李 阳,祁江豪,孟祥君,等.海底地震仪广角地震试验[J].海洋地质前沿,2019,35(9):36-44.

海底地震仪广角地震试验

李 阳^{1,2}, 祁江豪^{1,2}, 孟祥君^{1,2}, 吴志强^{1,2}, 单 瑞^{1,2}
 (1青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,青岛 266071;
 2中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266071)

摘 要:介绍了海底地震仪(OBS)的基本原理、结构和海上调查方法,针对解决东海冲绳 海槽地壳结构及性质等目的,利用大容量气枪枪阵震源和海底地震仪在东海冲绳海槽首 次开展人工地震深部地球物理探测试验。本次试验布设一条 NNW—SSE 向垂直构造走 向的勘测线,共投放海底地震仪40台,回收成功36台。获得了有效的深部地震数据,可 识别到 Pg、PmP、Pn 等多种震相。此次试验是我国在冲绳海槽深部探测中的成功示范,有 效填补了该地区深部地震数据的空白,为解决冲绳海槽深部地质问题奠定了坚实的基础。 关键词:海底地震仪;海洋调查;广角地震

中图分类号:P315.02;P736 **文献标识码:**A

0 引言

海底地震仪(Ocean Bottom Seismometer,简称 OBS)是一种将检波器直接放置在海底的地震 记录仪器,是研究海洋壳、幔速度结构和海沟、海 槽演化动力学机制的有效手段;也可应用于海洋 油气和天然气水合物等资源探测以及地震活动监 测、海啸预警^[1]。我国 OBS 研制和调查起步较 晚,不过近年取得了长足的进步,从 2003 年中科 院地质与地球物理研究所研制成功完全自主知识 产权的国产 OBS 开始,在南海、黄海、渤海及印度 洋相继布置多条 OBS 测线,获得了大量的地震数 据和研究区的壳、幔速度结构剖面,但是在东海的 OBS 研究几乎没有^[2]。

东海的地壳结构复杂且变化较快,前人根据

收稿日期:2019-05-22

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.09007

重力反演、大地电磁测深、声呐浮标、层析成像以 及岩石学等手段,对东海地区的地壳结构进行了 卓有成效的研究,但有关其地壳的性质一直以来 争论较大。目前的研究表明,陆架盆地和琉球隆 褶带的地壳厚度为 20~30 km,属于陆壳性质基 本为大家所认可,而对于冲绳海槽地壳性质,仍存 在较大争议。东海的地壳结构和性质是认识西太 平洋板块动力学特征及探索边缘海盆地起源及改 造转化的重要依据,同时也是海洋划界的重要参 考。东海中、新生代盆地的基底组成及其分布状 况,是认识华南大陆形成演化的窗口[3-4]。因此, 通过实施 OBS 测量,结合常规二维多道地震及重 磁反演手段,可以对盆地基底的速度、密度、磁性 进行综合研究,进而研究和探讨东海地区中上地 壳物质组成及其分布状况,从而为研究华南大陆 形成演化提供有力约束。通过在冲绳海槽实施 OBS测量,结合重力数据、地震层析成像、震源机 制解分析、地形地貌特征分析,为揭示冲绳海槽的 张裂过程及其与菲律宾海板块俯冲的动力学关系 提供基础数据。因此,基于 OBS 探测技术开展东 海地区,尤其是冲绳海槽的地壳结构及性质研究, 具有重要的理论和现实意义。

基金项目:中国地质调查局项目(DD20191003);国家重点基础研 究发展计划(973 计划)(2013CB429700);国家自然科学基金 (41606083)

作者简介:李 阳(1984—),男,硕士,助理研究员,主要从事地球 物理调查与研究工作.E-mail:342970082@qq.com

基于以上问题,2015年,在国家 973 课题"构 造地质过程及其对热液活动的控制"的资助下,由 青岛海洋地质研究所负责实施,在中国东部海域 开展海底地震调查(OBS调查)。

1 OBS 结构组成与工作方法

海底地震仪与常规拖缆地震的最大区别是其 将检波器直接放置在海底,近年来 OBS 探测逐渐 成为海洋深部地震探测的主要方法。按照震源不 同划分为主动源(人工震源)与被动源(天然地 震),主动源 OBS 探测主要用于探查海洋地壳和 地幔的速度结构及板块俯冲带、海沟、海槽演化的 动力学特征以及天然气水合物的勘探等;被动源 OBS 多用于监测记录天然地震,研究天然地震的 地震层析成像以及地震活动性和地震预报及防震 减灾等^[5]。根据记录信号源的频率不同,OBS 又 可分为短周期 OBS 和长周期 OBS(宽频带 OBS)。

作为海底深部地球物理探测的主要手段之一,OBS能够记录到入射 P 波反射回的转换波 (PS 波),而且 OBS 直接放置在海底可以消除海 水层对地震信号的影响,这为海洋地震勘探提供 了更为丰富的资料^[6],OBS 探测技术摆脱了常规 拖缆地震受拖缆长度限制的束缚,在海上勘察探 测时,激发点和接收点(海底地震仪)之间有足够 大的偏移距,地震波能够以广角角度入射,通过记录到的地震折射波和反射波,用以研究地下岩层的组成和构造特征,OBS 探测技术又被称为广角反射/折射剖面法,在人工源 OBS 地震探测中,既可以利用折射波获取大套地层层内速度和主要折射界面的构造形态,又可以利用广角反射能够得到比常规地震高得多的反射能量获得深部反射层信息,因此该方法不仅可以用于深部壳、幔结构研究,也可用于高速屏蔽层(玄武岩、火成岩)下成像研究^[7-9]。

本次实验使用国产短周期四通道便携式海底 地震仪(简称 Micro OBS,图 1),其主要由采集记 录单元、释放单元、地震检波器以及辅助设备 4 部 分组成。地震检波器主要负责将检测到的地动信 号转化为电信号。通常而言,地震计由 3 个正交 的地震检波器(2 个水平方向,1 个垂直方向)置于 球底和一个任意的水中检波器组成。OBS 探测 的一个重要技术特点是地震检波器具有 3 分量功 能,即 1 个垂直分量,2 个水平分量。释放单元控 制 OBS 仪器与沉耦架分离,使仪器依靠自身的浮 力浮出水面。采集记录单元主要目的在于将地震 计输出信号进行数字化,并将其记录在内部存储 卡上。其他的辅助设备包括电源、频闪信号灯、小 旗子、GPS 数传电台、无线电接收等^[10]。

传感器与采集技术是海底地球物理探测装备的灵魂,与国外各型号OBS相比较,MicroOBS





在这些方面取得了很大的突破和进展,在地震计的自动调平、稳定性、低功耗,深水水听计的高灵 敏度、大水深、经久耐用,以及低功耗采集技术等 关键技术上已经可以与国外同类型设备媲美甚至 超过了对方。表1列出德国 GeoproOBS 与国产 便携式短周期 OBS 2 种仪器的技术参数指标。

Table 1 Technology parameters of Geopro OBS & Micro OBS							
	Geopro OBS	Micro OBS					
仪器尺寸	550 mm \times 550 mm \times 520 mm	400 mm×400 mm×600 mm					
仪器重量	自重 30 kg+沉耦架 17 kg	自重 20 kg+沉耦架 10 kg					
采集通道数	四通道(三分量检波器十一通道水听器)	四通道(三分量检波器+一通道水听器)					
工作水深	6 700 m	6 000 m					
工作频带	$2\sim 100$ Hz	4.5~200 Hz					
连续工作时间	120 d	60 d					
动态范围	>120 dB	>120 dB					
采样率	$1\!\sim\!1\ 000\ { m sps}$	1 000,500,250 sps					
电池类型	蓄电池	充电电池					
存储介质容量	32 GB	32 GB					
参数设置方式	WIFI 连接	WIFI 连接					

表 1 Geopro OBS & Micro OBS 技术参数

OBS 海上作业过程大体可以分为 OBS 投放、气枪震源放炮和 OBS 回收 3 个阶段,不同于 多道地震,OBS 采集过程气枪激发与地震记录是 相互独立的。首先确定需要解决的地质问题,在 考虑工区地质条件、海底地形、水文潮汐及底质类 型等多种因素的情况下设计一定站位间隔的 OBS 测线,做好前期准备后按照站位坐标布设 OBS,全部站位布设完毕后沿震源测线进行等间 距震源作业(图 2)^[11],放炮完毕沿测线每一站位 通过甲板单元释放海底 OBS 使其上浮,将 OBS 回收后读取地震数据(图 3)。

2 广角地震 OBS 调查

2015 年下半年进行的广角地震 OBS 探测, 共用时 11 天,使用一艘"震源船"和一艘"布放回 收船"进行海上作业任务。"震源船"搭载气枪震 源,"布放回收船"用于 OBS 投放与回收。东海陆 架区的 OBS 投放间隔为 15 km,冲绳海槽地区 OBS 间距为 10 km,整体测线长度为 490 km。外



图 2 OBS 海上作业示意图 Fig.2 A sketch of oceanic survey by OBS



图 3 人工源 OBS 海上作业流程

Fig.3 Flowchart of oceanic survey using artificial seismic source

业施工 OBS 投放依然由 NW 至 SE 依次投放,回 收由 SE 站位至 NW,放炮沿 NW 至 SW 进行。 考虑到调查测线穿越东海陆架和冲绳海槽,设计 了一条 NW—SE 向、长约 530 km 的震源放炮测 线。

潮汐、波浪和环流是东海 OBS 调查海上施工 的重要影响因素。OBS 下沉和上浮过程中随海 水的运动会偏离初始投放点的位置,底流对冲击 不仅会改变 OBS 的姿态,而且会产生较强的噪声,降低资料的品质。因此,较强的海水流动不利于 OBS 调查工作的顺利开展。本次 OBS 调查的 测线位于东海中部,自杭州湾南侧向东南延伸至 琉球岛弧,根据潮流、波浪和环流特征,可以划分 为两个区域,西部的东海陆架区以潮流和波浪为 主,环流较弱;东部的东海陆架东缘和冲绳海槽以 黑潮的影响为主(图4)^[12]。陆架区水深相对较



图 4 东海冬季表层流(a)和底流(b)分布(据文献[12])

Fig.4 Distribution of winter surface current (a) and bottom current (b) in the East China Sea (from reference [12])

小,OBS下沉和上浮所需时间较短,海流作用下 漂移的距离较小。但浅水区受底流和风浪作用 影响显著,可能产生多种效应,如底流冲击造成 OBS周围海底地形的变化,导致 OBS的滑动甚 至翻滚;底流携带泥沙对 OBS的覆盖或掩埋;底 流冲击引起 OBS 晃动,导致资料失真。陆架东 缘和陆坡、海槽区水深较大,黑潮流速较高、厚 度大,会引起 OBS 在投放和回收过程中的显著 漂移,但在黑潮影响深度以下,底流作用较弱。 在 OBS 站位设计时也要将这些因素考虑进去, 尽量选择底流弱的地区投放以降低环境嗓音、 保障 OBS 着底姿态,将水动力条件对 OBS 释放 后上浮造成的偏移计算出来,有利于上浮后 OBS 的寻找回收。

2.1 气枪震源

在对大容量气枪阵列震源性能和立体气枪 震源主要优势分析的基础上,基于渤海-山东半 岛-南黄海 OBS 深部探测立体气枪震源设计的 成功经验,根据"震源船"气枪震源的装备情况, 经大量的模拟分析,确定了以4个子阵组成的 总容量6420 in³ 的气枪组合(图5)为基础,采用 立体枪阵、延迟激发的工作方式。具体参数和 关枪标准如表2,主要优势:低频能量强、曲线光 滑、陷波弱。为了对比立体枪阵(图6)与平面枪 阵(图7)的效果区别,按其平均沉放深度10 m 进行了远场子波特征模拟,从图中可以看出,立







	表 2 3	立体枪阵参数					
Table 2 Steric air-gun array parameters							
名称	数值	名称	数值				
总容量/in ^{3 *}	6420	子阵沉放深度/m	14-8-11-5				
子阵数量/个	4	激发时间延迟/ms	2				
气枪型号	Bolt, Sleeve	初峰值/bar•m**	85.5				
组合方式	立体枪阵	峰峰值/bar•m	124.7				
波泡比(P/B)	16.3	有效频带 宽度(-6dB)	5~65				



图 6 立体枪阵的远场子波波形(上)与频谱图(下) Fig.6 Waveform and spectrum of the far field wavelet of steric air-gun array

体枪阵的初峰值、波泡比、有效频带宽度(-6 dB) 均优于平面气枪阵列,尤其在频谱特征上,立体枪 阵的低频能量强、曲线光滑、陷波弱等优势明 显^[13]。

为了对比该枪阵与常规 OBS 探测采用的大容量 Bolt 气枪阵列震源的性能,对包括 4 条1 500 in³ 大容量 Bolt 气枪组成的 7 800 in³ 枪阵(图 8)和

^{* 1} in=2.54 cm; 1 in³=16.387 cm³

^{** 1} bar=0.1 MPa

^{*** 1} psi=6.896 kPa

9 000 in³ 枪阵(图 9)远场子波分别进行了模拟分 析,模拟的结果如图 10 所示,与本次建议使用的 立体枪阵的性能对比如表 3 所示。从中可以看 出,本次建议使用的立体枪阵具有更高的能量、更 好频谱性能和更宽的地震频带,能够满足 OBS 深 部探测的需要。











图 9 以 4 条 1 500 in³ 大容量 Bolt 气枪为主 组成的 9 000 in³ 枪阵示意图

Fig.9 A scheme of the 9 000 in³ air gun array consisting of four 1 500 in³ large capacity air guns



图 10 7 800CI 与 9 000CI 气枪阵列子波波形对比 Fig.10 Wavelet and Waveform Comparison of Air Gun Array 7 800CI and 9 000CI

OBS 投放结束后,"震源船"沿测线方向向 SE 向航行,提前 40 km 开始震源工作,由 NW 向 SE 向进行等间距激发,为防止大容量气枪在浅水区对 OBS 产生安全隐患,炮线距 OBS 测线 150 m,震源 船速度 5~6 kn,激发间距 125 m,到通报区域边界 结束,实际完成了 OBS 调查项目外业采集 545 km。

2.2 OBS 投放回收

开始投放工作前,在投放船上分别对 40 台 OBS 进行对钟及安装沉耦架,OBS 投放从测线西 北端 01 号站位开始,向 SE 端依次投放,投放点距 离设计投放位置均小于 100 m 偏差,在完成 40 个 站位的投放后,转为震源激发阶段。OBS 回收从东 南端 40 号站位开始,由东南端 OBS1-40 站位向西 北端依次回收,由于海流原因,OBS 回收点距离投放点会根据水深不同偏差数百米至几千米不等,依次完成所有站位 OBS 的回收后,完成本航次所有调查任务。在本次施工过程中,有2个站位的 OBS

被渔民打捞后归还(有数据),位于东海陆架区的4 个站位 OBS 呼叫无应答,推测被渔民拖网拖走,26 号站位 OBS 出现问题,未投放,OBS 损失数量见图 11。

枪阵	沉放	主峰值/	峰-峰值/	初泡比	气泡周	低截频/	高截频/	优势频	主频/
容量/in ³	深度/m	bar.m	bar.m		期/ms	Hz	Hz	宽/Hz	Hz
7 800	12	46.3	96.9	4.2	151.5	4	41	37	22.5
7 800	16	46.0	96.5	3.5	131.8	4	32	28	18
9 000	12	48.8	99.7	3.9	162.8	4	41	37	22.5
6 420	14-8-11-5	85.5	124.7	16.3	134.8	5	65	60	30
^Ⅲ ^Ⅲ 米 –1 –2	0 ⁴⁰ 33 48 -500 500 2000	- 37 - 38 - 35 -	∀ ₩ <u>₩~₩</u> ₩	V 	• * * * *		No and No and No.	100000	убана
-2	2 500 123.0)° 1:	23.5°	124.0°	124.5°	125.0°	125.5°	126.0	, Е
			▼ 丢	:失站位	●未投放 📘 🤅	渔民打捞(有数据)			

表 3 气枪阵列模拟统计表 Table 3 Table of Air gun array simulation parameters





2.3 数据处理

数据采集结束后,对采集到的 OBS 的原始记录、导航数据、水深数据以及枪控计时器数据进行数据处理,本次 OBS 探测数据的处理流程主要包括:① OBS 投放点坐标投影转换;② 每个站位 OBS 进行线性时间漂移校正;③各站位水平分量旋转和偏移据计算;④ 地震记录格式的转换:将 OBS 原始的二进制数据转化为国际通用的 SEGY 格式;⑤波场分离;⑥带增益恢复、滤波、反褶积。

2.4 OBS 调查初步成果

本次东海冲绳海槽 OBS 测线是冲绳海槽地 区首次进行的深地震测线,填补了该地区深地震 探测的空白,除了人工源地震信号采集,还成功记 录到11月14日在东海海域(31.0°N,128.7°E)发 生的7.2级地震(图12),数据质量良好。数据处 理和分析的初步结果显示,由于跨越了多个构造 单元,本次实验中 OBS 所记录到的震相信息是十 分丰富的,经过走时拟合的确认,OBS 记录到的不 同深度层位的震相包括:直达水波震相 Pw,沉积层 折射波震相 Ps1、Pb、Ps2、Ps3,地壳内折射波震相 Pg1 和 Pg2,地壳内反射波震相 PcP,莫霍面反射波 震相 PmP 以及上地幔折射波震相 Pn(图 13)。





图 13 10 台站(a)12 台站(b)地震记录剖面

Fig.13 Seismic profile of Site No.10(a) and Site No.12(b)

回收成功的 35 台 OBS 数据质量真实可靠, 相比较而言,位于测线 SE 方向冲绳海槽内的 OBS 台站记录到的数据质量要远优于测线 NW 方向的东海陆架地区,这可能是水深对 OBS 耦合 以及背景嗓音影响有关。测线整体从 NW 向 SE 方向由浅变深,NW 端折射波震相只能延伸至 50 km左右,SE 端折射波震相则可以延伸 150 km 左右。

总体来说,海底地震仪台站清晰记录到 0~ 150 km 远的折射波和广角反射波,海底地震仪垂 直分量的地震记录剖面都能清晰地见到 Pg、Pn 和 Pmp 等震相,为获取调查区深部地层结构奠定 了坚实的基础。

3 结论

OBS 作为一种新型海底地震勘探地球物理 仪器,正越来越广泛的应用于天然气水合物、油气 勘探、海洋工程及海底深部结构等方面的调查中, 本行次使用的国产短周期海底地震仪(Micro OBS)在传感器与采集技术方面,尤其是在地震 计、深水水听器及低功耗采集技术方面都取得了 重大突破,达到甚至突破了国外同类型设备的技 术指标,为我国今后开展 OBS 海底地震勘探提供 了一柄利器。 此次 OBS 探测试验是我国首次在东海冲绳 海槽海域进行的深部地球物理探测试验,采用国际先进的多层气枪震源激发技术,改善了低频性 能和远场子波,使采集的数据质量得到了很大的 提升,获得丰富的有价值的地震数据,深地震相丰 富,对区内的构造性质和深部地质研究具有重要 意义。通过对 OBS 数据的初步分析,其成果对后 期东海的地壳结构和性质的研究以及东海地区中 上地壳物质组成及其分布状况,包括为揭示冲绳 海槽的张裂过程及其与菲律宾海板块俯冲的动力 学关系提供扎实的基础数据。

致谢:对参加海上工作的青岛海洋地质研究 所部分科学家、中科院地质与地球物理研究所刘 康、中科院南海所贺恩远、山东科技大学支鹏遥表 示深切谢意!

参考文献:

- [1] 孟祥君. OBS 调查技术方法及其在南黄海的应用[J].海洋 地质前沿,2014,30(7):60-65.
- [2] 郝天珧.南海东北部及邻区深部结构的综合地球物理研究 [J].地球物理学报,2008,51(6):1785-1796.
- [3] 郝天珧.南海共轭大陆边缘构造属性的综合地球物理研究 [J].地球物理学报,2011,54(12):3098-3116.
- [4] 郝天珧.南海磁性基底分布特征的地球物理研究[J].地球物 理学报,2009,52(11):2763-2774.
- [5] 支鹏遥. 渤海海底地震仪探测试验及初步成果[J].地球科 学进展,2012,27(7):769-777.
- [6] 刘训矩. 主动源 OBS 探测技术及应用进展[J].地球科学进展,2018,网络首发,http://kns.cnki.net/kcms/detail/11. 2982.p.20181022.1637.162.html.
- [7] 郝天珧,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.
- [8] 游庆瑜,刘福田,冉崇荣,等.高频微功耗海底地震仪研制[J].地球物理学进展,2003,18(1):173-176.
- [9] 刘丽华.海底地震仪数据处理方法及其在海洋油气资源探测中的发展趋势[J].地球物理学进展,2012,27(6):2673-2684.
- [10] 郝天珧,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.
- [11] 夏少红. OBS广角地震探测在海洋沉积盆地研究中的作 用[J].地球科学进展,2016,31(11):1111-1124.
- [12] 边昌伟.中国近岸泥沙在渤海、黄海和东海的运输[D].青岛:中国海洋大学,2012.
- [13] 吴志强. OBS 在我国海洋深部地质调查中的应用现状和 前景[J].海洋地质动态,2008,24(9):35-42.

A WIDE ANGLE OCEAN BOTTOM SEISMIC SURVEY

LI Yang^{1,2}, QI Jianghao^{1,2}, MENG Xiangjun^{1,2}, WU Zhiqiang^{1,2}, SHAN Rui^{1,2}

(1 Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China)

Abstract: An ocean bottom seismic survey (OBS) was carried out in the Okinawa Trough of the East China Sea for the purpose to reveal the structure and properties of the crust. Basic principles, structures and survey methods of OBS were briefly introduced in the paper. This is the first deep geophysical exploration ever carried out in the trough using the large capacity air-gun array as seismic source. A survey line was put on the bottom along the direction of NNW-SSE, perpendicular to the structural direction. A total of forty seismometers were placed, of which thirty six were reclaimed successfully. Deep seismic data has efficiently obtained in the test including the multiple seismic phases of Pg,PmP and Pn. It is indeed a successful demonstration of deep exploration for the first time in the Okinawa Trough of East China Sea, which effectively filled the gaps in the deep seismic survey and laid a solid foundation for solving deep geological problems in the region.

Key words: ocean bottom seismometer; ocean survey; wide-angle seismic