

田平, 蒋策, 陈瑛, 等. 基于模板匹配方法的微震自动检测在河源 M4.3 地震中的应用研究[J]. 华南地震, 2023, 43(4): 142–149. [TIAN Ping, JIANG Ce, CHEN Ying, et al. Application of Auto-detection of Microearthquake Based on Template Matched Filter Method in Heyuan M4.3 Earthquake [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(4): 142–149]

基于模板匹配方法的微震自动检测在河源 M4.3地震中的应用研究

田平^{1,2}, 蒋策^{1,2}, 陈瑛^{1,2}, 梁明^{1,2}

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070)

摘要: 基于广东新丰江水库区密集的测震台网, 利用波形匹配定位方法对库区内2018—2019年期间的地震波形进行分析, 发现在新丰江河源地区, 存在有大量未被记录的微震事件, 匹配定位方法适用于新丰江地区的微震事件检测。通过分析本地区地震事件的主要波形特征, 初步建立新丰江地区的微震模板事件库, 利用脚本实现地震事件文件与地震模板的自动转换, 达到对新丰江地区地震模板库的实时扩充的要求, 借助JOPENS的波形导出功能, 实现对地震连续波形文件的自动预处理, 基本达到基于模板匹配定位方法的自动检测功能的要求, 可将其应用于台网的地震目录完善工作。

关键词: 波形模板匹配; 地震检测; 地震目录

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)04-0142-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.04.18

Application of Auto-detection of Microearthquake Based on Template Matched Filter Method in Heyuan M4.3 Earthquake

TIAN Ping^{1,2}, JIANG Ce^{1,2}, CHEN Ying^{1,2}, LIANG Ming^{1,2}

(1. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, CEA, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Based on the dense seismic network in the Xinfengjiang Reservoir area of Guangdong, the template matched filter method is used to analyze the seismic waveform in the reservoir area from 2018 to 2019. It is found that there are a large number of unrecorded microearthquake events in the Heyuan area of Xinfengjiang, and the matched filter method is suitable for the microearthquake event detection in Xinfengjiang area. By analyzing the main waveform characteristics of seismic events in this area, the microearthquake template event database in Xinfengjiang area is preliminarily established. The script is used to realize the automatic conversion of seismic event files and seismic templates, so as to meet the requirements of real-time expansion of seismic template database in Xinfengjiang area. With the help of the waveform export function of JOPENS, the automatic preprocessing of

收稿日期: 2023-04-28

基金项目: 中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-2021034, 3JH-202201017); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(DQJB22Z01)联合资助。

作者简介: 田平(1987-), 男, 工程师, 主要从事地震监测与分析研究工作。

E-mail: tianping87@163.com

continuous seismic waveform files is realized, which basically meets the requirements of the automatic detection function based on the match and locate method, and can be applied to the improvement of the earthquake catalog completeness.

Keywords: Waveform template matching; Earthquake detection; Earthquake catalog

0 引言

广东省新丰江水库自1959年截流蓄水以来,水库区内的地震活动明显增加,并在1962年触发了6.1级地震,成为华南地区地震活动最为活跃的地区之一。为研究库区的地震活动特征及发震机制,广东省地震局在新丰江地区开展了大量的研究工作,不断加密测震台网,目前该地区的水平定位误差小于1千米,达到百米级别的定位能力^[1]。水库区密集的测震台站可以高质量记录到区域内发生的大量小震微震事件,对这些地震活动及其时空分布特征进行精确分析,完善地震目录,有利于对新丰江地区的发震断层结构的精细探测、水库蓄水对地震的触发作用以及地震预测等方面研究工作的开展。

波形模板匹配(matched filter)方法是一种有效的微震检测方法,该方法将模板地震的各分量波形与连续波形进行互相关计算,通过对互相关波形进行叠加来判断地震事件^[2-4]。波形模板匹配方法对微弱的地震信号敏感,即使在低信噪比的情况下也可以检测到震级极小的微震事件,广泛应用于地震前震、余震检测^[5-8]、触发地震^[9-10]以及非天然地震检测^[11-12]等方面。Zhang等^[13]基于波形模板匹配方法发展了匹配定位方法(Match and Locate, 简称M&L方法),在相关波形叠加前考虑待检测事件与模板事件之间的相对位置,在检测微震的同时,获取高精度的发震位置信息。Zhang等^[14]利用该方法检测了日本Ontake火山2007和2014年两次喷发前的密集微震活动,得到30余倍日本气象厅的地震目录结果;马晓静等^[15]将该方法应用于2014年6月河源地区的小震群事件研究

中,结果显示模板检测到的地震事件数目相较于地震目录结果增加了一倍;王志伟等^[16]利用匹配定位方法对2008年10月至2011年7月间重庆荣昌地区的微震进行检测与定位,将该地区地震目录的震级下限从 M_L 1.0降低至 M_L 0.3;Liu等^[17]在匹配定位方法的基础上,开发了GPU版本的匹配定位计算程序,显著地提高了模板匹配计算的速度;杜瑶等^[18]在水库区爆破事件的检测研究中,发现匹配定位方法可以有效区分不同类型的地震活动,进而提高对疑爆事件的识别率。

在本研究中,我们利用M&L方法检测新丰江河源地区的微震事件,通过数字地震台网中心数据处理系统建立适合新丰江地区的微震模板事件库,实现对地震台网记录的连续波形的自动检测,将其应用于台网的地震目录完善工作。

1 原理与方法

M&L方法不需要假定待检测地震与模板地震发生在同一位置。该方法将各台站分量上记录的模板波形与包含潜在地震信号的连续波形进行互相关计算,在对相关波形进行叠加前,考虑待检测地震与模板地震发生位置之间的差异,在模板地震周围的三维空间进行网格搜索,计算模板地震与每个假定待检测地震位置之间的走时差,在此基础上对互相关波形进行走时矫正和叠加,计算叠加后的互相关波形中的平均互相关(Cross-Correlation, CC)系数和信噪比(Signal-Noise ratio, SNR)。

两个距离很近的地震波形之间的归一化互相关可表示为:

$$NCC(t) = \frac{\int_{-T}^T O_1(\vec{r}_1, \tau) O_2(\vec{r}_2, \tau + t) d\tau}{\sqrt{\int_{-T}^T O_1(\vec{r}_1, \tau) O_1(\vec{r}_1, \tau + t) d\tau \int_{-T}^T O_2(\vec{r}_2, \tau) O_2(\vec{r}_2, \tau + t) d\tau}} \quad (1)$$

式(1)中, $O_1(\vec{r}_1, \tau)$ 、 $O_2(\vec{r}_2, t)$ 分别表示两个波形信号, \vec{r} 表示震源到台站的距离, T 表示所选取参考震相的窗长。

互相关系数与地震波形的相似度成正比,可

以作为事件检测的阈值标准。但仅使用较低互相关系数作为阈值时,尽管可以增加检测事件的数量,同时也会极大提高了事件的误检概率;信噪比的引用可以对其进行约束,在较低阈值标准设

定的情况下,检测到更多地震,同时避免增加误检概率。

M&L方法将平均互相关系数和信噪比二者联立作为地震事件的判断标准。当其值超过设定的相关系数阈值和信噪比阈值时,即判断为检测到地震事件。之后,根据所有台站三分量波形与参考事件波形的振幅比的中位数确定地震事件的震级。

2 研究内容

2.1 河源地区微震事件检测

2018—2019年期间,广东测震台网记录到新丰江地区发生的天然地震共2967件(图1),其中震级 $M_L \leq 2.0$ 的地震事件共2935件,震级 $M_L \leq 1.0$ 的地震事件共2625件,微震小震事件占新丰江地区地震事件总数的88%以上。

上述地震目录全部为人工浏览连续地震波形识别、编目得到,由于人工识别误差、震级未达到编目要求($M_L < 0.0$)等原因,还存在大量微震事件未被记录在内。本研究将地震目录中的部分地震事件作为地震模板,检测2018—2019年间新丰江河源地区的地震事件,将其与人工地震目录结果比较,测试M&L方法在新丰江河源地区的适用性。

M&L方法的检测结果依赖于地震模板的丰富程度,无法利用有限的模板识别出所有的微震事件。地震模板的种类和数量越丰富,检测的结果越丰富越接近真实情况。相应地,模板的大量使用也极大增加计算时间,进而降低检测效率。在使用模板匹配检测方法时,一般将研究时间范围内的所有事件进行筛选作为地震模板,对连续波形进行扫描。新丰江库区地震数量较多,为测试在该地区模板检测的能力及效率,对使用的地震模板进行了人为震级筛选。最终确定选定2019年间新丰江河源地区($23.700^\circ \sim 23.766^\circ \text{N}$, $114.57^\circ \sim 114.75^\circ \text{E}$),震级范围 $0.5 \leq M_L \leq 1.0$,共125条地震事件作为地震模板(图2中红点所示)。新丰江水库区测震台站较为密集,经过对台站数据的记录质量以及相对研究区域的位置分布,选取其中的10个台站(图4)记录的数据进行分析处理。M&L方法受地壳速度模型影响较小,本文采用PREM速度模型^[20],利用TauP工具包^[23]计算理论震相到时。微震事件的判断阈值参考采用9倍背景平均相关系数。另外,新丰江水库区的地震深度普遍较浅,深度分布比较集中,为提高检测效率,在地震检测中没有对震源深度进行搜索,固定深度为模板地震的深度。

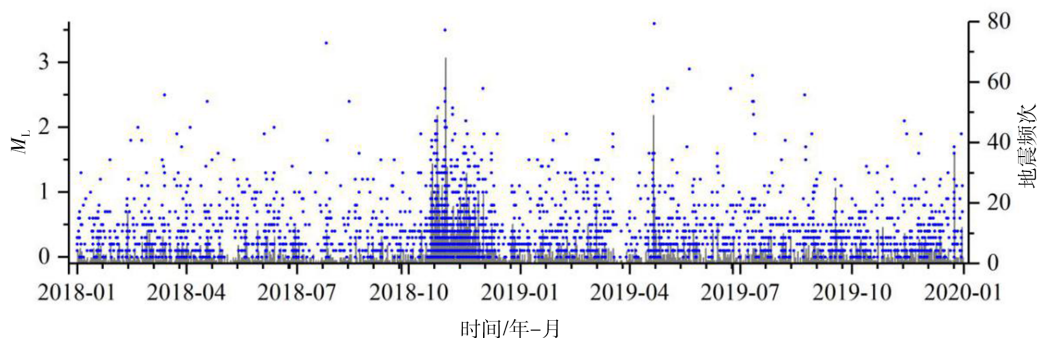
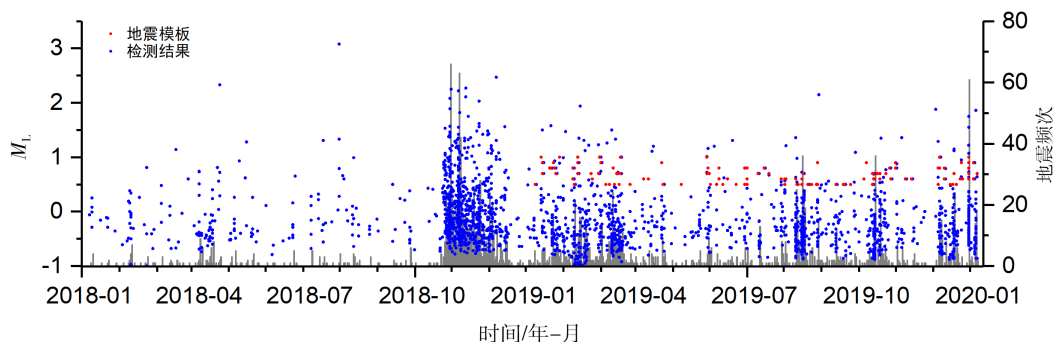


图1 2018—2019年间新丰江地区地震目录

Fig.1 Earthquake catalog in Xinfengjiang area from 2018 to 2019



红点表示采用的地震模板事件,震级范围 $0.5 \leq M_L \leq 1.0$;黑线所示为本研究模板匹配检测结果,震级范围 $-0.8 \leq M_L \leq 3.08$

图2 2018—2019年间利用模板检测得到的地震事件M-T分布结果

Fig.2 M-T distribution results of earthquake events obtained by template detection from 2018 to 2019

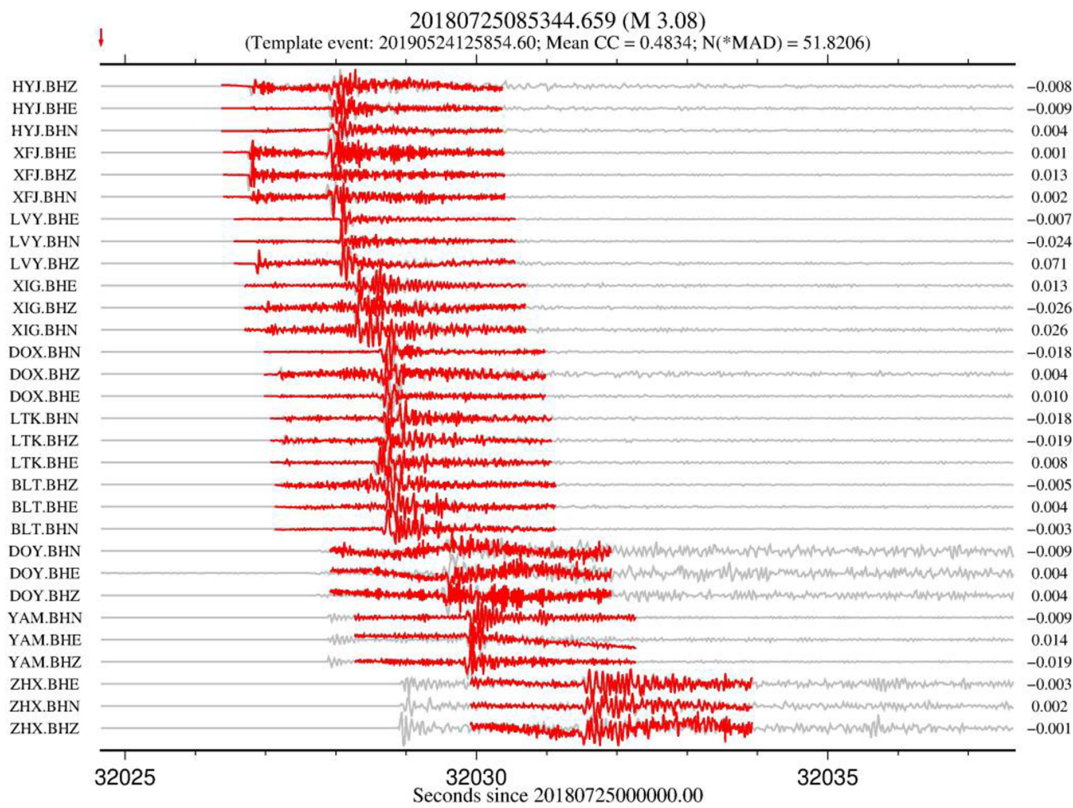
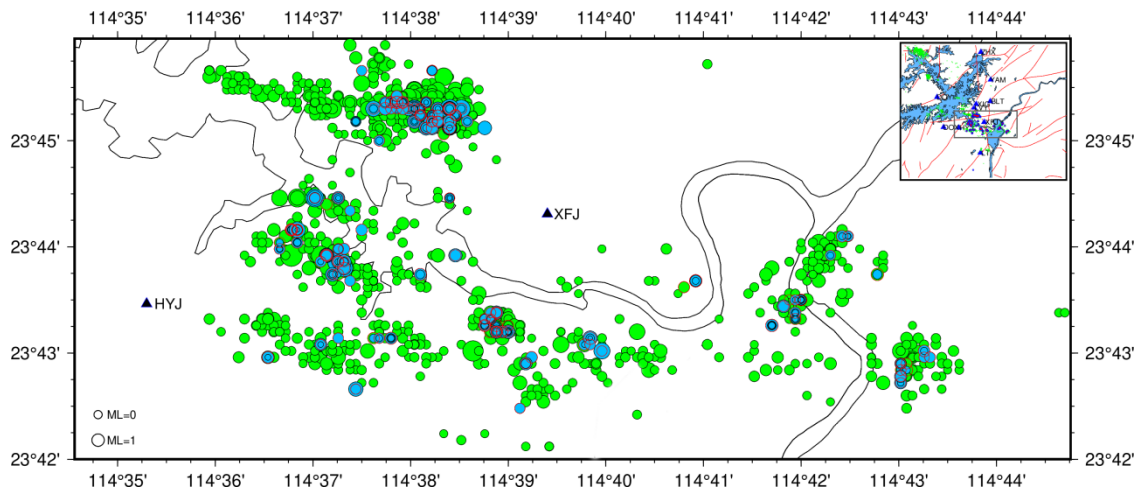


图3 模板检测结果示例(最大震级为 M_L 3.08,发震时刻2018-07-25 08:53:45)

Fig.3 Example of template detection results (the maximum magnitude is M_L 3.08, which occurred at 08:53:45 2018-07-25)

通过对连续波形的模板匹配扫描,共检测到2018—2019年间新丰江河源地区的地震事件共2160条(图2),最大震级 M_L 3.08(图3),最小震级 M_L 0.8。对检测结果的震级分布进行统计分析,震级 $0.0 \leq M_L \leq 1.0$ 的微震事件共625条,占地震事件总数的28.9%;震级 $M_L < 0.0$ 的地震事件共1438条,占地震事件的66.5%。检测到的地震事件在空间上

分布在地震模板的发震位置附近。2018—2019年地震目录结果(图4)显示新丰江河源区域记录地震共1764件,震级 $0.0 \leq M_L < 0.5$ 的微震事件共1163条,震级 $0.5 \leq M_L \leq 1.0$ 的微震事件共425条,震级 $1.0 \leq M_L \leq 2.0$ 的地震事件共159条, $M_L > 2.0$ 的地震事件17条。



绿色实心圆为2018—2019年间地震分布(广东数字地震台网)

图4 地震模板事件(红色)得到的模板匹配检测(蓝色)地震事件的分布

Fig.4 Distribution of seismic events(blue) from template matching detections obtained from seismic template events(red)

上述仅利用少量震级 $0.5 \leq M_L \leq 1.0$ 的地震模板, 对 2018–2019 年间新丰江河源地区的地震事件的检测结果表明, 地震模板事件全部被自检出, 相关系数接近于 1.0。将这些事件进行比较, 发现检测结果的发震时刻和震级与编目结果具有较小的差异, 具有较高的准确度。但是, 由于缺少 2018 年 $0.5 \leq M_L \leq 1.0$ 的地震模板, 对 2018 年期间检测出的震级 $0.5 \leq M_L \leq 1.0$ 的地震事件仅 92 件, 少于广东台网编目结果 300 条, M&L 方法的检测结果受地震模板的丰富程度影响较大, 仅利用部分模板无法对所有地震事件进行检测。

2.2 检测程序改进

上述的模板检测结果表明, M&L 方法适用于新丰江水库区的微震检测, 而且可以对检测到的微震事件进行定位以及震相标记, 可将其应用于测震台网的地震编目工作中。在数字台网中心的服务器上软件部署, 利用数字台网中心数据处理软件系统 JOPENS^[21–22] 获取地震事件以及连续波形, 实时扩充地震模板库, 并且对其调用在连续波形上自动进行微震检测, 达到完善地震目录的目的。

根据 M&L 模板匹配计算程序的处理流程(图 5), 为达到对地震波形的自动检测的要求, 需要改进的主要部分为流程中最主要的输入部分: 即“连续波形”和“地震模板”。

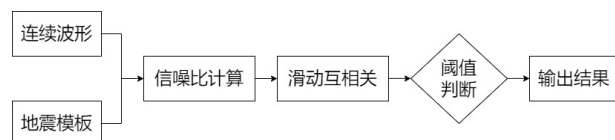


图5 模板检测程序的流程

Fig.5 Process of template detection program

对于“连续波形”部分, 通过数据处理系统获取到连续波形数据后, 需要对其进行格式转换, 完成波形的拼接、滤波以及降采样等数据处理工作。我们利用 JOPENS 的数据导出功能, 将其设置为定时将新入库的连续波形数据导出为 seed 文件, 保存在台网中心服务器端。检测程序部署在信息中心机群, 利用脚本从台网中心服务器下载波形数据 seed 文件, 并自动将其转换为 sac 格式数据文件; 对连续波形进行 1~20 Hz 的滤波以及降采样处理工作, 统一命名放置于 M&L 检测程序内部的 Trace 目录, 每日对其进行更新。

对于“检测模板”部分, 台网编目报告的地

震事件 seed 文件以及地震目录 catalog 文件经数据处理系统导出上传至中心机群, 放置于目标目录下。系统定时在该目录下进行搜索, 发现地震事件 seed 文件并将其转换为 sac 格式数据文件, 对事件波形进行 1–20 Hz 的滤波以及降采样处理, 保证与连续波形数据格式相同。经上得到的新的地震模板文件, 统一命名放置于 M&L 检测程序内部的 Template 目录, 实时对地震模板库进行更新。

上述利用震级范围 $0.5 \leq M_L \leq 1.0$ 的地震模板进行检测的结果表明, 仅利用部分地震模板不能检测出潜在的所有地震, 地震模板的丰富程度对检测结果产生非常大的影响。在保证检测效率的同时, 为了检测尽量多的微震事件, 在部署自动检测软件中, 将待检测长度为 24 小时的连续波形包括其前 24 小时以及后 24 小时, 共 72 小时内台网编目的所有地震事件作为模板, 对连续波形进行检测。若此时间段内不存在地震事件, 自动将调取时间范围进行延长; 另一方面, 系统也可随时根据需要调用数据库中的其他地震模板, 以保证充足的地震模板进行微震检测。自相关系数阈值等参数设置采用与上文相同设置。

2.3 河源 M 4.3 地震余震检测

基于对程序的上述配置, 重新检验其在新丰江地区地震检测中的适用性。2023 年 2 月 11 日 10 时 41 分广东省河源市源城区发生了 M 4.3 地震, 震后发生一系列余震, 广东数字地震台网中心的编目结果显示, 截至 2 月 12 日 0 时, 共记录到该地区余震 171 件, 其中, $0 \leq M_L < 1.0$, 143 件; $1.0 \leq M_L < 2.0$, 23 件; $M_L \geq 2.0$, 5 件; 最大余震 M_L 3.4。

利用上述改进的程序配置, 对其在该时间段内对连续波形的自动检测结果进行分析。结果显示, 截至 2023 年 2 月 12 日 0 时, 自动检测配置共检测到河源 M 4.3 地震的余震 265 件, 与人工余震目录相比, 新检测到的地震事件中, 有 15 件事件的震级在 M_L 0.0 左右, 最大的检测震级为 M_L 0.64; 其余震级均在 $M_L < 0.0$ (图 6), 最小的震级为 M_L -0.65。

地震目录记录的 171 件地震事件, 共检测出其中的 167 件, 经人工对波形校对发现, 未检测出的 4 件地震事件均为双震事件, 震级在 $0 \leq M_L < 1.0$ 范围。通过对模板的检查发现, 双震中的两起事件发生间隔时间过短(图 7), 生成的模板同时包含了两起事件, 在连续波形计算过程中对另一事件无

法检测, 导致对双震事件的检测失效。

将地震模板中被重新检测出中被地震目录收录的167件地震事件的发震时刻、震级与人工结果

进行比较(图8), 发现大部分震级与人工编目的震级结果相近, 差值一般小于 M_L 0.5; 发震时刻与人工编目的发震结果相近, 差值小于1.0 s。

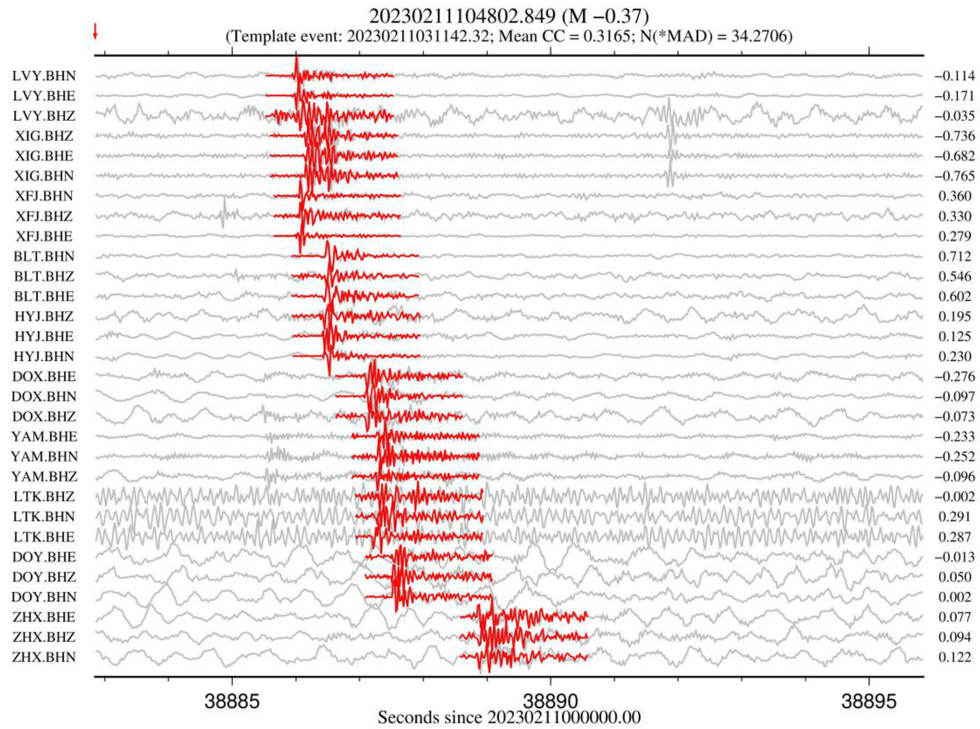


图6 检测出的地震事件(M_L 0.37)

Fig.6 One detected earthquake event with magnitude of M_L 0.37

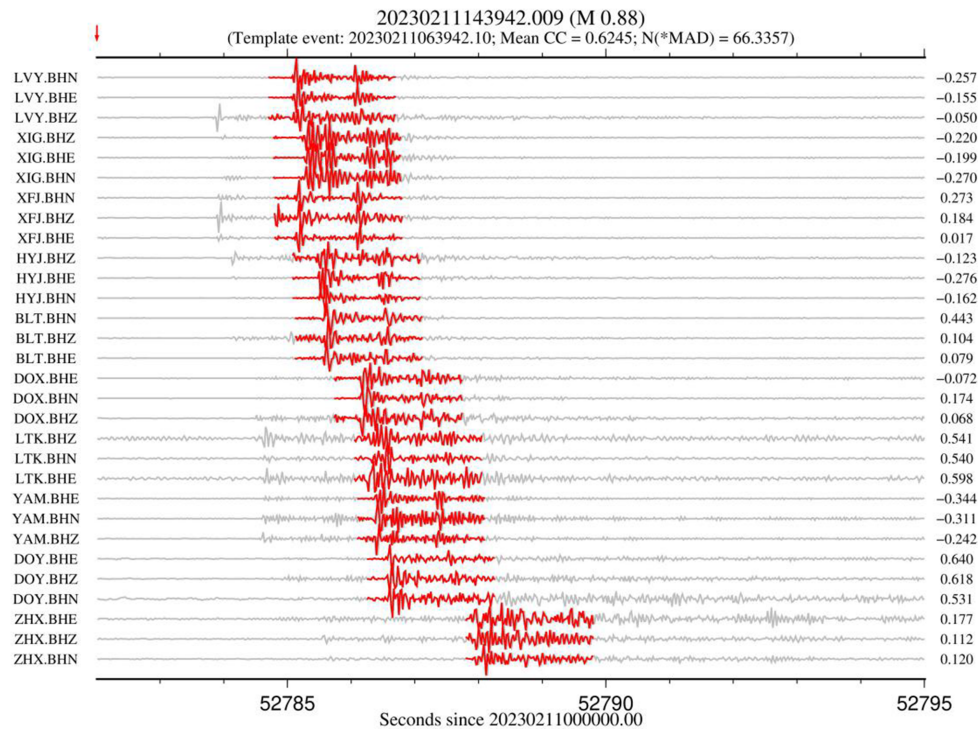


图7 未检测出的双震事件

Fig.7 Undetected double-earthquake event

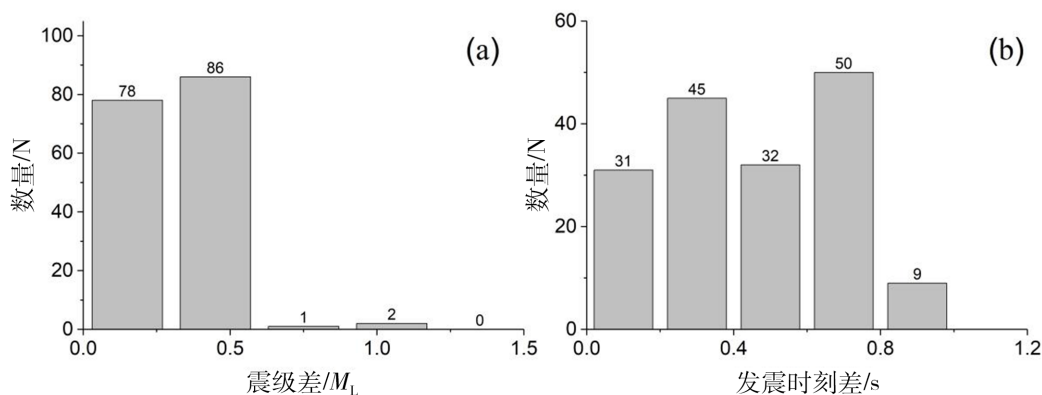


图8 编目报告与检测结果中同事件的震级(a)与发震时刻(b)的差值统计比较

Fig.8 Statistical comparison of the difference between the magnitude(a)and the occurrence time(b)of the same event in the catalog report and the detection results

3 讨论

3.1 双震事件检测

利用上述配置对河源 $M 4.3$ 的余震自动检测结果显示, 多个双震事件没能被扫描识别出来。经过对地震目录的分析, 发现这几次双震事件发生的时间间隔很短, 普遍在 2 s 以内。由于系统的配置未对地震事件进行筛选, 全部处理为地震模板并应用于模板匹配, 导致部分单个地震模板内包含了多次地震事件。在对波形进行扫描时, 直接将其与连续波形进行滑动互相关并输出匹配结果, 当双震的震级差比较大时, 输出为扫描时间窗内震级较大的地震事件。

在利用 M&L 方法进行匹配定位时, 一般需要对地震模板进行筛选, 尤其是多个地震事件的发震时间间隔较近, 前一事件的 s 震相淹没在后一事件更大的 p 震相中的情况。尽管在处理地震模板时, 可以控制地震模板的波形长度, 在一定程度上消除另一事件的影响, 但这也可能导致其他地震模板的长度过短, 不能包含所有必需的震相信息; 另外, 双震事件作为模板也将导致检测出的事件的定位结果和震级产生较大的误差, 双震以及多地震事件不适合作为地震模板进行匹配定位检测。在对地震模板库进行自动更新, 需结合地震目录, 剔除使用发震间隔较近、且发震位置也较近的地震事件。

3.2 台网编目工作中的适用性分析

本文与前人^[15]在新丰江河源地区的微震检测

中, 对于平均互相关系数的参数设定存在差异, 这种差异对微震的检测结果数量产生影响。在不同的研究区域, 需要对研究区域内拟使用的地震模板进行自检来估计平均背景相关系数, 以此确定检测标准。数字台网中心利用 M&L 方法对不同区域的微震进行检测时, 需要重新确定检测标准以保证检测质量。

M&L 方法在地震模板处理中, 利用 TauP 工具包^[23]根据给定地壳速度模型标记理论震相信息截取地震模板。通过计算模板事件与待检测事件的可能位置在同一台站上的走时差来进行定位计算, 对模型的依赖较小。本文利用 PREM 模型生成的地震模板, 发现其震相标注与实际震相的到时差异较大, 这对于检测微震以及对其进行定位的结果没有影响。但是, 地震目录包含精确的震相标记信息, 可以利用这些震相信息替代理论到时标记, 对地震模板进行截取、标记处理, 在匹配定位检测的同时, 输出比较准确的震相信息, 更加适合地震编目的完善工作。

另外, M&L 程序已经发布 GPU (Graphics Processing Unit-Based) 版本, 该程序的计算速度提高到 M&L 程序的 4.5 倍, 同时在地震模板的各分量波形上引入权重系数显著提高检测结果的稳定性^[13]。这可以在一定程度上缓解由于地震模板过多导致的检测效率过低的问题, 适合台网处理大量微震检测工作。

4 结论

本文利用匹配定位 M&L 方法, 通过对匹配定位程序与数据处理系统软件进行配置和参数设置,

在新丰江河源地区建立地震模板数据库,进行微震事件自动检测,并对河源M4.3地震震后余震的自动检测结果进行分析,得到以下结论:

(1)在新丰江地区,存在有大量未被记录的微震事件,匹配定位方法可以准确地对这些事件进行检测以及定位;

(2)利用数据处理系统软件将数据库内的地震事件自动转换为地震模板,建立新丰江地区的地震模板库并对其进行实时扩充,方便在微震检测中进行调用;

(3)根据对匹配定位程序的配置和参数设置,检测出河源M4.3地震震后大量 $M_L < 0.0$ 的地震事件,可以达到完善地震目录的要求。

致谢:感谢张森博士提供地震模板匹配程序(Match and Locate),本文部分图件使用GMT绘制。

参考文献

- [1] 林庆西,梁明,杨选,等.广东地震台网水平定位能力评估[J].华南地震,2020,40(04):49-55.
- [2] 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.
- [3] Shelly D, Beroza G, Ide S. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms[J]. Nature, 2007, 446(7133): 305-307.
- [4] Peng Z, Zhao P. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(12): 877-881.
- [5] Meng X, Peng Z, Hardebeck J L. Seismicity around Parkfield correlates with static shear stress changes following the 2003 M_w 6.5 San Simeon earthquake[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, 118(7): 3576-3591.
- [6] Meng X, Peng Z. Seismicity rate changes in the Salton Sea Geothermal Field and the San Jacinto Fault Zone after the 2010 M_w 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake[J]. Geophysical Journal International, 2014(197): 1750-1762.
- [7] Kato A, Nakagawa S. Multiple slow-slip events during a foreshock sequence of the 2014 Iquique, Chile M_w 8.1 earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 2014(41): 5420-5427.
- [8] Wu C, Meng X, Peng Z, et al. Lack of Spatio temporal localization of foreshocks before the 1999 M_w 7.1 Düzce, Turkey, Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014(104): 560-566.
- [9] van der Elst N J, Savage H M, Keranen K M, et al. Enhanced remote earthquake triggering at fluid-injection sites in the Midwestern United States[J]. Science, 2013(341): 164-167.
- [10] Walter J L, Dotray P, Frohlich C, et al. Earthquakes in Northwest Louisiana and the Texas-Louisiana Border Possibly Induced by Energy Resource Activities within the Haynesville Shale Play[J]. Seismological Research Letters, 2016(87): 285-294.
- [11] Zhang M, Wen L. Seismological evidence for a low-yield nuclear test on 12 May 2010 in North Korea[J]. Seismological Research Letters, 2015, 86(1): 138-145.
- [12] Zhao X, Feng W, Tan Y, et al. Seismological investigations of two massive explosions in Tianjin, China[J]. Seismological Research Letters, 2016(87): 826-836.
- [13] Zhang M, Wen L. An effective method for small event detection: match and locate (M&L)[J]. Geophysical Journal International, 2015, 200(3): 1523-1537.
- [14] Zhang M, Wen L. Earthquake characteristics before eruptions of Japan's Ontake volcano in 2007 and 2014[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(17): 6982-6988.
- [15] 马晓静,吕作勇,龚萱,等.河源地区小震群的检测与定位[J].华南地震,2018,38(01):39-46.
- [16] 王志伟,王小龙,马胜利,等.重庆荣昌地区注水诱发地震的时空分布特征[J].地震地质,2018,40(3):523-538.
- [17] Liu M, Li H, Zhang M, et al. Graphics processing unit-based match and locate (GPU-M&L): an improved match and locate method and its application[J]. Seismological Research Letters, 2020, 91(2A): 1019-1029.
- [18] 杜瑶,阮祥,戴仕贵,等.利用模板匹配技术识别大岗山水库库区爆破事件[J].地震地磁观测与研究,2022,43(1):42-50.
- [19] 张森.地震定位与检测[D].合肥:中国科学技术大学,2015.
- [20] Dziewonski A M, Anderson D L. Preliminary reference earth model[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1981, 25(4): 297-356.
- [21] 广东省地震监测中心.数字地震台网中心数据处理软件系统 JOPENS6.0 用户手册[R].广州:广东省地震局,2016.
- [22] 广东省地震监测中心.数字地震台网中心数据处理软件系统 JOPENS6.0 人机交互 MSDP 使用指南[R].广州:广东省地震局,2017.
- [23] Crotwell H P, Owens T J. The TauP Toolkit: Flexible seismic travel-time and raypath utilities[J]. Seismological Research Letters, 1999(70): 154-160.