

林庆西, 梁明, 杨选, 等. 广东地震台网水平定位能力评估 [J]. 华南地震, 2020, 40 (4): 49-55. [LIN Qingxi, LIANG Ming, YANG Xuan, et al. The Estimation of Horizontal Location Ability for Guangdong Seismic Network [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (4): 49-55]

广东地震台网水平定位能力评估

林庆西, 梁明, 杨选, 姜喜姣

(广东省地震局, 广州 510070)

摘要: 精确可靠的地震定位结果是地震学研究的重要基础数据, 而地震的水平定位精度是评价一个区域台网水平定位能力的重要依据。根据不同时期广东地震台站的几何分布, 利用非线性最小二乘法, 在假设每个网格点下方发生一个给定震级的地震情况下, 计算研究区域网格点下水平定位误差椭圆, 其最大水平投影即为水平定位精度, 从而实现对广东地震台网水平定位能力的理论评估。结果显示: 现阶段广东台网存在较为明显的定位能力薄弱区, 分别加入“十二五”和“十三五”测震台站后, 粤东、珠三角地区以及粤西地区水平定位能力得到明显的提升。分析以上结果, 给出一个未来台网扩建方案, 用以整体提升广东台网的水平定位能力。

关键词: 广东地震台网; 水平定位能力; 最小二乘法; 台站分布

中图分类号: P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 04-0049-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.04.07

The Estimation of Horizontal Location Ability for Guangdong Seismic Network

LIN Qingxi, LIANG Ming, YANG Xuan, JIANG Xijiao

(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

Abstract: The accurate and reliable earthquake location results are important basic data for seismological research, and the horizontal location accuracy of earthquakes is an important basis for evaluating the horizontal location capability of a regional seismic network. Based on the geometric distribution of Guangdong seismic stations in different periods and the assumption of a given magnitude under each grid point, the error ellipsoids of horizontal location under the grid points in the study area were calculated by using nonlinear least square method. The horizontal location ability for Guangdong Seismic Network was estimated theoretically by the maximum horizontal projection of error ellipsoids. The results show that there are obvious weak areas of location ability in the Guangdong Seismic Network at this stage. After the addition of seismic stations constructed in the "12th Five-Year Plan" and "13th Five-Year Plan", the horizontal location abilities were improved obviously in eastern Guangdong, Pearl River Delta and western Guangdong. By analyzing the above results, the paper gave a future network expansion plan to improve in horizontal location ability of Guangdong Seismic Network.

Keywords: Guangdong Seismic Network; Horizontal location ability; Least square method; Station distribution

收稿日期: 2020-05-09

基金项目: 中国地震局测震台网青年骨干培养专项 (CEA-JC/QNCZ-18201); 地震监测、预测、科研三结合课题 (3JH-201901001)

作者简介: 林庆西 (1986-), 男, 博士, 工程师, 主要从事地震监测工作

E-mail: forkiter@163.com

0 引言

地震定位结果是研究地震活动与地震环境的基础,也是评定地震灾害、探索地震发生规律以及寻找地震前兆特征的重要信息。地震定位结果是否精确可靠,是衡量台网地震定位能力的一项重要指标,也是台网进一步优化的基础。地震定位精度受多种因素的共同影响,包括台站分布、区域速度模型、震相量取精度、定位算法等。其中,台站几何分布是影响地震定位结果可靠性的一个主要因素,也是实际测量中最可改进的因素^[1]。多年来,诸多学者开展了相关方面的研究,如:Peters和Crosson^[2]预测分析描述了精确评价区域地震位置的方法;Uhrhammer^[3]提出了地震定位参数的理论误差计算,并给出优化分布的算法;赵仲和^[4]分析了在动态几何分布情况下子台网的地震定位能力;姜长宁^[5]引入不同标准误差,分析讨论了区域台网的地震定位能力。

广东省地震台网自“十五”以来,数字地震观测取得了长足进展。随着测震台站的增多,对区域地质构造和地震震源的研究也越来越深入,从而对地震定位的精度提出了更高的要求。目前,已有很多学者对广东地区地震定位结果进行了分析与评价^[6-8]。但基于台站分布对整个广东地区地震定位能力的评估工作鲜有人开展。本文利用非线性最小二乘反演方法,对广东地区不同时期地震台网的水平定位能力进行计算和分析,从而整体评估广东台网的水平地震定位能力。同时,根据评估结果提出广东台网台

站布局优化方案,为未来广东台网的扩建提供必要的支持和指导。

1 台站选取

广东省地震台网目前有111个地震台站用于地震资料的分析与处理。其中,“十五”期间建设的地震台44个,“十一五”期间建设的地震台17个、地方地震台8个以及“十二五”建设的2个背景场台,平均台间距约为54 km。同时,共享省外台网地震台共40个。系统主要采用大动态、高分辨率的宽(甚宽)频带地震仪和24位数字化地震信号采集器,通讯以CDMA\VPN、帧中继、卫星、SDH、ADSL、64同步DDN等多种实时传输并存方式,保障台网实时数据传输^[9-10]。

“十二五”期间,珠江三角洲地震预警系统全面建设完成,共建设有78个预警台站,其中74个位于粤东地区,4个位于珠海附近海岛上,粤东地区平均台间距仅为15 km,形成了广东省第一个地震预警台网和烈度速报网^[11]。系统以井下短周期地震仪为主,目前系统试运行中且运行良好。

进入“十三五”以来,国家地震烈度速报与预警工程广东子项目正有条不紊的进行当中。根据项目要求,将新建26个基准站,分布于东南沿海预警区范围内,这将进一步缩短广东测震台的平均台间距,提升全省的地震定位能力和监测能力。本文将选取以上不同时期分布的地震台站作为研究对象,台站分布图由图1所示。

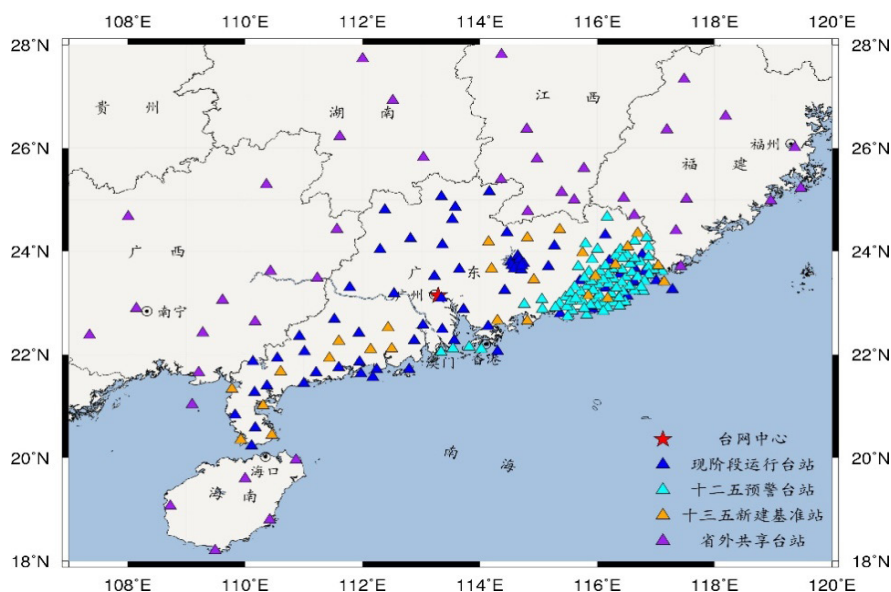


图1 广东台网不同时期台站分布图

Fig.1 The distribution map of Guangdong seismic stations in different periods

2 方法计算

2.1 方法

定位能力的计算方法主要是利用 Peters 和 Crosson^[2] 阐述的预测分析方法，依据一个给定的台站布局来估计震源定位精度。该方法是以最小二乘法原理为基础，且依据如下事实，即非线性最小二乘反演解的期望误差依赖于正规方程，而正规方程又依赖于走时函数对未知参数的偏导数，未知参数是震源位置和发震时间。用公式表示为：

$$S=\sum_{i=1}^N[w_{t_i}R_{t_i}^2+\sum_{j=1}^mw_{x_{ij}}R_{x_{ij}}^2]$$
 (1)

其中， w_{t_i} 和 $w_{x_{ij}}$ 为权重系数， t_i 表示为到时数据， x_{ij} 表示为台站坐标和速度模型参数。 R_{t_i} 和 $R_{x_{ij}}$ 为观测值与理论值之差。震源参数 a_l ($l=1, 2, \cdots, k$) 是关于 t_i 和 x_{ij} 的函数，利用加权平方和残差最小 S 的计算，最终确定震源参数 a_l 值。

将台网所在区域按照经度和纬度分成网格，并假设每个网格点上都发生已知震级大小以及震源深度的地震。先计算出台网中记录到该地震台站的正规方程，并根据台站的假设误差对走时方程进行适当加权后反演系数矩阵，最后在每个网格点上给出一个震源位置误差椭球。误差椭球的最大水平投影定义为震中测定误差。

2.2 定位能力计算

在具体的计算中作了如下假定：（1）台站坐标是精确已知的（无误差）；（2）P 波和 S 波的到时基于已知的先验误差来读取；（3）走时是基于均匀层状地球模型计算得来的，层内 P 和 S 波速度和地层边界在给定的误差范围内已知；（4）对地震台所在位置，在 STA/LTA 算法的工作频段内^[12]，噪声均方根值是已知的；（5）台网区域的大小满足采用平面地球模型近似。

由于计算结果强烈的依赖于这些假设，因此与实际情况有一定差异，其分析结果只在一定程度上反映了台网的实际定位能力。

为了计算广东台网布局的定位能力，将研究区域（108°~120°E, 18°~27°N）划分成 0.05°×0.05° 的网格，考虑到广东地区震源深度多在 10 km 左右，在计算中假设所有地震发生在深度 10 km 处，震级设定为 $M_L1.0$ 和 $M_L2.0$ 两组。参考华南走时表（速度模型），构建了计算中所采用的地球分层模型，给出了模型中各层内 P 波和 S 波速度以及地层厚度。根据广东台网日常编目结果，通过分析各个台站 P 波和 S 波拾取精度，可以给出 P 波和 S 波到时误差参数的取值，分别为 0.1 s 和 0.3 s。

在计算中，要求一个地震事件至少被 3 个台站记录到，并且每个被记录到的台站要满足地震信号超过环境地噪声水平一定倍数，因此，需要给出每个台站的背景噪声均方根值（rms）以及 STA/LTA 触发阈值。按照《地震台站观测环境技术要求》，对各台站按小时计算噪声功率谱密度（PSD），用 1/3 倍频程滤波器在 1~20 Hz 频带范围内由 PSD 计算 48 h 的 rms 平均值，再以三分向的最大值作为该台站的环境地噪声值^[13]。然后，对环境地噪声水平等级进行划分，得到表 1 所示。最后，考虑研究区内背景噪声水平、仪器频带范围、预设震级大小等实际因素，将 STA/LTA 触发阈值设为 4。

3 结果分析

3.1 应用结果

利用上文给出的计算方法，通过分析现阶段广东台网运行的 111 个台站的几何布局，对研究区域的水平定位误差（err）进行了计算，结果如图 2 所示。

表 1 广东测震台站环境地噪声水平
Table 2 The environment seismic noises of Guangdong seismic stations

台站名	rms 值/(m·s ⁻¹)	环境噪声水平级别	台站名	rms 值/(m·s ⁻¹)	环境噪声水平级别
广州	2.18E-08	I	梅州	1.56E-08	I
汕头	5.67E-08	II	湛江	3.63E-08	II
信宜	1.84E-08	I	英德	2.01E-08	I
韶关	1.80E-08	I	担杆岛	6.00E-08	II
新丰江	2.15E-08	I

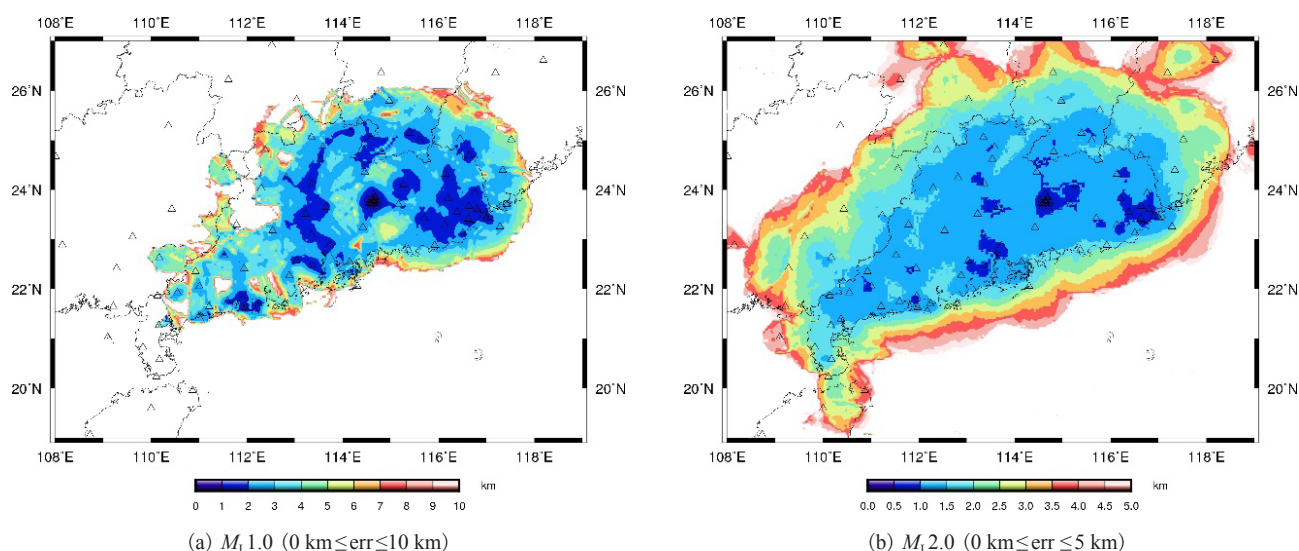


图2 现阶段广东地震台网水平定位误差分布图

Fig.2 Distribution map of horizontal location error of Guangdong Seismic Network at this stage

图2a是在震级 $M_L 1.0$ 情况下,广东地区及周边的水平定位误差分布,黑色三角形表示台站位置,误差取值区间为0~10 km。可以看到,在较小地震情况下,全省水平定位误差基本维持在10 km以内,只有雷州半岛和粤西、粤北部分地区,定位误差超过10 km。粤东、珠三角、新丰江以及阳江地区定位能力都较高,水平定位误差均在2 km以内,特别是新丰江地区,由于台站分布密集,水平定位误差小于1 km,达到百米级别的定位能力。网缘地区的地震定位能力较弱,除南澳和阳江地区外,其他发生在距陆地约20 km之外的海域地震,其定位误差均超过了10 km。图2b相较于图2a,发震震级增大到 $M_L 2.0$,而震源位置产生的震幅随之增大,地震波能传播的距离相应增加,于是会有更多的台站记录到(即满足信噪比),因此图2b中整个广东地区定位能力有了明显的提升。为便于观察,在图2b中将定位误差取值区间设为0~5 km。全省大部分地区水平定位误差均在2 km以内,其中,珠三角部分地区、新丰江地区以及南澳地区水平定位误差降低为1 km以内。网缘地震的定位能力也有了明显提升,定位误差小于5 km的海域范围提高到距海岸线外约80 km。

通过对比前人文献,可以得到本次计算结

果是否可靠。马晓静^[8]通过识别重复地震(平均震级略大于 $M_L 1.0$),定量评估了台网部分地区的定位精度。结果显示,新丰江地区水平定位误差为1 km,南澳地区在2~3 km之间,陆丰地区为3 km,阳江地区在2 km以内,这与本次研究的结果一致。因此,本次研究得到的估算结果基本可信。

加入目前正试运行的78个“十二五”测震台站,广东地区水平定位能力有了明显的变化,由图3所示。在发震震级较小,即 $M_L 1.0$ 的情况下,粤东地区的水平定位能力有了质的提升,见图3a。其水平定位误差由之前的2~3 km,降低为1 km以内,且高定位精度的范围扩大了近一倍。珠三角地区定位能力也有所提升,尤其是惠州地区,其水平定位误差由之前的5~8 km,降低至2~3 km,定位能力提升明显。其他地区定位能力没有发生明显的变化,这主要因为新增台站集中在粤东地区,而且发震震级小,新加入台站无法有效的影响到其他地区。图3b中发震震级变大,定位能力提高的区域有了进一步的扩大,东经114°以东地区水平定位误差基本均达到1 km以内,珠三角地区定位能力也较未加入“十二五”台站前有了明显的提升。珠三角以及粤东地区其定位误差小于5 km的海域范围提升至距海岸线外约110 km。

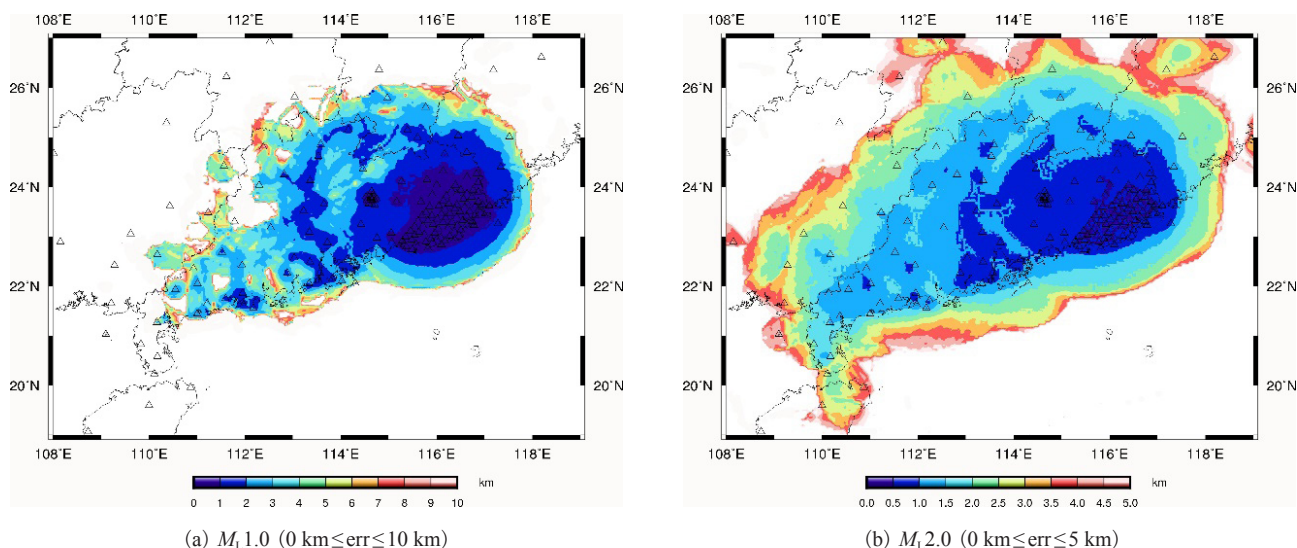


图3 加入“十二五”地震台站后广东地震台网水平定位误差分布图

Fig.3 Distribution map of the horizontal location error of the Guangdong Seismic Network after the addition of the “12th Five-Year Plan” seismic stations

“十三五”正在新建的26个基准站，主要分布在粤西、粤东以及河源等地。讨论加入“十三五”基准站后定位能力发生的变化情况，如图4所示。图4a中变化较为明显的是粤西部分地区，其中，雷州半岛大部分地区由于井下基准站的增加，水平定位误差由之前大于10

km，降低为5 km。茂名、阳江等地区定位能力也得到大幅度提升。图4b中，与“十二五”相比，水平定位误差小于1 km的范围扩大至粤西部分地区，雷州半岛地区的水平定位误差从3 km降低为1.5 km。整个粤西地区定位误差小于5 km的海域范围也有所提升。

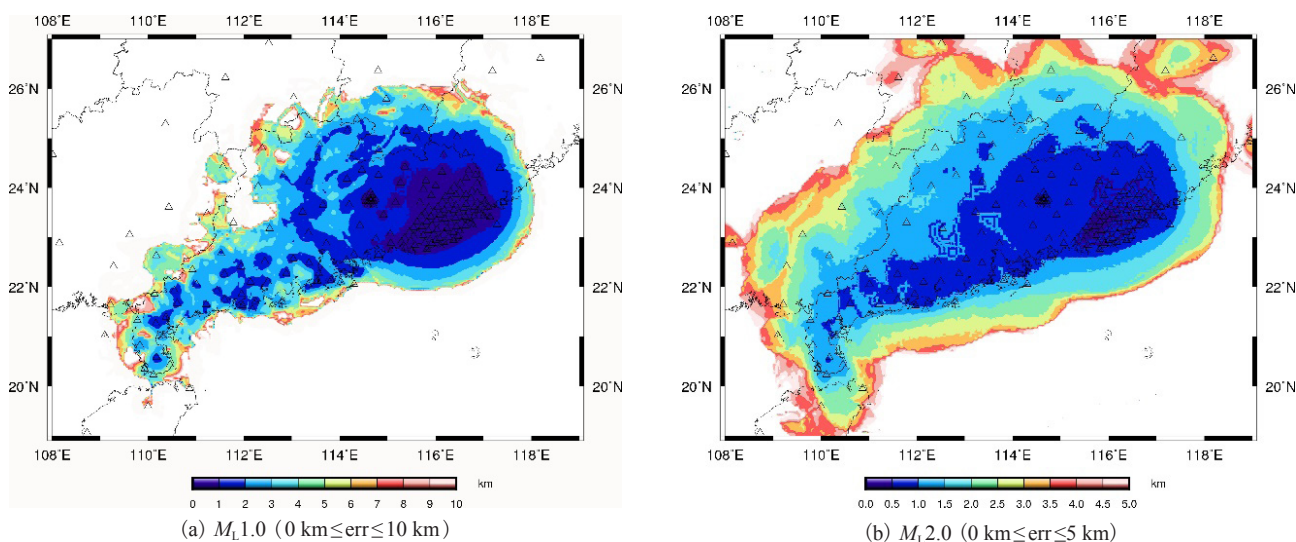


图4 加入“十三五”基准站后广东地震台网水平定位误差分布图

Fig.4 Distribution map of the horizontal location error of the Guangdong Seismic Network after the addition of the “13th Five-Year Plan” seismic stations

3.2 未来台网扩建方案

“十三五”基准站建成后，广东地震台网测震台站数量将达到175个，其水平定位能力已经达到很高的水平。从结果中可以看到，在较大地震发生时，其水平定位误差基本可以达

到2 km以内。而对于较小地震，虽然有部分地区已经达到很高的水平，比如新丰江地区，粤东地区等，但是仍有很多定位能力薄弱区。这主要有两个方面的原因，一是台站布局稀疏，导致其水平定位能力较低，比如粤西北地区。

二是台站环境地噪声过高，导致无法检测到震相，使定位能力下降，比如雷州半岛地区，尽管有 4 个测震台站，但是由于环境地噪声很高，导致其在加入“十三五”基准站前，水平定位误差均为 10 km 以上。在加入 4 个“十三五”低台基噪声的井下基准站后，其水平定位误差提高至 5 km 以下。

为了提高广东省整体水平定位能力，不仅要考虑台站几何布局，还需要提高台站环境地噪声水平。本文提出一个未来台网的扩建方案，

规划台站布局原则就是在图 4 的基础上，对定位能力薄弱区加密观测，以提高台网整体的定位能力。根据以上原则，在全省范围内加入 24 个测震台，如图 5 所示，红色“+”表示新加入的台站，其中，粤西地区 6 个，粤北地区 7 个，珠三角地区 11 个。内陆地区按地面台建设，其台基噪声水平给定为 II 类，而沿海附近地区，按井下台建设方式，台基噪声水平给定为 I 类。根据此方案扩建后，广东地区水平定位误差分布如图 6 所示。

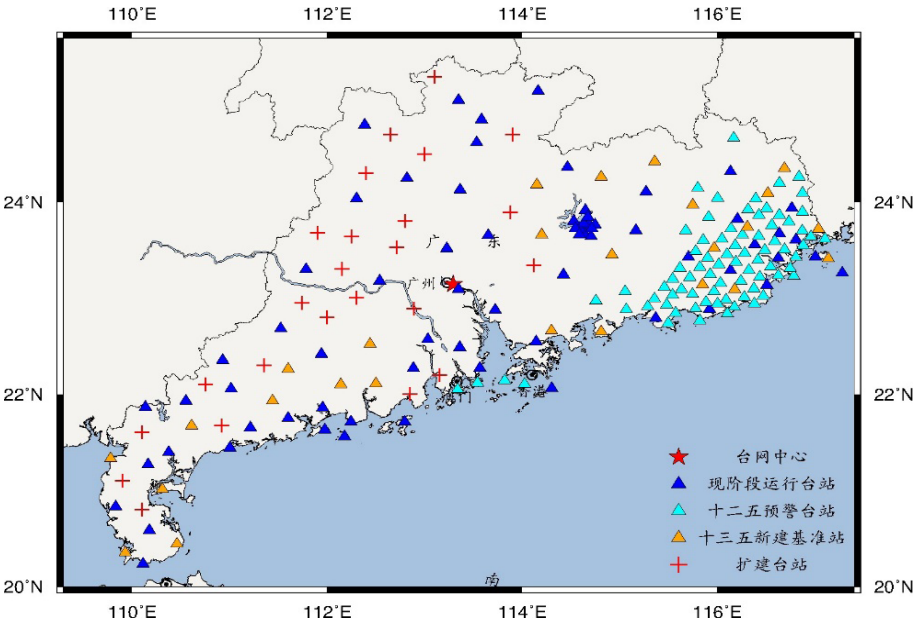


图 5 新加入台站分布图
Fig.5 The distribution map of the newly added stations

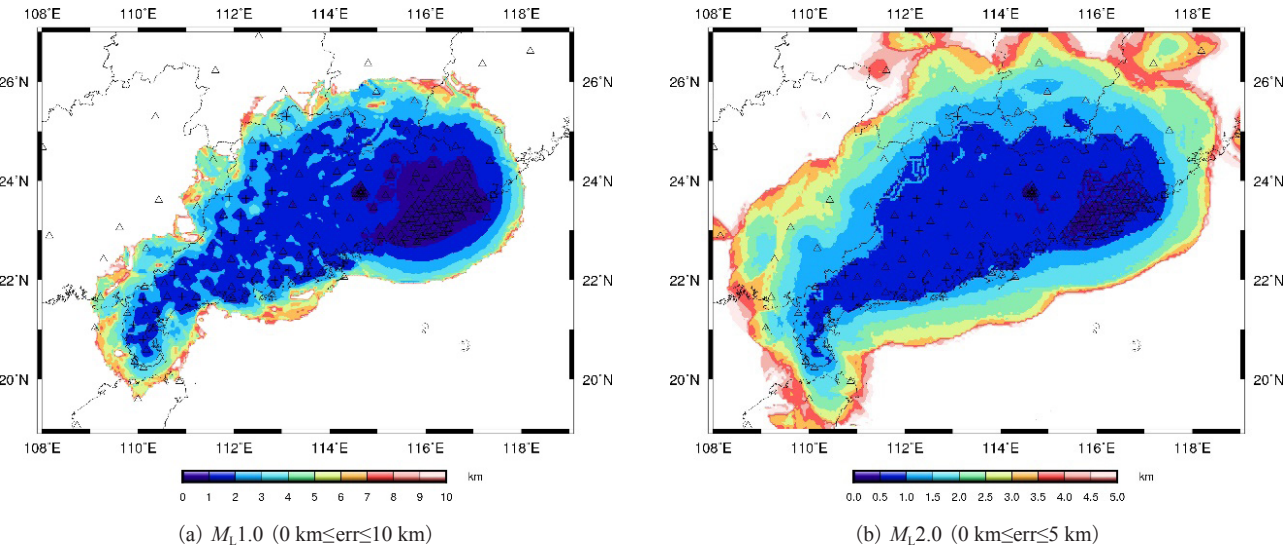


图 6 加入新台站后广东地震台网水平定位误差分布图
Fig.6 Distribution map of the horizontal location error of Guangdong Seismic Network after adding new stations

将图6与图4相比,可以明显看到水平定位能力有较大范围的提升。在发震震级为 $M_L 2.0$ 时,全省水平定位误差基本控制在1 km以内。在发震震级为 $M_L 1.0$ 时,全省大部分地区可以达到2 km以内,其他地区也可以控制在3 km范围。此次台网加密扩建仅考虑定位能力因素,未考虑预警区位置、地震活动性、构造分布和经济投入等因素^[14]。在以后台网扩建工作中,可以按照实际情况多方面考量。

4 结语

本文主要利用非线性最小二乘法原理方法,定量分析了不同时期广东地震台网水平定位能力,结果显示:

(1) 现阶段台网整体水平定位能力尚可,在发生较小发震和较大地震时,广东陆地水平定位误差分别控制在10 km和2 km以内。雷州半岛和粤西、粤北部分地区属定位能力薄弱区,水平定位能力较差。附近海域发生较小地震时,距海岸线外约20 km范围内水平定位误差小于10 km;较大地震时,距海岸线外约80 km范围内水平定位误差小于5 km。

(2) 加入“十二五”预警台站后,粤东和珠三角及其附近海域地区,水平定位能力有了明显的提升,尤其粤东地区水平定位误差基本控制在1 km以内,而其他地区无明显变化。

(3) 加入“十三五”国家基准站后,水平定位能力提升最为明显的为粤西地区。在发震震级较小时,雷州半岛地区水平定位误差降低为5 km以内;在发震震级较大时,茂名和阳江大部分地区水平定位误差降低为1 km以内。同时,整个粤西地区定位误差小于5 km的海域范围也有所提升。

根据以上结果可以看出,粤西、粤北以及珠三角部分地区水平定位能力仍较为薄弱。因此,对台网提出一个扩建方案,结果显示,扩建后全省定位能力较为平均且可以达到一个很高的定位水平。

本文对广东台网水平定位能力的评估,为以后台站规划设计提供了较为科学的参考。但

在实际计算中,由于受到速度模型误差、层厚误差和到时误差等影响,即未考虑先验误差,所以本文理论分析结果可能还会与实际定位结果有一定的差异。随着以后误差参数愈加完善,水平定位能力的评估结果也将愈加精准。

致谢: 本研究中使用的程序为 Mladen Zivcic 和 Jure Ravnik 研发的 LOK 程序,计算中得到谢剑波高工的指导并改进了程序,在此表示感谢。

参考文献

- [1] 张玲,张瑞芳,董春丽,等.数字化台网中定位子台网选取对定位结果的影响[J].山西地震,2014(1):10-15.
- [2] D Peter, R Crosson. Application of prediction analysis to hypocenter determination using a local array[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1972, 62(3):775-778.
- [3] R. Vhrhammer. Analysis of small seismographic station networks[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1980, 70(A):1369-1378.
- [4] 赵仲和.区域地震台网地震定位能力分析[J].地震学报,1983,5(4):467-476.
- [5] 姜长宁.江苏数字地震台网地震定位能力分析[J].地震学刊,2001,21(2):1-5.
- [6] 陈贵美,杨选,刘锦.广东数字地震台网“十五”系统的几种地震定位方法的定位效果分析[J].华南地震,2009,29(1):69-78.
- [7] 胡秀敏,叶秀薇,刘锦.广东两套数字化地震台网系统双差定位结果的比较——以广东阳江地区为例[J].华南地震,2009,29(4):103-107.
- [8] 马晓静,吕作勇.广东地区重复地震识别及其在台网定位评价中的应用[J].华南地震,2017,37(1):22-28.
- [9] 胡文灼,欧阳龙斌,吴叔坤,等.广东地震台网台站数据传输质量对比分析[J].华南地震,2019,39(1):12-19.
- [10] 姜喜姣,龚萱,胡文灼,等.广东数字地震台网地震编目分析[J].华南地震,2018,38(3):49-55.
- [11] 林伟,谢剑波,刘少文.广东省地震预警台网建设规划[J].华南地震,2018,38(S1):101-107.
- [12] 詹小艳,王恒知,王俊,等.基于波谱包络特征的地震事件检测[J].地震研究,2018,41(2):258-263.
- [13] 地震台站观测环境技术要求.中华人民共和国国家标准(GB/T 19531.1-2004)[S].北京:中国标准出版社,2004.
- [14] 王光明,刘自凤,赵小艳,等.2018年云南通海 $M_S 5.0$ 地震序列重定位及发震构造讨论[J].地震研究,2018,41(4):503-510.