

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250414001

青海地震预警站网效能的定量化评估研究*

万玉杰¹, 马丽¹, 吕弃暇¹, 白占孝¹, 王俊^{1,2}, 赵燕杰¹,
李玮杰¹, 李振凯¹, 张杰林¹

(1. 青海省地震局, 青海 西宁 810000; 2. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘要:综合运用噪声功率概率密度函数、双曲线正演建模及其联合似然性、插值网格时程等技术方法,从台网布局、地震监测与定位能力、预警能力与烈度速报精度等方面对青海地震预警站网的效能进行了系统性评估。获得的主要认识:(1)基于实际台基噪声水平计算了站网地震监测能力,结果显示:青海全省80%区域的地震监测能力可达到2.5级,重点预警区内局部可达1.2级;理论监测能力与基于PMC方法获得的概率最小完整性震级(M_p)空间分布十分一致。(2)采用二维理论合成地震定位测试,清晰地揭示了预警站网中增加了基本站和一般站,使得定位精度有了明显提高,结果的系统性误差显著降低;按照水平误差及GT定义综合判断定位精度的准则评估的定位精度表明,全省重点预警区内的定位精度能达到I类精度,其他区域范围内站点周围约30 km范围内能达II类精度;震中位置偏差大于20 km区域主要位于青海西南部的监测能力薄弱区。(3)3个台触发条件下,在重点预警区内的预警首报时间约5.9 s,全省约20%的区域预警首报时间为10 s左右;重点预警区内的烈度速报精度可达10 km,90%置信度下全省80%的区域烈度速报精度约为70 km。

关键词:理论合成地震定位;插值网格时程;最小完整性震级;定位精度;预警能力;烈度速报精度

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0961-08

Quantitative Evaluation of Performance of Earthquake Early Warning Station Network in Qinghai Province

WAN Yujie¹, MA Li¹, LYU Qixia¹, BAI Zhanxiao¹, WANG Jun^{1,2}, ZHAO Yanjie¹,
LI Weijie¹, LI Zhenkai¹, ZHANG Jielin¹

(1. Qinghai Earthquake Agency, Xining 810000, China; 2. Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China)

Abstract: By comprehensively applying techniques such as the probability density function of noise power, hyperbolic forward modeling and its joint likelihood, and interpolation grid time series, this study systematically evaluated the performance of the Qinghai earthquake early warning station network. The evaluation focused on four aspects: station network layout, earthquake monitoring and location capability, early warning capability, and rapid intensity reporting accuracy. The main findings were as follows: (1) the seismic monitoring capabilities of the network were calculated based on the actual noise levels at the stations. The results showed that 80% of Qinghai Province could detect earth-

* 收稿日期:2025-04-14;修回日期:2025-05-28

基金项目:地震科技星火项目(XH23015A)、中国地震局重大政策理论与实践问题研究课题“地震预警信息服务机制研究”、青海省地震科技基金项目(2025)资助

作者简介:万玉杰(1985—),男,工程师。主要从事地震监测预警研究。E-mail:376633212@qq.com

通信作者:王俊(1982—),男,研究员。主要从事地震监测预警技术及噪声地震学研究。E-mail:wangjun1099@qq.com

quakes with a magnitude of 2.5, while some areas within the key early warning zones could detect earthquakes with a magnitude as small as 1.2. These theoretical monitoring capabilities were highly consistent with the spatial distribution of the minimum completeness magnitude (MP) obtained using the PMC method. (2) Two-dimensional synthetic tests for theoretical earthquake locations revealed that the addition of basic and general stations significantly improved the location accuracy and greatly reduced systematic errors. The evaluation of the location accuracy based on the criteria combining horizontal error and GT definition indicated that the location accuracy in the key early warning zones of the province could reach Class I, while Class II accuracy could be achieved within approximately 30 km around the stations in other areas. Areas with epicenter deviations exceeding 20 km were mainly located in southwestern Qinghai where monitoring capabilities were weak. (3) Under the condition of three-station triggering, the initial early warning time in the key early warning zones was approximately 5.9 seconds, and in about 20% of the province, it was around 10 seconds. The rapid intensity reporting accuracy in the key early warning zones could reach 10 km, and at 90% confidence level, the accuracy in 80% of the province was approximately 70 km.

Keywords: theoretical synthetic seismic location; interpolation grid time series; minimum completeness magnitude; location accuracy; early warning capability; rapid intensity reporting accuracy

0 引言

地震预警是指快速检测和表征地震并发布地震动警报或警告,以便采取紧急处置或逃生措施。与地震预测不同,地震预警信息是在地震发生后才发布,当地震预警发布时,已经产生了可供检测的地震动。用户从接收到预估地震动信息与实际地震动到达之间的时间差,称为可用的预警时间^[1-3]。由于用户与地震震中之间的距离不同,潜在的预警时间可从几秒钟到几分钟不等。这一概念的提出最早可以追溯到电子通信技术出现的18世纪,在1868年美国海沃德断层地震后,J.D.Cooper^[4]就设想可以事先在距离旧金山市区100 km外的Hayward地区布设地震观测台站,一旦发生地震,立即就可以从这些观测仪器中获得地震的方位和规模,并同时利用地震动传播速度远小于电磁波传播速度的特性,在破坏性地震波尚未到达市区之前及时敲响议政大厦上的警钟,便于人们采取一些相应的紧急逃生避险措施,以达到减少人员伤亡和减轻地震灾害损失的目的。

世界科技强国都十分重视地震预警,我国国家地震预警工程是国家重点建设工程项目,于2024年全面完成,在全国范围内建设超过1.5万个观测站点,在华北、南北地震带、东南沿海、新疆天山中段

以及拉萨周边地区等重点地区形成秒级地震预警能力,在全国范围内形成分钟级地震烈度速报能力^[5]。其中青海地震预警站网是南北地震带重点预警区的核心区,是国家地震预警工程的重要组成部分,由基准站、基本站、一般站三种类型站点组成,青海地震预警站网于2022年试运行,2024年正式投入运行,青海具备完备的数据处理能力,实现了地震烈度速报业务化运行,重点预警区内具备秒级地震预警能力,地震参数与地震动参数产出能力得到进一步加强,地震预警信息、烈度速报等信息产品,可直接为政府快速把握灾情分布和重灾区位置提供科学依据,为大震应急救援决策提供科技支撑服务,有效提高救灾效率;如在2023年12月18日积石山6.2级地震后,青海地震预警站网为秒级产出首报预警信息,5分钟产出烈度分布等过程中发挥重要基础支撑作用。

然而,随着地震预警信息服务范围和领域越来越广、影响越来越深入,政府应急决策、社会公众紧急逃生避险以及各类重大工程的紧急处置都对地震预警信息产出与服务的时效性、可靠性提出了更高的要求^[6];另一方面,随着人工智能、光纤传感、低成本MEMS传感器植入各类泛在设备等新技术在地震预警应用中不断拓展,地震预警处理技术不断完善^[7],特别是对我国西部地区地震预警站网优化完善的需求更加迫切。因此,对地震预警站网的效

能开展系统性评估分析十分必要,目前江苏^[8]、福建^[9]、云南等^[10-11]围绕预警站网的监测预警能力已开展计算评估,但总体而言,已研究以理论计算评估为主或聚焦于单一指标。本文采用理论计算与数值模拟和实际观测数据相结合方法,从台网布局、地震监测与定位能力、预警能力与烈度速报精度等方面开展量化评估,系统分析青海地震预警系统的综合效能。研究结果对于科学认识地震预警站网的实际性能与应用实效具有重要意义,还可为进一步优化预警站网台站布局以及改进技术系统的处理流程参数设置提供参考依据,促进地震预警与烈度速报系统的性能提升。

1 站网概况

青海省地处构造运动强烈、断裂带发育的青藏高原北部,是我国大陆地区强震多发省份之一。青海地震预警基本站网由基准站、基本站和一般站组成,共计464个,其中:基准站为43个、基本站为71个、一般站总数为350个,主要分布在西宁市、海东市、海北藏族自治州、海南藏族自治州、黄南藏族自治州、果洛藏族自治州6个市州。另外,为保障国家重大战略基础设施地震安全,提高青藏高原东北缘地区地震灾害风险防治能力,保实施了“青藏高原东北缘地震监测预警能力提升工程”,在青海省东北部地区新建基本站15个,形成了一个由479个台站组成的高密度的地震预警综合观测站网(图1)。青海省国土面积为72万平方公里,重点预警区范围

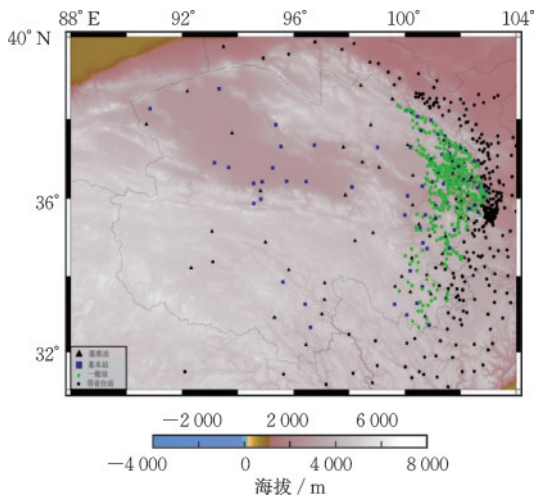


图1 青海地震预警站网台站分布

Fig.1 Spatial distribution of stations in Qinghai earthquake early warning station network

11万平方公里,约占总面积的1/7,区内平均台间距16 km;一般预警区面积约61万平方公里,区内平均台间距94 km。此外,为完善边界处的监测预警能力,还共享接入邻省甘肃、四川、新疆等省份的观测站点286个。三类站点配置见表1。

表1 青海地震预警站点配置

Table 1 Configuration of stations in Qinghai earthquake early warning network

站点类型	传感器	数据采集器
基准站	速度计:GL-CS120/ GL-CS60/ JS-120	TDE-324FI/24GN6 —EEW/HG-D6
	加速度计:TDA-33M/JS-A2	
基本站	加速度计:TDA-33M/ QA-2g/JS-A2	TDE-324FI/ TDE-324CI/24GN3 —EEW/HG-D3
一般站	烈度仪:VH-GL-LDY/ TMA-33	

2 地震监测与定位能力评估

2.1 地震监测能力评估

首先采用功率谱概率密度函数方法^[12-16]计算了全网765个台站2025年1月的台基环境噪声水平,再基于实际的噪声水平评估了站网的监测能力。我们将研究区按 $0.1 \times 0.1^\circ$ 进行网格划分,计算理论地震监测能力时,设定大于台站平均背景噪声水平6倍的信号作为台站的最小监测下限(式(1)),将达到平均3个以上台站能记录到、且台网空隙角小于 315° 视为监测能力有效的网格节点。如图2所示,为基准站、基本站以及一般站三类站点融合后得到地震监测能力,结果显示:青海全省80%区域的地震监测能力可达到 $M_L 2.5$,重点预警区内局部可达 $M_L 1.2$,青海西南部的监测能力 $M_L 3.0$ 。

$$M_L = \lg\left(\frac{a \cdot \text{RMS}}{2\pi f}\right) + R(\Delta) \quad (1)$$

式中,RMS为1~20 Hz范围内台基噪声水平均方根值; a 的取值为6; $R(\Delta)$ 为青海地区的量规函数。

为了进一步评估理论监测能力与站网实际监测能力的匹配度,我们基于2022年1月1日至2025年3月1月期间,青海及邻区实际记录到的13 950个地震记录数据,采用“基于概率的完整性震级”(PMC)方法计算了概率最小完整性震级

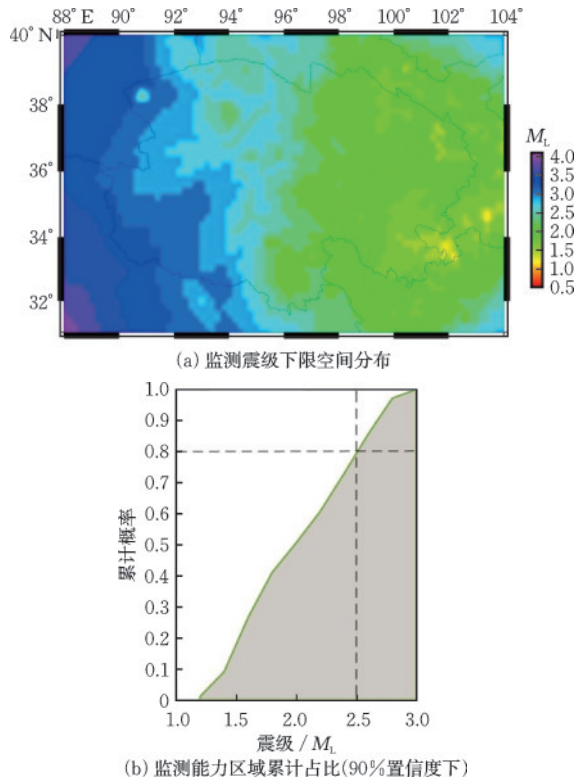


图2 青海地震预警站网地震监测能力

Fig.2 Earthquake monitoring capability of Qinghai earthquake early warning station network

(M_p)^[10,17-19],在位置 x 处、 t 时刻的最小完整性震级 M_p 可表示为式(2)。计算结果如图3所示,对比图2、图3可以看出,理论地震监测能力与实际记录的最小震级分布特征十分一致,全区大部分区域 M_p 值在 $M_L 1.0 \sim M_L 2.0$,在台站较为稀疏的青海西部和青海南部地区的完整性震级在 $M_L 2.5 \sim M_L 3.5$ 。

$$M_p(x, t) = \min_{M \in M} M \left(1 - \sum_{i=0}^3 P_E^i \right) \quad (2)$$

式中, P_E^i 为设定的某一震级的联合检测概率。

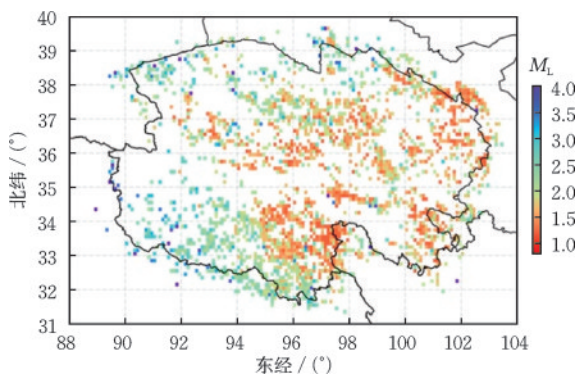


图3 2022年以来青海预警站网实际记录的最小震级分布
Fig.3 Distribution of the smallest earthquake magnitudes recorded by Qinghai earthquake early warning station network since 2022

2.2 地震定位精度评估

定位精度是反映地震台网性能的关键核心指标,它与台网布局紧密相关。我们根据定位程序给出的水平误差及GT定义综合判断定位精度,以误差椭圆3个半长轴在水平面投影长度最大值为水平误差,计算评估了全网的定位精度。根据地震行业标准《地震编目规范》^[20],精度可划分为4类,其中(1)1类精度:对于150 km之内的参与定位的台站,台站均匀度 $DU \leq 0.35$,且次最大空隙角 $S_{gap} \leq 160$ 度,且距离震中最近的台站的震中距小于10 km,且定位的水平误差估计小于5 km。(2)2类精度:对于所有的参与定位的台站, $S_{gap} \leq 180$ 度,且定位的水平误差估计小于15 km。(3)3类精度:对于所有的参与定位的台站, $S_{gap} \leq 240$ 度,且定位的水平误差估计小于30 km。图4给出了全区80%区域面积能达到的监测震级下限($M_L 2.5$ 级)地震的定位精度评估结果,从中可以看出,全省重点预警区内的定位精度能达到I类精度,其他区域范围内站点周围约30 km范围内能达到II类精度,站点周围约50 km范围内能达到III类精度。

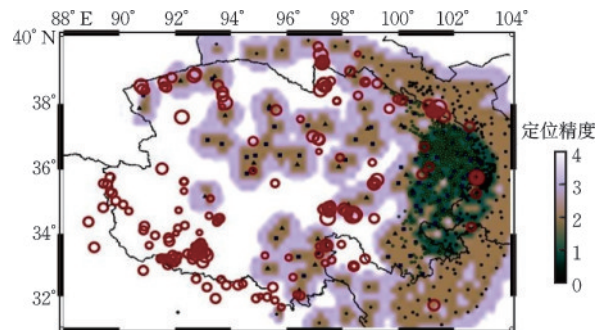


图4 青海地震预警站网 $M_L \geq 2.5$ 以上地震定位精度图
Fig.4 Location accuracy of earthquakes of $M_L \geq 2.5$ in Qinghai earthquake early warning network

2.3 地震定位误差分析

在数字地震学应用研究中,给出地震定位误差确保地震参数测定结果合理应用的基本保证。为此,我们对青海预警站网新旧两套地震编目系统的195次 $M 3.0$ 以上地震的定位结果进行了分析,新系统采用 JOPENS6.2-MSDP 软件,旧系统采用 JOPENS5.2-MSDP 软件进行定位,新旧系统均采用 IASP91 模型^[21-22] Hyposat 定位方法^[23] 来进行定位,震级测定时幅值均在仿真到 DD1 的幅频特性下。

新旧系统定位结果的震级偏差如图5所示,整体上结果一致性较好,约85%的地震的震级差为-0.3~0.3级。按地震速报有关规定,震级±0.3级偏差属于正常误差范围内,震级偏差大于0.5级的地震主要位于重点预警区之外,从站网布局上看,导致定位误差较大的原因无疑由于该区域台站较为稀疏,台网覆盖能力有限所致。新旧系统震中位置偏差的计算结果如图6所示,震中平均偏差为8.0 km,震中偏差小于15 km地震约占比80%,偏差小于25 km的占比约为98%。从图6(a)中可以清晰地看到,震中位置偏差大于20 km地震主要位于青海西南部的监测能力薄弱区。

为深入揭示台站覆盖范围和布局对定位结果精度的影响,我们采用二维理论合成地震定位技术方法,定量评估台站空间分布定位结果的系统性影响。该方法基于双曲线的正演建模及其联合似然

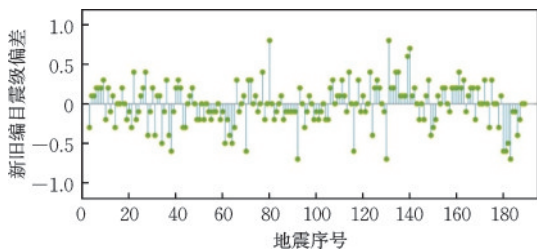


图5 新旧系统M3.0以上地震的编目结果震级偏差
Fig.5 Comparison of magnitude deviation in cataloged results for earthquakes of $\geq M3.0$ between new and old systems

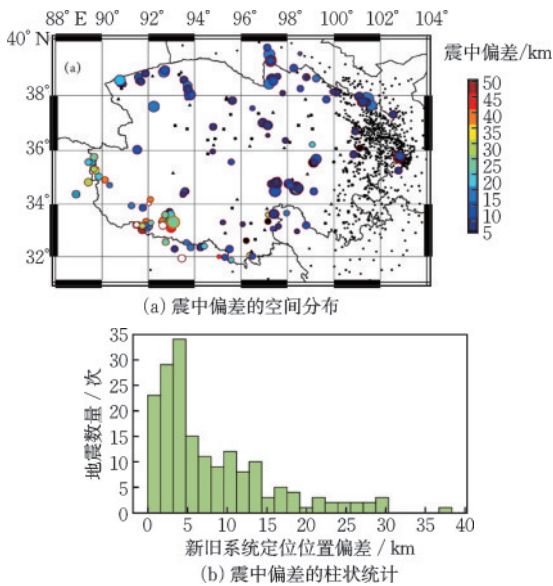


图6 新旧系统M3.0以及地震编目结果位置偏差
Fig.6 Location deviation in cataloged results of earthquakes of $\geq M3.0$ in new and old systems

性实现震源定位^[24],主要思路是,通过各台站P波到时数据,揭示观测误差与速度模型误差对震中定位估算的综合影响。首先,设定某一震源位置,我们假定纵波速度为常数 $V_p = 6.5 \text{ km/s}$,计算所有台站的P波理论到时,随后对理论到时加入标准差 $\sigma = 0.1 \text{ s}$ 的高斯拾取时间误差;随后,使用每对测站的带误差P波到时,构建出表示地震可能的震中位置的双曲线;最后,将网格离散化,分辨率为100 m,并将双曲线转换为离散的概率值分布,然后对这些分布进行逐元素相乘,以计算事件位置的联合概率分布概率值最高处即为理论震中位置。我们在生成的空间概率分布中抽取100个采样点表征定位结果的不确定性空间特征

图7给出了青海重点预警区北部边缘的2024年4月15日门源4.5级地震的理论模拟合成定位结果,结果显示:基准站、基本站以及一般站三类台站都参与定位时,定位结果垂向(即南北向)理论与实际定位误差约为1.0 km、水平向(即东西向)误差接近与0 km;当基准站参与定位时,垂向定位误差约为8.3 km、水平垂向误差约为6.9 km。这表明,相较

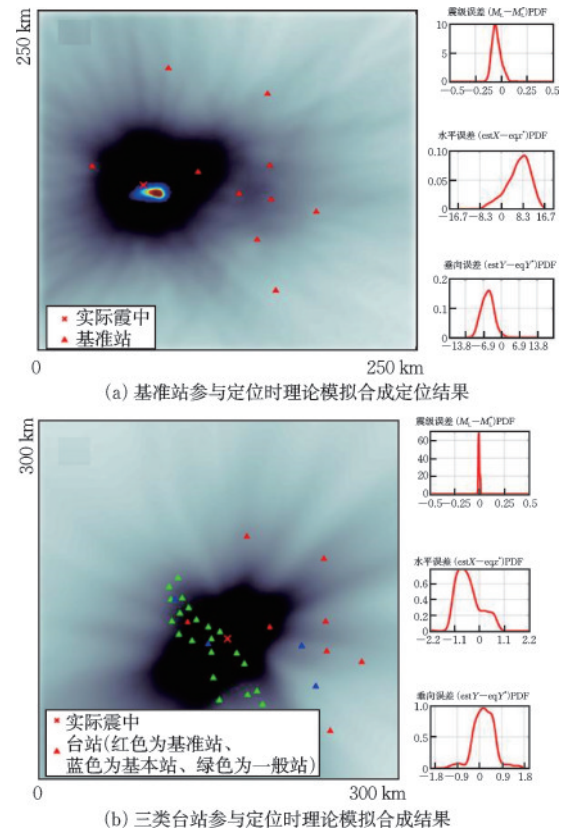


图7 2024年4月15日门源4.5级地震理论合成定位精度
Fig.7 Theoretical synthetic location accuracy of M4.5 earthquake in Menyuan on April 15, 2024

于地震预警站网中增加了基本站和一般站,使得观测站点布局更加合理,可以显著改善地震定位精度。但加入基本站和一般站后的定位精度估算是有限定条件的,对小地震并不适用。

3 地震预警与烈度能力评估

3.1 地震预警能力分析

根据地震预警时效性和可靠性要求,网内地震一般至少需要有3个台站触发,地震定位的可靠度较高,单台P波触发3s以上测定的震级比较可靠^[5]。以发震时间起算,扣除地震波达到首台的P波走时 t_{p1} ,以及确定地震参数的用时 Δt 和网络延时 τ ,S波到达用户的剩余时间,即预警时间为:

$$T_m(\Delta, h) = t_{sm}(\Delta, h) - t_{p1} - \Delta t - \tau \quad (3)$$

式中, $T_m(\Delta, h)$, 为初至S波到达目标区的走时, S波波速取3.5 km/s。

按照实际配置,我们以3台触发,首台触发后测定参数和网络延时合计按2s计算,计算了单层速度模型下青海地震预警站网的预警能力。计算过程中,将青海及邻区按 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的网格进行划分,假定每个网格节点处发生一次可预警的地震,本文以全区监测的完整震级下限值3.0基准进行计算。

三类台站融合处理下理论预警能力的计算结果如图8所示,在重点区域可实现5.9s左右的预警首报时间,全省约有20%的区域具有10s的预警首报时间,约80%的区域具有30s的预警时间。图9是2022年3月以来青海地震预警JEEW系统实际产出的149次3.0级以上地震的预警首报时间结果,重点预警区内首报用时小于10s的占比为98%,平均为5.7s。

3.2 地震烈度速报精度评估

地震烈度速报结果可以为震后的地震应急救援提供紧急信息,是灾情判断和应急救援决策的关键科学依据,其精度将直接影响预警系统的可靠性。目前,地震预警系统的烈度速报是采用插值网格时程计算方式,台站附近空间网格点的时程可用式(4)表示;插值公式在时间上满足地震波的传播规律和空间上的衰减规律,但插值结果主要受离插值点最近台站控制,即台网密度越高,插值效果越好。如果触发台站数较多时,可取4台或6台的时程进行插值,本文中取6台进行时程插值。

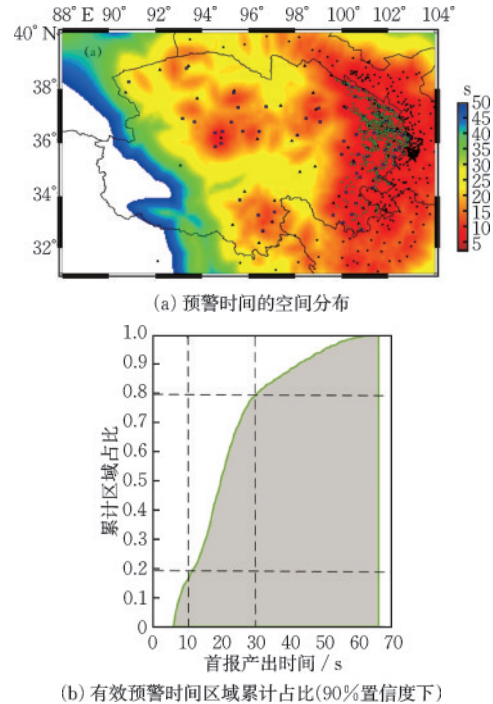


图8 青海地震预警站网3台触发的首报预警能力

Fig.8 First-report early warning capability of Qinghai earthquake early warning station network triggered by three stations

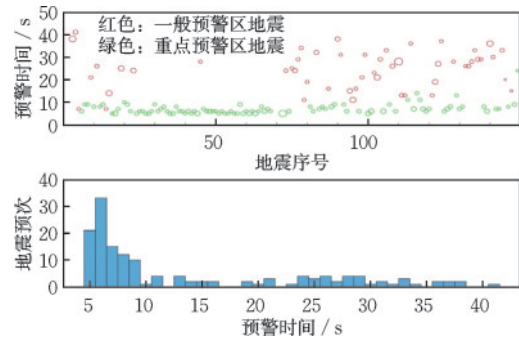


图9 2022年3月以来青海地震预警系统3.0级以上地震预警信息首报产出时间

Fig.9 First-report production time of early warning information for earthquakes of $M3.0$ and above in Qinghai earthquake early warning system since March 2022

$$a_A(t) = \sum_{j=1}^n m_j \frac{R_j}{R_A} a_j \left(\frac{R_A}{R_j} t \right) \quad (4)$$

式中, a_j 为台站实际加速度时程; R_A 为震源距; j 为台站数。

我们同样按照 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的方式网格化全区,网格中无观测值时采用附近台站值进行插值计算,将按穿过每个网格区域内至少3组台站对(即6个台站记录)路径间距的1/2,作为地震烈度速报精度的指标。结果显示,青海重点区域的烈度速报精度可

达 10 km,90% 置信度下全省 80% 的区域的烈度速报精度在 70 km 左右(图 10)。

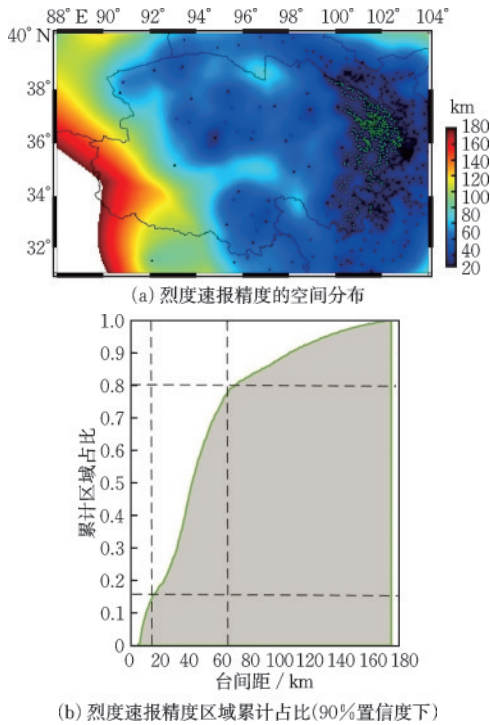


图 10 青海地震预警站网的地震烈度速报精度

Fig.10 Earthquake rapid intensity reporting accuracy of Qinghai earthquake early warning station network

4 结 论

本文以青海地震预警站网为样本,采用理论计算与实际监测数据相结合的方式,系统评估了预警站网的监测与定位能力、预警能力以及烈度速报精度等指标,为科学认识青海地震预警站网以及南北地震带重点预警区的效能提供了重要参考。总体而言,得到以下几方面的认识:

(1)采用基于台站实际噪声水平计算得到的地震监测能力显示,青海全省 80% 区域的地震监测能力可达到 2.5 级,重点预警区内局部可达 1.2 级,青海西南部为 3.0 级;与基于 PMC 方法的概率最小完整性震级(MP)空间分布十分一致,也表明未来开展理论监测能力的动态评估是可行的。

(2)基于双曲线正演建模及其联合似然性方法的二维理论合成地震定位测试表明,预警站网增加了基本站和一般站后使得站网布局更加合理,地震定位精度更高,系统性误差显著降低;按照水平误差及 GT 定义综合判断定位精度的准则评估的地震

精度表明,全省重点预警区内的定位精度能达到 I 类精度,其他区域内站点周围约 30 km 范围内能达到 II 类精度;新旧系统地震编目结果的震中平均偏差为 8.0 km,震中偏差小于 15 km 地震约占比 80%,偏差小于 25 km 的占比约为 98%。震中位置偏差大于 20 km 地震主要位于青海西南部的监测能力薄弱区。

(3)3 个台触发条件下,在重点预警区内预警首报时间在 5.9 s 左右,全省约有 20% 的区域具有 10 s 左右的预警首报时间;基于插值网格时程技术获得的烈度速报精度结果显示,在重点预警区内可达 10 km,90% 置信度下全省 80% 的区域的烈度速报精度在 70 km。通过对观测站网布局、参数测定精度、产出时效等多维度的评估,可以为科学认识预警系统的性能和产出结果的可靠性提供参考,这有助于确保地震预警和烈度速报结果充分发挥减灾应用实效。同时,也为进一步研究和改进地震预警系统处理精度,以及后续结合新型传感器网络应用在优化布局、缩小地震预警盲区等方面提供支撑。

从本文研究结果看,地震监测能力主要取决于基准站的布局,但青海部分地区的基准站密度较低,特别是中西部区域,未来需进一步建设高品质的基准站,以提升地震监测能力。重点预警区面积较小,为实现全域的地震预警,需进一步增加一般区的一般站、基本站的站点密度。

参考文献:

- [1] Allen R M, Melgar D. Earthquake early warning: advances, scientific challenges, and societal needs [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2019, 47(1):361-388.
- [2] Allen R M, Kanamori H. The potential for earthquake early warning in Southern California [J]. Science, 2003, 300:786-789.
- [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(4):874-882.
Wang J, Liu H G, Zhou Y C. Application and prospect of earthquake early warning technology [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4):874-882. (in Chinese)
- [4] Cooper J D. Earthquake indicator[M]. San Francisco: San Francisco Bulletin Publishing Company, 1868.
- [5] 金星.地震预警与烈度速报-理论与实践[M].北京:科学出版社,2021.

- [6] Finazzi F, Massoda Tchoussi F Y. Assessing the alerting capabilities of the Earthquake Network early warning system in Haiti with Monte Carlo simulations [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2024, 38: 147-156.
- [7] Li J, Zhai H, Jiang C, et al. Application of artificial intelligence technology in the study of anthropogenic earthquakes: a review [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2025, 58: 155-197.
- [8] 钱婷, 王俊, 魏梦婉, 等. 国家地震烈度速报江苏子系统参数测定能力评估 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(3): 725-729.
Qian T, Wang J, Wei M W, et al. Evaluation of the parameter determination capability of Jiangsu subsystem in the national earthquake rapid reporting system [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(3): 725-729. (in Chinese)
- [9] 杨源鸿, 林彬华, 李军, 等. 福建地震台网地震定位精度评估 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2024, 44(10): 1095-1100.
Yang Y H, Lin B H, Li J, et al. Evaluation of seismic location accuracy of Fujian seismic network [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*. 2024, 44(10): 1095-1100. (in Chinese)
- [10] 杨周胜, 杨晶琼, 刘鹏飞, 等. 基于概率的震级完备度方法评估云南地震台网的监测能力 [J]. *地震研究*, 2025, 48(1): 61-70.
Yang Z S, Yang J Q, Liu P F, et al. Assessment of detectability of the Yunnan Seismic Network by using the probability-based magnitude of completeness method [J]. *Journal of Seismological Research*, 2025, 48(1): 61-70. (in Chinese)
- [11] Tang H, Li X B, Xu J Y, et al. Evaluation comparison of earthquake monitoring capability of Ningxia network before and after the early warning project [J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2025, 55(6): 331-339.
- [12] Teja V, Akshay S P, Khaleed K A, et al. An Earthquake Alert system using Internet of Things [C] // 2024 10th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), Melmaruvathur, India: [s.n.], 2024: 1621-1626.
- [13] Zhang X, Zhang M. Universal neural networks for real-time earthquake early warning trained with generalized earthquakes [J]. *Commun Earth Environ*, 2024, 5: 528-544.
- [14] 孙丽. 地震预警的新发展: 新型传感器网络的应用 [J]. *地球与行星物理论评(中英文)*, 2023, 54(1): 105-107.
Sun L. The new development of EEW: The application of new sensor networks [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2023, 54(1): 105-107 (in Chinese)
- [15] McNamara D E, Buland R P. Ambient noise levels in the continental United States [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(4): 1517-1527.
- [16] 王俊, 徐戈, 孙业君, 等. 江苏省区域地表背景噪声特性的分析 [J]. *地震研究* 2009, 32(2): 155-161, 222.
Wang J, Xu G, Sun Y J, et al. Analysis on background of seismic noise characteristics in Jiangsu province [J]. *Journal of Seismological Research*, 2009, 32(2): 155-161, 222. (in Chinese)
- [17] Schorlemmer D, Woessner J. Probability of detecting an earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98(5): 2103-2117.
- [18] 蒋长胜, 房立华, 韩立波, 等. 利用 PMC 方法评估地震台阵的地震检测能力: 以西昌流动地震台阵为例 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(3): 832-843.
Jiang C S, Fang L H, Han L B, et al. Assessment of earthquake detection capability for the seismic array-A case study of the Xichang seismic array [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3): 832-843. (in Chinese)
- [19] 王亚文, 蒋长胜, 刘芳, 等. 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*, 2017, 60(7): 2767-2778.
Wang Y W, Jiang C S, Liu F, et al. Assessment of earthquake monitoring capability and score of seismic station detection capability in China Seismic Network (2008—2015) [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(7): 2767-2778. (in Chinese)
- [20] 康英, 黄文辉, 沈玉松, 等. 地震编目规范: DB/T 66—2016 [S]. 北京: 地震出版社, 2017.
- [21] Kennett, Brian L N, Eric R E. Travel times for global earthquake location and phase identification [J]. *Geophysical Journal International*, 1991, 105: 429-465.
- [22] Snoko J A. Traveltime tables for iasp91 and ak135 [J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(2): 260-262.
- [23] Schweitzer J. HYPOSAT-An enhanced routine to locate seismic events [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2001, 158: 277-289.
- [24] Kamer Y, Hiemer S. Data-driven spatial b value estimation with applications to California seismicity: To b or not to b [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(7): 5191-5214.

(本文编辑: 苏泽云)