

安徽霍山窗中小地震活动与精定位研究^①

黄显良^{1,2}, 郁建芳^{1,2}, 戚 浩^{1,2}, 张 炳^{1,2}, 夏仕安¹, 韩成成¹

(1. 安徽省地震局, 安徽 合肥 230031;

2. 蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 安徽 蒙城 233500)

摘要:采用双差地震定位方法对安徽省霍山地区 2009 年 1 月 1 日至 2014 年 6 月 13 日发生的 2 679 个 $M_L \geq 0.0$ 地震进行重新定位研究。对同一地震事件定位前后位置进行比较, 得到各个地震在 E-W、N-S 及 U-D 三个方向的偏差平均值分别为 0.05 km、0.06 km 及 0.07 km。重新定位后, 原震源位置的定位精度大大提高, 由定位误差所引起的原震源位置呈现的“网格状”假象分布现象得到明显改善, 震中在空间上分布更加紧凑, 从集性明显, 且呈现出 3 条 NE 向分布的地震密集带, 与落儿岭—土地岭断裂方向大致一致。同时震源深度的分布更加精确, 且在 4~9 km 处存在明显的优势分布现象, 占总数的 88% 以上。霍山地区浅源地震发育, 表明该地区地壳中上部地震波速度较高。

关键词:安徽霍山地区; 地震活动; 双差定位; 震源深度

中图分类号:P315.61

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2016)02-0236-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2016.02.0236

Precise Relocation of Small Medium Earthquakes in Anhui “Huoshan Seismic Window”

HUANG Xian-liang^{1,2}, YU Jian-fang^{1,2}, QI Hao^{1,2}, ZHANG Bing^{1,2}, XIA Shi-an¹, HAN Cheng-cheng¹

(1. Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 230031, Anhui, China;

2. Mengcheng National Geophysical Observatory, Mengcheng 233500, Anhui, China)

Abstract: The frequency and intensity of small medium earthquakes in the Luoerling—Zhufoan area, west of Huoshan county, are particularly prominent in Anhui province and its neighboring areas. The earthquakes in this area are characterized as moderately strong and concentrating into a band, with small ones clustering at shallow focal depth and forming a swarm. Based on the above, it is of critical and urgent importance to strengthen earthquake monitoring and improve location accuracy in the region. The double-difference (DD) location algorithm, as a relative positioning method, has unique advantages in improving the accuracy of earthquake location. From January 1, 2009 to June 13, 2014, 2 679 earthquakes of $M_L \geq 0.0$ occurred in the Huoshan area, Anhui province, and we relocated them in this study using the DD method. The average relative errors in the focal depths were 0.05, 0.06, and 0.07 km in the E-W, N-S, and U-D directions, respectively, as compared with the original values after relocation. The positioning accuracy of the original source location was greatly increased and the “grid” illusion distribution phenomenon of the original

① 收稿日期: 2015-11-09

基金项目: 地震科技星火计划“电离层观测系统的研制及其在地震预测中的应用研究”(XH15021); 测震台网青年骨干培养专项(20140311); 测震台网青年骨干培养专项(20140311/20160513); 安徽省地震局科研基金青年项目(20150412)

作者简介: 黄显良(1972—), 男, 安徽东至人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震活动性研究、数字地震学研究、地震监测管理等工作。

E-mail: hxl818@sina.com.

source location, caused by positioning errors, was significantly improved after relocation. The spatial distribution of the epicenters is more compact and concentrated than previously determined. The relocation results show that there are three dense seismic zones distributed along the NE direction, consistent with the direction of the Luoerling—Tudiling fault. The distribution of the focal depths is more precise and there is a predominant depth range from 4 to 9 km that accounts for over 88% of the total. More shallow earthquakes in the Huoshan area indicate that the upper crust may be in a period of higher seismic wave velocity.

Key words: Huoshan area in Anhui province; earthquake activity; double-difference algorithm; focal depth

0 引言

地震定位是地震学最基本的问题之一,地震活动性、地震与活动构造的关系等诸多研究都以地震定位的结果为基础和依据,为此地震学家们一直致力于改进和提出新的地震定位方法,以提高定位精度^[1-4]。

在台站布局合理的前提下,震源参数测定的误差主要来源于两方面:一是初至震相到时拾取引起的误差;二是定位过程中选取的速度结构模型引起的误差。通常后者是造成定位精度不高的重要原因。近年来,旨在弥补速度模型简化所引起误差的相对地震定位方法发展迅速,其利用多个地震事件联合定出多个震源参数,提高相对位置精度,而且大量事件的同时定位也使得定位效率有所提高^[5]。

双差地震定位方法^[6](Double-Difference Algorithm,简称 DD)是目前应用较多的一种相对定位方法。该方法反演的是一组丛集地震中每个地震相对于该丛集矩心的相对位置,不依赖主事件位置,不仅能有效减小地壳结构所引起的误差,而且同样适用于空间跨度较大的丛集地震。因其独到的优点,双差定位方法自被提出后在国内外得到广泛应用,并取得了较好效果^[7-11]。

1 双差定位方法

双差地震定位的基本思想是:如果两个地震震源之间的距离小于事件到台站的距离和速度不均匀的尺度,那么震源区和这个台站之间的整个射线路径几乎相同。这时在某个台站观测到的两个事件的走时差来自于事件之间的空间偏移。

双差定位中,使用两个地震走时差的观测值与理论值的残差(“双差”)确定其相对位置:

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j = dr_k^{ij} \quad (1)$$

式中: $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)^T$ 是第 i 个地震的震源参数改变量; dr_k^{ij} 为“双差”:

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{\text{obs}} - (t_k^i - t_k^j)^{\text{cal}} \quad (2)$$

即第 i 个地震至第 k 个地震台的地震波走时 t_k^i 与第 j 个地震至第 k 个地震台的地震波走时 t_k^j 之差的观测值 $(t_k^i - t_k^j)^{\text{obs}}$ 和理论计算值 $(t_k^i - t_k^j)^{\text{cal}}$ 的残差。

将所有地震 ($i, j = 1, 2, \dots, N$), 所有台站 ($k = 1, 2, \dots$) 表示的式(1)改为矩阵形式:

$$W\mathbf{G}\mathbf{m} = \mathbf{W}\mathbf{d} \quad (2)$$

其中: \mathbf{G} 是一个 $M \times 4N$ 的偏微商矩阵, M 是双差观测的数目, N 是地震数; \mathbf{d} 是双差资料矢量; \mathbf{m} 是有待定的震源参数改变量 $(\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)^T$, ($i = 1, 2, \dots, N$) 构成的维数为 $4N$ 的矢量; \mathbf{W} 是对每个方程加权的对角线矩阵。

反演中引进一个表示所有地震经重新定位后其平均“位移”为零(也即其“矩心”不动)的约束条件:

$$\sum_{i=1}^N \Delta m^i = 0 \quad (4)$$

以阻尼最小二乘法求解式(3),问题归结为:

$$\mathbf{W} \begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \lambda \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{m} = \mathbf{W} \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: λ 为阻尼因子; \mathbf{I} 为单位矩阵。

2 霍山地区历史地震重定位

自 20 世纪 70 年代安徽地震监测台网建成以后,监测到霍山县以西的落儿岭—诸佛庵一带频频发生中小地震,活动的频次和强度在安徽省及其邻区显得尤为突出。该地区具有中强地震集中成带、小震密集、震源深度浅、多以震群方式活动等特征,一直以来都是安徽省重点监测和关注的地区,在该地区加密了地震网点的布设,如图 1 所示。

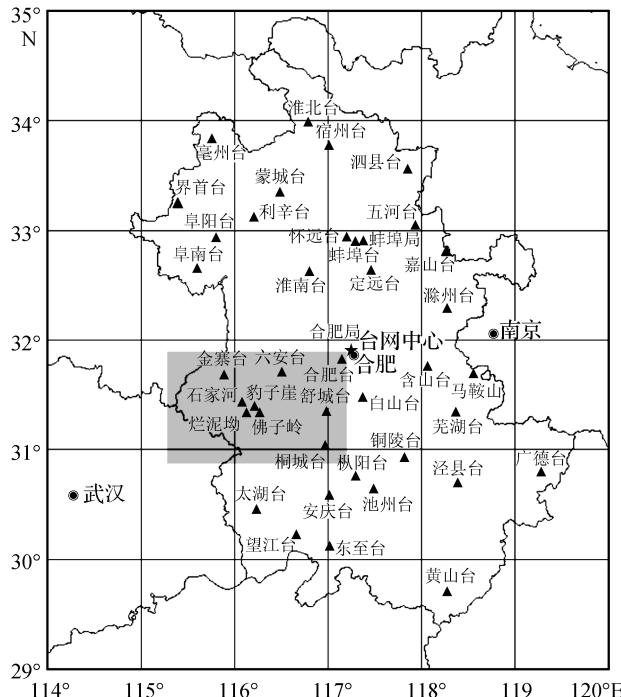


图 1 安徽霍山地理位置及台站分布

Fig.1 Geographical location of Huoshan area in Anhui province and stations distribution

近代又以区内的小震活动而形成著名的震情应力窗口，“霍山窗”内的小震活动水平是研究安徽省乃至华东地区地震活动的重要指标。霍山地区断裂构造复杂^[12]，展布有 NW 向的磨子潭—晓天断裂、梅山—龙河口断裂和 NE 向的落儿岭—土地岭断裂（图 2）。其中 NE 向的落儿岭—土地岭断裂沿线在历史上曾发生过一系列中强地震，如 1917 年 1 月 24 日霍山 6 1/4 地震（31.3°N, 116.2°E）发生在该断裂与磨子潭—晓天断裂的交汇部位，这也是安徽省有史料记录以来震级最大的两次地震之一。

2.1 资料选取

所选研究区域范围为 31.0°~32.0°N, 116.0°~117.0°E，收集整理了 2009 年 1 月 1 日至 2014 年 6 月 13 日期间安徽地震台网记录到的霍山地震资料，剔除震相不清楚或数据有差错的，仅挑出不少于 3 个台站记录到的 $M_L \geq 0.0$ 地震共计 2 679 个，其中 4.0~5.0 级地震 1 次，3.0~3.9 级地震 2 次，2.0~2.9 级地震 55 次，1.0~1.9 级地震 459 次，0~0.9 级地震 2 162 次。共整理出 21 450 条震相数据，包括直达波 Pg、Sg，首波 Pn、Sn，反射波 PmP、SmS 到时。使用安徽台网的数字记录波形资料进行重定位，数字记录每秒 100 个采样点。

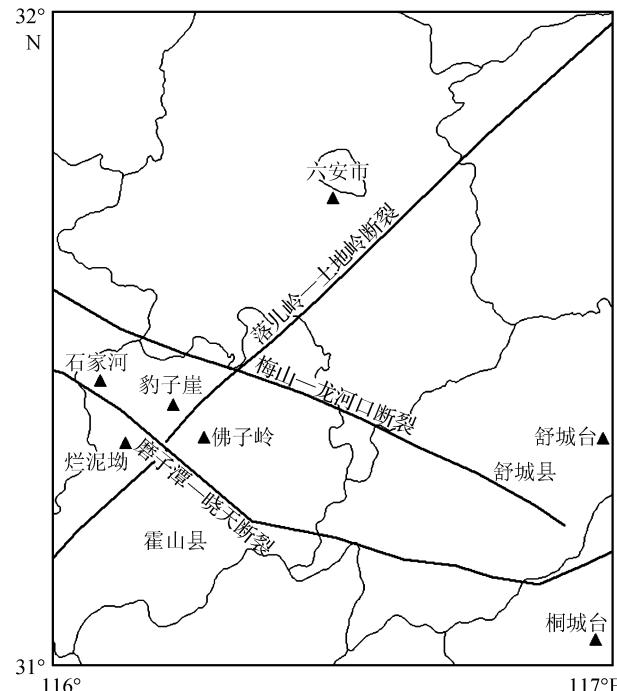


图 2 安徽霍山地区主要断裂展布图

Fig.2 Main faults distribution in Huoshan area, Anhui province

2.2 地壳速度结构模型

安徽霍山地区因其复杂的地质构造和频繁的地壳活动，一直以来都是地震学家研究的重点区域之一^[13~16]。该区域的人工地震研究也较丰富，黄耘等^[17]运用多震相地震走时成像法获得了该地区的三维地震速度结构成像结果；王椿镛等^[18~19]在大别山区域沿测线布设了 8 个炮点，给出了相对精细的速度结构图（图 3）。本文在充分吸收前人研究成果的基础上，结合接收函数 H-K 扫描结果，给出了研究区域的一维速度结构模型，将地壳分为 6 层，波速比取 1.73，每层厚度和速度值如表 1 所列。

2.3 双差定位过程和结果

对研究区域 2 679 个地震进行双差重定位，选取震相观测记录数 ≥ 7 、震源间距 < 10 km、震源距台站 300 km 范围内的地震事件进行组对，经筛选后有 2 148 个地震事件组成震群参与了定位。利用共轭梯度法反复迭代后得到 2 069 次地震的高精度震源位置，约占总数的 77.2%。造成地震部分缺失的原因是重定位组对过程中某些地震因不满足条件而被剔除。

重定位前后震中分布对比如图 4 所示：定位前后地震震中分布的整体位置没有太大改变，基本都位于 NE 向落儿岭—土地岭断裂西侧与 NW 向磨

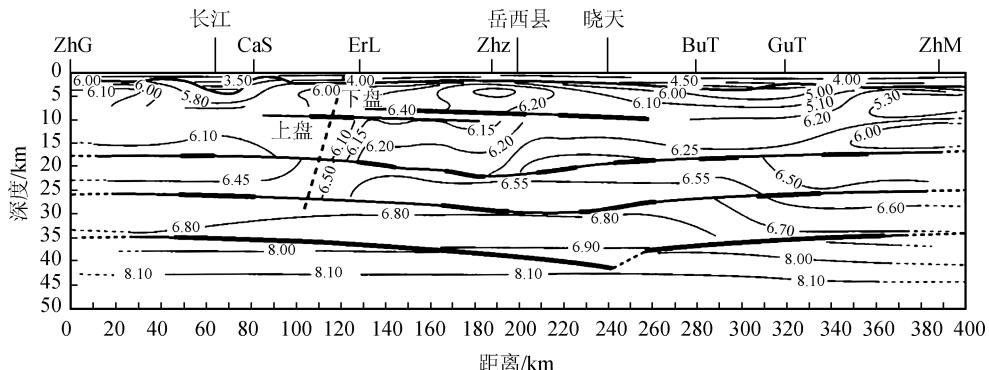
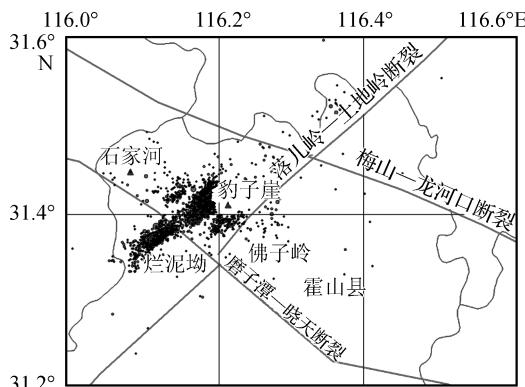
图3 大别山地区地壳二维速度模型^[19]Fig.3 2-D crustal velocity model of the Dabie Shan^[19]

表1 研究区域一维速度结构模型

Table 1 One dimension velocity model of research area

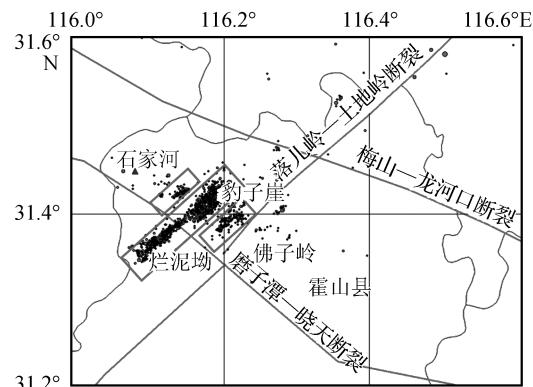
深度/km	层厚/km	纵波速度值/(km·s ⁻¹)
0	0	4.10
3	3	6.10
10	7	6.20
20	10	6.55
30	10	6.85
40	10	8.10



(a) 重新定位前震中分布图

子潭—晓天断裂的交汇处。定位前震中分布较零散[图4(a)],出现由定位误差造成的假象径向排列;重定位后,震中分布形态更清晰、更密集,条带状分布明显,主要可划分为3个呈NE向分布的地震密集带[图4(b)中方框],与落儿岭—土地岭断裂方向大致吻合。

对同一地震事件定位前后位置进行比较,可得



(b) 重新定位后震中分布图

图4 安徽霍山地区2009—2014年地震经双差定位法重新定位前、后震中分布图

Fig.4 Map view of epicenter distribution before and after the DD relocation from 2009 to 2014 in Huoshan area, Anhui province

到各个地震在E-W、N-S和U-D三个方向的偏差(图5),其平均值分别为0.05 km、0.06 km及0.07 km。误差分析表明:霍山地震经双差重定位后水平和垂直向的定位精度较高,其误差较小。对比三个方向的定位误差,垂直向的偏差最大,这也表明了震源深度的确定在地震定位过程中比较困难。

重定位前后地震震源深度的分布情况如图6所示。重定位前有近2%的地震未给出震源深度,重新定位后只有2次地震未给出震源深度;双差定位后,震源深度的分布更加精确,主要分布在4~10 km,占总数的95%,表明霍山地区中小地震在地

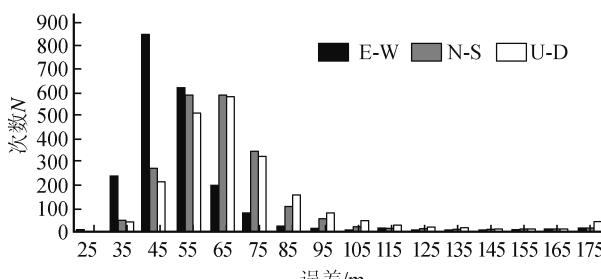


图5 震源位置经双差定位法重新定位后的相对误差统计图

Fig.5 Statistics histogram of the relative errors of hypocentral location after the DD relocation

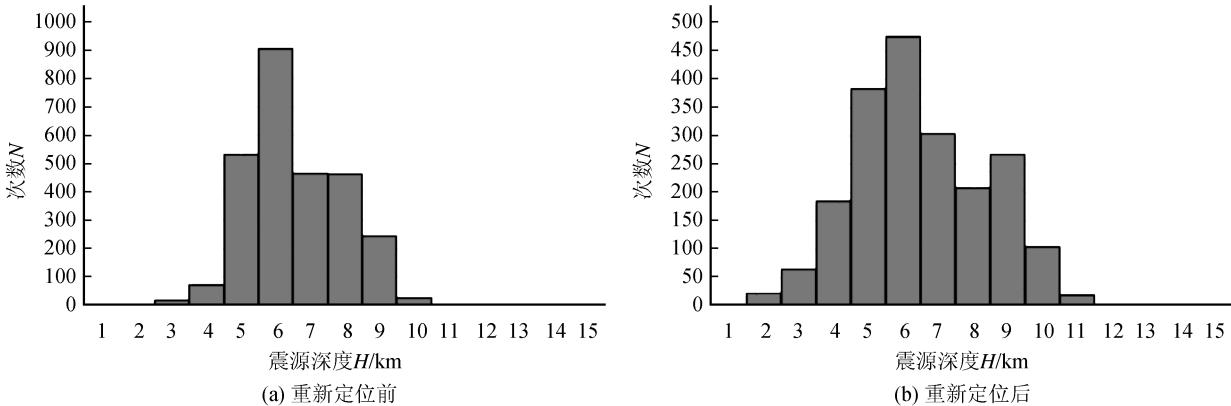


图 6 双差定位法重新定位前、后震源深度分布统计

Fig.6 Statistics distribution of focal depth before and after the DD relocation

壳中上部的一定深度范围内呈优势分布现象。

重定位前后震源深度沿经纬度方向的分布如图 7 所示。重定位前,由于给出的震源位置参数精度

较低,所以图 7(a)中呈现出“网格状”的假象分布;重定位后,这种由定位误差引起的假象径直分布得到明显改善,震中分布更加紧凑,从集性明显。

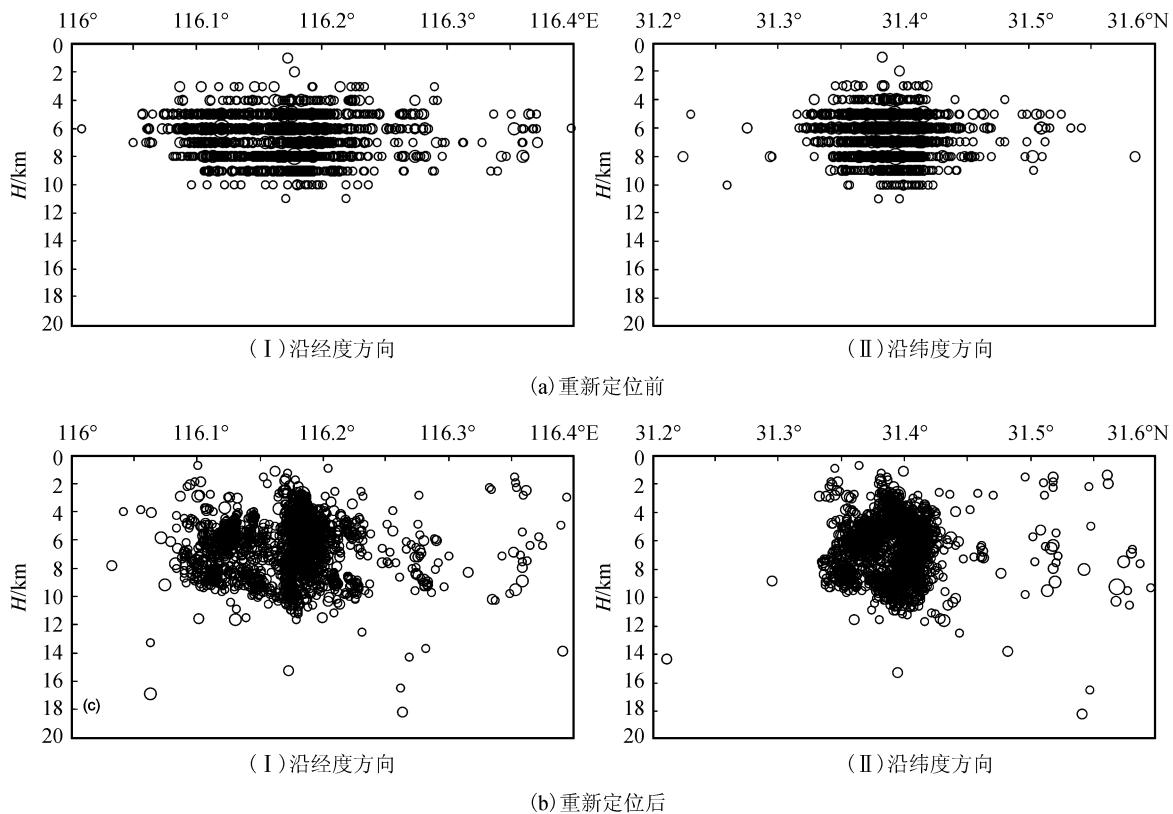


图 7 双差定位法重新定位前后震源深度沿经度、纬度方向的分布

Fig.7 Cross-sectional views of seismicity along longitude and latitude before and after the DD relocation

3 结论和讨论

采用双差地震定位方法对安徽霍山地区 2009 年 1 月 1 日—2014 年 6 月 13 日期间发生的 2 679 个 $M_L \geq 0$ 地震进行重新定位研究,给出了 2 069 次

地震较高精度的重新定位结果。

双差重定位结果表明,重定位后震源位置精度较高,由定位误差所引起的原震源位置呈现的“网格状”假象分布现象得到明显改善。位于霍山地区佛子岭—诸佛庵一带的小震震群,经重定位后由一个

地震从集呈现出3条NE向分布的地震密集带,与落儿岭—土地岭断裂方向大致一致。经计算得到重定位后E-W、N-S及U-D三方向的相对误差平均值分别为0.05、0.06和0.07 km,精度较高,且对比得到垂直方向误差最大,说明在地震定位中震源深度的确定较困难。

震源深度的分布在重定位后更加精确,在4~9 km处存在明显的优势分布现象,占总数的88%以上。浅源地震十分发育,表明该地区地壳中上部地震波速度较高。近年来许多地震学家对大别山地区进行了人工地震和构造结构的研究^[17-20],根据这些研究结果可见,位于大别山的霍山地区浅源地震发育是合理可信的。

同时,双差方法不能对孤立地震定位,需要满足一定条件组成地震对,且定位过程中反演大型矩阵会出现解的稳定性问题,都使得参与重新定位的地震数目在一定程度上减少。因此,利用其他定位方法或结合波形互相关技术联合反演进行对比研究是下一步研究方向。

致谢:感谢中国地震局地球物理研究所房立华老师在本研究过程中的指导和软件支持。

参考文献(References)

- [1] 朱元清,赵仲和.提高地震定位精度新方法的研究[J].地震地磁观测与研究,1997,18(5):59-67.
ZHU Yuan-qing, ZHAO Zhong-he. Research on the New Method to Raise Earthquake Location Accuracy [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 1997, 18(5): 59-67. (in Chinese)
- [2] 何斌,王恒知,张元生.基于视出射角与到时参数联合定位方法对高邮、宝应交界M4.9地震序列的定位研究[J].地震工程学报,2014,36(4):1081-1086.
HE Bin, WANG Heng-zhi, ZHANG Yuan-sheng. Location of the Gaoyou—Baoying M4.9 Earthquake Using Apparent Emergence Angle and Seismic Arrival Times [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 1081-1086. (in Chinese)
- [3] 李亚荣,荣代璐,范兵,等.玉门5.9级地震序列定位研究[J].西北地震学报,2005,27(增刊1):83-88.
LI Ya-rong, RONG Dai-lu, FAN Bing, et al. Study on the Locating of Seismic Sequence of Yumen Earthquake M5.9 [J]. Northwestern Seismological Journal, 2005, 27(Supp 1): 83-88. (in Chinese)
- [4] 裴慧娟,韩晓明,张帆,等.内蒙古通辽5.3级地震序列特征及发震背景分析[J].地震工程学报,2015,37(1):242-247.
PEI Hui-juan, HAN Xiao-ming, ZHANG Fan, et al. Analysis of Sequence Characteristics and Occurrence Background of the Tongliao M5.3 Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 242-247. (in Chinese)
- [5] 张天中,巴特尔,黄媛,等.近台资料对近震相对定位算法的影响[J].地球物理学报,2007,50(4):1126-1130.
ZHANG Tian-zhong, WU Bater, HUANG Yuan, et al. Effect of the Data Recorded at Nearby Stations on Earthquake Relative Location [J]. Chinese J Geophys, 2007, 50(4): 1126-1130. (in Chinese)
- [6] Waldhauser F, Ellsworth W L. A Double-difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California [J]. Bull Seism Soc Amer, 2000, 90(6):1353-1368.
- [7] 冯红武,张元生,刘旭宙,等.2013年甘肃岷县漳县Ms6.6地震及其余震序列重定位[J].地震工程学报,2013,35(3):443-447.
FENG Hong-wu, ZHANG Yuan-sheng, LIU Xu-zhou, et al. Relocation of Mainshock and Aftershocks of the 2013 Min xian—Zhangxian Ms6.6 Earthquake in Gansu [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 443-447. (in Chinese)
- [8] 朱艾斓,徐锡伟,周永胜,等.川西地区小震重新定位及其活动构造意义[J].地球物理学报,2005,48(3):629-636.
ZHU Ai-lan, XU Xi-wei, ZHOU Yong-sheng, et al. Relocation of Small Earthquakes in Western Sichuan, China and Its Implications for Active Tectonics [J]. Chinese J Geophys, 2005, 48(3): 629-636. (in Chinese)
- [9] Hauksson E, Shearer P. Southern California Hypocenter Relocation with Waveform Cross-correlation, Part 1: Results Using the Double-difference Method [J]. Bull Seism Soc Amer, 2005, 95(3):896-903.
- [10] 黄耘,李清河,张元生,等.江苏及邻区地震重新定位和构造特征分析[J].地球物理学报,2008,51(1):175-185.
HUANG Yun, LI Qing-he, ZHANG Yuan-sheng, et al. Relocation of Earthquakes in Jiangsu and Neighboring Areas, China and Analysis of Structural Features [J]. Chinese J Geophys, 2008, 51(1): 175-185. (in Chinese)
- [11] 蔡妍,吴建平,房立华,等.鄂尔多斯东缘地震重定位及拉张盆地过渡区的地震分布特征[J].地球物理学报,2014,57(4):1079-1090.
CAI Yan, WU Jian-ping, FANG Li-hua, et al. Relocation of the Earthquakes in the Eastern Margin of Ordos Block and Their Tectonic Implication in the Transition Zones of Extensional Basin [J]. Chinese J Geophys, 2014, 57(4): 1079-1090. (in Chinese)
- [12] 姚大全,张杰,沈小七.安徽霍山地区断层活动习性研究的新进展[J].地球物理学进展,2006,21(3):776-782.
YAO Da-quan, ZHANG Jie, SHEN Xiao-qii. New Advance of Fault Active Behavior Research in Huoshan Area, Anhui Province [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3): 776-782. (in Chinese)
- [13] 马秀芳.用相对定位法测定1973年安徽霍山震群的震源位置[J].地震研究,1982,5(1):99-113.
MA Xiu-fang. Locating the Epicenters of the 1973 Huoshan Swarm, Anhui Province, by the Relative Locating Method [J]. Journal of Seismological Research, 1982, 5 (1): 99-113. (in Chinese)

(下转248页)

- [12] 周永胜,何昌荣.汶川地震区的流变结构与发震高角度逆断层滑动的力学条件[J].地球物理学报,2009,52(2):474-484.
ZHOU Yong-sheng, HE Chang-rong. The Rheological Structures of Crust and Mechanics of High-angle Reverse Fault Slip for Wenchuan M_S 8.0 Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(2): 474-484. (in Chinese)
- [13] 柳畅,朱伯靖,石耀霖.粘弹性数值模拟龙门山断裂带应力积累及大震复发周期[J].地质学报,2012,86(1):157-169.
LIU Chang, ZHU Bai-jing, SHI Yao-lin. Stress Accumulation of the Longmenshan Fault and Recurrence Interval of Wen-

chuan Earthquake Based on Viscoelasticity Simulation[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(1): 157-169. (in Chinese)

- [14] 赵翠萍,顾瑾平,白彤霞.新疆伽师强震群震源应力环境分析[J].中国地震,2001,17(3):289-298.
ZHAO Cui-ping, GU Jin-ping, BAI Tong-xia. The Analysis of Focal Stress Environment of Jiashi Strong Earthquake Swarms in Xinjiang[J]. Earthquake Research in China, 2001, 17(3): 289-298. (in Chinese)
- [15] 陈Y,李L,王J,等.汶川地震:思维方式改变[J].Episodes,2008,31:374-377.

(上接 241 页)

- [14] 邵磊,王健,林国庆.特定震源台站校正定位方法及在安徽霍山地区的应用[J].地球物理学报,2010,53(6):1440-1450.
SHAO Lei, WANG Jian, LIN Guo-qing. Earthquake Relocations in Huoshan Area, Anhui Province, by Applying the Source-specific Station Term Method[J]. Chinese J Geophys, 2010, 53(6): 1440-1450. (in Chinese)
- [15] 吴萍萍,王椿镛,丁志峰,等.大别—苏鲁及邻区上地幔的各向异性[J].地球物理学报,2012,55(8):2539-2550.
WU Ping-ping, WANG Chun-yong, DING Zhi-feng, et al. Seismic Anisotropy of Upper Mantle beneath the Dabie—Sulu and Its Adjacent Areas[J]. Chinese J Geophys, 2012, 55(8): 2539-2550. (in Chinese)
- [16] 洪德全,王行舟,程鑫,等.安徽霍山窗重复地震尾波 Q_C 值变化研究[J].地球物理学报,2013,56(10):3416-3424.
HONG De-quan, WANG Xing-zhou, CHENG Xin, et al. Study on Variation of Seismic Coda Q_C Value of Repeating Earthquake Series in Anhui “Huoshan Seismic Window”[J]. Chinese J Geophys, 2013, 56(10): 3416-3424. (in Chinese)
- [17] 黄耘,李清河,张元生,等.郯庐断裂带鲁苏皖段及邻区地壳速度结构[J].地球物理学报,2011,54(10):2549-2559.

HUANG Yun, LI Qing-he, ZHANG Yuan-sheng, et al. Crustal Velocity Structure beneath the Shandong—Jiangsu—Anhui Segment of the Tancheng—Lujiang Fault Zone and Adjacent Areas[J]. Chinese J Geophys, 2011, 54(10): 2549-2559. (in Chinese)

- [18] 王椿镛,张先康,丁志峰,等.大别山造山带北部地壳结构的有限差分层析成像[J].地球物理学报,1997,40(4):495-502.
WANG Chun-yong, ZHANG Xian-kang, DING Zhi-feng, et al. Finite-difference Tomography of Upper Crustal Structure in Dabie Shan Orogenic Belt[J]. Chinese J Geophys, 1997, 40(4): 495-502. (in Chinese)
- [19] WANG C Y, ZENG R S. A Crustal Model of the Ultrahigh-pressure Dabieshan Orogenic Belt, China, Derived from Deep Seismic Refraction Profiling[J]. J Geophys Res, 2000, 105(B5): 10857-10869.
- [20] 董树文,吴宜治,高锐,等.大别造山带地壳速度结构与动力学[J].地球物理学报,1998,41(3):349-361.
DONG Shu-wen, WU Yi-zhi, GAO Rui, et al. On the Crust Velocity Levels and Dynamics of the Dabieshan Orogenic Belt [J]. Chinese J Geophys, 1998, 41(3): 349-361. (in Chinese)