

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(1): 39–46. [MA Xiaojing, LYU Zuoyong, GONG Xuan, et al. Detection and Location of a Small Earthquake Sequence in Heyuan [J]. South China journal of seismology, 2018, 38(1): 39–46.]

河源地区小震群的检测与定位

马晓静^{1,2,3}, 吕作勇^{1,2,3}, 龚萱^{1,2,3}, 姜喜姣^{1,2,3}

(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;
3. 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室(筹), 广州 510070)

摘要: 2014年6月16日至20日, 广东河源发生了一系列微震事件。以广东台网观测报告中 M_L 1.0级以上的61个事件波形为模板, 利用匹配定位方法在连续波形中搜索检测地震。结果检测到996个地震, 为模板事件的16倍, 比地震目录给出的469个事件多一倍, 检测震级范围为 M_L -0.5~1.3, 并将地震目录的完整性震级从 M_L 0.1降到了-0.2, 显著丰富了地震目录的完整度。对检测到的地震事件, 进一步通过双差精定位, 更好的揭示了该震群的展布形态和发震构造。

关键词: 波形匹配; 地震检测; 连续波形; 地震目录; 双差定位; 河源地震

中图分类号: P315.2 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2018) 01-0039-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.01.004

Detection and Location of a Small Earthquake Sequence in Heyuan

MA Xiaojing^{1,2,3}, LYU Zuoyong^{1,2,3}, GONG Xuan^{1,2,3}, JIANG Xijiao^{1,2,3}

(1. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, CEA, Guangzhou 510070, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Project, Guangzhou 510070, China)

Abstract: From June 16th to 20th in 2014, a series of small earthquakes occurred in Heyuan, Guangdong province. Utilizing 61 events with $M_L \geq 1.0$ in the Seismic Catalog of Guangdong Province as templates, the paper searched for earthquakes in the continuous waveforms by using the Match&Locate method. The 996 events were detected with a magnitude range M_L -0.5~1.3, which are 16 times of the template events and 2 times of the catalog events. The minimum complete magnitude is lowered from M_L 0.1 to -0.2, and the seismic catalog is significantly enriched. After relocation using the HypoDD method, the detected events displayed the distribution of earthquake swarm better.

Keywords: Waveform matching; Earthquake detect; Continuous waveform; Earthquake catalog; HypoDD relocation; Heyuan earthquake

收稿日期: 2017-01-23

基金项目: 波形互相关技术及“重复地震”方法在广东地区的初步应用(中国地震局测震台网青年骨干培养专项: 20140316)

作者简介: 马晓静(1987-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事地震监测工作。

E-mail: maxiaojing07@gmail.com.

0 引言

地震目录是地震学研究的基础资料,编目事件的完整和准确性,对后续研究具有直接的影响^[1]。目前我们的正式地震目录是通过编目人员从连续波形中识别和分析产出的。有经验的编目工作者可以产出十分可靠的目录资料,但对于一些微小的地震事件,特别是淹没在较大地震尾波中的地震、短时间内从发波形交叠的震群、地震噪声较大或存在其他干扰的情况,会造成部分或全部震相难以清晰的识别,使地震目录会遗漏某些地震。随着地震观测技术和条件的提高,检测遗漏地震、完善地震目录就成为一个值得关注的问题。

前人已经发展了许多地震自动识别方法,有基于震相特征识别的,也有基于波形特征识别的,如广泛使用的长短时间平均(STA/LTA)^[2]、震源扫描叠加(SSA)^[3-4]、波形模板匹配(matched filter)^[5-7]、基于重复地震概念的相关性检测方法^[8]等。其中,基于波形相关性分析的检测方法被证实实在微震检测上具有很大的优势,在微小地震的识别上表现出更强的能力,可对传统余震目录进行有效的补充^[9-11]。

其实,波形相关性分析在地震学中一直有着广泛的应用,一般来说,可以分为对震相波段做相关分析、对事件对进行相关性分析和对连续波形进行相关分析,常见的应用分别有双差定位、重复地震识别和地震事件自动检测等^[12-14]。

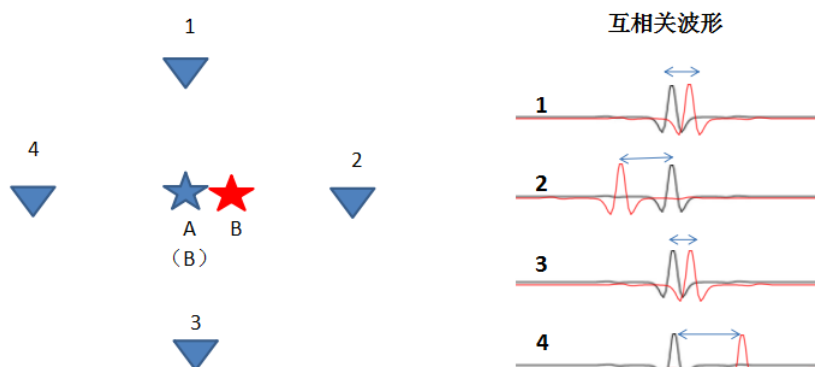
张淼等在匹配滤波技术的基础上发展出了匹配定位方法(Match&Locate Method,简称 M&L 方

法),在相关波形叠加前考虑了微震与模板之间的位置差,因此,M&L方法不仅对微震检测更加有效,而且能同时获得高精度的地震位置信息^[15]。本文尝试将该方法应用于广东河源地区的一个震群,自动检测地震事件,从而补充地震目录中遗漏的微小地震。

1 原理与方法

与匹配滤波方法类似的,M&L方法使用模板事件,通过模板事件与连续波形的互相关来检测微小地震事件。主要的不同点是,M&L方法在检测的过程中通过空间位置搜索,对检测事件进行相对定位。

步骤(图1):①选择模板事件并确定其位置。②在每个台站分量上,对包含主震相(一般取振幅最大的震相,如地方震的S震相)的模板事件波形和连续波形进行滑动互相关。③将以模板事件位置为中心的三维区域网格化,作为可能的检测事件位置,计算每个台站的模板事件和检测事件的参考震相的走时差。④对每个台站,每个可能位置和模板位置的走时差,与模板震相时间相减,并将互相关波形叠加,计算叠加后的波形中的平均相关系数(CC)和信噪比(SNR)。⑤当互相关图的平均CC和SNR超过规定阈值时,认为事件被检测到,并保存其位置和震级。该事件的位置为CC最大值对应的网格点位置,震级为检测事件与模板事件在所有台站分量的参考震相的峰值振幅比中位数。



五角星 A 代表模板地震,五角星 B 代表待检测地震,三角形代表地震台站。

右图黑色和红色曲线分别代表 A、B 事件在四个台站的波形记录。

图1 M&L方法示意图^[16]

Fig.1 Schematic diagram of the M&L method^[16]

地震检测的标准是基于叠加相关波形的平均相关系数和信噪比来确定的。当平均相关系数和左右信噪比超过了所设定的相关系数阈值和信噪比阈值时,认为检测到了一个地震。信噪比阈值 R_0 取决于某时刻的平均相关系数 $C(t)$, 背景平均相关系数 \overline{C}^0 和信噪比因子 α 。而信噪比因子是关于平均相关系数的函数。左右信噪比阈值具体定义如下:

$$R_l^0(t)=\alpha_l \frac{C(t)}{\overline{C}_l^0}, R_r^0(t)=\alpha_r \frac{C(t)}{\overline{C}_r^0} \quad (1)$$

\overline{C}_l^0 和 \overline{C}_r^0 为左右平均背景相关系数, 这里取所有模板自检时的左右平均相关系数。检测的原则是: ① 当平均相关系数较大时, 只用相关系数阈值做判断; ② 当平均相关系数较小时, 相关系数阈值和信噪比阈值同时使用。

2 研究区域和背景资料

广东河源新丰江水库地区在 1959 年水库蓄水后中小地震频发, 曾于 1962 年发生最大 6.1 级地震。该地区的地震资料丰富, 台站分布较密集, 地震监测能力较强, 所以选取该地区作为研究样本。

新丰江区域台网共有 14 个地震台站, 去除其中的 4 个短周期地震计, 选取 10 个地震台的数据记录进行分析处理。计算过程中使用的是华南地区的地壳速度模型(表 1)。

3 应用实例

3.1 较小样本数据计算

2014 年 6 月 16 日起, 河源地区发生一系列地震, 持续数天后于 6 月 20 日发生 M_L 3.0 级地震。《广东省测震台网地震观测报告》给出此次震群发生地震近 600 次。地震震级和每日发震个数的时序图如图 2 所示。

表 1 地壳速度模型

Table 1 Velocity model of the crust

深度/km	$V_P/(km \cdot s^{-1})$	$V_S/(km \cdot s^{-1})$
0.00	6.01	3.55
21.4	6.01	3.55
21.4	6.88	3.93
32.4	6.88	2.93
32.4	7.98	4.58
77.5	8.01	4.62

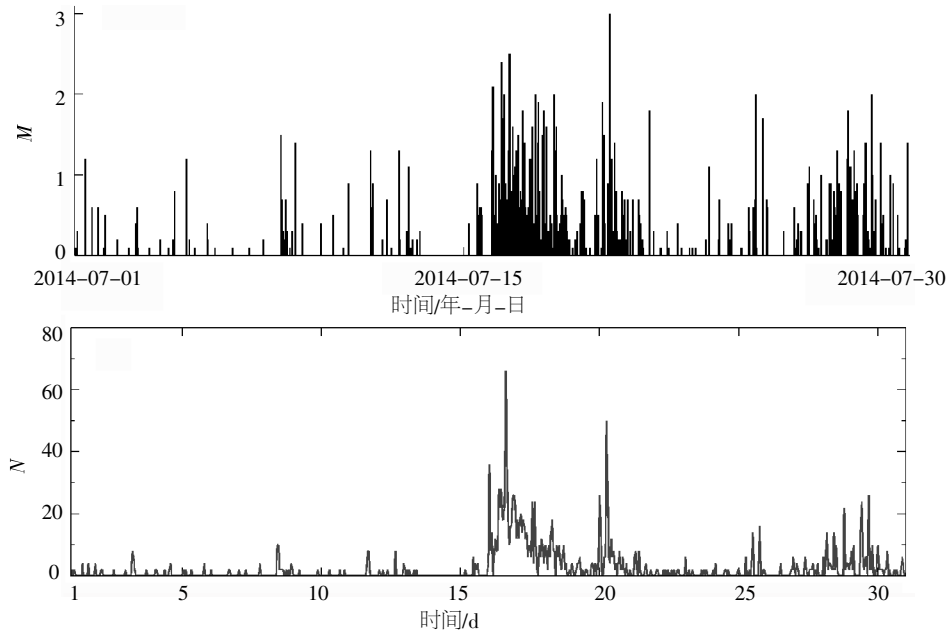


图 2 地震震级和每日发震个数的时序图

Fig.2 The magnitudes-time plot in June and daily number of earthquakes in the catalog

我们先选取一个发震密集的小时间段作为研究范围, 取 16 日 15:00~16:00 之间, 台网编目报告中的所有地震作为模板事件, 共 34 个, 震级范围为 M_L 0.1~2.5。

首先确定事件的检测标准。将 34 个模板事件进行自相关, 并将波形叠加(图 3), 得到的最大相关系数左右时间窗口内的平均背景相关系数, 最大为 0.014。为简化计算并降低误检概率, 取平均

互相关系数 CC 大于 0.3 (约 21 倍平均背景相关系数) 为检测阈值, 即当 CC 大于 0.3 时, 认为事件被检测到。

以观测报告中的震相和定位分析结果为依据, 利用所选的 10 个台站记录数据, 将模板事件与 15:00~16:00 的连续波形进行 1~20 Hz 滤波。以 S_g 震相为主震相, 取模板事件的 S_g 到时前 1 s、后 3

s 时间窗的波形, 与连续波形作滑动互相关。图 4 给出了一个检测事件的例子。

最终, 除模板事件外, 另外检测到 63 个事件, 最小震级 $M_L -0.3$, 最大震级 $M_L 0.9$ 。经人工浏览检查波形, 没有误判情况, 即检测到的事件确定为地震, 这也说明数据处理的参数和阈值设置比较合理、可靠。

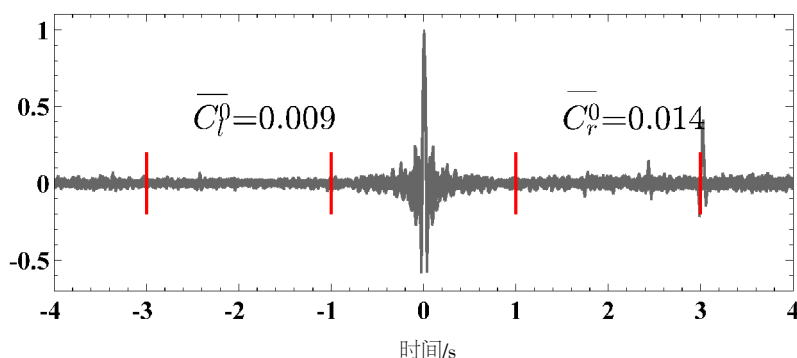
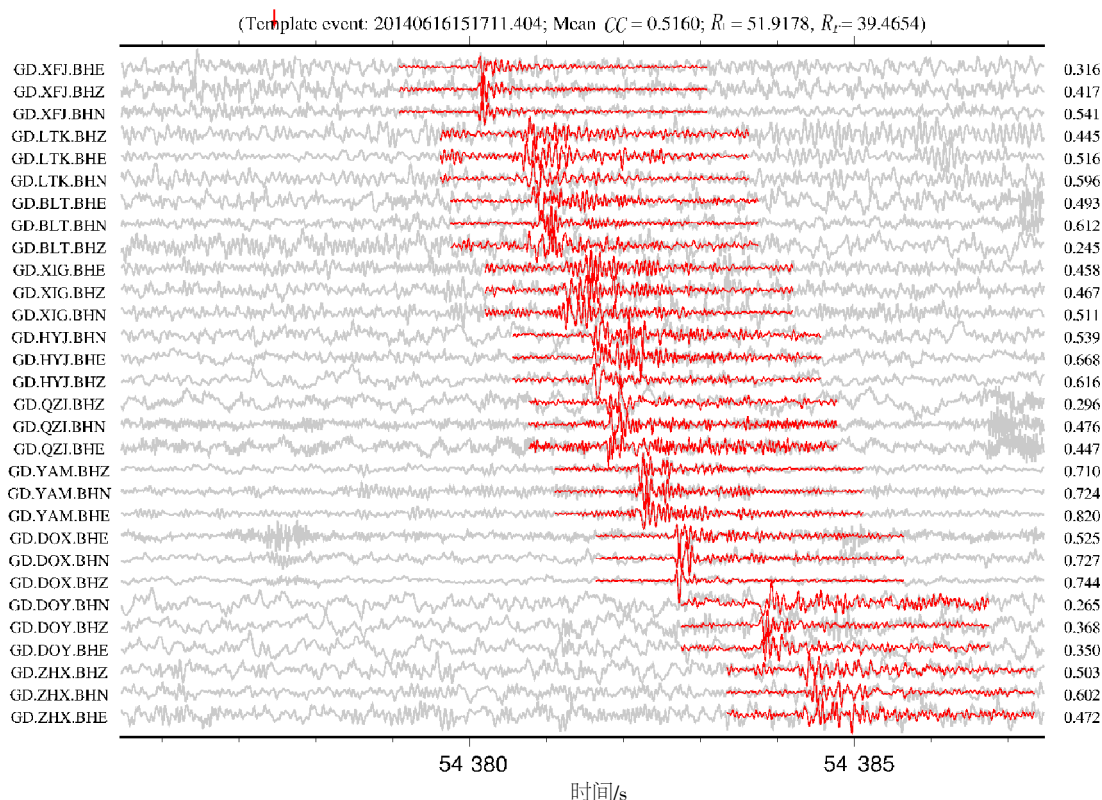


图 3 34 个模板事件自检时的叠加互相关波形, 及得到的左右平均背景相关系数

Fig.3 Stacked self-correlation waveforms of the 34 template events and the calculated mean background correlation coefficients



红色为模板事件波形, 灰色为连续波形。红色箭头指示出地震的发生时间。每条波形的左右两端都分别标明了台站名和相关系数。

图 4 检测到的 $M_L -0.3$ 级地震的波形图。

Fig.4 Waveforms of a detected events with a magnitude of -0.3 (gray traces) and the template event

3.2 较大样本数据计算

为了更好的探索 M&L 方法的用处和效果, 我

们再取一个较大范围的数据样本进行计算。

选取 2016 年 6 月 16 日至 19 日的河源地区编目事件, 选取范围如图 5 所示。共 469 个事件,

震级 M_L 0.0~2.4。

首先选取 16~19 日编目报告中震级 M_L 1.0 级以上的地震作为模板事件，剔除双震事件后共有 61 个，在连续波形中进行匹配搜索，得到 996 个检测事件。相比编目报告中的 469 个事件增加了一倍多。其中最小检测震级 M_L -0.5，最大 M_L

1.3。

将检测到的事件与编目报告中的事件分别作 Gutenberg–Richter 关系曲线(图 6)。用蓝色和绿色直线分别指出两者的完整性震级，大约为 M_L -0.2 和 0.1。与编目报告相比，检测事件的完整性震级更低，地震目录更加完整。

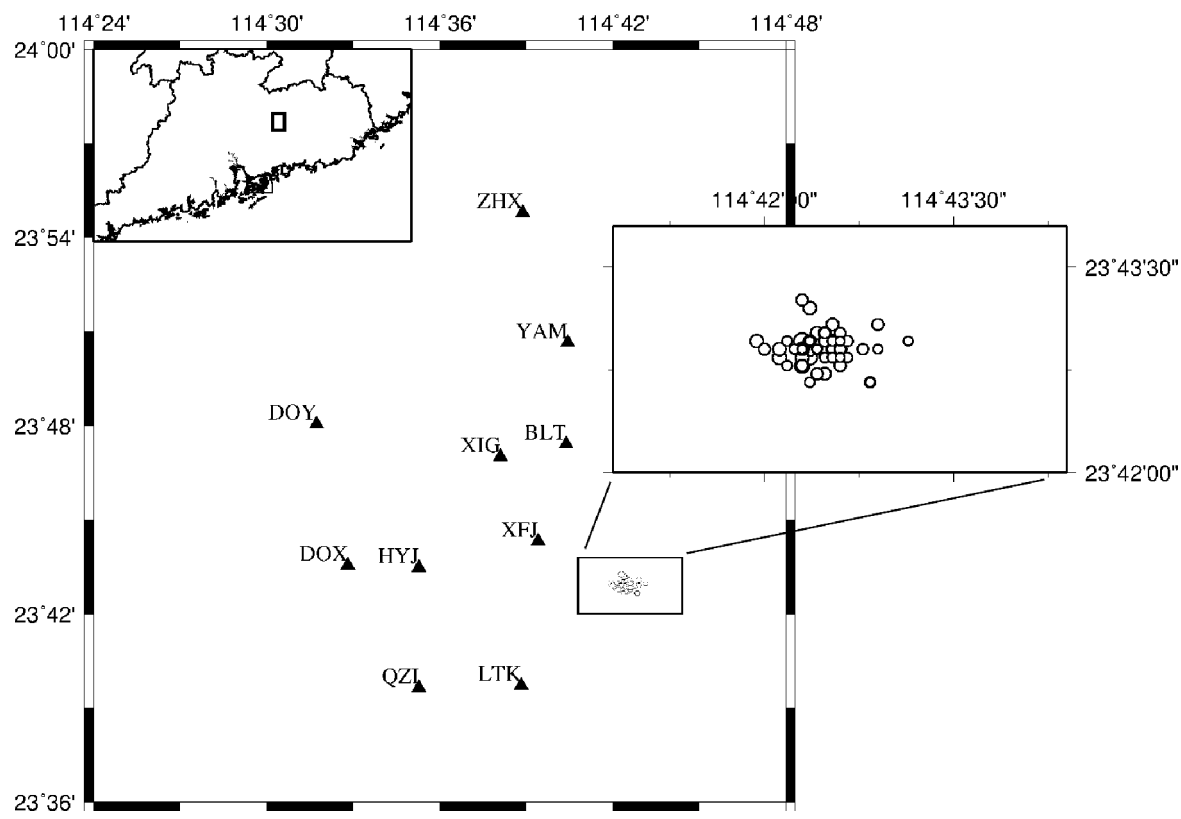
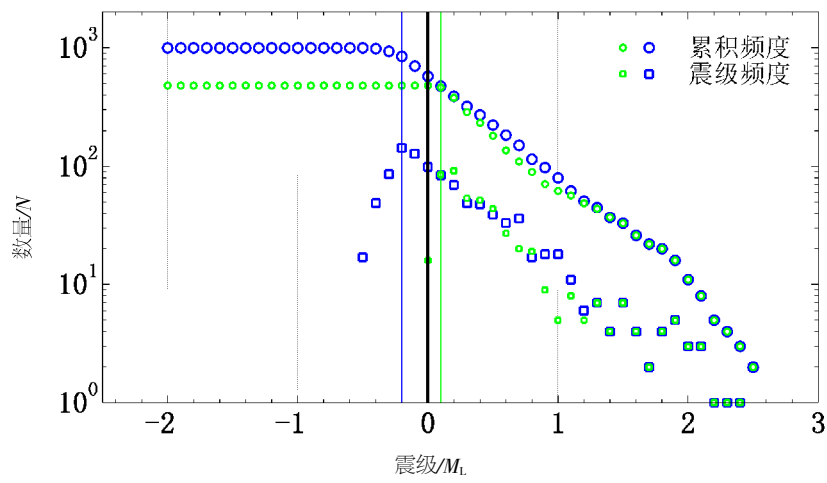


图 5 台站与地震目录事件分布图
Fig.5 Distribution of the stations and earthquake catalog events



事件：绿色；检测事件：蓝色；绿色和蓝色直线分别示意出两者的完整性震级。
图 6 编目报告中事件与检测事件的震级频度和累积频度曲线。

Fig.6 The cumulative and non-cumulative magnitude–frequency relationship of the catalog and detected events are shown

目前广东省级台网对于地震编目的要求是, M_L 0 级以上的地震事件需要进行编目, 用 M&L 方法检测到的事件基本可以满足该要求, 而且比人工编目的地震目录更加完整。

在 M&L 方法检测到的 996 个事件中, 有 412 个在编目报告中收录, 将这些事件进行比较(图 7a、b), 发现编目报告与 M&L 方法中事件的发震时刻和震级差绝大部分在 0.2 s 以内, 检测事件的发震时刻与震级具有较高的准确度。对另外 584 个 M&L 方法检测到的新事件的震级进行统计(图 7c), 主要分布在 M_L 0 级附近, 尤其是 0 级以下; 对 M_L 大于 0.4 的事件进行人工检查发现, 这些事件大多伴随双震或多震, P 波甚至 S 波淹没在上一个地震的尾波中, 无法识别。

为了解不同模板事件所起的作用大小, 将 61 个模板事件与检测到事件的数目和震级分布作比较, 结果如图 8 所示, 整体来看, 模板事件的震级越大, 检测到的事件数越少, 这也符合地震事件的

GR 关系。另一方面, 检测事件的震级下限也随模板事件震级增大而增大, 这应该受地震的频谱特征不同影响, 因为微震的频谱在高频端更加集中, 而较大地震的 S 波包含更多的低频能量。这也反应出模板事件的选取对于研究目的的重要性。

由于本文所选取的研究区域非常小, 在采样率的限制下, 网格搜索定位并不能取得满意的精度, 所以在检测事件的基础上, 采用双差方法进行重新定位, 以更好的获得地震事件的分布形态。将检测到的 996 个事件, 利用垂直分量的波形进行互相关计算, 得到震相到时和波形互相关的到时差数据, 并用 HypoDD 方法进行重新定位。结果如图 9 所示。地震观测报告中地震位置呈网格化分布, 加入检测事件并经双差定位后, 震源分布形态更加清晰。尽管所选取的震群分布范围较小, 但是重定位的结果还是展现出了一些与断裂构造特征相似的条带特性。更多的地震事件有助于对地震活动做出更准确的判断。

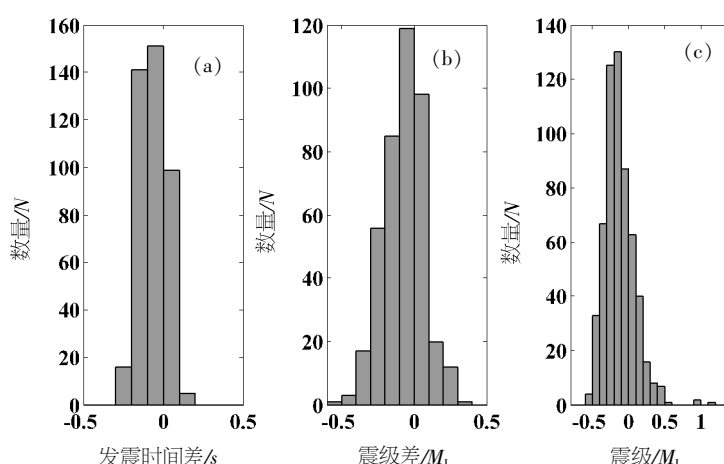


图 7 (a)和(b)分别为编目报告与 M&L 中相同事件的发震时刻和震级差值的统计;(c)为 M&L 新检测到事件的震级分布。

Fig. 7 Difference of the origin time (a) and magnitudes (b) between the overlapping part of catalog events and the M&L detected events. Figure c shows the magnitude distribution of the newly detected events that are not in the catalog

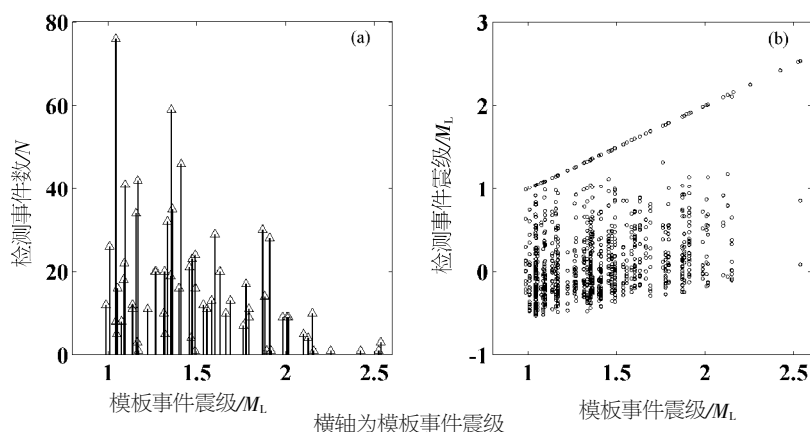


图 8 (a) 为 61 个模板事件的震级大小与检测事件数关系; (b) 为模板事件的震级大小与检测事件震级的分布

Fig.8 The distribution of the number(a)and magnitudes(b)of the detected events associated with the magnitudes of the 61 template events

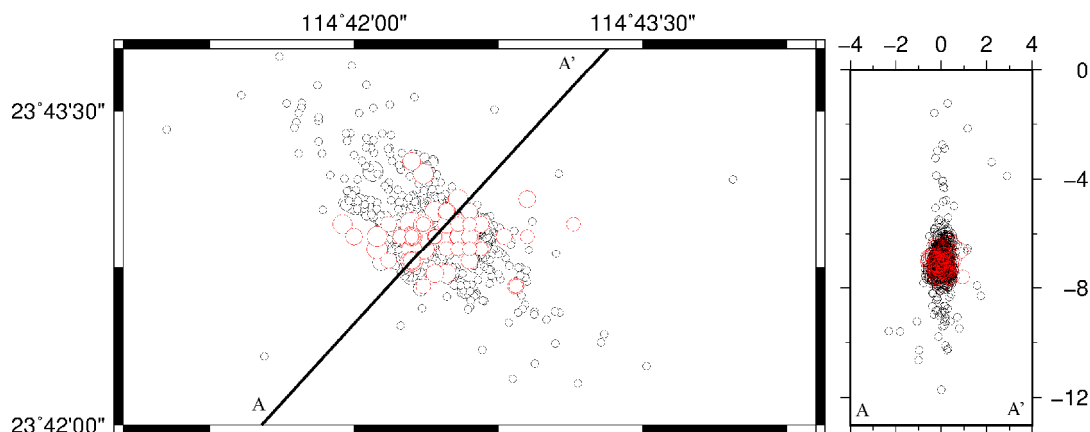


图 9 观测报告(红色)与检测到事件(黑色)的震中及震源分布(沿 AA' 剖面)

Fig. 9 Epicenter and hypocenter distribution of catalog (red circles) and detected events (black circles) along the profile AA'

4 结语

本文将匹配定位 M&L 方法应用于 2014 年 6 月的广东河源小震群,利用模板事件从连续波形中检测地震。应用实例首先采用小样本数据计算测试和验证方法的实用性,然后通过大样本数据做了进一步的分析。在计算中,选取了较严格的检测标准,即平均互相关系数 CC 大于 0.3(约 21 倍平均背景相关系数)时,认为事件被检测到。测试表明,检测结果十分准确,没有发现误判情况。尤其是对于一些淹没在较大地震尾波中的事件和时间上密集波形重叠的事件,肉眼很难分辨,分析时容易遗漏,而用 M&L 方法却能准确检测,表明该方法比起人工识别地震事件具有更强大的优势。

再以台网观测报告中 M_L 1.0 级以上的 61 个事件波形为模板,在连续波形中检测到 996 个地震,为模板事件的 16 倍,比地震目录给出的 469 个事件多一倍,并将地震目录的完整性震级从 M_L 0.1 降到了 -0.2,最小检测震级 M_L -0.5,最大 M_L 1.3,有效丰富了地震目录的完整性。对检测地震事件经过双差精定位分析后,更好的展现了该震群的展布形态和发震构造。

研究表明, M&L 方法是一种十分可靠的事件波形检测方法,可以有效应用于大震发生后的余震序列或震群序列分析,加快处理速度,便于及时判定震群活动情况和趋势预测,更能改善和丰富地震目录的完整性,为后续研究提供更准确的研究基础材料。

致谢:感谢张森博士提供的 Match&Locate 程序。感谢 Felix Waldhauser 提供的 HypoDD 程序。

参考文献:

- [1] Woessner J, Wiemer S. Assessing the quality of earthquake catalogs: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2005, 95 (2): 684–698.
- [2] Stevenson R. Microearthquakes at Flathead Lake, Montana: A study using automatic earthquake processing [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1976(66): 61–79.
- [3] Kao H, Shan S -J. The Source -Scanning Algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space[J]. Geophys. J. Int., 2004, 157(2): 589–594.
- [4] Kao H, Shan S -J. Rapid identification of earthquake rupture plane using Source -Scanning Algorithm [J]. Geophys. J. Int., 2007, 168 (3): 1011–1020.
- [5] 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.
- [6] Gibbons S J, Bottger Sorensen M, Harris D B, et al. The detection and location of low magnitude earthquakes in northern Norway using multi-channel waveform correlation at regional distances[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2007, 160(3–4): 285–309.
- [7] Peng Z, Zhao P. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake [J]. Nature Geoscience, 2009, 2 (12): 877–881.
- [8] Schaff D P. Improvements to detection capability by cross-correlating for similar events: a case study of the 1999 Xiuyan, China, sequence and synthetic sensitivity tests [J]. Geophys. J. Int., 2009, 180(2): 829–846.

- [9] Schaff D P, Waldhauser F. One magnitude unit reduction in detection threshold by cross correlation applied to Parkfield (California) and China seismicity[J]. Bull. Seismol. Soc. Am. 2010(100):6,3224–3238.
- [10] Waldhauser F, Schaff D P. Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods[J]. J. Geophys. Res., 2008(113):B08311.
- [11] 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):1 847–1 856.
- [12] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2000, 90(6):1 353–1 368.
- [13] Schaff D P, Richards P G. Repeating Seismic Events in China[J]. Science, 2004(303):1 176–1 178.
- [14] Gibbons S J, Ringdal F, Harris D B. Adaptive waveform correlation detectors for arrays: algorithms for autonomous calibration[J]. NORSAR Scientific Report. 2009.
- [15] Zhang M, Wen L. An effective method for small event detection: match and locate (M&L)[J]. Geophys. J. Int., 2015, 200 (3):1 523–1 537.
- [16] 张森. 地震定位与检测 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.