

怀奕迅, 王振南, 徐翔, 等. 湖南地震预警站网监测预警与烈度速报能力分析[J]. 华南地震, 2024, 44(3): 153–161. [HUAI Yixun, WANG Zhennan, XU Xiang, et al. Monitoring, Early Warning and Intensity Rapid Reporting Capabilities of Hunan Earthquake Early Warning Station Network[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(3): 153–161]

湖南地震预警站网监测预警与烈度速报能力分析

怀奕迅, 王振南, 徐翔, 刘洋君

(湖南省地震局, 长沙 410004)

摘要: 截止 2023 年底, 湖南预警站网系统已全面建设完成。通过以最大概率峰值位移(PGD)为指标对湖南三类站点的背景噪声水平进行计算, 在此基础上基于传统地震监测能力评估方法、考虑时效性的4台定位理论以及平均台间距方法计算综合分析湖南预警站网系统理论监测预警及烈度速报能力。结果表明: 湖南 95% 地区能监测 M_L 2.1 级以下地震、预警时间在 10.1 s 以下、能预警震级在 M_L 4.4 级以上地震、烈度速报精度在 38 km 以下。国家地震烈度速报与预警工程湖南子项目实施完成后, 湖南预警站网已具备一定的预警能力和烈度速报能力, 具备较好的地震监测能力。

关键词: 地震预警; 地震监测能力; 烈度速报

中图分类号: P315.62

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2024)03-0153-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.03.17

Monitoring, Early Warning, and Intensity Rapid Reporting Capabilities of Hunan Earthquake Early Warning Station Network

HUAI Yixun, WANG Zhennan, XU Xiang, LIU Yangjun

(Hunan Earthquake Agency, Changsha 410004, China)

Abstract: As of the end of 2023, the comprehensive construction of the Hunan early warning station network system has been completed. In this paper, the maximum probabilistic peak ground displacement(PGD) was used as an index to calculate the background noise level of three types of stations in Hunan. On this basis, the traditional earthquake monitoring capability evaluation method, the four-station positioning theory considering timeliness, and the average station spacing method were used to comprehensively analyze the theoretical monitoring, early warning, and intensity rapid reporting capabilities of the Hunan early warning station network system. The results show that 95% of areas in Hunan Province can monitor earthquakes below M_L 2.1, with a warning time of less than 10.1 seconds, and warn earthquakes above M_L 4.4, with an accuracy of intensity rapid reporting below 38 km. After the completion of the Hunan sub-project of the National Earthquake Intensity Rapid Reporting and Early Warning Project, the Hunan Early Warning Station Network has a certain level of early warning and intensity rapid reporting capabilities, and has good earthquake monitoring capabilities.

Keywords: Earthquake early warning; Earthquake monitoring capability; Intensity rapid reporting

收稿日期: 2024-03-12

基金项目: 湖南 2024 年度防震减灾科研课题(202403)

作者简介: 怀奕迅(1997-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事地震监测与预警相关研究。

E-mail: 495091652@qq.com

0 引言

地震预警是利用地震发生时最先到达的初至信号,推测即将到达的大振幅剪切波和面波,以此对特定区域的人们发送地震预警信息,达到减轻地震灾害损失的一种技术手段^[1]。地震预警的主要原理有两点,一是地震波的传播速度小于电磁波的传播速度,二是具有地震信息的P波波速比破坏力较强的S波要快。地震发生时,地震监测仪器会迅速捕捉地震信息并自动评估此次地震的破坏程度及影响范围,随即发出预警信息^[2]。大量研究表明,完备的地震预警系统能使人员伤亡大量减少^[3-4]。

湖南地区地质构造复杂,区域内有14条第四纪以来活动的断裂,走向以北东向为主。其中有多条早一中更新世以来的活动断裂,历史上曾多次发生破坏性地震,存在发生中强地震的背景^[5]。同时湖南省内,因矿山开采和水库水位变化等诱发的小震及微震活动频繁。故在湖南地区建设一定数量的预警台站以形成远场大震预警能力和基于县级城市实测值的烈度速报能力至关重要。

世界上许多国家和地区已开展地震预警系统建设,如日本的UrEDAS系统、墨西哥的SAS系统及美国的ELlarmS系统,2008年汶川地震后,地震预警逐步走向我国公众的视野^[6]。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,湖南台网承担了国家地震烈度速报与预警工程湖南子项目,经过近6年的实施,湖南预警系统于2023年6月进入试运行阶段,2023年10月正式通过验收并进入正式运行阶段。本文将对国家地震烈度速报与预警工程湖南子项目的成果进行简要介绍,梳理湖南预警站网主要系统构成,并对湖南预警站网的监测能力及预警能力进行简要分析,以期对湖南省的台网布局优化和重点区域防震减灾能力提升提供依据。

1 站网概况

湖南预警站网由五大技术系统构成,分别为台站观测系统、通信网络系统、数据处理系统、紧急地震信息服务系统和技术保障系统。其中,台站观测系统负责收集地面运实时速度与加速度,是整个系统的基础;通信网络系统负责其他子系统的通信与连接,保证数据与信息的高效传输;

数据处理系统负责分析、处理、判断台站观测系统传输的实时观测数据,产出地震预警和烈度速报等信息产品,并将其推送至紧急地震信息服务系统;紧急地震信息服务系统负责接收服务信息,并通过各种通信媒介和终端分门别类推送至社会公众和行业用户,它是预警站网的集中体现;技术保障系统是预警站网的“监控器”,它能及时剔除异常台站并提醒启动维修工作,确保各技术系统的良好运行。

台站观测系统是预警站网的根本,是监测预警及烈度速报的数据来源,本文是基于台站观测系统来展开研究,故将湖南台站观测系统的组成及其在全省的分布情况进行详细说明。

湖南台站观测系统由省内140个站点和省外89个站点构成。省内140个站点包括26个基准站、62个基本站和52个一般站,省外89个站点包括28个基准站、35个基本站和26个一般站。基准站作为预警站网的核心台站安装了地震仪(速度计)和强震仪(加速度计);基本站安装强震仪,作为预警站网的辅助台站及烈度速报的核心台站;一般站安装烈度仪,能辅助开展预警并作为烈度速报的骨干台站^[7]。湖南预警站网按照每个地级以上城市至少一个基准站、每个区县市至少一个基本站或一般站的原则,并综合考虑地震构造及地震分布特征建设预警台站,台站分布如图1所示。

2 理论监测能力计算与分析

台站监测能力取决于台站台基背景噪声水平、观测仪器响应灵敏度、仪器动态范围及台网密度及分布等^[8]。当台站设备位置确定后,监测能力与台站台基背景噪声水平有关,这是由于地震信号只有高于台基噪声信号一定程度后,此次地震事件才能得以被记录分析。故在计算监测能力之前,首先计算预警站网三类站点背景噪声。

2.1 三类站点背景噪声统计分析

三类站点仪器记录的噪声特点各异,为方便比较,本文采用噪声最大概率峰值位移(PGD)来计算三类站点的背景噪声水平,PGD能最大程度地提高计算的准确度^[9]。计算步骤如下:①导出24 h湖南预警站网的所有台站波形数据,且统一仿真为周期为1 s、阻尼比为0.707的位移记录;②对台站进行每分钟截取,求出每个台站的分钟PGD值;③依据统计学理论剔除异常数据,删除偏大偏小

数据;④根据台站PGD的频次图,求出该台站的最大概率PGD,以此作为该台站背景噪声的PGD值。分别统计三类站点PGD值的分布,并基于统计学理论以2%和98%作为正常范围求出三类站点PGD值的最大最小及平均值,依次得出三类站点分布、累积概率及频次结果,如图2所示。计算结果

显示三类站点的PGD平均值分别为0.028 μm 、0.12 μm 和36.8 μm ,结合三类站点PGD值分布,基准站PGD值分布较为均衡、基本站次之,一般站分布较为杂乱,可初步认定基准站数据质量最好,基本站次之,一般站最差。

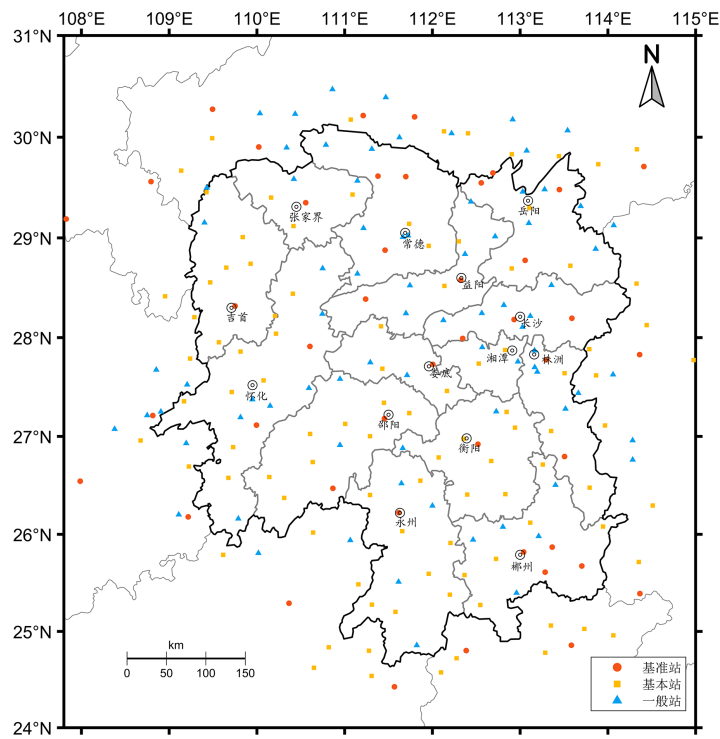


图1 湖南地区预警三类站点分布图

Fig.1 Three types of warning stations in Hunan Province

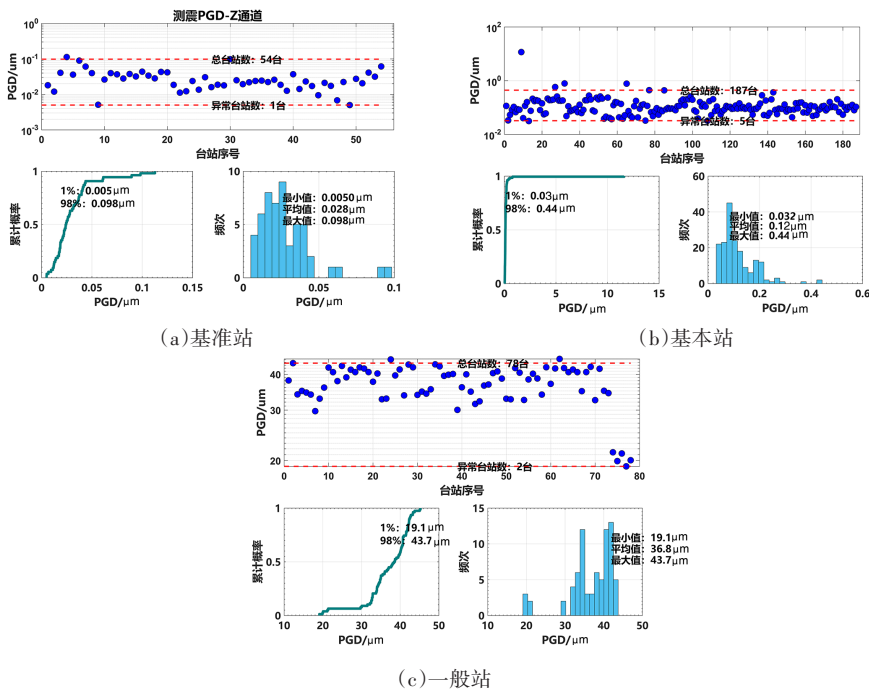


图2 三类站点背景噪声水平PGD分布、累积概率及频次图

Fig.2 PGD distribution, cumulative probability, and frequency of background noise level at three types of stations

2.2 监测能力计算与分析

本文理论监测能力计算方法如下：依据台站地基噪声观测值计算台站所能监测最小地震事件的振幅值，并根据近震震级公式，以量规函数反推计算既定震级的最小监控范围。近震震级计算公式为：

$$M_L = \lg A_\mu + R(\Delta)$$
 (1)

$$A_\mu = 3PGD$$
 (2)

上式中， M_L 表示震级； A_μ 代表着最大地动位移(μm)，一般来说， A_μ 要超过3倍PGD，地震信号才得以完备记录，各台站PGD的值已在上一节中给出； Δ 表示震中距； $R(\Delta)$ 表示近震震级量规函数，它随着震中距的变化而变化，表1已经给出量规函数在不同震中距下的取值^[10]。

根据式(1)、(2)式可知，在已知台基背景噪声和震中距的情况下，可反演计算出台站所能监测的最小震级。本文采用空间扫描法计算湖南地区监测能力，将湖南地区划分为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 的规则网格，当扫描到某网格时，计算每个台站与此网格的距离，根据距离结果及PGD结果以式(1)、(2)可反演每个台站的最小记录震级，将计算结果按从小到大顺序排列，按照4台定位理论，取最小4个震级中的最大值作为此点的监测能力值。依次循环研究区每一个网格，即可得到研究区理论监测能力分布图。

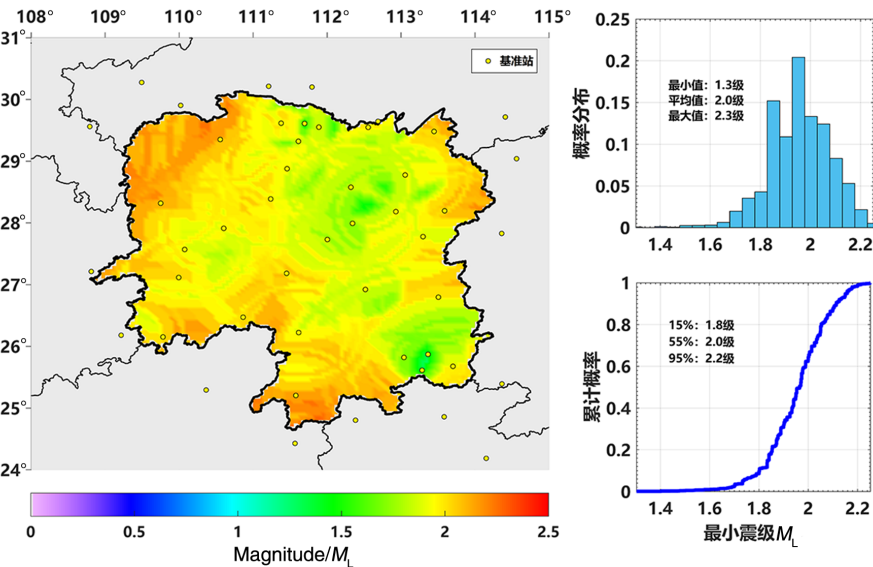
采用上述方法计算湖南地区监测能力分布，本文通过单独采用基准站数据、基本站数据、一般站数据、基准站+基本站数据及三类站点数据计算湖南地区最小监测能力，以此详尽分析三类台站对湖南台网最小监测能力的影响。计算结果如图3所示，结果显示基准站的监测能力最好，95%地区最小监测能力达到 $M_L 2.2$ ；基本站次之，95%地区最小监测能力达到 $M_L 2.5$ ；一般站最差，95%地区最小监测能力仅为 $M_L 5.0$ ，这与上文所计算的PGD结果是相一致的。

本文还采用基准站+基本站数据和三类站点数据计算湖南地区最小监测能力。与基准站单网最小监测能力相比，基准站+基本站数据对湖南最小监测能力有一定的提升，以湖南95%地区最小能力做参考，基准站+基本站的最小监测能力相较于基准站单网监测能力降低了0.1级，最小监测能力的最小震级降低了0.4级；三类站点的最小监测能力与基准站+基本站的最小监测能力相比，最小监测能力未发生明显变化，这说明一般站对台网的最小监测能力影响不大。

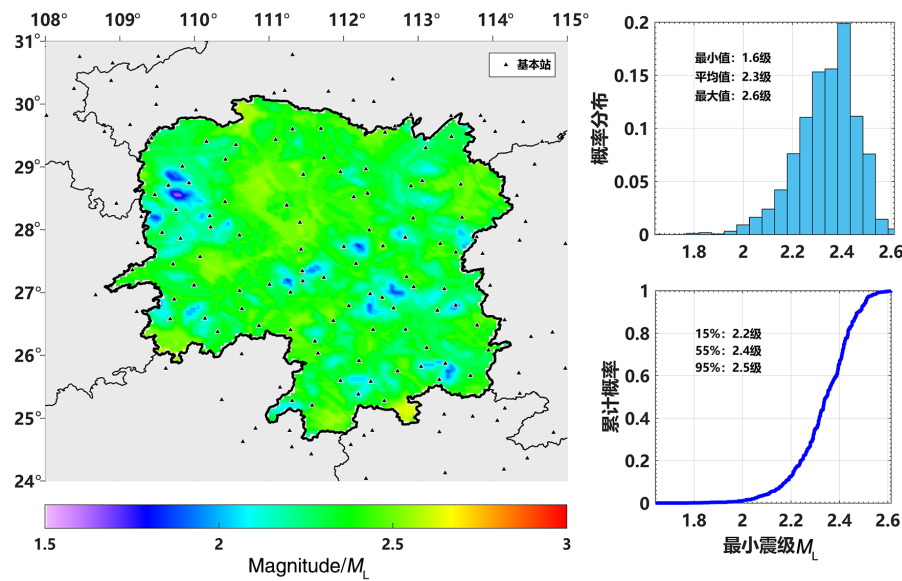
从三类站点的最小监测能力来看，湖南95%的地区监测能力在 $M_L 2.1$ 及以下，55%的地区监测能力在 $M_L 1.9$ 及以下，在郴州地区及湖南北部部分地区监测能力最好，达到 $M_L 1.0$ 左右。总体来说，湖南地区地震监测能力较为均衡。

表1 量规函数与震中距的关系
Table 1 Relationship between calibration function and epicentral distance

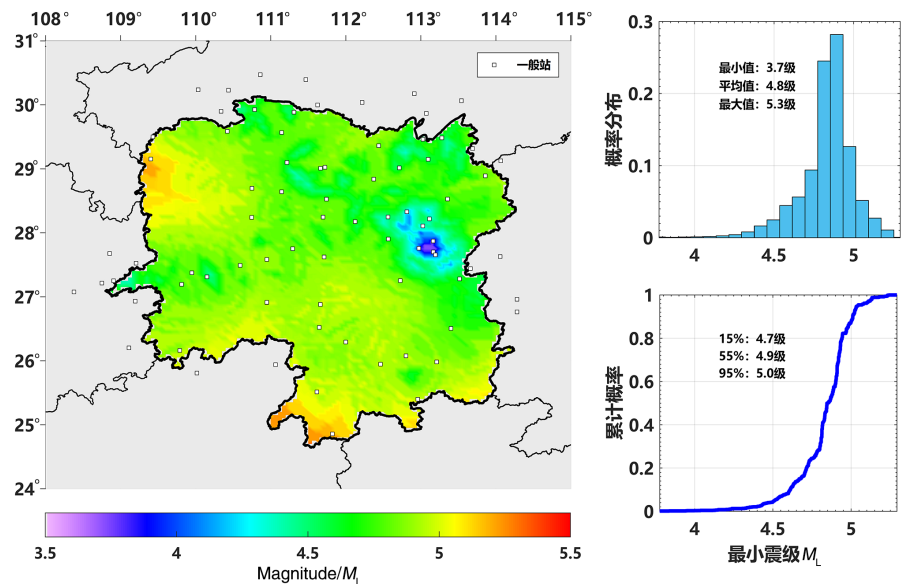
Δ/km	0~5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	66~70	75~85	90~100
$R(\Delta)$	1.8	1.9	2.0	2.1	2.3	2.5	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.3	3.3	3.4



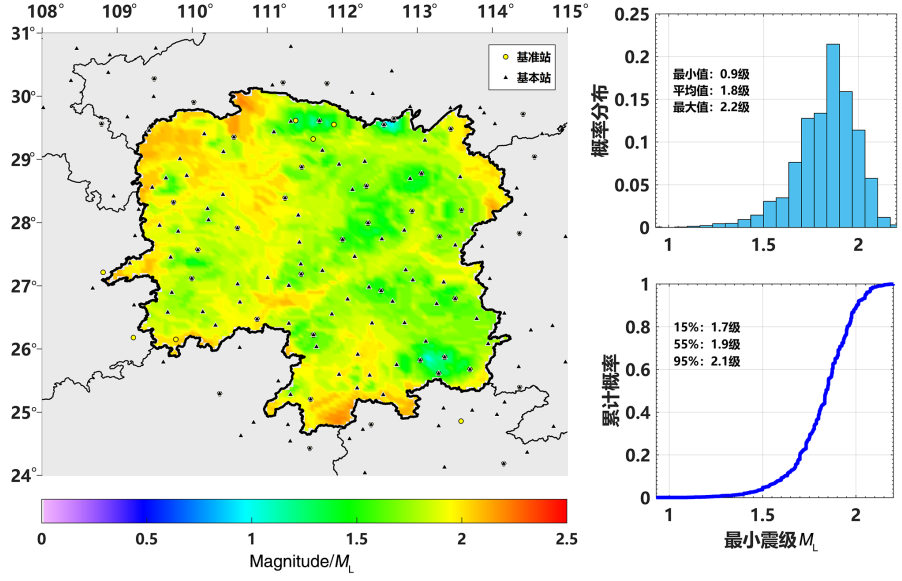
(a)湖南基准站最小监测能力



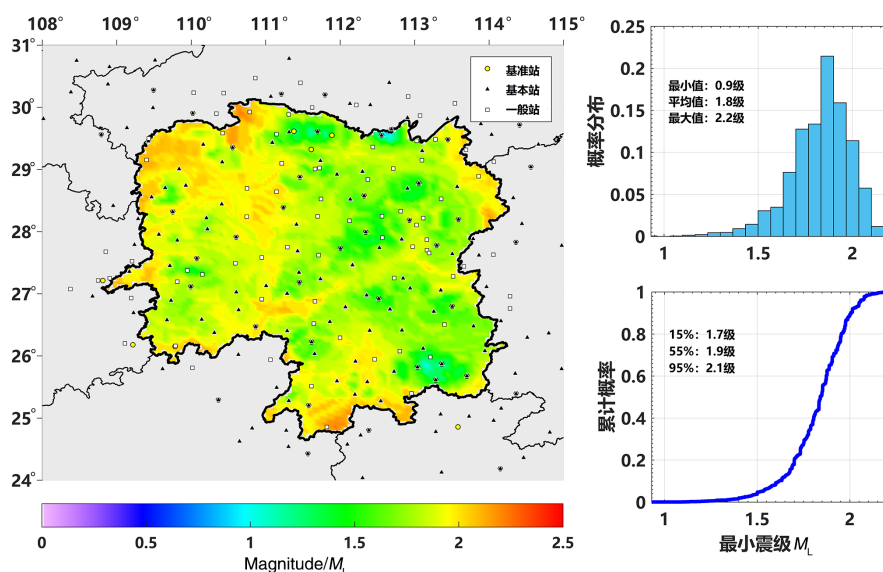
(b)湖南基本站最小监测能力



(c)湖南一般站最小监测能力



(d)湖南基准站+基本站最小监测能力



(e) 湖南三类站点最小监测能力

图3 湖南地区理论监测能力图

Fig.3 Theoretical monitoring capability in Hunan Province

3 理论预警能力计算与分析

预警能力的本质是预警时间的快慢。地震预警的过程是一个不断校正的过程,包含预警第一报、第二报及第三报等。通常来说地震预警时间是指第一报预警信息推送所需的时间,故在本文中,预警时间特指地震预警第一报时间,第一报时间的计算方法为距发震地点最近4个台站的触发时间。

预警时间的快慢还受台站捕捉地震信息能力的影响,即预警最小震级,只有当发生的地震超过一定的阈值时,附近的台站才足以触发。上文已经提到,这种捕捉信息的能力与台基背景噪声有关。但一般来说,需要预警的地震震级都偏大,现一般的地震台站都足以记录到地震信息,故可直接根据台站分布计算理论预警时间。需要说明的是,本文在计算地震预警时间时,未将数据处理时间及发布时间计算在内,仅单纯计算预警触发所用时间。

3.1 理论预警时间计算与分析

本文在计算预警时间时采用如下方法:研究区选定为湖南省辖区,将研究区人为地划分为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 的规则网格,计算此网格发生地震时地震预警首报时间。在计算某网格的预警时间时,假定震源深度为湖南地区地震的平均震源深度10 km 预警时间用预警信息第一次被推送的时间减去发震时间,触发台站设置为4,即有4个台站同时触发后

即可推送第一次预警信息,通过三类站点融合计算地震预警时间。在计算过程中假定地震波的传播路径上地形平坦且各图层介质均匀^[11],每个台站的预警时间计算公式为:

$$t = L / v_p + t_1 \quad (3)$$

式(3)中 t 表示预警时间, L 表示震源距, v_p 表示P波的传播速度(在本文中取6 km/s), t_1 表示台站延时(在本文中取湖南台网平均延时1.2 s)与用于估计台站到时和震级所必须的数据长度(通常认为此时时间为初至震相后3 s)。分别计算离发震网格最近4个台站的预警时间后,取最大值作为此网格的预警时间值。在此情况下,循环研究区内每个网格,计算理论预警时间,计算结果如图4所示。

计算结果显示,在不考虑通信传输和用于估计台站到时和震级所必须的数据长度时湖南95%的地区预警时间能达到10.1 s以下,55%的地区预警时间能达到8.4 s左右,在长株潭地区、郴州地区及常德地区预警时间能达到6 s左右,在湖南西北地区及西南地区预警时间在10 s左右,若考虑上述条件,湖南95%地区预警时间能达到14.3 s以下,55%地区的预警时间能达到12.6 s左右。

3.2 理论预警最小震级计算与分析

上文已经提到,需要预警的地震震级一般都足以被现有台站所记录,但本文还是计算预警最小震级,旨在为台网规划、布局提供一定的依据。在计算预警最小震级时,同样对研究区进行网格划分。

预警最小震级的计算方法与监测能力计算方法一样,但在计算预警最小震级时,由于需要考虑时效性,需要选用距离震地点最近的4个台站测定地震参数,选择好台站后同样运用式(1)、(2)反演最小监测震级,将4个震级以从小到大的顺序进行排列,选择最大的数值作为此网格的预警震级,

同样循环研究区每个网格以得到湖南地区预警最小震级分布图。计算结果如图5所示,在4台触发的时间限制下,湖南地区对省内 $M_L4.7$ 以上的地震均有预警能力,95%的地区对 $M_L4.4$ 以上地震有预警能力。

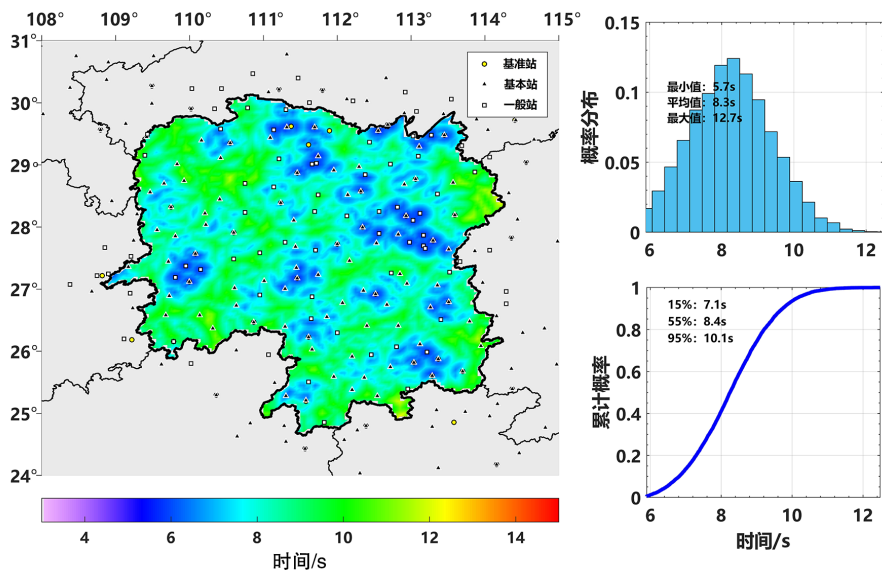


图4 湖南地区理论预警时间图
Fig.4 Theoretical early warning time in Hunan Province

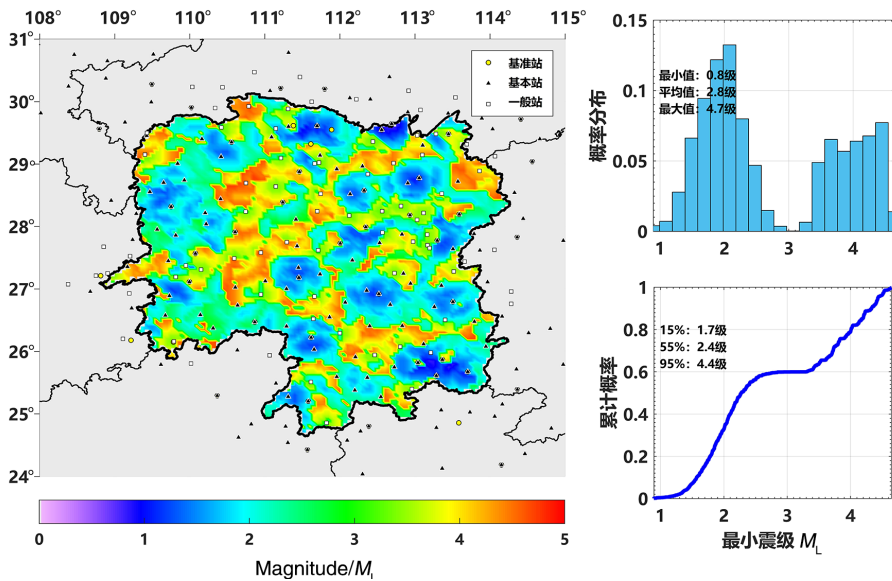


图5 湖南地区理论预警最小震级图
Fig.5 Minimum magnitude of theoretical early warning in Hunan Province

4 理论烈度速报精度计算与分析

烈度空间分布图主要是根据地震仪器记录到

的烈度结果,以插值的方法来绘制的。台网越密集、观测台站越多,烈度空间分布图精度就越高,故烈度速报精度计算可简化为平均台间距计算。本文在计算烈度速报精度时,同样将研究区划分

为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 的网格,通过计算某网格与每个台站的距离,取三个最小距离的平均值作为此点的烈度速报精度。同样地,循环每个网格,即可得到湖南地区烈度速报精度图。计算结果如图6所示。

计算结果显示,湖南95%的地区烈度速报精

度能达到38 km及以下,在长株潭地区、常德地区及郴州地区台站分布较为密集的地方烈度速报精度能达到13 km左右,湖南东部及南部小部分地区烈度速报精度较差,在45 km左右。

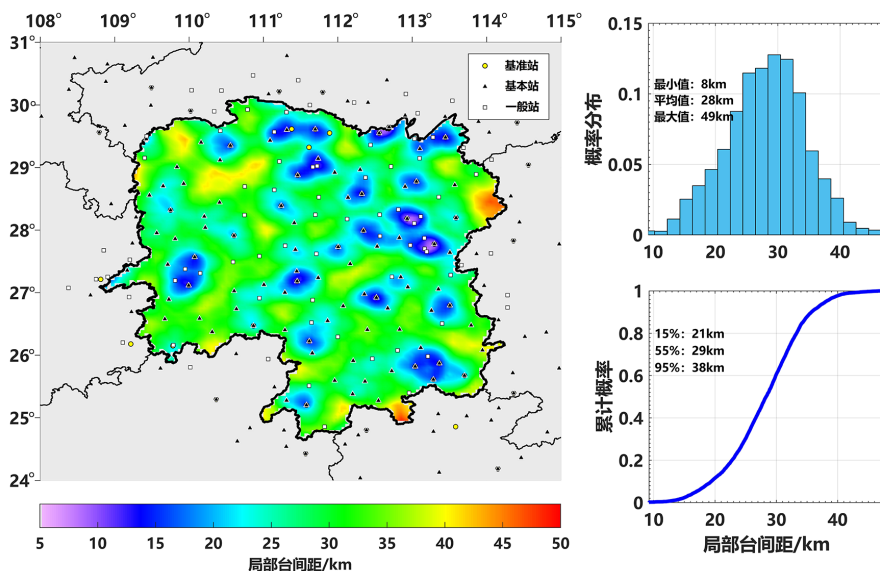


图6 湖南地区烈度速报理论精度图

Fig.6 Accuracy of theoretical intensity rapid reporting in Hunan Province

5 结论与讨论

本文以最大概率峰值位移(PGD)为指标计算湖南预警站网三类站点的台基背景噪声;通过传统计算监测能力的方法计算湖南预警站网的监测能力;考虑预警时效性,基于4台触发理论计算湖南地区预警最小震级和预警时间;基于平均台间距方法计算湖南地区烈度速报精度,得到以下结论:

(1)湖南地区基准站平均PGD值为 $0.028 \mu\text{m}$,分布范围在 $0.005 \sim 0.098 \mu\text{m}$ 之间;基本站平均PGD值为 $0.12 \mu\text{m}$,分布范围在 $0.03 \sim 0.44 \mu\text{m}$ 之间;一般站的平均PGD值为 $36.8 \mu\text{m}$,分布范围在 $19.1 \sim 43.7 \mu\text{m}$ 之间,通过以上结果可认定基准站数据质量做好,基本站次之,一般站最差。

(2)基于3倍PGD值的地震监测能力计算方法评估湖南地区地震监测能力,发现:湖南95%的地区监测能力在 $M_L 2.1$ 及以下,郴州地区及湖南北部部分地区监测能力最好,局部监测能力能达到 $M_L 1.0$ 左右;基准站对台网最小监测能力贡献最高,基本站次之,一般站最差;仅使用基准站+本站数据计算最小监测能力与使用三类站点数据

计算最小监测能力结果相似,未发生明显变化,这说明一般站对台网最小监测能力的贡献不高。

(3)在理想条件下,湖南预警站网对95%地区反馈时间能达到10.1 s及以下,对全省 $M_L 4.7$ 以下的地震均有预警能力,若考虑信息传输时间及用于估计台站到时和震级所必须的数据长度4.2 s左右,预计95%地区预警时间在14.3 s左右。

(4)湖南95%地区地震烈度速报精度在38 km及以下,部分地区地震烈度速报精度在13 km以下,但在湖南东部与南部地区烈度速报精度较差,精度为45 km左右。

综上所述,国家地震烈度速报与预警工程湖南子项目实施完成后,湖南预警站网已具备一定的预警能力和烈度速报能力,具备较好的地震监测能力。后续湖南省地震预警项目将进一步优化台站布局,增加台站密度,以期进一步提高湖南省防震减灾能力。

致谢:福建省地震局的林彬华老师为本论文提供计算程序,感谢评审专家提出珍贵的修改意见!

参考文献

- [1] 张红才.地震预警系统关键技术研究[J].国际地震动态, 2014(04):44-45.
- [2] 马强,金星,李山有,等.用于地震预警的P波震相到时自动拾取[J].地球物理学报,2013,56(07):2313-2321.
- [3] 王俊,刘红桂,周昱辰.地震预警技术的应用与展望[J].防灾减灾工程学报,2021,41(04):874-882.
- [4] 朱峰,杨驰,何奕成,等.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,2023,44(05):52-58.
- [5] 童琼,童迎世,康承旭.湖南矿山地震特征分类[J].地震地磁观测与研究,2023,44(04):41-47.
- [6] 宋晋东,朱景宝,韦永祥,等.2022年1月8日青海门源6.9级地震机器学习地震预警震级估计与现地阈值报警的回溯验证[J].地球物理学报,2023,66(07):2903-2919.
- [7] 魏斌,张志斌,乌尼尔,等.新疆地震预警与烈度速报系统建设及效能评估[J].内陆地震,2023,37(04):313-323.
- [8] 刘洋君,杨毅,王燕,等.浙江测震台网地震监测能力分析[J].地震地磁观测与研究,2016,37(04):57-61.
- [9] 游秀珍,林彬华,李军,等.福建省地震台网预警能力评估[J].地震学报,2023,45(01):126-141.
- [10] 刘瑞丰,陈运泰,任泉,等.震级的测定[M].北京:地震出版社,2015.
- [11] 赵林林,尹欣欣,尹志文,等.甘肃预警台网监测能力以及预警时间评估研究[J].地球物理学进展,2021,36(04):1487-1492.