

朱杰, 钟玉盛. 2025. 云南地震预警站网监测效能评估[J]. 地震研究, 48(3): 422–431, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0044.

Zhu J, Zhong Y S. 2025. Evaluation of the monitoring capability of the Yunnan Earthquake Early Warning Network[J]. Journal of Seismological Research, 48(3): 422–431, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0044.

## 云南地震预警站网监测效能评估\*

朱杰, 钟玉盛

(云南省地震局, 云南昆明 650224)

**摘要:** 选取2023年每个月中没有地震记录、人工干扰较小且记录完整的某一天的地震背景噪声数据, 计算得出云南地震预警站网包含的3类地震仪器的噪声最大概率峰值位移(PGD)分布, 并选择这3类地震仪器噪声最大的一个月(2月)对云南地震预警站网效能进行全面评估。利用考虑时效性的传统测震站网监测能力评估方法和混淆矩阵方法对云南地震预警站网3类地震仪器单独组网和融合组网的预警最小震级、预警首报时间和预警系统触发阈值进行研究。结果显示, 测震仪、强震仪和烈度仪的PGD范围分别为0.004~0.048  $\mu\text{m}$ 、0.04~2.85  $\mu\text{m}$ 和7.5~26.9  $\mu\text{m}$ 。云南地震预警站网监测能力下限由测震仪单独组网决定, 平均值为 $M_L 1.3$ , 三网融合预警最小震级平均值为 $M_L 2.7$ , 云南55%的地区的预警最小震级小于 $M_L 3.0$ , 95%的地区小于 $M_L 3.4$ 。预警首报时间平均值为5.2 s, 55%的地区小于5.1 s, 95%的地区小于5.8 s。对于云南地震预警系统, 提高其站点分布密度, 一定程度上能够降低预警最小震级下限和减少预警首报时间。云南地震预警系统的触发阈值为 $M_L 3.0$ , 能满足实际站网监测工作需求, 系统准确度为0.779 7, 精确度为0.895 5, 灵敏度为0.759 5, 特异性为0.820 5, F1分数为0.821 9。

**关键词:** 噪声水平; 地震预警; 监测能力; 时效性; 混淆矩阵

**中图分类号:** P315.39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)03-0422-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0044

### 0 引言

地震预警技术, 主要利用地震纵波的传播速度大于横波和面波, 且电磁波的传播速度远大于地震波的原理, 使用布设在预警目标区或潜在震源区的站点或站网对地震进行实时监测, 破坏性地震发生后, 预警系统会根据震中附近站点接收的地震波信息, 快速估算出地震三要素和地震动影响, 通过电磁波信号, 抢在破坏性地震波到达预警区域的数秒至数十秒之前向该地区用户发出地震预警信息, 从而使用户有足够时间采取相应紧急处置措施, 避免重大人员伤亡和经济损失(张红才等, 2013; 刘辰, 李小军, 2014)。

国家地震烈度速报与预警工程云南子项目, 在云南地区建设了由202个基准站、228个基本站

和1230个一般站组成的高密度综合地震观测站网, 平均台间距为11 km, 基本建成了覆盖云南省全境的地震预警站网。

随着预警工程项目整体验收工作的开展, 需要对云南地震预警站网预警最小震级、预警首报时间等区域地震监测能力指标进行评估。许多学者使用基于概率的完整性震级(PMC)方法(王鹏等, 2016; 王亚文等, 2017)、震级-最大距离方法(许可等, 2017; 曹舸斌等, 2019)等, 对传统测震台网监测能力进行评估, 得到了各站网监测震级下限, 然而这些研究没有考虑站网时效性, 对于预警站网监测效能评估是不完备的。在此基础上, 部分研究人员(余思, 唐婷婷, 2021; 游秀珍等, 2023; 朱峰等, 2023)在评估站网监测震级下限的同时, 引入时效性研究, 得出站网的预警最小震级和预警首报时间。背景噪声具有

\* 收稿日期: 2024-03-28.

基金项目: 云南省地震局科技专项(2024ZX02).

第一作者简介: 朱杰(1986-), 工程师, 主要从事地震监测、预警工作. E-mail: 583805982@qq.com.

季节性变化（王伟涛等，2011），不同时段背景噪声差异，会导致评估结果出现差异，同时，还需要对预警站网触发地震阈值的有效性、合理性进行测评，才能更全面地评估预警站网的效能。

目前，尚未见关于预警站网触发地震阈值的相关研究报道，因此本文选择2023年云南地区背景噪声较大的时段，对预警最小震级和预警首报时间进行计算。混淆矩阵是在分类问题中用于评估系统性能的一种表格形式，许多学者用其评估分类器性能和传感器可靠性（赵存秀，2020；张开放等，2021；于营等，2021）。本文借鉴混淆矩阵的方法，对云南地震预警站网触发地震的阈值，系统准确度、灵敏度、精确度等指标进行评估。

## 1 研究方法

测震仪、强震仪和烈度仪3类仪器的传感器具有不同的噪声模型，各类传感器的性能、灵敏度等差异大，噪声水平在不同频带呈现不同的特性（王芳等，2019）。常用的均方根值法和噪声功率谱法无法有效地去除不同传感器的噪声干扰（游秀珍等，2023）。为了统一仪器的传感器噪声评估标准，本文将3类仪器都仿真为周期为1 s、阻尼比 $\xi=0.707$ 的DD-1型地震仪的位移噪声波形数据进行评估。

计算站点背景噪声水平，统计站点时域噪声最大峰值位移（PGD），去除记录异常站点，可获得各站点可靠的位移振幅值。利用近震震级计算公式，对监测区域进行 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 网格化处理，假设每个网格发生一次地震，则：

$$\begin{aligned} M_L &= \lg U_m + R(\Delta) \\ U_m &= 3PGD = 9\sigma \end{aligned} \quad (1)$$

式中： $M_L$ 为近震震级； $U_m$ 为地震波最大峰值位移； $R(\Delta)$ 为量规函数； $\Delta$ 为震中距； $\sigma$ 为位移噪声有效值。对第 $i$ 个站点、第 $j$ 个网格，测定的震级表示为：

$$M_{ij} = \lg(3PGD_i) + R(\Delta_{ij}) \quad (2)$$

式中： $PGD_i$ 为将3类仪器的传感器统一仿真成DD-1地震仪记录上所量取的噪声最大概率峰值位移评估值； $R(\Delta_{ij})$ 为研究区域量规函数。

考虑地震预警的时效性，计算距离第 $j$ 个网格最近的前3个台站地震震级，将结果按震中距由近

到远排序，则使用三台定位得到第 $j$ 个网格的地震预警最小震级为：

$$M_j = \max\{M_{1j}^*, M_{2j}^*, M_{3j}^*\} \quad (3)$$

式中： $M_{1j}^*$ 、 $M_{2j}^*$ 、 $M_{3j}^*$ 为距第 $j$ 个网格最近的前3个台站地震震级。确定每个网格可监测的最小震级，对空间网格进行循环计算，从而获得整个站网的地震预警最小震级。

预警首报时间的评估，以首台地震触发时间为起点，基于IASP91全球地震波速度模型，计算震中距最近的3个台站定位所需时间，对第 $j$ 个网格内发生的地震有：

$$t_j = \max\{t_{Lj}, t_{Mj}\} \quad (4)$$

式中： $t_L$ 为震中距最近的3个台站定位时间； $t_M$ 为测定震级所需时间。循环计算网格，可得预警首报时间的空间分布。

通过计算不同地震仪器最小震级与首报时间，可得到不同地震仪器单独组网的最小震级与首报时间。将3类地震仪器进行多网融合，包括测震仪与强震仪，强震仪与烈度仪以及三种仪器融合组网。假设每个网格发生一次地震，在震后3~30 s，地震触发各类仪器分别计算震级和首报时间，结果分别按从小到大的顺序排列，三台定位后，以从小到大的排列的第3个震级和首报时间为多网融合后的结果。根据地震仪器的不同融合类型，就可以确定出不同类型地震仪多网融合的最小震级与首报时间。

## 2 数据选择

云南地区地震背景噪声受太平洋和印度洋影响较大（郑定昌等，2011），且具有较强的季节性变化（王伟涛等，2011）。噪声水平不仅影响台站记录的震级下限，还关系到整个预警台网的监测效果。单一选取某一天的噪声数据不能用来评估地震预警站网效能，也不能全面客观地反映站网的监测能力，因此，需要对一段时间范围内的噪声数据进行评估。

云南地震预警站网的基准站安装有测震仪和强震仪，基本站安装强震仪，一般站安装烈度仪。根据云南地震预警站网基准站、基本站和一般站空间分布（图1a），随机选择各类站点仪器的10%，包括测震仪23台、强震仪45台和烈度仪124台（图1b）。

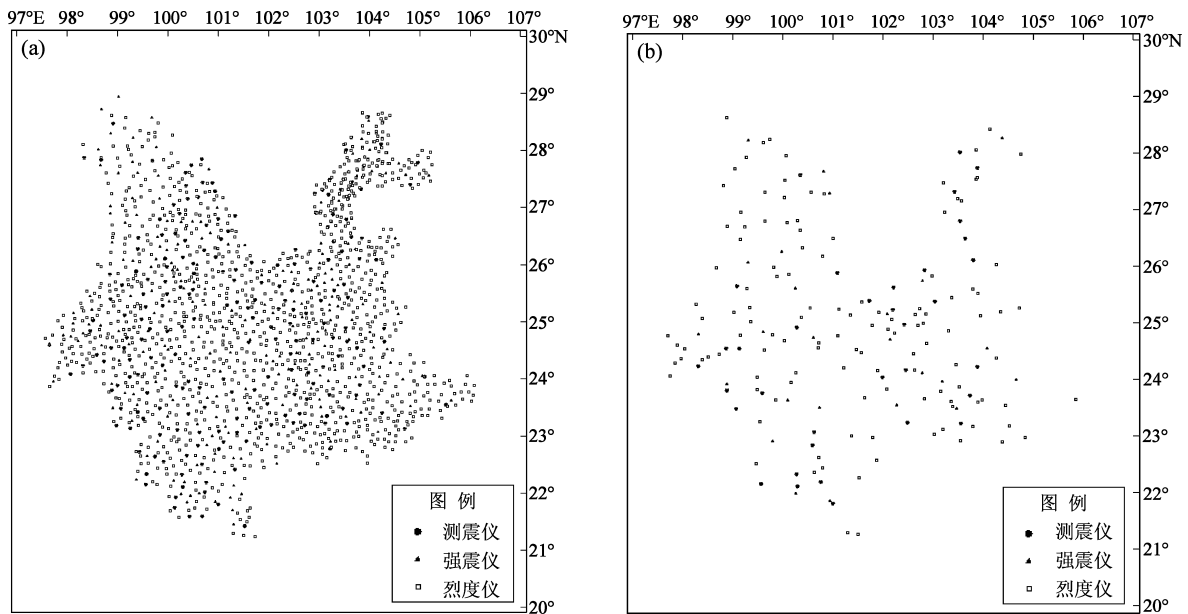


图1 云南地震预警站网3类地震仪器 (a) 及选取的10%仪器 (b) 分布

Fig. 1 Distribution of three types of seismic instruments of the Yunnan Earthquake Early Warning Network; 100% sensors (a) and 10% sensors (b)

本文选取2023年每个月中没有地震记录、人工干扰较小且记录完整的某一天的地震背景噪声数据(为了保证数据时间分布均匀,通过查阅2023年云南地震目录,统一取每月15日数据,5月、10月因15日有地震记录改取14日数据),计算得出3类地震仪器的噪声最大概率峰值位移( $PGD$ )分布,如图2所示。

在以 $PGD$ 值为指标的年度热图中,3类地震仪器呈现不同的特征。测震仪的 $PGD$ 值相对较小,主要分布在 $0.004 \sim 0.048 \mu\text{m}$ ;强震仪的 $PGD$ 值范围较广,主要为 $0.04 \sim 2.85 \mu\text{m}$ ;而烈度仪的 $PGD$ 值最大,主要为 $7.5 \sim 26.9 \mu\text{m}$ 。测震仪的 $PGD$ 值表现出明显的季节变化规律,冬季(1、2、12月)和夏季(8、9月) $PGD$ 值明显高于其他月份,其中8、9月 $PGD$ 值是其他月份的3~9倍;强震仪的 $PGD$ 值范围高于测震仪,1、2月 $PGD$ 值约为其他月份的5倍;烈度仪整体噪声水平高于测震仪和强震仪,部分台站全年噪声保持在高水平,1、2月 $PGD$ 值较其他月份高,最大值约为其他月份的2.5倍。这3类地震仪器噪声差异可能与响应频率、灵敏度、安装方式等因素有关。3类仪器噪声水平由小到大排列依次为测震仪、强震仪、烈度仪;测震仪由于自身仪器性能较好,对噪声季节性变化较为敏感。各类台站 $PGD$ 值变化在一定范围内相对稳定,1、2月 $PGD$ 值均呈现较高水平。

综合分析认为,应选择这3类地震仪器噪声最大的一个月进行评估,最终选取2023年2月数据对云南地震预警站网效能进行评估。

### 3 预警最小震级评估

在考虑预警时效性的基础上,借鉴传统测震站网监测能力评估方法,根据三台定位测定地震参数,对云南地震预警站网3类地震仪器单独组网、融合组网的预警最小震级进行评估。

由图3a可以看出,测震仪单独组网循环计算所有网格,得出地震预警最小震级平均值为 $M_L 1.3$ ,局部站点密集区域可计算得出最小震级为 $M_L 0.5$ ,较曹舸斌等(2019)计算的原有68个站点测震站网监测能力 $M_L 1.6$ 提升至 $M_L 0.3$ ;云南西北、东南地区站点相对稀疏,预警最小震级最大值为 $M_L 2.2$ ;全省55%的地区预警最小震级小于 $M_L 1.3$ ,95%的地区预警最小震级小于 $M_L 1.8$ (表1)。

强震仪和烈度仪分别单独组网(图3b、c),得出的最小震级平均值相差不大,分别为 $M_L 3.2$ 、 $M_L 3.3$ (表1),可能是因为两种仪器性能相似,测量物理量均为加速度。烈度仪站点分布密度高于强震仪,但在站点规模达到一定数量后,仪器灵敏度、带宽等自身仪器性能对震级的影响更大。

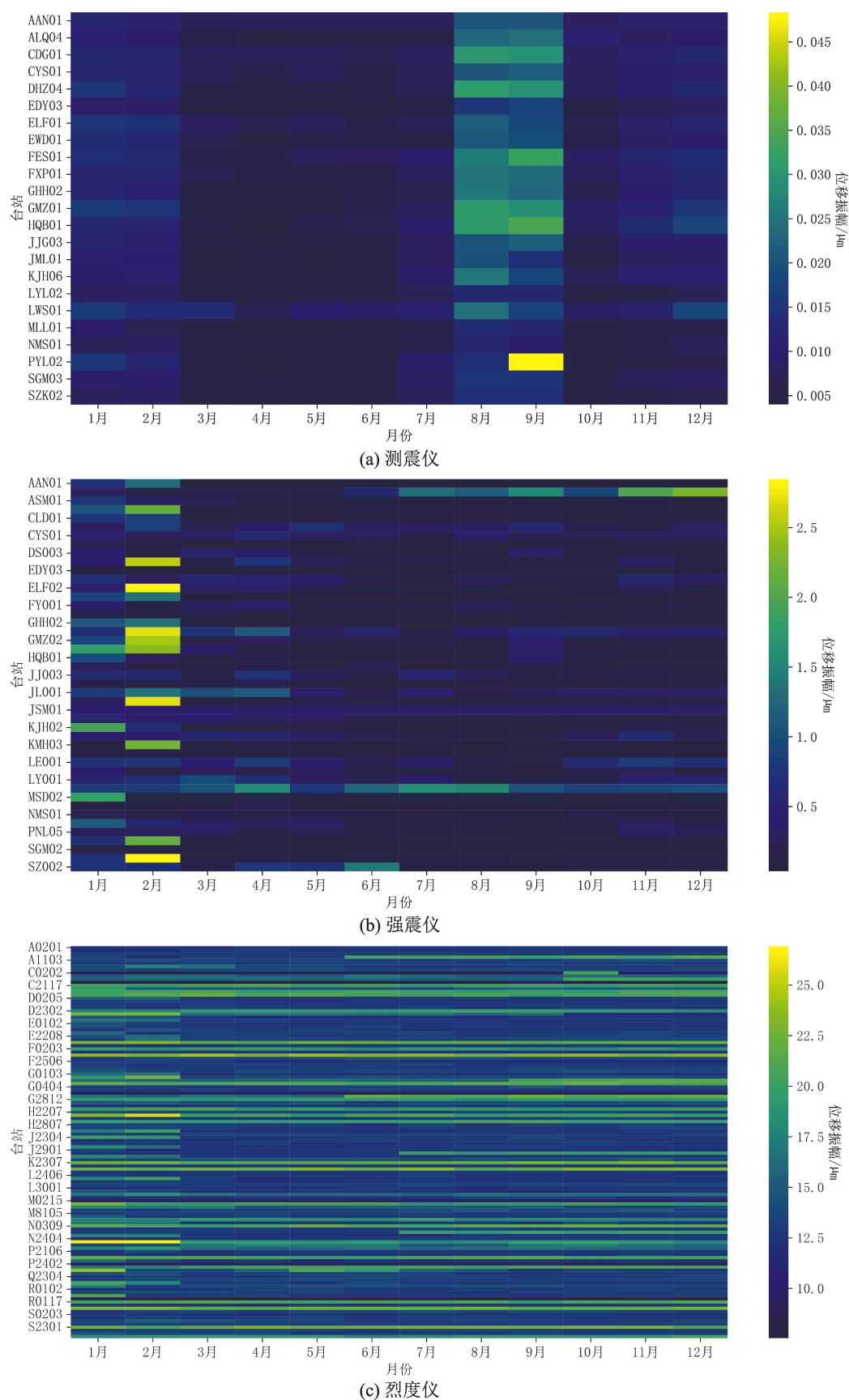


图2 2023年3类地震仪器PGD热图

Fig. 2 Heatmaps of the *PGD* recorded by the three types of seismic instruments in 2023

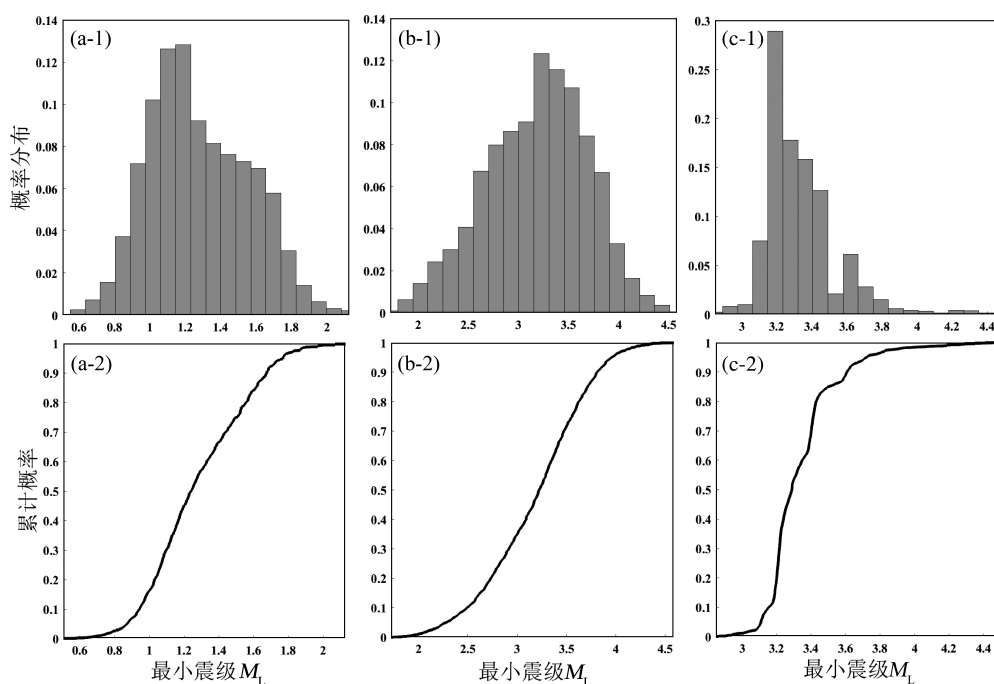


图3 测震仪 (a)、强震仪 (b) 和烈度仪 (c) 分别单独组网的预警  
最小震级概率分布直方图和累计概率分布图

Fig. 3 Histograms and cumulative probability distribution plots of the minimum earthquake magnitudes for early warning by the seismometer network (a), the strong-motion seismometer network (b) and the intensity meter network (c)

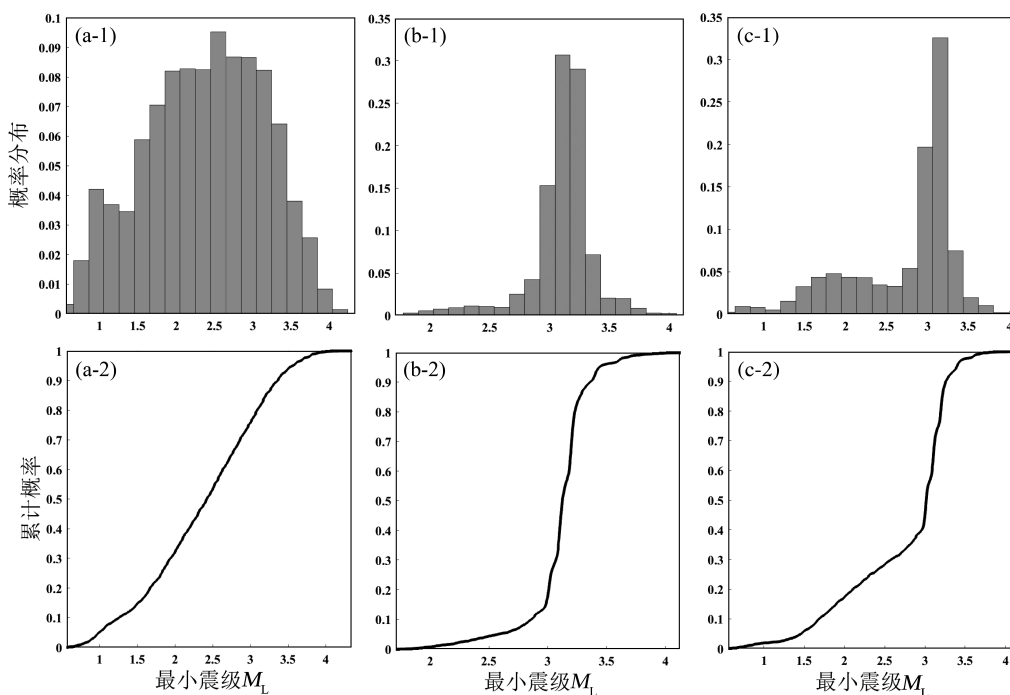


图4 测震仪与强震仪组网 (a)、强震仪与烈度仪组网 (b) 及三网融合组网 (c) 的预警  
最小震级概率分布直方图和累计概率分布图

Fig. 4 Histograms and cumulative probability distribution plots of the minimum earthquake magnitudes for early warning by the integrated seismometer and strong-motion seismometer network (a), the integrated strong-motion seismometer and intensity meter network (b) and the integration of the three types of network (c)

强震仪自身带有机电结构，总体仪器性能、安装环境等因素优于烈度仪，所以，强震仪单独组网预警最小震级监测范围优于烈度仪单独组网的预警最小震级。

测震仪与强震仪组网、强震仪与烈度仪组网（图 4a、b），预警最小震级下限均由各仪器单独组网震级下限决定，预警最小震级上限则优于单独组网中较大的结果。分析认为，决定站网震级下限的主要因素是仪器自身性能、区域站点分布密度等。融合组网后，在地震仪器自身性能不变的前提下，站点数量相对单独组网增多，区域站点分布密度加大，一定程度上优化了预警最小震级的上限。

测震仪、强震仪和烈度仪三网融合组网（图 4c），得出的最小震级平均值为  $M_L 2.7$ ；局部站点密集区域预警最小震级为  $M_L 0.5$ ；云南西北地区由于地形限制，站点密度相对小于其他地区，该地区靠近省界、国界处预警最小震级为  $M_L 4.2$ ；云南全省 55% 地区预警最小震级小于  $M_L 3.0$ ，95% 的地区预警最小震级小于  $M_L 3.4$ （表 1）。

表 1 云南地震预警站网预警最小震级

Tab. 1 Minimum magnitudes observed by the Yunnan Earthquake Warning Network

融合类型	下限 $M_L$	平均 $M_L$	上限 $M_L$	55% 累计 概率 $M_L$	95% 累积 概率 $M_L$
测震仪	0.5	1.3	2.2	1.3	1.8
强震仪	1.6	3.2	4.7	3.3	4.0
烈度仪	2.8	3.3	4.5	3.3	3.7
测震仪与强震仪	0.5	2.4	4.4	2.5	3.6
强震仪与烈度仪	1.6	3.1	4.2	3.1	3.4
三网融合	0.5	2.7	4.2	3.0	3.4

4 预警首报时间评估

云南地震预警系统设定 3 个台站触发定位，根据数据传输网络状态、系统计算性能等条件，从首台触发到测定地震三要素所用时间设为 3 s，因此，计算预警首报时间不应低于 3 s。按地震震源深度 10 km 计算，分别得出 3 类地震仪器单独组网和融合组网的预警首报时间，如图 5 所示。

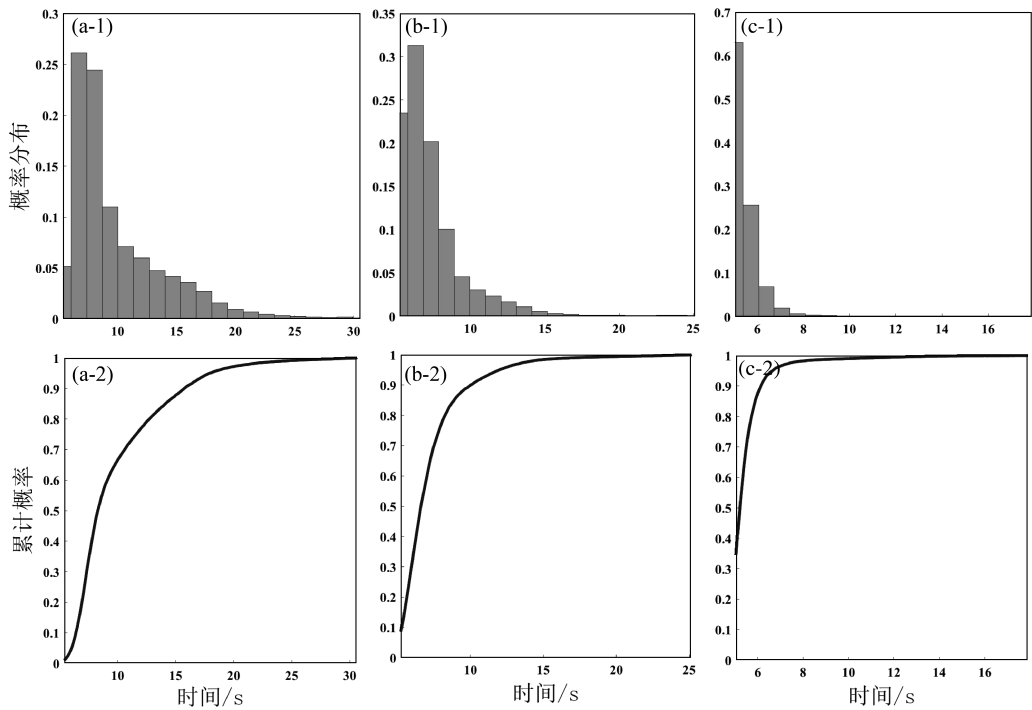


图 5 测震仪 (a)、强震仪 (b) 和烈度仪 (c) 分别单独组网的预警首报时间概率分布直方图和累积概率分布图

Fig. 5 Histograms and cumulative probability distribution plots of the first report times for early warnings by the seismometer network (a), the strong-motion seismometer network (b) and the intensity meter network (c)

由图 5 可见,测震仪、强震仪、烈度仪单独组网,预警首报时间平均值分别为 9.9 s、7.3 s、5.4 s。预警首报时间与站点数量、分布密度有关,随着仪器的数量逐渐增多,分布密度逐渐密集,预警首报时间逐渐减小;地震仪器单独组网时,在区域站点分布密集地区,预警首报时间较短,在云南西北、东南地区,站点分布稀疏,预警首报时间较长。在不考虑接入邻省台站的情况下,测震仪单独组网在云南东南地区的预警首报时间最长可达 31.2 s (表 2)。

测震仪与强震仪融合组网 (图 6a) 时,预警首报时间平均值为 6.7 s,优于测震仪、强震仪单独组网,这是因为强震仪数量约为测震仪的 2 倍,仪器融合组网后,在云南西北、东南地区站点分布得到相互补充,站点整体空间分布更均匀。强震仪与烈度仪融合组网时,预警首报时间平均值为 5.2 s (图 6b),与烈度仪单独组网的预警首报时间平均值 5.4 s 相差不大。分析原因可能是,烈度仪整体数量约为强震仪的 2.8 倍,且空间分布相比强震仪更均匀,所以当两种仪器组网时,烈度

仪起主导作用,对融合结果影响较大。

三网融合时,云南全省预警首报时间平均值为 5.2 s,云南西北地区预警首报时间最大值为 12.5 s,云南全省 55% 的地区预警首报时间小于 5.1 s,95% 的地区预警首报时间小于 5.8 s (表 2)。三网融合组网计算结果与强震仪与烈度仪组网计算结果基本相同,说明在预警首报时间的计算中,烈度仪由于数量较多、分布相对更均匀,起到了决定性的作用。

表 2 云南地震预警站网预警首报时间

Tab. 2 Time of the post-earthquake first report by the Yunnan Earthquake Early Warning Network 单位: s

融合类型	最小值	平均值	最大值	55% 累计概率	95% 累计概率
测震仪	4.7	9.9	31.2	8.6	17.9
强震仪	4.7	7.3	25.6	6.8	12
烈度仪	4.7	5.4	18.2	5.3	6.7
测震仪与强震仪	4.7	6.7	20.9	6.4	10.4
强震仪与烈度仪	4.7	5.2	12.5	5.1	5.9
三网融合	4.7	5.2	12.5	5.1	5.8

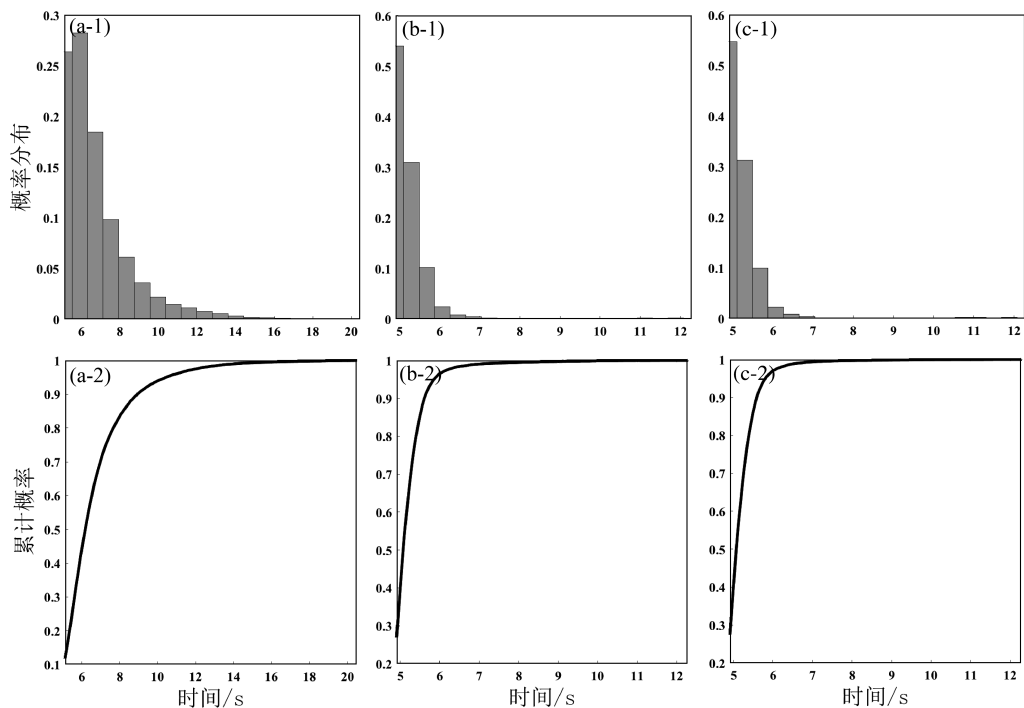


图 6 测震仪与强震仪组网 (a)、强震仪与烈度仪组网 (b) 及三网融合组网 (c) 的预警首报时间概率分布直方图和累计概率分布图

Fig. 6 Histograms and cumulative probability distribution plots of the first report times for early warnings by the integrated seismometer and strong-motion seismometer network (a), the integrated strong-motion seismometer and intensity meter network (b) and the integration of the three types of network (c)

## 5 首报触发阈值评估

基于传统速报震级，云南地震预警系统设定预警触发震级为  $M_L 3.0$ 。在此阈值下，需要对系统预警首报正确触发的性能进行评估，鉴于目前尚无相关研究成果，本文借鉴混淆矩阵方法，对云南地震预警系统地震触发阈值进行评估。

在混淆矩阵中，行表示实际类别，列表示系统产出类别。对于二元分类问题，它是一个  $2 \times 2$  的二维矩阵，包含 4 个重要的统计信息：真正例（True Positives, TP）、真负例（True Negatives, TN）、假正例（False Positives, FP）、假负例（False Negatives, FN）。

通过这些统计信息，可以计算出准确度、精确度、灵敏度、特异性、F1 分数等性能指标，从而全面评估系统的表现。其中准确度表示系统正确触发、未触发的比例： $Accuracy = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)$ ；精确度表示系统首报触发的样本中被正确触发的比例： $Precision = TP / (TP + FP)$ ；灵敏度表示编目大于等于  $M_L 3.0$  的样本中被正确触发的比例： $Sensitivity = TP / (TP + FN)$ ；特异性表示编目小于  $M_L 3.0$  的样本中被正确未触发的比例： $Specificity = TN / (TN + FP)$ ；F1 分数表示系统整体的精确性和全面性： $F1 = (2 \times Precision \times Sensitivity) / (Precision + Sensitivity)$ 。

基于上述理论，在充分考虑云南地区地震活动水平、预警系统设计目标、数据可用性等因素的基础上，以 2023 年云南地区  $M_L 2.8 \sim 3.5$  的地震编目结果为准确样本，规定编目震级  $M_L \geq 3.0$  地震为 T， $M_L < 3.0$  地震为 F，预警首报结果触发为 P，未触发为 N。在阈值为  $M_L 3.0$  时，可将云南地震预警系统产出的首报结果分为以下 4 类——TP： $M_L \geq 3.0$  地震，预警首报结果触发；TN： $M_L \geq 3.0$  地震，预警首报结果未触发；FP： $M_L < 3.0$  地震，预警首报结果触发；FN： $M_L < 3.0$  地震，预警首报结果未触发。

统计 2023 年云南地区满足震级要求的 118 个编目和预警首报结果，得到混淆矩阵如图 7 所示。由混淆矩阵可以计算出在阈值为  $M_L 3.0$  时，云南地震预警系统首报触发地震的性能指标：准确度

		预警首报触发结果	
		P	N
编目实际结果	T	60	32
	F	7	19

图 7 云南地震预警系统阈值  $M_L 3.0$  时首报触发结果混淆矩阵

Fig. 7 The confusion matrix for the first report triggering results at the threshold of  $M_L 3.0$  of the Yunnan Earthquake Warning System

为 0.779 7，精确度为 0.895 5，灵敏度为 0.759 5，特异性为 0.820 5，F1 分数为 0.821 9。

由上述各项性能评估指标可以看出，在阈值为  $M_L 3.0$  时，云南地震预警系统首报正确触发地震的性能较好，其中 FP、FN 的结果均在阈值为  $-0.1 \sim 0.3$ ，属于正常误差范围。假设阈值设置降低  $M_L 0.1$ ，系统可以触发更多地震，但是震级偏小，预警意义不大；阈值设置提高  $M_L 0.3$ ，系统会遗漏大量  $M_L 3.0 \sim 3.2$  的地震，可能存在预警漏触发的风险。综合评价可以认为，云南地震预警系统地震触发阈值设置为  $M_L 3.0$ ，能够满足实际站网监测工作需求。

## 6 结论

本文在考虑地震预警时效性的基础上，综合评价 2023 年云南地区地震背景噪声变化特性，借鉴传统测震站网的监测能力评估方法，把云南地震预警站网 3 类地震仪器的传感器，统一到噪声最大概率峰值位移（PGD）进行计算，分别得出单类地震仪器组网和各类地震仪器融合组网的预警最小震级、预警首报时间。同时，借鉴混淆矩阵的方法，对云南地震预警系统设置的预警触发阈值进行评估，得到地震预警系统的监测能效评估，主要结论如下：

（1）三网融合后，云南地震预警站网监测预警最小震级平均值为  $M_L 2.7$ ，台站密集区域最小震级为  $M_L 0.5$ ，监测到最小震级上限为  $M_L 4.2$ ，云南全省 55% 的地区的地震预警最小震级小于  $M_L 3.0$ ，



95%的地区小于  $M_L 3.4$ 。

(2) 云南地震预警站网预警首报时间平均值为 5.2 s, 最小值为 4.7 s, 最大值为 12.5 s, 云南全省 55% 的地区预警首报时间小于 5.1 s, 95% 的区域小于 5.8 s。

(3) 云南西北、东南地区, 以及靠近省界、国界地区, 由于地理条件等原因, 各类站点数量相对较少, 站点空间分布不均匀, 台间距较大, 对预警最小震级、预警首报时间有较大影响。对于站点分布密集地区, 预警最小震级、预警首报时间均能取得较好结果, 但是站点分布过于密集, 会增加预警系统误触发的风险。所以适度、均匀的台站分布, 可以提高地震预警系统最小震级、缩短预警首报时间。

(4) 在触发阈值  $M_L 3.0$  下, 系统准确度为 0.779 7、精确度为 0.895 5、灵敏度为 0.759 5、特异性为 0.820 5、F1 分数为 0.821 9。综合分析认为, 云南地震预警系统地震触发阈值设备为  $M_L 3.0$  能满足实际站网监测工作需求。

本文在撰写过程中使用的预警能力评估软件, 由福建省地震局林彬华高级工程师提供, 在此表示感谢。

## 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[J]. 地震地磁观测与研究, 40(2): 71–76.
- Cao G B, Cai M J, Li W T, et al. 2019. Analysis of seismic monitoring capacity of Yunnan Seismic Network[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 40(2): 71–76. (in Chinese)
- 刘辰, 李小军. 2014. 针对设定地震的地震预警能力评估[J]. 地震工程与工程振动, 34(S1): 1031–1037.
- Liu C, Li X J. 2014. Capability assessment of earthquake early warning for assumed earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 34(S1): 1031–1037. (in Chinese)
- 王芳, 王伟涛, 龙剑锋, 等. 2019. 中国大陆地区宽频带地震台台基噪声特征[J]. 地震学报, 41(5): 569–584.
- Wang F, Wang W T, Long J F, et al. 2019. Seismic noise characteristics of broad-band seismic networks in Chinese mainland[J]. Acta Seismologica Sinica, 41(5): 569–584. (in Chinese)
- 王鹏, 郑建常, 李铂. 2016. 基于 PMC 方法的山东省测震台网监测能力评估[J]. 地球物理学进展, (6): 2408–2414.
- Wang P, Zheng J C, Li B. 2016. Analysis of detection capability of Shandong regional seismic network based on PMC method[J]. Progress in Geophysics, (6): 2408–2414. (in Chinese)
- 王伟涛, 倪四道, 王宝善. 2011. 云南地区地脉动噪声特征分析研究[J]. 地震, 31(4): 58–67.
- Wang W T, Ni S D, Wang B S. 2011. Study on the characteristics of microseisms in the Yunnan Region, China[J]. Earthquake, 31(4): 58–67. (in Chinese)
- 王亚文, 蒋长胜, 刘芳, 等. 2017. 中国地震台网监测能力评估和台站检测能力评分(2008—2015 年)[J]. 地球物理学报, 60(7): 2767–2778.
- Wang Y W, Jiang C S, Liu F, et al. 2017. Assessment of earthquake monitoring capability and score of seismic station detection capability in China Seismic Network(2008–2015)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(7): 2767–2778. (in Chinese)
- 许可, 柳艳丽, 高也, 等. 2017. 天津测震台网地震监测能力分析[J]. 地震地磁观测与研究, 38(4): 194–198.
- Xu K, Liu Y L, Gao Y, et al. 2017. Evaluation of monitoring capability of Tianjin Seismic Network[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 38(4): 194–198. (in Chinese)
- 游秀珍, 林彬华, 李军, 等. 2023. 福建省地震台网预警能力评估[J]. 地震学报, 45(1): 126–141.
- You X Z, Lin B H, Li J, et al. 2023. Evaluation of early warning capability of Fujian Province Seismic Network[J]. Acta Seismologica Sinica, 45(1): 126–141. (in Chinese)
- 于营, 杨婷婷, 杨博雄. 2021. 混淆矩阵分类性能评价及 Python 实现[J]. 现代计算机, (20): 70–73.
- Yu Y, Yang T T, Yang B X. 2021. Confusion matrix classification performance evaluation and Python implementation[J]. Modern Computer, (20): 70–73. (in Chinese)
- 余思, 唐婷婷. 2021. 江西省测震站网地震预警能力评估初步研究[J]. 地震科学进展, 51(6): 246–251.
- Yu S, Tang T T. 2021. Preliminary discussion on the earthquake early warning network of Jiangxi Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 51(6): 246–251. (in Chinese)
- 张红才, 金星, 李军, 等. 2013. 地震预警系统研究及应用进展[J]. 地球物理学进展, 28(2): 706–719.
- Zhang H C, Jin X, Li J, et al. 2013. Progress of research and application of earthquake early warning system[J]. Progress in Geophysics, 28(2): 706–719. (in Chinese)
- 张开放, 苏华友, 窦勇. 2021. 一种基于混淆矩阵的多分类任务准确率评估新方法[J]. 计算机工程与科学, 43(11): 1910–1919.
- Zhang K F, Su H Y, Dou Y. 2021. A new multi-classification task accuracy evaluation method based on confusion matrix[J]. Computer Engineering and Science, 43(11): 1910–1919. (in Chinese)
- 赵存秀. 2020. 基于混淆矩阵的分类器性能评价指标比较[J]. 电子技术与软件工程, (13): 146–147.
- Zhao C X. 2020. Comparison of performance evaluation indicators for classifiers based on confusion matrix[J]. Electronic Technology and Software Engineering, (13): 146–147. (in Chinese)
- 郑定昌, 庞卫东, 闵照旭, 等. 2011. 云南地区背景噪声特征分析[J]. 地震研究, 34(2): 201–206.
- Zheng D C, Pang W D, Min Z X, et al. 2011. Investigation of ambient-noise source in Yunnan[J]. Journal of Seismological Research, 34(2): 201–206. (in Chinese)
- 朱峰, 杨驰, 何奕成, 等. 2023. 江苏省测震台网地震预警能力评估[J]. 地震地磁观测与研究, 44(5): 52–58.
- Zhu F, Yang C, He Y C, et al. 2023. Preliminary discussion on the earthquake early warning network of Jiangsu Province[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 44(5): 52–58. (in Chinese)

## Evaluation of the Monitoring Capability of the Yunnan Earthquake Early Warning Network

ZHU Jie, ZHONG Yusheng

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650024, Yunnan, China)

### Abstract

To study the warning effectiveness of the Yunnan Earthquake Early Warning Network, this paper selects the complete records of noise data of one day in each month of 2023, which has no earthquakes and less interference. The distribution of the peak ground displacement (*PGD*) of the three types of sensors is calculated, and the month (February) with the highest noise of the three types of sensors is chosen to conduct a comprehensive assessment of the warning network. By using the traditional monitoring capacity assessment method of seismic networks that considers timeliness and the confusion matrix method, this paper studies the minimum warning magnitude, the first report time after an earthquake, and the trigger threshold of the warning system for the three types of sensors when they are independently networked and in a combined network within the Yunnan Earthquake Early Warning Network. The results revealed that *PGD* of the seismometers' sensors ranged between  $0.004 - 0.048 \mu\text{m}$ , *PGD* of the accelerographs' sensors ranged between  $0.04 - 2.85 \mu\text{m}$ , and *PGD* of the intensity - meters' sensors ranged  $7.5 - 26.9 \mu\text{m}$ . The lower limit of the monitoring capability of the Yunnan Earthquake Early Warning Network is determined by the seismometer network it contains; its average is  $M_L 1.3$ . The average value of the minimum magnitude for the Yunnan Earthquake Early Warning Network is  $M_L 2.7$ , and in 55% of Yunnan area the early warning network can detect the magnitudes smaller than  $M_L 3.0$ . In 95% of Yunnan area the early warning network can detect the magnitudes smaller than  $M_L 3.4$ . The average time of the first - report for early warning after the earthquake is 5.2 s. For 55% of Yunnan area, the first - report time is less than 5.1 s. For 95% of Yunnan area, the reporting first - report time is less than 5.8 s. Increasing the station of the Yunnan Earthquake Early Warning System can help reduce the lower limit of the magnitude for early warning, and reduce the post - earthquake first report time. The triggering threshold of the Yunnan Earthquake Early Warning System is  $M_L 3.0$ , which can meet the monitoring requirement. In this case, the whole warning system's exactitude is 0.7797, its precision is 0.8955, its sensitivity is 0.7595, its specificity is 0.8205, and its F1 score is 0.8219.

**Keywords:** noise level; earthquake early warning; monitoring capability; timeliness; confusion matrix