

闫新义, 冯雪玲, 刘东亚, 谭毅培, 2020. 2018 年 11 月 25 日新疆博乐  $M_S4.9$  地震余震检测与目录完整性研究. 震灾防御技术, 15 (3): 548—555. doi: 10.11899/zzyf20200308

# 2018 年 11 月 25 日新疆博乐 $M_S4.9$ 地震余震检测与目录完整性研究<sup>1</sup>

闫新义<sup>1)</sup> 冯雪玲<sup>1)</sup> 刘东亚<sup>1)</sup> 谭毅培<sup>2)</sup>

1) 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011

2) 天津市地震局, 天津 300201

**摘要** 本文基于匹配滤波技术, 通过 SEPD (Seismic Events and Phase Detection) 对 2018 年 11 月 25 日新疆博乐  $M_S4.9$  地震序列进行检测, 检测出遗漏地震 32 条, 84.4% 地震为  $M_L0.0—1.0$ , 9.4% 地震小于  $M_L0.0$ , 较地震目录中原有 15 条地震多 213%, 检测出的遗漏地震事件使地震目录更加完整。检测后的最小完整性震级由检测前的  $M_L1.6$  减至  $M_L0.8$ , 地震目录最小完整性震级的减小有利于地震工作者对区域地震活动性作出更准确全面的结论, 并使地震危险性分析更可靠。

**关键词:** 匹配滤波技术 新疆博乐  $M_S4.9$  地震 SEPD 遗漏地震 地震目录

## 引言

地震目录是区域地震活动性研究、地震地质和地震危险性分析的基础资料, 其数据完整性、准确性决定了地震工作者对区域地震活动的认识, 在一定程度上决定了区域地震活动性研究和地震危险性分析的可靠程度 (谭毅培等, 2104a)。对于一次地震事件, 完整地统计其余震序列数目、震级、发震时刻、震中地点, 能使地震工作者更准确地分析地震活动规律, 从而作出更准确全面的结论 (谭毅培等, 2104b)。目前, 地震目录的统计主要靠人工分析, 而大震后的波形干扰往往较大, 且在余震较多的情况下易叠加, 人工辨别受到很大影响。新疆台站密度相对稀疏, 在距离震源远、震级微弱的情况下, 台站记录的震相难以辨别。基于此, 中国地震局监测预报司预报管理处组建的地震预报青年组地震序列小组研发了 SEPD (Seismic Events and Phase Detection) 软件 (《SEPD 用户手册—地震事件与震相检测软件 v1.0》), 可对地震序列中地震时空演化特征、发震构造几何形态的精细确定等科学问题, 提供更完整可靠的地震序列目录和震相报告。谭毅培等 (2014a, 2014b) 通过该软件对 2013 年 3 月涿鹿微震群及 2013 年 8 月河北蔚县小震群地震序列目录进行分析, 尹欣欣等 (2018) 通过该软件对青海门源  $M_S6.4$  地震进行分析研究, 冯雪玲等 (2019) 用 Morlet 小波对微地震进行检测。

**1 基金项目** 中国地震局“三结合”课题 (CEA-JC/3JH-173102、3JH-202001097); 新疆地震科学基金 (202004)

**[收稿日期]** 2020-04-02

**[作者简介]** 闫新义, 男, 生于 1991 年。工程师。主要从事地震监测研究工作。E-mail: 1178648911@qq.com

## 1 互相关扫描

2018 年 11 月 25 日 20 时 23 分新疆博乐发生  $M_S4.9$  地震。该地区位于新疆天山西段北麓, 艾比湖西, 准噶尔盆地西南部, 地处阿拉套山和岗吉格山间谷地, 地势西部高、东部低, 高山、中山、低山丘陵和谷地平原呈阶梯状分布。其周边台站相对稀疏且分布不均匀(李艳永等, 2018, 2019), 距离该地震最近的博乐台(BUL)超过 50km(图 1), 因受背景噪声、台基等因素的影响,  $M_L1.0$  以下地震记录不清楚, 造成人工识别震相困难。本文通过 SEPD 软件对该地震 2018 年 11 月 25 日—2018 年 11 月 27 日连续波形进行互相关扫描和遗漏地震检测, 从而完善余震地震目录, 以使对该地震事件余震序列有更准确的认识。

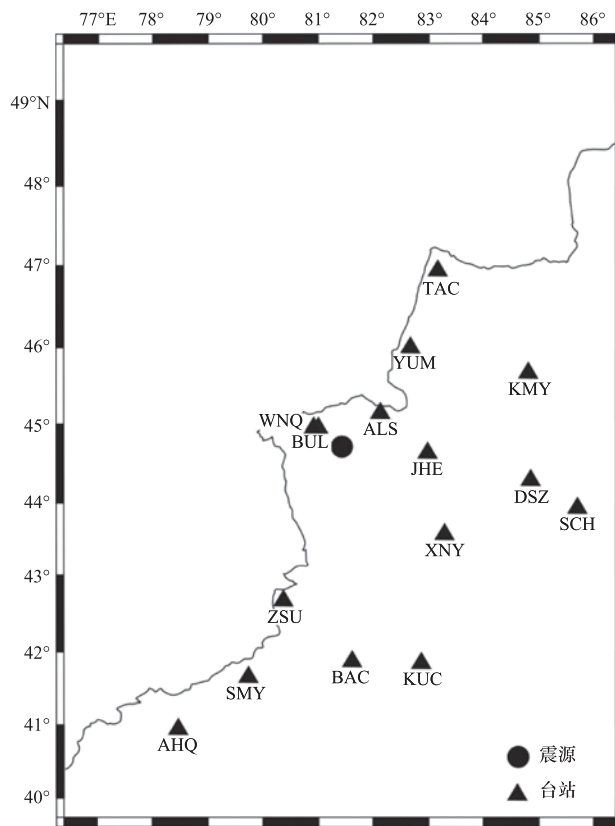


图 1 震中位置示意图

Fig. 1 Station distribution of Bole earthquake

本文所用数据源自新疆台网监测中心记录的三分量数字化地震波形, 并在 Jopens Data Service 网站下载震相报告数据进行检测。检测前需选择合适的模板地震, 总体原则为波形记录清晰、信噪比高。为此, 本文选取  $M_L2.0$  以上的地震事件作为模板地震(表 1), 为找到清晰的波形, 每个地震事件均选取震中距最近的博乐台(BUL)、温泉台(WNQ)、阿拉山口台(ALS) 3 个台站记录的连续波形作为研究对象。

表 1 选取的模板地震

Table 1 Selected template events

模板地震号	发震时刻 (北京时间)	震中经度	震中纬度	震源深度 /km	震级 $M_L$
Eq1125202334	2018-11-25 20:23:34.4	81.504°E	44.683°N	21	5.3 (主震)
Eq1125202932	2018-11-25 20:29:32.2	81.486°E	44.638°N	6	2.4
Eq1125203419	2018-11-25 20:34:19.3	81.465°E	44.641°N	6	3.1

互相关扫描参数的设置选用 4 阶 Butterworth 零相移数字滤波器 1—4Hz 滤波, 截取地震观测报告信息中 S 波震相到达前 2.0s 至震相到达后 2.0s 的波形。参数设置完毕后, 软件以选取的 3 个地震为模板, 分别对每个模板 3 个台站进行扫描, 并计算互相关系数 (Cross-correlation, CC)。由于互相关扫描是通过匹配模板进行的, 不能确保每个余震事件均与模板相似, 所以可能存在漏检的情况, 可通过增加模板数量减少漏检事件。

## 2 余震检测

连续波形和地震模板经过重采样, 采样间隔由 0.01s 变为 0.05s。本文通过取 CC 结果中三分向的平均值, 并计算其绝对离差中位数  $MAD$  ( $MAD = \text{median}|X_i| - \bar{X}$ ), 得到 CC 三分向平均值绝对离差中位数为 0.09939。Peng 等 (2009) 认为, 如果 CC 之和大于 9 倍  $MAD$ , 认为每天误检测的地震事件少于 1 次, 可作为地震事件检测阈值。本文阈值取 9 倍  $MAD$ , 即 0.89。模板地震 Eq1125202334 阿拉山口台 2018 年 11 月 25 日 20:20—21:10 互相关扫描结果及阈值关系如图 2 所示, 图中有 17 个疑似地震的发震时刻。依据程序中的设定, 所选 3 个台站 CC 之和大于 0.89 即认为检测到地震事件, 可判定此时刻存在地震事件, 所检测出的地震目录中没有的事件在本文中称为遗漏地震事件。为减少误差, 在震相校正模块对疑似地震发震时刻进行人工标定目录遗漏地震的震相到时。

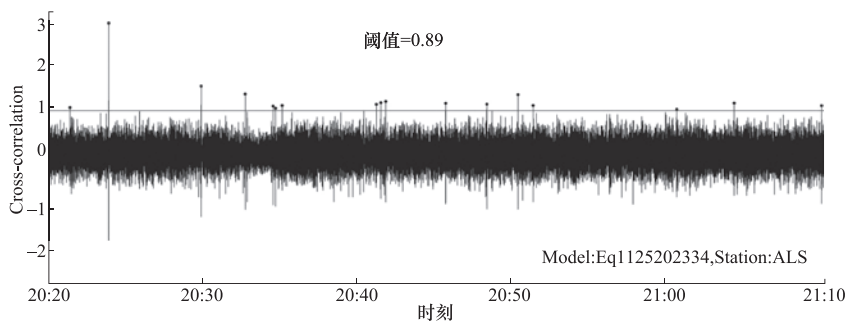


图 2 互相关扫描结果示意图

Fig. 2 Diagrammatic map of cross-correlation scanning result

搜索遗漏地震事件发震时刻 P 波、S 波到时方法示意如图 3 所示, 图中灰色为连续波形, 黑色为模板地震 Eq1125202334,  $C_{\max}$  为最大互相关系数。最终检测出 47 个地震事件, 较地震目录中 15 个地震事件多 32 个。模板地震 Eq1125202334、Eq1125202932、Eq1125203419 检测出的余震事件数量分别是 16 个、20 个、28 个, 且每个模板地震均有独自检测出的余震

事件, 说明所选模板地震震级不能决定检测出余震事件的数量, 而取决于余震事件与模板的互相关性, 选取模板时, 在保证波形清晰、信噪比较高的情况下, 尽可能多地选取模板地震, 以包含尽可能多的余震事件。本文选择的 3 个模板均为此次地震事件中震级较大的事件, 且选择了震中距最近的台站波形, 保证了较高的信噪比和清晰波形, 最大程度保证了模板地震的必要条件。

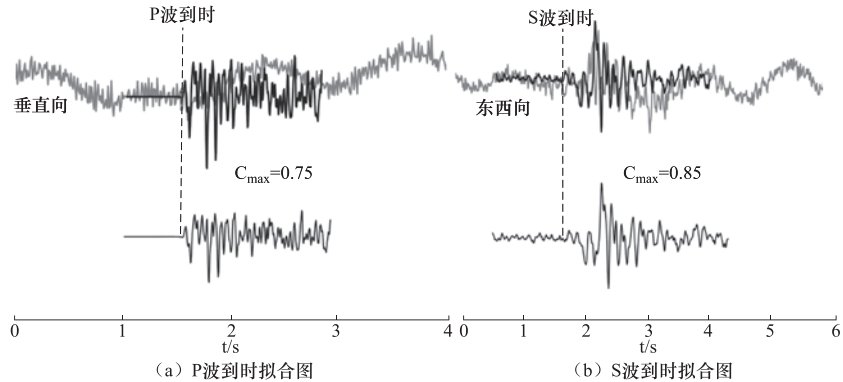


图 3 地震发震时刻 P 波、S 波到时方法示意图

Fig. 3 The process of detecting origin time, P-wave and S-wave arrival time of missing earthquakes

部分检测结果见表 2, 其中三台互相关系数均值为 1, 代表模板地震检测到自身, 这是判断互相关扫描结果是否准确的标准之一。结果中三台互相关系数均值明显偏小, 多为 0.4—0.6, 这是因为检测出的地震事件震级较小, 只有距离更近的 2 个台站有较好的互相关系数, 而距离较远的 ALS 台站互相关系数较差, 因此降低了 3 个台站的互相关系数均值, 其余 2 个台站所测结果互相关系数较理想。同一地震事件会被多个模板地震检测到, 将不同模板地震检测到的同一时刻地震事件划分为一组, 为一次地震事件。

表 2 通过模板所检测出的部分地震事件

Table 2 Partial seismic events detected by template events

序号	时间	三台互相关系数均值	匹配模板	BUL 台站互相关系数	WNQ 台站互相关系数	ALS 台站互相关系数
1	2018-11-25 20:23:34.40	1.00	Eq1125202334	1.00	1.00	1.00
	2018-11-25 20:23:34.75	0.50	Eq1125203419	0.72	0.72	0.05
2	2018-11-25 20:29:32.20	1.00	Eq1125202932	1.00	1.00	1.00
3	2018-11-25 20:32:23.05	0.43	Eq1125202932	0.65	0.63	0.00
4	2018-11-25 20:32:29.75	0.42	Eq1125202932	0.66	0.67	-0.07
5	2018-11-25 20:34:19.30	1.00	Eq1125203419	1.00	1.00	1.00
6	2018-11-25 20:38:05.10	0.56	Eq1125203419	0.87	0.87	-0.06

续表

序号	时间	三台互相 关系数均值	匹配模板	BUL 台站 互相关系数	WNQ 台站 互相关系数	ALS 台站 互相关系数
7	2018-11-25 20:38:19.50	0.46	Eq1125203419	0.69	0.69	0.01
8	2018-11-25 20:49:56.15	0.40	Eq1125202932	0.58	0.57	0.05
9	2018-11-25 22:13:38.60	0.49	Eq1125202334	0.61	0.62	0.24
	2018-11-25 22:13:38.95	0.48	Eq1125203419	0.77	0.77	-0.09
10	2018-11-25 22:16:44.65	0.54	Eq1125202334	0.71	0.70	0.22
11	2018-11-25 22:25:39:65	0.58	Eq1125203419	0.73	0.73	0.27
	2018-11-25 22:25:39:75	0.43	Eq1125202932	0.65	0.65	0.00
12	2018-11-25 22:52:27.50	0.42	Eq1125202932	0.55	0.55	0.16
13	2018-11-25 22:38:38.40	0.48	Eq1125203419	0.73	0.71	-0.01
14	2018-11-26 00:00:03.50	0.55	Eq1125202334	0.72	0.72	0.22
	2018-11-26 00:00:03.80	0.53	Eq1125203419	0.72	0.72	0.14
	2018-11-26 00:00:03.90	0.46	Eq1125202932	0.65	0.65	0.07

### 3 震级的确定

震级测定使用 SEPD 软件震相校正模块实现。通过震相校正, 检测出遗漏地震的发震时刻和震级见表 3。通过遗漏地震事件和目录地震事件对比, 目录原有地震事件 15 个, 共检测出 32 个遗漏地震事件, 由于负震级震相特征微弱, 更不易检测, 为保证检测结果的可靠性, 本文研究以  $M_L 0.0$  以上为主。

表 3 遗漏地震事件发震时刻与震级

Table 3 The origin time and magnitude of missing earthquakes events

发震时刻 (北京时间)	震级 $M_L$	发震时刻 (北京时间)	震级 $M_L$
2018-11-25 20:32:23	0.8	2018-11-26 01:43:39	0.8
2018-11-25 23:32:29	0.7	2018-11-26 02:19:19	0.5
2018-11-25 20:38:05	1.1	2018-11-26 02:25:37	-0.2
2018-11-25 20:38:19	0.5	2018-11-26 02:26:15	0.2
2018-11-25 20:49:56	0.0	2018-11-26 02:29:25	0.2
2018-11-25 22:13:38	0.5	2018-11-26 02:45:38	0.1
2018-11-25 22:16:44	0.9	2018-11-26 04:21:25	0.5
2018-11-25 22:25:39	0.1	2018-11-26 05:16:33	0.1

续表

发震时刻 (北京时间)	震级 $M_L$	发震时刻 (北京时间)	震级 $M_L$
2018-11-25 22:52:27	0.6	2018-11-26 05:58:48	-0.1
2018-11-25 23:38:38	0.1	2018-11-26 09:42:49	0.6
2018-11-26 00:00:03	0.2	2018-11-26 15:01:00	1.0
2018-11-26 00:00:51	0.7	2018-11-26 23:06:20	-0.1
2018-11-26 00:40:16	0.1	2018-11-27 05:00:40	0.0
2018-11-26 01:02:20	0.8	2018-11-27 05:02:30	0.6
2018-11-26 01:13:31	-0.3	2018-11-27 05:50:53	0.2
2018-11-26 01:38:03	0.0	2018-11-27 12:50:35	0.0

#### 4 地震目录完整性

相比原有地震目录, 检测结果多出 213%, 检测出地震事件的震级为  $M_L-0.3-1.1$ , 其中  $M_L0.0-0.5$  地震最多。地震频次与震级之间存在的关系是当前地震事件目录完整性分析的重要依据, 通过遗漏地震检测,  $M_L0.0-1.0$  地震序列得到补充, 填补了检测前  $M_L0.0-1.0$  地震缺失的情况。该次地震序列事件中  $M_L2.0-2.9$ 、 $M_L3.0-3.9$ 、 $M_L5.0-5.9$  地震事件各出现一次, 为去除其偶然性, 本文以  $M_L0.0-2.9$  地震为研究对象, 在该范围下, 检测后的结果使震级与频次之间具有更好的线性关系 (图 4)。

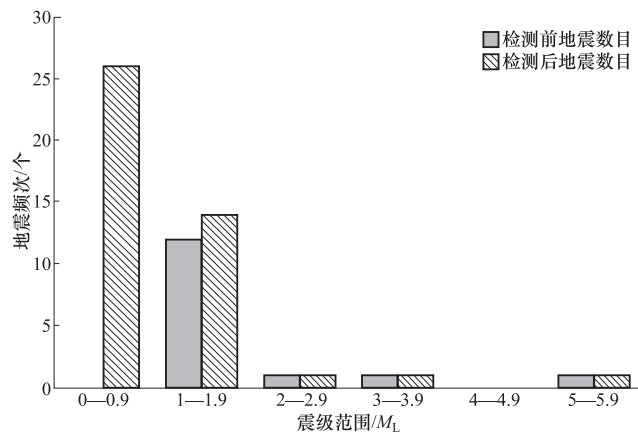


图 4 遗漏地震检测前后地震频次对比图

Fig. 4 Area chart before and after missing detection

地震目录最小完整性震级表征台网监测能力水平, 能填补地震目录数据空白, 使地震工作者根据研究方向选择所需地震事件, 以达到对地震活动性研究更详细、可靠的目的 (苏有锦等, 2003; 冯建刚等, 2012)。由于数据量有限, 本研究分别以原有地震目录和检测出的地震事件为基础, 采用最大曲率法分析二者最小完整性震级。通过分析研究事件震后 3d 的检测目录, 得出台网目录与检测目录最小完整性震级分别为  $M_L1.6$ 、 $M_L0.8$  (图 5), 检测出的地震目录最小完整性震级比台网目录最小完整性震级明显降低, 从而提高了台网监测能力。

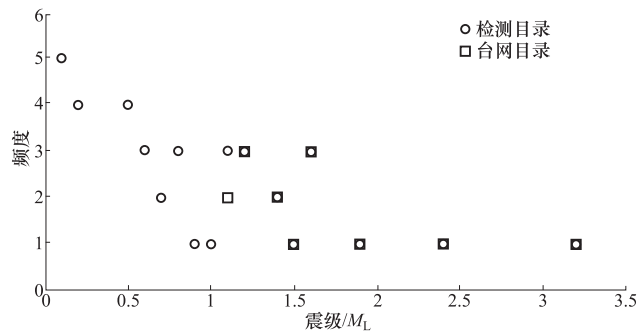


图5 检测前后最小完整性震级对比

Fig. 5 Contrast of minimum integrity magnitude before and after detection

## 5 结论

本文通过匹配滤波技术对2018年11月25日新疆博乐 $M_S4.9$ 地震及余震序列中遗漏地震进行检测,并对发震时刻和震级进行确定,检测出遗漏地震32条,其中84.4%为 $M_L0.0—1.0$ ,9.4%小于 $M_L0.0$ ,较地震目录中原有15条地震多213%,使 $M_L0.0—1.0$ 地震目录得以完善,完善后的震级和频次呈现出更好的线性关系。最小完整性震级由 $M_L1.6$ 减至 $M_L0.8$ ,从而提高了台网监测能力。通过对连续波形的对比分析,认为本次拾取遗漏地震结果可靠。

相比人工分析地震,该技术能较大程度上排除背景噪声及大震面波干扰。在与主震相邻的时间段内,地震波形产生较大面波,并受地脉动、地震事件叠加及台站距离较远、台基不理想等因素的影响,较小地震震相难以辨别,无法分析,该软件通过连续波形与地震模板波形的对比,更易发现小震并进行分析,以减少人工识别误差,获得更完善的地震目录,使地震工作者对某一地区地震活动性的分析研究更全面准确,并使地震危险性分析更可靠。但该软件也有不足,首先,该软件依赖于模板地震,当模板地震选取不典型或数量不够时,易遗漏所要检测的地震,当余震波形特征与主震或模板不同时,易造成检测结果不准确;其次,当信噪比不高或波形记录信号与噪声频带重叠时,检测效果不理想;最后,在地震校正计算中,需凭借地震工作者的经验完成,且互相关扫描所需时间较长(如检测1d的波形大概需要1d),降低了工作效率。

**致谢** 感谢谭毅培副研究员提供的SEPD软件及新疆维吾尔自治区地震局监测中心提供的连续波形资料。

## 参考文献

- 冯建刚,蒋长胜,韩立波等,2012.甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析.地震学报,34(5):646—658.
- 冯雪玲,刘东亚,李志海,2019.基于小波互相关的微地震信号检测方法研究.大地测量与地球动力学,39(9):982—986.
- 李艳永,王成虎,杨佳佳,2018.呼图壁地区震源机制解及构造应力场特征分析.大地测量与地球动力学,38(12):1246—1250.
- 李艳永,唐明帅,乌尼尔,2019.新疆北天山中东段呼图壁地区震源深度的重新测定.震灾防御技术,14(2):352—362.

- 苏有锦, 李永莉, 李忠华等, 2003. 川滇地区区域地震目录完整性最小震级分析. 地震研究, **26** (S1): 10—16.
- 谭毅培, 曹井泉, 卞真付等, 2014a. 2013 年 8 月河北蔚县小震群遗漏地震检测与发震构造分析. 地震学报, **36** (6): 1022—1031.
- 谭毅培, 曹井泉, 刘文兵等, 2014b. 2013 年 3 月涿鹿微震群遗漏地震事件检测和发震构造分析. 地球物理学报, **57** (6): 1847—1856.
- 尹欣欣, 杨立明, 赵林林等, 2018. 青海门源  $M_S6.4$  地震微震检测与目录完备性研究. 大地测量与地球动力学, **38** (7): 760—764, 770.
- Peng Z. G., Zhao P., 2009. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake. Nature Geoscience, **2** (12): 877—881.

## Research for Aftershock Detection and Completeness of Earthquake Catalogues of the Bole $M_S4.9$ Earthquake in November 2018

Yan Xinyi<sup>1)</sup>, Feng Xueling<sup>1)</sup>, Liu Dongya<sup>1)</sup> and Tan Yipei<sup>2)</sup>

1) Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous, Urumqi 830011, China

2) Earthquake Agency of Tianjin, Tianjin 300201, China

**Abstract** Based on matched filter technique and by SEPD software, aftershock sequence to earthquake of Xinjinag Bole during 25th to 27th in november 2018 was detected, and 32 missing earthquakes were found. The missing earthquakes during  $M_L0.0\sim1.0$  is 84.4%, the earthquakes less than  $M_L0.0$  is 9.4%. The amount of detected earthquakes is 213% more than the 14 earthquakes in catalogues, and the eaathquakes catalogue become more complete. The minimum integrity magnitude reduce from  $M_L1.6$  to  $M_L0.8$  after detection. The reduced of minimum integrity magnitude in the whole earthquakes catalogues is in favor of more accurately and roundly research for activity of area earthquake and more reliable to seismic hazard analysis.

**Key words:** Matched filter technique;  $M_S4.9$  earthquake of Xinjiang bole; SEPD; Missing earthquakes; Earthquake catalogues