

地震预警系统中进一步提高三台震中定位精度的方法研究^{*}

刘希强, 蔡寅, 赵银刚, 曲保安, 赵瑞, 李红, 冯志军

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要: 针对基于3个台站Pg震相进行震中定位时有时存在误差较大、不稳定等现象, 通过分析区域速度模型差异、台站的几何分布对震中定位精度的影响, 结合山东虚拟测震台网, 给出了接近实际的直达Pg波视速度结构, 提出了三台震中定位的综合解决方案。对2009~2013年山东虚拟测震台网内1555次地震的震中定位结果表明, 应用三台定位方法得到的震中定位误差平均为8.7 km (与台网定位结果相比), 提高了震中定位的精度, 减少了震中不能确定的概率。

关键词: 地震预警; 三台震中定位; 定位精度; 速度模型; 震中方位角

中图分类号: P315.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2014)03-0399-07

0 前言

近年来, 地震早期预警(EEW)技术在多个国家和地区得到迅速的发展和应用, 对部分强震进行了成功预警并取得了明显的减灾实效(Allen *et al.*, 2009)。EEW的核心问题是快速而又准确地确定地震预警参数(包括震中、震级、预警目标区烈度、预警时间等)。在如何利用最少的台站直达波到时和最短的波形数据, 最大限度地提高震中定位的时效性和准确性问题上, 众多学者已开展了大量研究工作(Odaka *et al.*, 2003; Rydelek, Pujol, 2004; Horiuchi *et al.*, 2005; Satriano *et al.*, 2008; 周彦文等, 2010; 赵冰, 刘希强, 2011; 刘希强等, 2012a, b; 王庆民等, 2013)。

刘希强等(2012b)在充分考虑了非触发台站和地震波传播规律对震中分布范围的约束条件之后, 根据地震发生后第1个、第2个、第3个触发台站P波到时记录提出了动态、近实时确定地震发生区域、线区间和震中位置的方法, 提高了震中定位结果的精度。研究表明:(1)当参与震中定位的3个台站空间分布近似呈线性分布时, 基于3个台站的Pg波到时测定震中的不确定性会增大, 误差比较大;(2)若选取的区域直达波速度不合理, 由于震中近似分布在以两台为焦点的双曲线上, 直达波速度的大小会影响双曲线的分布形态,

进而也会影响到根据3条双曲线的两两相交确定震中的精度。

本文研究的前提和基础是假定地震发生后, 通过分析技术(刘希强等, 2012a, b)测量得到了前3个台站的直达波震相和震中方位角(特指震中相对于第一个触发台站, 下同)信息。在保证预警时效性基础上, 给出了用以进一步提高震中定位精度的速度模型, 提出当3个台站分布的拟合优度较高时, 通过增加震中方位角信息参与定位, 可进一步提高定位精度的研究新思路。

1 三台震中定位方法

本文称由3个台站P波到时确定震中的方法为三台震中定位法。Rydelek和Pujol(2004)提出了震中快速定位的双台子台阵方法, 其基本的思路是在已知速度模型的前提条件下, 根据最早记录到P波的两个台站到时信息, 结合台网中其他台站还未有记录到P波这一约束条件, 尽可能确定地震发生的空间范围。震中定位的基本原理总结如下:

设介质为均匀介质, P波速度为 V_p , 视速度为 V_p' , 地震发生的时刻是 T_0 , 震源深度为 H , 台站 S_1 、 S_2 到时分别是 T_1 、 T_2 ($T_2 > T_1$), 台站间距离为 $2c$, 震中到两个台站的距离分别为 d_1 和 d_2 , 则有

^{*} 收稿日期: 2014-02-25.

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAK19B04)和中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH12029)联合资助。

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{V_p^2(T_1 - T_0)^2 - H^2} = V_p'(T_1 - T_0), \\ d_2 = \sqrt{V_p^2(T_2 - T_0)^2 - H^2} = V_p'(T_2 - T_0). \end{cases} \quad (1)$$

根据式 (1), 有 $d_2 - d_1 = V_p'(T_2 - T_1)$, 由于震中到两个台站间距离差为已知, 则可认为震中位于以两个台站为焦点的双曲线上。以两个台站连线为 x 轴、中垂线为 y 轴坐标系的双曲线方程为

$$\frac{4x^2}{V_p'^2(T_2 - T_1)^2} - \frac{4y^2}{4c^2 - V_p'^2(T_2 - T_1)^2} = 1. \quad (2)$$

刘希强等 (2012b) 对基于 Delaunay 三角剖分生成测震台网的 Voronoi 图 (以下简称 V 图) 方法进行过论述。根据地震震中不会位于非触发台站 V 图范围内的观测事实, 可将位于双曲线上某点的震中位置进一步约束在由第 1 个触发台站形成的 V 图内。根据 3 个台站记录的 P 波到时, 可得到 3 个由两两台站组合得到的地震震中双曲线分布, 3 条双曲线在第 1 个台站 V 图内的交点围成的区域中心位置即是震中位置。

2 V 图单元内地震直达 P 波视速度确定

2007 年 8 月以来, 山东虚拟测震台网由 84 个台站组成, 根据三台震中定位方法, 要提高震中定位精度需要客观给出每个台站附近或每个台站 V 图单元范围内的地震直达 P 波视速度。利用 2007 年 8 月至 2013 年 12 月期间山东及邻区 ($33.5^\circ \sim 40.5^\circ\text{N}$, $114.5^\circ \sim 123^\circ\text{E}$) 范围内的山东、河北、

河南、辽宁、江苏、安徽、天津等省 (市) 地震观测报告资料, 从中选择地震定位精度为 I 类、震中距小于 120 km 的地震台站观测数据进行直达 P 波视速度反演。满足上述条件的地震数为 16 159 次 (图 1), P 波射线总数达 124 641 条, 平均每次地震有 8 个左右台站记录到。在研究范围内选择 1.5° 窗逐 0.1° 步长滑动扫描计算得到每个窗口大小范围内的地震波射线总数。结果表明, 射线密度较低 (小于 15 条) 的区域为南黄海、辽东湾、

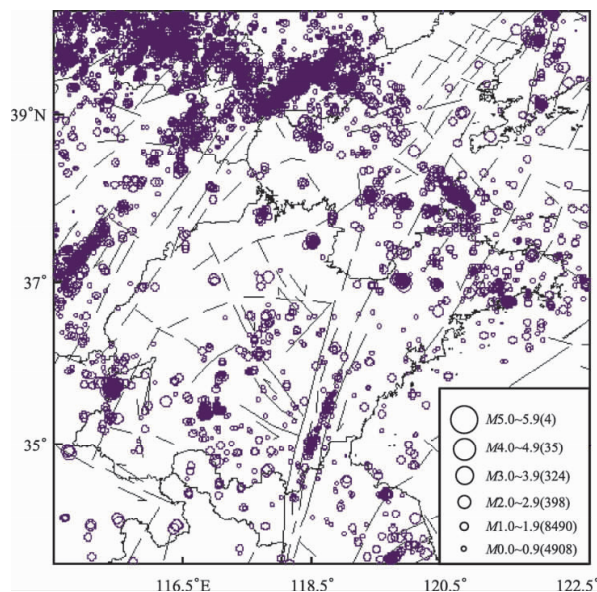


图 1 用于直达 P 波视速度反演的地震震中分布图
Fig. 1 Distribution of earthquake epicenter to be used for apparent velocity inversion of Pg wave

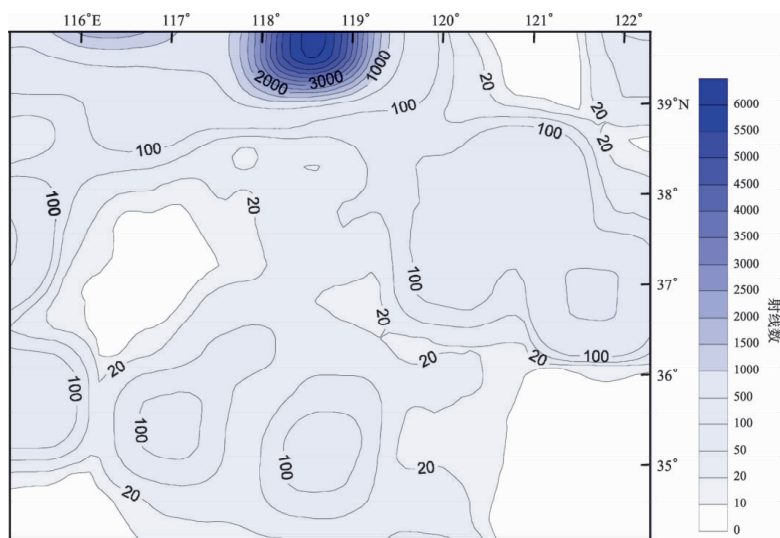


图 2 用于直达 P 波视速度反演的地震射线分布图 (由 1.5° 逐 0.1° 滑动计算得到)
Fig. 2 Distribution of seismic wave rays to be used for apparent velocity inversion of Pg wave
(calculation of 1.5° sliding average value and 0.1° sliding step)

鲁西北和河南东北部局部区域(图2),但总体上用于计算P波视速度的地震射线数量是足够的。选择 1.5° 窗逐 0.1° 步长滑动扫描计算得到2007年8月至2013年12月期间每个窗长范围内所有台站震中距和对应地震波射线路径的走时,然后对每个窗口范围内震中距和射线走时数据进

行非线性拟合,最终得到该窗口范围内的平均视速度。图3给出了根据P波视速度的空间分布计算得到的山东虚拟测震台网84个台站中每个V图单元范围内的地震直达P波视速度分布。图3中P波视速度的横向变化范围为 $5.35 \sim 5.9 \text{ km/s}$,平均为 5.78 km/s 。

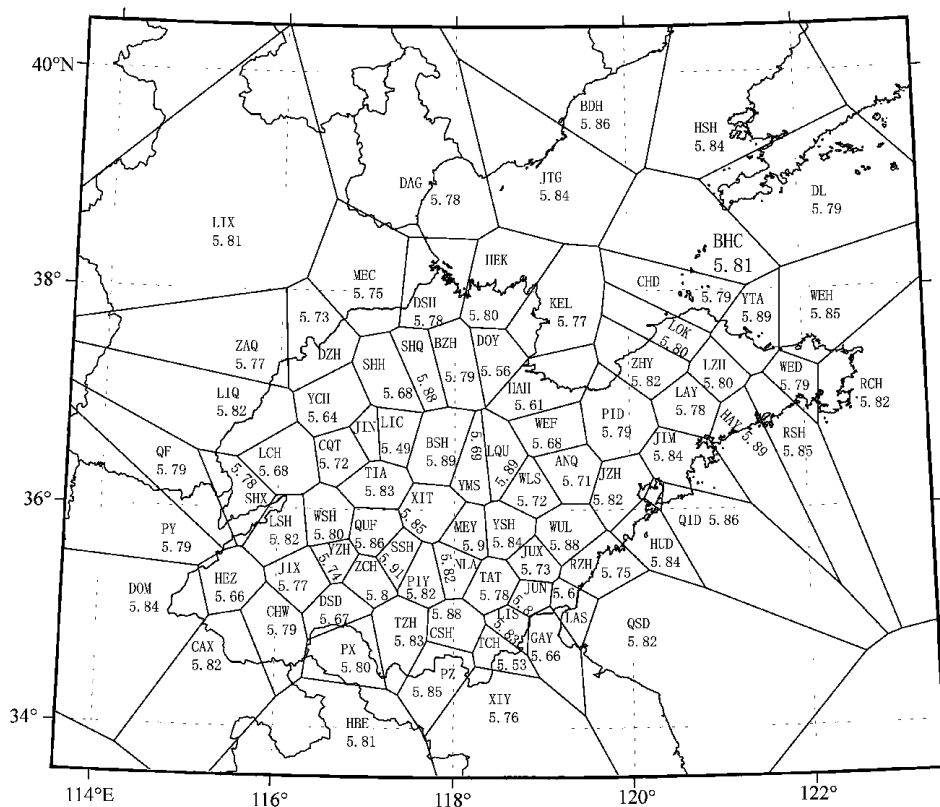


图3 由山东虚拟测震台网形成的V图及其每个V图单元区内的直达P波视速度分布

Fig. 3 Voronoi diagrams formed by the virtual seismic network of Shandong Province and the apparent velocity distribution of Pg wave in each unit of Voronoi diagram

3 台站的几何分布对震中测定结果的影响

台站的几何分布对测定地震参数是有影响的。本文采用拟合优度来描述台站的几何分布形态,当拟合优度等于1时,台站分布在一条直线上;拟合优度越接近于1,表示台站越近似呈直线分布。为了说明台站的几何分布对震中测定结果的影响,本文以山东虚拟测震台网记录的网内地震为例来进行分析。图4给出了山东虚拟测震台网分布和2009~2013年山东虚拟测震台网记录的网内地震,每个地震至少有3个台站的Pg波到时记录,共计

1555次。图5给出了每次地震记录的前3个台站拟合优度分布情况。由图5可看出,拟合优度大于0.95的台次有629个,占总数的40%。可见应用三台震中定位方法必须要考虑台站分布对震中测定带来的不确定性因素。

根据均匀介质模型下的地震波传播理论,在已知台站Pg波到时和传播速度的条件下,当台站分布呈直线或二次曲线(包括椭圆、双曲线、抛物线等)时,则不能得到确定的震中位置(中国科学院地球物理研究所,1977)。因此,在进行地震预警时,为了保证三台震中测定的精度,应采取如下措施:一是所选择的参与定位的台站不要分布在直线或二次曲线上;二是尽量利用第1个

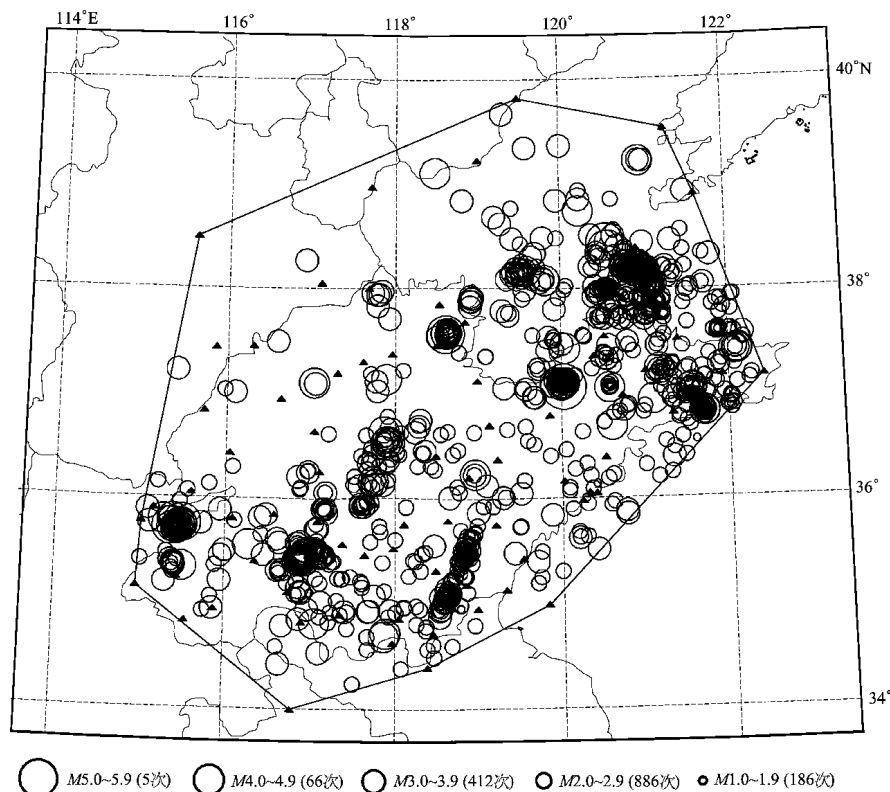


图4 山东虚拟测震台网台站(实心三角)分布及2009至2013年期间网内地震分布(空心圆圈)

Fig. 4 Distribution of stations in virtual seismic network of Shandong Province (solid triangle) and epicenter distribution inside the network from 2009 to 2013 (hollow circle)

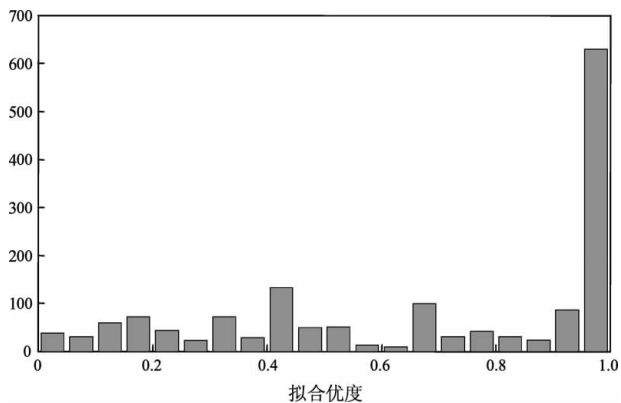


图5 图4中地震发生后前3个触发台站拟合优度分布情况

Fig. 5 The goodness of fit distribution for the first three triggered stations after the earthquake in Fig. 4

台站的Sg震相到时信息,即使Sg震相识别有误差,但这个误差一般要小于台站布局不合理造成的误差;三是由于台站分布完全呈一条直线的情况很少,但接近直线的情况常见。在这种情况下,应用三台震中定位方法会出现多个震中位置,利

用震中方位角的信息选择最可能的震中位置是提高震中测定精度的技术途径之一。

4 三台震中定位解决方案及应用实例分析

4.1 三台震中定位解决方案

(1) 考虑到三台定位时所触发的3个台站不一定是距离实际震中最近的台站,以及减少计算耗时等因素,每条双曲线分布范围限制在3个台站V图所涉及的最大经、纬度范围内。

(2) 当3条双曲线两两相交各有一个交点或2条双曲线相交只有一个交点时,则震中为交点的重心或交点位置(定位精度用“1”表示)。

(3) 当双曲线间都不相交时,则双曲线间最近两点的中点定为可能的震中位置;当双曲线两两相交有一个交点,但距离该交点最近的3个台中不含有一个台站参与本震中定位时,则最大可能的震中位置为第1个台站所在的图内双曲线间最近两点的中点;当双曲线两两相交有多个交点时,

判断每个交点距离最近的3个台与参与确定震中的3个台站中相同台站的数量,数量最多的交点定为震中位置(以上情况的定位精度用“2”表示);

(4) 当双曲线两两相交有多个交点时,若每个交点距离最近的3个台与确定震中所使用的3个台站中具有相同的台站数量时或台站的拟合优度大于0.95时,分两种情况确定震中位置:第一种情况是当根据第1个台站Pg波记录可以测定震中方位角时,首先计算各交点相对于第1个台站的方位角与震中方位角之间的误差大小,然后选择误差最小的交点为震中位置;第二种情况是计算各交点相对于第1个台站的震中距离,然后选择震中距最小的交点为震中位置(以上两种情况的定位精度用“3”表示)。

(5) 以上情况都不满足时,震中视为不能确定,此时以第1个台站位置代表震中位置(定位精度用“4”表示)。

4.2 应用实例分析

为了说明山东虚拟测震台网的地震监控能力,图6给出了地震发生后山东虚拟测震台网前3个地震触发台站的震中距分布情况,其中图6a、b分别给出了图4中第1个地震触发台站和第3个触发台站震中距分布情况,首先触发台站的平均

震中距为42.1 km,第3个触发台站的平均震中距为60.0 km。

图7给出了3种速度模型下的震中定位误差及其精度分布,其中图7a、d都是根据图3视速度分布得到的与台网震中定位结果相比的误差分布图;图7b、c分别是根据平均视速度 V_p 为5.3 km/s和6.3 km/s得到的与台网震中定位结果相比的误差分布图。与图7a、b、c和d结果相对应的定位精度分别见图7e、f、g和h。图7h中定位精度为3的定位方法对应于3.1节中方案(4)中的第一种方法;而图7e、f和g中定位精度为3的定位方法对应于4.1节中方案(4)中的第二种方法。由图7a、b、c可见,应用接近真实的视速度模型得到的平均震中误差为11 km;应用速度偏小的视速度模型得到的平均震中误差较大,为14.5 km;应用视速度偏大的模型得到的平均震中误差为8.8 km。图7c和图7g对比可以看出,应用速度偏大的模型会导致震中不能确定的概率增加,同时定位精度为3和4的地震明显增多,说明应用速度偏大的模型会导致震中定位的不确定性程度明显增加。根据三台震中定位综合方案,由于定位精度为3和4的震中不止一个,在取舍时保留了距离第一个台站最近的点为假设震中,因此应用速度偏大的模型得到的平均震中误差为8.8 km的结果并不意味着所选速度模型是合理的。图7d、h分别与图7a、e对比可以看出,平均震中定位精度误差从11.0 km降到了8.7 km,4类定位精度的地震数量未有变化,这说明当3个台站分布的拟合优度大于0.95时,增加方位角对震中定位的约束条件后使得震中定位的精度得到进一步提高。

5 讨论与结论

(1) 如何对传统的三台震中定位方法进行改进,使其结果既能保证一定的精度要求又能满足地震预警所需的时效性要求是需要不断研究的课题。本文分析了区域速度模型差异、台站的几何分布对震中定位精度的影响。利用2007年以来山东虚拟测震台网的观测资料,反演得到了山东及邻区直达Pg波视速度结构,给出了每个台站的单元内的视速度,提出了三台震中定位的综合解决方案。2009~2013年山东虚拟测震台网网内1555

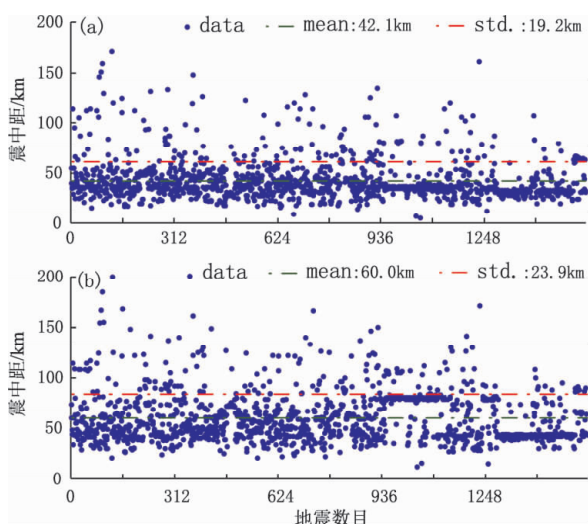


图6 地震发生后山东虚拟测震台网第1个触发台站和第3个触发台站震中距统计分布情况

Fig. 6 The epicentral distance distribution about the first and the third triggered stations after the earthquake in the virtual seismic network of Shandong Province

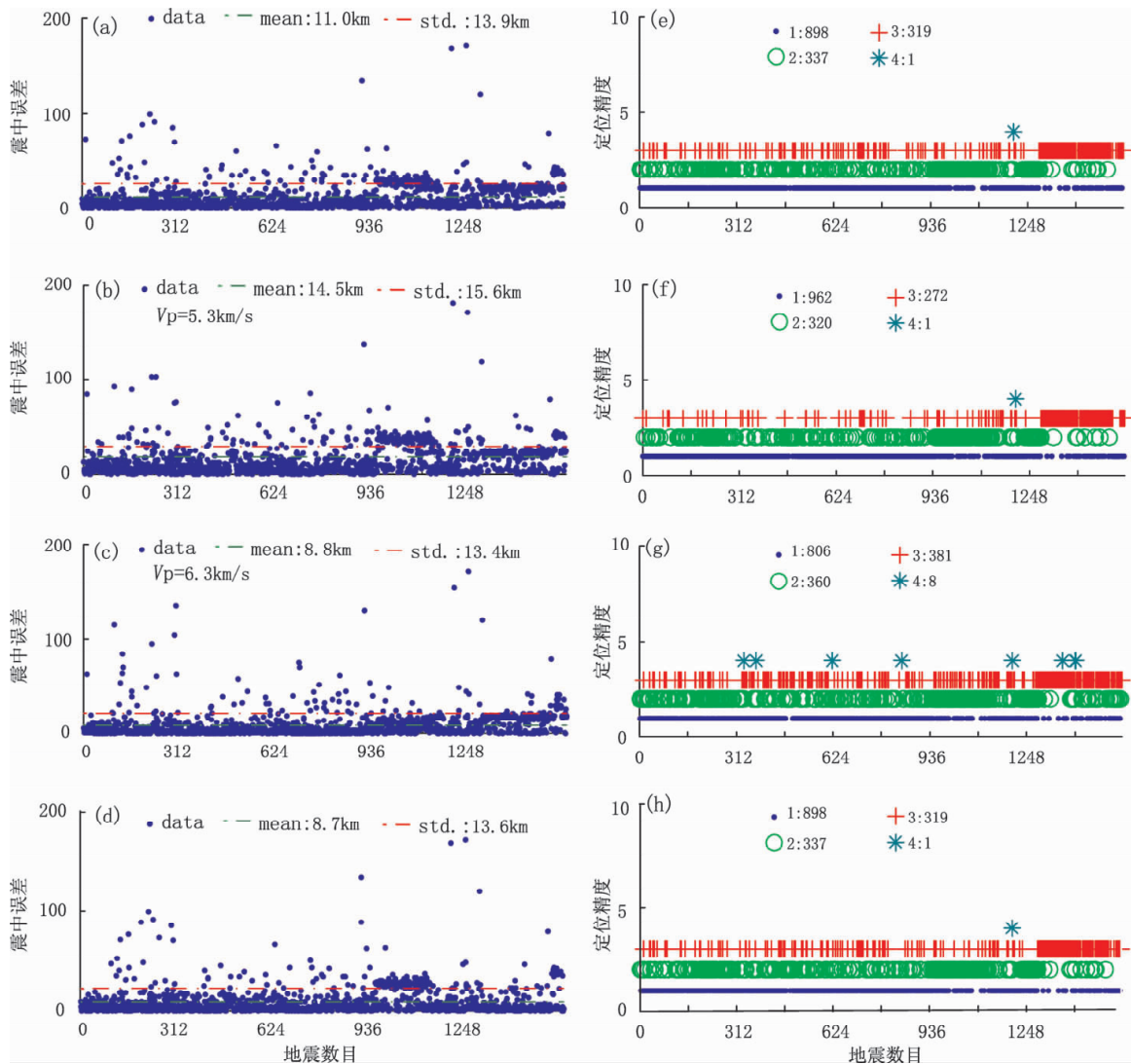


图7 根据不同速度模型和三台震中定位解决方案得到的震中定位误差及其精度分布

Fig. 7 Epicenter locating error and precision distribution obtained by different velocity model and epicenter location of three stations

次地震的震中定位结果表明,在第一个触发台站的平均震中距为42.1 km,第3个触发台站的平均震中距为60.0 km的台网监控能力下,与台网定位结果相比,应用三台定位方法得到的震中定位误差平均为8.7 km,提高了震中定位的精度,减少了震中不能确定的概率;与台网人机交互的地震速报平均用时8 min相比,应用方法测定震中的平均用时为10.4 s(未考虑定位计算和震相识别所需的初至波波形持续时间,以上累计耗时不足3 s),在不失定位精度的前提条件下,定位的速度大幅提高。

(2) 实际检验表明,1 555次地震发生后首先触发的前3个台站分布的拟合优度大于0.95的占

到了总数的40%,这导致震中位置的非唯一性程度明显增大。对此,除了要考虑非触发台站的空间分布信息和第1个触发台站的单元分布作为震中发生范围的约束条件以外,在增加方位角对震中发生范围的约束后,震中位置的不确定性得到显著降低。刘希强等(2012a)的研究表明,地震发生后,利用第1个触发台站Pg波的前1s数据可比较准确地测定方位角。因此,应用本文三台定位方法时,方位角的测定一般不会增加时间,在提高震中定位精度的同时,也不会降低定位的时效性。

(3) 速度结构是影响震中定位精度的因素之一。本文应用三台定位方法的前提是假定每个台

站的V图单元是均匀介质,不同的单元具有不同的视速度。和以往所使用的单层速度模型相比,本文考虑了单层速度的横向变化,更加接近实际。但如果考虑三维速度模型进行震中定位,这又会导致定位速度的降低。如何实现定位结果的“又快又好”是我们不断努力的方向。

参考文献:

- 刘希强,李霞,蔡寅,等. 2012a. 基于单台P波初始记录的地震震中和震级快速测定方法研究[J]. 地震研究, 35(4): 514-521.
- 刘希强,孙亚强,赵冰,等. 2012b. 地震震中实时动态定位的方法研究[J]. 西北地震学报, 34(4): 342-349.
- 王庆民,刘希强,沈得秀,等. 2013. 地震预警中的动态定位方法研究及应用[J]. 地震研究, 36(4): 485-489.
- 赵冰,刘希强. 2011. 全球地震早期预警研究综述[J]. 西北地震学报, 33(4): 392-402.
- 中国科学院地球物理研究所. 1977. 近震分析[M]. 北京:地震出版社, 142-158.
- 周彦文,刘希强,李铂,等. 2010. 基于单台P波记录的快速自动地震定位方法研究[J]. 地震研究, 33(2): 183-188.
- Allen R. M., Gasparini P., Kamigaichi O., *et al.*. 2009. The Status of Earthquake Early Warning around the World An Introductory Overview[J]. Seismological Research Letters, 80(5): 682-693.
- 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.
- Odaka T., Ashiya K., Tsukada S., *et al.*. 2003. A New Method of Quickly Estimating Epicentral Distance and Magnitude from a Single Seismic Record[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 93(1): 526-532.
- Rydelek P., Pujol J. 2004. Real-Time Seismic Warning with a Two-Station Subarray[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 94(4): 1546-1550.
- Satriano C., Lomax A., Zollo A. 2008. Real-time Evolutionary Earthquake Location for Seismic Early Warning[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 98: 1482-1494.

Study on Method of Further Improving Epicenter Locating Precision Based on Pg Onsets of Three Stations in Earthquake Warning System

LIU Xi-qiang, CAI Yin, ZHAO Yin-gang, QU Bao-an, ZHAO Rui, LI Hong, FENG Zhi-jun
(Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China)

Abstract

Aiming at the phenomenon of the larger error and instability that exists in the epicenter location based on Pg onsets of three stations, combined with virtual seismic network of Shandong Province, we analyze the influence of the difference of regional velocity structure and geometric distribution of stations on locating precision of epicenter, and give the apparent velocity model of direct Pg wave to put forward the integrated solutions scheme on epicenter location based on Pg onsets of three stations. The epicenter location results of 1 555 earthquakes recorded by the virtual seismic network of Shandong Province from 2009 to 2013 indicates that the average error of epicenter location is 8.7 km by Pg onsets of three stations (compared with the epicenter location in network), which can improve the precision of epicenter location and deduce the probability of epicenter cannot be determined.

Key words: earthquake warning; epicenter location based on Pg onsets of three stations; location precision; velocity model