

谢小玲, 孙金龙, 康英, 等. 海底地震仪对海上地震定位精度的提升作用——以南澳外海域 M_L 2.8 级地震为例[J]. 华南地震, 2015, 35(1): 21–29. [XIE Xiaoling, SUN Jinlong, KANG Ying, et al. Development of Offshore Ocean Bottom Seismometer to Promote the Accuracy of Coastal Earthquakes Relocation——A M_L 2.8 Earthquake in the Open Sea of Nanao[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(1): 21–29.]

海底地震仪对海上地震定位精度的提升作用 ——以南澳外海域 M_L 2.8 级地震为例

谢小玲^{1,2}, 孙金龙¹, 康英³, 徐辉龙¹, 夏少红¹

(1. 科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;
2. 中国科学院大学, 广州 510070; 3. 广东省地震局, 广州 510070)

摘要: 由于海底地震台站的缺乏, 如何提高海域地震定位的精度是目前地震学家面临的问题之一。南海北部陆缘作为板内地震的活跃带, 其微震活动在华南沿海和近海海域频发, 海上由于未布设相应的地震台网, 因此对近海海域地震尤其是微震的定位精度极低。利用 2012 年南海东北部海陆地震联测期间两台海底地震仪 (Ocean Bottom Seismographs, OBS) 所记录到的南澳外海域发生的 M_L 2.8 级地震为例, 对比分析 OBS 数据加入前后对地震定位结果的影响。这是首次在南海北部陆缘利用 OBS 联合陆上地震台网对天然地震进行定位的对比研究, 结果说明了近海海域 OBS 的布设将会对我国沿海地震定位精度的提升、地震活动性的特征以及海域断裂构造的研究具有极其重要的意义。

关键词: 南澳海域; 地震重定位; 海底地震仪 (OBS)

中图分类号: P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2015) 01-0021-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2015.01.004

Development of Offshore Ocean Bottom Seismometer to Promote the Accuracy of Coastal Earthquakes Relocation ——A M_L 2.8 Earthquake in the Open Sea of Nanao

XIE Xiaoling^{1, 2}, SUN Jinlong¹, KANG Ying³, XU Huilong¹, XIA Shaohong¹

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 10049; 3. Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Due to the lack of seismologic observation stations, how to promote the accuracy of coastal earthquake location is one of important problems for seismologists now. As an active intraplate seismic zone, microearthquakes occurred at the northern margin of the South China Sea frequently, however, the accuracy of

收稿日期: 2014-11-15

基金项目: 国家自然科学基金 (41376060, 91328206, 41222039), 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目 (SQ201303) 联合资助

作者简介: 谢小玲 (1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事新构造运动、地震地质学研究。

E-mail: ipoppy@163.com.

coastal earthquakes location, especially the microearthquakes location is extremely low for the lack of corresponding seismologic observation networks. The paper relocates a M_L 2.8 earthquake which was captured by two Ocean Bottom Seismometers (OBS) in 2012 during the period of the onshore-offshore seismic experiment in northeastern South China Sea, and analyzes the influence of OBS data on seismic relocation. The studying on using the data of OBS and continental networks to relocate the natural earthquake is the first time in the northern margin of the South China Sea. The results inform that the offshore OBS is important to promote the accuracy of coastal earthquakes location, and understand seismic activity and undersea fault tectonic.

Keywords: Northeastern South China Sea; Earthquakes relocation; Ocean Bottom Seismometers

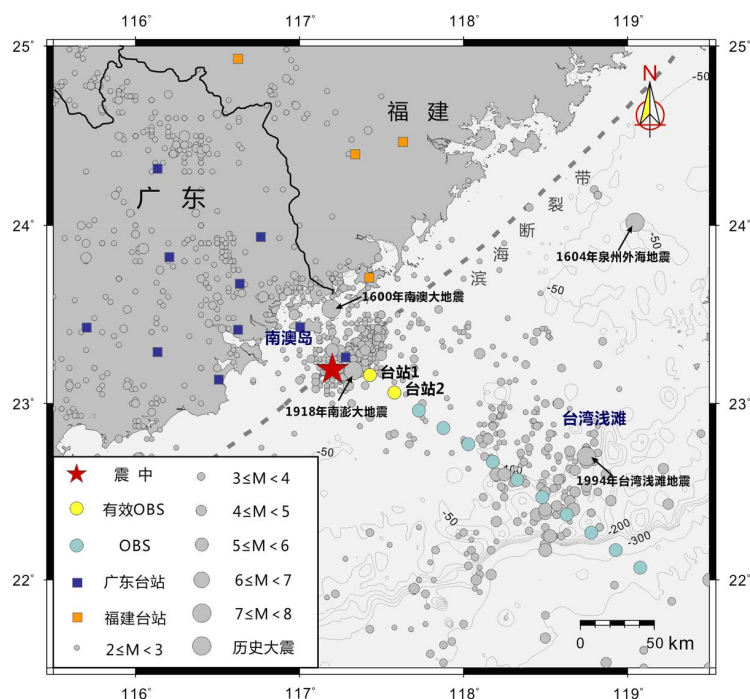
0 引言

地震定位是地震学中最经典、最基本的问题之一,对于研究诸如地震活动构造、地球内部结构、震源的几何构造等此类地震学中的基本问题有重要意义^[1],所以地震发生后,如何准确地获取震源的位置参数,是地震学的一个传统而富有挑战性的问题,一直是地震学家关心的一个重要研究方向。

目前相对于陆上地震定位而言海上的地震定位工作较少,其原因是陆上地震观测台网日趋成熟,而海上并没有布设相应的地震台网。由于缺乏海上台站,因此无法对远海地震进行及时有效的观测与地震信号记录,而且对近海地震无法进

行有效环绕接收数据,从而对于地震定位的精度会有所影响。

南澳岛位于闽南-粤东东南面海域,海域面积为 4 600 km²,周围分布大小不等的岛屿,地形复杂,地处欧亚板块与菲律宾海板块会聚带上变形前缘的后侧。该区先后发生 1600 年南澳 7.0 级地震、1604 年泉州外海 7 $\frac{1}{2}$ 级地震、1918 年南澎 7 $\frac{1}{4}$ 级地震和 1994 年台湾浅滩 7.3 级地震,占整个南海北部陆缘地震带 7.0 级以上强震的绝大部分(图 1),因此,该区无疑是南海北部陆缘地震带内活动性最强的区域^[2]。闽南-粤东沿海城市,人口密集,经济发展迅速,一旦在该处发生地震将会造成大量的人员伤亡和财产损失,因此该处地震频发一直倍受地震学家的关注。故对该区域地震的



红色五角星为 2012 年 07 月 05 日 M_L 2.8 地震 (图中震中来自广东省地震信息网);

地震包括 1600 年南澳 M_L 7.0 地震、1604 年泉州外海 7 $\frac{1}{2}$ 级地震和 1918 年南澎 7 $\frac{1}{4}$ 级地震这三次历史大震。

图 1 南澳外海域 $M_L \geq 2.8$ 地震和 OBS 分布图 (1970—2011 年)

Fig.1 The distribution map of earthquakes with $M_L \geq 2.8$ in the open sea of Nanao and OBS (1970—2011)

精确定位,为后续相关的地震研究工作提供了数据基础,而且有利于今后地震灾害预测及地震安全评估工作。

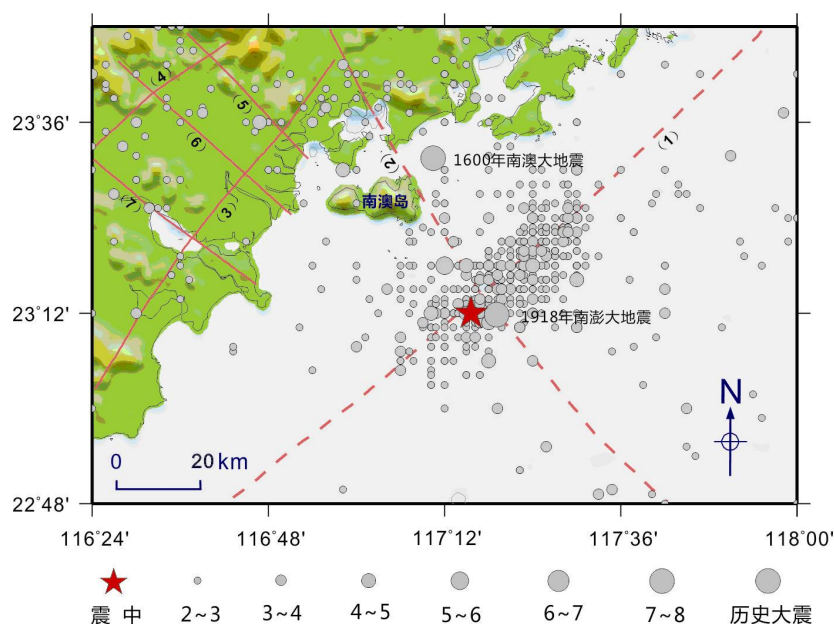
本文利用2012年海陆地震联测期间所记录到的数据,重点以南澎列岛西南海域2012年7月5日发生的一个 $M_L 2.8$ 地震为例,首次利用OBS数据对南海北部近海海域地震进行了定位,通过对比分析OBS数据加入前后地震定位的结果,探讨了近海海域OBS对地震定位的重要作用。

1 区域地质概况

南海北部陆缘位于欧亚大陆东南缘,地处华南陆块和南海之间,被认为是被动陆缘^[3-6]。其东面受到台湾-吕宋会聚变形带与菲律宾海板块碰撞会聚,北侧受到印藏碰撞产生侧向挤压和印度-澳大利亚板块N-NE向的俯冲作用,因此华南陆块整体向E-SEE向运动,南侧的其它陆块则独立于华南地块向东运动,二者之间形成挤压剪切^[2]。华南北部陆缘内部,新生代岩浆活动频繁,热流值高,断裂构造发育^[5],为减薄型陆壳^[7]。区内NEE-NE向的滨海断裂带为一条深大断裂^[8],将华南沿海与南海北部不同构造单元分割开来,且控制了华南沿海的主要强震活动。由于南海北部陆缘的特殊构造背景和复杂的应力状态,导致该区地

震活动频繁,也一直受到很多学者的关注。前人对南海北部陆缘地震带经过了详细的研究,将该地震带划分为4个区域,分别为东部,闽南-粤东沿海;中部,珠江口区域;中西部,阳江地区;西部,雷琼地区,其中闽南-粤东沿海是该地震带地震活动的活跃区^[2]。

闽南-粤东沿海位于南海东北部,是南海东北部地震活动最为活跃的地区^[9]。南海东北部地处欧亚大陆东南端,构造上属被动大陆边缘。受菲律宾海板块俯冲和印藏碰撞衍生的侧向应力传递等因素影响^[10],构造环境复杂,新构造运动活跃且表现形式多样。该区断裂构造十分发育,以NE、NEE向的东亚系、NNE-NE向的岛弧系、NEE-WE向的南海系断裂为主^[11],兼EW向断裂(图2)。横穿南海东北部NE走向的滨海断裂带是一条强活动断裂带,为南海东北部的重要控震构造和发震构造^[12]。南海东北部构造活动强烈主要是表现为地震活动频发,其中东部的潮汕沿海地震最为活跃。这一区域小震十分频繁,主要集中在南澳岛西南面海域,密集成簇,并且曾出现过7级地震重复的现象,分别为1600年9月29日南澳7级和1918年2月13日南澳7.3级地震^[13](图2)。NEE走向的滨海断裂带从南澎列岛穿过,控制了该区的小震活动,与NW向黄岗水断裂共同组成1918年南澳大地震的震源构造^[12]。



(1) 滨海断裂带; (2) 黄岗水断裂; (3) 饶平-汕头断裂; (4) 潮州-普宁断裂;

(5) 韩江断裂; (6) 古巷-澄海断裂; (7) 榕江断裂。红色五角星为2012年07月05日 $M_L 2.8$ 地震

(图中震中来自广东省地震信息网); 地震包括1600年南澳 $M 7.0$ 地震和1918年南澎 $7\frac{1}{2}$ 级地震这两次历史大震。

图2 南澳外海域区域地震活动^[9](1970—2011年)

Fig.2 Earthquakes in the open sea of Nanao^[9](1970—2011)

2 数据和方法

2.1 数据收集与处理

2.1.1 数据收集

本次地震发生在南澳东南面海域, 距离南澳岛约 30 km, 广东、福建等区域的台网都记录到了较好的地震波形, 其中还包括了 2012 年由中科院南海海洋研究所和广东地震局联合布设的测线 2012-L3 中的台站 1 和台站 2, 这些近震台网的记录提供了有力的数据支持。本文采用的所有可用的台站分布见图 1。其中区域数字地震台网包括广东省和福建省台网, 采用的是宽频带观测系统与井下短周期观测系统, 观测场地主要有地表型与井下型两大类型。使用的宽频带仪器有 CMC-3ESPC、CMC-3EPSPCB、BBVS-60 和 KS-200M, 频带宽度为 60 s~50 Hz; 使用的短周期仪器有 JDF-2、FSS-3DBH 和 FSS-3B, 频带宽度为 2 s~50 Hz^[14]。测线 2012-L3 投放的 OBS 为国产宽频带、7 通道(I-7C)OBS, 采用单球一体化结构, 具备 7 通道采集能力(3 通道宽带地震计、3 通道高

频检波器、1 通道水听器)。单台 OBS 同时具备了接收气枪等高频人工震源信号和天然地震的能力, 频带宽度为 30 s~40 Hz^[15]。

对震中重新定位时, 我们选定了 6~200 km 之内包括广东省和福建省台网的 14 个台站的地震波到时数据进行定位, 随后再加上两个 OBS 台站的数据, 将三次定位结果进行对比, 从中分析出有无 OBS 数据其结果的区别。从分布方位来看, 我们采用的陆上台网均位于地震的西侧, 而其东侧没有固定台站, 仅有两个 OBS 台站。从距离来看, 大部分的台站都位于 200 km 之内, 因此能提供可靠的地震波反演资料。

2.1.2 数据处理

来自广东和福建台网的数据, 我们直接使用广东省和福建省地震局所拾取的到时数据(表 1)。由 OBS 获得的原始数据, 首先将其转化成 SAC 数据(包括 3 通道宽带地震计、3 通道高频检波器、1 通道水听器), 以便于能在 SAC 中对数据进行处理。OBS 被投放沉至海底接收信号, 海底环境复杂不同的噪声源对其影响较为明显, 为了提高信

表 1 地震台站坐标和地震波到时

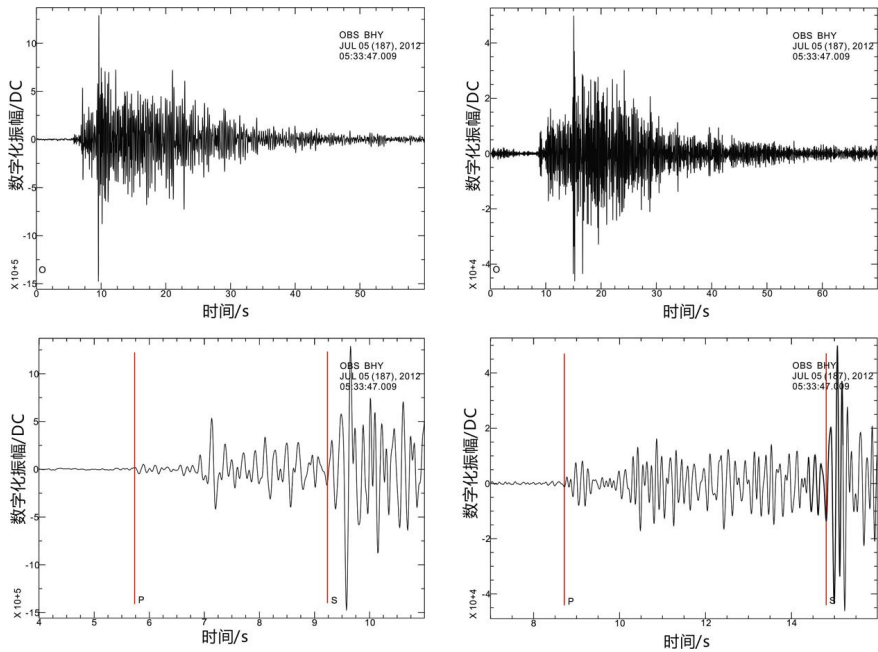
Table 1 Coordinates of seismic stations and the time-arrival of seismic waves

数据来源	台站名称	纬度/ $^{\circ}$	经度/ $^{\circ}$	P 波到时 /h:min:s	S 波到时 /h:min:s
广东台网	CHZ	23.67	116.64	05:34:01.70	05:34:11.56
	SHT	23.42	116.63	05:33:59.75	05:34:07.70
	NAP	23.26	117.28	05:33:50.11	05:33:51.44
	NAO	23.43	117.01	05:33:54.04	05:33:58.30
	TIX	23.13	116.51	05:34:0.55	05:34:09.77
	RAP	23.94	116.77	05:34:03.47	05:34:14.27
	PUN	23.29	116.14	05:34:07.38	05:34:20.99
	FES	23.82	116.21	05:34:09.09	05:34:23.91
	JIX	23.43	115.70	05:34:14.34	05:34:33.45
	MEZ	24.32	116.14	05:34:14.66	05:34:33.99
福建台网	DSXP	23.71	117.43	05:33:57.36	05:34:03.89
	PHSG	24.40	117.34	05:34:09.48	05:34:24.09
	ZZJH	24.47	117.63	05:34:11.32	05:34:27.78
	SHLX	24.93	116.63	05:34:20.63	05:34:43.52
海底地震仪(OBS)	台站 1	23.16	117.43	05:33:52.44	05:33:54.66
	台站 2	23.06	117.58	05:33:55.56	05:34:01.69

噪比, 得到可靠的结果, 在拾取震相到时之前需要对记录到的速度波形进行滤波。对 OBS 波形经 1~8 Hz 的带通滤波器滤波, 此时得到了较清晰的波形(图 3)。手动拾取 P 波和 S 波到时(表 1)。将处理好的数据保存, 以便定位使用。

2.2 定位方法

接收到南澳外海域发生的 M_L 2.8 地震的台网范围均在 200 km 以内, 属于网内近震范围, 故本文所用定位方法首选 Hypo2000^[16-17]。Hypo2000 定位程序采用传统 Geiger 法的基本思路。在用



左图和右图分别为 OBS 台站 1 和台站 2 记录到的波形图, 上为完整波形, 下为 P 波和 S 波的到时记录

图 3 OBS 台站记录波形图

Fig.3 Waveform graph recorded by OBS

Hypo2000 进行定位之前, 还需要确定定位所需的速度模型。

由于中国大陆及其周围地区的地壳厚度变化很大, 不同的区域其构造不一, P 波和 S 波的速度结构就有着明显的差别, 尤其是海上和陆上的地质构造相差甚大, 选用了不同的速度模型对定位的精度影响尤为重要。此次要对南澳外海域地震进行定位, 该处地壳速度结构为陆壳结构, 地壳厚度由陆地向海区逐步变薄, 在上地壳下部普遍存在一层速度为 5.5~5.9 km/s、厚度为 2.5~4.0 km 的低速层, 并向海区方向减薄, 未发现明显的高速层^[7], 并且该区发育多条断裂, 复杂构造加大了选取模型的难度, 因此我们要选用适合该处的速度模型, 通过各个模型的对比分析, 最终我们选用了华南及其海域的速度模型^[18], 如表 2 所示。

将以上所获得的所有 P 波和 S 波到时、台站位置和地壳速度模型数据用 fortran 编译成 Hypo2000 的输入文件格式, 分别为 .arc、.txt 和 .crh 格式文件。将以上三个文件和一个命令参数文件

表 2 华南及其海域的速度模型^[18]

Table 2 The velocity model of South China and its coast^[18]

深度/km	P 波速度 km/s
0	4.90
2	5.90
19 ⁻⁰	6.20
19 ⁺⁰	6.40
32 ⁻⁰	6.60
32 ⁺⁰	7.80
65	8.00

注: 深度的上角标-0 为层顶; +0 为层底。

(.inp) 应用于 Hypo2000, 得到重新定位结果。

3 结果与分析

3.1 震源位置对比

本文共列举了使用 Hypo2000 的三次定位结果, 使用了不同的台网数据, 分别为广东台网、广东福建台网和广东福建台网加上 OBS 数据 (表 3)。为了以下描述方便, 我们用 A、B 和 C 来分别

表 3 $M_L2.8$ 地震重新定位结果

Table 3 The relocation result of $M_L2.8$ earthquake

数据来源	地震参数			纬度/ $^{\circ}$	经度/ $^{\circ}$	深度/km
	走时残差	水平误差/km	垂直误差/km			
GD(A)	23.2110	117.2440	7.86	0.19	0.87	1.64
GD+FJ(B)	23.2537	117.2613	9.50	0.15	0.60	0.69
GD+FJ+OBS(C)	23.2550	117.2615	8.91	0.20	0.50	0.67

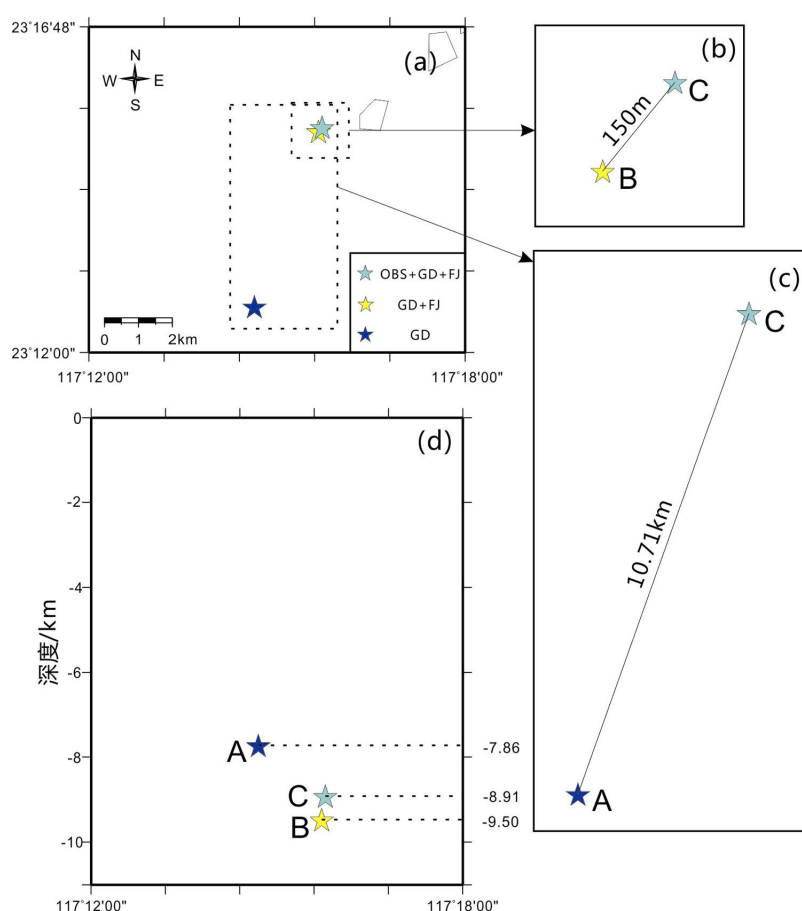
代表数据来源为广东台网、广东福建台网和广东福建台网加上 OBS 数据这三次定位。图 4 为三次定位的震源的分布图和垂向的对比图。

从图 4 上可以看到, A 定位的结果与 C 定位结果从震中平面分布图上可以看到相距较大, 而 B 定位与 C 定位的结果在平面距离相距较小, 仅 150 m, 这与 A 定位中的台网和 B 定位的台网分布的方位角和次级方位角有关, 下一节将详细介绍。虽然 BC 定位震中距离相对于 AC 定位震中距离小很多, 但是对于一个 M_L 2.8 地震而言, C 定位和 B 定位震中相距 150 m 已是一个明显的定位差距。

从垂向分布图中可见, 加上 OBS 数据的震源深度居于其他两次重定位的深度之间。这说明了加上 OBS 数据, 该地震的震源深度的拟合程度会更好。

3.2 精度分析

地震定位的精度与地震台网的分布的几何形态密切相关, 地震台网与震中相对位置的不同直接影响定位结果的精度。Lilwall 和 Francis 利用三角台站布设的方法对地震进行定位, 发现地震台站如果只是“跨坐”在地震两侧对地震深度的定位影响很大^[19]。Bondár 利用蒙特卡罗模拟台网几何



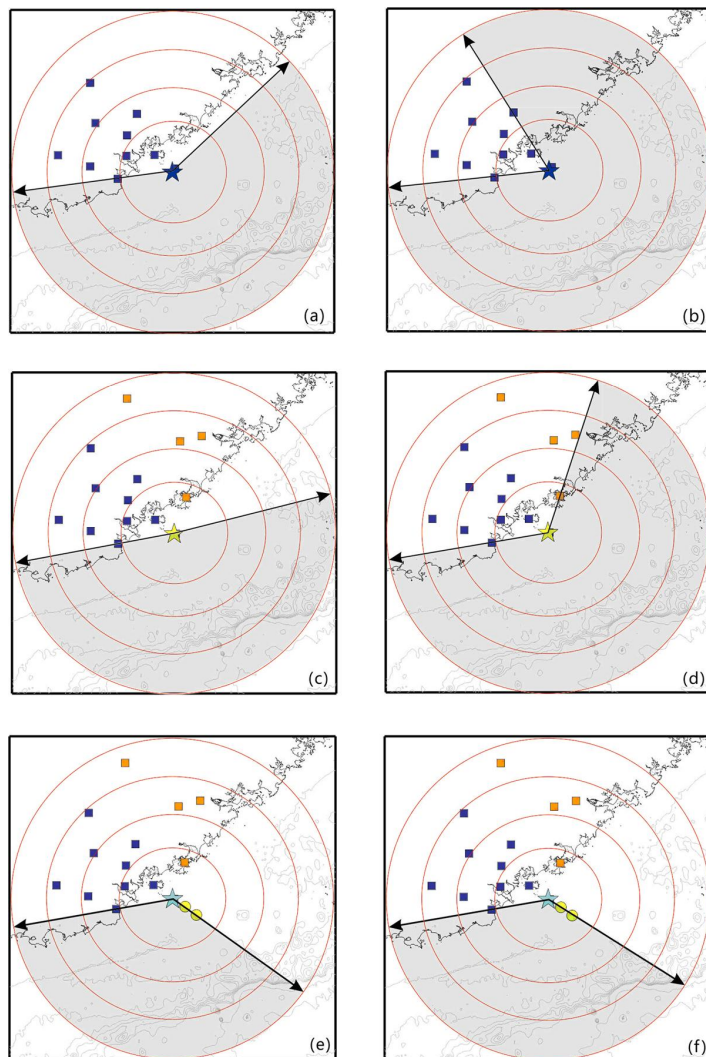
(a) 图为震中的平面分布图; (b) 和 (c) 分别是 BC 定位和 AC 定位的震中相距的距离;
(d) 图为震源深度对比图。其中蓝、青和黄色五角星分别代表 A、B 和 C 定位的震中。

图 4 三次地震重新定位震源结果对比图

Fig.4 Comparison of relocations results of the three earthquakes

形态, 发现当近震台网符合以下判据时近震台网定位能精确到 5 km 之内, 具有 95% 的置信度: ① 250 km 以内有 10 个或更多的台站; ② 方位角间隔小于 110° ; ③ 次级方位角间隔小于 160° ; ④ 30 km 以内至少有一个台站^[20]。次级方位角定义为仅包含一个台站的最大方位角^[21]。各次定位的方位角和次级方位角如图 5 所示。

从表 3 中可见这三次定位中的震中距均在 200 km 以内, 属于地方震, 所以得到的波形数据清晰可靠。影响定位精度的不仅是台站个数和震中距, 方位角对定位精度的影响同样不容忽视。从图 5 可以看到, 仅使用广东台网进行定位时, 台站均分布在震中的西面(图 5), 方位角和次级方位角分别为 225.874° 和 311.524° , 对震中的包围角度较



(a)(c)和(e)分别为 A、B 和 C 定位台站分布的方位角大小;(b)(d)和(f)分别为 A、B 和 C 定位台站分布的次级方位角大小。

图 5 三次地震定位台站分布方位角和次级方位角间隔

Fig.5 The azimuth and the interval of secondary azimuth of seismic stations in the three earthquakes location

为局限,因此其水平误差和垂直误差较其他两次定位明显(表 3);使用广东福建台网定位时,台站相对于震中的分布角度有所增大,由正西方向向西北方向扩大(图 5),方位角间隔和次级方位角间隔分别为 186.317° 和 241.020° ,较 A 定位大大减小,其水平误差、垂直误差和走时残差相对 A 定位明显减小(表 3),由此可见,方位角和次级方位角对地震定位的精度影响明显;C 定位加上了两个 OBS 台站的数据,使得方位角和次级方位角的间隔变小分别为 140.016° 和 142.127° ,相对于 B 定位看来,其水平误差和垂直误差也都有减小,但是走时残差却由 0.15 增大到 0.20,走时主要是与速度模型有关^[21],此处的走时残差的增大可能是由于模型选取的原因。由于南澳岛区域发育多条纵横交错的断裂,构造活动强烈,构造复杂,这加大

了我们对速度模型的选取难度,而单从数据上我们很难判定速度模型的质量,通过多个速度模型的对比,该速度模型得到的结果最佳。从以上结果可见,方位角和次级方位角间隔的大小对定位结果有很大的影响。由于此次 OBS 接收到该次地震的台站不多,并且均处于一条直线上,故对地震的重新定位的效果不是很明显,如果有更多的海底台站和分布的范围更广,相信重新定位的效果会更好。

4 结语

A、B 和 C 三次定位结果显示,地震台网的分布几何形态对于地震定位精度的影响显著,特别是对于区域地震和地方地震来说,震中和台站之间的方位角和次级方位角大小直接影响了震源参

数的精度。单纯依靠广东省地震局的数据对该地震进行定位时,定位误差较大,主要原因就是广东台网均位于震中的西面,台站分布集中,对地震信号接收的角度有限,不能全面的对该地震进行记录。由于福建台网分布于地震的西北向,B定位较于A定位其台站对震中的环绕角度加大,定位精度也明显优于A定位,但是毕竟陆上台站分布范围局限,这使得海上地震定位精度很受影响。C定位中加上了两个OBS数据使得定位精度有所提升,虽然不甚明显,但是受到两方面条件的约束,其一该地震仅为 M_L 2.8,属于小地震且为近震,故在平面和垂向上的差异小,其二此次测线不是为了收集地震资料而布设,故仅有两台OBS接收到其波形,且这两台OBS位于同一条测线上,距离较近,不利于地震信号的记录分析。

南海北部陆缘是一个强烈的地震带,该区的地震活动以频繁的小、微地震及偶发的中级地震为主,破坏性大地震偶发,历史上曾发生过7.0级以上地震4次,6级以上地震18次^[3],地震频发对该区造成了强烈破坏,导致了严重的人员伤亡和财产损失^[12,22-23]。目前,由于陆上台站的合理布设和国家越来越重视对陆上台网的建设,所以陆上地震台网建设逐步成熟,但是海上地震台网布设工作却鲜受人们关注,台站甚少。以往人们对海上地震的定位仅依靠位于地震一侧的陆上台网,这使得地震定位的精度受限,并且由于海上地震台站的缺乏,我们鲜少观测到远海地震,缺少对远海地震的研究,使得我们对南海北部陆缘缺乏全面的了解。

综上所述,如果海上地震台站增多且合理布设其分布的几何形态,相信会有利于地震信号的接收,这一方面提高沿海地震定位的精度,为后续地震研究打好坚实的基础,有利于对这些板内大震、强震的孕震构造与发震机理的研究,这具有重要防震减灾意义,另一方面可以对远海地震进行及时观测,有利于对南海北部陆缘的全面了解,对南海北部构造演化具有参考价值。

综合以上结果分析与讨论,得到以下几点结论:

(1) 我们利用不同的数据对此次南澳外海域 M_L 2.8地震进行了重新定位,分别为广东台网数据(A定位)、广东福建台网数据(B定位)和广东福建台网加上OBS数据(C定位)。这三组数据所得结果均存在着差异。无论是在震源空间上还是结果误差分析上,A定位和C定位的结果差距相对

于B定位和C定位的结果差距要明显,这可能与这三组定位所利用的台站的方位角和次级方位角间隔有关。

(2) 从震源角度分析,B定位和C定位的震中在平面上相距150m,虽然在平面分布图上几乎重叠,但这个距离相对于一个 M_L 2.8地震来说已是一个很明显的定位差距,如若为一个大震级的远震,其震中距离会非常明显。C定位震源深度介于A定位和B定位震源深度之间,这可以看出加上OBS数据使得定位结果拟合得更好。

(3) 根据Bondaár地震定位精度判据,台网的分布几何形状对定位的精度有很大的影响。三组地震重新定位均符合判据中的台站个数和距离的要求,但方位角和次级方位角间隔却各不相同。加上OBS其方位角和次级方位角间隔会大大减小,从结果精度分析,其水平和垂直误差相对于其他两次定位的误差小,但其走时残差却大于B定位的走时残差,这可能是由于此次地震的发震区域较为特殊,区域内有多条断裂带交汇,构造复杂,故增加了速度模型选取的难度,并且震源靠近该区域内一条强烈的活动断裂带滨海断裂带,这可能也会对地震的定位造成一定的影响。

(4) 南海北部陆缘是一个强烈的地震带,如果参考此次 M_L 2.8地震定位工作结果,增加该区海上地震台站的数量,并合理布设其分布的几何形态,提升该区地震定位的精度对后续的地震研究工作打好坚实的基础,有利于对这些板内大震、强震的孕震构造与发震机理的研究,这具有重要防震减灾意义,另一方面可以对远海地震进行及时观测,有利于对南海北部陆缘的全面了解,对南海北部构造演化具有参考价值。

致谢: 本研究中固定地震台站数据由广东省和福建省地震局提供,OBS数据由2012年国家自然科学基金委南海北部地质地球物理共享航次提供,OBS数据采集的海上作业由“实验2号”全体船员及科考队员完成,丘学林研究员、赵明辉研究员和曹敬贺博士在文章写作过程中提供了很大的指导帮助,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 田玥,陈晓非.地震定位研究综述[J].地球物理学进展,2002,17(1):147-155.
- [2] 孙金龙,徐辉龙,詹文欢,等.南海北部陆缘地震带的

- 活动性与发震机制[J]. 热带海洋学报, 2012, 31 (3): 40-47.
- [3] 任镇寰, 罗振暖, 华卫. 粤闽赣交界地区地震活动若干特征及其地震大形势分析[J]. 华南地震, 2002, 22 (3): 28-38.
- [4] 陈恩民, 黄咏茵. 华南十九次强震暨南海北部陆缘地震带概述[J]. 华南地震, 1984, 4 (1): 11-32.
- [5] 刘以宣, 钟建强, 詹文欢. 南海北部陆缘地震带基本特征及区域稳定性初步分析[J]. 华南地震, 1994, 4 (4): 41-16.
- [6] LüDMANN T, WONG H K. Neotectonic regime on the passive continental margin of the northern South China Sea [J]. Tectonophysics, 1999, 311 (1-4): 113-138.
- [7] 赵明辉, 丘学林, 叶春明, 等. 南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析[J]. 地球物理学报, 2004, 47 (5): 845-852.
- [8] 刘以宣. 华南沿海区域断裂构造分析[M]. 北京: 地震出版社, 1981: 1-120.
- [9] 孙金龙, 徐辉龙, 李亚敏, 等. 南海东北部新构造运动及其动力学机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29 (3): 61-68.
- [10] 陈益明. 华南地区震源机制与应力场特征[J]. 华南地震, 1992, 12 (2): 23 - 31.
- [11] 刘以宣. 华南沿海的活动断裂[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5 (3): 11 - 21.
- [12] 徐辉龙, 丘学林, 等. 南海东北部南澳大地震($M=7.5$)震中区的地壳结构特征与震源构造[J]. 科学通报, 2006, 51: 83-91.
- [13] 康英, 杨选, 吕金水, 等. 广东及邻区地震的震源机制特征[J]. 中国地震, 2005, 2 (3): 320-331.
- [14] 刘瑞丰, 高景春, 陈运泰, 等. 中国数字地震台网的建设与发展[J]. 地震学报, 2008, 30 (5): 533-539.
- [15] 郝天姚, 游庆瑜. 国产海底地震仪研制现状及其在海底结构探测中的应用[J]. 地球物理学报, 2011, 54 (12): 3352-3361.
- [16] 傅莺, 范军. Hypocenter 和 Hypo2000 地震定位方法在攀枝花-会理地震序列中的应用[J]. 四川地震, 2010, (1): 8-12.
- [17] Klein F W. User's guide to HYPOINVERSE-2000, a fortran program to solve for earthquake locations and Magnitudes[R]. U.S. Geological Survey Open File Report, 2007.
- [18] 刘建华, 吴华, 刘福田, 等. 华南及其海域三维速度分布特征与岩石层结构[J]. 地球物理学报, 1996, 39 (4): 483-492.
- [19] Lilwall R C, Francis T J G. Hypocentral resolution of small ocean bottom seismic networks [J]. Geophys J.R., 1987, 54: 721-728.
- [20] Istvaín Bondaár, Stephen C. Myers, et al. Epicentre accuracy based on seismic network criteria [J]. Geophys, 2004, 156: 483-496.
- [21] 徐志国, 刘瑞丰. 收集地震参考事件的研究进展[J]. 地震地磁观测与研究, 2006, 27 (3): 20-24.
- [22] 钟贻军, 任镇寰. 1969 年阳江 6.4 级地震发震构造研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23 (4): 92-98.
- [23] 陈恩民, 黄咏茵. 1605 年海南岛琼州大地震及其发震造的初步探讨[J]. 地震地质, 1979, 1 (4): 37-44.