

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^①

何 斌¹, 王恒知¹, 张元生²

(1.江苏省地震局,江苏,南京 210014; 2.甘肃省地震局,甘肃 兰州 730000)

摘要:利用 P 波视出射角与到时参数对 2012 年 7 月 20 日江苏高邮、宝应交界 M4.9 地震序列进行了联合定位。建立了与视出射角联合定位方法的目标函数,并使用蒙特卡洛法进行反演计算。结果表明地震序列沿杨汉苍—桑树头断裂带呈 NNE 向密集型分布;深度分布显示断层以走滑为主,带有少量正断,高倾角特征;结合速度结构,地震序列集中发生在速度高值区和低值区的交界部位,即脆—韧性转换带,并且震源深度的下界面止于 20 km。根据速度结构性质认为下部地壳的高速结构为其提供了上部地壳横向运动的松弛边界条件。

关键词:高邮、宝应交界 4.9 级地震;视出射角;地震波到时;联合定位

中图分类号: P315.63

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-1081-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.1081

Location of the Gaoyou—Baoying M4.9 Earthquake Using Apparent Emergence Angle and Seismic Arrival Times

HE Bin¹, WANG Heng-zhi¹, ZHANG Yuan-sheng²

(1.Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210014, China;

2.Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: An M4.9 earthquake occurred in Gaoyou-Baoying, Jiangsu on July 20, 2012. Numerous aftershocks followed the main shock. According to the China Earthquake Networks Center, there were 84 aftershocks with a magnitude of 1.0 and above until July 30, 2012; there were 59 aftershocks with a magnitude of 1.0~1.9, 20 with a magnitude of 2.0~2.9, 4 with a magnitude of 3.0~3.9, and one with a magnitude of 4.0~4.9.

In this study, 84 aftershocks from July 20 to July 30, 2012 were precisely located using the Multiparameter Seismic Location method. The apparent emergence angles and arrival times were extracted according to the wave data with SEED format. The objective function in the Multiparameter Seismic Location method using apparent emergence angles and arrival time was determined. The Monte Carlo method was used to realize its optimization. The apparent emergence angle has a very strong sensitivity to depth. The results of the Multiparameter Seismic Location method are accurate with respect to latitude and longitude, and in particular, enhance the depth resolution effectively.

This study used the Multiparameter Seismic Location method to determine the location of the aftershocks of the M4.9 earthquake at the border area between Gaoyou and Baoying. The apparent emergence angles and arrival times were extracted according to the wave data. The results

① 收稿日期: 2014-03-13

作者简介: 何斌(1985—),男,工程师,主要从事地震学及相关数字信息处理。

of the Multiparameter Seismic Location method show that the earthquake sequence was densely distributed along the Yangchacang-Sangshutou fault zone, in a spatial belt with a NNE direction.

The average depth of the earthquake sequence is 12.21 km, distributed in a range of 5~20 km (up crust), but the dominant distribution is at 12~15 km. The depth of the $M_{4.9}$ earthquake was at 9.3 km. The depth distribution is more at the strike-slip region, where there is a small amount of thrust coming from the detachment plane (belt) at a depth of 12~15 km. The aftershocks are densely distributed at the fault ramp, which is the region of stress accumulation; the main shock occurred at this location.

The high speed structure of the lower crust provides a relaxed boundary condition for transversal motion. The depth is concentrated at the brittle-ductile transition zone, which is the speed boundary between the high-and low-values, at a depth of approximately 20 km. The different thickness of the lower crust caused the great changes in the earth's crust. Subei thickness thinning may have contributed to the deep dynamic environment. The results of the Multiparameter Seismic Location method show that the earthquake sequence is densely distributed along the Yangchacang-Sangshutou fault zone.

Key words: Gaoyou—Baoying $M_{4.9}$ earthquake; apparent emergence angle; seismic arrival time; multiparameter seismic location

0 前言

2012年7月20日20时11分51秒,江苏省高邮、宝应交界(N 33.0°, E 119.5°)发生 $M_{4.9}$ 地震。这是江苏省陆地上继1990年常熟、太仓4.9级地震(中国地震局震害防御司,1999;江苏省地震局一般采用5.1级)后时隔22年的又一次破坏性地震,地震类型为主震—余震型,余震非常发育,持续时间长。

地震发生后,对地震的地表破裂构造、发震机理和震源机制等做了不同程度的研究和解释^[1-3],但受限于震源深度的准确性,对地震的空间分布和深部断层的空间展布一直没有较为清晰的认识。

地震精确定位结果可提供更加精细的地震震源分布图像。在许多地震带,地震震中具有更加明确的条带状分布的图像,这种条带状分布与活动构造性质密切相关,所以地震精定位对研究深部构造有着重要的作用。地震定位是根据台站对地震的观测资料确定震源的空间坐标和发震时刻,属于典型的地球物理反演问题^[4-7]。在反演问题中,不充分的观测数据及观测数据存在的误差会导致反演结果的非唯一性,因此只能按照给定的求解标准在解空间中选取最优解作为待求参数的近似值。

增加独立的参数信息可减少反演问题的多解性^[8],提高定位的精度。所以本文增加了P波的视出射角参数,对宝应余震序列进行地震定位,提高对震源深度的分辨,并对宝应地震序列的空间分布和

该区域的发震构造机理进行分析和研究。

1 到时与视出射角联合定位方法

1.1 视出射角参数

真出射角是地震波入射射线与地面的夹角,常用 e 表示。视出射角是地面位移向量与地面的夹角,常用 \bar{e} 表示^[9]。视出射角与真出射角的示意图见图1。

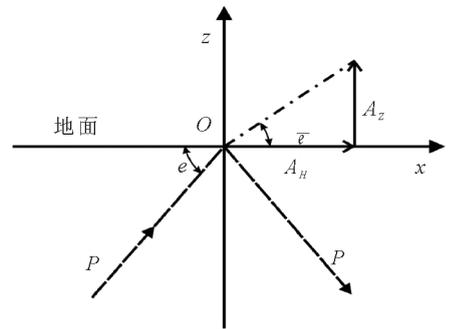


图1 视出射角与真出射角示意图

Fig.1 Diagram of emergence angle and real angle

由于地震波在地面上形成了反射波,所以视出射角不等于入射波的真出射角。根据记录到的地面位移垂直分量和水平分量的比值可确定视出射角,其计算公式为

$$\tan \bar{e} = \frac{A_z}{\sqrt{A_{NS}^2 + A_{EW}^2}} \quad (1)$$

式中, A_z 为地动位移的垂直分量; A_{NS} 为 NS 分量; A_{EW} 为 EW 分量。将地球表面视为自由表面,研究

入射到自由表面上的反射问题,得视出射角与真出射角的关系式:

$$\cos e = \frac{V_P}{V_S} \cdot \cos\left(\frac{90^\circ + e}{2}\right) \quad (2)$$

式中, V_P 为纵波速度; V_S 为横波速度; 其比值称为介质的泊松比。

可见, 视出射角与真出射角的关系曲线与地壳介质的泊松比有关。

1.2 联合定位方法

在联合定位计算过程中, 利用多台数据, 根据对离群点的加权方式不同和资料量纲不同, 选用走时残差的 1-范数与视出射角残差的 1-范数相乘建立目标函数。这样当走时残差与视出射角残差的范数同时达到最小时, 建立的目标函数也必然达到最小。

表达式为

$$E = \|t_i^O - t_i^T\|_1 \cdot \|\bar{e}_j^O - \bar{e}_j^T\|_1 \quad (3)$$

上式可写成

$$E = \sum_i^N |(t_i^O - t_i^T)| \cdot \sum_j^M |\bar{e}_j^O - \bar{e}_j^T| \quad (4)$$

式中, i 是台站序号; N 是台站总数; t_i^O 为第 i 个台站的观测走时; t_i^T 为理论走时; j 是具有视出射角的台站序号; M 为具有视出射角参数的台站总数; \bar{e}_j^O 为第 j 个台站的观测视出射角值; \bar{e}_j^T 为第 j 个台站的视出射角理论值。

利用地震波到时与视出射角联合定位方法中, 以地震的空间位置和简单的层状速度结构为模型参数建立模型空间。根据先验信息的约束随机生成大量可选择的模型, 计算出这些模型所对应的到时数据和视出射角数据的理论值并与实际观测值进行比较, 求得残差, 以残差目标函数达到最小或达到预期值为目标进行搜索, 最后所得的结果即为联合定位结果^[10-11]

2 高邮宝应地震序列定位

2.1 资料来源和处理

本文用于精确定位所使用的波形资料是由江苏省地震局提供的 2012 年 7 月 20 日至 8 月 22 日台网观测资料。由于震级小的地震其震相识别存在一定的难度, 我们选取了 $M \geq 1.0$ 的 84 次地震进行研究。这些地震事件的台网初步定位结果和台站 \bar{P} 、 \bar{S} 到时数据由波形资料获得。

对 84 次地震事件各台站记录的三分向波形数据进行预处理获得速度值^[11], 并且根据震中距由近及远的排序并读取 \bar{P} 、 \bar{S} 的到时数据, 挑选出记录较

为清晰的待研究地震 68 次。

由于联合定位方法中一重要参数为 P 波的视出射角, 视出射角可以从时间域和频率域下计算^[12]。在时间域下可以根据波形数据处理计算视出射角, 以各台站的 P 波到时时为起点分别对其三个分向选取 P 波的 1/4 个周期的区域内计算视出射角; 在频率域下以各台站 P 波到时时为起点分别对其三个分向向后读取 256 个数据点(记录长度为 2.56 秒)做 FFT 变换, 计算其优势频率所对应的视出射角值。

根据江苏及邻区莫霍深度, 选取待研究地震中仅包含直达波的视出射角参数的地震事件共 68 次。在江苏台网现有分布条件下, 37.6% 的地震有震中距小于 50 km 的近台记录, 50% 的地震有震中距小于 80 km 的近台记录。

2.2 方法与结果

以台网地震定位的结果作为初始值, 采用 HQ-13 线人工地震测深剖面获得的地壳结构模型(表 1)作为研究区地壳初始模型, 结合视出射角参数进行联合定位。

表 1 江苏地壳速度模型

Tabal 1 Crustal velocity model of Jiangsu province

深度/km	P 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	泊松比
0~2	3.70	
2~5	5.10	
5~10	5.44	
10~15	6.03	0.4
15~20	6.34	
20~25	6.52	
25~40	7.02	

比较同一地震重新定位前后位置, 得到各个地震在 EW, NS 和 UD 三个方向的偏移, 并求得其均方根分别为 0.02, 0.03 和 4.4 km。由于初始位置的误差包含了到时拾取误差, 并且在联合定位中使用了走时数据和视出射角参数, 所以我们的定位结果既保证了位置参数的精度, 并且在很大程度上提高了深度的分辨。

重新定位获得了 68 个地震(占参与地震定位总数的 80.95%)的修订位置参数。定位前后的地震序列震中分布图见图 2。

联合定位前后的平面分布有一定的变化, 但不明显。五角星为主震位置, 经联合定位的地震序列约为 15 km。图中时间标尺以主震发震时刻为起始时间。联合定位后显示, 在主震发生之后的一天左右的时间范围内余震主要发生主震四周; 随着时间推移,

余震主要发生在主震的西南方向。

沿径向地震深度分布图见图3。定位后深度优势明显较定位前上移,主震深度定位之前为15 km,定位之后为9.3 km,与双差定位结果10.2 km和

sPn震相定位结果9.4 km基本一致。为了更清楚地看出地震的震源深度分布,以2 km为统计间隔对不同震源深度的地震频次进行定量统计,给出深度—频度统计直方图(图4)。

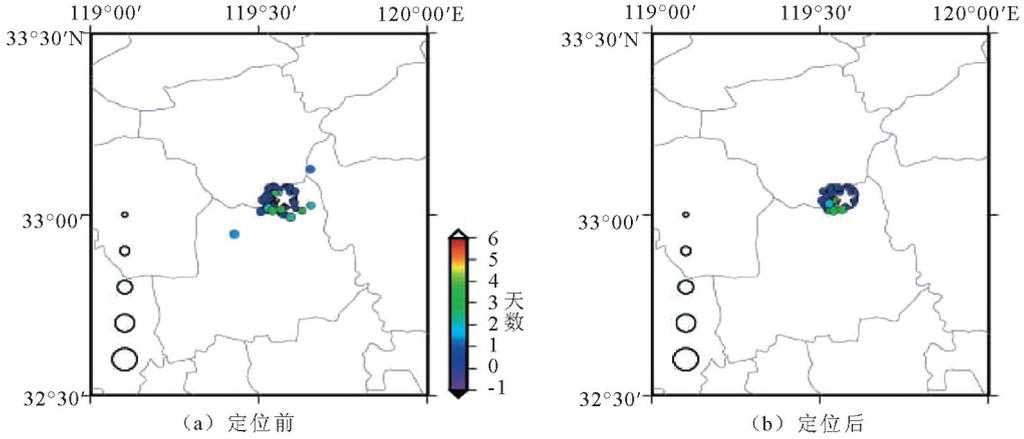


图2 定位前后地震分布图

Fig.2 Earthquake distribution before and after location

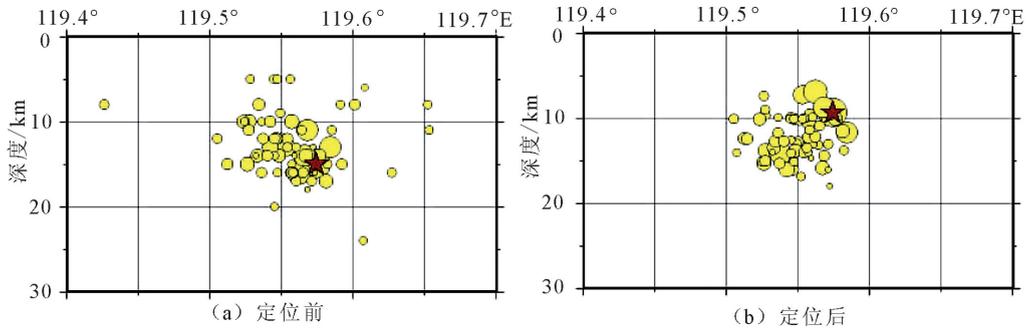


图3 沿径向地震深度分布图

Fig.3 Distribution of earthquake depths along the radial direction

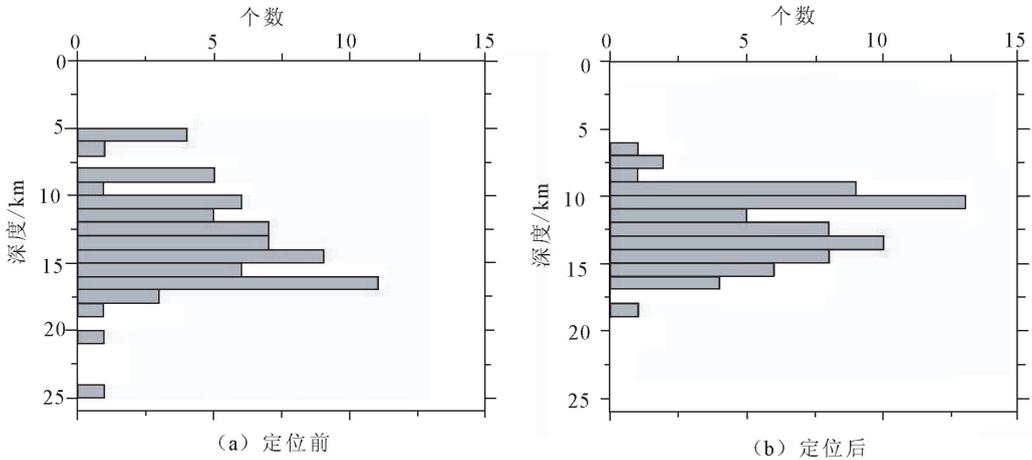


图4 深度统计图

Fig.4 Statistical graph of depths

联合定位的地震序列平均震源深度为12.21 km,深度分布在5~20 km(上地壳);其优势分布在

12~15 km;主震深度为9.3 km。定位之前深度范围为3~24 km,深度分布集中在16 km以上;定位

之后深度集中在 10~16 km, 占总数的 66.7%, 具有了优势分布。结果表明改善震源深度的分布是重新定位的最大优势。

本文给出了横穿余震带的 1 个地震剖面, 图 5 中 A-A' 表示这个剖面位置。地震深度剖面显示地震主要分布在断层两侧(图 6)。根据接收函数方法得到的速度结构^[13], 地壳中低速层的下界面深度约为 12~15 km, 根据低速层的位置可勾画出深部滑脱面; 根据地震深度分布可以勾画出发震断层几何形态; 根据断层在地表的出露分布^[1-2], 可以大致勾画出断层发震部位与其在地表出露的几何关系(图 7)。可清楚看到地震发生于断层的脆-韧性转换带部位, 脆-韧性转换带部位易于应力积累, 这就是地震集中发生在这一部位的主要原因。

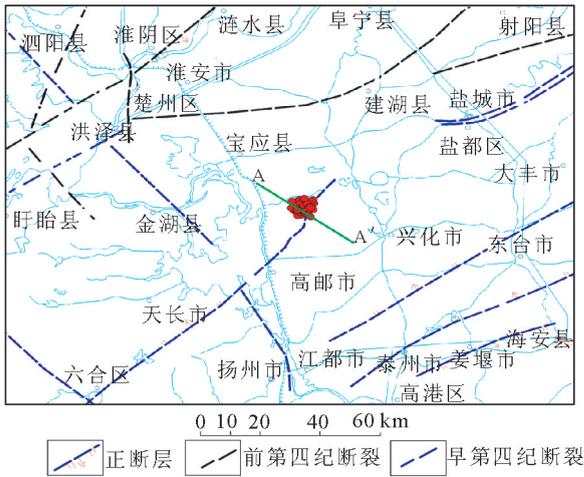


图 5 震区构造分布与剖面位置图

Fig.5 Structure distribution and profile position

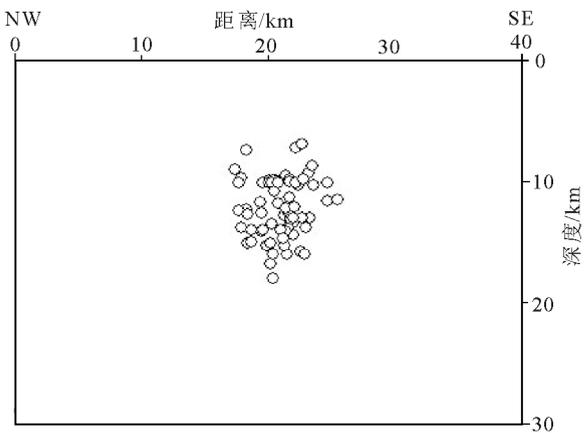


图 6 深度剖面图

Fig.6 Depth profile

3 讨论与结论

本文利用江苏地震固定台站观测的波形资料,

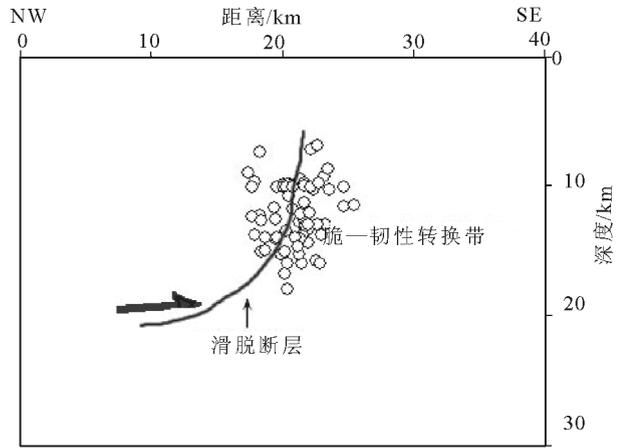


图 7 深度构造模型图

Fig.7 Depth structure model

对地震序列进行地震波到时与视出射角联合定位。对定位结果进行分析, 有如下讨论与结论:

(1) 使用地震波到时与视出射角联合定位方法, 以地震空间位置和层状速度结构为模型参数建立模型, 对走时残差的 1-范数与视出射角残差的 1-范数相乘建立的目标函数进行搜索, 实现目标函数最小, 结果即为联合定位的结果。因为视出射角参数对深度具有较高的敏感度, 联合定位在保证经纬度方向的准确度上, 还大大提高了对深度的分辨。

(2) 宝应地震序列根据地震序列的空间分布显示宝应地震序列的主要发震断层是杨汉苍-桑树头断裂, 地震带以走滑性质为主, 带有少量逆冲成分, 表现出高倾角的特征, 与野外考察资料^[1]结果相一致, 并且认为地震的发生可能是该断层与柳堡凸起与临泽凹陷构造共同作用的结果, 是发震构造的共同体。

(3) 本文根据速度分层的位置勾画出脆-韧性转换带, 地震往往集中发生在速度高值区和低值区的交界部位, 并且震源深度的下界面止于 20 km。根据速度结构性质, 认为下部地壳的高速结构为其提供了上部地壳横向运动的松弛边界条件。根据低速层的位置, 下扬子地区低速层集中在上地壳, 埋深约 12~15 km, 因此勾画的脆-韧性转换带位置也集中在上地壳的埋深部位, 正是应力在此部位的长期积累, 最终释放能量发生地震, 地震集中发生在脆-韧性转换带部位。此外根据接收函数方法得到的速度结构^[13]下地壳的平均速度为 6.80 km/s, 其厚度变化可分为三个区: 华北地台区厚约 10 km; 苏北凹陷一带为 8.0~8.7 km; 苏南至上海地区又加厚为 10.8~12.5 km。下地壳的厚度差异导致了中、上地

壳的巨大变化,苏北凹陷厚度减薄可能是导致此次地震的深部动力环境的重要格架。由于软流圈上涌(地幔热物质上升)引起的岩石圈拉张减薄区,地下介质随着滑脱面运移,若受到坚硬板块阻挡,应力在脆-韧性转换带部位长期积累,最终释放能量发生地震。

(4) 前最常使用的定位方法是双差定位方法。利用双差定位方法也对高邮、宝应地震序列做了很多的研究。双差定位法能有效减少地壳速度结构横向不均匀性引起的误差,消除相邻地震到台站共同路径的影响。但是由于到时参数对深度的敏感度不高,在使用双差定位方法的时候,高分辨率判断震源深度仍然是其瓶颈。本文所用的联合定位增加的视出射角参数对深度有很强的敏感性,联合利用到时与视出射角进行反演,既保证了经纬度的准确性又有效地提高了深度的分辨,在现代数字化资料地震定位中也具有广泛适用性。

参考文献(References)

- [1] 刘建达,杨伟林,李丽梅,等.江苏高邮-宝应交界 4.9 级地震震害分析[J].中国地震,2012,28(4):402-414.
LIU Jian-da, YANG Wei-lin, LI Li-mei. Damage Survey and Analysis on Earthquake ($M_S = 4.9$) at the Boundary Zone of Gaoyou and Baoying, Jiangsu Province [J]. Earthquake Research in China, 2012, 28(4): 402-414. (in Chinese)
- [2] 孙业君,王俊,黄耘.2012年7月20日高邮市、宝应县交界 M4.9 地震的震源机制[J].防灾减灾工程学报,2012,32(4):521-522.
SUN Ye-jun, WANG Jun, HUANG Yun. Focal Mechanism Solution of M4.9 Earthquake for 20 July 2012 Gaoyou-Baoying, Jiangsu Province [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(4): 521-522. (in Chinese)
- [3] 王俊,缪发军,詹小燕.利用 sPn 震相精确测定江苏高邮、宝应交界 M4.9 地震震源深度[J].防灾减灾工程学报[J].2013,33(4):354-360.
WANG Jun, MIAO Fa-jun, ZHAN Xiao-yan. Precise Determination of the Focal Depth of Jiangsu Gaoyou-Baoying M4.9 Earthquake by sPn Phase [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(4): 354-360. (in Chinese)
- [4] 杨文东,金星,李有山,等.地震定位研究及应用综述[J].地震工程与工程振动,2005,25(1):14-20.
YANG Wen-dong, JIN Xing, LI Shan-you, et al. Study of Seismic Location Methods [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(1): 14-20. (in Chinese)
- [5] Geiger L. Probability Method for the Determination of Earthquake Epicenters from Arrival Time Only [J]. Bull St Louis Univ, 1912(8): 60-71.
- [6] Lienert B R, Berg E, Frazer L N. Hypocenter: An Earthquake Location Method Using Centered, Scaled, and Adaptively Damped Least Squares [J]. Bull Seism Soc Am, 1986, 76(3): 771-783.
- [7] Aki K, Christoffersson A, Husebye E S. Determination of the Three-dimensional Seismic Structure of the Lithosphere [J]. J Geophys Res, 1977, 82(2): 277-296.
- [8] 王家映.地球物理反演理论(第二版)[M].北京:高等教育出版社,2002.
WANG Jia-ying. Inverse Theory in Geophysics (Second Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)
- [9] 傅淑芳,刘宝诚.地震学教程[M].北京:地震出版社,1991.
FU Shu-fang, LIU Bao-cheng. Seismology Course [M]. Beijing: Seismological Press, 1991. (in Chinese)
- [10] 李稳,张元生,何斌.地震波到时与视出射角联合定位方法研究[J].西北地震学报,2009,31(3):34-39.
LI Wen, ZHANG Yuan-sheng, HE Bin. Study on Seismic Location Method Using Seismic Arrival-time and Apparent Emergence Angle [J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31(3): 34-39. (in Chinese)
- [11] 李稳.地震波到时与视出射角联合定位方法研究[D].兰州:中国地震局兰州地震研究所,2008.
LI Wen. Study of Seismic Location Method Using Seismic Arrival-time and Apparent Emergence [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2008. (in Chinese)
- [12] 何斌,张元生,李稳.计算地震初至波视出射角方法[J].西北地震学报,2010,32(1):11-15.
HE Bin, ZHANG Yuan-sheng, LI Wen. The Calculation Method of Apparent Emergence Angle of Seismic First-arrival Wave [J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(1): 11-15. (in Chinese)
- [13] 黄耘,李清河,张元生,等.郯庐断裂带苏鲁皖段及邻区地壳速度结构[J].地球物理学报,2011,54(10):2549-2559.
Huang Y, Li Q H, Zhang Y Sh, et al. Crustal Velocity Structure Beneath the Shandong-Jiangsu-Anhui Segment of the Tancheng-Lujiang Fault Zone and Adjacent Areas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(10): 2549-2559. (in Chinese)
- [14] 张辉,徐辉,王熠熙.基于地震波反演的地震震源深度研究[J].华南地震,2012,32(4):29-36.
ZHANG Hui, XU Hui, WANG Yi-xi. Study on Focal Depth from Local Broadband Waveform Data Inversion [J]. South China Journal of Seismology, 2012, 32(4): 29-36. (in Chinese)