尹欣欣,曾文浩,李少华,等.青海祁连 $M_8$ 5.2 地震微震检测与目录完备性研究[J].地震工程学报,2019,41(1):183-188.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.183

YIN Xinxin, ZENG Wenhao, LI Shaohua, et al. Missing Earthquakes Detection and Completeness of Earthquake Catalogs of the 2015 Qilian, Qinghai  $M_{\rm S}5.2$  Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 183-188. doi: 10.3969/j.issn. 1000—0844.2019.01.183

# 青海祁连 $M_{\rm S}$ 5.2 地震微震检测与目录完备性研究

尹欣欣1,2,曾文浩1,李少华1,赵林林1,蒲 举1,高永国1

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要:利用模板匹配方法对 2015 年 11 月 23 日青海省祁连县  $M_{\rm S}5.2$  地震进行遗漏地震检测研究,由于主震后短时间内目录中遗漏事件较多,故对主震后 1 天的连续波形进行检测。主震后 1 天内青海测震台网记录到的余震个数(包括单台)共 62 个,选取主震后  $M_{\rm L}1.0$  以上余震 30 个作为模板事件,通过匹配滤波的方式扫描出遗漏地震 31 个,约为台网目录给出的 0.5 倍。基于包络差峰值振幅与震级的线性关系估测检测事件的震级参数,最后将检测后的余震目录与台网余震目录在主震后 1 天内的最小完备震级进行对比分析,结果发现检测后最小完备震级从  $M_{\rm L}1.2$  降到了 $M_{\rm L}0.7$ ,得到青海测震台网在祁连地区最小完整性震级为  $M_{\rm L}0.7$ 。

关键词: 目录完备性; 匹配滤波; 遗漏地震; 祁连  $M_s5.2$  地震

中图分类号: P315.7

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2019)01-0183-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.183

# Missing Earthquakes Detection and Completeness of Earthquake Catalogs of the 2015 Qilian, Qinghai $M_{\rm S}$ 5.2 Earthquake

YIN Xinxin<sup>1,2</sup>, ZENG Wenhao<sup>1</sup>, LI Shaohua<sup>1</sup>, ZHAO Linlin<sup>1</sup>, PU Ju<sup>1</sup>, GAO Yongguo<sup>1</sup>

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Earthquake Agency of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: This paper used a template matching technique to detect missing earthquakes of the Qilian, Qinghai  $M_{\rm S}5.2$  earthquake that occurred on November 23, 2015. In existing catalogs, aftershock sequence data, especially from the short time after the main shock, are usually huge so we detected continual waveforms one day after the mainshock. In that day, the seismic network recorded 62 aftershocks, including single-station earthquakes. In this study, we chose 30  $M_{\rm L} > 1.0$  aftershocks as the templates, and finally found 31 missing earthquakes after detection, which was about 0.5 times the number given by the network catalog. According to the linear fitting relationship between frequency envelope difference amplitude and magnitude, we estimated the magnitude of detected events. We then compared the minimum magnitude of completeness

收稿日期:2018-07-14

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2015IESLZ04);中国地震局地震科技星火计划项目(XH19043);中国 地震局测震台网青年骨干专项课题(20170624)

第一作者简介:尹欣欣,高级工程师,主要从事地震台网监测和数字地震资料的应用。E-mail:yxx@gsdzj,gov.cn。

通信作者:曾文浩,高级工程师,主要从事地震、前兆数据处理研究。E-mail:Zengwh@gsdzj.gov.cn。

 $(M_{\rm C})$  before and after detection within one day of mainshock, and found that the minimum magnitude of completeness was reduced from  $M_{\rm L}1.2$  to  $M_{\rm L}0.7$ , showing that the minimum magnitude of completeness in the Qilian area of the Qinghai Seismic Network was about  $M_{\rm L}0.7$ . In addition, the b value of seismicity decreased slightly after the detection, and the results showed that the b value decreased markedly within a short time after the mainshock. Using the template matching method can effectively reduce the number of loss events caused by the earthquake coda wave interference, and improve the capability of seismic detection. The b value of further accurate calculations of earthquake aftershocks can help us better track earthquake activity.

**Keywords:** completeness of catalogs; matched filter; missing earthquakes; Qilian  $M_{\rm S}$ 5.2 earthquake

#### 0 引言

地震定位一直是地震学研究中最经典、最基础 的问题。许多深层次地球物理问题的解决以及地震 预报的部分工作都依赖于地震定位的结果。在地震 预报工作中,地震序列的精确定位也能为余震发生 趋势以及地震活动性预测提供一定的理论依据与参 考。地震定位依靠的是P波、S波中各种震相的走 时数据,获取震相走时的过程称为震相分析,震相分 析是提取地震学和地球物理学研究数据的基础手 段,也是测定地震震源位置和震级等基本参数的基 础[1]。震相分析对深入研究震源性质和地球内部构 造,研究地震的时、空、强活动图像,了解地震孕育、 发生、发展的活动规律,寻求地震学前兆进行以震报 震等工作都有着极为重要的意义[2]。因此,震相分 析是微观地震学的核心工作、地震科学的心脏。地 震工作者应该对地震图进行全面的量化解释[3]。通 过震相分析后产出地震目录是区域地震活动性研 究、地震危险性分析和地震地质研究的重要基础资 料。地震目录是否完整、震源参数是否准确,直接影 响后续研究的可靠性与科学性。

强震发生后或震群活动时,短时间内会发生大量的地震,不同的地震事件波形相互重叠,从而较难识别震级较小的地震信号。目前,主要采用两种方法自动识别地震信号。第一种是基于长短时间平均的震源扫描叠加技术。这种方法可以在有精确的速度模型的情况下做到检测地震的识别与定位,同时对微震的发震位置没有限制,并不依赖震相识别与到时拾取。这种方法需要精确的速度模型与较高的信噪比。第二种方法是利用台站记录的连续波形与已知的地震事件波形进行波形互相关识别地震信号,这一方法又称匹配滤波技术。互相关是针对输入信号的相似程度进行对比和分析,输入波形的相

似性对互相关结果会产生明显影响。地震信号的波 形包含了振幅、相位、频率和时差等多个方面信息。 当输入的两个地震波形数据之间的相位差为零时, 互相关的输出为一对称波形。当两个地震波形存在 一定相位差时,互相关的输出为一上、下不对称波 形,其最大值也会受到一定的影响。随着两者相位 差的增加,波形的不对称性越来越严重,而互相关输 出的分辨能力也随之降低。当输入的两个地震波存 在 180°相位差时(极性相反),信号的相关度最小。 这一方法可以在没有速度模型与信噪比较低的情况 下更好的做到微小信号的检测。目前,匹配滤波技 术应用于多个研究领域。包括高精度确定断层面、 矿难后对矿工的定位、水压致裂过程中诱发的微震、 地颤动中低频地震的监测、大地震的前震活动性研 究、小当量核试验的监测和地震触发、火山喷发前的 地震检测等等。

模板匹配法以互相关技术为基础,它的前提是: 如果被同一台站记录到的两个地震波形呈现出很高 的相似性,则可以认为这两个震源相距很近,且震源 机制相同。相比于传统的基于长短时窗比方法 (STA/LTA 方法)来进行事件自动识别,模板匹配 方法在信噪比方面具有明显的优势。如 Gibbons 等[4]以 1997 年 Kara Sea 地震主震后 4 小时的一个 微震为例,比较了这两种方法,结果显示出传统的 STA/LTA 方法无法检测出这个微震; Peng 等[5] 利 用模板匹配方法,对 2004 年 Parkfield 地震的余震 目录进行了完备,并以此研究了余震的迁移;Meng 等[6]利用模板匹配方法完备的地震目录,研究发现 2003年 San Simeon Mw6.5 地震之后, Parkfield 地 区的地震活动性与静剪切应力间存在比较好的对应 关系; Zhang 等[7] 利用匹配滤波的方法实现了对朝 鲜地区多次核爆的监测,并给出了几次核爆的相对

位置。

据中国地震台网测定,北京时间 2015 年 11 月 23 日 5 时 2 分 42 秒,青海省海北藏族自治州祁连 县(38.0°N,100.4°E)发生  $M_{\rm s}$ 5.2 地震,震源深度 10 km。青海、甘肃多地有感[8],地震对青海祁连县、甘 肃肃南县造成较大影响。震中附近 100 km 范围内 有 3 个宽频带记录台站,其中最近的祁连台(QIL) 离主震震中位置仅 39 km。主震后 1 天内国家测震 台网总共统计余震序列 62 次。本文选取了主震后 M<sub>L</sub>1.0 以上余震 30 个作为模板事件,对震后近台连 续波形进行匹配滤波分析,对比区域测震台网目录 发现遗漏地震 31 次,其震中空间分布范围与余震序 列中其他地震分布范围基本一致。本文对单台记录 到的地震事件的处理主要是使用波形互相关震相检 测技术。在多个台站的震相到时中,如果能在4个 以上台站检测到震相,则利用测震台网常用的 HY-POSAT 方法估计其震中位置[9],速度模型选择甘 肃一青海区域甘青一维平均速度模型[10],并利用多 个台站记录波形与模板地震的振幅比估计其震级。 之后计算主震发生后不同时间的最小完备性震级, 并通过线性拟合得到最小完备性震级随时间变化的 表达式,以分析此地震余震序列的目录完备性。

### 遗漏地震检测

#### 1.1 模板匹配方法简介

大震发生后地震目录往往会遗漏较多的余震事 件[6],造成余震遗漏的主要原因在于主震及较大余 震的面波等后续震相及尾波的干扰,其中所含低频 成分较多[11]。为了抑制低频干扰的影响,本研究使 用 4 阶零相移 Butterworth 滤波器对连续波形进行 截止频率为 15 Hz 的高通滤波,选取  $M_L > 1.0$  的地 震事件作为模板地震,然后进行 2~8 Hz 的滤波。 模板波形每个分量的信噪比(SNR)都要大于3,噪 声能量水平由 P 波到时前 6~2 s 计算得到。根据 观测报告以直达 S 波到时为中心,截取其前 2 s 至 后2 s 的波形作为模板波形,本文总共挑选出满足 SNR 条件且  $M_L > 1.0$  的模板地震事件 31 个,扫描 时长为主震后1天。计算模板与连续波形之间互相 关系数 correlation coefficient (CC)计算公式为:

$$CC = \frac{\sum_{t_0}^{t_1} (X(t) - \overline{X}) * (Y(t) - \overline{Y}))}{\sqrt{\sum_{t_0}^{t_1} (X(t) - \overline{X})^2 * \sum_{t_0}^{t_1} (Y(t) - \overline{Y})^2}}$$
(1)

式中: $t_0$ 、 $t_1$ 分别为模板窗的起始时间;X(t)、Y(t)

分别为模板波形与连续波形的时间序列;X、Y 分别 是模板波形与连续波形的时间序列的平均值。

4-s 窗选取两水平向 S 波到时前 1 s 至后 3 s, 垂直向 P 波到时前 1 s 至后 3 s,将主震发震时刻作 为 0 点,用 4-s 窗与连续波形进行滑动扫描,扫描间 隔为一个采样点,取三分向互相关系数平均值。通 过计算序列的绝对离差中位数 (median absolute deviation, MAD) 检测微小地震。绝对离差中位数 表达式为:

$$MAD = \text{median}(\mid X_i \mid -\overline{X})$$
 (2)

式中: $X_i$  为第 i 个互相关系数序列: $\overline{X}$  为其平均值。

在利用模板匹配方法进行遗漏事件检测过程中, 需要权衡阈值,阈值太大可能会造成遗漏事件的缺 失,阈值太小可能会包含太多错误事件,因此阈值的 选取必须通过多次的实验来确定。Peng 等[5] 和谭毅 培等[9]都将 9 倍的 MAD 值作为阈值,本文参考前人 研究结果,取 9 倍 MAD 值作为阈值,相关系数大于 阈值的事件则被认为是一个地震事件,当相邻两个大 于阈值的点过于接近或小于3 s 之内,判断为同一个 事件。图 1 展示了检测地震 Eq11230532 检测示意 图。模板匹配检测地震判定依据至少需要3个台站 且平均 CC 参数都大于 0.3,图中 3 个 CC 值为 3 个 台站各分向 CC 值的平均值,蓝色波形为模板地震, 红色地震事件为检测事件。在得到疑似地震事件之 后,使用原始波形(每秒 100 个采样点)和模板波形 进行互相关系数扫描,以确认疑似地震,并搜索遗漏 事件P波和S波的到时。

#### 1.2 震级计算方法

Peng 等[12] 通过研究日本多个地震,认为以 1.5 级为界包络振幅对应的震级与台网测量震级间存在 两组线性关系。Wang等[13]也发现经过滤波后的地 震波振幅与震级存在线性关系。 谭毅培等[14] 研究 甘肃岷县 M<sub>s</sub>6.6 地震时给出了包络差峰值振幅与 震级的线性拟合关系式。本文针对门源地震余震震 级特性(余震震级偏小,且 $M_1$ 3以上余震个数为2,  $M_{L4}$  以上余震个数为 0),设定包络差峰值振幅与震 级的线性关系式为:

$$M = a \cdot \lg(Env) + b \tag{3}$$

其中:M 为震级;Env 为高频包络差峰值振幅。本 文选取了62个余震进行拟合计算,结果如图2。计 算结果为 a = 0.62, b = 1.24, 代入式(3), 即 M = $0.62\lg(Env) + 1.24$ 

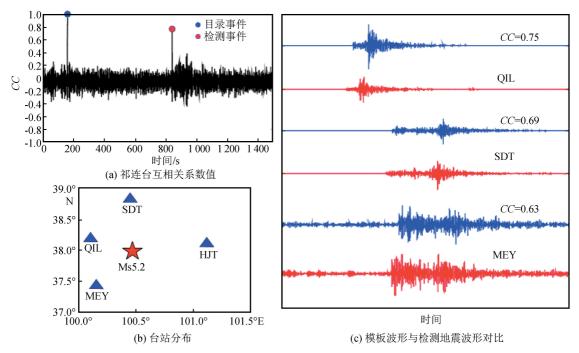


图 1 波形互相关扫描结果示意图

Fig.1 Scanning results using waveform cross-correlation

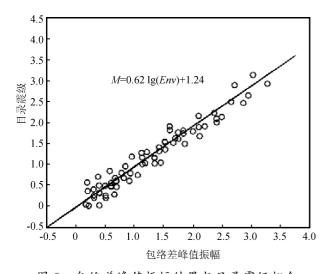


图 2 包络差峰值振幅结果与目录震级拟合 Fig.2 Linear fitting relationship of frequency envelope

difference amplitude and magnitude in the catalog

#### 1.3 检测结果与分析

本文选取了主震后 M<sub>L</sub>1.0 以上余震 30 个作为模板事件,通过匹配滤波的方式扫描出遗漏地震 31 个,重新定位后余震空间分布见图 3。震级计算依据震级与包络差峰值振幅的线性关系计算,计算结果显示遗漏地震震级偏低。根据模板匹配结果与震级估算,从时间域来分析,遗漏地震频次随时间推移有着逐渐衰减现象,主震后短时间内遗漏地震最多,原因一是通常主震应力释放能量最大,从而引起断

层移动,导致震源附近地下较脆结构发生级联破裂, 短时间内余震频次最大;其次主要受主震尾波干扰、 波形叠加,导致人工分析地震难度加大。

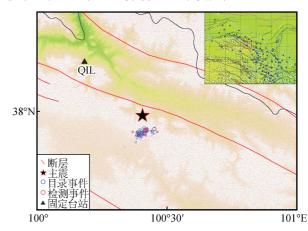


图 3 检测前后 1 天内余震空间分布

Fig.3 Spatial distribution of aftershocks in one day before and after the detection

为确保检测质量,通过波形对比及经验分析对 31个检测地震事件进行再研究,结果发现遗漏地震 波形直观辨认上有一定程度的包络特征,但震相到 时不清晰,不符合台网中心地震编目震相标注要求, 即高于背景信号 3 倍以上。

## 2 地震目录完备性与 b 值分析

完备震级(Magnitude of completeness, $M_{\rm C}$ )是

国际上普遍采用的评估地震台网检测能力的一个定量标准,同时也是进行地震活动性研究的重要参数。 地震目录的完备震级主要取决于台站分布,同时还 受到处理方法的影响。Schaff等[15]研究表明,利用 模板匹配方法能有效降低目录的完备震级。为进一 步研究地震活动性特征,本文首先在检测事件的基础上,采取最大曲率法[16]来获得检测目录的完备震 级。该方法认为震级-频度曲线一阶导数最大值对应的震级为完备震级。利用最大曲率法,本文分析了主震后一个月时间内青海台网目录和检测目录,得到的完备震级由台网目录的  $M_{\rm L}1.2$  降低到检测目录的  $M_{\rm L}0.7$ ,如图 4(a) 所示,这说明模板匹配方法能有效减轻由于强震尾波干扰而造成的目录缺失现象,提高地震检测能力。

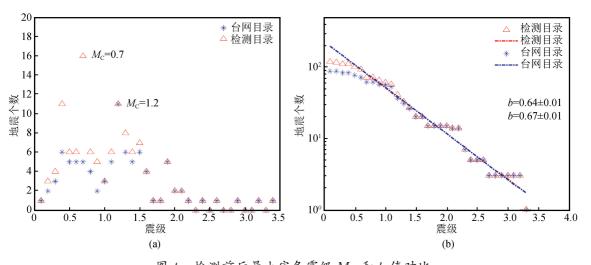


图 4 检测前后最小完备震级  $M_{\rm C}$  和 b 值对比

Fig. 4 Comparison of the minimum magnitude of completeness ( $M_{\rm C}$ ) and the b-value before and after detection

地震数量与震级通常遵循 G-R 关系:  $\log N$  = a-bM(其中 N 表示大于震级 M 的地震累积频度; a,b 为拟合常数)[17]。研究表明 b 值与材料的不均 匀性[18]等因素有关,求解 b 值的方法包括最小二乘 法、最大似然法[19]等。模板匹配检测遗漏事件震级 一般是小震级事件,因此对所有地震赋予同样权重 的最大似然法更适合本文研究。利用最大似然法计 算震后一个月时间内检测前后 b 值相对大小,起始 震级取最大拐角震级。从 G-R 关系分布图上可以 得到,检测前后的最大拐角震级分别与检测前后的 完备震级  $M_L1.2$  和  $M_L0.7$  一致[图 4(b)],因此起 始震级分别取检测前后的完备震级,b 值最终结果 为检测前  $b = 0.67 \pm 0.01$ , 检测后  $b = 0.64 \pm 0.01$ [图 4(b)]。检测后地震活动性 b 值略微减小,结果 更佐证了强震后短时间内 b 值明显降低的普遍 现象[9]。

# 3 结论与讨论

利用模板匹配方法对 2015 年 11 月 23 日青海 祁连  $M_s$ 5.2 主震震后 1 天的连续波形做了遗漏地 震检测,总共检测出目录以外的 31 个地震事件,约 为青海测震台网目录给出余震数量的 0.5 倍。震级

根据地震波振幅与震级线性关系进行了估算,总共选取 62 个余震资料做了地震波振幅与震级线性拟合,推算出震级估算公式为 M=0.62 lg(Env)+1.24,最后将检测前后余震目录最小完备震级进行对比,直接根据青海测震台网目录计算结果  $M_c$  为  $M_L1.2$ 。遗漏地震通常是较小地震,因此加入检测地震后使得目录进一步完善,使最小完备震级  $M_c$  减小到  $M_L0.7$ ,并对比传统 GR 关系拐点震级,发现具有很好的一致性。另外,计算了地震活动性 b 值的变化,检测前后 b 值由  $0.67\pm0.01$  减小到  $0.64\pm0.01$ 。检测后地震活动性 b 值略微减小,结果更佐证了强震后短时间内 b 值明显降低的普遍现象。

祁连处于青藏高原东北缘地区,本文获得的地震目录与震相到时为祁连地区地震余震序列增加了更多的样本,为青藏高原东北缘地下三维速度结构、未来地震活动性等提供更多的资料和参考依据。完备震级的变化说明区域台网常规产出的地震目录反映的监测能力较实际结果偏低,而使用模板匹配方法能有效减轻由于强震尾波干扰而造成的目录缺失现象,从而提高地震检测能力;而 b 值的进一步精确计算对我们判断强震余震活动性以及震后跟踪具有较大的意义。

致谢:本文所使用的地震波形资料来自于青海、 甘肃数字地震台网,模板匹配程序由中国地震局地 球物理研究所王宝善研究员提供,在此一并感谢。 文中所有图件由 GMT、SAC 和 Matlab 软件绘制。

#### 参考文献(References)

- [1] 高立峰,陈晓明,陈飞,等.如何提高磁照图数字化的精度[J]. 地震地磁观测与研究,2007,28(4):32-34. GAO Lifeng,CHEN Xiaoming,CHEN Fei, et al. How to Improve the Digitizing Accuracy of Magnetic Photographs[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2007,28(4):32-34.
- [2] 张诚.地震分析基础[M].北京:地震出版社,1986. ZHANG Cheng.Foundation of Seismic Analysis[M].Beijing: Seismological Press,1986.
- [3] 邹立晔.地震震相分析与测量的进展[J].国际地震动态,2004 (10):1-8.

  ZOU Liye.Advances in Seismic Facies Analysis and Measurement[J]. Recent Developments in World Seismology, 2004 (10):1-8.
- [4] 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.
- [5] PENG Z.ZHAO P. Migration of Early Aftershocks Following the 2004 Parkfield Earthquake[J]. Nature Geoscience, 2009, 2 (12),877-881.
- [6] MENG X, PENG Z, HARDEBECK J L. Seismicity around Parkfield Correlates with Static Shear Stress Changes Following the 2003 Mw6.5 San Simeon earthquake[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2013, 118(7):3576-3591.
- [7] ZHANG M, WEN L. An Effective Method for Small Event Detection: Match and Locate (M<sub>L</sub>)[J]. Geophysical Journal International, 2015, 200(3):1523-1537.
- [8] 郭安宁,郭增建,任栋,等.2013 年甘肃岷县—漳县 Ms6.6 级地震及非传统方法的回顾性预测讨论[J].华南地震,2016,36
   (2):56-59.
   GUO Anning,GUO Zengjian,REN Dong, et al. Retrospective
  - Discussion of Prediction by Using Non-traditional Methods for the 2013 Minxian—Zhangxian  $M_86.6$  Earthquake in Gansu[J]. South China Journal of Seismology, 2016, 36(2):56-59.
- [9] 谭毅培,陈继锋,曹井泉,等.2013 年甘肃岷县—漳县 M<sub>8</sub>6.6 地震余震序列目录完备性研究——基于对单台记录地震事件震中与震级的估计[J].地震学报,2015,37(5);806-819.

  TAN Yipei,CHEN Jifeng,CAO Jingquan,et al.2015.Catalogue Completeness Analysis on Aftershock Sequence of the 2013 Minxian—Zhangxian,Gansu,M<sub>8</sub>6.6 Earthquake Based on Location and Magnitude Estimation of Single-Station Earthquake Events[J]Acta Seismologica Sinica,2015,37(5);806-819.
- [10] 尹欣欣,杨立明,陈继锋,等.甘肃地区一维速度模型计算研究 [J].地震工程学报,2017,39(1):154-159.

- YIN Xinxin, YANG Liming, CHEN Jifeng, et al. Study on the One Dimensional Velocity Model in Gansu Area [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1):154-159.
- [11] 李少华,王彦宾,梁子斌,等.甘肃东南部地壳速度结构的区域 地震波形反演[J].地球物理学报,2012,55(4):1186-1197. LI Shaohua, WANG Yanbin, LIANG Zibin, et al. Crustal Structure in Southeastern Gansu from Regional Seismic Waveform Inversion[J]. Chinese J Geophys, 2012,55(4): 1186-1197.
- [12] 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.

  TAN Yipei, DENG Li, CAO Jingquan, et al. Seismological Mechanism Analysis of 2015 Luanxian Swarm, Hebei Province[J].Chinese J Geophys,2016,59(11):4113-4125.
- [13] PENG Z, VIDALE J E, ISHII M, et al. Seismicity Rate Immediately before and after Main Shock Rupture from High-frequency Waveforms in Japan[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(B3); 485-493.
- [14] WANG J. SCHWEITZER J. TILMANN F. et al. Application of the Multichannel Wiener Filter to Regional Event Detection Using NORSAR Seismic-Array Data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(6):2887-2896.
- [15] 谭毅培,曹井泉,陈继锋,等.2013 年甘肃岷县漳县  $M_86.6$  地震余震序列时域衰减特征分析[J].地球物理学报,2015,58 (9):3222-3231.
  - TAN Yipei, CAO Jingquan, CHEN Jifeng, et al. Temporal Decay Characteristics of the Aftershock Sequence of the 2013 Minxian—Zhangxian, Gansu,  $M_86.6$  Earthquake, [J]. Chinese Journal of Geophys, 2015, 58(9), 3222-3231.
- [16] SCHAFF D P.Semiempirical Statistics of Correlation-detector Performance [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(3):1495-1507.
- [17] 冯建刚,蒋长胜,韩立波,等.甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析[J].地震学报,2012,34(5):646-658.
  FENG Jian'gang,JIANG Changsheng,HAN Libo,et al.Analysis on the Monitoring Capability of Seismic Networks and Completeness of Earthquake Catalogues in Gansuregion[J] Acta Seismologica Sinica,2012,34(5):646-658.
- [18] GUTENBERG B, RICHTER C F. Frequency of Earthquakes in California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America 1944, 34(4):185-188.
- [19] MOGI K.Study of Elastic Shocks Caused by the Fracture of Heterogeneous Materials and Its Relations to Earthquake Phenomena[J].1962.
- [19] 尹欣欣,杨立明,赵林林,等.青海门源 $M_{8}$ 6.4 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):760-764,770.
  - YIN Xinxin, YANG Liming, ZHAO Linlin, et al. Missing Earthquakes Detection and Completeness of Earthquake Catalogues of the 2016 Menyuan, Qinghai,  $M_8$ 6.4 Earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(7): 760-764, 770.