

谢石文, 黄显良, 杨波, 等. 基于不同方法、地壳速度模型的地震定位研究及其在安徽地区的应用[J]. 华南地震, 2018, 38 (1): 95-100. [XIE Shiwen, HUANG Xianliang, YANG Bo, et al. Earthquake Location Research Based on Different Methods, the Crustal Velocity Model and Its Application in Anhui[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(1): 95-100.]

基于不同方法、地壳速度模型的地震定位研究 及其在安徽地区的应用

谢石文¹, 黄显良¹, 杨波¹, 郁建芳¹, 袁勇², 张明明³, 夏仕安¹, 韩成成¹

(1. 安徽省地震局, 合肥 230031; 2. 嘉山地震台, 安徽 明光 239432;
3. 蒙城地震台, 安徽 蒙城 233527)

摘要: 以安徽台网产出的实际地震, 运用 MSDP5.2 中不同定位方法分别配置原模型(华南模型)与新模型(AH2015 模型)对其进行重新定位。统计定位残差及震中差(与编目结果震中位置偏差)等参数, 并进行对比分析, 旨在研究新老模型对不同定位方法的适用性。对比显示: AH2015 模型对地震定位结果更好, 更加符合安徽区域地壳一维速度结构。在使用单纯型或 Hyposat 定位法时, 定位结果良好。结果认为: AH2015 模型可以取代华南模型应用于安徽区域的地震速报与编目工作。

关键词: 地震定位; 华南模型; AH2015 模型

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2018) 01-0095-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.01.013

Earthquake Location Research Based on Different Methods, the Crustal Velocity Model and Its Application in Anhui

XIE Shiwen¹, HUANG Xianliang¹, YANG Bo¹, YU Jianfang¹, YUAN Yong²,
ZHANG Mingming³, XIA Shian¹, HAN Chengcheng¹

(1. Anhui Earthquake Agency, Hefei 230031, China; 2. Jiashan Seismic Station, Mingguang 239432, China;
3. Mengcheng Seismic Station, Mengcheng 233527, China)

Abstract: The paper calculates the parameters such as the positioning residuals and the epicenter difference (distortion from the epicenter position of cataloging results), and does comparative analysis to study the applicability of new and old models to different positioning methods. The results show that the AH2015 model on the earthquake location is better than South China model, and more suitable to the regional 1d crust velocity structure in Anhui. When using the simplex or Hyposat positioning method, a good positioning result will be got. The AH2015 model can take place of South China model to locate earthquakes in Anhui.

Keywords: Earthquake location; South China model; AH2015 model

收稿日期: 2017-12-08

基金项目: 中央引导地方专项资金科技惠民项目(2016080802D117)、安徽省地震局科研合同制课题(201707)

作者简介: 谢石文(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事地震定位算法研究。

E-mail: ECITxshw@163.com.

0 引言

安徽位于中国东南部,地处长江下游,东连江苏,南邻浙江、江西,西靠湖北、河南,北接山东,居华东腹地,是我国东部地区南北之间和东西之间过渡地带^[1]。安徽省地处华北断块区、下扬子断块区和秦岭-大别山断褶带三个大地构造单元的接壤地带,是古中国大陆重要结合地带,地质构造复杂,区域性深、大断裂对全省的构造格架有着明显的制作用^[2]。在安徽境内,华北陆块东以郯庐断裂带、南以六安深断裂为界与大别造山带相接,扬子陆块西以郯庐断裂带为界与大别造山带相接,而秦岭-大别造山带则夹持于华北陆块、扬子陆块之间,经历了多期离合形成了复杂的复合型大陆造山带^[3-5]。

全省地壳结构具有明显的层状特征,新构造运动比较活跃,主要表现在大面积的块体升降运动、断裂活动以及相伴的岩浆喷溢、温泉出露和地震活动,这就决定了安徽的地震活动在全国居于中等水平。

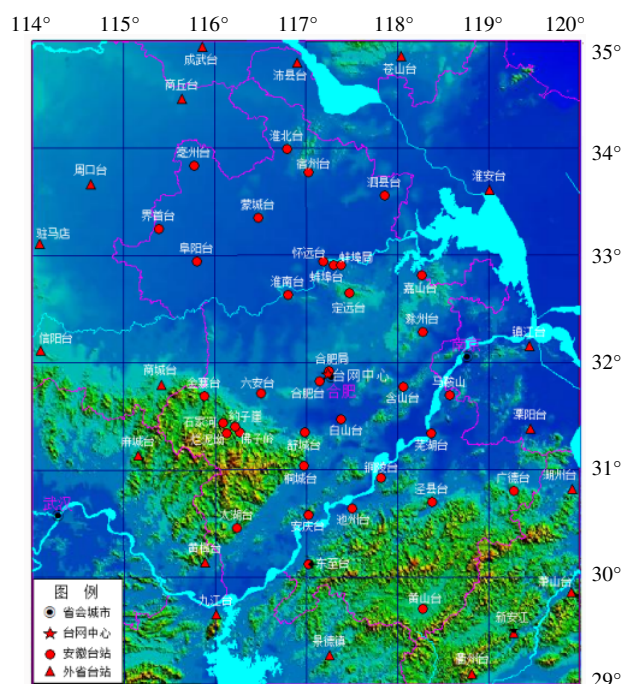


图1 安徽省测震台站分布图

Fig.1 The distribution map of seismic stations in Anhui province

对于安徽地区的地震定位,采用的是华南模型(表1),华南模型利用华南地区天然地震和人工爆破资料研究获得的两层平均速度模型^[6],对华南大部分地区得到比较好的地震测定效果,由于区域特殊性,安徽地区的其实际地壳速度模型显然

与华南模型存在一定差距。因此,2015年在中国地震局监测预报司的“全国区域一维速度模型研究”的项目中,建立了适用于安徽地区的地壳一维速度模型:AH2015模型^[7],AH2015模型参数见表2。

表1 华南模型参数表

Table 1 Parameter table of South China model

层号	层厚/km	P波速度/(km·s ⁻¹)	S波速度/(km·s ⁻¹)
1	21	6.01	3.55
2	12	6.88	3.93
3		7.98	4.58

表2 AH2015模型参数表

Table 2 Parameter table of the AH2015 model

层号	层厚/km	P波速度/(km·s ⁻¹)	S波速度/(km·s ⁻¹)
1	19	6.14	3.57
2	15	6.60	3.84
3		8.00	4.65

AH2015模型是在华南模型的基础上,对地壳各层速度和厚度进行微调,得到一系列新模型,再使用Hyposat定位法配置这些模型对地震进行批量定位,将定位残差和震中差最小的一组模型确定为适用于安徽区域地壳的一维速度模型即AH2015模型。虽然,AH2015模型对于Hyposat定位法有良好的适用性,而对于常用另外两种方法(单纯型、Locsat)的适用性如何,还需进一步验证。作者选取了2016年上半年发生于安徽区域及邻省的M1.0以上地震23个进行重定位,目的是了解三种不同定位法分别采用不同速度模型对相同地震的定位结果的不同。

1 三种地震定位方法简介

1.1 单纯型定位法

单纯型法是一种直接搜索法,属于非线性最优化理论中的全局搜索算法。单纯型法通过在模型空间中构造单纯形来逼近目标函数的极小点,每构造一个单纯形,计算各定点的目标函数,并确定其目标函数的最大和最小点,然后通过扩展、压缩、反射等算法来构造新的单纯形,以使目标函数的极小点能包含在单纯形内,当它们的均方根小于预设的精度值时则停止迭代。

单纯形法本身不能给出定位结果的水平误差和垂直误差估计。初始单纯形的选取对单纯形法

定位结果有一定影响。当对初始单纯形的顶点坐标引入小的随机变化量时,使用同样到时数据重复定位时,每次的结果稍有不同。此外该方法对网外地震定位误差偏大。

1.2 Hyposat 和 Locsat 定位法

Hyposat、Locsat 定位法是基于经典方法 Geiger 法的改进方法。其实质是将非线性方程线性化,并通过最小二乘原理求解。设 n 个台站的观测到

$$\varphi(t_0, x_0, y_0, z_0) = \sum_{i=1}^n r_i^2 \tag{1}$$

最小,其中 r_i 为到时残差

$$r_i = t_i - t_0 - T_i(x_0, y_0, z_0) \tag{2}$$

T_i 为震源到第 i 个台站的计算走时。

使目标函数取极小值也即

$$\nabla_{\theta} \varphi(\theta) = 0 \tag{3}$$

其中

$$\theta = (t_0, x_0, y_0, z_0)^T, \nabla_{\theta} = \left(\frac{\partial}{\partial t_0}, \frac{\partial}{\partial x_0}, \frac{\partial}{\partial y_0}, \frac{\partial}{\partial z_0} \right)^T$$

则由(3)式,在真解 θ 附近任意试探解 θ^* 及其校正矢量 $\delta\theta$ 满足

$$g(\theta^*) + [\nabla_{\theta} g(\theta^*)]^T \delta\theta = 0 \tag{5}$$

也即

$$[\nabla_{\theta} g(\theta^*)]^T \delta\theta = -g(\theta^*) \tag{6}$$

结合 φ 定义,可以知道,若 θ^* 偏离真解 θ 不大,则 $r_i(\theta^*)$ 和 $\left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial \theta \partial \theta_k}\right)_{\theta^*}$ 较小,可忽略二阶导数项,简化为线性最小二乘解的矩阵形式为:

$$A^T A \delta\theta = A^T r \tag{7}$$

其中

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\partial T_1}{\partial x_0} & \frac{\partial T_1}{\partial y_0} & \frac{\partial T_1}{\partial z_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{\partial T_n}{\partial x_0} & \frac{\partial T_n}{\partial y_0} & \frac{\partial T_n}{\partial z_0} \end{pmatrix}, \quad r = \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}$$

求解(7)式可得到一组 $\delta\theta$,令 $\theta = \theta^* + \delta\theta$ 作为下一次迭代的初值,直到满足一定的截至误差为止。

MSDP 系统中的 Hyposat、Locsat 定位法求解方法是奇异值分解最小二乘法。Hyposat 先将观测方程组降维,不化成正规方程组,直接用奇异值分解最小二乘法求解,实际计算中还采用多种数据加权,可以采用分区水平分层速度模型,为每个台站指定不同速度模型,初值采用近台初值。Locsat 则采用阻尼最小二乘法,将观测方程组化为正规方程组,然后用主元素消去法求解,没有加

权,采用水平分层速度模型,所有台站采用同一模型,初值采用计算初值。

2 地震资料处理

2.1 地震的选取

由安徽省数字地震台网自 2016 年 1 月至 2016 年 5 月产出的速报地震及 CC 地震目录。 M 1.0 级以上地震总数 23 个;其中 10 个台以上有记录地震 22 个。按震级大小划分, M 1.0~2.0 地震 17 个, M 2.0~2.9 地震 5 个, $M \geq 3$ 地震 1 个。震中分布图如图 2 所示。对这些地震按照震级的不同,分别对 Pg, Pn, Sg, Sn 进行震相数目统计,统计结果见表 3。

由图 2 看出,选择的 23 个地震震中分布均匀,基本覆盖了安徽大部分区域,覆盖面积占比约为 70%,达到了研究要求。由于皖南地区属于少震区域,所以该区域中没有地震参与研究。

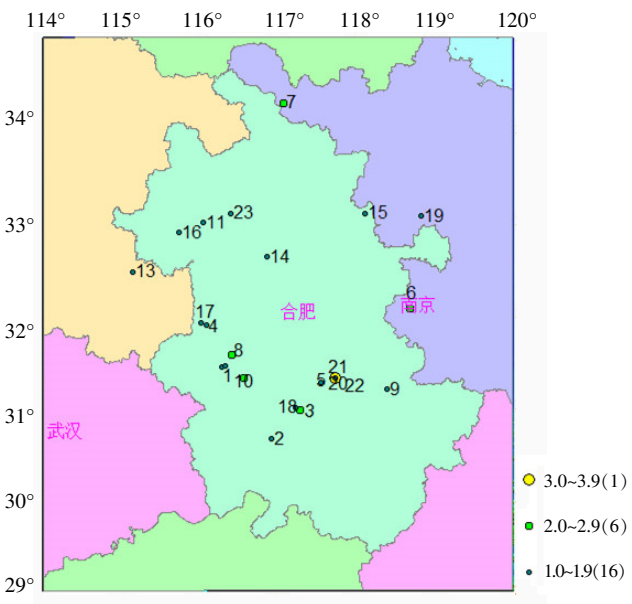


图 2 所选 23 个地震震中分布图

Fig.2 The epicenter distribution of the 23 earthquakes

表 3 按震级划分的地震震相统计

Table 3 The statistics of the earthquake phase according to the earthquake magnitude

震级/M	震相数/Pg	震相数/Pn	震相数/Sg	震相数/Sn
1.0~1.5	167	40	175	4
1.5~2.0	55	17	59	6
2.0~2.5	110	40	116	24
2.5~3.0	29	8	30	5
3.0 以上	33	12	35	9
总数	394	117	415	48

2.2 处理方法

本次研究主要目的是为了确定不同地震定位方法对地壳模型的依赖性以及使用相同模型时不同定位方法的定位效果。研究中使用了 MSDP5.2 中的三种定位方法进行研究。主要研究思路是控制变量法思想,即使用相同定位方法配置不同模型对同一批地震进行定位。对比定位结果的残差,震中差及深度,从而确定定位效果最优的模型及适合于安徽区域地震的定位方法。

3 定位结果分析

3.1 定位残差对比分析

分别在 MSDP5.2 中配置华南模型和 AH2015 模型,并分别使用这两种模型对所选的 23 个地震进行重新定位,统计其定位残差、震中差及定位深度。

首先统计了不同定位方法分别配置华南模型和 AH2015 模型的定位残差。由统计可知,使用单纯型定位法分别配置华南模型和 AH2015 模型的定

位残差主要分布在 0~0.8 s 之间,平均值分别是 0.434 s 和 0.374 s。使用 Hyposat 定位法分别配置华南模型和 AH2015 模型的定位残差主要分布在 0~1.0 s 之间,平均值分别是 0.382 s 和 0.375 s。使用 Locsat 定位法分别配置华南模型和 AH2015 模型的定位残差主要分布在 0~4.0 s 之间,平均值分别是 1.092 s 和 1.056 s。总体来说,三种定位法在配置 AH2015 模型时的定位残差比配置华南模型小,这说明 AH2015 模型更适合安徽区域的地震定位。

图 3 是残差分布图,由图可知,单纯型和 Hyposat 定位的残差值分布均匀而且集中,而 Locsat 法定位残差分布离散;单纯型法在配置 AH2015 模型时的残差始终小于配置华南模型时,但是 Hyposat 方法和 Locsat 方法定位结果中有个别地震(编号 6、7、19)在使用 AH2015 模型时残差反而大于华南模型,这是因为这些地震位于安徽省边缘或省外,台站包围性较差的原因所致。综合分析,三种定位方法中,单纯型法和 Hyposat 法定位质量比 Locsat 法高,且对地壳模型的依赖性稳定,但是对于台站包围不好的地震定位,单纯型法表现最好。

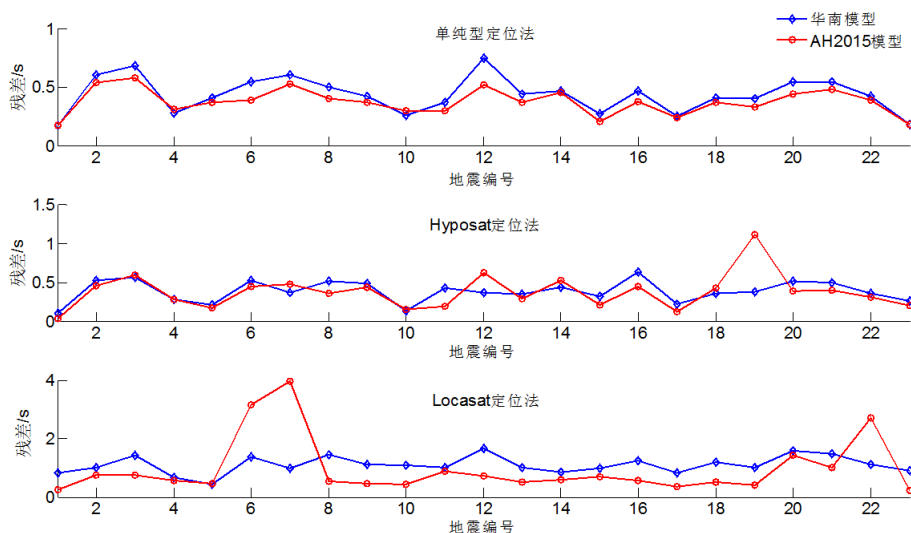


图 3 三种定位方法分别配置华南模型和 AH2015 模型定位残差分布图

Fig.3 The position residual distribution by using three methods for SouthChina model and AH2015 model

3.2 定位震中差对比分析

震中差(与编目结果震中位置偏差)可以间接衡量地壳模型的优劣,安徽编目采用的是 MSDP4.3 中的单纯型定位法并配置华南模型进行定位,在本次研究中同样使用 MSDP5.2 中的三种定位方法,分别配置华南模型和 AH2015 模型对 23 个地震进行重新定位,统计震中差。

据统计数据,使用单纯型定位法分别配置华南模型和 AH2015 模型的定位震中差主要分布在 0~4 km 之间,平均值分别为 2.961 km 和 2.312 km。使用 Hyposat 定位法分别配置华南模型和 AH2015 模型的定位震中差主要分布在 0~8 km,平均值分别为 5.774 km 和 3.765 km。使用 Locsat 定位法分别配置华南模型和 AH2015 模型的定位残差主要分布在 0~15 km,平均值分别为 5.630 km

和 5.183 km。这说明,对于三种定位方法,配置 AH2015 模型的定位震中差比配置华南模型小。从图 4 的定位震中差分布曲线可以看出,单纯型和 Hyposat 定位法不管是配置华南模型还是 AH2015 模型,其定位震中差分布都均匀且集中,而 Locsat

定位法不管配置什么模型,定位震中差都大于其他两种方法。且震中差分布跨度较大,部分已经超出 10 km。这说明 Locsat 对地壳模型的依赖性较差。对于台站包围不好的地震在使用 Locsat 定位法时定位效果较差。

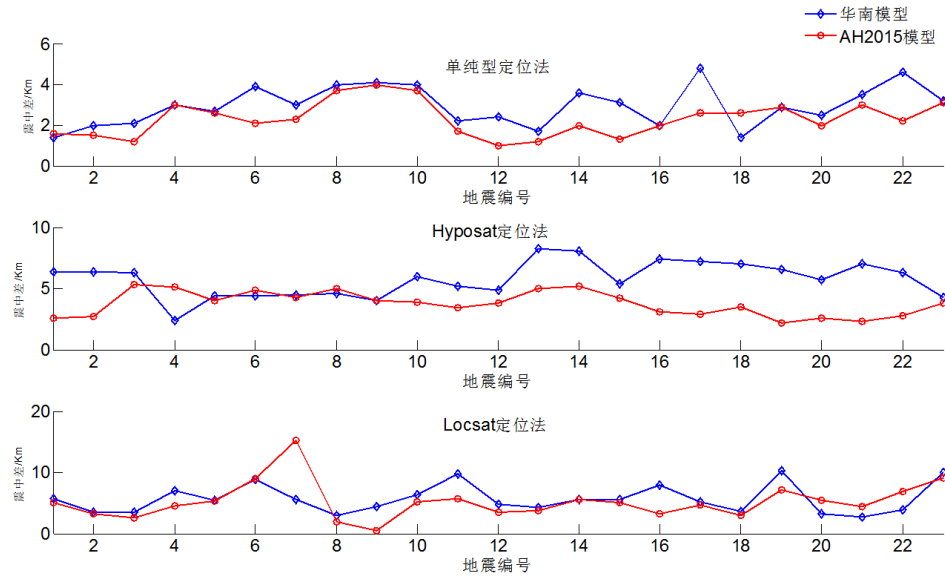


图 4 不同定位法配置华南模型和 AH2015 模型对 23 个地震定位震中差分布曲线
Fig.4 The epicenter error distribution of 23 earthquakes by using three methods for South China model and AH2015 model

3.3 定位深度对比分析

不同模型对震源深度的定位也有较大影响^[8],同前文方法一样,作者对三种定位方法分别配置华南模型和 AH2015 模型,对所研究的 23 个地震进行定位,并绘制 3D 深度图。

图 5 是三种定位方法配置华南模型时定位的 3D

深度图,本次研究所选的 23 个地震深度分布在 4~10 km,从图上可以看出,使用单纯型定位法定位深度最小,主要集中在 6~10 km 左右。使用 Hyposat 定位的深度主要集中在 11~15 km 左右,使用 Locsat 定位的深度最大,主要集中在 14~18 km 左右,最大值可达 20 km,与所选地震深度相差较大。

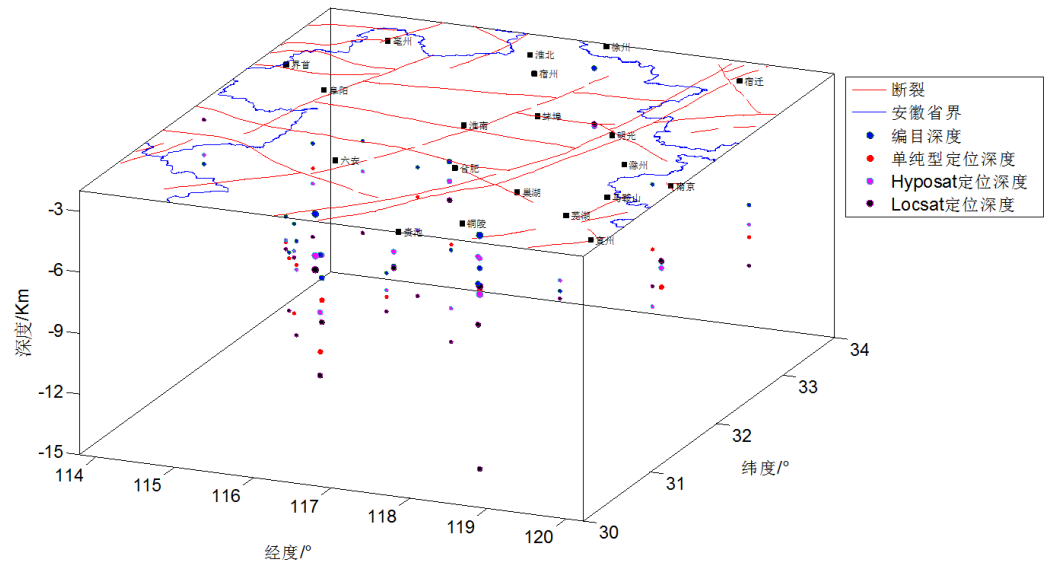


图 5 三种定位方法配置华南模型时定位 3D 深度图
Fig.5 The 3D depth map with three methods used in the South China model

图 6 是三种定位方法配置 AH2015 模型的定位 3D 深度图。与图 5 相比,配置 AH2015 模型的定位深度更加集中。其中单纯型定位法定位深度在 5~8 km 左右, Hyposat 定位法定位深度在 10~12 km, Locsat 定位法定位深度在 10~20 km。

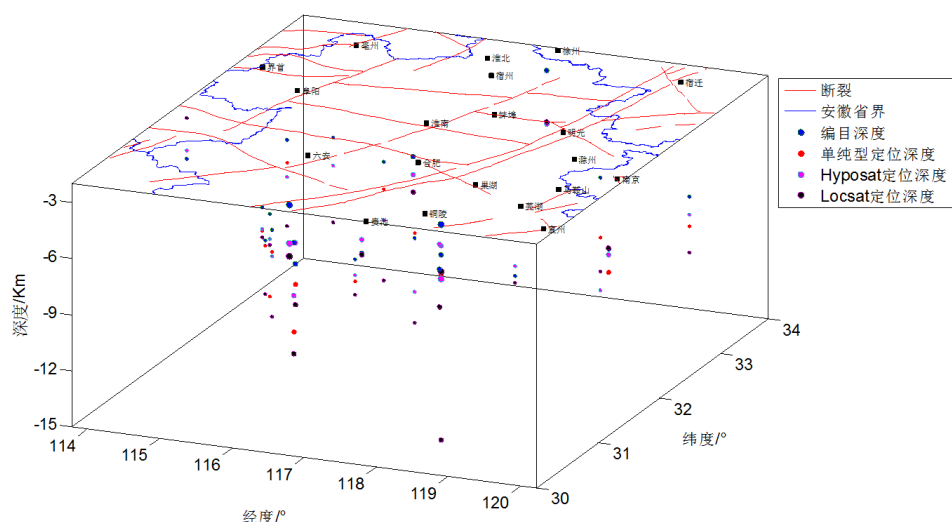


图 6 三种定位方法配置 AH2015 时定位 3D 深度图

Fig.6 The 3D depth map with three methods used for the AH2015 model

4 结语

本文通过使用 MSDP5.2 中的单纯型、Hyposat、Locsat 三种定位方法分别配置华南模型和 AH2015 模型对安徽台网 2016 年 01 月~06 月 23 所记录到的 23 个地震进行了重新定位,统计定位残差、震中差和深度,并分析对比。通过研究,得到如下结论:

(1) 2015 年所建立的新的地壳模型 AH2015 模型比华南模型更加吻合于安徽区域实际地壳结构。

(2) 通过单纯型、Hyposat、Locsat 三种定位方法分别对华南模型和 AH2015 模型进行对比定位,结果显示三种方法在配置 AH2015 模型时其定位残差和震中差均比华南模型小,定位深度更加吻合实际情况。

(3) 在配置相同模型时,单纯型和 Hyposat 定位法比 Locsat 定位法定位残差和震中差更小,定位深度也更可靠。单纯型和 Hyposat 定位法更适用于网内近震的定位。

(4) 对于台站包围不好的地震使用单纯型和 Hyposat 定位法要优于 Locsat 定位法。

综上所述,作者认为在安徽区域的地震定位中使用单纯型或 Hyposat 定位法配置 AH2015 模型可以取得良好的定位效果,建议在安徽区域的地震速报和编目中进行推广应用。

综合分析可知,单纯型法和 Hyposat 定位深度和地震实际深度比较吻合。Locsat 定位法所定的深度比地震实际深度要大。这表明,Locsat 定位法并不适用于安徽区域地震的定位。

参考文献:

- [1] 安徽省地质矿产局编. 安徽省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1987.
- [2] 陆镜元. 安徽南部构造格局的演化[J].地质学报,1984,04(02):128-134.
- [3] 王长荣. 地震与安徽地震的地质构造背景[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),1974(02):89-94.
- [4] 徐树桐,董树文,周海渊,等. 大别山东段(安徽)大别杂岩中的断层构造岩和推复构造[J].科学通报 1984,29(5):298-301.
- [5] 徐树桐,江来利,刘贻灿,等. 大别山区(安徽部分)的构造格局和演化过程[J]. 地质学报,1992,66(01):1-14.
- [6] 范玉兰,林纪曾,胡瑞贺,等. 华南地区近震走时表的研制 [J]. 华南地震,1990,10(2):1-16.
- [7] 谢石文,韩成成,郁建芳,等. 基于 Hyposat 定位法的安徽地区地壳一维速度模型研究 [J]. 地球物理学进展,2016,31(6):2 429-2 437.
- [8] 李军辉,刘东旺,洪德全,等. 安徽及邻区地震震源深度分布特征研究 [J]. 地震地磁观测与研究,2010,31(01):1-5.