

刘思青, 陈洁, 曹骏, 等. 滨海型宽频带海底地震仪的技术特点及其数据质量分析[J]. 华南地震, 2020, 40(1): 73–80. [LIU Siqing, CHEN Jie, CAO Jun, et al. Technical Characteristics and Data Quality Analysis of Coastal Type Wide-band Ocean Bottom Seismometer[J]. South China journal of seismology, 2020, 40(1): 73–80]

滨海型宽频带海底地震仪的技术特点 及其数据质量分析

刘思青¹, 陈洁², 曹骏², 王先庆¹, 袁松湧³

(1. 广州海洋地质调查局, 广州 510760; 2. 珠海市泰德企业有限公司, 广东 珠海 519080;
3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 我国海洋地震监测研究起步较晚, 深入开展相关的技术方法研究势在必行。通过对我国自主研发的滨海型宽频带海底地震仪的工作原理、总体设计以及野外的布放回收过程进行系统介绍, 并对其在我国黄渤海海域的实践过程进行数据质量分析, 结果显示: 滨海型宽频带海底地震仪的总体设计十分合理, 不仅有效降低了渔业活动、海流、生物腐蚀等外部因素对仪器的影响, 又可满足低功耗供电和高质量数据记录, 也可以有效克服内部时钟漂移的影响; 与常规利用声通讯释放技术的回收方式不同, 地震仪回收作业采用潜水员水下作业的方式, 有效减少了系统的成本, 适合滨海海洋地震勘探; 与陆地台站大连台对比分析, 滨海型宽频带海底地震仪亦可记录到清晰可靠的P波、S波信号, 数据质量较高。

关键词: 滨海型; 宽频带海底地震仪; 仪器设计; 地震观测

中图分类号: P738.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2020)01-0073-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.01.011

Technical Characteristics and Data Quality Analysis of Coastal Type Wide-band Ocean Bottom Seismometer

LIU Siqing¹, CHEN Jie², CAO Jun², WANG Xianqing¹, YUAN Songyong³

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China; 2. Zhuhai Taide Enterprises Limited, Zhuhai 519080, China; 3. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: It is imperative to carry out marine seismic observation research, which started late in China. Based on the systematic introduction of the working principle, overall design, field release and recovery process of the coastal wide-band ocean bottom seismometer (OBS) that is independently developed in China and quality analysis of the data obtained in Huanghai and Bohai Sea, the following understandings are obtained: the overall design of the coastal wide-band OBS is quite reasonable, which not only effectively reduces the influence of

收稿日期: 2019-10-22

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项“海洋地磁场矢量测量仪开发与应用”(2014YQ100817); 广东省基础与应用基础研究基金“白云凹陷陆架坡折迁移前后的沉积响应及其对水合物成藏的影响”(2020A1515011172); 国家重点研发计划项目“天然气水合物高分辨率三维地震探测技术”(2017YFC0307400)

作者简介: 刘思青(1990-), 女, 博士, 工程师, 主要从事海洋地质与深部构造探测与研究。

E-mail: lsq13140307@126.com.

通信作者: 陈洁(1985-), 男, 本科, 工程师, 主要从事地震仪器的研发制造。**E-mail:** cj@tai-de.com.

external factors, such as fishery activities, ocean currents and biological corrosion on the instrument, but also meets the requirements of low power supply and high quality data recording, and can effectively overcome the influence of internal clock drift; different from the conventional recovery method using acoustic communication release technology, the coastal type OBS is recovered by divers, which effectively reduces the cost and is suitable for coastal marine seismic exploration; compared with Dalian station, the coastal type OBS can also record reliable P-wave and S-wave signals with high data quality.

Keywords: Coastal type; Wide-band ocean bottom seismometer(OBS); Instrument design; Seismic observation

0 引言

海底地震观测是全球地震观测不可或缺的一部分。把地震观测技术引入到海底观测之中,可以用于研究大陆边缘、洋中脊和海沟等区域的壳幔结构及其动力学演化,也可用于天然地震的地震活动和地震预报研究,为地震监测、防震减灾和地球科学的基础研究提供科学依据。与常规反射地震法不同的是,海底地震仪(OBS)探测直接将仪器沉入海底并与其耦合,消除了海水层和陆地噪音对地震信号的影响,更适宜地震观测,且可以同时记录来自于深部的纵横波信息,极大的丰富了地下地质体的结构信息。海底地震观测站点和陆地观测台站比,前者的站点非常稀疏且分布不均,仅仅依靠陆地上的观测网不能了解海底地震的发生和发展信息,想测定震源机制参数甚至开展进一步的科学研究也十分困难。综上,开展海底地震台阵观测方式的研究十分必要。

OBS 是一种将地震计通过封装处理直接放置在海底的地震观测系统,也是组成海底地震台阵的基本单元。由于 OBS 所处的海底观测环境具有特殊性,对于该项设备的技术要求是:体积小、重量轻、耗电省,水密防腐以及布放回收便捷等特点。OBS 分为主动源和被动源两大类,此外还有用以连接海底观测网络的 OBS 类型。主动源 OBS 以船上的大容量气枪阵列为震源,主要用于二维、三维深部结构探测,科学家们在我国南海、黄渤海、东海以及太平洋和印度洋等国际海域已进行了大量主动源探测工作,收获了丰富的研究成果^[1-5];被动源 OBS 是一种以自然界的天然地震为震源的观测设备,该种 OBS 具有观测时间长,频带范围宽并且可以克服时钟漂移等技术特点。由于被动源 OBS 的研发和作业难度比较大,相关技术在我国海洋深部探测和科学研究中的成功案例并不多,所以研究基础相对薄弱。根据海底观测环境的不同,对于被动源 OBS 的技术需求也不

同,总体上,可分为深水型宽频带海底地震仪(下文简称: DOBS)和滨海型宽频带海底地震仪(下文简称: SOBS)两类。DOBS 主要是带声学释放器的、可自返海面的海底宽频带地震仪,适用于大陆边缘、海盆、海沟和洋中脊等深水海域;SOBS 主要适用于海陆交互带、滨海和大陆架等水深较浅的海域。

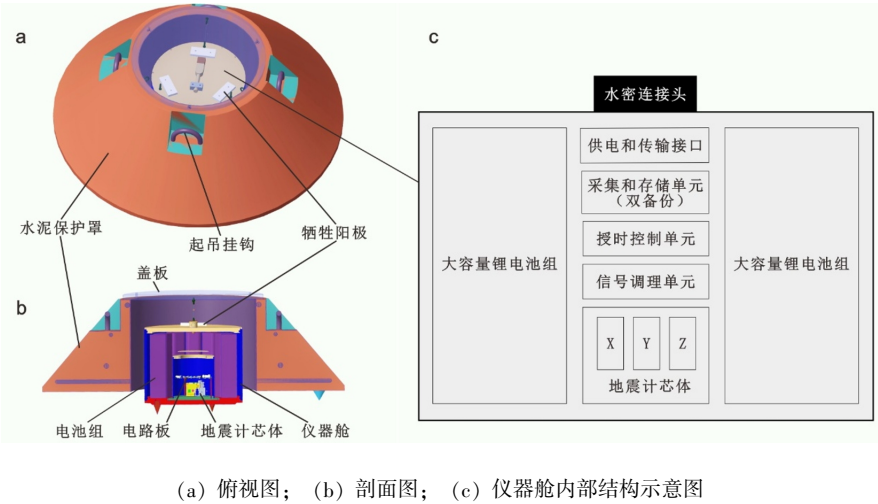
针对不同海域海底地震观测环境的特殊性,对海底观测设备的适应性研究也十分重要。本文在介绍 TDO-63B 型 SOBS 工作原理、野外试验的基础上,对其数据质量进行系统分析,为今后在我国滨海和大陆架开展宽频带海底地震仪的研究提供经验与借鉴,进而促进 SOBS 技术的普及推广,更好地服务我国沿海地区的地震活动监测能力、强地震预警能力及地震活动的认识水平,为地方经济发展、防灾减灾提供基础科学服务。

1 仪器及设计原理

1.1 总体设计

TDO-63B 型 SOBS 是根据我国滨海和大陆架海域开展海底地震观测量身定做的科学观测装置,可应用于南海北部的滨海断裂带、黄渤海的郯—庐断裂带和北部湾红河走滑断裂带等海域的科学研究。

根据地震观测技术要求以及在滨海和大陆架开展海底地震观测的环境特殊性,SOBS 的仪器设计需要考虑:① 设备运行的低功耗;② 克服内部时钟漂移;③ 耐压防水;④ 防止海水和海洋生物的腐蚀;⑤ 与海底的良好耦合;⑥ 克服海底流体影响和人类的渔业活动等综合因素。因此,本着坚固、简单、低成本和布放回收简便等原则,由珠海泰德企业有限公司设计和制作了 TDO-63B 型 SOBS,并拥有自主知识产权和相关专利。TDO-63B 型 SOBS 设备由水泥保护罩(或称外壳)和仪器舱两个部分组成,见图 1。



(a) 俯视图；(b) 剖面图；(c) 仪器舱内部结构示意图

图 1 TDO-63B 型 SOBS 结构示意图

Fig.1 Structure diagram of TDO-63B SOBS

1.2 外壳设计

在图 1 中，TDO-63B 型 SOBS 外壳的俯视图(图 1a)和剖面图(图 1b)体现了仪器总体设计的基本原则。具体的措施是：

根据人类渔业活动（如拖网等）对于 SOBS 工作带来的潜在威胁，设计考虑了防护措施，在外型设计和重量设计时增加了特殊防护外壳，并减少了声学通讯应答单元来降低设备的制作成本。

为了克服海流对地震计的影响，将地震计和防护外壳分离，两者采用软连接，加上框架采用梯型（顶部窄底部宽）结构设计，可有效地减弱外部流体活动对传感器的影响，整个设备有比较大的自重，确保地震计与海底的良好耦合。

为了耐压防水、防止海水和海洋生物的腐蚀，地震计使用了一种高标号不锈钢材料构建的耐压密封仪器舱封装，仪器舱外部固定了牺牲阳极的特殊金属块，并用特殊防海洋生物（如海蛎子等）的涂料。

根据 SOBS 收放的特殊需求，在外壳上加装起吊挂钩装置，确保仪器的成功回收。

1.3 地震计设计

TDO-63B 型SOBS 的仪器舱主要由传感器单元、信号调理单元、授时控制单元、采集存储单元和供电单元组成，见图 1c 所示。其中，传感器单元包括 3 个互相正交的地震检波器，可将地动信号转换为可测量的电信号；信号调理单元主要功能是将传感器单元采集到的电信号经反馈、滤波、放大、模/数转换等处理之后记录到采集存储单元里；授时控制单元采用泰德公司自主研发的

一套低功耗、高精度海底授时系统，可以为 SOBS 提供 0.1ppm/30day 的时间服务精度；采集存储介质为 32G 大容量存储卡；供电单元由大容量锂电池组构成。其主要技术指标见表 1。

表 1 TDO-63B 型 SOBS 主要技术指标

Table 1 Main technical specifications of TDO-63B SOBS

项目	指标
地震计类型	三分向一体，电容换能反馈式地震计
地震计频带	30s~50Hz，速度平坦输出
采集器通道	三通道，24 位
工作水深	0~200 m
连续工作时间	大于 12 个月
释放及回收	人工辅助释放回收或 ROV 打捞
最大工作倾角	30°
电源配置	大容量锂电池
存储介质	大容量存储卡，32 GB
仪器重量	约 500kg，其中传感器观测罐重量约 40~100kg（根据耐压、内置电池确定）

2 资料采集

2.1 观测设备的野外布放

渤海海域位于渤海湾盆地的中东部，平均水深 18 m；黄海是一个浅海大陆架，习惯上将山东半岛成山角与朝鲜白翎岛的连线以北的海区称为北黄海，北黄海平均水深 38 m。试验海区位置图见图 2。设备投放时，船慢速移动靠近工区站位附近，利用吊机吊起，当设备完全进入水中后再投放，投放时船保持低速匀速移动，按照站位编号依次投放 SOBS，直到所有设备全部下水，投放作业完毕（图 3）。

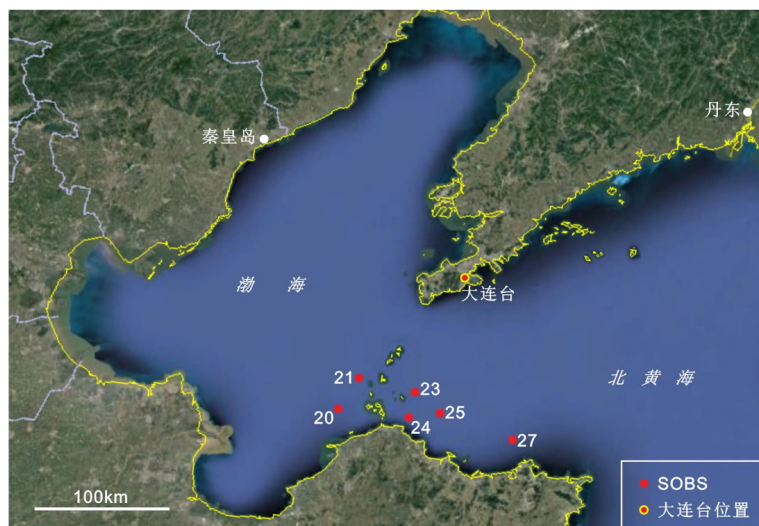
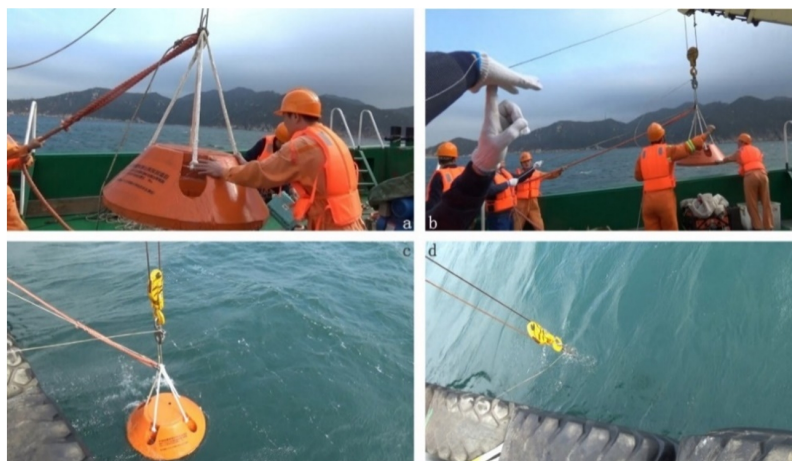


图2 已回收的 SOBS 及大连台位置图

Fig.2 The location of recovered SOBS and Dalian station



(a) 起吊; (b) 准备下海; (c) 入海; (d) 水下脱钩

图3 TD0-63B 型 SOBS 释放过程

Fig.3 Release process of TD0-63B SOBS

2.2 观测设备的野外回收

SOBS 分为内置仪器舱和外围保护设备, 打捞时将设备整体回收至甲板后再进行分离, 仪器舱相对脆弱, 打捞回收时应尽量小心。与常规利用声通讯释放技术的回收方式不同, 本次 SOBS 回收作业采用了潜水员水下打捞方式, 第一航段回收了 6 台, 位置图见图 2, 具体打捞流程如下:

(1) 准备好重物及浮球, 重物与浮球间绳索相连。根据投放时坐标确定好准确的投放落水点后, 垂直投入重物同时陆续自然释放绳索。

(2) 潜水员沿着浮球的绳索下潜至重物位置, 以重物为中心, 10 m 范围为半径搜索 SOBS, 找到后与甲板人员通讯, 若未找到则继续以 15 m 为半径搜索。

(3) 确定 SOBS 的位置后, 潜水员用准备好的绳索连接船只甲板上的绞车与 SOBS; 用水上通讯电话通知潜水员离开 SOBS 足够远距离, 保证安全的前提下用绞车缓慢上提 SOBS, 缓缓上提至水下 1 m 位置停住。

(4) 启动船只甲板上的吊机, 甲板操作人员负责把止荡绳钩子挂住设备防止设备摇荡, 吊机与止荡绳一起协助把设备放在甲板上预备好的木托盘上。

(5) 回收后进行设备外观检查及数据检查。

2.3 海底观测过程中遇到的问题

由于海上地震观测比陆地地震观测的环境条件要恶劣得多, 在项目实施过程中主要存在以下两个方面的问题:

(1) 近海渔业和海流活动对 OBS 造成较大影响。由于渤海—北黄海水深较浅,海底海流对 OBS 的观测存在较大干扰,同时该区域渔业活动频繁,普通的球形 OBS 很容易被海流和渔网带走,导致设备与海底耦合较差,偏离实际投放点距离较远。本次研究的地震仪采用外部实心混凝土框架包围仪器舱的结构,有效的减少了外界环境对宽频带地震仪的干扰,在外观设计上采用梯型(顶部窄底部宽)结构,可有效地减弱海底洋流对设备的冲击;又由于整个设备自重较大,可确保与海底沉积物之间很好耦合。

(2) OBS 在海底记录时间长达一年以上,需同时满足低功耗供电和高质量地震数据记录。信号放大过多会增加耗电,信号放大不足会造成有效信号淹没在噪声里,这就要求系统功耗与数据记录信号二者之间达到一个平衡状态。TDO-63B 型 SOBS 采用的锂亚硫酰氯(Li/SOCl₂) 电池是实际应用电池系列中比能量最高的一种电池,比能量可达 500 W·h/kg 以上,OBS 整机的静态功耗约为 0.6W (其中数据采集为双备份设计),电池组理论总容量为 13 000 W·h。但由于海底温度(海底温度偏低,降低了电池容量)、放电效率、电池自放电、系统并非所有时间都工作在静态状态下、以及系统在电池未全部放光电之前可能已处于非正常工作状态(电池亏电状态无法维持系统正常工作)等因素的影响,保守估计实际容量为理论容量的 60%,即 7800 W·h。综上,预计 OBS 的持续

工作时间 $7800\text{ W}\cdot\text{h}/0.6\text{ W}=13\ 000\text{ h}$,约为 542 d,满足在浅水海域中开展中长期、高质量的海底地震观测。

3 观测数据的质量分析

3.1 SOBS 回收后情况简介

实验采集的数据包括原始数据文件和监控日志文件两部分信息,均记录在内置的大容量存储卡(32G)中。其中,原始数据文件为标准 SEED 格式,存储过程为实时数据存储;监控日志文件为二进制格式,包括时钟漂移、晶振准确性、晶振压控电压输出、UD 零位、EW 零位、NS 零位、供电电压、电池电压、内部温度、内核温度和经纬度等信息。

第一航段 SOBS 的回收率为 100%,数据完整率为 100%。其中 BH27 台站表现出明显的拖动痕迹,在距投标点将近 14 m 的位置被找到,水泥保护罩上刮痕明显,挂绳磨损严重,其余 5 个台站受外界的影响相对较小。

时间记录是 OBS 数据最为重要的信息之一,其准确性决定了后续数据处理的可靠性。时钟漂移是指 SOBS 投放前和回收后两次 GPS 对钟之间的时间差,SOBS 在海底作业期间,靠其内部的时钟源,即高精度晶振,来记录时间信息,之后利用时钟漂移对其进行校正,用以获得准确的地震波走时信息。所有回收台站的信息详见表 2。

表 2 SOBS 回收基本信息表

Table 2 Basic information of the recovered SOBS

站点名称	水深/m	OBS 离投标点距离/m	海底地质	OBS 掩埋情况	OBS 渔网刮痕	OBS 挂绳磨损	OBS 腐蚀情况	数据完整度	钟漂/s
BH27	≈20	<14	硬泥底	正常	明显	严重	轻微	完整	0~1
BH25	≈20	<3	软泥底	正常	少	无	轻微	完整	0~1
BH24	≈20	<3	软泥底	一侧泥较多	无	无	轻微	完整	0~1
BH23	≈20	3	软泥底	正常	少	无	轻微	完整	0~1
BH21	≈20	<2	软泥底	正常	少	无	轻微	完整	0~1
BH20	≈20	<6	软泥底	正常	少	无	轻微	完整	0~1

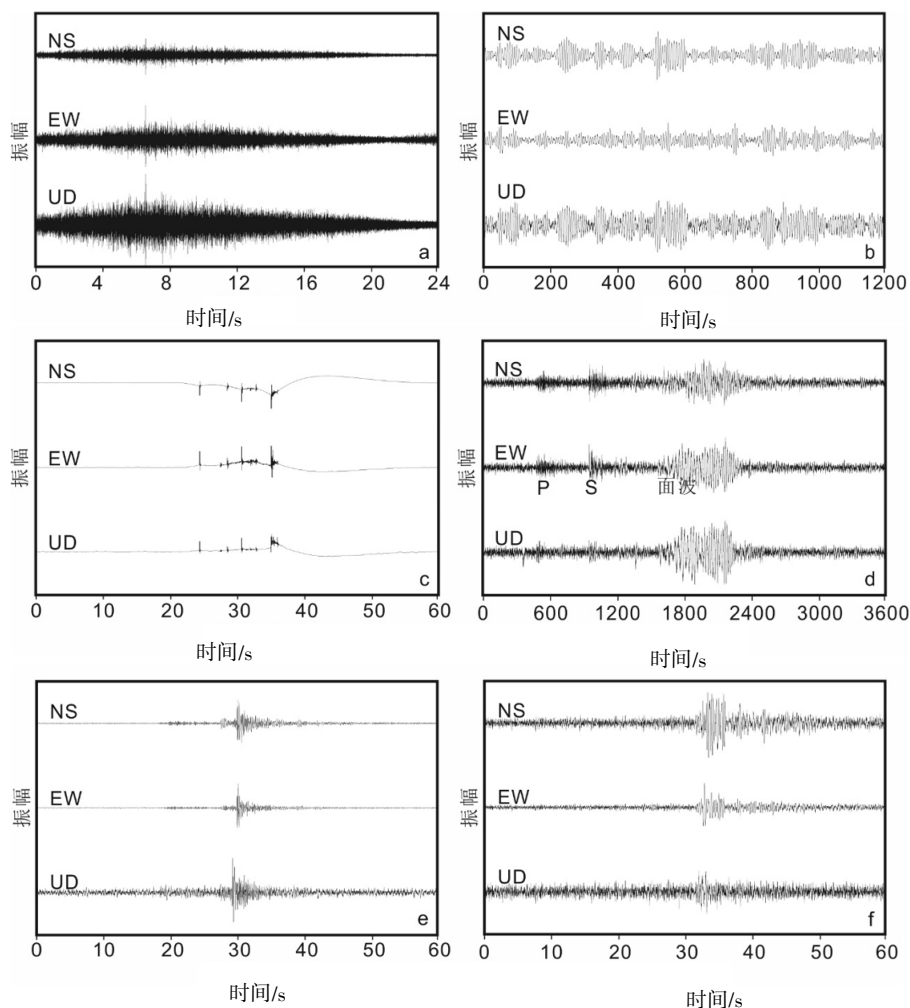
3.2 典型震相分析

图 4 是 TDO-63B 型 SOBS 在海底作业过程中记录到的典型震相。图 4(a)为海流日数据记录,通常表现为纺锤形,在一天的开始和结束阶段海流噪声最小;图 4(b)为随机截取的 1200 s 长度的海流数据记录,表现为不规则的波动信息,且垂直方向波动(UD)大于水平方向波动(NS、EW);

图 4(c)为渔业活动过程中渔网(鱼钩)对 OBS 的拖曳信号,波形特征上表现为急剧的跳跃起伏状态,从表 2 中可看出 BH27 台站被拖拉的距离最远,达 14 m;图 4(d)是美国阿拉斯加 7.2 级地震记录,该地震相对 BH21 台站的震中距为 56.88°,属于远震(一般震中距大于 30°是远震),地震记录非常清晰,震相丰富(P 波、S 波、面波);图 4(e)为

SOBS 观测台站附近的小震记录,图 4(f)为河北唐山滦县 2.6 级地震记录,该地震相对 BH21 台站的震中距为 2.1205° ,记录清晰,属于小震,这也有力的说明了 SOBS 数据质量的可靠性。综上,无论

近震还是远震,大震还是小震,TD0-63B 型 SOBS 所记录的波形数据均完整清晰、震相明确、信噪比高,为地震活动的长期监测及地下精细结构的认识创造了有利条件。



(a)BH21 台 24 h 海流记录;(b)BH21 台 1200s 海流记录;(c)BH27 台渔网(鱼钩)拖曳信号;(d)BH21 台 2018.12.1 美国阿拉斯加 M 7.2 地震;
(e)BH21 台 2019.1.1 渤海附近小震;(f)BH21 台 2019.3.2 河北唐山滦县 M 2.6 地震

图 4 SOBS 观测期间的典型信号(NS 和 EW 代表水平分量,UD 代表垂直分量)

Fig.4 Typical signals during SOBS observation

(NS and EW represent the horizontal components,UD represents the vertical component)

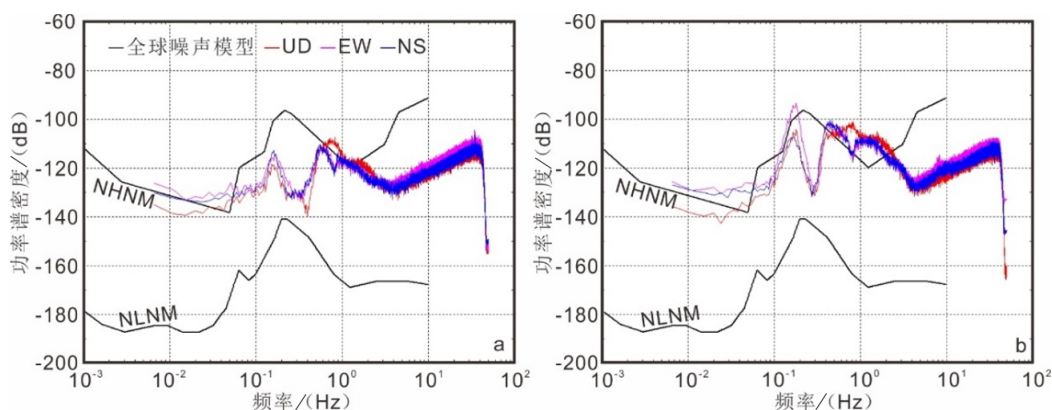
根据 TD0-63B 型 SOBS 记录的数据,对海底噪声进行了初步分析。图 5(a)和 5(b)分别是海底平静时段和较大海流时段的功率谱密度曲线,图中 NLNM 和 NHNM 分别代表低噪声和高噪声功率谱密度的全球平均模型,可看出谱线整体形态与全球模型较为一致,从另一方面反映了海洋噪声的水平。从垂直向和水平向的表现来看,SOBS 垂直向受到海底环境的影响小于水平向,这体现了 SOBS 所采用的耦合方式的特点。

选取辽宁省大连地震台地震数据和本研究 SOBS 观测数据进行对比(图 6)。图 6(a)和图 6(c)是 2019 年 6 月 17 日四川 M 6.0 地震,图中可看出虽是同一地震,但由于台站方向和位置的差异,接受到的地震信号也会有一定差异,图 6(b)和图 6(d)是渤海海域附近 M 3.0 左右的地震记录,SOBS 台站所记录的 P 波和 S 波振幅均较小,大连台的 P 波振幅明显大于 S 波振幅,这说明同一震源的地震波经过不同路径会对波形产生较大的影响^[6-7]。

4 结语

通过野外实践和室内资料的整理分析, DO-63B 型 SOBS 采用较大自重的混凝土框架, 有效的减少了渔业活动对 OBS 的反复拖曳, 促进了 OBS 与海底更好的耦合, 同时也保护了内部仪器舱不受海流影响, 提高了数据质量; 采用人工下潜的方式回收设备, 减少了系统的成本, 适合滨海海

洋地震勘探, 仪器的整体设计较为合理, 其 100% 的回收成功率和数据完整率也反映了海上作业技术方法的安全性合理性。SOBS 在渤海成功记录到了不同类型的天然地震信号, 可清晰识别 P 波、S 波和面波等地震波形, 数据质量较好, SOBS 在黄渤海海域的成功试验, 为海底地震观测提供了新的技术方法, 填补了滨海和大陆架区域海底地震观测的空白。

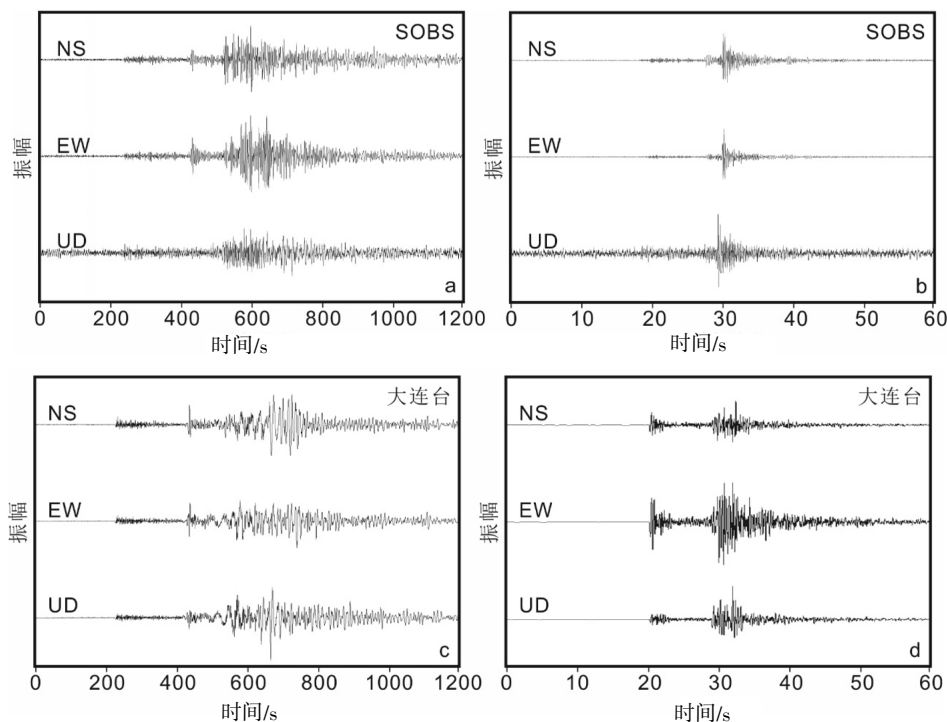


(a) 海底较为平静时段背景噪声; (b) 较大海流时段背景噪声

图 5 海底台基噪声功率谱 (NS 和 EW 代表水平分量, UD 代表垂直分量)

Fig.5 Noise power spectrum of the station on ocean bottom

(NS and EW represent the horizontal components, UD represents the vertical component)



(a) SOBS 2019-06-17 M 6.0 四川地震记录; (b) SOBS 在渤海附近 M 3.0 左右地震记录;
(c) 大连台 2019-06-17 M 6.0 四川地震记录; (d) 大连台在渤海附近 M 3.0 左右地震记录

图 6 SOBS 和大连台信号对比

Fig.6 Signal comparison of SOBS and Dalian station

致谢：广州海洋地质调查局方法所徐行副所长、珠海泰德企业有限公司罗新恒总工在文章写作过程中提供了大量的指导帮助，本研究中陆地固定台站地震数据由大连地震台提供，在此一并表示感谢。

参考文献：

- [1] Liu L H, Hao T Y, et al. Crustal structure of Bohai Sea and adjacent area (North China) from two onshore-offshore wide-angle seismic survey lines [J]. J Asian Earth Sci, 2015, 98: 457-469.
- [2] Liu S Q, Zhao M H, et al. Geophysical constraints on the lithospheric structure in the northeastern South China Sea and its implications for the South China Sea geodynamics [J]. Tectonophysics, 2018, 742-743: 101-119.
- [3] Hao T Y, You Q Y, et al. Joint land-sea seismic survey and research on the deep structures of the Bohai Sea areas [J]. Acta Oceanol Sin, 2013, 32(12): 13-24.
- [4] Qiu X L, Zhao M H, Ao W, et al. OBS survey and crustal structure of the SW sub-basin and Nansha Block, South China Sea [J]. Chinese J Geophys, 2011, 54(6): 1009-1021.
- [5] Wan K Y, Lin J, Xia S H, et al. Deep seismic structure across the southernmost Mariana Trench: Implications for arc rifting and plate hydration [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019: 124.
- [6] 陈幸莲, 陆镜辉, 徐行, 等. 广东阳江深井中的变化地磁场特征研究 [J]. 华南地震, 2019, 39(4): 53-59.
- [7] 邢琮琮, 徐行, 陆镜辉, 等. 南海北部陆海台站地磁观测与磁场模型计算的对比分析 [J]. 华南地震, 2019, 39(4): 60-68.