

徐佳静,张建勇,梁建宏,等,2022. 大震地震序列自动地震速报结果分析——以云南漾濞 6.4 级和青海玛多 7.4 级地震为例. 中国地震,38(4):810~819.

大震地震序列自动地震速报结果分析 ——以云南漾濞 6.4 级和青海玛多 7.4 级地震为例

徐佳静 张建勇 梁建宏 孙丽

中国地震台网中心,北京 100045

摘要 根据国家台网中心自动地震速报系统在云南漾濞和青海玛多 2 个地区的台网监测能力,选取 2 个地区 2021 年 5 月 18—29 日的地震序列,对自动地震速报系统进行性能分析。国家台网中心自动地震速报系统基本实现 1min 内的单路自动地震速报信息初次产出,根据地震台网密度的不同,产出时间从 30~60s 不等。与地震编目结果相比,云南漾濞地震序列震中位置偏差较小,青海玛多地震序列震中位置偏差较大,2 个地震序列震级偏差不大。青海玛多地震序列震中位置偏差较大的原因是该区域台站稀少且空隙角较大。自动地震速报系统存在少量的漏报地震,与系统定位时信噪比较低、台站空隙角较大及多个地震混叠在一起有关。

关键词: 自动地震速报系统 震中位置偏差 震级偏差 地震序列

[文章编号] 1001-4683(2022)04-0810-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震三要素的自动测定主要包括地震检测、震相拾取、震相关联、地震定位、震级计算等步骤,一般使用长时窗与短时窗内地震波能量的比值 STA/LTA 与 AIC 准则拾取初至 P 波到时(Allen,1982;王继等,2006),在 S 波信噪比较好的情况下,也会利用 S 波极性变化等方法拾取 S 波到时(Grigoli et al,2014)。震相到时关联采用三维网格搜索方法或其他算法,在时空域寻找最可能的发震时刻和震源位置,去除错误的或误差较大的到时时再进行定位,并对定位结果进行评价。随着时间的推移,使用越来越多的台站到时时持续更新定位结果。在实时仿真或滤波的基础上,震级计算基于理论时间窗内波形振幅与周期参数,计算 M_L 、 M_w 和 M_s 等震级;基于初步确定的地震参数,对于大震、小震、浅源地震、中深源地震,优选某个震级确定地震最终的震级,或基于经验取多种震级加权平均确定最终震级。

国内实际运行的自动地震速报系统一般产出 2 次结果,首次产出时效优先,第二次产出主要考虑震级稳定性,兼顾时效。当触发的台站数大于等于 6 时,系统进行自动处理流程,

[收稿日期] 2021-11-02 [修定日期] 2022-06-08

[项目类别] 中国地震台网中心自动速报系统技术评价项目(12050411008)资助

[作者简介] 徐佳静,女,1992 年生,工程师,主要从事地震速报、预警等方面的研究工作。E-mail:xujiajing@seis.ac.cn

产出地震三要素,经评估后认定为一个真实地震事件,该地震三要素就作为首次产出的结果。随着时间的推移,可使用的台站数量和波形信息增加,当一定数量的台站波形满足量取震级的时间窗,进行第二次定位和震级计算,其结果作为第二次产出的地震三要素,此时确定的震级更稳定。

国家台网中心自动地震速报系统于 2013 年 4 月开始正式运行,该系统具有高时效性的优势,但发布参数的准确性、地震漏报和误报问题一直受到关注。张会苑等(2019)对西南区域自动地震速报系统定位结果进行评估,狄秀玲等(2013)对西北区域自动地震速报系统定位结果进行评估,杨陈等(2010、2013、2014)和徐佳静等(2021)对国家台网中心自动地震速报系统进行了评估,但均未针对密集发生的地震序列确定的参数准确性、漏报和误报情况进行较全面的评估。尤其是针对大震后的余震,在有可能受到较小前震或较大前震尾波影响的情况下,需要对国家台网中心自动地震速报系统的处理结果进行深入分析研究。

2021 年 5 月 21 日 21 时 48 分云南大理州漾濞县发生 6.4 级地震,4 小时 15 分钟后,5 月 22 日 2 时 4 分青海果洛州玛多县发生 7.4 级地震,国内学者从地震前兆异常、应急产出等方面对这 2 个地震序列进行了深入研究(戴丹青等,2021;邓文泽等,2021;廖诗荣等,2021;钟骏等,2021;岳冲等,2022;Zhou et al,2021;Jiang et al,2021;Wang et al,2021)。2 个地震序列交替且频繁,对自动地震速报系统是一个极大的挑战。本文分别选取 2 个地震序列对应的自动地震速报系统监测的最小震级,统计国家台网中心自动地震速报系统的产出情况,对其定位结果进行偏差分析,为今后自动地震速报系统升级、完善和产出结果的拓展应用提供基础数据支持。

1 数据资料

1.1 云南漾濞地震序列数据资料

2021 年云南漾濞 6.4 级地震为典型的前震-主震-余震型地震。根据自动地震速报系统对该区地震台网的监测能力($M_L \geq 1.7$),选取全国统一编目 2021 年 5 月 18—29 日云南漾濞地区 766 个地震,其中 13 个地震测定的是面波震级 M_s ,其余 753 个地震测定的是地方性震级 M_L 。表 1 为云南漾濞地震序列不同震级段的地震数量统计,图 1 为云南漾濞地震序列分布,其中前震 107 个,主震 1 个,余震 658 个。云南漾濞属于滇西大理区域,该区地震台站分布较密,台站间距 50~100km,台网监测能力 $M_L \geq 1.2$ (曹舸斌等,2019)。图 2 为云南漾濞 6.4 级地震的台站分布,其中距主震震中 100km 以内有 5 个台站,震中距 200km 以内有 16 个台站,震中距 300km 以内有 32 个台站,最近的台站为团山台(TUS),距主震震中 36km。

表 1 云南漾濞地震序列不同震级段地震数量统计

震级	1.0~1.9	2.0~2.9	3.0~3.9	4.0~4.9	5.0~5.9	6.0~6.9	合计
个数	270	393	79	20	3	1	766

1.2 青海玛多地震序列数据资料

2021 年青海玛多 7.4 级地震为典型的主震-余震型地震。根据自动地震速报系统对该区地震台网的监测能力($M_L \geq 2.0$),选取全国统一编目中 2021 年 5 月 18—29 日青海玛多地

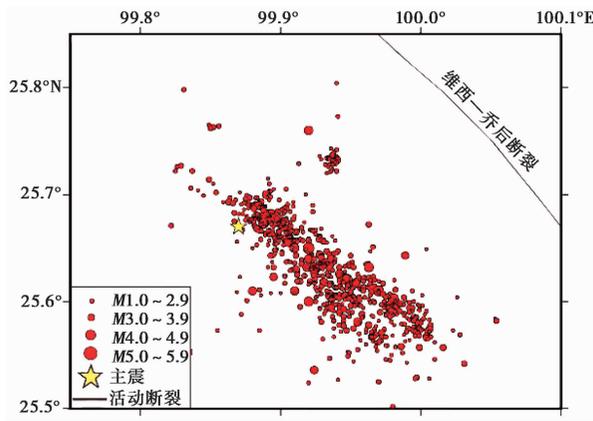


图1 云南漾濞地震序列分布

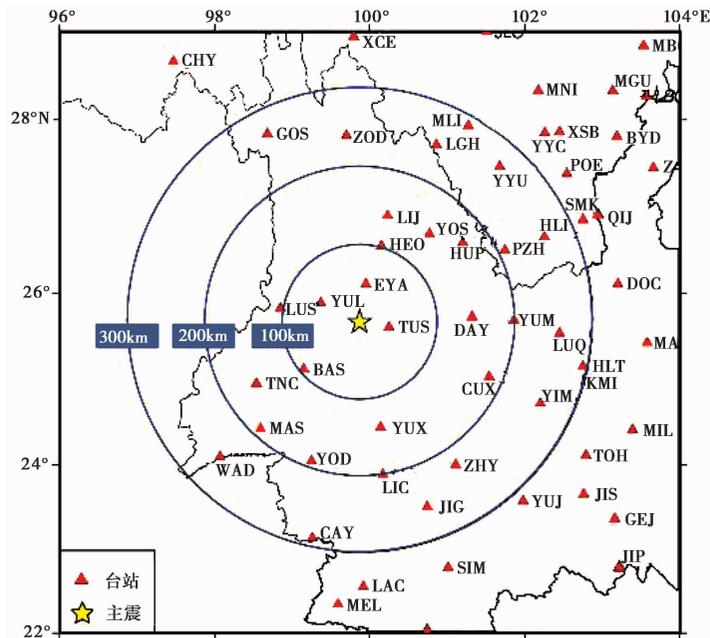


图2 云南漾濞 6.4 级地震台站分布

区 772 个地震,其中 1 个地震测定的是矩震级 M_w ,14 个地震测定的是面波震级 M_s ,其余 757 个地震测定的是地方性震级 M_L 。表 2 为青海玛多地震序列不同震级段地震数量统计,图 3 为青海玛多地震序列分布,其中主震 1 个,余震 771 个。青海玛多位于青海中部偏南,该区地震台站分布密度不大,台网监测能力 $M_L \geq 2.0$ (沙成宁等,2016)。图 4 为青海玛多 7.4 级地震台站分布,其中距主震震中 100km 以内有 1 个台站,震中距 200km 以内有 6 个台站,震中距 300km 以内有 23 个台站,最近的台站为玛多台 (MAD),距主震震中 36km。

2 自动速报系统产出结果及分析

2021 年 5 月 18—29 日,国家台网中心自动地震速报系统第一次产出云南漾濞地震序列

表 2 青海玛多地震序列不同震级段地震数量统计

震级	1.0~1.9	2.0~2.9	3.0~3.9	4.0~4.9	5.0~5.9	7.0~7.9	合计
个数	21	554	168	27	1	1	772

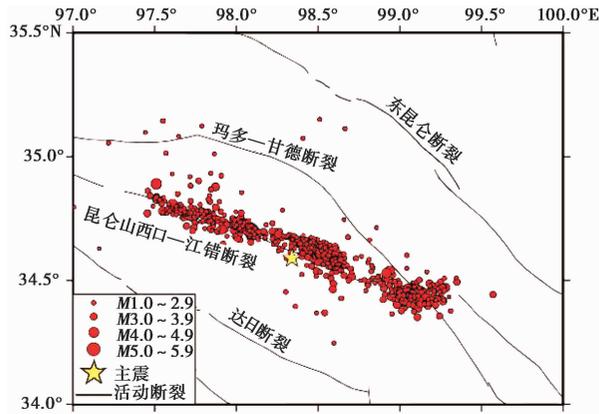
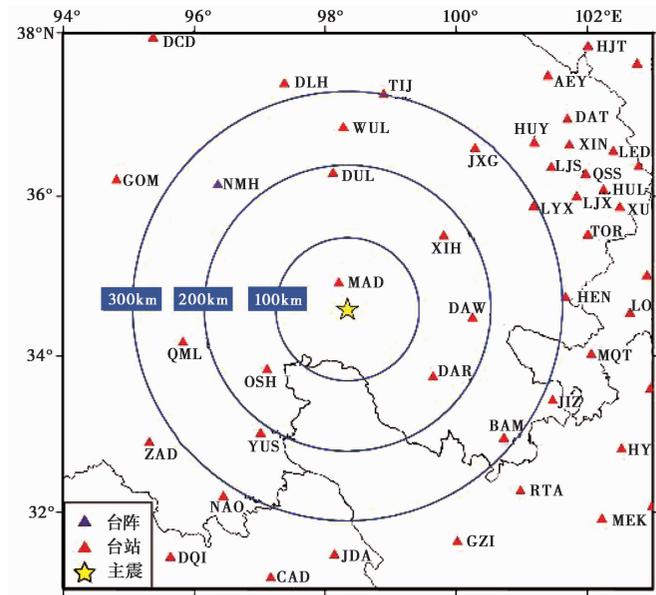


图 3 青海玛多地震序列分布



注：紫色三角形表示 NMH 台阵，共 10 个台站，平均台间距 2km。

图 4 青海玛多 7.4 级地震台站分布

321 次，平均震中位置偏差 3.2km，平均震级偏差 0.15 级，平均用时 32s；第二次产出云南漾濞地震事件 316 次，平均震中位置偏差 4.3km，平均震级偏差 0.25 级，平均用时 81s。

2021 年 5 月 18—29 日，自动地震速报系统第一次产出青海玛多地震序列 387 次，平均震中位置偏差 12.2km，平均震级偏差 0.21 级，平均用时 57s；第二次产出青海玛多余震事件 377 次，平均震中位置偏差 12.5km，平均震级偏差 0.21 级，平均用时 113s。

2.1 震中位置偏差

2021年5月18—29日,国家台网中心自动地震速报系统第一次产出的云南漾濞地震序列平均震中位置偏差为3.2km,94%的地震震中位置偏差在6km以内,震中位置偏差大于10km的事件共有9次;第二次产出的云南漾濞地震序列平均震中位置偏差为4.3km,90%的地震震中位置偏差在6km以内,震中位置偏差大于10km的事件共有12次(图5)。

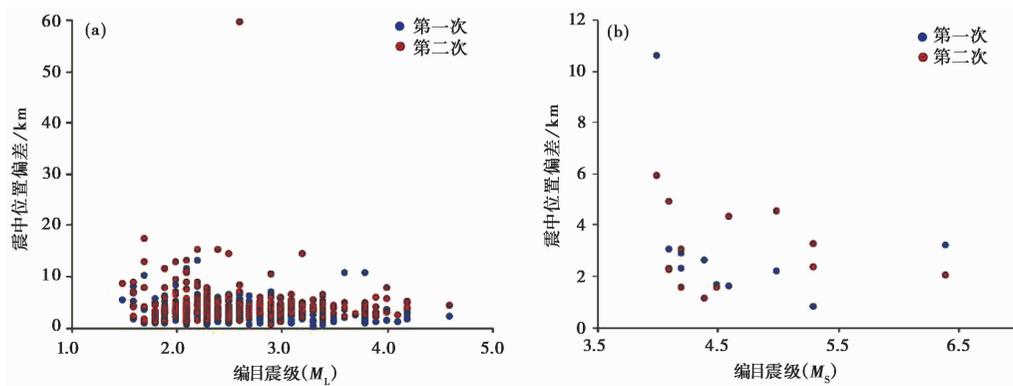


图5 云南漾濞地震序列震中位置偏差与震级的关系

2021年5月18—29日,自动地震速报系统第一次产出的青海玛多地震序列平均震中位置偏差为12.2km,65%的地震震中位置偏差在10km以内,震中位置偏差大于10km的事件共有133次;第二次产出的青海玛多地震序列平均震中位置偏差为12.5km,63%的地震震中位置偏差在10km以内,震中位置偏差大于10km的事件共有138次(图6)。

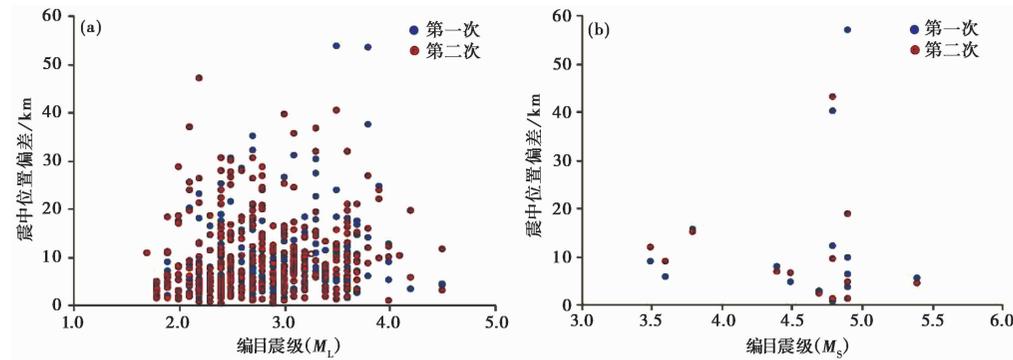


图6 青海玛多地震序列震中位置偏差与震级的关系

2个地震序列自动定位结果显示,震中位置偏差未随台站的增加而改善,近台对震中位置有更好的控制作用,远台的加入可能引入更多速度模型的不确定性和低信噪比的震相,导致定位的更大偏差。云南漾濞地震序列2.5级以下地震和青海玛多地震序列3.0级以下地震存在部分地震震中位置偏差较大,主要源于小震触发台站较少以及信噪比不高,影响震相的自动拾取精度。

2.2 震级偏差

2021年5月18—29日,自动地震速报系统第一次产出的云南漾濞地震序列平均震级偏

差为 0.15,第二次产出的地震序列平均震级偏差为 0.25。根据云南漾濞地震序列不同震级段的地震平均震级偏差统计结果(表 3),自动地震速报系统第二次产出的 4.0 级以下地震震级偏差较大,表明更多台站的触发并不能减小地震的震级偏差;自动地震速报系统第一次产出的 5.0 级以上地震震级偏差较大,是因为地震参数发布时,参与震级计算的台站大多为近台,部分远台数据缺失。

表 3 云南漾濞地震序列不同震级段平均震级偏差统计

震级	1.0~1.9	2.0~2.9	3.0~3.9	4.0~4.9	5.0~5.9	6.0~6.9	合计
第一次产出的平均震级偏差	0.26	0.13	0.08	0.20	0.36	1.04	0.15
第二次产出的平均震级偏差	0.42	0.25	0.18	0.21	0.30	0.22	0.25

图 7 为云南漾濞地震序列震级偏差与编目震级的关系(震级偏差指自动地震速报震级与地震编目震级的差)。自动地震速报系统第一次产出的云南漾濞地震序列中,震级偏差大于 0.3 的地震约占总数的 6.5%;自动地震速报系统第二次产出的地震序列中,震级偏差大于 0.3 的地震约占总数的 20%,主要为 $M_L \leq 3.0$ 的地震。在震级偏差大于 0.3 的地震中,4.5 级以上地震自动速报震级偏小;4.5 级以下地震自动速报震级偏大。

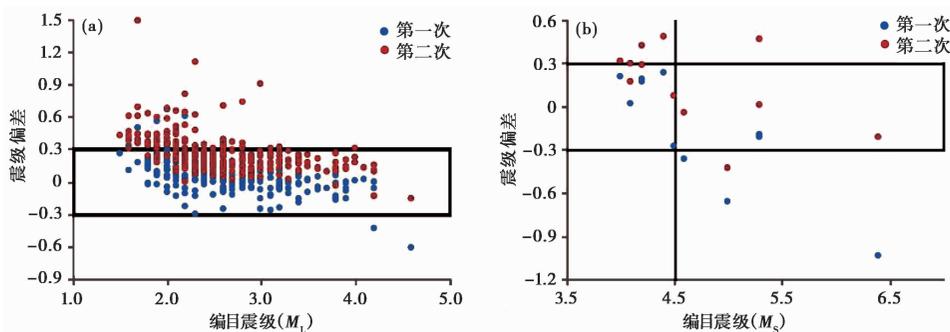


图 7 云南漾濞地震序列震级偏差与震级的关系

2021 年 5 月 18—29 日,自动地震速报系统 2 次产出的青海玛多地震序列平均震级偏差均为 0.21。根据青海玛多地震序列不同震级段的地震平均震级偏差统计结果(表 4),该地震序列自动地震速报系统 2 次产出结果偏差不大。

表 4 青海玛多地震序列不同震级段平均震级偏差统计

震级	1.0~1.9	2.0~2.9	3.0~3.9	4.0~4.9	5.0~5.9	7.0~7.9	合计
第一次产出的平均震级偏差	0.41	0.23	0.16	0.18	0.34	1.05	0.21
第二次产出的平均震级偏差	0.40	0.23	0.15	0.19	0.37	0.49	0.21

图 8 为青海玛多地震序列震级偏差与编目地震震级的关系。自动地震速报第一次产出的青海玛多地震序列中,主震 $M_w 7.4$ 震级偏差 1.05,震级偏差大于 0.3 的地震约占总数的 18%;自动地震速报第二次产出的地震序列中,主震 $M_w 7.4$ 震级偏差 0.5,震级偏差大于 0.3 的地震约占总数的 15%。分析认为主震震级偏差大是因为地震参数发布时,参与震级计算

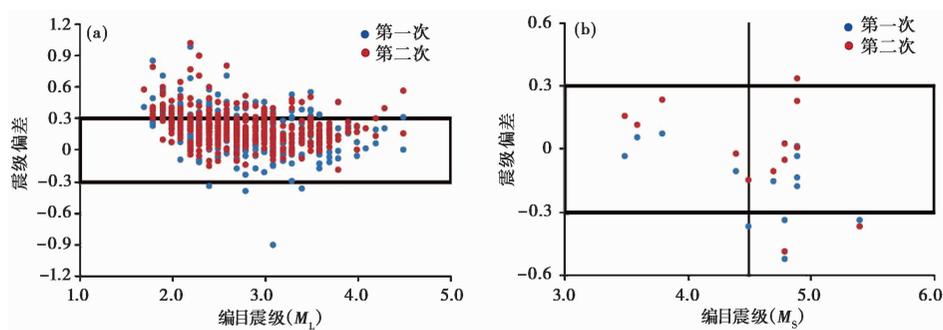


图8 青海玛多地震序列震级偏差与震级的关系

的台站大多为近台,部分远台数据缺失。

2.3 漏报和误报地震分析

2021年5月18—29日,根据自动地震速报系统的监测能力,自动地震速报系统产出的云南漾濞地震序列共漏报445个地震(表5),其中 $1.7 \leq M_L < 2.0$ 的地震漏报率为52.3%, $2.0 \leq M_L < 2.5$ 的地震漏报率为35.0%。在此期间,自动地震速报系统产出的青海玛多地震序列共漏报385个地震(表6),其中 $2.0 \leq M_L < 2.5$ 的地震漏报率为68.3%, $2.5 \leq M_L < 3.0$ 的地震漏报率为19.5%。为了更好地展示这2个地震序列漏报地震情况,给出漏报地震震级与时间的关系(图9),从漏报地震震级分布可以看出,随着地震震级的增大,2个地震序列漏报地震减少;3.0级以上漏报地震主要集中在主震后1h内。

表5 云南漾濞地震序列不同震级段漏报地震数量统计

震级	1.7~1.9	2.0~2.4	2.5~2.9	3.0~3.9	4.0~4.9	合计
个数	233	156	40	13	3	445

表6 青海玛多地震序列不同震级段漏报地震数量统计

震级	2.0~2.4	2.5~2.9	3.0~3.9	4.0~4.9	合计
个数	263	75	39	8	385

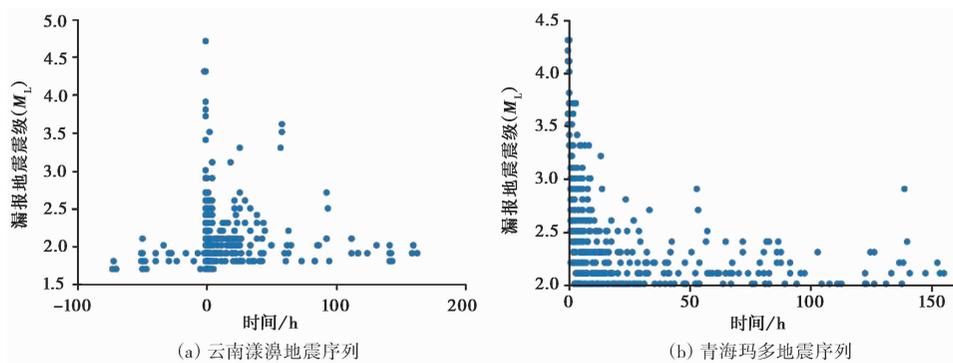


图9 漏报地震震级随时间变化曲线

为了进一步探究漏报原因,我们系统地分析了这些地震波形,发现导致地震漏报的情形主要有 2 种:①在较短时间内连续发生 2 个以上地震,后续地震的初至震相受到前边地震波形影响,信噪比较低,系统将后续地震波形误认为前一个地震事件波形的持续,未能识别后续地震的到时,如 5 月 21 日 20 时 56 分 2 秒云南漾濞 M_L 4.3 地震漏报,在 19s 前,20 时 55 分 43 秒云南漾濞发生 M_L 3.0 地震(图 10);5 月 21 日 21 时 53 分云南漾濞 M_L 3.9 地震漏报,在 5min 前,21 时 48 分云南漾濞发生 M_S 6.4 地震(图 11);②台站稀少的地区,最大空隙角较大,如 5 月 22 日 2 时 16 分青海玛沁 M_L 4.3 地震漏报。

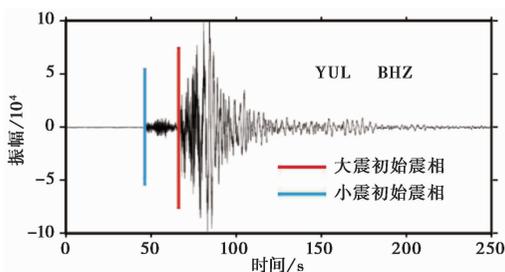


图 10 2021 年 5 月 21 日 20 时 56 分云南漾濞 M_L 4.3 地震波形

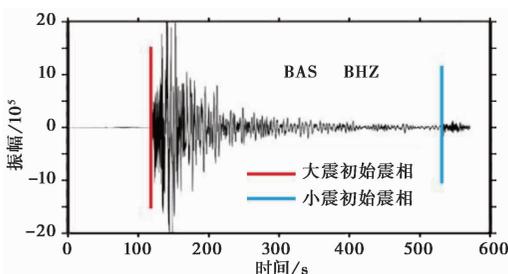


图 11 2021 年 5 月 21 日 21 时 48 分云南漾濞 M_S 6.4 地震波形

统计发现,2021 年 5 月 18—29 日自动地震速报系统无误报地震,这与系统在拾取到时时要求的信噪比高、对同一台站连续拾取到时时要求间隔的时间较大有关,也与使用震相到时关联地震时要求的台站数目较多和台站分布较好有关,这些高要求在很大程度上也导致了漏报的发生,这恰好与自动地震速报系统要求的“宁弃不误”的发布原则(杨陈等,2014)相统一。

3 结论

根据国家台网中心自动地震速报系统在云南漾濞和青海玛多 2 个地区的台网监测能力,选取全国统一编目 2021 年 5 月 18—29 日 2 个地震序列事件,对自动地震速报系统处理密集发生的地震序列性能进行偏差分析。基于目前的地震台网密度,自动地震速报系统初次产出时间均在 60s 内,由于区域地震台网密度的变化差别较大,最短产出时间在 30s 左右,平均震级偏差 0.2。平均震中位置偏差在地震台网密集地区小于 5km,在地震台网稀疏地区可能超过 20km。

云南漾濞地震序列产出事件的时间较快,震中位置偏差较小,而青海玛多地震序列产出

事件的时间稍慢,震中位置偏差较大,主要由于青海玛多区域台站稀少且没有近台、台站空隙角较大。2个地震序列自动定位结果显示,震中位置偏差并未随台站的增加而改善,近台对震中位置有更好的控制作用,远台的使用增加了速度模型不确定性对定位结果的影响。

与地震编目结果比较,国家中心自动地震速报系统漏报云南漾濞地震序列445个地震和青海玛多地震序列386个地震。漏报地震震级分布显示随着震级增大,2个地震序列漏报地震减少,3.0级以上漏报地震主要集中在主震后1h内。导致自动速报系统漏报地震主要有2种原因:①在较短时间内连续发生2个以上地震,后续地震的初至震相受到前一地震波形影响,信噪比较低,系统将后续地震波形误认为前一个地震事件波形的持续,未能识别后续地震的到时;②震中区域台站稀少且空隙角较大。

参考文献

- 曹舸斌,蔡明军,李文涛,等,2019. 云南测震台网地震监测能力分析. 地震地磁观测与研究,40(2):71~76.
- 戴丹青,孙丽,席楠,等,2021. 2021年5月21日云南漾濞 $M_s6.4$ 地震的快速测定与数据产品产出. 中国地震,37(2):532~540.
- 邓文泽,杨志高,席楠,等,2021. 2021年5月22日青海玛多 $M7.4$ 地震的快速测定与数据产品产出. 中国地震,37(2):541~550.
- 狄秀玲,李少睿,古云鹤,等,2013. 西北区域自动地震速报系统定位结果评估. 西北地震学报,35(2):378~384.
- 廖诗荣,张红才,范莉苹,等,2021. 实时智能地震处理系统研发及其在2021年云南漾濞 $M_s6.4$ 地震中的应用. 地球物理学报,64(10):3632~3645.
- 沙成宁,崔煜,赵永海,2016. 青海省数字测震台网监测效能评估. 高原地震,28(4):21~26.
- 王继,陈九辉,刘启元,等,2006. 流动地震台阵观测初至震相的自动检测. 地震学报,28(1):42~51.
- 徐佳静,张建勇,文明,等,2021. 2020年自动地震速报系统结果分析. 地震地磁观测与研究,42(5):180~186.
- 杨陈,黄志斌,廖诗荣,等,2010. 全国自动地震速报系统介绍. 地震地磁观测与研究,31(5):158~161.
- 杨陈,黄志斌,杜广宝,等,2013. 全国自动地震速报系统评估. 地震学报,35(2):272~282.
- 杨陈,黄志斌,高景春,等,2014. 中国自动地震速报系统评估及发布策略. 地球物理学进展,29(6):2572~2579.
- 岳冲,孙玺皓,牛安福,等,2022. 2021年青海玛多 $M_s7.4$ 地震同震应力场与形变台站同震阶变分布关系探讨. 中国地震,38(2):189~198.
- 张会苑,杨晶琼,2019. 西南区域自动地震速报系统定位结果评估,中国地震,35(2):295~304.
- 钟骏,王博,周志华,等,2021. 2021年青海玛多 $M_s7.4$ 地震前地下流体异常特征分析. 中国地震,37(3):574~585.
- Allen R,1982. Automatic phase pickers: Their present use and future prospects. Bull Seismol Soc Am,72(6B):S225~S242.
- Grigoli F, Cesca S, Amoroso O, et al,2014. Automated seismic event location by waveform coherence analysis. Geophys J Int,196(3):1742~1753.
- Jiang C, Fang L H, Fan L P, et al,2021. Comparison of the earthquake detection abilities of PhaseNet and EQTransformer with the Yangbi and Maduo earthquakes. Earthq Sci,34(5):425~435.
- Wang W L, Fang L H, Wu J P, et al,2021. Aftershock sequence relocation of the 2021 $M_s7.4$ Maduo Earthquake, Qinghai, China. Sci China Earth Sci,64(8):1371~1380.
- Zhou Y J, Ghosh A, Fang L H, et al,2021. A high-resolution seismic catalog for the 2021 $M_s6.4/M_w6.1$ Yangbi earthquake sequence, Yunnan, China: Application of AI picker and matched filter. Earthq Sci,34(5):390~398.

Analysis of Results from the Automatic Earthquake Monitoring System for Large Earthquake Sequence—A Case Study of Yangbi, Yunnan and Maduo, Qinghai Earthquakes

Xu Jiajing, Zhang Jianyong, Liang Jianhong, Sun Li

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract We selected two earthquake sequences based on the monitoring capabilities of the nation automatic earthquake information release system in Yangbi of Yunnan Province and Maduo of Qinghai Province, from May 18, 2021 to May 29, 2021, to analyze the performance of the system in the earthquake sequence. The nation automatic earthquake information release system basically realizes the first output of single-channel automatic earthquake information within 1 minute, and the output time varies from 30 seconds to 60 seconds according to the density of the station network. Compared with the earthquake cataloguing results, the deviation of the earthquake epicenter location of the earthquake sequence in Yangbi, Yunnan was small, while the deviation of the epicenter location of the Qinghai Maduo earthquake sequence was relatively large. However, the deviation of magnitude of both earthquake sequences was not large. The large deviation of the epicenter location may be due to the scarcity of stations in the area, lack of nearby stations and the large gap angles between stations. There were a small number of missed earthquakes in the automatic earthquake information release system, which is probably related to the low signal-to-noise ratio of the system during positioning, the large gap angle of the station, and the aliasing of multiple earthquakes.

Keywords: Automatic earthquake information release system; Deviation of the epicenter location; Magnitude deviation; Earthquake sequence