

# 2021年云南漾濞 $M_s$ 6.4 地震预警处理结果分析<sup>\*</sup>

李丹宁, 张国权, 缪素秋, 高 洋, 秦 敏, 马红虎, 崔庆谷

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 2021年5月21日云南漾濞发生  $M_s$  6.4 地震, 云南地震预警处理系统对观测数据进行了有效处理并产出预警信息。首先分析了观测记录的走时—震中距关系以及不同类型台站的信噪比, 说明该系统震相拾取正确, 确保了震中位置和发震时刻测定的高准确度; 鉴于此次地震预警震级整体偏小, 对比了不同类型台站的震级偏差, 其中一般台震级偏差最小、测震台次之、基准台第三、基本台最大。云南地震预警处理系统在2021年5月接入基准台和基本台后, 对于漾濞地震的震中位置和发震时刻测定的准确性和稳定性均有提高, 震级偏差变化不明显, 仍然整体偏小。这说明了云南地震预警处理系统台站布局合理, 系统具备一定的预警能力, 但震级算法还有待改进。

**关键词:** 地震预警; 台站类别; 震级偏差; 漾濞  $M_s$  6.4 地震

**中图分类号:** P315.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2021)03-0399-08

## 0 引言

地震预警作为有效减轻地震灾害的措施之一, 最早是在1868年美国旧金山大地震后由Cooper提出的, 其主要原理是利用电磁波传播速度大于地震波的传播速度, 根据震中附近的地震台所记录到的最早到达的地震波信息快速计算地震三要素、影响范围及其破坏程度, 并抢在破坏性地震波到达之前发布预警信息(张红才等, 2012)。公众可以利用地震预警系统提供的几秒至几十秒的预警时间逃生避险, 重大基础设施及生命线工程可以实施紧急处置, 从而达到减轻地震次生灾害的目的。因此积极推进地震预警工程, 在减少地震人员伤亡与减轻重大工程灾害损失上意义重大(于培青等, 2019; 高峰等, 2014)。日本是地震灾害较多的国家, 也是世界上最早建设地震预警系统的国家之一, 于20世纪50年代与80年代分别建立了铁路预警系统与紧急地震速报系统, 2007年

日本气象厅正式对全国公众发布预警的警报信息, 称为“紧急地震速报”(Horiuchi *et al*, 2005; Kamigaichi *et al*, 2009; 马强, 2008; 袁志祥等, 2007; 杨陈等, 2018)。经过数十年的发展, 日本的预警系统已取得了较好的应用成果。美国于1994年开始研究地震预警, 最初使用的是Elarm系统(Allen, Kanamori, 2003), 经过不断技术更新, 在ElarmS3的基础上建成了ShakeAlert系统, 该系统融合了ElarmS3和Finder两种算法(Given *et al*, 2014)。墨西哥于1991年建成了墨西哥市地震预警系统SAS(Espinosa-Aranda *et al*, 1995)。还有很多国家和地区都建立了预警系统, 如土耳其(Erdik *et al*, 2003)、意大利(Zollo *et al*, 2009)、欧盟(Parolai *et al*, 2015)、中国(Zhang, *et al*, 2016)等。

2008年汶川地震之后, 地震预警作为地震灾害防御的重要手段之一正逐步走向我国公众的视野。与此同时, 根据《国家防震减灾规划(2006—2020年)》提出的目标(国务院办公厅,

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2021-06-18.

**基金项目:** 国家自然科学基金——基于密集台阵与多测项联合的慢地震监测研究(4187040705)和国家地震烈度速报与预警工程云南子项目联合资助.

**第一作者简介:** 李丹宁(1982-), 高级工程师. 主要从事测震学相关研究, 如地震重定位、震源参数、地震预警等.  
E-mail: zuni\_2001@163.com.

2007), 地震预警系统的建设作为目前我国防震减灾的一项重点任务全面展开。2013 年 6 月通过验收的国家科技支撑计划“地震预警与烈度速报系统的研究与示范应用”标志着中国地震预警的研究与建设迈出了坚实的一步; 已经完成立项的“国家地震烈度速报与预警工程”标志着中国地震预警系统的建设已经摆上了地震监测的日程表(杨陈等, 2015)。

中国地震局于 2018 年正式实施国家地震烈度速报与预警工程, 云南作为“先行先试”单位于 2019 年 4 月开始接入一般站数据进行预警系统试运行。在 2021 年云南漾濞  $M_s 6.4$  地震中云南地震预警处理系统有效产出数据, 本文拟针对此产出结果, 通过分析台站信噪比、地震“三要素”的偏差情况等, 对云南地震预警处理系统在漾濞地震中的表现进行系统研究。

## 1 云南预警台网现状

目前, 云南地震预警台网建设了 203 个基准台(测震仪)、233 个基本台(强震仪)和 1 110 个一般台(烈度仪), 另外还有 120 个示范台(烈度仪), 建成后台站的总数超过 1 600 个(图 1), 构建了“测震、强震动、地震烈度”三网融合的云南地震预警台网。传统的测震观测主要服务于地震学, 其记录的数据为地动速度, 可为地球内部构造和地震活动性的研究提供各种地震参数, 也可用于研究地震波的传播规律; 传统的强震观测主要记录近场强震, 记录的物理量为加速度, 旨在测定地面和建筑物在地震作用下的运动过程(金星等, 2004; 付萍等, 2020); 烈度仪是基于低成本的 MEMS 传感器的加速度计, 其体积小、能耗低, 灵敏度高、价格低廉, 便于铺设高密度台网, 利用高密度的 MEMS 传感器可以在震后最短几秒内提供强地面运动图, 在提供关键性地震信息、减小预警盲区、缩短预警时间等地震预警研究中具有很大的应用前景(康涛, 2018)。

2021 年 5 月 15 日, 云南地震预警台网接入基准台与基本台, 实现了三网融合。全省平均台间距从原来的 50 km 左右, 发展到现在的 10 km 左右。

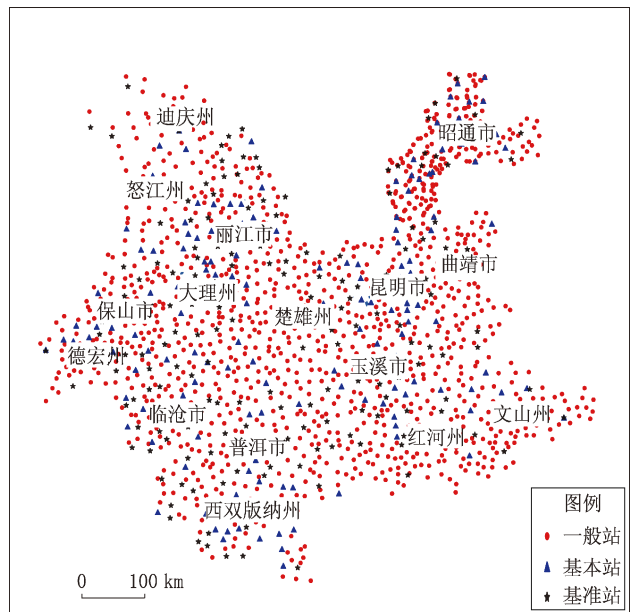


图 1 云南预警台网台站分布示意图

Fig. 1 Distribution of stations of the Yunnan Early Warning Network

从有测震观测的 203 个基准台来看, 台间距也提升到了 25 km 左右, 台网的监测能力也得到明显提升。

## 2 数据分析

### 2.1 预警处理结果总体情况

2021 年 5 月 21 日 21 时 48 分, 云南漾濞发生  $M_s 6.4$  地震后, 云南预警系统共使用 330 个台站进行预警, 其中一般台 217 个、基本台 18 个、基准台 66 个、测震台 29 个、共进行了 31 次处理, 详细结果见表 1。系统首次处理时共使用 3 个台站的数据, 预警用时 6.6 s (预警用时指预警信息提供时刻与人工编目发震时刻的时间差), 系统耗时 (预警信息提供时刻与地震波检知时刻的时间差为 4.8 s), 震级偏差为 -1 级, 震中位置偏差为 1.2 km, 发震时刻误差为 -0.1 s。由以上分析可看出, 首次处理的震中位置和发震时刻的误差均很小, 能满足预警需求, 但震级误差较大。随着时间推移, 触发台站的数量不断增加, 后续处理结果基本稳定, 但震级一直偏小, 31 次处理的震级平均偏差为 -1, 最大偏差为 -1.4 (第 4 次的处理结果), 最小偏差为 -0.8 (第 18、19 次的处理结果)。

表1 2021年5月21日预警系统处理结果  
Tab.1 Evaluation results of the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake on May 21, 2021 by the Yunnan Early Warning Network

| 处理<br>序号 | 预警系统相关     |             |             |           | 震源要素 |                        |                        |          | 预警结果评价相关 |             |              |
|----------|------------|-------------|-------------|-----------|------|------------------------|------------------------|----------|----------|-------------|--------------|
|          | 预警信息提供时刻   | 预警总<br>耗时/s | 预警实<br>耗时/s | 使用台<br>站数 | 震中地名 | 推定震中位置                 |                        | 估算<br>震级 | 震级<br>误差 | 震中误差/<br>km | 发震时刻<br>误差/s |
|          |            |             |             |           |      | $\lambda_E/(^{\circ})$ | $\varphi_N/(^{\circ})$ |          |          |             |              |
| 1        | 21:48:42.0 | 6.6         | 4.8         | 3         | 云南漾濞 | 99.88                  | 25.69                  | 5.43     | -0.92    | 1.15        | -0.1         |
| 2        | 21:48:43.1 | 7.7         | 5.9         | 10        | 云南漾濞 | 99.88                  | 25.68                  | 5.03     | -1.32    | 0.42        | -0.1         |
| 3        | 21:48:44.2 | 8.8         | 7           | 17        | 云南漾濞 | 99.88                  | 25.69                  | 4.98     | -1.37    | 0.48        | -0.1         |
| 4        | 21:48:45.2 | 9.8         | 8           | 24        | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 4.97     | -1.39    | 0.81        | 0            |
| 5        | 21:48:46.4 | 11          | 9.2         | 32        | 云南漾濞 | 99.88                  | 25.69                  | 5.07     | -1.28    | 0.82        | -0.1         |
| 6        | 21:48:47.6 | 12.2        | 10.4        | 37        | 云南漾濞 | 99.88                  | 25.69                  | 5.23     | -1.13    | 0.89        | -0.1         |
| 7        | 21:48:48.7 | 13.3        | 11.5        | 45        | 云南漾濞 | 99.88                  | 25.69                  | 5.24     | -1.12    | 0.9         | -0.1         |
| 8        | 21:48:49.9 | 14.5        | 12.7        | 56        | 云南漾濞 | 99.88                  | 25.69                  | 5.21     | -1.14    | 1.19        | -0.1         |
| 9        | 21:48:51.7 | 16.3        | 14.5        | 70        | 云南漾濞 | 99.88                  | 25.69                  | 5.24     | -1.12    | 1.25        | -0.1         |
| 10       | 21:48:53.7 | 18.3        | 16.5        | 86        | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.35     | -1       | 0.95        | 0            |
| 11       | 21:48:54.9 | 19.5        | 17.7        | 106       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.35     | -1       | 1.07        | 0            |
| 12       | 21:48:57.9 | 22.5        | 20.7        | 137       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.39     | -0.96    | 1.11        | 0            |
| 13       | 21:49:00.3 | 24.9        | 23.1        | 166       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.42     | -0.93    | 1.09        | 0            |
| 14       | 21:49:02.8 | 27.4        | 25.6        | 201       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.43     | -0.92    | 1           | -0.1         |
| 15       | 21:49:05.2 | 29.8        | 28          | 231       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.46     | -0.89    | 1           | 0            |
| 16       | 21:49:07.5 | 32.1        | 30.3        | 256       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.47     | -0.88    | 1.01        | 0            |
| 17       | 21:49:09.9 | 34.5        | 32.7        | 274       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.51     | -0.84    | 0.99        | 0            |
| 18       | 21:49:12.3 | 36.9        | 35.1        | 291       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.54     | -0.81    | 0.99        | 0            |
| 19       | 21:49:15.2 | 39.8        | 38          | 298       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.54     | -0.81    | 1           | 0            |
| 20       | 21:49:18.7 | 43.3        | 41.5        | 304       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.52     | -0.83    | 0.99        | 0.1          |
| 21       | 21:49:22.8 | 47.4        | 45.6        | 309       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.5      | -0.86    | 1           | 0.1          |
| 22       | 21:49:26.9 | 51.5        | 49.7        | 313       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.47     | -0.88    | 0.99        | 0.1          |
| 23       | 21:49:30.9 | 55.5        | 53.7        | 321       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.49     | -0.87    | 0.99        | 0.1          |
| 24       | 21:49:35.1 | 59.7        | 57.9        | 322       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.49     | -0.87    | 0.99        | 0.1          |
| 25       | 21:50:07.6 | 92.2        | 90.4        | 324       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.45     | -0.9     | 0.99        | 0.1          |
| 26       | 21:50:14.5 | 99.1        | 97.3        | 325       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.46     | -0.89    | 0.99        | 0.1          |
| 27       | 21:50:18.5 | 103         | 101         | 326       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.46     | -0.89    | 0.99        | 0.1          |
| 28       | 21:50:28.5 | 113         | 111         | 327       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.46     | -0.89    | 0.99        | 0.1          |
| 29       | 21:50:32.6 | 117         | 115         | 328       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.46     | -0.89    | 0.99        | 0.1          |
| 30       | 21:50:49.4 | 134         | 132         | 329       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.46     | -0.89    | 0.99        | 0.1          |
| 31       | 21:50:53.4 | 138         | 136         | 330       | 云南漾濞 | 99.89                  | 25.69                  | 5.46     | -0.89    | 0.99        | 0.1          |

2.2 台站初至时间

较远台站的时效性无法满足地震预警需求，因此，根据人工编目结果中的发震时刻，结合预警系统处理结果，本文计算了震中距在300 km范围内各预警台站 P 波震相以及测震台站编目结果中 Pg 或 Pn 波震相的走时，绘制震中距与走时的拟合曲线，如图 2 所示。从图中可以看出，在漾濞地

震的预警处理中，预警系统所用台站的震相与走时曲线吻合较好，没有明显偏离曲线的台站，即预警系统台站到时拾取准确，不存在错误拾取初动时间的情况，这也是该系统能精确确定震中位置和发震时刻的原因。从图 2 还可以看到，在震中距 180 km 左右，编目结果中出现 Pn 波震相前，预警系统拾取的 P 与 Pg 波震相走时曲线吻合度较高，

这是由于预警台站中多为一般台,只有烈度仪,不能清晰记录 Pn 波,通常拾取到的都是 Pg 波;震中距大于 180 km 后,少数与编目结果中 Pn 波震相吻合的预警台初动为基准台或测震台的速度仪记录。

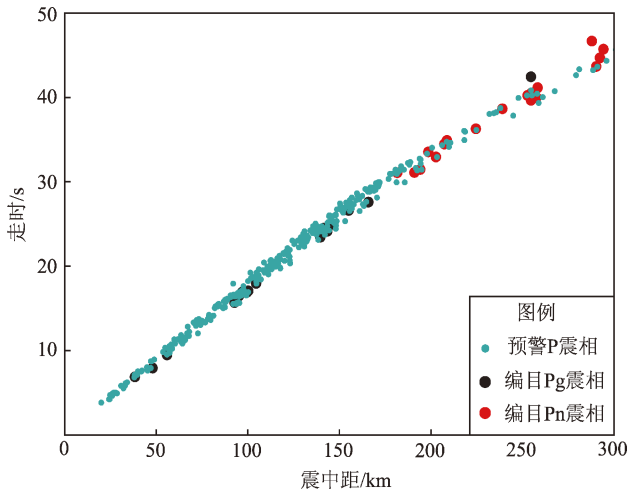


图2 震相走时与震中距拟合曲线

Fig. 2 Fitted curve of P-phases' travel time and the epicentral distance

### 2.3 信噪比

云南地震预警台网的一般台占比最大,超过 2/3,因此对于预警的结果最具影响力。而一般台使用的是烈度仪,其信噪比是预警台网所有台站类型中最低的,因此,本文主要针对一般台的信噪比进行分析。在上述初动到时拾取准确的基础上,预警系统在漾濞地震预警处理中主要使用了震中距 200 km 内的一般台,计算信噪比,如图 3 所示,一般台的信噪比随震中距增大而逐渐降低,

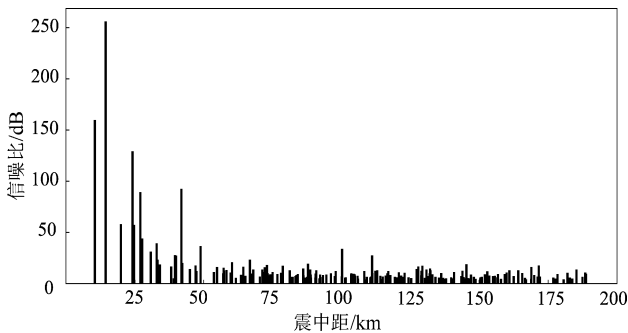


图3 震中距 200 km 范围内一般台的信噪比

Fig. 3 The signal - to - noise ratio of regular stations within 200 km from the epicenter

震中距 50 km 内的台站信噪比最高,均值达 50 以上,震中距 200 km 内的一般台信噪比均值为 14,满足预警系统对波形信噪比的要求。此外,基本台和基准台的信噪比均值达 100 以上。测震台有 2 个台站 S 波段限幅,但由于预警系统主要采用 P 波段计算震级,所以限幅问题影响不大。

### 2.4 “三要素”偏差分析

通常评价地震定位准确度主要通过地震发震时刻、震中位置和震级来进行,简称“三要素”。本文通过对漾濞地震“三要素”进行分析,来判断预警系统处理结果的准确性。

#### 2.4.1 震级偏差分析

震级测定是地震预警中的难点之一。从根本上来讲,震级是反映地震大小的物理量,传统的地震震级包括里氏震级(地方震级)  $M_L$ 、面波震级  $M_s$ 、矩震级  $M_w$ 、地幔震级  $M_m$ 、能量震级  $M_E$  等,这些震级的确定过程往往十分复杂,而且标准不一,有些甚至依据不明,还有些学者提出在某些情况下地震震级与地震的大小并没有一个严格的相关关系(王勇胜,韦永祥,2018)。由于地震预警时间极短,预警震级的确定除了准确性要求,还有时效性要求,这就更增加了地震预警震级确定的难度。地震预警实时震级的确定往往只根据几个台站初至 P 波的信息与震级的经验统计规律来计算,而破坏性地震的成核和发展非常复杂,仅利用有限台站的初始记录信息进行计算,有可能因为地震破裂过程尚未完成,波形还未完全发育而造成较大的不确定性。目前地震预警震级计算的方法还不具有普适性(马强,2008),对某一区域,需要更多的震例样本积累,才能为预警信息的可靠性、时效性、稳定性提供支撑。

为更全面地分析云南地震预警系统确定震级的表现,本文对 31 次系统处理结果进行分析。由于本文参照的编目结果中,关于震级的确定主要是使用原有的测震台记录进行计算,虽然基准台也采用测震仪进行记录,但因为是新架设的台站,出于对稳定性的考虑,我们把基准台和原有的测震台分开进行对比,得到使用测震台、一般台、基本台、基准台测定的震级偏差概率密度分布曲线,如图 4 所示。

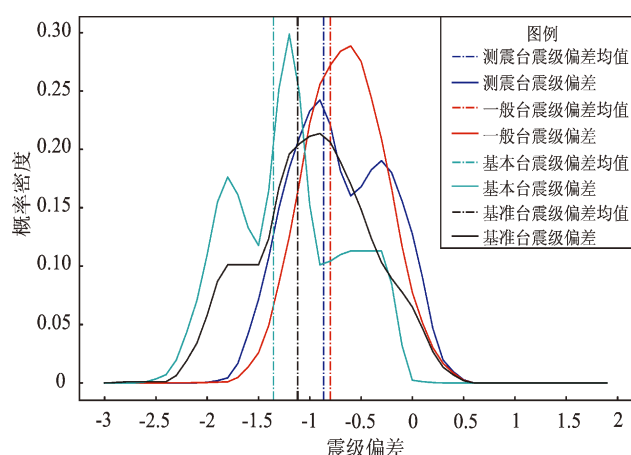


图4 震级偏差的概率密度分布图

Fig. 4 Probability density distribution of the magnitude error

从图4可以看到,一般台震级偏差在均值和峰值上的分布都有明显优势,呈现单峰分布特征,28%的一般台的震级偏差集中在 $-0.5$ 附近,震级偏差峰值最小,仅为 $-0.5$ ,均值为 $-0.8$ ;测震台次之,呈现双峰分布特征,分别有24%的测震台的震级偏差集中在 $-0.8$ 附近,18%集中在 $-0.3$ 附近,震级偏差峰值为 $-0.8$ ,均值偏差为 $-0.9$ ;基准台的震级偏差呈现双峰分布特征,有21%的基准台的震级偏差集中在 $-0.8$ 附近,10%集中在 $-1.8$ 附近,震级偏差峰值与测震台相当,为 $-0.8$ ,均值偏差为 $-1.1$ ;震级偏差最大的为基本台,呈现双峰分布特征,有近30%的基本台的震级偏差集中在 $-1.2$ 附近,18%集中在 $-1.8$ 附近,震级偏差峰值为 $-1.2$ ,均值偏差为 $-1.4$ 。

理论上概率密度分布应呈对称型,而图4表现出来的是偏态分布,除测震台的震级偏差均值比峰值大外,其它3类台站的震级偏差均值都比峰值小。这很可能是预警系统计算震级时,因时效性的要求,远台台站波形还未发育完全(未达到最大振幅)就参与计算,拉低了均值,而峰值体现的是波形发育完全的台站的计算结果,因此表现出震级偏差均值比峰值大的特征,而测震台站因为台间距较大(50 km左右),波形是否发育完全对其影响相对较小,其震级偏差峰值和均值较接近,峰值还略小于均值。综合不同类型台站的震级偏差概率密度分布情况,我们发现在漾濞地震预警处理

中,采用峰值来表示预警震级,比均值更为接近编目结果。但在震级算法方面还有待改善。

为了更系统地分析震级随预警系统处理进程的变化,对上述4类台站每一次处理的均值进行计算,如图5a所示。首次处理时仅有3个一般台触发,这与一般台数量最多、平均台间距仅为10 km左右有关;从第二次处理开始,基本台、基准台陆续有触发,参与预警处理计算。总体来看,图5a与图4情况吻合。一般台的震级偏差最为稳定,幅值变化在0.4以内,这与一般台数量最多且整体偏差最小有关,在第19次处理时达到最优,震级偏小0.7;其次测震台的震级偏差也较为稳定,变化幅度在0.5以内,这与多年来测震台的维护情况良好有关;基准台与基本台震级偏差整体较大,均偏小1级以上。从系统预警处理进程来看,对于基准台和基本台,第16次处理是一个分界点,此次处理结果在震后32.1 s给出。前15次处理结果总体表现为使用基本台计算的震级偏差较小,基准台较大;但从第16次处理开始,情况反转,使用基准台测定的震级偏差明显减小,优于基本台,从偏小1.5逐渐变小,在随后的16次处理中逐渐稳定到偏小1.1左右。理论上,震级通常是采用最大振幅值进行计算,对于预警系统,同一地震震级的表现应是随预警进程的推移,越来越多的台站记录的波形发育完全,震级逐渐增大至稳定。漾濞地震中,基准台、测震台、基本台的记录都体现了这一特征,但一般台在第19次处理中震级达到最优之后偏差值没有稳定,还有所下降,这可能与预警后期大量一般台的远台增多有关系。

#### 2.4.2 震中位置偏差分析

为了更直观地分析自5月15日起增加基准台、基本台后云南地震预警系统的处理能力,我们把预警处理系统应用于漾濞地震时,只有一般台和增加基准台、基本台后参与计算震中位置偏差的结果进行了对比。如图5b所示,这两种情况对于震中位置的测定都比较准确,相对而言,仅使用一般台测定的震中位置偏差较大,最大偏差约为1.5 km,加入了基准台、基本台的所有台站测定的震中位置最大偏差约1.2 km,且总体比仅有一般台的结果更为稳定。



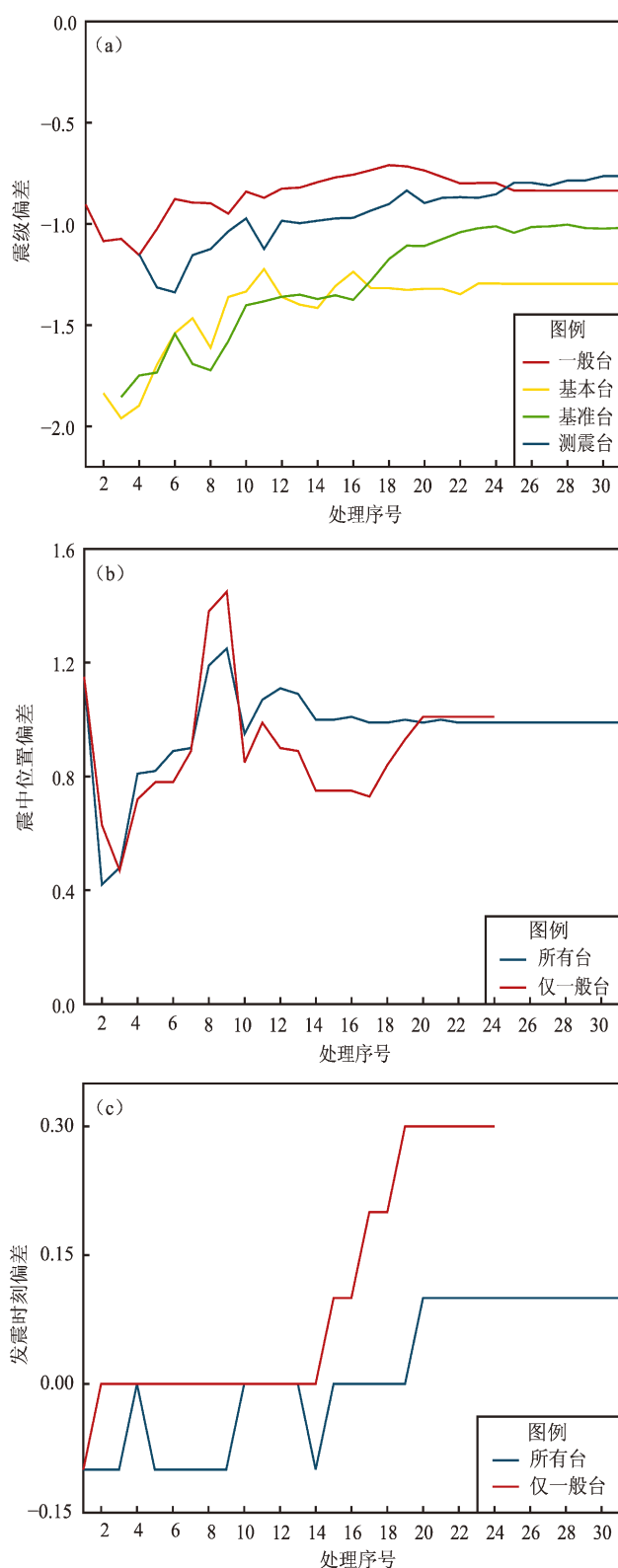


图5 不同类型台站的震级偏差 (a)、震中位置偏差 (b) 以及发震时刻偏差 (c)

Fig. 5 Magnitude error (a), epicenter location error (b) and origin time error (c) of different stations type

### 2.4.3 发震时刻偏差分析

由图5c可见, 只有一般台和增加基准台、基本台后对于发震时刻的计算都比较准确, 仅使用一般台时计算的发震时刻偏差较大, 最大偏差为0.3 s, 加入了基准台、基本台的所有台站计算的发震时刻最大偏差为0.1 s, 且总体也比仅有一般台时计算的结果更为稳定。

## 3 结论

云南地震预警系统在漾濞  $M_s 6.4$  地震中有效产出, 首次处理使用3个台站数据, 预警用时6.6 s, 系统耗时4.8 s; 震级偏差为-1, 震中位置偏差为-1.2 km, 发震时刻误差为-0.1 s, 这体现了预警系统在本次地震中的实效性和定位准确性。整体来看, 台站到时读取准确, 无错误拾取P波到时的情况; 从31次处理情况看, 该系统对震中位置和发震时刻的计算准确度高, 震中位置最大偏差为1.3 km, 均值偏差为1 km, 发震时刻最大偏差为0.1 s, 均值偏差为0.01 s; 但预警震级整体偏小, 且偏差较大, 最大偏差为-1.4, 均值偏差为-1。

从3种类型台站的震级偏差表现来看, 一般台较有优势, 震级偏差最小且呈单峰分布, 从辐射花样上看最符合震级分布特征。其次是测震台和基准台, 基本台震级偏差最大。整体上, 预警处理系统目前的震级算法有待改善。

对比增加基准台和基本台后的系统处理能力与仅有一般台时的差别, 发现增加台站后, 系统计算的震中位置和发震时刻稳定性均有提升。

综上所述, 云南地震预警系统台网的台站布局合理, 对于震中位置和发震时刻的计算准确度高, 预警震级整体偏小, 说明该系统具备一定的预警能力, 但震级算法还有待改进。目前人工智能地震预警震级估算方法正进行系统研发, 下一步我们将云南地震预警系统使用人工智能方法进行震级测算。

### 参考文献:

付萍, 郑韶鹏, 汪豪. 2020. 福建省简易烈度计地震预警试验区观测网络系统建设[J]. 华南地震, 40(1): 60-66.

- 高峰, 杨学山, 马树林. 2014. 地震预警系统综述[J]. 自然灾害学报, 23(5): 62–69.
- 国务院办公厅. 2007. 国家防震减灾规划(2006—2020年)[R].
- 金星, 马强, 李山有, 等. 2004. 宽频带强震仪与地震仪同一台基上记录仿真对比研究[J]. 地震工程与工程振动, 4(5): 7–12.
- 康涛. 2018. MEMS 加速度计在地震预警中的应用研究[J]. 山西建筑, 44(25): 39–41.
- 马强. 2008. 地震预警技术研究及应用[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 王勇胜, 韦永祥. 2018. 地震预警技术研究现状及展望[J]. 科学技术创新, (14): 22–24.
- 杨陈, 郭凯, 张素灵, 等. 2015. 中国地震台网现状及其预警能力分析[J]. 地震学报, 37(3): 508–515.
- 于培青, 符衡, 林彬华, 等. 2019. 地震预警在广西北流  $M_s 5.2$  地震中的实践与应用[J]. 华北地震科学, 37(增刊1): 43–46, 66.
- 袁志祥, 单修政, 徐世芳, 等. 2007. 地震预警技术综述[J]. 自然灾害学报, 16(6): 216–223.
- 张红才, 金星, 李军, 等. 2012. 地震预警震级计算方法研究综述[J]. 地球物理学进展, 27(2): 464–474.
- 朱景宝, 宋晋东, 李山有. 2021. 基于支持向量机的地震预警震级快速估算研究[J]. 振动与冲击, 40(7): 126–134.
- Allen R M, Kanamori H. 2003. The potential for earthquake early warning in southern California[J]. Science, 300(5620): 786–789.
- Erdik M, Fahjan Y, Ozel O, *et al.* 2003. Istanbul earthquake rapid response and the early warning system[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 1(1): 157–163;
- Espinosa – Aranda J M, Jiménez A, Ibarrola G, *et al.* 1995. Mexico City seismic alert system[J]. Seism Res Lett, 66(6): 42–53.
- Given D D, Cochran E S, Heaton T, *et al.* 2014. Technical implementation plan for the ShakeAlert production system – An earthquake early warning system for the West Coast of the United States[C]. Reston, VA: U S Geological Survey, 25.
- Horiuchi S, Negishi H, Abe K, *et al.* 2005. An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(2): 708–718.
- Kamigaichi O, Saito M, Doi K, *et al.* 2009. Earthquake early warning in Japan: warning the general public and future[J]. Seismological Research Letters, 80(5): 717–726.
- Parolai S, Bindi D, Boxberger T, *et al.* 2015. On – site early warning and rapid damage forecasting using single stations: Outcomes from the REAKT Project[J]. Seismological Research Letters, 86(5): 1393–1404.
- Zhang H, Jin X, Wei Y, *et al.* 2016. An earthquake early warning system in Fujian, China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 106(2): 755–765.
- Zhu Jingbao, Li Shanyou, Song Jindong, *et al.* 2021. Magnitude estimation for earthquake early warning using a deep convolutional neural network [J]. Frontiers in Earth Science, doi: 10.3389/FEART.2021.653226.
- Zollo A, Iannaccone G, Lancieri M, *et al.* 2009. Earthquake early warning system in southern Italy: Methodologies and performance evaluation[J]. Geophysical Research Letters, 36(5): L00B07.

## Analysis of Early Warning Processing Results from the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ Earthquake

LI Danning, ZHANG Guoquan, MIAO Suqiu, GAO Yang, QIN Min, MA Honghu, CUI Qinggu  
(*Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

### Abstract

On May 21, 2021, the Yunnan Earthquake Early Warning Processing System effectively processed the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake and produced kinds of early warning information. This paper analyzed the relationship between the arrival time and the epicentral distance. It is found that for the Yangbi earthquake, the Early Warning System picked up seismic phases without mistake, ensuring high accuracy of the epicenter location and the origin time. The magnitude given by the system is generally underestimated. We compared the magnitude error of different types of stations, and found that the stations deployed with seismic – intensity meters have the smallest error, followed by the old seismometer stations and the newly – built seismometer stations. The accelerometer stations have the largest error. The Early Warning Processing System was connected to the newly – built seismometer stations and the accelerometer stations in May 2021, which in favor of improving the accuracy and stability of early warning results like the epicenter location and the original time of the Yangbi earthquake given by the system. But the magnitude error has not changed significantly, and the magnitude is still generally underestimated. This proves that the stations' layout of the Yunnan Earthquake Early Warning Processing System is reasonable; the epicenter and the origin time produced by the system are of high accuracy. The system has a certain early warning capability, but its magnitude algorithm needs to be improved.

**Keywords:** earthquake early warning; stations type; magnitude error; the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake