

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. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3352~3361, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.033

Hao T Y, You Q Y. Progress of homemade OBS and its application on ocean bottom structure survey. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(12): 3352~3361, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.033

## 国产海底地震仪研制现状及其 在海底结构探测中的应用

郝天珧, 游庆瑜

中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院油气资源研究重点实验室, 北京 100029

**摘 要** 海底地震仪(Ocean Bottom Seismographs, OBS)及由其组成的海底流动地震观测台阵是近年来发展起来的高新技术, 在油气探测、科学研究、防灾减灾等方面有广泛的用途, 是地球物理仪器与探测技术发展中的一个新增长点. 本文介绍了由中国科学院地质与地球物理研究所研制成功的宽频带、7 通道海底地震仪((I-7C)OBS)的性能、指标以及关键技术的实现. 同时, 介绍了(I-7C)OBS 近年来在渤海、南海以及西南印度洋的 5 次海上试验与应用的成果. 5 次应用试验中均有国外同类型的一起参加, (I-7C)OBS 在性能指标、回收率和数据质量等方面都有较好的表现. 2010 年以来, 国产 OBS 在我国各海区经过上百台次的海上作业(超过半数工作水深在 2000 m 以上), 仅丢失一台. 仪器回收率超过 98%, 数据完整率超过 95%. 一些航次的首席科学家认为我国国产 OBS 已经达到国际先进水平.

**关键词** 国产海底地震仪, 海陆联合地震探测, 海底地质结构

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.033

中图分类号 P738

收稿日期 2011-11-18, 2011-11-27 收修定稿

### Progress of homemade OBS and its application on ocean bottom structure survey

HAO Tian-Yao, YOU Qing-Yu

*Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

**Abstract** Ocean Bottom Seismographs (OBS) and the seabed mobile seismic observation array composed by them was recently developed high-tech. It's a new growth point in the geophysical instruments and exploration technology, and it has a wide range of uses, such as in oil and gas exploration, scientific research, disaster prevention and mitigation and so on. The performance, technical data, and key techniques of the I-7C Ocean Bottom Seismograph (OBS) is introduced in this paper. The wideband 7-channel OBS is designed and produced by Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences. In recent years we have conducted five marine tests in the Bohai Sea, South China Sea, and southwestern Indian Ocean. OBS instruments made in western countries were also used in the five tests. The results indicate the good performance of the (I-7C) OBS in technical data, recovery operation ratio, and data quality. Since 2010,

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划(2007CB411701)和国家自然科学基金项目(90814011, 41074058)联合资助.

**作者简介** 郝天珧, 女, 1957 年生, 1982 年毕业于长春地质学院, 研究员, 主要从事海、陆油气盆地综合地球物理研究.

E-mail: tyhao@mail.igcas.ac.cn

homemade OBS were tested over one hundred times in different seas, more than half worked in over 2000 meters water depth, only one was lost, and the recovery operation ratio was over 98%, data integrity ratio was over 95%. Some chief scientists believe that the domestic OBS have already reached advanced world levels.

**Keywords** Homemade OBS, Land-marine joint seismic survey, Geological structure of ocean bottom

## 1 引言

海底地震仪(OBS)及其由其组成的海底流动地震观测台阵是近年来发展起来的高新技术,在油气探测、科学研究、防灾减灾等方面有广泛的用途,是地球物理仪器与探测技术发展中的一个新增长点。

近年来,在海底科学的研究中,被动大陆边缘如何从非稳态的初始张裂阶段发展到稳态的海底扩张阶段,成为国际大陆边缘计划(InterMARGINS)和综合大洋钻探计划(Earth, Oceans and Life, Initial Science Plans 2003~2013 of IODP)的优先研究领域;主动大陆边缘如何因板块俯冲导致弧后扩张系统的形成,也是国际洋中脊计划的优先研究方向。在以上的研究中,海底深部结构是海盆构造演化的“骨架”,是边缘海形成演化、海底扩张和洋壳形成过程的信息载体,一直是大陆边缘演化与洋中脊扩张等科学问题研究的重点<sup>[1~10]</sup>,而 OBS 探测是研究海底深部结构的最有效的地球物理方法,成为目前进行海底地壳内部结构研究的最新发展方向<sup>[11~15]</sup>。1996年,Digranes 等<sup>[16]</sup>用三分量海底地震数据模拟了挪威北部拉张大陆边缘地壳上地幔的纵横波速度结构,Flueh 等<sup>[17]</sup>利用海底地震数据研究了卡斯卡迪俯冲带的岩石圈结构特征,Chian 等<sup>[18]</sup>则用海底地震资料研究了南伊利比利深海平原的地壳结构。1999年6月德国海洋地学研究中心(GEOMAR)在夏威夷海域投放了47台 OBS<sup>[19]</sup>;2000年4月,来自德国、英国和美国等国家的海洋研究单位联合在大西洋南5°洋中脊进行了大规模的 OBS 探测,可以看出,海底地震探测技术在各种海洋构造研究中得到了广泛的应用。

未来世界油气总储量的44%将来自海洋深水区,海洋石油勘探开发已从水深300 m扩展到3000 m的深海区。OBS具有噪声小、排列长度大、包含折射波和转换横波等优势<sup>[11]</sup>,特别是与大容量震源的结合,可成为海洋油气勘探的重要手段。1994年,Katzman 等<sup>[20]</sup>在南加利福尼亚海域成功进行了反

射地震和海底 OBS 联合观测,在 OBS 的共接收点道集上清晰地记录到 BSR 反射震相,并用多道反射地震走时数据和 OBS 记录的广角反射走时数据进行了速度结构反演。2005年,Mienert 等<sup>[21]</sup>在挪威中部的 Omen Lange 海域进行了浅层天然气和天然气水合物的 OBS 观测。其观测系统采用以 OBS 为中心,炮点测线在6个方向呈放射状分布的方式,利用接收到的反射波和 PS 转换波得到了该海域三个地区的  $V_p$ ,  $V_s$  和  $V_p/V_s$  随深度变化的曲线,并据此推算了这三个地区的天然气及天然气水合物的饱和度。德国的 Geopro 公司生产了数以百计的 OBS<sup>[22]</sup>,为全球数十家石油公司和科研单位提供高分辨地震勘探服务。其客户中石油公司占了将近一半,是将 OBS 技术引入油气勘探领域比较成功的单位之一。特别是该公司在苏伊士湾采用 OBS 广角反射地震法,较好地解决了中新统蒸发岩下伏地层层速度较低、常规反射地震无法揭示高速层之下的地质构造情况的技术难题,成为油气勘探中的一个范例。目前,国外的石油勘探公司已经开始将 OBS 技术用于油气勘探,并开始向小型化方向发展。特别是针对海洋油气资源勘探开发过程中的巨大投资风险,为提高钻井成功率,各石油公司开展的多种井场地球物理调查工作,对 OBS 密度和信息量的需求也远远超过了一般海洋深部结构调查。

尽管 OBS 技术在海洋深部结构和海洋油气勘探中可以发挥重要的作用,但是多年来,OBS 技术一直只为少数发达国家所拥有。2003年以前,我国在南海北部陆缘完成过7条测线、共74台次的海底地震探测,都是通过国际和地区合作来实现的,所使用的 OBS 都不是我国自主研发。我国自主研发的 OBS 虽然起步较晚<sup>[23]</sup>,但在国家863计划以及仪器研制专项的大力支持下,中国科学院地质与地球物理研究所于2003年研发成功3通道高频 OBS 的基础上,于2008年又研制成功宽频带、7通道 OBS,使我国成为拥有 OBS 技术的国家之一,并于2009~2011年期间多次在渤海、南海以及西南印度洋的海底结构探测中得到了应用<sup>[24~26]</sup>,取得了很好的效

果. 它标志着国产 OBS 技术日趋成熟, 从原理样机逐步走向实际应用. 目前已批量制作了 40 套, 初步形成了海底流动观测台阵.

## 2 国产宽频带、7 通道(I-7C)OBS 介绍

### 2.1 (I-7C)OBS 的构成与技术指标

宽频带、7 通道(I-7C)OBS 采用单球一体化结构, 具备了 7 通道的采集能力(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, 它主要由三部分组成(参见图 1).

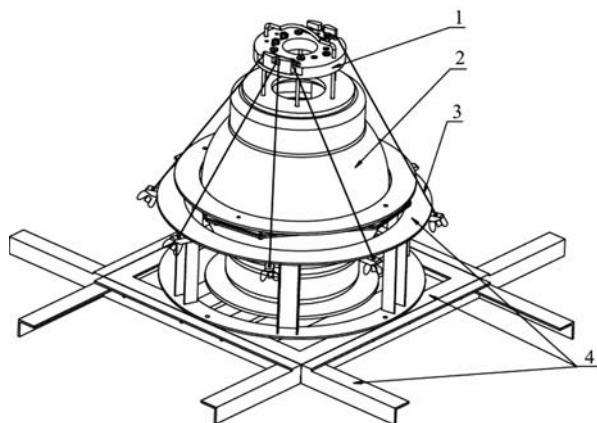


图 1 (I-7C)OBS 的构成

1 为脱钩机构, 2 为承压仪器舱, 3、4 为沉耦架.

Fig. 1 Configuration of (I-7C) OBS

Component 1 is the (rehabilitate mechanism) device, component 2 is the pressure hull, components 3 and 4 are the settlement coupling mounting.

表 1 (I-7C)OBS 的设计指标与实际实现指标对比

Table 1 Comparison between design and actual technical data of (I-7C) OBS

指标名称	设计指标	实际指标
频带范围	30 s~40 Hz	60 s~50 Hz
工作水深	6000 m	6000 m
工作时间	>3 个月	>3 个月
仪器回收率	>80%	>98%

### 2.2 (I-7C)OBS 的关键技术实现

#### (1) 声学应答模块

声学应答模块是海底地震仪实现回收的关键部件, 目前通讯距离达到 10000 m 的声学应答模块我国基本依赖进口, 价格昂贵. (I-7C)OBS 采用自主研发的基于低功耗 FPGA 器件, 采用数字解调方式的声学应答模块. 其技术创新点在于大大降低了制作

表 2 (I-7C)OBS 与美国 WHOI 研制的 OBS 的指标对比  
Table 2 Comparison of technical data between (I-7C) OBS (China) and WHOI OBS (USA)

	OBS(WHOI)	(I-7C)OBS
仪器功耗	约 1 W	0.25 W
仪器结构	5 球多舱球结构 (约 200 kg)	单舱球结构 (约 45 kg)
采集通道数	3 通道宽带地震计 (30 s~40 Hz) 1 通道水听器	3 通道宽带地震计 (60 s~50 Hz) 3 通道检波器 (2~150 Hz) 1 通道水听器
连续工作时间	60 天(碱电池) 180 天(锂电池)	120 天
工作水深	6000 m	6000 m

工艺难度, 提高了可靠性. 其性能与国外产品相当, 而制作成本只有购买国外产品的 1/10.

#### (2) 低功耗采集系统

自主研发了低功耗的 AD 转换电路、时间服务电路、数据存储电路和逻辑控制电路, 采集器功耗低于 120 mW, 整机功耗低于 250 mW, 大大低于国际同类仪器水平.

#### (3) 姿态姿态控平装置

该装置采用机电一体化技术, 由单片机根据姿态传感器的姿态信息, 控制垂向电机与步进电机调整姿态. 这种姿态调整装置使得地震计与玻璃舱球底部的耦合呈刚性连接, 增强了信号的传递性, 保证地动信号的低失真传递.

在以上关键技术实现的基础上, 国产 OBS 在整机性能、数据质量方面都具自己的特点与优势.

北京时间 2009 年 4 月 16 日 4 时 01 分, 自主研发的(I-7C)OBS 在南海记录到印尼苏门答腊南部(3.1°S, 100.4°E)发生 M6.6 级地震. 这是我国首次利用 OBS 在深水海区记录到天然地震资料(图 2).

2009 年, 广州海洋地质调查局采用电火花震源, 在测试水槽中将国产 OBS 与法国 Sercel 公司的 MicroOBS 于同样环境下的记录进行了测试对比, 结果表明: 国产 OBS 数据具有更好的分辨率与信号一致性(图 3).

## 3 近年来国产 OBS 的海区实验与应用

### 3.1 西南印度洋大洋中脊地质结构调查

(I-7C)OBS 研制成功后, 在浅海地区经历 >30 台次的投放回收试验, 并没有出现丢失. 但是在 2009 年 4 月实施南海共轭大陆边缘深部结构的

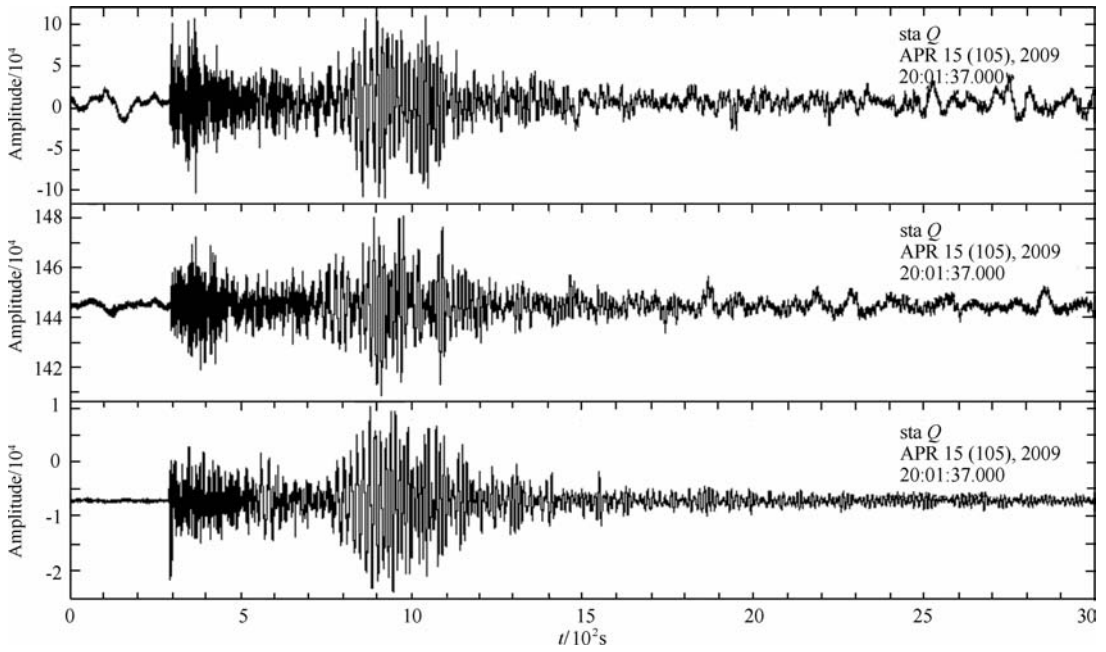


图 2 南海海盆(水深约 4300 m)中的 OBS 的天然地震记录

Fig. 2 Earthquake recording of the OBS in the marine basin of South China Sea (water depth is about 4300 m)

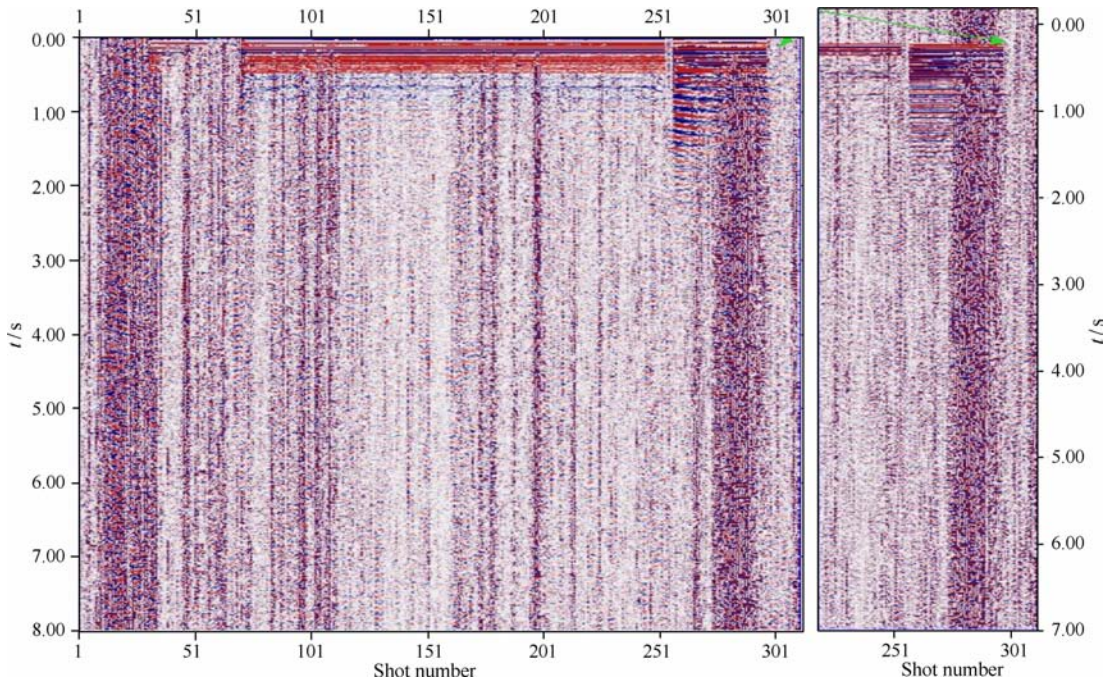


图 3 国产 OBS 与法国 Sercel 公司 MicroOBS 的水槽测试结果对比(广州海洋地质调查局伍忠良提供)

左:MicroOBS;右:国产 OBS.

Fig. 3 Comparison of test results at water tank (provide by Wu Zhongliang of Guangzhou Marine Geological Survey)

Left: MicroOBS;Right: (I-7C) OBS.

OBS 探测剖面中,却经历了重大挫折,丢失了 17 台仪器. 项目组迅速总结经验,针对可能引发回收失败的原因进行了改进,于 2010 年 2 月 5 日~2 月 24 日搭载“大洋一号”在西南印度洋大洋中脊海区再度

开展试验. 由于面临 OBS 回收再度失败的风险,项目组特别研制了深水试验装置(图 4),在国内尚没有适合的 ROV 配合的情况下,该装置可以实现试验用 OBS 的单独回收与试验装置的整体回收,即使

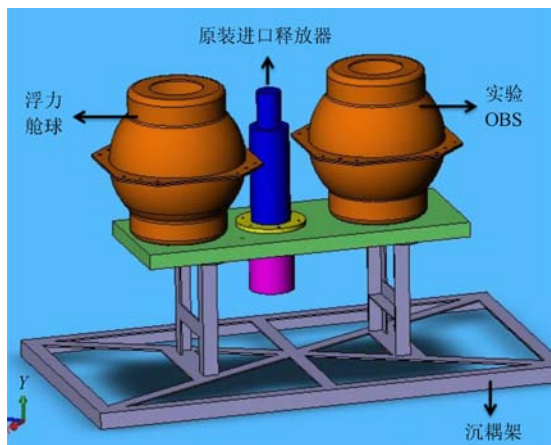


图4 OBS深水试验装置设计图

Fig. 4 Test set of the OBS for deep water

OBS脱钩失败,也能通过加装的机械脱钩释放器将其回收,便于故障原因的定位分析.不仅可在深水回收试验中降低仪器丢失风险,同时也能够对OBS的脱钩释放性能进行真实测试.深水试验装置在西南印度洋中脊试验中采用取得了很好的应用效果.

5台(I-7C)OBS搭载“大洋一号”科考船在西南印度洋中脊复杂海底地形和3000余米水深环境下工作了近20天,获得了良好的数据记录(图5),投

放了6台次全部顺利回收(图6),数据基本正常.同期参加该航次还有来自法国与德国的OBS.其中,法国两台同类宽带OBS无有效数据记录,法国IPGP研究所15台短周期OBS丢失1台,德国GeoPro公司19台OBS丢失1台.这是对(I-7C)OBS实际性能真实测试试验中最为重要的一次.通过这次试验,还发现了夜间回收灯光不明显、OBS上浮后姿态不利于打捞等一些问题,对后期的改正有至关重要的作用.

### 3.2 渤海海陆联合地震观测

该项调查任务来自于国家自然科学基金重大研究计划“华北克拉通破坏”中的重点研究项目“渤海及邻区深部结构及其对华北克拉通破坏的响应”以及国家863计划“海陆联合深部地球物理探测关键技术研究”,目的就是通过渤海海域布设的两条“十字”型地震探测剖面,开展海区与陆区的联合地震观测,形成一套进行海陆地震联合探测的综合地球物理技术.渤海海域是开展华北克拉通破坏研究的关键地区之一,是东部陆块破坏最严重、地壳减薄的中心(28 km).利用海底地震观测数据研究区内大地震的分布、重要的断裂带(如郯庐、张家口—蓬

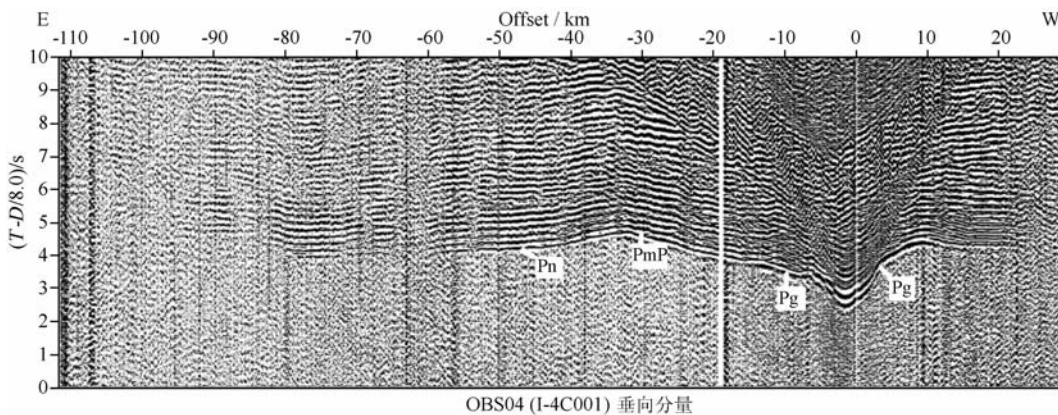


图5 西南印度洋航次中(I-7C)OBS-04记录的折合时间剖面(中国科学院南海海洋研究所丘学林提供)

Fig. 5 Time section of the (I-7C) OBS recordings in Southwestern Indian Ocean  
(provided by Qiu Xuelin of South China Sea Institute of Oceanology, CAS)



图6 西南印度洋航次中(I-7C)OBS回收的现场照片(国家海洋局第二海洋研究所阮爱国提供)

Fig. 6 Field photos of recovery operation of (I-7C) OBS in Southwestern Indian Ocean voyages  
(provided by Ruan Aiguo of the Second Institute of Oceanography, SOA)

莱断裂带)与克拉通破坏的关系、油气盆地形成的深部原因等都有重要的意义。

作业分两次进行.第一条 NW 向剖面观测采集于 2010 年 3 月 20 日~4 月 10 日进行(图 7),此次作业共投放 28 台国产 OBS、德国产 22 台、法国产 3 台.沿测线国产仪器与进口仪器交替投放.国产 OBS 在回收时丢失 1 台,后来在葫芦岛海区被渔民发现后寻回,回收的仪器数据完整.投放的 22 台德国 Geopro 公司产 OBS,回收时丢失 3 台,后来寻回 2 台,回收的仪器有 5 台完全没有数据.另外投放了 3 台广州海洋地质调查局进口的法国 Sercel 公司产 OBS,回收时丢失 1 台,后来经渔民发现找回,回收的仪器数据完整.第二条 NE 向剖面采集作业时间为 2011 年 8 月 3 日~20 日,此次作业共投放 20 台国产 OBS、20 台德国 Geopro 公司产 OBS,沿测线国产仪器与进口仪器交替投放.国产 OBS 全部回收,数据完整.德国产 OBS 有 2 台未能释放成功,实验后为渔民送回.海上试验表明,研发的 OBS 样机在工作稳定性和回收可靠性上有了进一步的提升。

### 3.3 南海海陆联合地震观测

2010 年 7 月 12 日~8 月 10 日,国家自然科学基金委员会在南海实施了地球物理开放航次,其中有多条海陆联合地震观测剖面,目的是查明滨海断裂带的位置以及深部地壳结构特征.在这些观测剖面中,国产 OBS 在 AB 和 DE 测线共投放 6 台次,全

部顺利回收,数据正常.航次首席科学家丘学林教授认为:“经数据回放和分析处理,显示数据信号清晰,震相追踪可达 100 km 以上,比国外同类仪器有更好的剖面质量。”

### 3.4 南海深海盆三维 OBS 地震观测

这是国产 OBS 首次在南海深海海盆中开展的三维地震观测.震源由 4 支 1500 in<sup>3</sup> 的 BOLT 空气枪组成,双排列组合,航速 4~5 kn,数据采样率 250 Hz (间隔 4 ms).投放时间:2010 年 12 月 11 日;回收时间:2011 年 3 月 22 日.此次海上作业的时间为 2010 年 12 月~2011 年 3 月,由国家海洋局第二研究所组织实施.该航次搭载“奋斗七号”科学考察船,共采用了三种不同的 OBS:(1)8 台国产宽带 OBS;(2)15 台德国 Geopro 公司产 OBS;(3)17 台法国 Sercel 公司的 MicroOBS.三种 OBS 均为单舱球 OBS,采用了同样的耐压玻璃舱球.国外的两种 OBS 装配短周期检波器,仅能应用于主动源地震探测.此次海试较充分地体现了国产仪器宽频带、低功耗的优势.在 2010 年 12 月 15 日,科考船完成了测线放炮作业,但因台风逐渐接近作业海区,科考船被迫避风.考虑到法国 Sercel 公司生产的 MicroOBS 留海时间短,科考船于 2011 年 1 月 5 日至 6 日在恶劣的海况下抢先回收了 8 台 MicroOBS 后离开作业区.直至 2011 年 3 月海况条件允许的情况下,科考船再度回到作业海域重新进行 OBS 回收工作.回收情况如下:

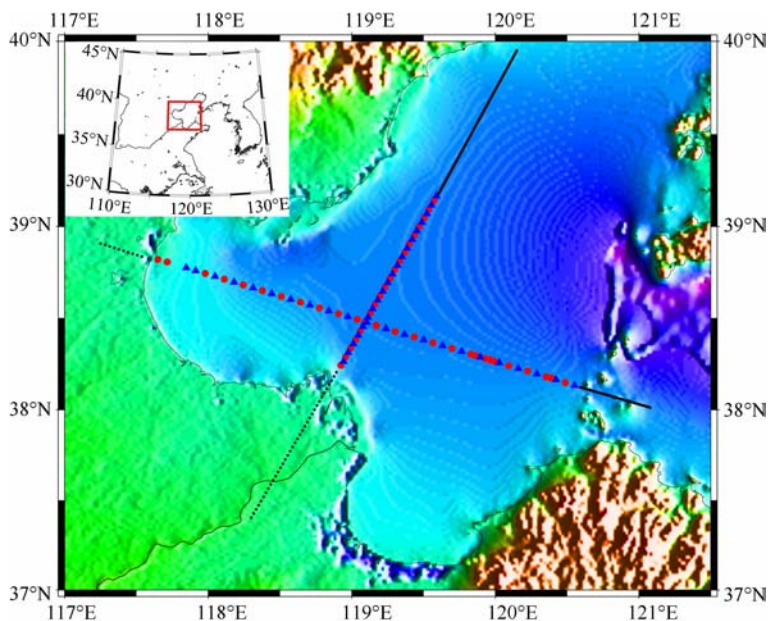


图 7 渤海海陆联合地震探测剖面位置

图中红色圆点代表国产 OBS;蓝色三角为德国产 OBS.

Fig. 7 Locations of seismic profiles for marine-land joint survey in the Bohai Sea

The red circles represent (I-7C) OBS. The blues represent the OBS made in Germany.

(1) 国产宽带 OBS, 投放 8 台, 回收 7 台; 回收率 87.5%.

(2) 德国 Geopro 公司产高频 OBS, 投放 15 台, 回收 11 台; 回收率 66.6%.

(3) 法国 SerCEL 公司产 MicroOBS(高频), 投放 17 台, 回收 8 台, 回收率 47%. 在 2011 年 3 月的回收作业中因天气原因剩余的 MicroOBS 均未能成功回收.

受天气原因, 科考船未能按预定计划如期回收 OBS, 使滞留海底 4 个月的国产宽带 OBS 还接收到一些天然地震事件, 其中包括日本东海 3 月 11 日发生的 9 级大地震(图 8).

### 3.5 南海深部结构探测航次

2011 年 5 月~6 月, 自主研发的宽带 OBS 首次在南海中央海盆 4000 多米水深海域大量投入使用, 航次中前后共投放该类型仪器 52 台次, 回收率 100%, 在南海扩张中脊等深部结构调查中发挥了重

要作用(图 9). 该航次首席科学家丘学林教授认为“国产海底地震仪(OBS)已达到国际先进水平”; 本航次的第二航段为 6 月 2 日~6 月 9 日, 历时 8 天, 圆满完成国家自然科学基金委员会南海北部地球物理科学考察的 OBS 探测任务, 共投放 20 台国产宽带 OBS, 全部成功回收, 放炮测线长 230 km, 连续放炮作业 1 天多, OBS 平均留底时间 3 天.

在这个航次中, 国产 OBS 第一次采用大批量、跳蛙式作业采集方式集中在 4000 m 水深海域作业, 不但自身得到了检验, 也为国家基金重大项目记录到宝贵的实测数据, 标志着国产宽带 OBS 仪器各项技术的进一步成熟, 在实际应用中又迈出关键性一步.

2010 年以来, 国产沉浮式宽频带 OBS 经历了大量的海上试验的检验, 共投放超过 150 台次, 回收率超过 98%, 数据完整率超过 95%. 在历次海试中均有国外同类仪器进行应用对比, 国产仪器在回收

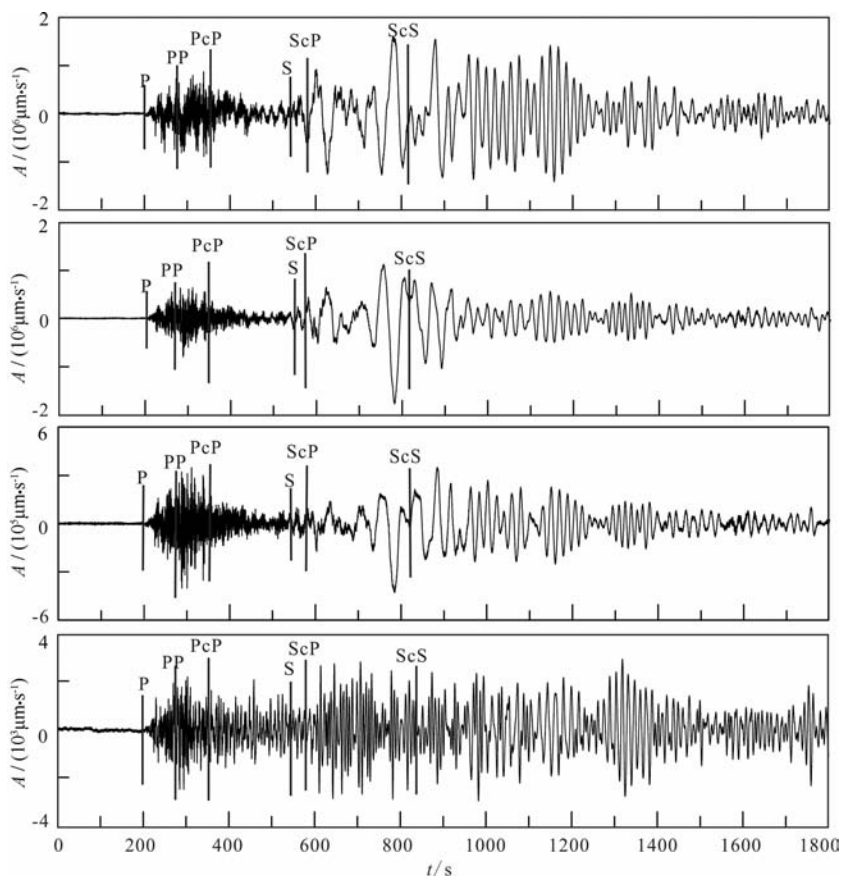


图 8 6 号 OBS 台站记录到的日本东部海域 9 级地震 (国家海洋局第二海洋研究所阮爱国提供)  
震中距:  $34.934^\circ$ , 反方位角:  $39.821^\circ$ ; 发震时间:  $05:46:24$ , 到时:  $05:53:07$ ; 直达 P 波走时 6 min 43 s.

Fig. 8  $M_s9$  earthquake of eastern seas of Japan recorded by No. 6 OBS station

(provided by Ruan Aiguo of the Second Institute of Oceanography, SOA)

Epicenter distance:  $34.934^\circ$ , reverse azimuth:  $39.821^\circ$ ; Earthquake origin time:  $05:46:24$ , arrival time:  $05:53:07$ ; Travel time of direct P waves: 6 min and 43 s.

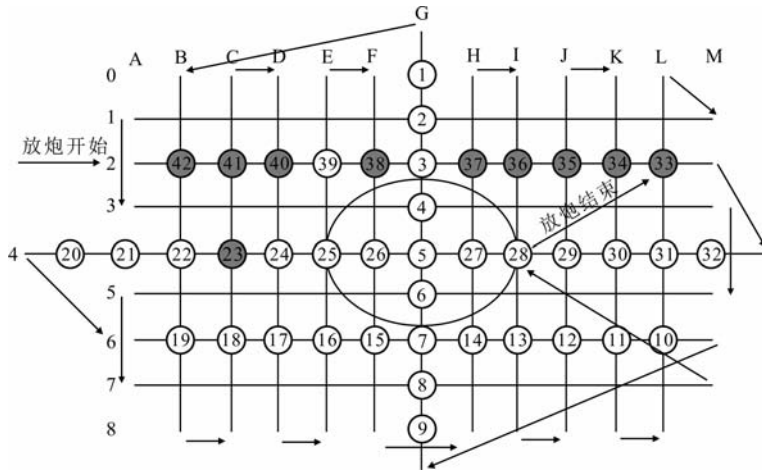


图9 南海中央海盆 OBS 台阵和放炮测线分布图(中国科学院南海海洋研究所丘学林提供)  
白圈为国产 OBS,灰圈为德国产 OBS.

Fig. 9 Locations of OBS stations and shot lines in the central marine basin of South China Sea  
(provided by Qiu Xuelin of South China Sea Institute of Oceanology, CAS)  
White circles represent (I-7C) OBS and gray ones represent the OBS made by Germany.

率与数据质量方面均具有优势,同时也积累了经验,有助于在海洋油气探测、海洋深部结构调查等领域中的进一步应用。

## 4 结论与展望

2010 年以来,国产 OBS 在我国各个海区经过上百台次的海上作业(超过半数工作水深在 2000 m 以上),仅丢失一台.仪器回收率超过 98%;数据完整率超过 95%.每次都有国外同类仪器进行对比,在易用性,回收率、数据完整率等重要指标上都具有一定的优势.仪器的性能也得到了国内广大涉海地质研究单位的认可.结合国内外的发展趋势,预计国产 OBS 应有较好的应用前景.主要表现在:

(1) 国产 OBS 技术日趋成熟;

(2) 随着海底科学研究的不断深入,随着一些新的科学问题涌现<sup>[26,27]</sup>,势必拉高国内各海洋研究单位开展 OBS 探测研究的需求;

(3) 发达国家已经将 OBS 技术引入海洋深水油气勘探、开发领域并作为一种重要的地球物理手段,我国迄今为止在这方面的应用仍是空白.

针对这样的情况,近期 OBS 的主要研发方向将包括:

(1) 根据当前国外发展动态,开展海底耦合的研究.针对低频地动信号,优化整机结构,提高仪器记录天然地震的数据质量;积极开展海区天然地震观测.

(2) 在 863 计划支持下研发便携式高频 OBS.

采用 33 cm 耐压舱球,可将仪器体积、重量缩减近一半,更适用于高密度海洋地质调查.在此基础上进一步研制适用于深水油气海底地震勘探设备.

(3) 针对涉海研究单位的需求,开展仪器定制研发.

综上所述,国产宽频带 OBS 发展到今天,总体技术已经比较成熟,整机指标比较稳定,与国外同类产品相比具有自己的优势.回顾我国国产 OBS 从无到有的长期艰苦研发过程,应该说这是两代科学家和国内多个海洋研究单位共同努力的成果,特别是与来自国家科技部、财政部、中国科学院以及中国科学院地质与地球物理研究所各级领导的支持和来自全国众多地球物理专家的合作与帮助密不可分.在研制的过程中,项目组经历了成功的喜悦和失败的打击,也肩负了更多的希望.时至今日,项目组对每次海试用户反馈的意见与建议都认真地进行了分析,并对 OBS 进行了持续改进.未来还将在改进内部配重、增配浮力材料、调整上浮姿态等方面继续努力,使国产 OBS 更加实用、可靠.

**致谢** 感谢国家科技部、财政部、中国科学院在国产 OBS 研发过程中的大力支持!感谢国家海洋局第二海洋研究所、中国科学院南海海洋研究所、国土资源部广州海洋地质调查局、国家海洋局第一海洋研究所、大港油田等单位给予的合作与支持!对在国产 OBS 研发中热情关心、始终指导的刘光鼎院士、朱日祥院士、秦蕴珊院士、李家彪研究员、丘学林研究员、阮爱国研究员、周立宏教授以及所有关心该项目的人们,以及辛勤工作的《地球物理学报》评委



与编辑,在此一并致谢!

## 参考文献 (References)

- [1] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理系列图(1:500万). 北京:地质出版社, 1992  
Liu G D. Geophysical Series Maps in China Sea and Adjacent Regions (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1992
- [2] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质-地球物理系列图及说明书(1:500万). 北京:地质出版社, 1992  
Liu G D ed. Specification of Geophysical Series Maps in China Sea and Adjacent Regions (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1992
- [3] 李家彪. 中国边缘海形成演化与资源效应. 北京:海洋出版社, 2005  
Li J B ed. Evolution and Resources Effect of Marginal Basins in the China Sea (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2005
- [4] 丘学林, 施小斌, 阎 贫等. 南海北部地壳结构的深地震探测和研究新进展. 自然科学进展, 2003, **13**(3): 231~236  
Qiu X L, Shi X B, Yan P, et al. Deep seismic sounding and new progress in crustal structure of the northern South China Sea. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2003, **13**(3): 231~236
- [5] 郝天兆, 黄 松, 徐 亚等. 南海东北部及邻区深部结构的综合地球物理研究. 地球物理学报, 2008, **51**(6): 1785~1796  
Hao T Y, Huang S, Xu Y, et al. Comprehensive geophysical research on the deep structure of Northeastern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(6): 1785~1796
- [6] Li Z W, Xu Y, Hao T Y, et al.  $V_p$  and  $V_p/V_s$  structures in the crust and upper mantle of the Taiwan region, China. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2009, **52**(7): 975~983
- [7] 张 健, 熊亮萍, 汪集喏. 南海深部地球动力学特征及其演化机制. 地球物理学报, 2001, **44**(5): 602~610  
Zhang J, Xiong L P, Wang J Y. Characteristics and mechanism of geodynamic evolution of the South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(5): 602~610
- [8] Brias A, Pautot G. Reconstructions of the South China Sea from structural data and magnetic anomalies. In: Jin X, Kudrass H R, Pautot G, eds. Marine Geology and Geophysics of the South China Sea. Proc. Symp. On Recent Contributions to the Geological History of the South China Sea. Hangzhou: China Ocean Press, 1990. 60~70
- [9] Davis M, Kusznir N. Depth-dependent lithospheric stretching at rifted continental margins. In: Karner G D, Taylor B, Driscoll N W, eds. Rheology and Deformation of the Lithosphere at Continental Margins. Columbia: Columbia University Press, 2004. 92~137
- [10] Xia S H, Zhao M H, Qiu X L, et al. Crustal structure in an onshore-offshore transitional zone near Hong Kong, northern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, **37**(5-6): 460~472
- [11] 阎 贫. 海底地震仪记录中的横波. 海洋地质与第四纪地质, 1998, **18**(1): 115~118  
Yan P. Shearwaves in OBS Records. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 1998, **18**(1): 115~118
- [12] 丘学林, 赵明辉, 夏少红等. 大容量气枪震源与南海北部海陆联合深地震探测. 见: 金翔龙, 秦蕴珊, 朱日祥. 中国地质与地球物理研究进展. 北京:海洋出版社, 2008. 467~473  
Qiu X L, Zhao M H, Xia S H, et al. The large volume air gun sources and the onshore-offshore deep seismic experiments in northern South China Sea. In: Jin X L, Qin Y S, Zhu R X, eds. Progress of Geology and Geophysical Research of China (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2008. 467~473
- [13] 敖 威, 赵明辉, 丘学林等. 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, 2010, **53**(12): 2982~2991  
Ao W, Zhao M H, Qiu X L, et al. The correction of shot and OBS position in the 3D seismic experiment of the SW Indian Ocean Ridge. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(12): 2982~2991
- [14] 赵明辉, 丘学林, 夏少红等. 南海东北部三分量海底地震仪记录中横波的识别和分析. 自然科学进展, 2007, **17**(11): 1516~1523  
Zhao M H, Qiu X L, Xia S H, et al. Identification and analysis of shear wave from three-component OBS records of northeastern South China Sea. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2007, **17**(11): 1516~1523
- [15] 赵明辉, 丘学林, 夏少红等. 大容量气枪震源及其波形特征. 地球物理学报, 2008, **51**(2): 558~565  
Zhao M H, Qiu X L, Xia S H, et al. Large volume air-gun sources and its seismic waveform characters. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(2): 558~565
- [16] Digranes P, Mjelde R, Kodaira S, et al. Modelling shear waves in OBS data from the Voring basin (northern Norway) by 2-D ray-tracing. *Pure and Applied Geophysics*, 1996, **147**(4): 611~629
- [17] Flueh E R, Fisher M A, Bialas J, et al. New seismic images of the Cascadia subduction zone from cruise SO108-ORWELL. *Tectonophysics*, 1998, **293**(1-2): 69~84
- [18] Chian D P, Loudon K E, Minshull T A, et al. Deep structure of the ocean-continent transition in the southern Iberia Abyssal Plain from seismic refraction profiles: Ocean Drilling Program (Legs 149 and 173) transect. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1999, **104**(B4): 7443~7462
- [19] <http://www.geomar.ge/>
- [20] Katzman R, Holbrook W S, Paull C K. Combined vertical-incidence and wide-angle seismic study of a gas hydrate zone, Blake Ridge. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1994, **99**(B9): 17975~17995
- [21] Mienert J, Bünz S, Guidard S, et al. Ocean bottom

- seismometer investigations in the Ormen Lange area offshore mid-Norway provide evidence for shallow gas layers in subsurface sediments. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, **22**(1-2): 287~297
- [22] <http://www.geopro.com/home.html>
- [23] 阮爱国, 李家彪, 陈永顺等. 国产 I-4C 型 OBS 在西南印度洋中脊的试验. *地球物理学报*, 2010, **53**(4): 1015~1018  
Ruan A G, Li J B, Chen Y S, et al. The experiment of broad band I-4C type OBS in the Southwest India ridge. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(4): 1015~1018
- [24] 吴振利, 李家彪, 阮爱国等. 南海西北次海盆地壳结构: 海底广角地震实验结果. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 2011, **41**(10): 1463~1476  
Wu Z L, Li J B, Ruan A G, et al. Crustal structure of the northwestern sub-basin, South China Sea: Results from a wide-angle seismic experiment. *Sci. China Earth Sci.* (in Chinese), 2011, **41**(10): 1463~1476
- [25] 薛彬, 阮爱国, 李湘云等. 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*, 2008, **26**(2): 98~102  
Xue B, Ruan Y G, Li X Y, et al. The seismic data corrections of short period auto-floating ocean bottom seismometer. *Journal of Marine Sciences* (in Chinese), 2008, **26**(2): 98~102
- [26] Zhao M H, Qiu X L, Xia S H, et al. Seismic structure in the northeastern South China Sea: S-wave velocity and  $V_p/V_s$  ratios derived from three-component OBS data. *Tectonophysics*, 2009, **480**(1-4): 183~197
- [27] 赵明辉, 丘学林, 李家彪等. 慢速、超慢速扩张洋中脊三维地震结构研究进展与展望. *热带海洋学报*, 2010, **29**(6): 1~7  
Zhao M H, Qiu X L, Li J B, et al. Research development and prospect on three-dimensional seismic structures of slow and ultraslow spreading ocean ridges. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2010, **29**(6): 1~7

(本文编辑 何燕)