

南海中央次海盆 OBS 位置校正及三维地震探测新进展

张 莉^{1,3},赵明辉^{1*},王 建^{1,3},贺恩远^{1,3},敖 威²,
丘学林¹,徐辉龙¹,卫小冬^{1,3},张佳政^{1,3}

1. 中国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,广东广州 510301

2. 中国海洋石油深圳分公司技术部,广东广州 510240

3. 中国科学院大学,北京 100049

摘要:南海中央次海盆首次开展的三维海底地震仪(ocean bottom seismometer, OBS)探测试验,对于全面认识南海扩张脊处速度展布特征及海底扩张历史有着重要意义。海底地震仪的位置是研究三维地震结构的关键参数之一,高精度的三维OBS数据处理,决定着后期地震结构反演模型的分辨率与准确性。利用直达水波走时信息,综合最小二乘法反演原理,并采用蒙特卡罗法模拟OBS降落海底的过程,完成了南海中央次海盆试验区39台OBS数据格式转换与位置校正工作;同时探讨了蒙特卡罗法应用于位置校正的精度问题。处理后OBS综合记录剖面中展示了多组清晰可靠、来自珍贝—黄岩火山链下深部结构中的P波震相,如Pg、PmP和Pn震相,为下一步南海中央次海盆的三维层析成像奠定了坚实数据基础。

关键词:海底地震仪;位置校正;蒙特卡罗法;震相;南海中央次海盆;海洋学。

中图分类号: P714; P716

文章编号: 1000-2383(2013)01-0033-10

收稿日期: 2012-05-10

Correction of OBS Position and Recent Advances of 3D Seismic Exploration in the Central Sub-Basin of South China Sea

ZHANG Li^{1,3}, ZHAO Ming-hui^{1*}, WANG Jian^{1,3}, HE En-yuan^{1,3}, AO Wei², QIU Xue-lin¹,
XU Hui-long¹, WEI Xiao-dong^{1,3}, ZHANG Jia-zheng^{1,3}

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China

2. Dept. of Science and Technology, Shenzhen Branch of CNOOC, Guanzhou 510240, China

3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: A three-dimensional (3D) Ocean Bottom Seismometer (OBS) seismic exploration is implemented for the first time in the central sub-basin of South China Sea (SCS). The velocity distribution in 3D high spatial variability is significant to understand the history of expansion and evolution of SCS. However, high-precision 3D data processing determines the resolution and accuracy for the further seismic structure, where OBS position is one of the key parameters in seismic structural study. We use the travel time data of direct water waves to simulate the process of OBS landing on seafloor employing the least squares method and Monte Carlo method. Finally the corrections of OBS positions have been achieved for a total of 39 OBSs in the central sub-basin of SCS experiment. Meanwhile the accuracy of Monte Carlo method for relocation has been discussed. A few clear and reliable P-wave seismic phases, such as Pg, PmP and Pn, were discovered in the OBS seismic record sections, which come from deep crust or upper mantle beneath the Zhenbei-Huangyan volcanic chains. These abundant seismic phases provide a strong data foundation to the further modeling of 3D tomography for the central sub-basin of SCS.

Key words: ocean bottom seismometer (OBS); correction of position; Monte-Carlo method; seismic phases; central sub-basin of South China Sea; oceanography.

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(No. 91028002);国家自然科学基金项目(Nos. 41076029, 41176053)。

作者简介:张莉(1989—),女,硕士,研究方向为海洋深部地球物理。E-mail: zephy@foxmail.com

* 通讯作者:赵明辉,E-mail: mhzhao@scsio.ac.cn

南海是我国走向深海研究的重要突破口(汪品先,2009). 中央次海盆是南海 3 个深海盆之一(图 1a), 其北界为北部陆坡, 南界为礼乐滩地块, 东面与马尼拉海沟俯冲带相临, 西面与西北次海盆、西沙—中沙微板块和西南次海盆相接, 海盆内展布近东西走向的珍贝—黄岩海山链. 通过对比南海海盆的磁异常条带, 前人初步确定了它的扩张年代, 但至今对于整个海盆扩张年龄与机制等基本科学问题仍存在分歧(Briais *et al.*, 1993; 姚伯初等, 1994; 李春峰等, 2009; 李家彪等, 2011; 郝天珧等, 2011). 中央次海盆内沿残余扩张脊分布的珍贝—黄岩海山链, 是扩张后残余岩浆的表现, 还是后期岩浆活动形成的海山? 沿扩张脊分布的海山链下方的三维地震结构及构造特征将提供南海中央次海盆形成演化过程的重要信息, 深部结构探测将提供更为直接的速度与岩性结构方面的证据. 然而, 目前南海已有的海底地震仪(ocean bottom seismometer, OBS)探测和研究大都集中在北部陆缘带, 在南部陆缘带仅分布有两条 OBS 测线, 而在南海中央次海盆一直是深地震探测空白带(丘学林等, 2012). 2011 年, 在南海中央次海盆实施的大规模的三维 OBS 探测实验, 不仅推动了国产 OBS 的发展与成熟(丘学林等, 2012), 同时对于探讨南海形成演化“骨架”及其深部动力学机制具有重要的科学意义.

OBS 位置校正是获取深部地震结构的关键工作(王彦林等, 2007; Oshida *et al.*, 2008; 薛彬等, 2008). 在对 OBS 原始数据进行解编及可视化处理后, 准确拾取 SEGY 格式地震剖面记录中各种震相走时是保证最终结果准确性的重要因素(Ao *et al.*, 2010). 为了保证有限数量的 OBS 尽可能全面地记录到整个研究区域内气枪震源折射和反射震相, 实验前根据气枪激发波形与最佳穿透距离等参数(丘学林等, 2007; 赵明辉等, 2008), 精确设计了 OBS 的投放位置和测线方向(Perice and Day, 2002). 但在海上作业过程中, 由于海风、海流等环境因素影响, 自由落体的 OBS 在降落至海底的过程中会偏离设计点一定距离, 从而影响 Pg、PmP、Pn 等深部震相的走时精度(Shiobara *et al.*, 1997; Oshida *et al.*, 2008). 因此, 高质量的三维 OBS 探测数据及 OBS 位置校正是整个三维地震资料处理中最基础的工作, 同时也是后期通过计算模拟获得南海中央次海盆扩张脊附近的三维地震结构模型最重要的环节之一. OBS 校正结果直接影响着后继模型的精度, 对于南海深部地壳结构以及其他相关科学问题的研究有着

基础性意义.

1 南海中央次海盆三维海底地震仪探测实验

2011 年 5~6 月, 由中国科学院南海海洋研究所、国家海洋局第二海洋研究所、广东省地震局和广州海洋地质调查局等合作单位组成的科研调查队, 利用“实验 2 号”船, 在大容量气枪枪阵布设与激发作业下, 顺利完成了南海中央次海盆大规模的三维海底地震仪探测实验.

实验中使用了 42 台 OBS, 其中, 国产 7 通道宽频带的 I-7C 型单球 OBS 有 32 台(图 1b), 其频带为 60~50 Hz, 动态范围大于 120 dB, 整体功耗小于 0.3 W(阮爱国等, 2010; 郝天珧和游庆瑜, 2011), 实验中设置的采样率为 125 Hz; 德国 GeoPro 公司制造的 Sedis IV 型短周期自浮式四分量 OBS 有 10 台, 频带为 2~100 Hz, 基频为 4.5 Hz, 动态范围大于 120 dB, 采样率设为 250 Hz. 所有 OBS 沿 4 条主测线分布(图 1b), 其中南北向主测线 1 条(G0G8), 东西向主测线 3 条(A2M2, A4M4, A6M6), OBS 间隔约 10 km, 整个 OBS 台阵呈“丰”字型分布(图 1b).

震源系统由 4 支大容量 1 500 L 型号的 BOLT 气枪组成, 单枪容量 $2.46 \times 10^{-2} \text{ m}^3$, 震源总容量 $9.83 \times 10^{-2} \text{ m}^3$. 大容量气枪首先沿 4 条主测线放炮, 然后沿 15 条辅测线放炮, 其中东向辅助测线 4 条, 南北向辅助测线 10 条, 圆形测线 1 条, 构成了网格状测线分布(图 1b). 主测线和辅助测线累计长度 2 000 km, 航渡测线累计长度 500 km, 航渡期间继续放炮, 因而, 总计放炮测线长度 2 500 km, 共激发 8 252 次, 放炮期间同步进行了单道电缆测量, 获得单道反射地震剖面 2 500 km. 最终回收 41 台 OBS, 其中 OBS36 丢失, 仪器回收率近 98%. 数据回放和检查表明大部分台站数据质量良好, 但其中有 2 台没有记录到新的数据(OBS32 和 OBS33), 可有效利用 OBS 数据共有 39 台. 此次实验实施过程中海况良好, 获得的高质量实验数据为后期地震结构研究奠定了良好的基础.

2 海底地震仪位置校正

自由落体投放的 OBS 由于受到海流、海风等因素影响, 其落点位置会在一定范围内偏离设计落点.

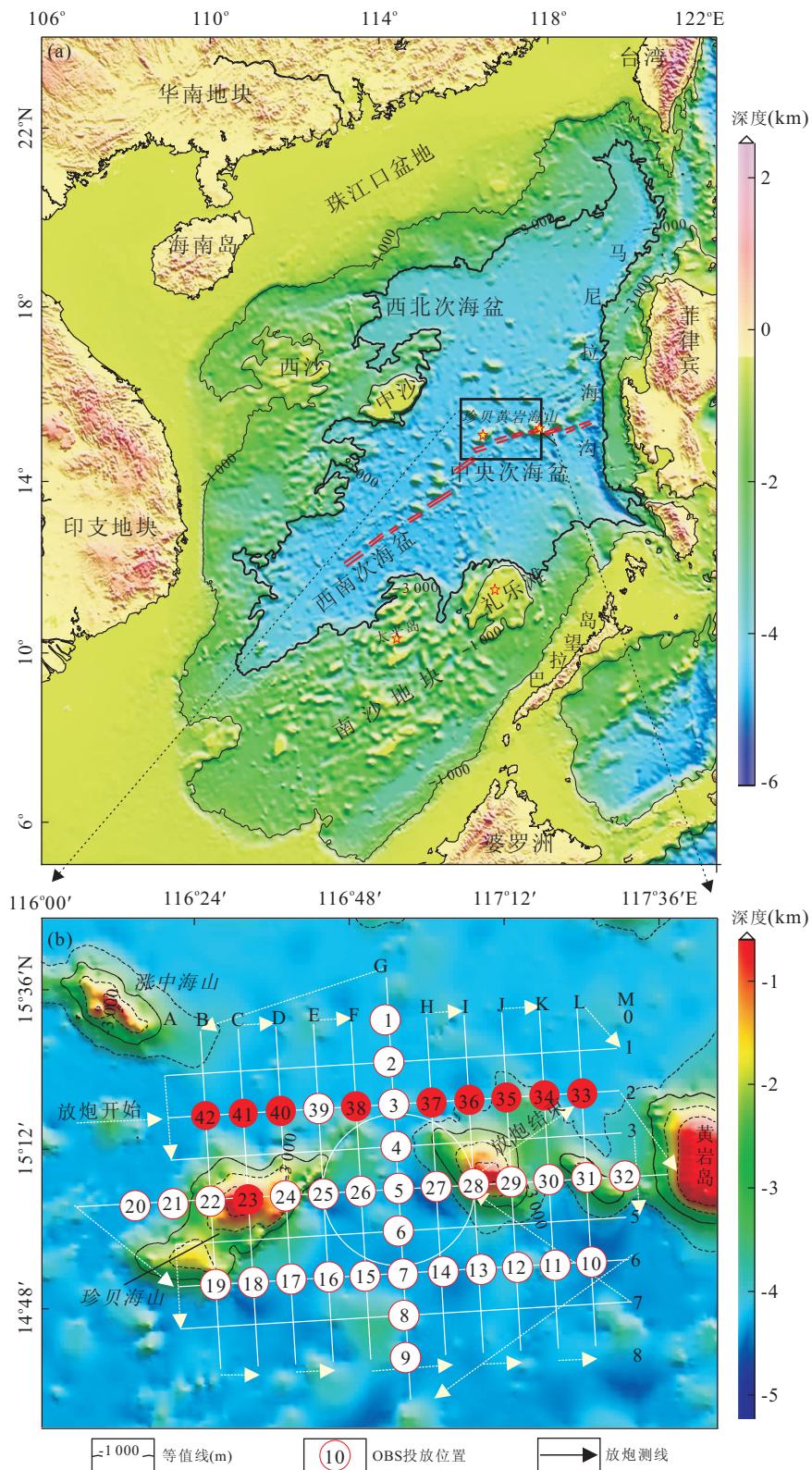


图 1 南海中央海盆 OBS 探测范围与测网布设

Fig. 1 Key plan of OBS exploration in central sub-basin of SCS

a. 区域水深图, 矩形框表示探测区域, 红色双线表示扩张脊(据 Briais *et al.*, 1993); b. 为 OBS 台阵及放炮测线的布设。白色圆圈表示国产 OBS, 红色圆圈表示德国 OBS

为了获取高精度的震相特征,OBS 位置校正成为数据处理中最重要的基础工作之一.一定要确保从原始数据转换到 SEGY 格式数据的可靠性,这是因为 OBS 位置校正结果的好坏很大程度上决定于各 SEGY 格式数据中显示的直达水波走时信息.

在进行 OBS 位置校正之前,首先需要整理以下数据及参数:(1)OBS 投放点坐标.一般地,在海流、海风作用下,OBS 在投放和回收阶段都存在一定程度地偏离,但回收点坐标还受到上浮与寻找时间的影响,因此将投放点坐标作为位置校正的初始值.(2)精确的水深数据.本次校正采用 30 分重力水深数据,以获取 OBS 所在位置的水深值.(3)放炮时间及炮点精确位置.由于实验中气枪震源位于定位 GPS 天线后面 47 m,海面下 10 m.所以炮点位置要做相应的校正(敖威等,2010).(4)直达水波走时信息.经过 OBS 上方的两条放炮测线(少数台站仅一条)对应的直达水波走时信息,是位置校正中的关键参数.(5)平均海水声波速度 V_w .可以利用直达水波走时,结合炮点、OBS 设计点位置等,反演得到平均海水声速.

上述准备工作完成后,采用 Matlab 语言编写了位置校正程序,OBS 位置校正(图 2)主要分为以下

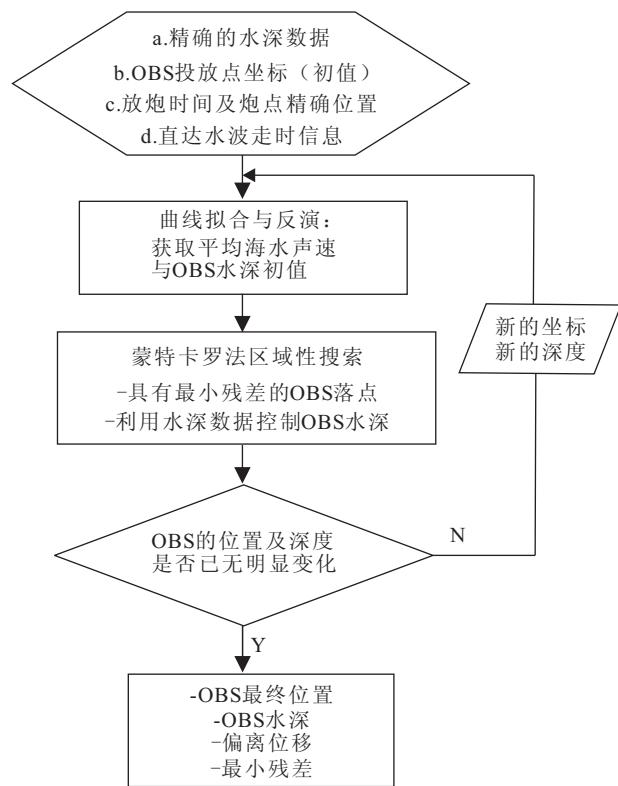


图 2 OBS 位置校正流程

Fig. 2 The flow chart of OBS relocation

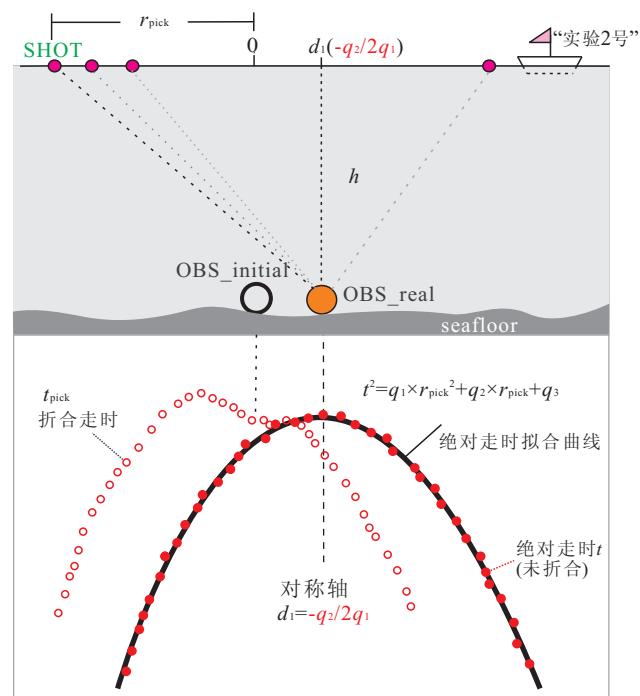


图 3 拟合直达水波走时曲线示意

Fig. 3 Schematic diagram of fitting the travel-time curve of direct water waves

几个步骤:

(1) 拾取每个台站 SEGY 地震记录中的直达水波走时信息,包括 r_{pick} (偏移距), t_{pick} (地震剖面拾取的直达水波折合走时), i_d_{pick} (炮号) 等,利用二次曲线拟合直达水波走时,初步反演出海水的平均声速 V_w 和 OBS 水深 h . 由于 OBS 位置发生了偏移,直达水波走时曲线与偏移距的一次项有关(公式(1)). 因此,用下面二次双曲线进行拟合反演(图 3):

$$t^2 = \frac{(r_{\text{pick}} + d_1)^2 + h^2}{(V_w)^2} = q_1 \cdot r_{\text{pick}}^2 + q_2 \cdot r_{\text{pick}} + q_3, \quad (1)$$

其中, q_1, q_2, q_3 为二次双曲线拟合系数.

进一步推导可得:

$$\begin{aligned} d_1 &= -\frac{q_2}{2q_1}, \\ V_w &= \frac{1}{\sqrt{q_1}}, \\ h &= \sqrt{\frac{q_3}{q_1} - \left(\frac{q_2}{2q_1}\right)^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

反演得到的水波速度 V_w 、OBS 水深 h ,以及拾取的直达水波走时信息,是整个位置校正过程中,决定 OBS 位置精度的关键参数.

(2) 蒙特卡罗方法(Monte Carlo Method)搜索

残差最小的 OBS 位置。利用服从标准正态分布的数万个随机点模拟,OBS 在海底自由降落过程中可能到达的位置,根据 OBS 设计点与回收点位置关系,估计海流造成 OBS 最大偏移距约为 2 km,以 OBS 投放点为中心,以 3 km 为搜索半径圈定 OBS 可能着落的范围 F(图 4a)。计算 F 范围内每一个蒙特卡

罗点(MC point)与炮点之间的直达水波走时曲线,同时计算其与观测走时之间的均方根残差 RMS(Root Mean Square)。最后找到 RMS 最小值所对应的经纬度坐标,即为真实落点。

(3)利用精确的水深数据进行深度控制。利用蒙特卡罗法搜索出最小 RMS 坐标点后,在水深网格

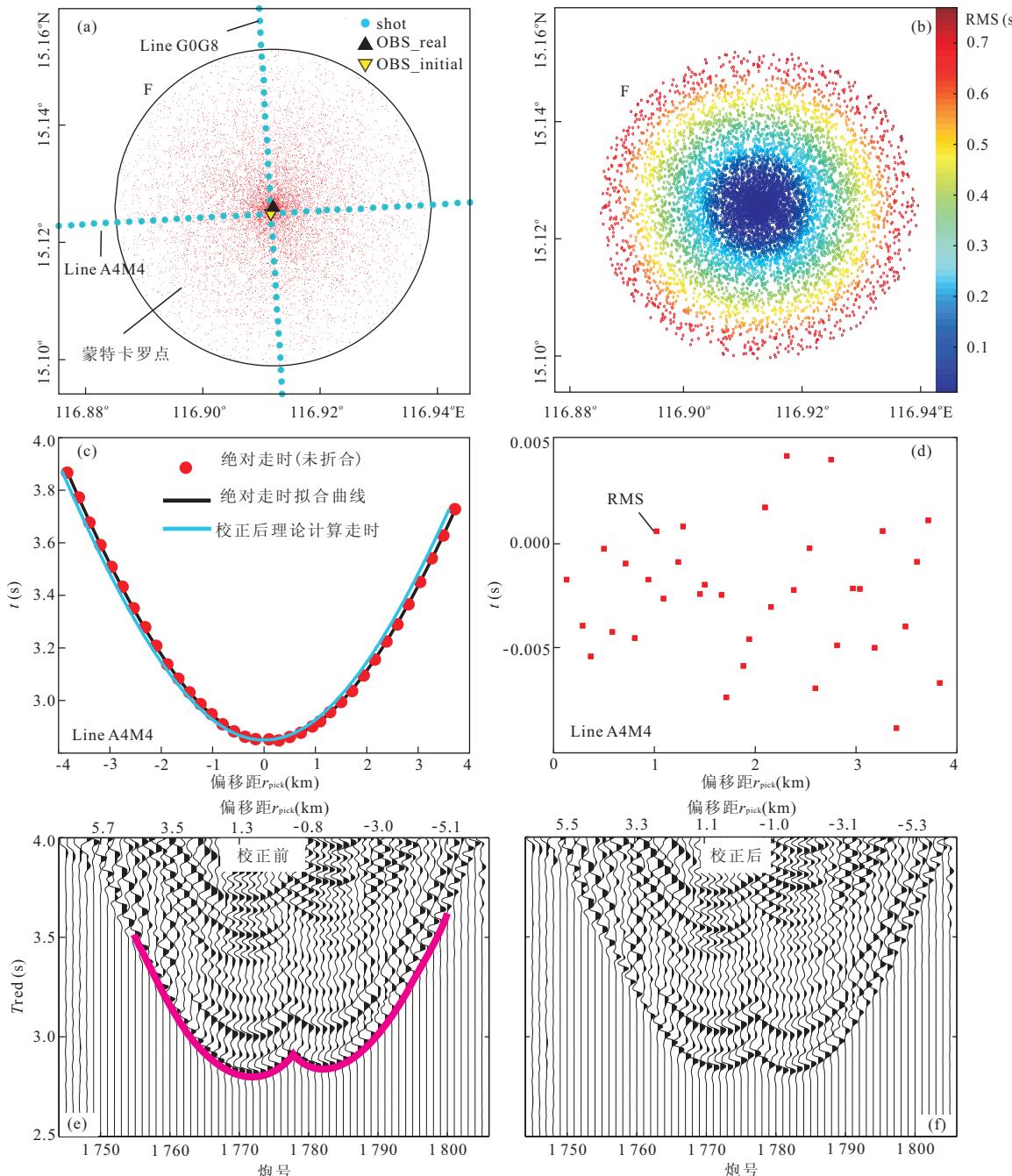


图 4 OBS05 台站蒙特卡罗法位置校正

Fig. 4 Monte-Carlo method for OBS05 positioning

a. 搜索最小残差点;b. 所有残差分布;c. 位置校正后,理论计算走时与绝对走时曲线对比;d. 理论计算走时与绝对走时残差的均方根 RMS 分布;e,f. 分别为 OBS05 台站 A4M4 测线位置校正前后直达水波特征对比的 SEGY 剖面图

表1 南海中央次海盆 OBS 位置校正结果
Table 1 Results of OBSs' relocation in the central sub-basin of SCS

OBS	Before- location		After- location		V_w (km/s)	h (m)	RMS(s)	D(m)			t -adjust(s)
	Lon(°E)	Lat(°N)	Lon(°E)	Lat(°N)				to line1	to line2	all	
1	116.88776	15.52209	116.88998	15.52274	1.500	4 212.9	0.009	304.2	304.2	1.001	
2	116.89381	15.42297	116.89373	15.41991	1.499	4 226.5	0.018	426.5	-5.9	426.5	1.101
3	116.89957	15.32351	116.90009	15.32456	1.500	4 111.0	0.011	70.7	106.0	127.4	0.050
4	116.90558	15.22435	116.90807	15.22508	1.494	4 231.1	0.011	319.2	-97.9	333.9	0.000
5	116.91159	15.12497	116.91243	15.12553	1.502	4 274.6	0.004	109.8	50.3	120.8	0.050
6	116.91748	15.02561	116.91795	15.02593	1.506	4 182.3	0.009	37.1	653.1	654.2	0.170
7	116.92344	14.92671	116.92297	14.92755	1.501	4 322.0	0.008	205.7	499.1	539.8	0.061
8	116.92975	14.82704	116.92950	14.83053	1.502	4 225.2	0.017	-96.3	498.2	507.4	1.090
9	116.93618	14.72777	116.93702	14.72763	1.504	4 261.0	0.008	90.1	226.2	243.5	1.020
10	117.38784	14.95242	117.38600	14.95113	1.500	4 321.5	0.011	169.2	334.8	375.1	1.100
11	117.29437	14.94754	117.29294	14.94654	1.483	3 937.4	0.026	390.8	-370.6	538.6	1.060
12	117.20200	14.94200	117.20022	14.93946	1.491	4 283.1	0.051	586.2	756.6	957.1	-0.055
13	117.10926	14.93667	117.10756	14.93571	1.495	4 282.5	0.011	-289.8	392.7	488.1	0.085
14	117.01644	14.93153	117.01500	14.93035	1.516	4 281.5	0.026	375.4	-232.8	441.7	0.135
15	116.83071	14.92095	116.82988	14.92026	1.500	4 281.0	0.010	-40.9	114.7	121.8	0.090
16	116.73806	14.91568	116.73726	14.91451	1.500	4 287.8	0.008	157.9	-35.7	161.9	0.100
17	116.64523	14.90997	116.64450	14.90597	1.486	4 079.1	0.022	146.1	-41.9	152.0	1.075
18	116.55244	14.90488	116.55288	14.90376	1.498	3 792.9	0.008		286.1	286.1	0.060
19	116.45959	14.89932	116.46001	14.89806	1.508	2 766.9	0.027	52.1	452.7	455.7	0.150
20	116.26139	15.08674	116.26161	15.08400	1.507	4 295.5	0.007	-259.7		259.7	1.105
21	116.35446	15.09231	116.35423	15.09531	1.500	3 954.0	0.002	-252.1		252.1	1.082
22	116.44692	15.09791	116.44823	15.09783	1.497	1 844.1	0.037	-150.7	221.0	267.5	0.150
23	116.54001	15.10333	116.54086	15.10278	1.499	949.1	0.044	35.7	88.6	95.5	0.210
24	116.63305	15.10878	116.63563	15.10502	1.504	1 900.0	0.013	-106.1	41.3	113.9	0.102
25	116.72640	15.11419	116.72707	15.11460	1.501	3 566.2	0.013	85.7	392.3	401.6	-0.100
26	116.81962	15.11974	116.82019	15.11926	1.502	3 977.0	0.024	36.1	354.3	356.1	0.000
27	117.00472	15.12999	117.00521	15.12835	1.505	4 223.2	0.005	42.1	146.9	152.8	0.100
28	117.09750	15.13546	117.09819	15.13527	1.508	1 878.0	0.014	122.3	207.8	241.1	0.050
29	117.19049	15.14069	117.18822	15.14399	1.499	1 016.2	0.112	-157.2	658.5	677.0	0.800
30	117.28335	15.14584	117.28379	15.14429	1.486	3 733.0	0.230	-95.6	-169.6	194.7	-0.200
31	117.37630	15.15095	117.37619	15.15260	1.500	2 338.8	0.011	16.7	14.1	21.9	0.122
34	117.27246	15.34454	117.27323	15.34515	1.447	3 987.9	0.055	53.4	-165.9	174.3	0.084
35	117.17866	15.33927	117.17994	15.33973	1.500	4 040.2	0.016	31.6	-239.1	241.2	0.169
37	116.99272	15.32902	116.99324	15.32892	1.500	4 218.7	0.051	159.3	-84.5	180.3	0.200
38	116.80660	15.31809	116.80697	15.31963	1.500	4 236.8	0.009	-115.6	-5.5	115.7	0.150
39	116.71365	15.31261	116.71390	15.31188	1.505	4 211.0	0.027	-360.4	196.8	410.6	0.100
40	116.62066	15.30731	116.62042	15.30706	1.481	4 216.4	0.036	-248.3	180.9	307.2	0.022
41	116.52764	15.30183	116.52730	15.30101	1.501	4 292.7	0.023	358.1	584.9	685.8	0.115
42	116.43465	15.29644	116.43405	15.29540	1.501	4 258.8	0.014	-709.7	16.5	709.9	0.120

注:(1)D为OBS沿某一放炮方向相对于校正前位置的偏离距离(line1表示东西向测线, line2表示南北向测线,后文同),以放炮方向为正;(2) V_w 为反演过程中得到的海水波速, h 为在重力水深数据控制下,通过反演得出OBS最终落点所对应的深度值;(3)RMS为走时残差的均方根.

数据中找到距校正后位置最近的坐标点的水深值,再以校正后的位置作为搜索初值进行步骤(2),直到计算结果满足精度要求,最终获得OBS的经纬度坐标及深度.

下面以OBS05台站为例说明.图4b显示了蒙特卡罗法生成的所有随机点的走时残差,残差分布在以校正后的落点为圆心,收敛于搜索半径3 km的圆内,未出现个别发散点或畸形点(图4b).经过多

次重复搜索,每次按标准正态分布随机生成10 000个点(图4a),最终得到OBS05校正后的经纬度坐标(116.91243°E, 15.12553°N),水深值为4 274.6 m.位置校正后,理论计算走时与观测绝对走时与之间的差异较小(图4c, 4d).同时比对校正前后该台站直达水波走时曲线特征(图4e, 4f),校正前,直达水波折合走时曲线不对称(图4e),校正后的直达水波走时曲线显示了较好的对称性(图4f),说明校正后的

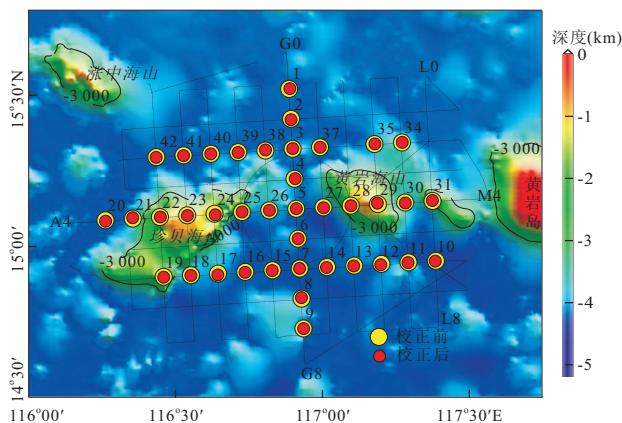


图 5 南海中央次海盆 OBS 位置校正结果及实际炮点测线
Fig. 5 Results of OBS position correction in the central sub-basin of SCS

图中点线为校正后炮点,标记 G0G8、L0L8 和 A4M4 的测线分别对应于图 6 中的 SEGY 剖面

表 2 OBS05 与 OBS21 台站重复四次位置校正后的结果

Table 2 Results of four times relocation on OBS05 and OBS21

OBS	校正次数	Lon(°E)	Lat(°N)	<i>h</i> (m)	RMS(s)
5	1	116.91243	15.12555	4 274.5	0.004
	2	116.91245	15.12554	4 274.6	0.004
	3	116.91243	15.12554	4 274.5	0.004
	4	116.91243	15.12553	4 274.6	0.004
21	1	116.35423	15.09545	3 954.8	0.003
	2	116.35422	15.09541	3 954.7	0.003
	3	116.35423	15.09531	3 954.0	0.002
	4	116.35424	15.09512	3 952.7	0.002

位置更接近于 OBS 的实际落点。OBS05 台站位置校正结果中走时残差的均方根 RMS 在 10 ms 以内(图 4d),这样的精度保证了此次实验后期模型工作的顺利进行。

在对南海中央次海盆三维地震探测数据处理基础上,运用相同方法与程序,共完成了 39 台 OBS 的位置校正(图 5),从位置校正结果(表 1)可以看出:利用交叉测线的直达水波信息对 OBS 位置进行校正的方法,对于大部分偏离不大或两条测线上声速反演结果相差不大的 OBS 台站是有效且准确的;OBS 经过位置校正后得到的落点,其理论走时与观测数据的绝对走时之间的残差 RMS 较小,只有少数台站(OBS29 和 OBS30)因复杂地形影响,走时残差较大,而大部分 OBS 校正计算的 RMS 值均稳定在 30 ms 以内(表 1)。理论上讲,当 RMS 值趋近零时才能更好地说明位置校正的准确性,但分析全局搜索中反演海水声速 V_w 、反演 OBS 水深的过程发

现,该 RMS 值并不能代表蒙特卡罗算法的精度,因为该 RMS 值很大程度上还与下列因素有关,如:直达水波走时拾取的不确定性,反演得出的声速是一个平均值(一般地,海水介质并不是各向同性的),以及炮点校正中的误差等。

蒙特卡罗算法不仅本身计算精度高,并且其计算结果也是非常稳定的。表 2 给出了对 OBS05 和 OBS21 两个台站重复校正试验的结果。统计数据显示不仅校正后位置点的坐标很稳定,其最小走时残差也稳定在毫秒级。该结果说明了本文运用的校正方法所得到的最小残差对应的 OBS 位置不是随机或者偶然的点,方法本身具有较高准确度。

南海中央次海盆三维地震探测实验中,39 个 OBS 台站的位置校正结果(图 5)展示了校正后的台站位置与实验投放点间的关系,其中第 32 和 33 台站没有数据下载,第 36 台 OBS 丢失,图 5 中未标示这些投放点坐标。通过该结果与 2010 年完成的西南印度洋中脊实验 A 区的 OBS 位置校正(敖威等,2010)对比分析发现,中央次海盆实验中所有 OBS 的偏离相对较小(表 1),而西南印度洋实验区 OBS 在自由释放到海底过程中偏离设计点的幅度远大于南海中央次海盆中的实验情形。结合两次实验实施过程推测,南海中央次海盆探测实验期间良好的海况是 OBS 位置偏离较小的重要原因之一。

3 珍贝—黄岩海山链下震相初步识别

位置校正后,重新转换 SEGY 格式数据,绘制各 OBS 台站综合地震记录剖面图(Cohen and Stockwell, 1995),以便对南海中央次海盆内的震相进行识别。为了直观地对研究区域的记录信号进行震相识别和对比,对各台站的地震记录以 6 km/s 的速度进行折合,得到综合地震记录剖面图。根据震相对比原则及各震相记录特征,对珍贝—黄岩岛海山链下的 P 波震相进行识别。OBS05 台站在主测线 A4M4 以及南北测线 G0G8 的地震剖面、OBS31 主测线 A4M4 以及南北测线 L0L8 的地震剖面,均能识别出几组能量较强的 P 波波组,如:直达水波(Pw)、地壳内部折射震相(Pg)、上地幔的折射震相(Pn)和莫霍面的反射震相(PmP)等。Pw 是气枪信号激发后经过海水介质传播,直接反射至 OBS 接收器的震相,即是前期用于 OBS 位置校正的重要数据。Pg 震相是来自结晶基底以下地壳内部的折射波,是出现最多、信号最强的一组震相,视速度随炮

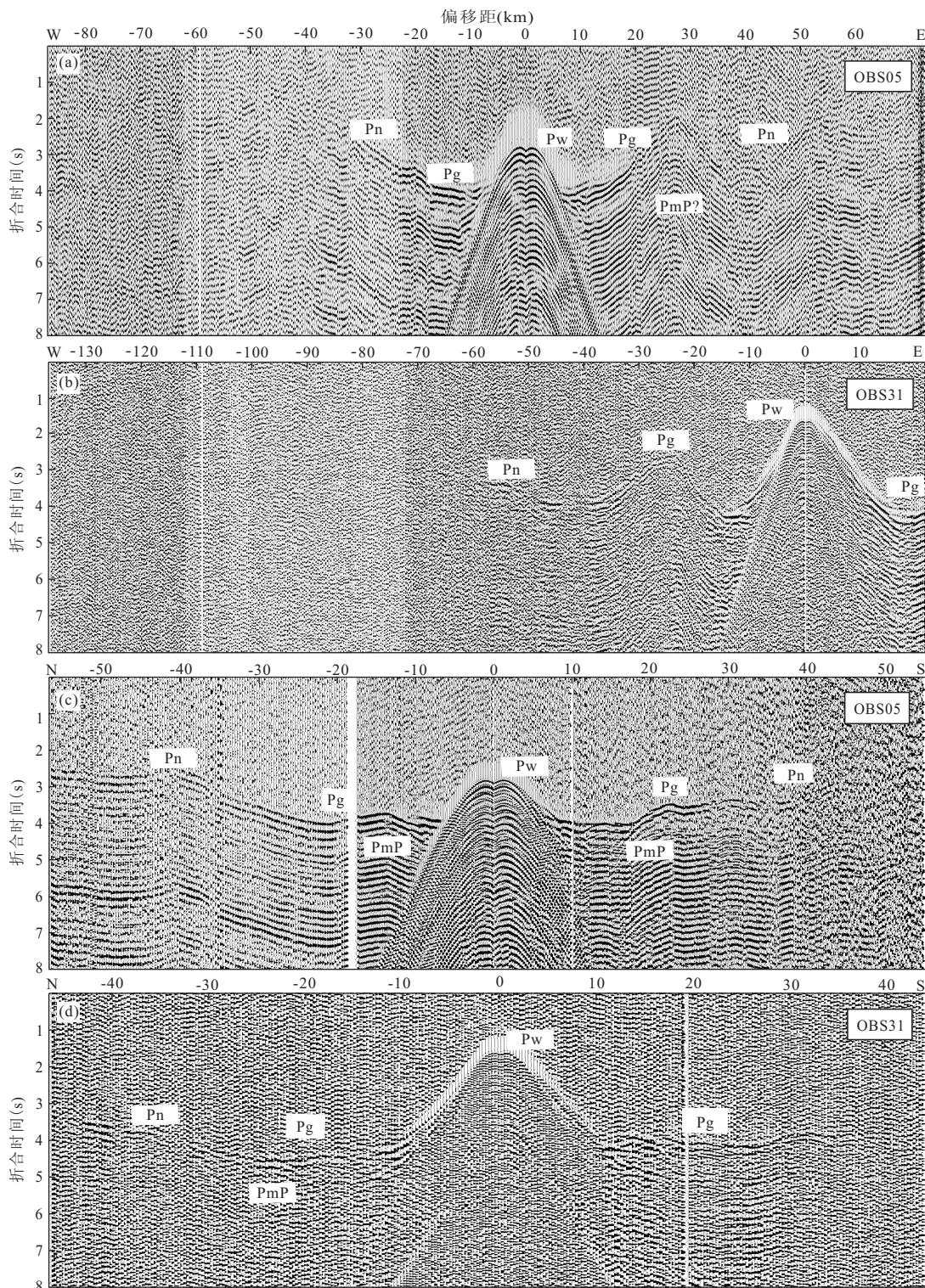


图 6 综合地震记录剖面与震相识别

Fig. 6 Seismic record sections of OBS05 and OBS31 and seismic phases identification

a 和 b 分别为 OBS05 与 OBS31 台站在相同炮点 A4M4 测线上的综合记录剖面; c. OBS05 台站沿 G0G8 测线方向的记录剖面;d. OBS31 台站沿 G0G8 测线方向的记录剖面图. 其中折合速度均为 6 km/s,以上剖面均是 OBS 位置校正后的地震剖面,带通滤波器 $f=1,4,13,25$ Hz

检距增大而缓慢增加; Pn 和 PmP 分别是来自地壳底部莫霍面的首波震相和反射震相, Pn 较弱, 追踪距离较短, PmP 震相走时曲线呈现双曲线特征, 在

一定范围内滞后于 Pg 震相, 属于后至震相.

在平行于珍贝—黄岩海山链的地震剖面中(图 6a, 6b), OBS05 台站位于剖面中间位置(图 6a), 东

西两侧各分布珍贝海山与黄岩海山(A4M4 测线),初至震相的视速度随偏移距增加而变大,在地震波经过海山处(偏移距离 $-40\text{ km}, 30\text{ km}$),主要是由于地形凸起,地震波在水中传播的走时减少,走时大幅度减少;测线中的左半支 $-20\sim-40\text{ km}$ 和右半支 $20\sim50\text{ km}$ 仍可追踪到来自海山下面、深达Moho 面的折射震相 Pn(图 6a),而来自 Moho 面的反射震相 PmP 不是很清楚,需要进一步确认。另一个台站,OBS31 台站位于 A4M4 测线最东端的台站(图 5),其综合地震记录剖面(图 6b)显示,其左半支震相发育较好,在偏移距 $-5\sim-50\text{ km}$ 可连续追踪到 Pg 震相,在 $-20\sim-30\text{ km}$ 处由于黄岩海山影响,Pg 震相呈现上拱状态;在偏移距 $-55\sim-70\text{ km}$ 可追踪 Pn 震相,在偏移距 $-40\sim-60\text{ km}$ 可能有 PmP 震相,根据 Pg、Pn 与 PmP 震相之间的关系,初步估算 OBS31 与 OBS05 台站之间黄岩海山下方(OBS29 处)的地壳厚度约为 8 km (按偏移距 50 km 、地壳平均速度 6.0 km/s 计算),属于偏厚的洋壳。

在垂直于珍贝—黄岩海山链的两条地震剖面中(图 6c,6d),即 G0G8 与 L0L8 测线,均横穿残余扩张脊,反映了较为相似的深部结构信息。OBS05 台站测线 G0G8 地震剖面(图 6c)显示,北侧地形高于南侧,走时偏快,左半支 $-6\sim-60\text{ km}$ 与右半支 $5\sim35\text{ km}$ 范围内能连续追踪到清晰的 Pg 震相,右半支 $35\sim50\text{ km}$ 能追踪到 Pn 震相,另外,其左右半支分别在 $-5\sim15\text{ km}$ 和 $15\sim25\text{ km}$ 处出现 PmP 震相,说明 PmP 震相下方的洋壳厚度较薄,估计为 4 km 。OBS31 台站 L0L8 测线记录剖面(图 6d)上,台站两侧地形高差相近,两侧震相较为对称,在偏移距 $-10\sim-30\text{ km}$ 和 $10\sim40\text{ km}$ 范围可追踪到 Pg 震相,在左半支 $-30\sim-40\text{ km}$ 可追踪 Pn 震相,只是台站下方由于黄岩海山的影响,该剖面的直达水波震相有些模糊;所有这些震相均需要在今后地震结构射线追踪模拟中开展进一步地识别与确认。

4 结论

OBS 探测实验是研究深部地震结构的有力手段,OBS 的精确位置是关键参数之一,是后期地震模型研究与分析的基础。本文完成了南海中央次海盆 OBS 探测实验中 39 个 OBS 台站的位置校正工作,同时对海盆内珍贝—黄岩岛火山链下的地震震相进行了初步识别与分析,综合以上工作得到以下两点结论:

(1)位置校正结果表明,综合蒙特卡罗法,利用经 OBS 的交叉测线直达水波信息对其位置进行校正的方法,对于多数 OBS 台站是有效而准确的,其精度一般稳定于 30 ms 以内,取平均水速为 1.5 km/s 计算,位置校正误差在 45 m 以内;只有少数台站(OBS29,OBS30)因地形复杂或信号记录因素导致残差较大。

(2)在垂直与平行于珍贝—黄岩海山链的 4 条综合地震记录剖面中,均识别出多组清晰可靠的来自地壳深部的 P 波震相,说明此次实验数据质量良好,为下一步深部结构研究提供了坚实的数据保证;根据各地震相关系,初步估算 A4M4 主测线中黄岩海山下方的地壳厚度约为 8 km ,OBS05 下方约为 4 km ,各地震相及地壳厚度将在今后地壳结构模拟工作中进行再次确认。

致谢:感谢此航次调查中的全体船员及科调队员所付出的努力,感谢中国科学院地质与地球物理研究所和国家海洋局第二海洋研究所在仪器与人员方面的大力支持!

References

- Ao, W. , Zhao, M. H. , Qiu, X. L. , et al. , 2010. The Correction of Shot and OBS Position in the 3D Seismic Experiment of the SW Indian Ocean Ridge. *Chinese J . Geophys.* , 53(6):1072—1081 (in Chinese with English abstract). doi: 10. 3969/j. issn. 0001—5733. 2010. 12. 022
- Briais, A. , Patriat, P. , Tapponnier, P. , 1993. Updated Interpretation of Magnetic Anomalies and Seafloor Spreading Stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary Tectonics of Southeast Asia. *J. Geophys. Res.* , 98(B4): 6299—6328.
- Cohen, J. K. , Stockwell, J. W. , 1995. The New SU User's Manual. Colorado School of Mines, USA, 1—40.
- Hao, T. Y. , You, Q. Y. , 2011. Progress of Homemade OBS and Its Application on Ocean Bottom Structure Survey. *Chinese J. Geophys.* , 54(12): 3352—3361 (in Chinese with English abstract). doi: 10. 3969/j. issn. 0001 — 5733. 2011. 12. 033
- Hao, T. Y. , Xu, Y. , Sun, F. L. , et al. , 2011. Integrated Geophysical Research on the Tectonic Attribute of Conjugate Continental Margin of South China Sea. *Chinese J . Geophys.* , 54(12): 3098—3116 (in Chinese with English abstract). doi: 10. 3969/j. issn. 0001—5733. 2011. 12. 011
- Li, C. F. , Wang, P. X. , Dieter, F. , et al. , 2009. Opening of the South China Sea and Its Implications for Southeast

- Asian Tectonics since the Late Mesozoic. *Advances in Earth Science*, 24(12): 1339—1351. (in Chinese with English abstract).
- Li, J. B., Ding, W. W., Gao, J. Y., et al., 2011. Cenozoic Evolution Model of the Seafloor Spreading in South China Sea: New Constraints from High Resolution Geophysical Data. *Chinese J. Geophys.*, 54(12): 3004—3015 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.003
- Oshida, A., Kubota, R., Nishiyama, E., et al., 2008. A New Method for Determining OBS Positions for Crustal Structure Studies, Using Airgun Shots and Precise Bathymetric Data. *Exploration Geophysics*, 39, 15—25.
- Peirce, C., Day, A. J., 2002. Ocean-Bottom Seismograph Tomographic Experiments—A Consideration of Acquisition Geometries Vs. Resource. *Geophys. J. Int.*, 151, 543—565.
- Qiu, X. L., Chen, Y., Zhu, R. X., et al., 2007. The Application of Large Volume Air Gun Sources to the Onshore-Offshore Seismic Surveys: Implication of the Experimental Results in Northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 52(4): 553—560. (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X. L., Zhao, M. H., Xu, H. L., et al., 2012. Important Processes of Deep Seismic Surveys in the South China Sea: Retrospection and Expectation. *Journal of Tropical Oceanography*, 31(3): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Ruan, A. G., Li, J. B., Chen, Y. S., et al., 2010. The Experiment of Broad I-4C Type OBS in the Southwest India Ridge. *Chinese J. Geophys.*, 53(4): 1015—1018 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.4.026
- Shiobara, H., Nakanishi, A., Shimamura, H., et al., 1997. Precise Positioning of Ocean Bottom Seismometer by Using Acoustic Transponder and CTD. *Marine Geophysical Researches*, 19, 199—209.
- Wang, P. X., 2009. Toward Scientific Breakthrough in the South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 28(3): 1—4. (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. L., Yan, P., Zheng, H. B., et al., 2007. Timing and Positioning Corrections of Ocean Bottom Seismograph Data. *Journal of Tropical Oceanography*, 26(5): 40—46 (in Chinese with English abstract).
- Xue, B., Ruan, A. G., Li, X. Y., et al., 2008. The Seismic Data Corrections of Short Period Auto-Floating Ocean Bottom Seismometer. *Journal of Marine Sciences*, 26(2): 98—102 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., Zeng, W. J., Hayes, D. E., et al., 1994. The Geological Memoir of South China Sea Surveyed Jointly by China & USA. China University of Geosciences Press, Wuhan, 204 (in Chinese).
- Zhao, M. H., Qiu, X. L., Xia, S. H., et al., 2008. Large Volume Air-Gun Sources and Its Seismic Waveform Characters. *Chinese J. Geophys.*, 51(2): 558—565 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 敖威,赵明辉,丘学林,等,2010.西南印度洋中脊三维地震探测中炮点与海底地震仪的位置校正. 地球物理学报, 53(12): 2982—2991.
- 郝天珧,徐亚,孙福利,等,2011.南海共轭大陆边缘构造属性的综合地球物理研究. 地球物理学报, 54(12): 3098—3116.
- 郝天珧,游庆瑜,2011.国产海底地震仪研制现状及其在海底结构探测中的应用. 地球物理学报, 54(12): 3352—3361.
- 李春峰,汪品先,Dieter, F.,等,2009.南海张裂过程及其对晚中生代以来东南亚构造的启示—IODP建议书735Full介绍. 地球科学进展, 24(12): 1339—1351.
- 李家彪,丁巍伟,高金耀,等,2011.南海新生代海底扩张的构造演化模式:来自高分辨率地球物理数据的新认识. 地球物理学报, 54(12): 3004—3015.
- 丘学林,陈颙,朱日祥,等,2007.大容量气枪震源在海陆联测中的应用:南海北部试验结果分析. 科学通报, 52(4): 463—469.
- 丘学林,赵明辉,徐辉龙,等,2012.南海地震探测重要科学进程:回顾和展望. 热带海洋学报, 31(3): 1—8.
- 阮爱国,李家彪,陈永顺,等,2010.国产I-4C型OBS在西南印度洋中脊的试验. 地球物理学报, 53(4): 1015—1018.
- 汪品先,2009.南海—我国深海研究的突破口. 热带海洋学报, 28(3): 1—4.
- 王彦林,阎贫,郑红波,等,2007. OBS记录的时间和定位误差校正. 热带海洋学报, 26(5): 40—46.
- 薛彬,阮爱国,李湘云,等,2008. SEDIS-IV型短周期自浮式海底地震仪数据校正方法. 海洋学研究, 26(2): 98—102.
- 姚伯初,曾维军, Hayes, D. E., 等, 1994. 中美合作调研南海地质专报. 武汉:中国地质大学出版社, 204.
- 赵明辉,丘学林,夏少红,等,2008. 大容量气枪震源及其波形特征. 地球物理学报, 51(2): 558—565.