

汤兰荣, 曾新福, 许志山, 等. 寻乌及邻区遗漏地震检测及目录完整性分析[J]. 华南地震, 2024, 44(2): 1-7. [TANG Lanrong, ZENG Xinfu, XU Zhishan, et al. Missing Earthquakes Detection and Integrity Analysis of Earthquake Catalogue in Xunwu and Its Adjacent Area[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(2): 1-7]

寻乌及邻区遗漏地震检测及目录完整性分析

汤兰荣¹, 曾新福¹, 许志山¹, 陈江贻¹, 万祺薇¹, 罗丽¹, 段莉莉²

(1.江西省地震局, 南昌 330096; 2.哈尔滨市应急救援保障中心, 哈尔滨 150028)

摘要: 利用匹配滤波技术对寻乌及邻区2009年1月—2020年12月的遗漏地震事件进行检测, 共检测到遗漏地震306个, 约为台网目录的40%, $M_L 1.5$ 以下地震的目录完整性有较明显的改善。增加遗漏地震后 b 值从0.885变为0.917。区域内的寻乌、平远和安远震群分别检测到遗漏地震36个、15个、8个, 约为原震群目录的 $1/2$ 、 $1/3$ 和 $1/5$, 遗漏地震比例与模板地震数量关系密切。补充遗漏地震后寻乌震群 ρ 值判定结果由非前兆变为前兆, 表明遗漏地震检测对前兆震群识别有重要影响。

关键词: 寻乌及邻区; 遗漏地震检测; 模板匹配; b 值; 前兆震群识别

中图分类号: P315

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)02-0001-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.02.01

Missing Earthquakes Detection and Integrity Analysis of Earthquake Catalogue in Xunwu and Its Adjacent Area

TANG Lanrong¹, ZENG Xinfu¹, XU Zhishan¹, CHEN Jiangyi¹,
WAN qiwei¹, LUO Li¹, DUAN Lili²

(1. Jiangxi Earthquake Agency, Nanchang 330096, China; 2. Harbin Emergency Rescue Support Center, Harbin 150028, China)

Abstract: Using the matched filtering technology to detect the missing earthquake events in Xunwu and its adjacent area from January 2009 to December 2020, a total of 306 missing earthquakes were detected, which is about 40% of the network catalog, and the catalog integrity of earthquakes below $M_L 1.5$ has been significantly improved. The b value changes from 0.885 to 0.917 after adding missed earthquakes. The 36, 15 and 8 missing earthquakes were detected in Xunwu, Pingyuan and Anyuan earthquake swarms in the region, which are about $1/2$, $1/3$ and $1/5$ of the original earthquake swarm catalogue, and the proportion of missing earthquakes is closely related to the number of template earthquakes. The determination result of the ρ value of the Xunwu earthquake swarm changes from non-precursor to precursor after the supplementing the missing earthquakes, indicating that the missing earthquakes detection has an important influence on the identification of precursory earthquake swarm.

收稿日期: 2023-05-16

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划(XH201402Y); 江西省防震减灾与工程地质灾害探测工程研究中心开放基金(SDGD202020)联合资助。

作者简介: 汤兰荣(1983-), 女, 高级工程师, 主要从事地震监测和分析预报工作。

E-mail: 156878629@qq.com

Keywords: Xunwu and its adjacent area; Missing earthquakes detection; Template matching; b value; Identification of precursor earthquake swarms

0 引言

地震目录是区域地震活动性分析最重要的基础资料,目录完整性如何直接关系到分析结果的可靠性和准确性。由于受背景噪声水平、记录仪器分布等多种因素的影响,许多微弱的地震信号被淹没在噪声中,无法直接观测。另一方面,大地震发生后的短时间内,由于受强震尾波的影响以及大量余震事件的发生,波形相互重叠,难以区分。如果能够自动识别出这些微弱的地震信号和遗漏的早期余震,对于完善地震目录、全面分析地震活动性、监测地震破裂区域的震后形变等具有重要意义^[1]。目前主要采用两种方法自动识别地震信号,一种是基于震相拾取的方法,其中最常用的为长短时间平均法(STA/LTA)^[2-3],此类方法在数据信噪比较高时能够可靠准确地识别震相^[4];另一种方法是基于互相关的模板匹配滤波技术^[5-7],该方法基于滑动窗互相关检测技术,能有效地压制噪声干扰,在数据信噪比低时仍然能够提取微弱信号^[8]。目前模板匹配技术各个领域都有应用,如火山地震的检测、水压致裂过程中诱发的地震、地震活动性研究等。在地震活动性研究方面,大多数研究者针对震群开展遗漏地震检测,完善地震目录^[8-17],针对区域地震进行遗漏地震检测的研究不多,张雅楠使用模板匹配定位技术对上海及邻区10年的连续资料进行遗漏地震事件的扫描和检测,共识别出824个地震事件^[18]。本文将利用模板匹配滤波技术对寻乌及邻区2009—2020年的遗漏地震事件进行检测。

赣南地区是一个中强地震多发区,历史上破坏性地震频发。寻乌及邻区是赣南地区地震活动最为强烈的地区,有史以来共发生4.7级以上地震5次,最大地震为1806年会昌南6.0级地震,该地震也是江西境内有史以来记载的最大地震。寻乌及邻区小震一直较为活跃,2009—2020年共记录到地震760次。期间发生了3次小震群活动,分别为2016年7月平远 M_L 2.7震群、2017年11月寻乌 M_L 3.8震群和2018年3月安远 M_L 2.1震群。本文利用模板匹配方法检测寻乌及邻区(包括区域小震群)的遗漏地震,分析地震活动性参数变化,可为区域地震危险性分析和地震趋势判定提供有效的依据。

1 资料和方法

寻乌及邻区主要的控震断裂带为石城—寻乌断裂带、全南—寻乌断裂带。该地区2009年1月—2020年12月发生 $M_L \geq 1.0$ 地震383次,其中 M_L 2.0~2.9地震58次, M_L 3.0以上地震10次。选取距离研究区域最近的寻乌台(XUW)、安远台(ANY)和会昌台(HUC)在2009年1月—2020年12月记录到的连续波形资料,利用 M_L 2.0以上地震作为模板进行遗漏地震检测。资料来源于江西省测震台网。研究区地震和台站分布见图1。

采用模板匹配识别方法^[7]进行遗漏地震检测。在模板选取过程中,首先选 $M_L \geq 1.5$ 地震进行试算,发现研究区域 $M_L < 2.0$ 的模板信噪比不高, M_L 1.5~1.9模板很难检测到可靠的遗漏地震,最终选取68次 M_L 2.0以上地震作为模板,截取寻乌台(XUW)、安远台(ANY)和会昌台(HUC)三分量直达S波到时前2 s到后2 s的波形,经过零相移4阶Butterworth滤波器2~8 Hz滤波后,在连续波形上进行互相关扫描。遗漏地震检测过程分为4步:①将3个台站扫描得到的互相关系数序列按模板地震在此台站的走时平移;②计算3个台站波形互相关系数的平均数,取9倍绝对离差中位数(median absolute deviation, MAD)为阈值,挑选大于阈值或单台互相关系数大于0.6,而目录中未记录的作为疑似遗漏地震事件;③基于波形互相关震相检测技术检测疑似遗漏地震事件的震相,在距离震中最近的3个台至少检测到一个P波和S波震相的则确认为遗漏地震,扫描得到的互相关序列中互相关系数最大值位置即为遗漏事件P波、S波到时(图2);④利用遗漏事件水平向波形S波段最大振幅与模板地震的振幅比估计遗漏事件的震级^[8,14]。

2 遗漏地震检测结果

2.1 区域遗漏地震检测结果

采用上述方法得到疑似遗漏地震目录后,通过人工对遗漏地震波形进行筛选,剔除波形记录错误或者干扰数据对应的遗漏地震,最后得到遗漏地震目录(图3)。除检测到台网已有目录以外,共检测到遗漏地震306个,约为台网目录760次的

40%。其中 $M_L0.0 \sim 0.9$ 遗漏地震 88 个, $M_L1.0 \sim 1.9$ 为 $M_L2.0$ 为 215 个, $M_L2.0 \sim 0.9$ 为 3 个, 最大遗漏地震震级

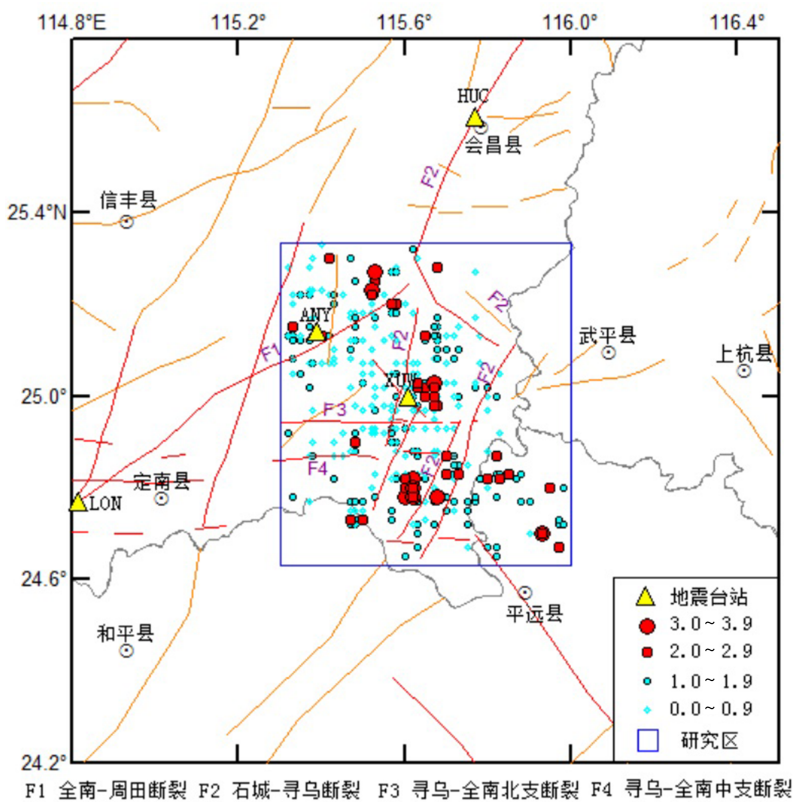
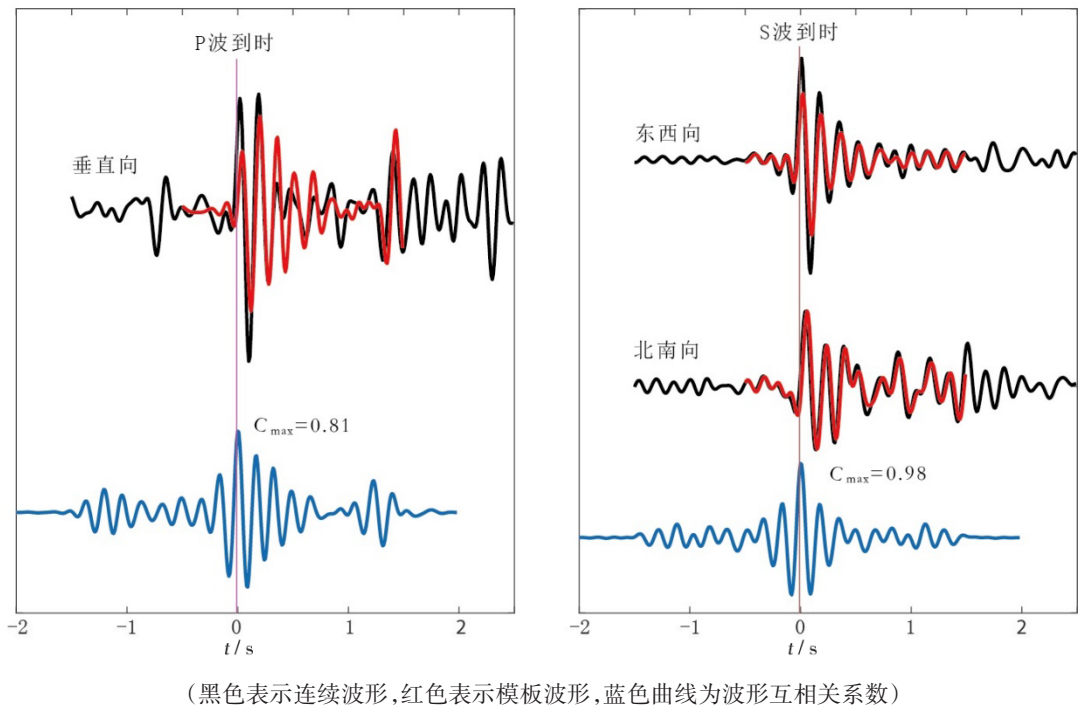
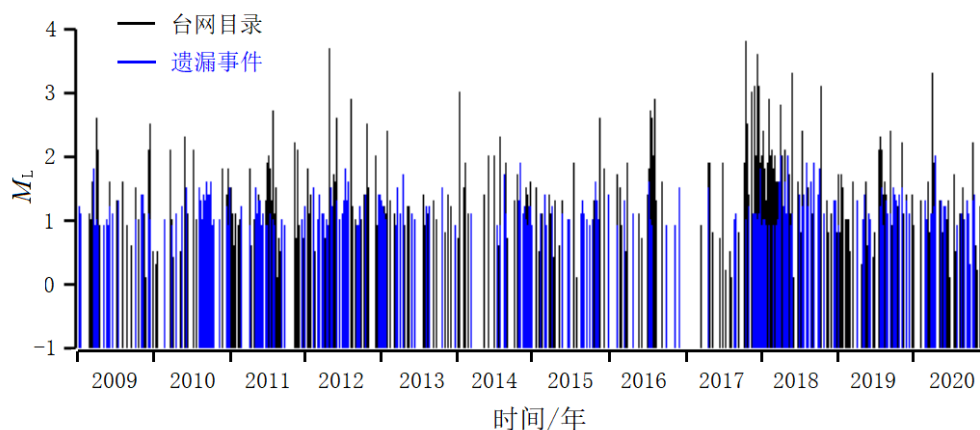


图1 地震、台站和构造分布
Fig.1 Distribution of earthquakes ,stations and structures



(黑色表示连续波形,红色表示模板波形,蓝色曲线为波形互相关系数)
图2 搜索遗漏地震事件P波、S波到时示意图
Fig.2 Schematic diagram of the arrival time of P-wave and S-wave for missing earthquake events during search

图3 台网目录和遗漏地震的 $M-t$ 图Fig.3 $M-t$ diagram of network catalog and missing earthquakes

对采用模板匹配识别方法得到的地震事件震级与台网目录震级的差值进行分析,结果如图4所示,可以看出震级差在0.1以内的地震占比最高,86%的震级差在0.3内,表明遗漏地震的震级较为可靠。

对研究区域内原台网地震目录进行震级—频度关系拟合,与合并遗漏地震后的拟合进行对比,可以看出增加遗漏地震后 $M_L 1.5$ 以下地震的目录完

整性有较明显的改善(图5),但 $M_L 0.8$ 以下地震数量与拟合直线还存在较大差距,说明距离理论值还相差甚远。遗漏地震检测数量多少,与区域地震监测能力有直接关系,也与连续波形信噪比有关。本次检测得到区域遗漏地震不到台网目录的一半,主要原因是区域观测台站稀疏,监测能力不高。增加遗漏地震后 b 值从0.885变为0.917,该参数的变化对区域地震趋势分析有重要作用。

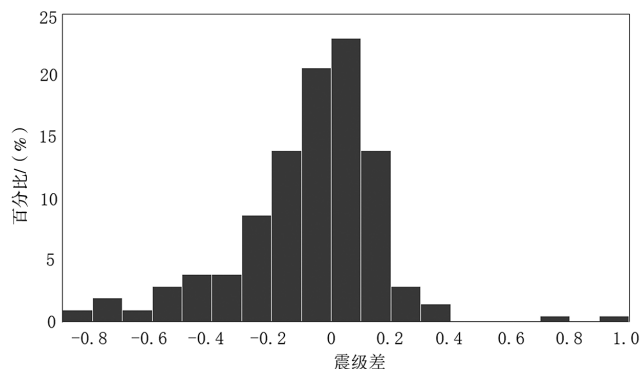


图4 模板匹配识别得到的震级与台网目录震级的差值分布
Fig.4 Distribution of differences between the magnitude identified by the template matching recognition and the magnitude of network catalog

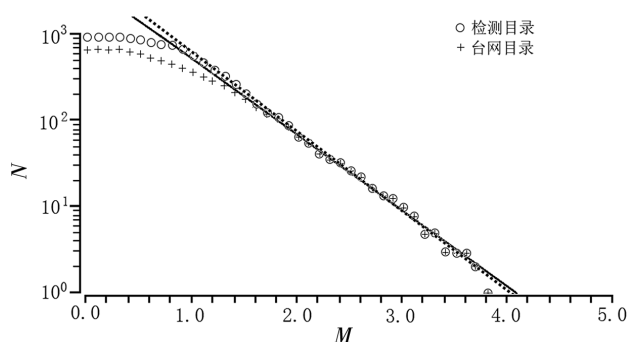


图5 补充遗漏地震前后地震目录的震级—频度关系对比图
Fig.5 The comparison diagram of magnitude-frequency relationship of earthquake catalog before and after supplementing the missing earthquakes

2.2 区域小震群的遗漏地震检测结果

研究区域2009—2020年共记录到3次小震群活动,2017年寻乌 $M_L 3.8$ 震群在2017年11月—2018年4月共记录到地震68次,其中 $M_L 0.0 \sim 0.9$ 地震6次, $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震46次, $M_L 2.0 \sim 2.9$ 地震11次, $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震5次。经遗漏地震检测,寻乌震群得到遗漏地震36个,约为台网目录的一半,

其中 $M_L 0.0 \sim 0.9$ 地震18个, $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震18个。2016年平远 $M_L 2.7$ 震群在2016年7月至8月发生地震37次,其中 $M_L 0.0 \sim 0.9$ 地震4次, $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震27次, $M_L 2.0 \sim 2.9$ 地震6次。平远震群检测得到遗漏地震15个,约为台网目录的 $1/3$,其中 $M_L 0.0 \sim 0.9$ 地震11个, $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震4个。2018年安远 $M_L 2.1$ 震群在2018年3至5月共发生地震35次,其中 $M_L 0.0 \sim 0.9$ 地震24次, $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震9次,

M_L 2.0~2.9地震2次。安远震群检测得到遗漏地震共8个,约为台网记录的 $1/5$ 。其中 M_L 0~0.9地震3个, M_L 1.0~1.9地震5个,如图6。从3次震群的遗

漏地震比例可以看出,震级水平越高且地震数量越多的震群检测得到的遗漏地震比例越高。

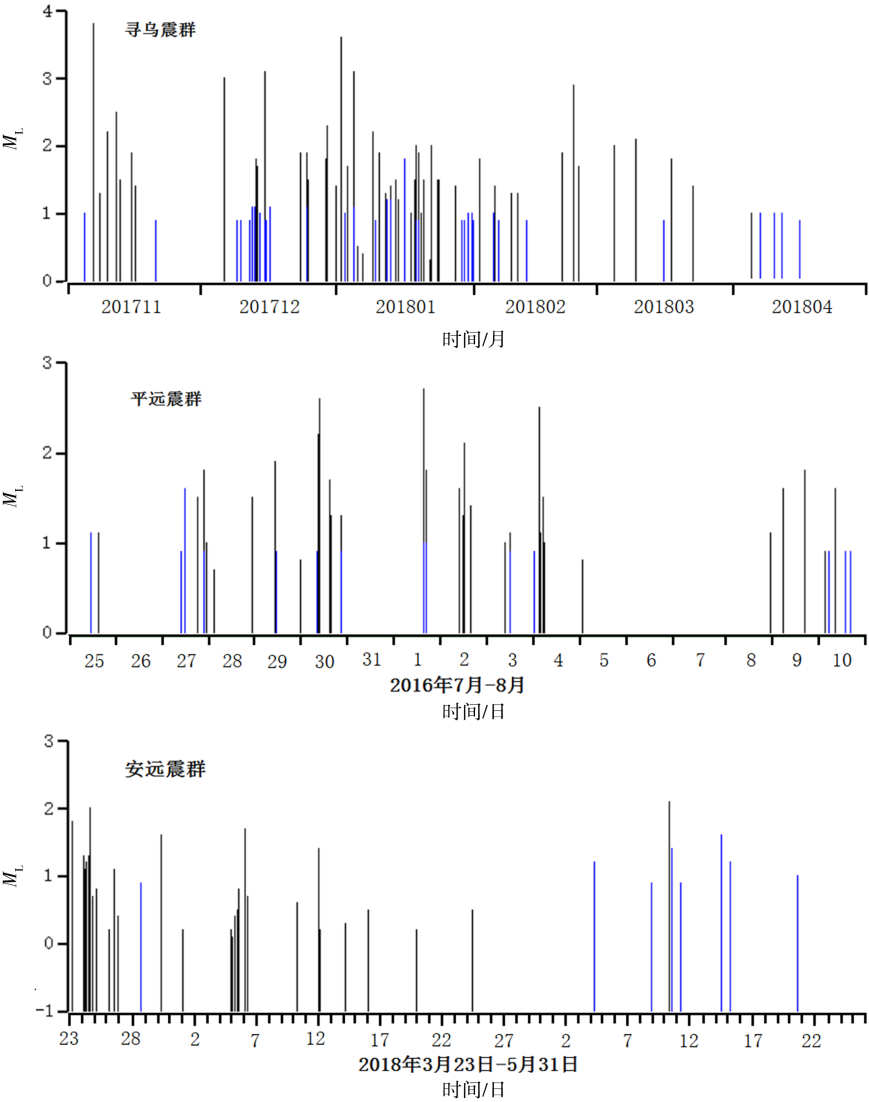


图6 寻乌、平远、安远震群的台网目录和遗漏地震对比图

Fig.6 Comparison map of network catalog and missing earthquakes of Xunwu ,Pingyuan, and Anyuan earthquake swarm

2.3 遗漏地震对前兆震群判定的影响

一般来认为,判定前兆震群单项指标规定为: $U>0.5$, $F>0.7$, $K>0.7$, $\rho<0.55$, $b>0.65$, $h<1.0$ 。凡满足其中一项,即判断该震群为前兆震群^[19]。未加遗漏地震的寻乌震群各项前兆震群判定指标分别为 $U=0.587$ 、 $F=1.626$ 、 $\rho=0.584$ 、 $K=0.557$ 、 $H=0.180$ 、 $b=0.517$, 增加遗漏地震后,对应的各项指标值为 $U=0.680$ 、 $F=1.589$ 、 $\rho=0.366$ 、 $K=0.557$ 、 $H=0.180$ 、 $b=0.576$, 从表1中可以看出, U 、 F 、 ρ 、 b 值都发生了变化,其中 ρ 值判定结果

由非前兆震群变为前兆震群,说明增加遗漏地震后,对前兆震群的判定结果产生了一定影响,对区域趋势判定具有重要意义。

3 结论和讨论

本文利用匹配滤波技术对寻乌及邻区2009年1月—2020年12月的遗漏地震事件进行检测,共检测到306次遗漏地震事件,约为台网目录的40%,与胡涛等人^[17]对青海茫崖5.0级地震震源区微震检测得到的遗漏地震比例43%相近,也与尹欣欣等

人^[16]对青海门源6.4级地震微震检测得到的40%相似。区域内的寻乌震群、平远震群、安远震群分别检测到遗漏地震36个、15个、8个,为台网目录个数的 $1/2$ 、 $1/3$ 和 $1/5$ 。遗漏地震比例不高的原因一是区域监测能力不高,太小的地震无法记录到

信噪比高的波形,二是研究区域虽然小震频繁,但强度不高,可用作模板的地震数量有限。从3个震群的遗漏地震比例可以看出,地震数量越多且震级越大的震群检测出来的遗漏地震比例越高。

表1 寻乌震群增加遗漏地震前后的前兆参数指标

Table 1 Precursor parameter index of Xunwu earthquake swarm before and after adding missing earthquakes

判定指标	前兆震群判定标准	台网目录计算结果	增加遗漏地震结果	是否为前兆震群
U	>0.5	0.587	0.680	是
F	>0.7	1.626	1.589	是
ρ	≤ 0.55	0.584	0.366	非→是
K	>0.7	0.557	0.557	非
h	<1.0	0.180	0.180	是
b	>0.65	0.517	0.576	非

采用模板匹配识别方法得到的地震事件震级与台网目录的震级相差不大,86%的震级差在0.3内,表明遗漏地震的震级估计较为可靠。震级一频次统计分析表明加入遗漏事件后, $M_L1.5$ 以下地震的目录完整性有较明显的改善。增加遗漏地震后研究区域的 b 值从0.885变为0.917,该参数的变化对区域地震趋势分析有着重要作用。

对寻乌震群增加遗漏地震前后的前兆震群判定指标进行对比分析,发现 U 、 F 、 ρ 、 b 值都发生了变化,其中 ρ 值判定结果由非前兆震群变为前兆震群,说明遗漏地震的补充对前兆震群的判定结果产生了一定影响,对区域趋势判定具有重要意义。

本文对寻乌及邻区遗漏地震检测得到了大量的遗漏地震,丰富了区域地震目录资料,但是补充遗漏地震后 $M_L0.8$ 以下的地震数量仍与震级一频度拟合直线相差很远,说明检测出来的遗漏地震数量有限,由于研究区域监测能力不高,太小的地震波形信噪比较低,模板匹配滤波技术无法识别出太小的地震。寻乌震群遗漏地震比例比整个研究区域的比例高,主要原因是震群地震之间的互相关程度更高。总的来说,检测出的遗漏地震数量与监测能力、地震波形互相关程度和模板地震数量关系密切。

从本研究结果来看,检测到的遗漏地震有三类:一是震级较小,只有单台记录波形清晰;二是地震信号被淹没在噪声中,无法直接观测;三

是受前一个地震尾波的影响,波形相互重叠,难以区分。本研究占比最高的遗漏地震是第一类。总的来说,由于本研究区域监测能力不高,利用遗漏地震事件波形进行后续研究的作用有限,难以对遗漏地震做出精确定位,常用的做法是将遗漏地震事件震中置于互相关系数最大的模板地震震中位置^[7,20],这样在空间分布上起不到补充作用,对发震构造的研究意义不大。本研究对遗漏地震检测的主要作用是丰富地震目录资料,使地震活动性参数计算更加准确,有利于地震趋势研判。

致谢: 本文所用程序由天津市地震局谭毅培高级工程师提供,河北省地震局单连君高级工程师、安徽省地震局倪红玉高级工程师为本研究提供宝贵意见,在此表示感谢。

参考文献

[1] 李璐,王宝善,侯金欣. 模板匹配滤波技术在地震数据处理中的应用[J]. 中国地震,2017,33(1):14-22.

[2] Stevenson P R. Microearthquakes at Flathead Lake, Montana: a study using automatic earthquake processing[J]. Bull Seismol Soc Amer,1976,66(1):61-80.

[3] Earle P S, Shearer P M. Characterization of global seismograms using an automatic-picking algorithm[J]. Bull Seismol Soc Amer,1994,84(2):366-376.

[4] 刘希强,周彦文,曲均浩,等. 应用单台垂向记录进行区域地震事件实时检测和直达P波初动自动识别[J]. 地震学报,2009,31(3):26-271.

- [5] Schaff D P, Waldhauser F. Waveform cross-correlation-based differential travel-time measurements at the northern California Seismic Network[J]. *Bull Seismol Soc Amer*, 2005, 95(6):2446–2461.
- [6] Gibbons S J, Ringdal F. The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation[J]. *Geophys J Int*, 2006, 165(1):149–166.
- [7] Peng Z G, Zhao P. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake[J]. *Nat Geosci*, 2009, 2(12):877–881.
- [8] 倪红玉, 谭毅培, 邓莉, 等. 2014年金寨 $M_L3.9$ 震群序列遗漏地震检测及发震构造分析[J]. *中国地震*, 2021, 37(2):379–389.
- [9] 付裕, 黄晖, 徐鸣洁. 匹配滤波方法研究 2016 年意大利中部 $M_w6.0$ 地震的余震迁移[J]. *中国地震*, 2018, 34(4):621–631.
- [10] 侯金欣, 王宝善. 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震前后地震活动性[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(4):1446–1456.
- [11] 倪红玉, 刘泽民, 洪德全. 等. 2016 年安徽无为 $M_s3.0$ 震群序列发震构造与震后趋势研究[J]. *中国地震*, 2017, 33(3):365–373.
- [12] 单连君, 张新东, 王晓山. 2016 年 1 月 9 日河北怀来 $M_L3.4$ 震群发震构造分析[J]. *震灾防御技术*, 2017, 12(3):557–564.
- [13] 谭毅培, 曹井泉, 刘文兵, 等. 2013 年 3 月涿鹿微震群遗漏地震事件检测和发震构造分析[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(6):1847–1856.
- [14] 谭毅培, 邓莉, 曹井泉, 等. 2015 年河北滦县震群发震机理分析[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(11):4113–4125.
- [15] 王鹏, 郑建常. 山东乳山震群遗漏地震检测及震源区活动特征分析[J]. *中国地震*, 2021, 37(2):400–414.
- [16] 尹欣欣, 杨立明, 赵林林, 等. 青海门源 $M_s6.4$ 地震微震检测与目录完备性研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2018, 38(7):760–770.
- [17] 胡涛, 陈继锋, 杨立明, 等. 青海茫崖 5.0 级地震震源区微震检测与序列活动特征分析[J]. *地震工程学报*, 2020, 42(4):941–947.
- [18] 张雅楠, 李红谊, 张盛中, 等. 上海及邻区微震检测与定位[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(3):1113–1124.
- [19] 国家地震局科技监测司. 地震学分析预报方法程式指南[M]. 北京:地震出版社, 1990.
- [20] Peng Z G, Vidale J E, Ishii M, et al. Seismicity rate immediately before and after main shock rupture from high-frequency waveforms in Japan[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112(B3):B03306.