速产出台湾海峡地震序列目录,目录完备性明显优于人工目录,地震参数的精度与人工目录相当,自动处理结果可用于快速判断发震断层,服务于地震预测预报、地震应急处置等工作。

参 考 文 献:

[1] 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 $M_s 6.4$ 地震中的应用[J]. 地球物理学报,2021,64(10):3632-3645.
Liao S R, Zhang H C, Fan L P, et al. Development of a real-time intelligent seismic processing system and its application in the 2021 Yunnan Yangbi $M_s 6.4$ earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64 (10): 3632-3645. (in Chinese)

- [2] 廖诗荣,杨婷,张红才,等.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[J].地震研究,2021,44(4): 515-520.
Liao S R, Yang T, Zhang H C, et al. Fast detection and relocation of the 2021 Shuangbai M_s 5.1 earthquake sequences in Yunnan [J]. Journal of Seismological Research, 2021,44(4): 515-520. (in Chinese)
- [3] 刘媛,颜利君,廖诗荣,等.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[J].地质论评,2022,68(4):1375-1381.
Liu Y, Yan L J, Liao S R, et al. Application of real-time intelligent seismic processing system in the 2020's $M5.6$ earthquake in Shiqu, Sichuan [J]. Geological Review, 2022,68(4): 1375-1381. (in Chinese)
- [4] 王祖东,杨晓鹏,尹欣欣,等.2022年1月8日青海门源 M_s 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.
Wang Z D, Yang X P, Yin X X, et al. Discussion on the automatic processing results for aftershock sequence of Menyuan, Qinghai M_s 6.9 earthquake on 8 January, 2022 [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(2): 408-414. (in Chinese)
- [5] 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.
Yan L J, Liu Y, Liao S R, et al. Analysis and research of the real time automatic detecting results for the Sichuan Maerkang earthquake sequence on 10 June, 2022 [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(6): 1450-1458. (in Chinese)
- [6] Zhu W Q, Beroza G C. PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method [J]. Geophysical Journal International, 2019, 216(1): 261-273.
- [7] Lomax A, Michelini A, Curtis A. Earthquake location, direct, global search methods [C] // Meyers R. (eds) Encyclopedia of Complexity and Systems Science. New York: Springer, 2009: 2449-2473.
- [8] 地震震级的规定:GB17740—2017[S].北京:国家质量监督检验检疫总局,2017.
- [9] 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(5): 121-127.
Su Z J, Huang W H, Automatic phases recognition technology in MSDP [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2015, 36(5): 121-127. (in Chinese)
- [10] 杨贵,许振栋,林彬华.福建测震台网单台震级偏差与台站场地响应关系的初步分析[J].中国地震, 2016, 32(4): 674-684.
Yang G, Xu Z D, Lin B H. Preliminary analysis of the relationship between the magnitude deviation of the station and the site response in Fujian Digital Seismic Network [J]. Earthquake Research in China, 2016, 32(4): 674-684. (in Chinese)
- [11] 陈继峰,尹欣欣,董宗明,等.甘肃地区集镇震级的量规函数研究[J].中国地震,2013, 29(3): 327-334.
Chen J F, Yin X X, Dong Z M, et al. Study on calibration function of local earthquakes in the Gansu region [J]. Earthquake Research in China, 2013, 29(3): 327-334. (in Chinese)
- [12] 胡淑芳,李军,李强,等.台湾海峡 M_s 6.2地震的微震检测定位及其发震断裂[J].华南地震,2022,42(3): 1-8.
Hu S F, Li J, Li Q, et al. Micro seismic detection and location of the M_s 6.2 earthquake in Taiwan strait and its seismogenic fault [J]. South China Journal of Seismology, 2022, 42(3): 1-8. (in Chinese)
- [13] Zhang M, Wen L X. An effective method for small event detection: match and locate (M&L) [J]. Geophysical Journal International, 2015, 200(3): 1523-1537.
- [14] Zhao L S, Helmberger D V. Source estimation from broadband regional seismograms [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(1): 91-104.
- [15] Zhu L, Helmberger D V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(5): 1634-1641.
- [16] 王小娜,叶秀薇,黄元敏,等.2018年11月26日台湾海峡 M_s 6.2地震发震构造研究[J].地球物理学报,2019, 62(12): 4673-4683.
Wang X N, Ye X W, Huang Y M, et al. Seismogenic structure of the Taiwan strait earthquake on 26 November, 2018 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(12): 4673-4683. (in Chinese)
- [17] 陈惠芳,林彬华,张燕明,等.利用sPn震相测定台湾海峡 $M6.2$ 地震震源深度[J].大地测量与地球动力学, 2021, 41(8): 853-857.
Chen H F, Lin B H, Zhang Y M, et al. Precise determination of the focal depth of Taiwan strait $M6.2$ earthquake by sPn phase [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(8): 853-857. (in Chinese)
- [18] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(6): 1353-1368.
- [19] 金震,李山有,蔡辉腾,等.福建及台湾海峡西侧地壳一维速度结构研究[J].地震工程与工程振动,2018, 38(3): 81-93.
Jin Z, Li S Y, Cai H T, et al. Inversion for the 1D velocity model of onshore-offshore in Fujian area [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(3): 81-93. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)