

地震震中实时动态定位的方法研究

刘希强, 孙亚强, 赵冰, 王庆民, 赵大鹏, 赵瑞, 李铂

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要:在地震早期预警系统中具破坏性地震震中的确定速度十分重要。本文提出了地震发生后根据1个、2个、3个台站P波到时记录进行动态、近实时确定地震发生区域、线区间和震中位置的方法。方法充分考虑了地震触发台站和非触发台站分布与地震波传播规律的一致性和差异性特征,提高了震中定位结果的精度。对由79个台站组成的山东虚拟测震台网2009—2010年期间记录的425次网内地震进行了快速定位,结果表明对发生在网内的地震可在要求时间内给出比较准确的震中位置,可满足预警地震速报时效性和精度的双重要求。

关键词: Voronoi 剖分; 双台子台阵; 地震动态实时定位; 山东数字测震台网; 地震预警

中图分类号: P315.61 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2012)04-0342-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2012.04.0342

Research on Real-time Evolutionary Earthquake Epicentral Location

LIU Xi-qiang, SUN Ya-qiang, ZHAO Bing,

WANG Qing-min, ZHAO Da-peng, ZHAO Rui, LI Bo

(Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: In a earthquake early warning system, the ability to quickly locate devastating earthquake is very important. In this paper a new method to estimate earthquake epicentral region, hyperbolic curve range and epicenter point from only the three earliest P-wave arrival times in a seismic network is developed. In the method the constraint conditions that some stations record P arrivals the others do not record P arrivals, and seismic wave travelling characteristics are considered fully to improve earthquake epicentral location accuracy. The method is applied to P-wave seismic data from the Virtual Seismic Network of Shandong province with 79 stations for 425 earthquakes in 2009—2010, the results show agreement with actual earthquake epicentral locations. The method can satisfy the real-time and accurate need in the earthquake early warning system.

Key words: Voronoi cells; Two-station subarray; Real-time evolutionary location; Digital Seismic Network of Shandong Province; Earthquake warning

0 前言

“地震早期预警”(EEW)是用于描述实时地震的信息系统,能够在强地面震动到来之前发出预警信息,快速检测地震破裂所产生的能量大小且估计稍后将在当地或异地发生地面震动情况。近年来EEW技术在国际上得到迅速的发展^[1],在墨西哥

哥^[2-3]、日本^[1,4-6]、美国^[7-11]、意大利^[12-13]、土耳其^[8,11,14]和中国台湾^[15-16]等国家和地区中得到应用,并取得了成功预警且收到减灾实效的地震实例。

我国是世界上遭受地震灾害最严重的国家之一,地震专家对地震预警技术和预警系统的应用也

收稿日期:2011-09-12

基金项目:国家科技支撑计划课题(2012BAK19B04);地震科技星火计划项目(XH12029)

作者简介:刘希强(1964—),男(汉族),山东武城人,博士,研究员,研究方向为地震波信息处理及应用。

进行了深入的思考、构想和初步实践^[17-21]。中国广东大亚湾核电站在1994年就建立了用于地震报警的地震仪表系统;刘林等^[17]在对京沪高速铁路的地震预警系统的构成、监测设备的设置方案以及报警模式等关键问题进行了研究,给出了机械式地震仪的预警水平,并提出了适用于P波检测的M-R判别标准;廖旭等^[18]利用数字化观测、GIS等高新技术建立了大型石化企业地震预警系统,并与地震应急系统相连,于2001年10月投入试运行。地震预警技术研究在不断进行中^[22-24],但自主研发的地震预警产品还未达到实用化程度。通过“十五”、“十一五”期间地震台网建设,我国数字观测台网将更加密集,这为地震预警系统建设提供了良好的硬件基础。地震预警的过程相当复杂,强震动数据的实时处理与地震三要素的快速确定、地震动场的生成、基于地震动参数的震害快速评估、应急决策与自动控制、地震预警系统的集成等科学和技术问题仍需进一步研究解决^[25-26]。

在如何利用最少的台站直达波到时,最大限度地提高地震定位的时效性和准确性问题上,科学家已经开展了一些研究工作^[4,12,27-29]。本文综合应用触发台站震相和位置以及未触发台站位置信息,借助Voronoi剖分技术和地震波传播规律探索依次应用1个台站到3个台站实时动态确定地震发生的区域、线段区间和震中的综合分析新方法。以此方法对山东省部分地震进行定位,并与山东省虚拟测震台网2009—2010年的地震观测报告进行对比,分析其时效性和精度。

1 地震震中判断的新方法

1.1 震中发生区的判断方法

Voronoi图(以下简称V图)是一个关于空间分割的基础数据结构^[29-33],它以某种距离作为度量,以近邻原则对空间点集进行剖分。这种剖分结果能够很好地表达点与点之间的邻近关系以及点的影响范围等重要的空间关系信息。V图已经在图形学、机械工程、虚拟现实、地理信息系统、机器人、图像处理、CAD等领域得到广泛应用,目前也在地震速报^[12,27-29]和应急管理^[30]中得到初步应用。在地震定位中的应用思路是将测震台站两两相连形成Delaunay三角网,同时作连线的中垂线,中垂线相交形成若干个凸多边形,即V图(也称为泰森多边形)。图1是根据三角形增长算法的原理^[31]得到的由测震台站生成的Delaunay三角网。基于Delaunay

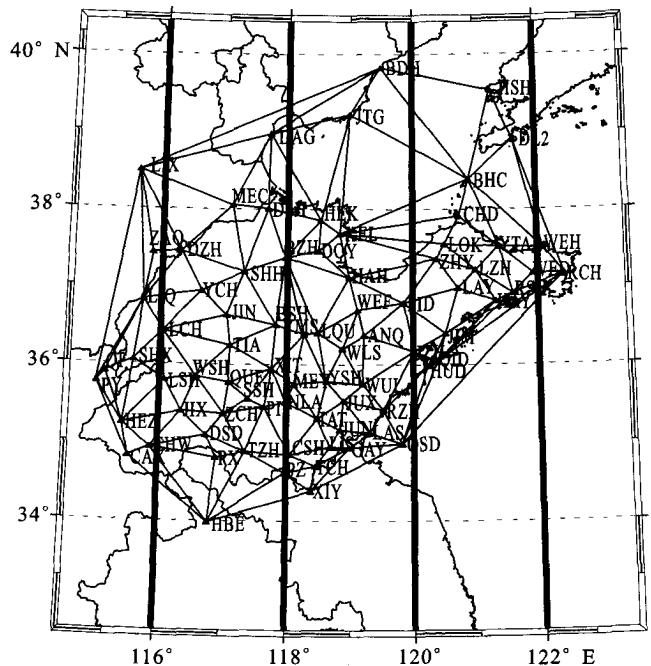


图1 由山东省地震观测台站生成的 Delaunay 三角剖分图(三角表示台站)

Fig.1 The delaunay triangulation formed by seismic stations (solid triangles) in Shandong province.

三角剖分可生成V图^[32],基本思路是寻找每个点的有序目标三角形。常规方法是遍历所有的三角形,找到与该目标点相关的所有三角形,然后对有序目标三角形的圆心按空间位置进行顺时针或逆时针排序,再依次连接圆心生成该点V图;遍历所有点,就生成测震台站的V图(图2)。

根据第*i*个台站触发记录可确定地震震中所在的V区。从图2可看出山东省79个测震台对应有79个V图,每个V图具有以下特性:(1)每个V图内仅含有一个测震台;(2)V图内的点到测震台的距离最近;(3)位于V图多边形边上的点到其两边的测震台距离相等。根据地震波传播的规律可知,当第*i*个测震台首先记录到地震P波时,对网内地震我们可确定地震就发生V_i区域内,对网外地震可确定地震就发生距离第*i*个测震台最近的地方。根据V_i图多边形区顶点坐标可计算和搜索得到地震最初影响区域大小、城镇、区域内地震应急救援人员和物资储备等信息。

图3给出了根据已知P波速度($V_p = 6.01$ km/s)、地震触发记录台站以及非触发记录台站信息进行模拟震中实时定位方法检验的例子。假定距新泰台(XIT)最近的某地发生一次地震,新泰、蒙阴和牛岚台先后记录到地震P波,蒙阴和牛岚P波到

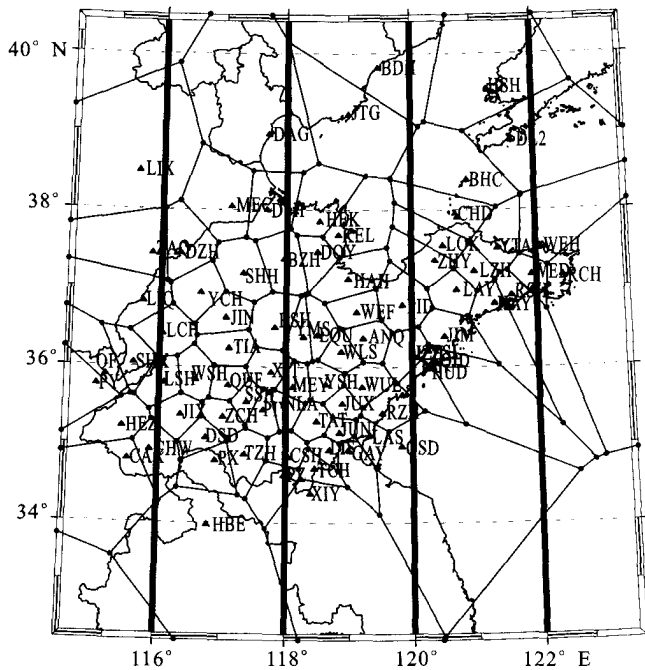


图2 由山东地震观测台站生成的 Voronoi 图

Fig. 2 Voronoi diagram formed by seismic stations in Shandong province.

时与新泰的到时差分别为 1.14 s 和 5.16 s。当新泰台一旦有地震记录,则可快速判断和得到地震发生在编号为 V_{70} 的区域(图 3(b)阴影区)以及相关地震速报和应急信息,如台站地理坐标(35.947 4°N, 117.763 3°E)、 V_{70} 区面积(2 930.8 km²)、 V_{70} 邻近分区编号(依次为 52, 50, 60, 54, 62, 19, 46 和 49)、 V_{70} 邻近区内台站(平邑(PIY),牛岚(NLA),泗水(SSH),曲阜(QUF),泰安(TIA),博山(BSH),临朐(LQU)和蒙阴(MEY))以及 V_{70} 内主要城市(莱芜市、新泰市等)等。

1.2 进一步缩小地震震中发生范围的线区间判断方法

Rydelek 和 Pujol(2004)首先提出了震中快速定位的双台子台阵方法。基本的思路是在已知速度模型的前提下,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:

忽略地震震源深度,近似认为震中分布满足双曲线规律。设介质为均匀介质, P 波速度为 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

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

忽略 H 的影响,有 $d_1 - d_2 \approx V_p(T_2 - T_1)$,则由于震中到两个台站间距离差为已知,则可认为震中近似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

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

根据台网中其它台站的初至波不是最先到达的事实,可将双曲线上震中位置进一步约束在第一个触发台站所在的 V_i 区内。

图 3(c)给出了当第二个台站蒙阴台记录到 Pg 波,且其与新泰台 Pg 到时差为 1.14 s 时,地震震中位置所满足的双曲线分布。结合地震发生在 V_{70} 区,判断震中位置最大可能分布在图 3(c)中阴影区内的双曲线上。

1.3 地震震中位置的判断方法

根据三个台站记录的 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,三条双曲线的交点围成的区域中心位置即是震中位置。图 3(d)给出了三条双曲线的交点的中心位置(117.999 9°E, 35.999 8°N),与理论位置(118.0°E, 36.0°N)非常吻合。这说明根据 V_i 图和震中的双曲线分布相结合确定地震发生区、线区间和震中位置的动态预警地震实时定位的思路是可行的。

1.4 一些特殊情况下地震震中位置判断的方法

上述方法仅在理想的条件下适用,必须满足地震发生在网内、地震波传播介质性质均匀和距离实际地震最近的台站首先触发这三个条件。但在实际地震实时动态定位过程中有许多问题具有不确定性,表现在以下几个方面:(1)地震观测台站偶有中断,如距离地震最近的台站在震时恰逢中断;(2) V 内或不同的 V 区 P 波速度并不一致;(3)地震震中的双曲线分布有时会出现三个以上交点;(4)由于震相到时读取的误差有时甚至不能形成双曲线;(5)台站分布不合理,如三个台站呈近似线性分布等。对此,本文采用以下改进思路进行地震震中测定。

(1) 双曲线间不相交时,则第一个台站所在的 V 图内双曲线间最近两点的中点为最大可能的震中位置。图 4(a)给出了利用新泰(XIT)、蒙阴(MEY)和泗水(SSH)三个台 Pg 波到时对山东省测震台网测定的 2009 年 10 月 29 日 20 时 41 分 23.6 秒新泰(35.976°N, 117.668°E, 深度 7 km) $M_L 1.6$ 地震的定位结果。阴影区为第一个有 P 波记录 of XIT 台

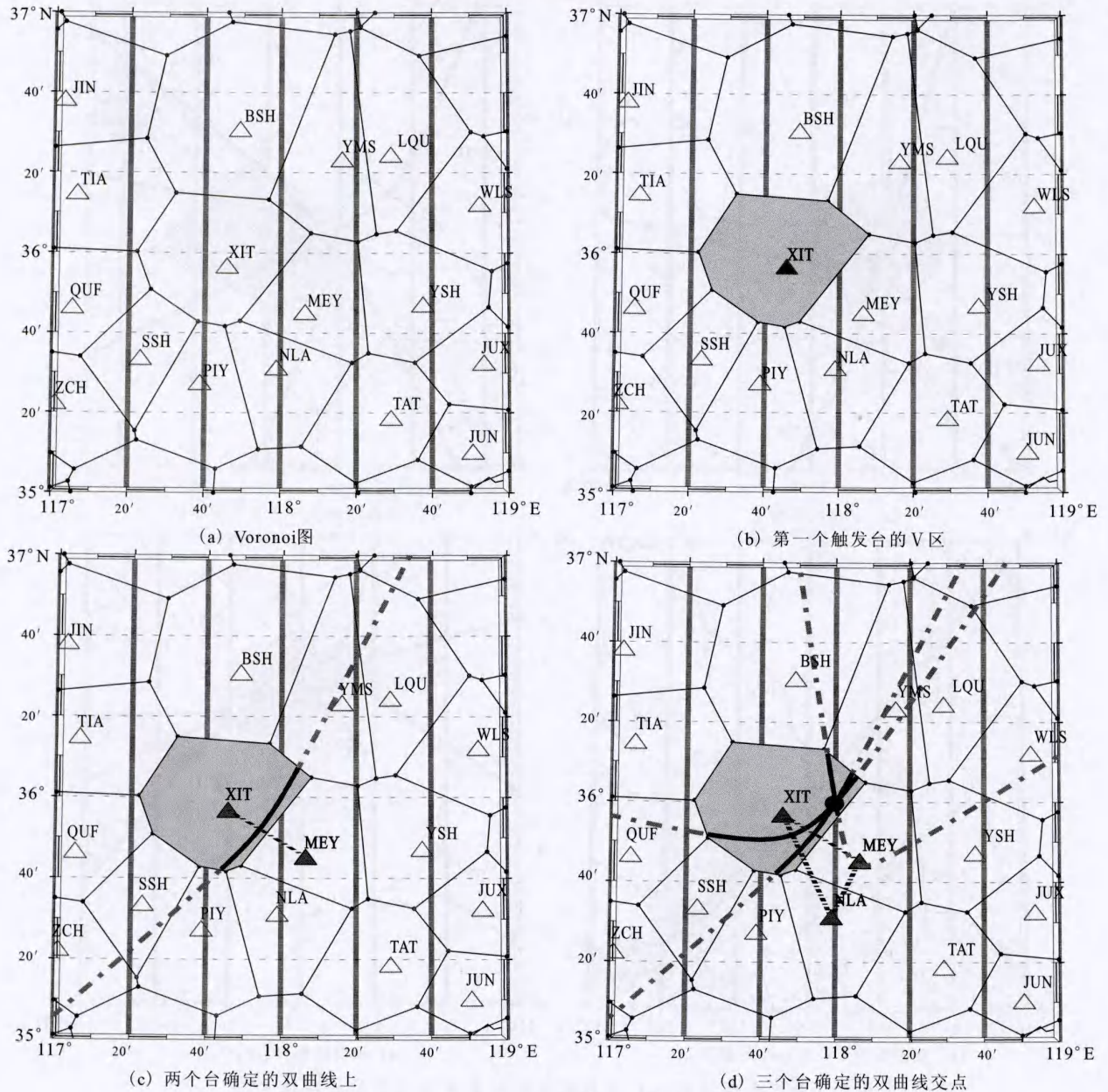


图 3 根据已知 P 波速度、地震触发和非触发记录台站信息的模拟震中实时动态定位方法

Fig. 3 When the velocity of P-wave is known, using the information of triggered and untriggered stations to locate seismic epicenter.

所对应的 V 图,圆圈位置为本文方法所确定的震中位置,实心五角星为山东测震台网测定的震中位置。震中误差为 2.8 km。

(2) 当双曲线相交只有一个交点,且距离该交点最近的三个台中含有至少一个台站参与本研究震中定位时,则最大可能的震中位置为交点位置。图 4(b)给出了利用日照(RZH)、五莲(WUL)和莒县(JUX)三个台 Pg 波到时对山东省测震台网测定的 2009 年 01 月 11 日 14 时 39 分 09.2 秒日照

(35.480°N,119.420°E,深度 6 km) M_L 2.0 地震的定位结果。图中阴影区为第一个有 P 波记录的 RZH 台所对应的 V 图,圆圈位置为本方法所确定的震中位置,实心五角星为山东测震台网测定的震中位置,震中误差为 1.6 km。

(3) 当双曲线相交有一个交点(标号为 B 的圆圈),但距离该交点最近的三个台中不含有一个台站参与本研究震中定位时,则最大可能的震中位置为第一个台站所在的 V 图内双曲线间最近两点的

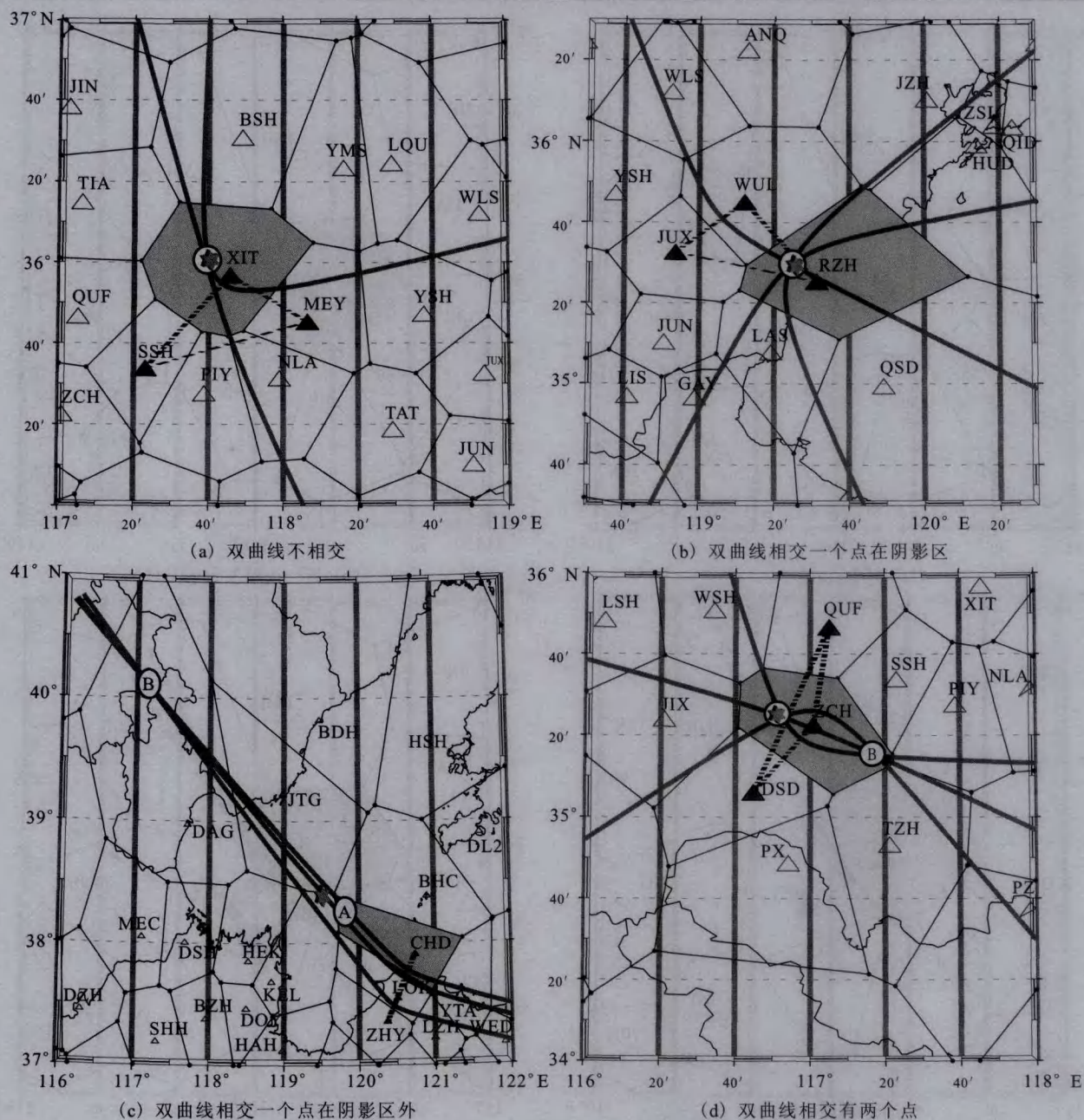


图4 由三个台站实际P波到时进行的震中快速定位的特殊实例

Fig. 4 Some special cases of the quick locating seismic epicenter method using P-wave data in three stations.

中点。图4(c)给出了利用长岛(CHD)、龙口(LOK)和招远(ZHY)三个台Pg波到时对山东省测震台网测定的2009年11月22日01时48分24.0秒渤海(38.431°N, 119.506°E, 深度8 km) M_L 1.8地震的定位结果。标号为B的圆圈表示双曲线交点的位置, 标号为A的圆圈表示本文方法所确定的震中位置。实心五角星为山东省测震台网测定的震中位置, 震中误差为22.8 km。

(4) 当双曲线相交有二个交点时, 如果距离这两个交点最近的三个台都一样且都参与本研究震中

定位, 那么最大可能的震中位置为距离第一个台站最近的交点; 如果距离其中一个交点(比如A)最近的三个台中含有至少一个台站参与本研究震中定位, 而另一个交点不含有一个台站参与本研究震中定位时, 那么取A点为最大可能的震中位置; 如果距离任一交点最近的三个台中都不含有一个台站参与本研究震中定位时, 那么最大可能的震中位置为第一个台站所在的V图内双曲线间最近两点的中点。图4(d)给出了利用邹城(ZCH)、曲阜(QUF)和独山岛(DSD)三个台Pg波到时对山东省测震台网

测定的2009年01月13日23时19分14.5秒邹城(35.420°N, 116.859°E, 深度8 km) M_L 2.8地震的定位结果。标号为A和B的圆圈表示两个交点位置, 标号为A的圆圈位置为本方法所确定的震中位置, 实心五角星为山东测震台网测定的震中位置, 震中误差为2.2 km。

(5) 当出现三个台站近似位于一条直线时, 理论上会出现震中位置的不确定性。在地震预警或速报的过程中除了给出定位参数的不确定信息外, 只能再等待增加新的记录台站, 在上述四个台站中, 选择其中张角最大的三个台站组合再进行震中分析处理。对于台网网缘 Voronoi 剖分网格过大造成预警能力有限的情况, 只能通过建立虚拟台网, 进一步扩大台网的监测孔径来解决。

2 实例分析

搜集了2009年1月至2010年12月期间山东虚拟测震台网地震观测报告资料, 期间网内、网外可定位地震达619次, 其中满足至少有3个台站以上Pg到时记录且距离震中最近的测震台站参与本文方法定位的网内地震频次为425次(图5)。

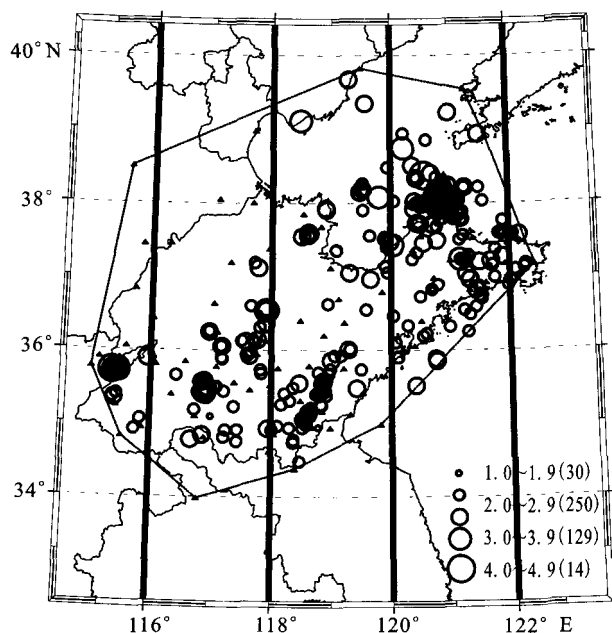


图5 山东虚拟测震台网台站(实三角)和2009—2010年满足条件的地震分布图

Fig. 5 Distribution of stations (solid triangle) in the virtual seismic network of Shandong province and earthquakes which satisfy the conditions.

图6给出了利用三个台站的P波到时测定的定位结果与山东虚拟测震台网定位结果的比较。结果

显示, 425次定位结果的平均误差为6.3 km, 误差小于20 km的地震频次占总数的95.1%。图7给出了参与定位台站空间分布情况统计, 显示参与定位的第一个台站与震中的距离主要分布在 23.1 ± 13.8 km范围内、第三个台站与震中的距离主要分布在 57.3 ± 21.8 km范围。

3 结论

(1) 综合应用两种方法, 并考虑多种实际的复杂定位情况, 提出了地震发生后根据1个、2个、3个台站P波到时记录进行动态、近实时确定地震发生区域、线区间和震中位置的新思路。

(2) 研究结果表明, 对发生在山东虚拟测震台网网内的地震, 基于有限台站和有限震相到时信息在震后平均4 s左右可确定地震发生的最小区域, 在震后平均10 s左右(不考虑数据传输延迟和数据处理时间)可以给出比较准确的震中位置, 定位方法可同时满足预警地震速报时效性和精度的双重要求。

(3) 台站分布、速度模型、到时读取精度等因素影响震中测定精度。为进一步提高预警地震速报的时效性, 一方面需进一步提高台站密度, 另一方面需进一步发展利用单台记录比较准确确定地震发生方位角的方法。

[参考文献]

- [1] Allen R M, Gasparini P, Kamigaichi O, et al. The Status of Earthquake Early Warning around the World An Introductory Overview[J]. Seismological Research Letters, 2009, 80(5), 682-693.
- [2] Espinosa-Aranda J M, Jimenez A, Ibarrola G, et al. Mexico City Seismic Alert System[J]. Seismological Research Letters, 1995, 66, 42-52.
- [3] Espinosa-Aranda J M, Cuellar A, Garcia A, et al. Evolution of the Mexican Seismic Alert System (SASMEX) [J]. Seismological Research Letters, 2009, 80(5), 694-706.
- [4] Odaka T, Ashiya K, Tsukada S, et al. A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(1), 526-532.
- [5] Kamigaichi O. JMA earthquake early warning[J]. Journal of the Japan Association for Earthquake Engineering, 2004, 4, 134-137.
- [6] Hoshiba M, Kamigaichi O, Saito M, et al. Earthquake early warning starts nationwide in Japan[J]. Eos. Transactions of American Geophysical Union, 2008, 89, 73-80.
- [7] Bock Y, Nikolaidis R, De Jonge P J, et al. Instantaneous geo-

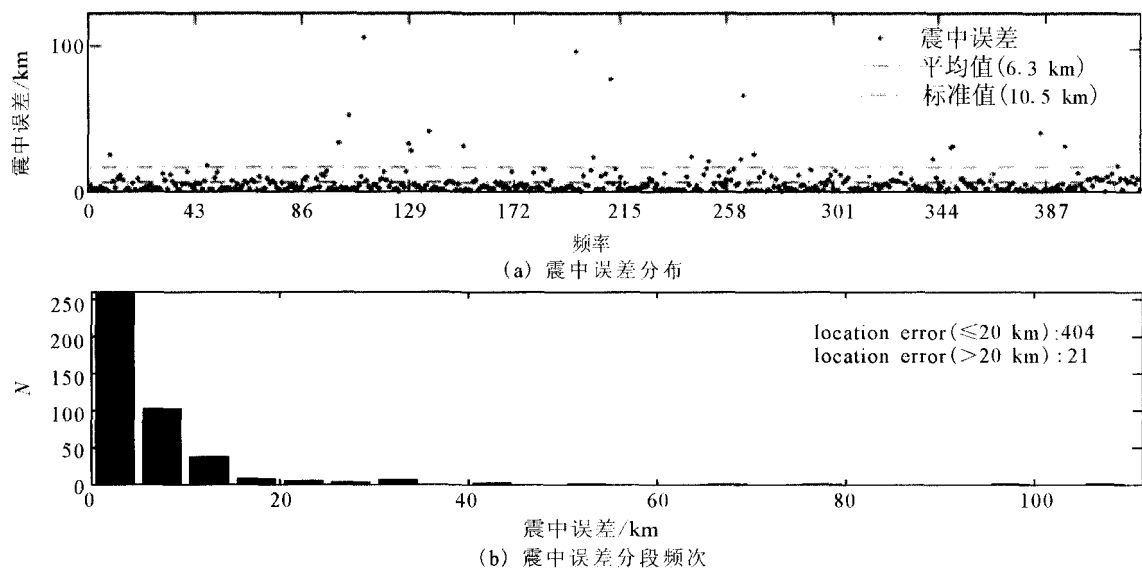


图 6 本方法与山东虚拟测震台网测定的震中误差统计分析

Fig. 6 Statistical analysis of epicenter error in this study compared with one determined by the virtual seismic network of Shandong province.

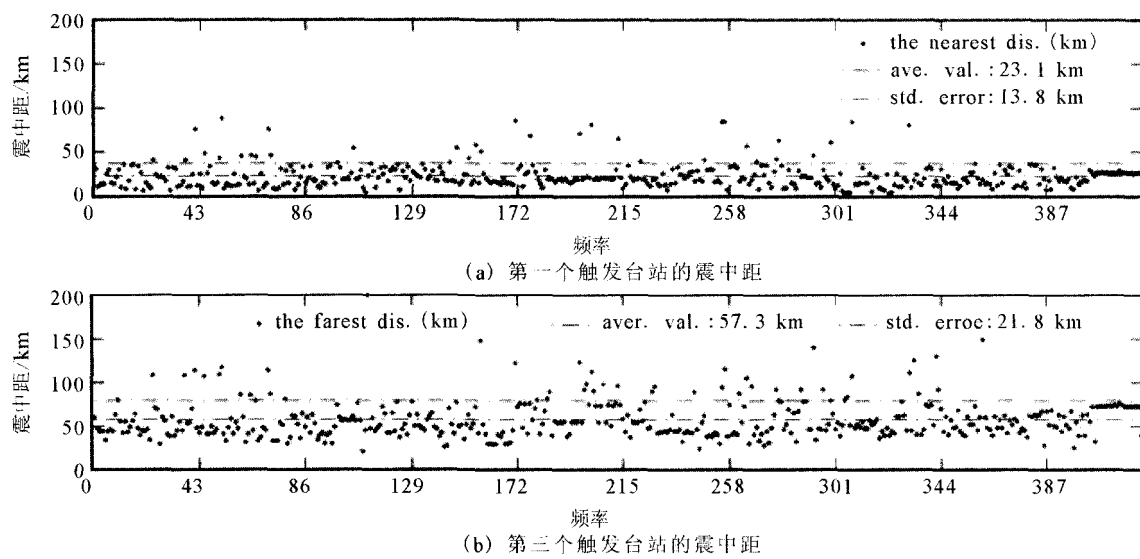


图 7 参与定位的触发台站空间分布情况

Fig. 7 Space distribution of stations which were triggered and used in determining earthquake epicenter.

detic positioning at medium distances with the Global Positioning System[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105: 28233-28253.

[8] Böse M, Wenzel F, Erdik M. PreSEIS: A neural networkbased approach to earthquake early warning for finite faults[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98: 366-382.

[9] Crowell B W, Bock Y, Squibb M B. Demonstration of earthquake early warning using total displacement waveforms from real-time GPS networks[J]. Seismological Research Letters, 2009, 80(5): 772-782.

[10] Cua G, Fischer M, Heaton T, et al. Real-time performance of the Virtual Seismologist earthquake early warning algorithm in southern California[J]. Seismological Research Letters, 2009, 80(5): 740-747.

[11] Köhler N, Cua G, Wenzel F, et al. Rapid source parameter estimations of southern California earthquakes using PreSEIS [J]. Seismological Research Letters, 2009, 80(5): 748-754.

[12] Satriano C, Lomax A, Zollo A. Real-time evolutionary earthquake location for seismic early warning[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98: 1482-1494.

[13] Zollo A, Aldo Amoroso O, Lancieri M, et al. A threshold-based earthquake early warning using dense accelerometer networks[J]. Geophysical Journal International, 2010, 183: 963-974.

[14] Fleming K, Picozzi M, Milkereit C, et al. The Self-organizing

- Seismic Early Warning Information Network (SOSEWIN) [J]. Seismological Research Letters, 2009, 80(5): 755-771.
- [15] Wu Y M, Teng T L. A virtual subnetwork approach to earthquake early warning[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92: 2008-2018.
- [16] Wu Y M, Lin T L, Chao W A, et al. Faster Short-Distance Earthquake Early Warning Using Continued Monitoring of Filtered Vertical Displacement: A Case Study for the 2010 Jiasian, Taiwan, Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(2): 701-709.
- [17] 刘林, 阎贵平, 辛学忠. 京沪高速铁路地震预警系统的方案及关键参数研究[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(4): 75-79.
- [18] 廖旭, 黄河. 企业地震预警系统应用研究[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(6): 142-149.
- [19] 袁志祥, 单修政, 徐世芳, 等. 地震预警技术综述[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(6): 216-224.
- [20] 周彦文, 刘希强, 胡旭辉, 等. 早期地震预警方法研究现状及展望[J]. 国际地震动态, 2008, (4): 28-34.
- [21] 卢瑞珊, 宋麒林, 王富章, 等. 铁路地震灾害预警与应急系统现状及展望[J]. 铁路计算机应用, 2010, 19(7): 17-20.
- [22] 刘希强, 周彦文, 曲均浩, 等. 应用单台垂向记录进行区域地震事件实时检测和直达 P 波初动自动识别[J]. 地震学报, 2009, 31(3): 260-271.
- [23] 周彦文, 刘希强, 李铂, 等. 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, 2010, 33(2): 183-188.
- [24] 曲均浩, 刘希强, 石玉燕, 等. 地震事件自动判断方法研究[J]. 西北地震学报, 2010, 32(4): 325-329.
- [25] 李山有, 金星, 马强, 等. 地震预警系统与智能应急控制系统研究[J]. 世界地震工程, 2004, 20(4): 21-26.
- [26] 赵冰, 刘希强. 全球地震早期预警研究综述[J]. 西北地震学报, 2011, 33(4): 392-402.
- [27] Rydelek P, d Pujol J. Real-Time Seismic Warning with a Two-Station Subarray [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(4): 1546-1550.
- [28] Horiuchi S, Negishi H, Abe K, et al. An Automatic Processing System for Broadcasting Earthquake Alarms [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95(2): 708-718.
- [29] 王庆民, 刘希强, 沈得秀. Voronoi 图和双曲线联合方法在地震快速定位中的应用[J]. 西北地震学报, 2012, 34(3): 234-238.
- [30] 范会川, 周慧娟, 贾利民. Voronoi 图和 Delaunay 三角网在铁路应急管理中的运用[J]. 中国科技信息, 2010, (8): 245-247.
- [31] 姬安召, 兰燕. 三角形增长算法构建 Delaunay 三角网 DEM 的原理与实现[J]. 测绘, 2009, 32(2): 65-69.
- [32] 孙继忠, 胡艳, 马永强. 基于 Delaunay 三角剖分生成 Voronoi 图算法[J]. 计算机应用, 2010, 30(1): 75-77.
- [33] Sambridge M. Geophysical inversion with a Neighbourhood Algorithm - I. searching a parameter space[J]. Geophys. J. Int., 1999, 138: 479-494.
- [34] Aurenhammer F. Voronoi diagrams - a survey of a fundamental geometric data structure[J]. ACM Computing Surveys, 1991, 3(3): 345-405.
- [35] Okabe A, Boots B, Sugihara K. Nearest neighborhood operations with generalized Voronoi diagrams: A review[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1994, 8(1): 43-71.
- [36] 周培德. 计算几何算法分析与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 1-100.
- [37] 刘金义, 刘爽. Voronoi 图应用综述[J]. 工程图学学报, 2004, 25(2): 125-132.