

JOPENS 常用定位方法对台湾中深源地震 定位差异分析^①

段 刚, 张丽娜, 蔡杏辉

(福建省地震局, 福建 福州 350003)

摘要:福建省地震台网负责监测中国台湾地区地震。由于属于网外范围,台站分布偏一侧,对于有一定深度的地震使用何种定位方法能获得较好的地震参数一直是个问题。本文利用 JOPENS 系统中交互分析软件 MSDP 提供的常用定位方法,使用福建省地震台网监测资料对台湾地区中深源地震进行定位,并将各种定位方法得出的结果与中国台湾公布的地震参数进行对比,分析两者结果的差异,进而找出合适的定位方法用于地震速报。

关键词: 台湾地区; 中深源地震; JOPENS 方法; 定位方法; 结果对比; 地震速报

中图分类号: P315.61

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-1087-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.1087

Location Differences between Intermediate and Deep Focus Earthquakes in Taiwan Using Different Location Methods in Java Open System

DUAN Gang, ZHANG Li-na, CAI Xing-hui

(Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract: The Fujian network monitors earthquakes in the Taiwan region. The seismic stations are distributed beside the epicenter and there is a small opening angle between the seismic stations used for locating and the epicenter. Therefore, the locating methods for intermediate and deep earthquakes, which can be used to obtain better seismic parameters, will directly affect the earthquake rapid reports. This paper uses common methods to locate earthquakes by MSDP, an interaction analysis software package in JOPENS (Java Open System). The results are then compared with the data from Taiwan's official website to obtain the appropriate location methods for rapid earthquake reporting. The depth of the epicenter to the source is referred to as focal depth and is divided into three categories: less than 70 km (shallow earthquakes), between 70 km and 300 km (intermediate earthquakes), and greater than 300 km (deep earthquakes). The focal depth is an important parameter for seismic studies, seismic tectonics, seismic risk assessment, and seismic event identification. Focal depth's accuracy affects our understanding of the focal process, fault tectonics, and stress field. Because tectonic plates push into each other, the activities of intermediate and deep earthquakes reflect the driving forces of the plates. The region offshore to northeast Taiwan is one of the active earthquake regions because it is located where the Eurasian and Pacific plates meet. Intermediate and deep earthquakes have different seismic phases than shallow earthquakes. Therefore, developing a fast and accurate location method for intermediate and deep earth-

^① 收稿日期: 2014-05-14

作者简介: 段 刚(1979—), 男, 工程师, 主要从事地震监测工作. E-mail: duanwolf@126.com

quakes is of great significance to rapid earthquake reporting.

Key words: Taiwan area of China; intermediate and deep focus earthquakes; JOPENS (Java Open system); location methods; results comparison; earthquake rapid reports

0 前言

按地震震源深度划分,小于 70 km 为浅源地震;大于 300 km 为深源地震;70~300 km 之间为中深源地震。对于地震学研究、地震构造研究、地震危险性评估和地震事件识别来说,震源深度是一个重要参数,它的准确测定关系到对震源过程、断层构造和应力场作用等一系列问题的正确认识^[1]。由于中深源地震处于板块推挤、碰撞的前沿,因此中深源地震的活动状况能反映出板块作用的剧烈程度^[2]。其震相与浅源地震差异较大。中国台湾东北部近海地区处于亚欧板块和太平洋板块交汇处,地震活动频繁,其中有一部分为中深源地震。如何快速准确定位这些中深源地震在地震速报中具有重大意义。本文将利用 JOPENS 中的几种定位程序,根据福建省地震台网的数据对中国台湾地区中深源地震进行反复定位,并将结果参数与中国台湾气象局定位的参数对比,以找出可靠、高效的定位方法。

1 中深源地震相特征与资料选取

与浅源地震记录相比较,中深源地震突出的特征是 P 波和 S 波初动尖锐并且振幅大,在垂直向记录上可能出现 P 波振幅大于 S 波振幅的情况,P 波和 S 波之间过渡震相比较少,衰减较快,且无面波记录^[3]。浅源地震记录的波形则表现为 P 波平缓,振幅的幅度小于 S 波列,在适当震中距上出现明显的面波。由于震源深,地震波从地幔折射而出,在标注震相时应使用 P 与 S 的震相代号,而不能使用 Pn 和 Sn。

中国台湾地震部门对其陆地及近海区域的地震会即时产生地震报告,并在“中央气象局全球资讯网”上公布其定位参数。我们挑选了从 2009 年至 2014 年中期的中国台湾地震目录中震源深度大于 70 km 的地震作为对象。考虑到中国台湾有提供地震目录,但福建地震台网并没有记录到此地震或记录很差的情况,所以挑选了 15 个里氏震级大于 4.0 的地震事件。

2 地震定位及对比

利用 JOPENS 系统中的 MSDP 进行地震分析定位。由于 HYPO2000 定位程序不适用于网外地

震,所以利用单纯型、LocSAT 和 HypoSAT 三种定位法进行定位处理。其中的 LocSAT 和 HypoSAT 两个外挂程序都以盖革法为基础,采用线性化观测方程组和奇异值分解最小二乘法。单纯型则是利用数学的单纯型搜索极值的方法,搜索残差最小的位置,也就是震中。先将深度固定在某一区间,在已知各台的初至 P 波到时的前提下,以走时表为理论模型(设定震源位置和发震时刻),将实测数据(P 波到时)与理论数据(走时表值)对比,借助最小二乘法原理找出残差最小时的理论模型作为定位结果^[4]。由于震中相对于台网而言是偏一侧,台站不可能包围震中,但是仍然需要将空隙角控制到最小,使定位精度尽可能提高。

震中之间的误差采用以下公式计算:

$$\Delta s = 111.199 \times [(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\lambda_1 - \lambda_2)^2 \cos^2(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2})^{1/2}]$$

式中: Δs 为两点间的震中误差,单位为 km; (φ_1, λ_1) 为福建台网测定的震中纬度和经度; (φ_2, λ_2) 为台湾测定的震中纬度和经度。

2.1 LocSAT 定位

采用 LocSAT 方法定位,将结果参数与中国台湾的定位结果做对比,见表 1。

2.2 HypoSAT 定位

采用 HypoSAT 方法定位,将结果参数与中国台湾的定位结果做对比,见表 2。

2.3 单纯型定位

采用单纯型方法定位,将结果参数与中国台湾的定位结果做对比,见表 3。

3 震中和震源深度的偏差分析

在分析平均偏差时,采用以下公式:

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$$

式中: $\bar{C}$ 为平均偏差;n 为地震个数; C_i 为表 1、表 2、表 3 中相应的差值。

分析标准偏差时采用以下公式:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n - 1}}$$

式中: δ 为标准偏差。具体分析结果见表 4。

表 1 LocSAT 法和中国台湾定位结果对比

Table 1 The comparison between LocSAT positioning result and the result of Chinese Taiwan

日期	数据来源	发震时刻(时:分:秒)	纬度/(°)	经度/(°)	震级/ M_L	震源深度/km	震中相差距离/km
2009-11-15	台湾	22:47:49.1	24.95	122.17	5.5	125.4	
	福建	22:47:48.1	24.89	122.29	4.8	88.7	
	差值	1.0 s	0.06	0.12	0.7	36.7	13.82
2010-04-04	台湾	07:03:0.8	24.93	122.63	4.8	125.2	
	福建	07:03:0.6	24.91	122.65	3.5	103.8	
	差值	0.2 s	0.02	0.02	1.3	21.4	3.0
2010-07-09	台湾	08:41:19.5	24.70	122.61	5.8	113.6	
	福建	08:41:19.7	24.69	122.62	5.2	62.3	
	差值	0.2 s	0.01	0.01	0.6	51.3	1.5
2010-10-12	台湾	14:43:26.0	24.99	122.07	4.5	119.3	
	福建	14:43:26.9	24.98	122.07	3.4	63.2	
	差值	0.9 s	0.01	0.0	1.1	56.1	1.11
2011-03-05	台湾	21:01:25.9	24.89	121.88	4.3	113.8	
	福建	21:01:25.5	24.87	121.94	3.3	88.5	
	差值	0.4 s	0.02	0.06	1.0	25.3	6.45
2011-07-26	台湾	23:00:24.3	22.06	121.64	4.7	114.7	
	福建	23:00:21.8	22.00	121.75	4.1	44.4	
	差值	2.5 s	0.06	0.11	0.6	70.3	13.16
2011-10-30	台湾	11:23:43.8	25.31	123.16	6.3	215.8	
	福建	11:23:46.0	25.28	123.00	5.0	188.4	
	差值	2.2 s	0.03	0.16	1.3	27.4	16.43
2012-01-25	台湾	16:36:23.2	24.89	122.20	5.0	124.3	
	福建	16:36:23.7	24.90	122.22	4.0	93.5	
	差值	0.5 s	0.01	0.02	1.0	30.8	2.3
2012-01-29	台湾	16:07:39.2	25.32	122.37	5.6	264.7	
	福建	16:07:40.3	25.35	122.16	4.2	247.5	
	差值	1.1 s	0.03	0.21	1.4	17.2	21.37
2012-02-04	台湾	10:54:22.6	24.67	122.66	5.6	116.1	
	福建	10:54:22.3	24.66	122.70	4.6	69.5	
	差值	0.3 s	0.01	0.04	1.0	46.6	4.19
2013-10-11	台湾	12:45:59.4	25.04	121.69	4.9	143.8	
	福建	12:45:57.9	24.98	121.81	4.2	124.3	
	差值	1.5 s	0.06	0.12	0.7	19.5	14
2013-11-21	台湾	15:36:2.4	24.87	121.93	4.5	89.5	
	福建	15:36:1.2	24.90	122.01	3.9	69.8	
	差值	1.2 s	0.03	0.08	0.6	19.7	9
2014-01-07	台湾	02:49:40.5	25.38	122.95	5.8	226.6	
	福建	02:49:40.6	25.41	122.79	5.0	242.6	
	差值	0.1 s	0.03	0.16	0.8	16	16
2014-05-06	台湾	08:02:16.2	22.14	121.65	4.2	120.6	
	福建	08:02:18.2	22.28	121.62	3.7	70.0	
	差值	2.0 s	0.14	0.03	0.5	50.6	16
2014-07-26	台湾	00:44:0.3	24.92	122.11	4.4	97.0	
	福建	00:44:0.9	24.87	121.98	3.7	72.2	
	差值	0.6 s	0.05	0.13	0.7	24.8	14

4 结果分析

(1) 对于同一地震事件而言,三种定位方法在确定发震时刻方面差别不大,均能满足精度要求。在确定震中经纬度方面,LocSAT 和 HypoSAT 两种定位方法要优于单纯型。

(2) 在确定震源深度方面,单纯型不能给出理想的结果,深度在 30 km 以下一般在 10 km 左右。LocSAT 和 HypoSAT 两种定位方法的结果略有差异,HypoSAT 定位的结果与中国台湾给出的结果更为接近,并且很稳定,没有出现大的波动。

表 2 HypoSAT 法和中国台湾定位结果对比

Table 2 The comparison between HypoSAT positioning result and the result of Chinese Taiwan

日期	数据来源	发震时刻(时:分:秒)	纬度/(°)	经度/(°)	震级/ M_L	震源深度/km	震中相差距离/km
2009-11-15	台湾	22:47:49.1	24.95	122.17	5.5	125.4	
	福建	22:47:47.6	24.90	122.29	4.8	106.6	
	差值	1.5 s	0.05	0.12	0.7	18.8	13.32
2010-04-04	台湾	07:03:00.8	24.93	122.63	4.8	125.2	
	福建	07:02:60.0	24.92	122.65	3.5	119.0	
	差值	0.8 s	0.01	0.02	1.3	6.2	2.3
2010-07-09	台湾	08:41:19.5	24.70	122.61	5.8	113.6	
	福建	08:41:19.4	24.69	122.62	5.2	83.3	
	差值	0.1 s	0.01	0.01	0.6	30.3	1.5
2010-10-12	台湾	14:43:26.0	24.99	122.07	4.5	119.3	
	福建	14:43:26.8	24.98	122.05	3.4	83.8	
	差值	0.8 s	0.01	0.02	1.1	35.5	2.3
2011-03-05	台湾	21:01:25.9	24.89	121.88	4.3	113.8	
	福建	21:01:24.9	24.87	121.93	3.3	104.3	
	差值	1.0 s	0.02	0.05	1.0	9.5	5.51
2011-07-26	台湾	23:00:24.3	22.06	121.64	4.7	114.7	
	福建	23:00:22.7	22.01	121.75	4.1	68.2	
	差值	1.6 s	0.05	0.11	0.6	46.5	12.63
2011-10-30	台湾	11:23:43.8	25.31	123.16	6.3	215.8	
	福建	11:23:44.1	25.26	123.09	5.1	201.6	
	差值	0.03 s	0.05	0.07	1.2	14.2	8.97
2012-01-25	台湾	16:36:23.2	24.89	122.20	5.0	124.3	
	福建	16:36:22.8	24.90	122.23	4.0	110.2	
	差值	0.4 s	0.01	0.03	1.0	14.1	3.22
2012-01-29	台湾	16:07:39.2	25.32	122.37	5.6	264.7	
	福建	16:07:39.6	25.35	122.17	4.2	257.9	
	差值	0.4 s	0.03	0.20	1.4	6.8	20.38
2012-02-04	台湾	10:54:22.6	24.67	122.66	5.6	116.1	
	福建	10:54:21.3	24.66	122.75	4.6	94.2	
	差值	1.3 s	0.01	0.09	1.0	21.9	9.16
2013-10-11	台湾	12:45:59.4	25.04	121.69	4.9	143.8	
	福建	12:45:58.0	24.98	121.79	4.2	124.7	
	差值	1.4 s	0.06	0.10	0.7	19.1	12
2013-11-21	台湾	15:36:2.4	24.87	121.93	4.5	89.5	
	福建	15:36:2.8	24.91	121.92	3.9	75.7	
	差值	0.4 s	0.04	0.01	0.6	13.8	5
2014-01-07	台湾	02:49:40.5	25.38	122.95	5.8	226.6	
	福建	02:49:41.4	25.41	122.76	5.0	231.1	
	差值	0.9 s	0.03	0.19	0.8	4.5	19
2017-05-06	台湾	08:02:16.2	22.14	121.65	4.2	120.6	
	福建	08:02:15.6	22.08	121.78	3.7	87.5	
	差值	0.6 s	0.14	0.13	0.5	33.1	15
2017-07-26	台湾	00:44:0.3	24.92	122.11	4.4	97.0	
	福建	00:43:58.8	24.84	122.06	3.7	79	
	差值	1.5 s	0.08	0.05	0.7	18	10

(3) 在震级问题上,一方面由于中深源地震面波不发育,无法使用面波来测定震级;中国台湾地区中深源地震多发生于台北、宜兰海域,距福建台网震中距约为 3°~6°,在这一距离上无法使用体波震级;另一方面,福建和台湾两个台网使用的观测仪器不同,频带宽度差别大,仪器频带宽度不同会使震级测

定产生差异;此外有量规函数问题,福建台网所使用的量规函数不能补偿所记录的台湾地震的实际衰减,这是造成震级偏小的主要原因^[5];同时,部分地震的 S 波震相记录不清晰或发育不好。这些因素都使得测算的震级偏小。

表 3 单纯型和中国台湾定位结果对比

Table 3 The comparison of positioning results between the simple type and that of Chinese Taiwan

日期	数据来源	发震时刻(时一分一秒)	纬度/(°)	经度/(°)	震级/ M_L	震源深度/km	震中相差距离/km
2009-11-15	台湾	22:47:49.1	24.95	122.17	5.5	125.4	
	福建	22:47:47.8	24.88	122.13	4.6	8.3	
	差值	1.3 s	0.07	0.04	0.9	117.1	8.77
2010-04-04	台湾	07:03:00.8	24.93	122.63	4.8	125.2	
	福建	07:02:59.7	24.87	122.65	3.4	20.0	
	差值	1.1 s	0.06	0.02	1.4	105.2	6.97
2010-07-09	台湾	08:41:19.5	24.70	122.61	5.8	113.6	
	福建	08:41:17.8	24.69	122.56	5.2	7.5	
	差值	1.7 s	0.01	0.05	0.6	106.1	5.17
2010-10-12	台湾	14:43:26.0	24.99	122.07	4.5	119.3	
	福建	14:43:24.3	24.96	122.10	3.3	7.5	
	差值	1.7 s	0.03	0.03	1.2	111.8	4.5
2011-03-05	台湾	21:01:25.9	24.89	121.88	4.3	113.8	
	福建	21:01:24.2	24.93	121.88	3.2	5.7	
	差值	1.7 s	0.04	0.00	1.1	108.1	4.45
2011-07-26	台湾	23:00:24.3	22.06	121.64	4.7	114.7	
	福建	23:00:21.9	22.14	121.63	4.1	5.0	
	差值	2.4 s	0.08	0.03	0.6	109.7	8.96
2011-10-30	台湾	11:23:43.8	25.31	123.16	6.3	215.8	
	福建	11:23:39.6	25.07	123.49	5.2	10.4	
	差值	4.2 s	0.24	0.33	1.1	205.4	42.6
2012-01-25	台湾	16:36:23.2	24.89	122.20	5.0	124.3	
	福建	16:36:21.3	24.84	122.23	3.8	10.2	
	差值	1.9 s	0.05	0.03	1.2	114.1	6.33
2012-01-29	台湾	16:07:39.2	25.32	122.37	5.6	264.7	
	福建	16:07:38.2	24.97	122.55	4.2	05.9	
	差值	1.0 s	0.35	0.18	1.4	258.8	42.93
2012-02-04	台湾	10:54:22.6	24.67	122.66	5.6	116.1	
	福建	10:54:20.7	24.63	122.69	4.5	14.2	
	差值	1.9 s	0.04	0.03	1.1	101.9	5.38
2013-10-11	台湾	12:45:59.4	25.04	121.69	4.9	143.8	
	福建	12:45:57.8	24.98	121.72	3.8	5	
	差值	1.6 s	0.06	0.03	1.1	138.87	
2013-11-21	台湾	15:36:2.4	24.87	121.93	4.5	89.5	
	福建	15:35:59.5	24.86	122.01	3.8	10	
	差值	2.9 s	0.01	0.08	0.7	79.5	8
2014-01-07	台湾	02:49:40.5	25.38	122.95	5.8	226.6	
	福建	02:49:41.4	25.08	122.91	4.9	10	
	差值	0.9 s	0.3	0.04	0.9	216.6	34
2014-05-06	台湾	08:02:16.2	22.14	121.65	4.2	120.6	
	福建	08:02:14.0	22.20	121.76	3.5	12	
	差值	2.2 s	0.06	0.11	0.7	108.6	13
2014-07-26	台湾	00:44:0.3	24.92	122.11	4.4	97.0	
	福建	00:43:59.3	24.85	121.97	3.3	10	
	差值	1.0 s	0.07	0.14	1.1	87	16

(4) 通过表 4 的偏差分析可以看出,LocSAT 和 HypoSAT 两种定位方法均可用于中国台湾地区中深源地震的定位。在地震分析中,如果 S 波不清晰,只应使用 P 波到时定位并且使用较多的台站,可获得较高的可靠性^[6];如果 S 波清晰,则需要加入少量的 S 波震相。在此过程中发现,使用 LocSAT

方法定位速度较快,而使用 HypoSAT 方法定位则速度较慢,在地震速报中可优先使用 LocSAT 方法定位。当出现震源深度不理想时换用 HypoSAT 方法定位。标注震相时尽可能使用福建台网南部和北部的台站,以控制水平方向上的误差,但是即便如此,深度上的误差并没有大的改善,这也说明地震深

度是地震定位中最复杂的问题^[7]。

表 4 震中相差距离和震源深度偏差分析结果
Table 4 Results of deviation analysis on epicenter and depth

分析内容	震中相差距离/km		震源深度/km	
	平均偏差	标准偏差	平均偏差	标准偏差
LocSAT	10.2	6.58	34.25	16.78
HypoSAT	9.4	6.05	19.49	12.09
单纯型	14.3	13.73	131.25	52.31

随着海峡两岸交流的不断深入,福建台网将把中国台湾数据流接入。可以预见,在以后的中国台湾地区地震分析中加入使用中国台湾台站数据地震定位的精度将大大提高,对震源深度的测定也会有一定的辅助作用。

参考文献(References)

[1] 魏娅玲,蔡一川,苏金蓉.采用 sPn 震相确定甘肃岷县 $M>4.0$ 地震震源深度[J].地震工程学报,2013,35(3):438-442.
WEI Ya-lin,CAI Yi-chuan,SU Jin-rong.Calculation of the Focal Depth of $M>4.0$ Earthquakes in Minxian,Gansu,Based on sPn Seismic Phases[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):438-442.(in Chinese)

[2] 王周元,何少林,李勇,等.中国中深源地震分布特征及其意义[J].西北地震学报,2000,22(3):288-295.
WANG Zhou-yuan,HE Shao-lin,LI Yong,et al.Distribution Feature of Intermediate and Deep-focus Earthquakes In China and its Significance[J].Northwestern Seismological Journal,2000,22(3):288-295.(in Chinese)

[3] 韩京,周仕勇,黄建英,等.新疆地震目录中的中源地震定位问题研究[J].内陆地震,2004,18(2):113-121.
HAN Jin,ZHOU Shi-yong,HUANG Jian-ying,et al.Location Study of Earthquakes with Mid-deep Source in XinJiang Seismic Catalogue[J].Inland Earthquake,2004,18(2):113-121.(in

Chinese)

[4] 赵金花,李波,陆汉鹏,等.单一地震事件与多个地震事件的定位方法及应用[J].地震地磁观测与研究,2007,28(4):15-19.
ZHAO Jin-hua,LI Bo,LU Han-peng,et al.The Earthquake Location Methods for Sing-le Seismic Event and a Number of Seismic Events and their Application[J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2007,28(4):15-19.(in Chinese)

[5] 蔡杏辉,曹轶,许振栋.福建与台湾地震台网测定震级偏差浅析[J].防灾科技学院学报,2013,15(3):72-77.
CAI Xing-hui,CAO Yi,XU Zhen-dong.Deviation Analysis of Earthquake Magnitude Determination by Fujian And Taiwan Seismic Network[J].Journal of Institute of Disaster Prevention,2013,15(3):72-77.(in Chinese)

[6] 陈贵美,刘锦,刘军,等.数字地震台网对不同区域地震事件的震中定位研究[J].华北地震科学,2010,28(1):59-64
CHEN Gui-mei,LIU Jin,LIU Jun,et al.Analysis on Precision of Deferent Earthquake Location Methods in Guangdong Digital Seismic Network[J].North China Earthquake Sciences,2010,28(1):59-64.(in Chinese)

[7] 冯建刚,蒋长胜,韩立波,等.1970 年以来甘肃台网地震观测报告收集整理及其重新定位研究[J].西北地震学报,2012,34(3):289-293.
FENG Jian-gang,JIANG Chang-sheng,HAN Li-bo.Collection and Reestablish Work for the Earthquake Observation Reports of the Gansu Seismographic Net work since 1970 and Earthquake Relocation [J].Northwestern Seismological Journal,2012,34(3):289-293.(in Chinese)

[8] 张有明,陈珊桦,罗开奇,等.极值理论在台湾地区地震趋势预测中的应用[J].华南地震,2013,33(3):55-64.
ZHANG You-ming,CHEN Shan-hua,LUO Kai-qi,et al.Extreme-Value Theory Application Research about Earthquake Tendency Prediction in Taiwan[J].South China Journal of Seismology,2013,33(3):54-64.(in Chinese)