

实测数据揭示海底地震仪上浮速率与出水点规律

程立群1,方银霞1*,牛雄伟1,2,王 嵘1,2,卫小冬1,2,阮爱国1,2,李家彪1

- 1. 自然资源部海底科学重点实验室,自然资源部第二海洋研究所,浙江杭州 310012
- 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),广东珠海 519000

摘 要:使用海底地震仪(OBS)对极地浮冰区进行探测时,存在上浮的OBS被浮冰遮挡而难以发现和回收等困难,为提高两极浮冰区海底地震探测效率,亟需对OBS上浮出水时间和位置进行较为准确地预测.本研究以2019年南海OBS观测、2020年西太平洋OBS探测以及2011年南海东部次海盆三维OBS探测现场作业的实测距离和位置信息等数据为基础,分析了OBS上浮速率、投放点和出水点的特征,开展了OBS在水中下沉和上浮的运动过程研究,总结了OBS出水点的分布规律.结果表明:(1)在垂直方向上,OBS上浮速率近似匀速,可用平均速率代替,进而可精确计算上浮出水时间;(2)OBS在海底的位置与投放位置的偏移距随机分布,这表明投放点水深与重定位偏移距离无明显线性相关性;(3)OBS上浮出水点与投放点有重合的趋势,两者距离在300m以内的概率大于31%,两者距离在500m以内的概率大于59%.

关键词:海底地震仪;OBS上浮速率;OBS出水点;海底地震探测;海洋地质.

中图分类号: P715 文章编号: 1000-2383(2021)03-1072-11 收稿日期:2020-11-24

Floating Rate and Sea Surface Outlet Point of Ocean Bottom Seismometer

Cheng Liqun¹, Fang Yinxia^{1*}, Niu Xiongwei^{1,2}, Wang Rong^{1,2}, Wei Xiaodong^{1,2}, Ruan Aiguo^{1,2}, Li Jiabiao¹

- 1. Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China
- 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China

Abstract: Ocean bottom seismometer (OBS) active and passive experiments are the most useful methods to reveal crustal and upper mantle structures under the ocean, but till now, few OBS experiments have been done in the Arctic and Antarctica, where the main challenges are finding and recovering the OBSs sheltered by the high coverage rate of floating ices. For the forthcoming OBS experiments in the polar regions, it is necessary to study the time and the location of OBS surfacing to the sea (outlet position). To reveal the process of OBS sinking and floating in the sea and to find the law of OBS's outlet position, we use the information of the up-floating rate, deployment position and recovery position of OBS during three expeditions of the 2019 South China Sea OBS observation, 2020 Western Pacific OBS experiment and 2011 the South China Sea three-dimension OBS experiment in this study. The main results are as follows: (1) The OBS shows stable up-floating rate in the vertical direction, which will be helpful to predict the moment of OBS surfacing to the sea; (2) the OBS locations on the sea bottom are randomly distributed with the offset of the drop location, which indicates that the water depth at the drop point has no obvious linear correlation with the relocation offset distance; (3) the outlet position and deployment position of OBS suggest very close distance, with a statistical estimate of <300 meters (31%) and <500 meters (59%).

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2017YFC1405502);"全球变化与海气相互作用"专项项目(No. GASI-GEOGE-01);国家自然科学基金项目(Nos. 41876060, 41776053).

作者简介:程立群(1996—),女,硕士在读,主要从事海底地震探测研究. ORCID: 0000-0002-6978-0725. E-mail:192389601@qq.com *通讯作者:方银霞, E-mail: fangyx@sio. org. cn

Key words: ocean bottom seismometer; floating rate of OBS; sea surface outlet point of OBS; ocean bottom seismic survey; marine geology.

0 引言

海底地震仪(ocean bottom seismometer, 简称 OBS)是开展海洋地球物理场调查的重要设备,将 其布设在海底,可记录人工和天然地震信号,用于 揭示海洋下方地壳、上地幔速度和各向异性等深部 结构特征,有助于开展大陆裂解、洋中脊扩张和板 块俯冲等板块构造过程的研究(Caress et al., 1995; 丘学林等,2003;阮爱国等,2004;Zhao et al., 2010; 牛雄伟, 2014; 赵明辉等, 2018; Kong et al., 2020; 黎雨晗等,2020);除此之外,也可以利用海底地震 仪获取由水合物活跃等局部地质现象引起的微震 动信息(朱俊江等,2020).OBS的海上作业流程通 常分为3步:(1)在设计站位从调查船上投放OBS, 借助配重使地震仪自由落体到海底;(2)OBS在海 底记录人工地震、天然地震以及其他声学信息;(3) 通过水声通讯控制 OBS 与配重分离, OBS 自由上 浮至水面后被打捞上船(胡家赋等,2012).由于布设 和回收过程中,通常没有条件使用超短基线等定位 设备来实时获取OBS下沉和上浮过程中的位置,使 得研究人员无法确定OBS在海面投放点和回收点 之间的真实移动轨迹,因此无法获取OBS在海底和 露出水面时的准确位置.对于OBS在海底的位置, 可以使用放炮测线的直达水波到时信息计算获得 (夏常亮,2009;敖威等,2010;夏少红等,2011;张莉 等,2013;牛雄伟等,2014).但对于OBS露出水面的 时间和位置,目前仍无有效手段获得(即使OBS装 有 GPS,由于与卫星通讯需要一定时间导致定位数 据滞后).而OBS上浮至水面的时间和位置对于快 速、高效、安全地回收OBS至关重要,尤其是在南极 和北极大范围浮冰覆盖区、渔船作业区和海况恶劣 区等.因此,为了提高OBS回收效率,非常有必要开 展对 OBS 出水时间和位置(出水点)的研究.

本研究基于 2019 年南海被动源 OBS 观测现场作业的实测距离和位置信息、2020 年西太平洋二维主动源 OBS 探测试验数据、以及 2011 年南海东部次海盆三维主动源 OBS 探测站位位置信息(张莉等, 2013),主要针对以下两个问题进行了分析:(1) OBS 上浮至水面的时间:对 OBS 上浮过程进行了一维模拟并与实测数据进行对比分析,评

价了实际作业中用于计算 OBS 出水时间的方法; (2) OBS 上浮露出水面的位置:探讨了水深对 OBS 落底位置、出水点位置的影响,并对 OBS 出 水点分布规律进行了初步分析与预测.

1 数据来源

1.1 2019年南海被动源 OBS 观测试验

自然资源部第二海洋研究所在南海开展的被动源OBS观测试验,于2019年8~9月完成了对宽频带OBS的布设,于2020年7月完成了OBS的回收.在回收过程中对两台OBS上浮过程进行了连续测距,其站位分布见图1a,其中OBS-1的投放点(投放时船所在的位置)水深为2092m,OBS-2的投放点水深为3481m,测量数据见表1和表2.

1.2 2011 年 南 海 东 部 次 海 盆 三 维 主 动 源 OBS 探测 试 验

2011年5~6月由中国科学院南海海洋研究所组织,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单位参加,在南海东部次海盆开展了三维主动源OBS探测试验.该地震航次所使用的震源系统由4支1500 L型号的BOLT气枪组成,共布设42台OBS,其中投放点水深最浅处为949 m,最深处为4322 m,半数OBS投放点水深超过4000 m,具体布设情况如图1a所示.其中一台OBS丢失,两台OBS没有记录数据,因此只分析了39台OBS的位置信息.张莉等(2013)利用OBS记录的主动源地震波信息,对OBS进行位置校正,得到了OBS在海底的理论位置.在此基础上,本文计算了OBS海底理论位置与海面投放点的距离,笔者称之为"重定位偏移距离".该试验数据用于研究OBS投放深度与重定位偏移距离之间的关系.

1.3 2020年西太平洋二维主动源 OBS 探测试验

2020年初,自然资源部第二海洋研究所在西太平洋进行了主动源 OBS 探测,站位分布如图 1b 所示.现场作业过程中记录了每台 OBS 浮出水面的预测时间(利用投放点水深和 OBS 平均上浮速率相除得到)和实际打捞上船的时间,这两个时间差为打捞 OBS 耗时,即 OBS 在海面漂流的时长.此外,利用 OBS 回收点坐标与投放点坐标之差,计算出回收

表1 OBS-1上浮过程轨迹信息

Table 1 Trajectory information of the process of floating of OBS-1

*实测距离(m)	船漂离投放点距离(m)	计算所得OBS深度(m)	两次测量时间间隔(s)	上浮速率(m/s)
2 091	402	2 052	/	/
2 028	498	1 966	75	1.15
1 970	513	1 902	60	1.06
1 869	544	1 788	138	0.83
1 822	555	1 735	42	1.25
1 768	568	1 674	60	1.02
1 726	586	1 623	60	0.85
1 685	594	1 577	60	0.78
1 638	607	1 521	60	0.92
1 588	620	1 462	60	0.99
1 548	629	1 414	60	0.79
1 496	641	1 352	60	1.05
1 449	652	1 294	60	0.96
1 412	663	1 247	60	0.79
1 369	675	1 191	60	0.93
1 337	686	1 148	60	0.72
1 240	726	1 005	180	0.79

表 2 OBS-2上浮过程轨迹信息

Table 2 Trajectory information of the process of floating of OBS-2

*实测距离(m)	船漂离投放点距离(m)	计算所得OBS深度(m)	两次测量时间间隔(s)	上浮速率(m/s)
3 369	209	3 363	/	/
3 336	220	3 329	38	0.89
3 296	227	3 288	30	1.35
3 265	235	3 257	30	1.05
3 179	262	3 168	90	0.98
3 149	274	3 137	30	1.04
3 121	284	3 108	30	0.97
3 063	308	3 047	60	1.01
3 036	322	3 019	30	0.95
3 008	336	2 989	30	0.99
2 973	357	2 951	40	0.94
2 925	385	2 900	50	1.04
2 899	402	2 871	30	0.95
2 873	420	2 842	30	0.96
2 847	438	2 813	30	0.97
2 821	457	2 784	30	0.98
2 795	477	2 754	30	0.99
2 770	495	2 725	30	0.95
2 732	529	2 680	50	0.90
2 699	556	2 641	40	0.98
2 650	598	2 582	60	0.99
2 605	638	2 526	60	0.93
2 559	678	2 468	60	0.97
2 514	720	2 409	60	0.98
2 473	664	2 353	60	0.93
2 432	608	2 296	60	0.95
2 394	552	2 240	60	0.92
2 359	496	2 187	60	0.90
2 322	440	2 129	60	0.96
2 288	968	2 073	60	0.93
2 256	912	2 018	60	0.93
2 226	856	1 962	60	0.92
2 194	800	1 903	60	0.99
2 173	744	1 854	60	0.81
2 150	688	1 801	60	0.89

注:该数据来自 2019 年南海被动源 OBS 观测试验 .*实测距离 (Dr): 声学换能器与 OBS 之间的直线距离 (斜距); 船漂离投放点距离 (Dd): 由于无法确定声学换能器与 OBS 的水平距离,因此这里使用船漂离投放点距离来进行近似表示;计算所得 OBS 深度 (Hc): $Hc = \sqrt{Dr^2 - Dd^2}$, 结果保留整数; 上浮速率(v): $v = (Hc_2 - Hc_1)/(t_2 - t_1)$, 并以此速率近似该深度的瞬时速率,结果保留两位小数;在实际作业中计算上浮速率的目的是预测 OBS 上浮出水时间,从而指导 OBS 的回收 .

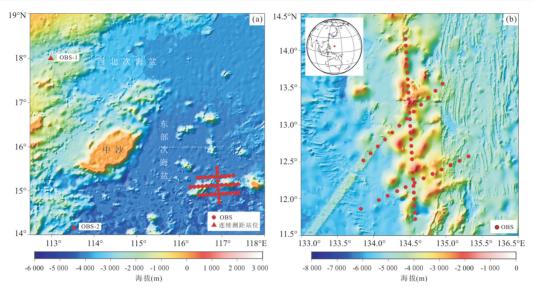


图1 OBS试验区域位置分布

Fig.1 Location distribution of OBS experiment

水深资料来源于 GEBCO(https://www.bodc.ac.uk/projects/data_management/international/gebco/). a. 2011年南海东部次海盆三维 OBS 探测区域与站位分布(红色圆点据张莉等(2013))与 2019年南海 OBS 观测试验连续测距站位分布(红色三角);b. 2020年西太平洋 OBS 探测区域与站位分布(红色圆点),左上角插图中红色方块为试验区在全球的位置

点与投放点的水平距离.结合投放点水深,用该试验数据对OBS海面漂流时长、投放点水深、回收点与投放点水平距离之间的关系进行了分析.

2 结果和讨论

2.1 OBS上浮速率模拟

2.1.1 OBS上浮速率模拟结果 本文对 OBS上 浮过程进行了垂直方向上的一维速率模拟,其受力情况如图 2 所示.

图 2 + F为 OBS 受到的浮力,其受海水密度 ρ_{ocean} 和自身体积的影响;M为 OBS 自身的质量,由 OBS 自身体积 V_{OBS} 和其密度 ρ_{OBS} 决定;G为其重力,重力加速度 g取 9.81 m/s²;R为 OBS 上浮过程中的阻力,阻力大小取决于摩擦系数 r、上浮速率 v. 净浮

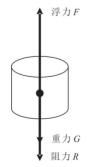


图 2 OBS上浮过程中受力分析

Fig.2 Force analysis during up-floating of OBS

力B,可由以下公式(Jochen, 2009)计算得到:

$$B = F - G - R = \rho_{\text{ocean}} g V_{\text{OBS}} - \rho_{\text{OBS}} g V_{\text{OBS}} - rv$$
 , (1)

利用牛顿第二定律,可得到

$$B = Ma = \rho_{\text{OBS}} V_{\text{OBS}} \cdot \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \,, \tag{2}$$

其中a为OBS的加速度.

根据有限差分思想,公式(2)可以写为如下形式:

$$B = \rho_{\text{ocean}} g V_{\text{OBS}} - \rho_{\text{OBS}} g V_{\text{OBS}} - r v^{n+1} = \rho_{\text{OBS}} V_{\text{OBS}} \cdot \frac{v^{n+1} - v^n}{\Delta t}, \qquad (3)$$

其中, v^n 为n时刻OBS的上浮速率, v^{n+1} 为n+1时刻OBS的上浮速率, Δt 为时间步长.

因此模拟速率可由公式(4)进行循环计算:

$$v^{n+1} = \left[v^{n} + \frac{g(\rho_{\text{ocean}} - \rho_{\text{OBS}})}{\rho_{\text{OBS}}} \cdot \Delta t\right] / (1 + \frac{r}{\rho_{\text{OBS}} V_{\text{OBS}}} \cdot \Delta t), \tag{4}$$

令 $\frac{r}{\rho_{\text{OBS}}V_{\text{OBS}}}$ 为R',则公式(4)可写为以下形式:

$$v^{n+1} = \left[v^n + \frac{g \left(\rho_{\text{ocean}} - \rho_{\text{OBS}} \right)}{\rho_{\text{OBS}}} \cdot \Delta t \right] / (1 + R' \cdot \Delta t), (5)$$

已知初始时刻OBS上浮速率为0.

对OBS的深度变化求导可以得到其速率,因此

OBS深度(z)的有限差分表达形式如下:

$$z^{n+1} = z^n + \Lambda t \cdot v^{n+1} \,, \tag{6}$$

其中,z"为n时刻OBS所处的深度,z"⁺¹为n+1时刻OBS所处的深度.初始时刻的释放深度需要根据实际情况来设定.上述主要参数如表3所示.

由于OBS-1、OBS-2的投放点水深不同,因此对 OBS自由上浮过程进行数值模拟时初始时刻的释放 深度(即投放点水深)分别选为2092m和3481m.其 中时间步长 Δt 均取2s,得到了OBS自由上浮开始后 每隔2s的深度信息和上浮速率信息,OBS-1的模拟 平均速率约为 0.954 6 m/s,模拟上浮耗时为 2 196 s;OBS-2 的模拟平均速率为 0.954 6 m/s,模拟 上浮耗时为3652 s. 将模拟结果与实测数据进行了 比较(图3和图4),可以看出,在只考虑垂直方向 受力的情况下,模拟结果与实测数据存在一定的 误差 .OBS-1 的实测速率 (V_a) 平均偏离模拟速率 $(V_m) \pm 0.124$ 7 m/s,误差范围为 13.06%; OBS-2 的实测速率 (V_a) 平均偏离模拟速率 (V_m) ± 0.046 6 m/s, 误差范围为 4.88%. 以水深 2 092 m 计算,OBS-1用实测平均速率(0.93 m/s)计算得 到 OBS 上 浮 耗 时 为 2 249 s, 与 模 拟 上 浮 耗 时 (2 196 s)相差为53 s,误差范围为2.41%;以水深 3 481 m 计算, OBS-2 用实测平均速率(0.97 m/s) 计算得到 OBS 上浮耗时为 3 589 s 与模拟上浮耗 时(3652s)相差为63s,误差范围为1.73%.

此外,分析图3和图4可以得到:在两种不同水深情况下实测上浮速率的拟合曲线具有相似的截距参数(b),基本在1.1 m/s左右,要明显高于模拟结果,这可能是由于OBS开始脱离沉耦架时,存在弹簧向上的弹力,使其具有了较高的初始上浮速率,受到海水阻力后速率减小,又在重力、浮力、阻力作用下达到三力平衡,继而保持相对稳定的上浮速率.

表 3 参数信息

Table 3 Parameter information

M (kg)	$V_{\mathrm{OBS}}(\mathrm{m}^{\mathrm{3}})$	$\rho_{\rm OBS}({\rm kg/m^3})$	$* ho_{ m ocean}$	*R' (s ⁻¹)
44	0.097	453.6	$\rho_0(1+\frac{N^2}{g} z)$	13

注: ρ_0 为海水某深度的初始密度,根据相关温度、盐度数据本文对海水进行了简要分层(数据来源:https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-atlas-2018/);N:布伦特-韦伊塞莱频率,可以根据海水的温度、盐度得到(计算网站:https://www.mt-oceanography.info/Utilities/bvf.html);z:海水深度;R':与仪器的材料,形状等有关,根据厂家提供该型号的OBS在水中净浮力为30 N左右推算得到;海水分层情况如表 4 和表 5 所示.

表 4 OBS-1站位的海水分层情况

Table 4 Seawater stratification at OBS-1 station

z (m)	$\rho_0(\mathrm{kg/m^3})$	$N^2(10^{-8}s^{-2})$
0~50	1 021.580	2.082 2
50~150	1 022.578	2.082 2
150~700	1 025.110	2.099 6
700~1 000	1 027.063	0.184 9
1 000~4 000	1 027.381	0.184 9

表 5 OBS-2 站位的海水分层情况

Table 5 Seawater stratification at OBS-2 station

z (m)	$\rho_0(\mathrm{kg/m^3})$	$N^2(10^{-8}\text{s}^{-2})$
0~50	1 021.130	2.496 4
50~150	1 022.356	2.496 4
150~700	1 025.270	2.405 6
700~1 000	1 027.075	0.173 9
1 000~4 000	1 027.383	0.173 9

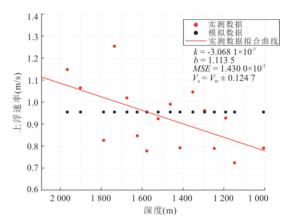


图 3 OBS-1上浮速率实测数据与模拟结果对比

Fig.3 Comparison of measured and simulated up-floating rates of OBS-1

其中实测数据拟合为线性拟合,拟合后的斜率(b)、截距(b)、均方误差(MSE)如右上所示,均方误差越小,说明拟合结果越好

2.1.2 误差分析 图 3 和图 4 显示:实测数据与模拟结果存在偏差,但两幅图中实测数据拟合曲线与模拟结果都存在交叉点,这表明实测上浮速率处于从高于模拟速率到小于模拟速率的变化过程.经过对现场作业过程和 OBS 回收点位置计算方法的分析,除了将 OBS上浮过程简化为浮体沿垂向自由上浮与实际上 OBS 可能存在多方向运动不完全一致而导致的误差之外,还存在距离测量误差和近似误差.

(1)距离测量误差.距离测量误差是指船上甲板控制单元的声学换能器与OBS通讯测距过程中存在的误差.甲板控制单元通过声学换能器与OBS建立通

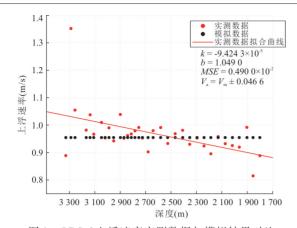


图 4 OBS-2上浮速率实测数据与模拟结果对比

Fig.4 Comparison of measured and simulated up-floating rates of OBS-2

讯,OBS接收到信号后再传回,此时甲板控制单元界面显示声学换能器与OBS之间的距离,这个过程利用了回声测距原理,测距信息由发出至接收到返回信号的时间间隔和信号在海水中的传播速度决定.计算距离时海水中声速使用1500 m/s,实际上海水中声速并不是固定不变的,受海水温度、盐度、深度的影响,海水中声速约为1450~1540 m/s(冯士筰等,1999),与1500 m/s相比,大约有不大于3.33%的误差,因此距离测量误差可能会对结果带来不大于3.33%的误差.

此外,在实际作业中声学换能器要放置在海水中,下放深度的不同也会带来一定的误差,其下放的最大水深由电缆长度决定,本研究使用的电缆最大长度为15 m. 随着 OBS上浮,水深越来越浅,OBS与声学换能器的距离不断减小,测量误差对结果的影响也会加大.已知 OBS-1 的投放点海水深度比 OBS-2 的投放点海水深度浅,因此其实测速率偏离模拟速率的误差也更大.

(2)近似误差.本研究使用了2次近似计算.第1次使用船漂离投放点距离(Dd)来近似声学换能器与OBS的水平距离(Dl),该近似计算会导致使用勾股定律得到的OBS深度(Hc)存在一定偏差,进而导致由此深度计算的OBS上浮速率存在偏差.在测距过程中,船的位置是随时调整的,当声学换能器与OBS的水平距离(Dl)大于船漂离投放点距离(Dd)时,计算所得OBS深度(Hc)偏大,其上浮速率(v)就高于OBS真实上浮速率(图5);同理,当声学换能器与OBS的水平距离(Dl)小于船漂离投放点距离(Dd)时,计算所得OBS深度(Hc)偏小,其上浮速率(v)就低于OBS真实上浮速率,这也是造成实测上浮速率在模拟上浮速率附近上下浮动的原因.第2次是采用

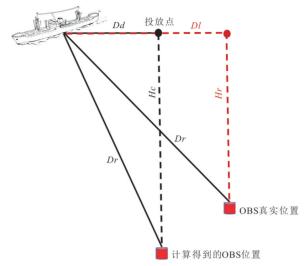


图 5 利用勾股定理计算 OBS 深度时的误差来源

Fig.5 Error sources when using Pythagorean theorem to calculate OBS's depth

Dr. 实测距离; Dd. 船漂离投放点距离; Hc. 计算所得 OBS 深度; Dl. 声学换能器与 OBS 的水平距离; Hr. OBS 实际深度

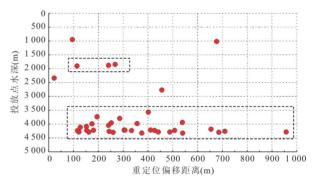


图 6 OBS 投放点水深与重定位偏移距离关系

Fig.6 Relationship between the water depth at OBS deployment position and the offset of the relocated OBS position and deployment position

数据来自2011年南海东部次海盆三维OBS探测试验(张莉等,2013),其中黑色虚线框内显示为投放点水深分别为2000m和4000m左右的OBS

两次测距之间的平均上浮速率来近似瞬时速率,显 然测距间隔时间越短,该近似误差会越小.

2.2 水深对 OBS 位置的影响

2.2.1 水深对 OBS 在海底位置的影响 2011 年南海东部次海盆三维 OBS 探测试验中投放点水深和重定位偏移距离的关系(图 6)可以用来分析投放点水深对 OBS 在海底实际位置的影响. 当投放点水深在 4 000 m左右时,重定位偏移距离沿横轴均匀分布;投放点水深在 2 000 m左右时,情况也大致相同.这说明在投放点水深相

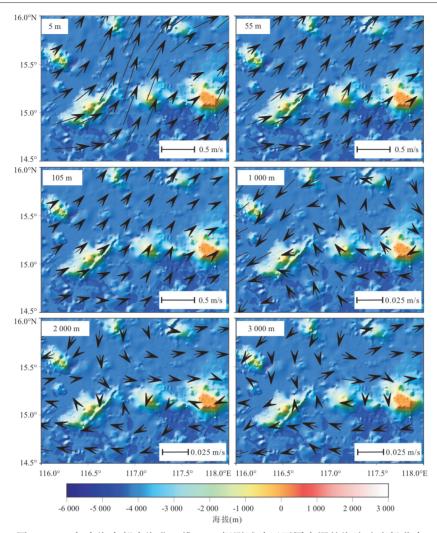


图 7 2011年南海东部次海盆三维 OBS 探测试验区不同水深的海流速度场分布 Fig. 7 Current conditions at different depths in the location 2011 South China Sea

图中箭头方向代表海流的方向,箭头长度代表海流的流速大小;数据来源:http://apdrc.soest.hawaii.edu/erddap/griddap/hawaii_soest_628b fb2e 515b.html

同的情况下,重定位偏移距离差别较大,表明两者之间并没有明显的正相关.

为了更好地说明这个问题,笔者分析了2011年5~6月份该海域不同深度的平均洋流速度(图7),可以看到在浅层和深层海流方向并不相同,这说明即使在小范围(约100 km)海域内,OBS从海面下沉到海底的过程中,也受到多方向复杂海流的影响.虽然深海海流速度较小,但是随时间的累积其对OBS落底位置的影响也是无法忽略的.这也解释了水深与重偏移距之间无明显相关性的原因.

2.2.2 水深对 OBS 出水点的影响 为探讨 OBS 投放点水深对出水点位置的影响, 笔者利用 2020 年 西太平洋 OBS 探测试验实测数据绘制了 OBS 投放点水深与回收点偏离投放点距离的关系

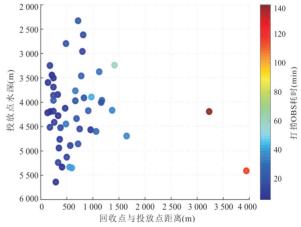


图 8 OBS 投放点水深与回收点偏离投放点距离关系 Fig.8 Relationship between the water depth of OBS at deployment position and the distance between the recovery position from the deployment position

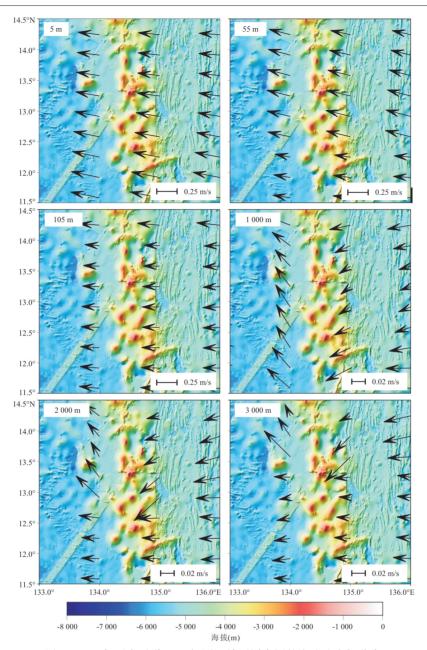


图 9 2020年西太平洋 OBS 探测区域不同水深的海流速度场分布

Fig.9 Current conditions at different depths in the location of the 2020 Western Pacific OBS experiment 图中箭头方向代表海流的方向,箭头长度代表海流的流速大小;数据来源:http://apdrc.soest.hawaii.edu/erddap/search/index.html? page=18.itemsPerPage=1000&searchFor=GODAS

图,图中不同颜色代表不同偏移距(图8).影响回收点偏离投放点距离的因素有很多,其中影响最大的是OBS在海面漂移的距离,即出水点与回收点的距离,因此需要消除OBS海面漂移距离的影响.基于前文的模拟结果,OBS实际上浮到水面所用时间与预测时间基本一致,因此,假设当打捞OBS耗时相同时,OBS在海面偏离投放点的距离是相同的,即相同颜色代表具有相同的海面漂移量(图8).这种情况下,可

以用回收点偏离投放点的距离来评估出水点偏离投放点的距离.在打捞OBS耗时相同(颜色相同)的情况下,对于投放点水深不同的OBS站位,其回收点与投放点的距离表现为随机分布但又集中在一个范围内(图8),并没有随水深增加而增大的趋势,也表明OBS出水点偏离投放点的距离与投放点水深无线性相关性.

在此,本文分析了作业期间该海域不同深度 的海流速度场分布(图9),与图7相比可以看出 不同海域的流场特征是不同的,但在某些方面也具有相似的规律.如浅层海流流速较大,而在深层海流流速较小;不同深度的海流方向不完全相同,具有方向的改变.在OBS下沉过程中通过时间的积累海流方向的改变会体现在OBS移动方向的改变,进而可以说明OBS并不是沿固定方向偏离投放点的,这种偏离是随机的、无序的.

2.2.3 出水点和投放点的关系 2020年西太平洋 OBS 探测试验的实测数据表明 OBS 回收点与投放点距离和打捞 OBS 耗时具有正相关性(图 10).由于在短时间内(1~2 h),风向和流向可视为基本稳定,因此该统计结果可以解释为 OBS 在海面漂移的距离和时间成正相关,在去除奇异点(图 10,红圈内)后,对其余 47个点进行了线性拟合,得到截距为零的一次方程式:

$$y=0.033 \ 2x$$
 , (3)

式中,时间和距离单位分别取为分钟和米,其相关系数 R^2 为0.8139.

拟合方程与横轴的截距为零,这说明在零时刻OBS回收点与投放点距离为零,也就是说OBS出水点位置与投放点位置重合.斜率的倒数在一定程度上代表OBS漂移的速率,在这里为0.502 m/s,漂移主要受表层的海流以及风速的影响,由班报记录可知作业期间风力为2~4级,风速在1.6~7.9 m/s之间,由风速带动海水表层的流动,进而会造成OBS约为0.502 m/s的漂移速率.

2.3 OBS 在水中下沉和上浮轨迹

假设当 OBS 投放时间与回收时间间隔较短时,同一海域海流方向稳定,在下沉、上浮过程中 OBS 受水平方向的力一致,那么 OBS 在海底的准确位置一般位于投放点和回收点的中间区域(敖威,2010).当水深大时,从海面到海底的时间会更长,受水平力作用时间更长,投放点与出水点距离差可能会更大.

然而,通过对南海、西太平洋地震试验中的 OBS投放点和回收点位置、上浮时间和上浮速率等 数据的统计分析,得到了新的认识:(1)OBS投放点 水深与其重定位偏移距离无关;(2)消除打捞时间, 将回收点拟合为出水点,发现OBS在水面的出水点 与投放点近似重合(图 10). 基于上述分析, OBS 在 水中下沉和上浮的轨迹可能如图 11 所示, OBS 下沉 过程受垂直向下的重力和多个方向上海流的冲击 力影响,其轨迹为不规则曲线,但由于重力远大于 海流的冲击力,OBS在海底的真实位置可能不会偏 离投放点,或者偏移较小.OBS上浮过程中受垂直 向上的浮力和多个方向上海流的冲击力作用,浮力 仍远大于海流的冲击力,因此OBS在海面的出水点 可能与投放点重合,或者偏移较小.通过统计2019 年南海和2020年西太平洋航次64台OBS现场回收 记录,约38台(59%概率)OBS投放点与回收点距 离不超过 500 m, 20 台(31% 概率) OBS 投放点和回 收点距离小于300 m(图12). 考虑到OBS回收点与 投放点的距离可能大于OBS出水点与投放点的距

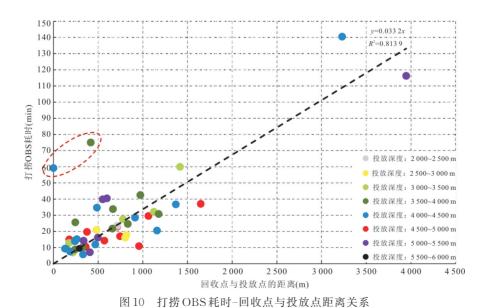


Fig.10 Relationship between OBS's recovery time and distance between the recovery position and the deployment position 黑色虚线为线性拟合所得的趋势线,线性拟合所得的方程在右上角, R^2 为相关系数(R^2 =1为最优拟合结果),红色椭圆虚线内为拟合时剔除的点

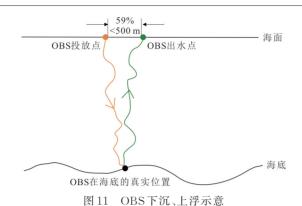


Fig.11 Schematic diagram of OBS sinking and floating

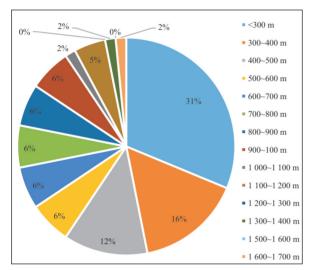


图 12 2019 年南海和 2020 年西太平洋试验中 64 台 OBS 回收点偏离投放点距离的分布

Fig.12 Pie chart shows distances between the recovery positions and the deployment positions of 64 OBSs used in the 2020 South China Sea and Western Pacific OBS experiments

不同颜色代表不同距离,扇形面积的大小代表该距离范围内 OBS 台数,例如,31% 代表 64 台 OBS 中有 20 台 $(64 \times 31\%)$ OBS 投放点和回收点距离小于 300 m

离,OBS出水点与投放点距离分别小于500 m或300 m的概率可能还要更大.这一认识可以用于指导冰区OBS的回收工作,即使作业区浮冰覆盖率为100%,回收OBS时破冰船仅需以投放点为圆心破冰,制造半径为300~500 m的碎冰区,就有可能为OBS露出水面提供有效空间,从而大大提高OBS的冰区回收率(牛雄伟等,2016).

4 结论

基于在南海和西太平洋开展的OBS探测试验

中记录的 OBS 投放点位置、回收点位置、上浮速率、OBS 上浮时间和 OBS 海底重定位位置等现场作业资料,开展了对 OBS 在海水中下沉和上浮轨迹的研究,重点探讨了如何预测 OBS 出水点位置.本研究有助于提高 OBS 回收效率,提高复杂海况尤其是冰区 OBS 的搜寻成功率.主要结论如下:

- (1)同一台 OBS 的上浮速率基本稳定,符合物体自由上浮规律;在实际作业中,利用一段时间内的平均速率和投放点水深计算 OBS 的上浮时间是可行的.
- (2)当OBS投放点水深相同时,使用三维直达水波定位出的OBS在海底的位置与投放位置的偏移距随机分布,这表明投放点水深与重定位偏移距离无明显线性相关性.
- (3)打捞 OBS 耗时和打捞上船位置偏离 OBS 投放点的距离成正比,线性回归分析表明 OBS 出水点与投放点位置非常接近;OBS 出水点与投放点距离小于 500 m的概率不小于 59%,OBS 出水点与投放点距离小于 300 m的概率不小于 31%.

致谢:感谢2019年南海被动源OBS航次、2020年西太平洋主动源OBS地震航次所有科考队员和船员对本文数据采集付出的辛苦劳动.感谢审稿专家的宝贵意见和编辑部的大力支持!

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 Journal of Geophysics*, 53(12): 2982—2991 (in Chinese with English abstract).

Caress, D. W., McNutt, M. K., Detrick, R. S., et al., 1995. Seismic Imaging of Hotspot-Related Crustal Underplating Beneath the Marquesas Islands. *Nature*, 373 (6515): 600-603. https://doi.org/10.1038/373600a0

Feng, S.Z., Li, F.Q., Li, S.J., 1999. Introduction to Marine Science. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).

Hu, J. F., Xu, H. N., Qiu, X. L., et al., 2012. Design of Gun Controlling Chronometer and Its Application in Gathering and Processing OBS Data. *Journal of Tropical Oceanography*, 31(3): 97-102 (in Chinese with English abstract).

Kaempf, J., 2009. Ocean Modelling for Beginners, Second Edition. Springer, Berlin.

Kong, F. S., Gao, S. S., Liu, K. H., et al., 2020. Seismic

- Anisotropy and Mantle Flow in the Sumatra Subduction Zone Constrained by Shear Wave Splitting and Receiver Function Analyses. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(2): e2019GC008766. https://doi.org/10.1029/2019GC008766
- Li, Y. H., Huang, H. B., Qiu, X. L., et al., 2020. Wide-Angle and Multi-Channel Seismic Surveys in Zhongsha Waters. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(4): 1523— 1537 (in Chinese with English abstract).
- Niu, X. W., 2014. Wide Angle Seismic Tomography (2D/3D) of Southwest Indian Ridge (Dissertation). Zhejiang University, Hangzhou (in Chinese with English abstract).
- Niu, X.W., Gao, J. Y., Wu, Z. C., et al., 2016. Lithosphere Anisotropy of Prydz Bay, Antarctica: From Ocean Bottom Seismometer Long Term OBServation. *Earth Science*, 41(11): 1950—1958 (in Chinese with English abstract).
- Niu, X. W., Ruan, A. G., Wu, Z. L., et al., 2014. Progress on Practical Skills of Ocean Bottom Seismometer(OBS) Experiment. *Progress in Geophysics*, 29(3): 1418—1425 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X. L., Shi, X. B., Yan, P., et al., 2003. Recent Progress of Deep Seismic Experiments and Studies of Crustal Structure in Northern South China Sea. *Prog*ress in Natural Science, 13(3): 231-236 (in Chinese with English abstract).
- Ruan, A. G., Li, J. B., Feng, Z. Y., et al., 2004. Ocean Bottom Seismometer and Its Development in the World. *Donghai Marine Science*, 22(2): 19—27 (in Chinese with English abstract).
- Xia, C. L., 2009. A Study on Privotal Data Processing Procedure of Ocean Bottom Seismograph (Dissertation). China University of Geoscience, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Xia, S. H., Ao, W., Zhao, M. H., et al., 2011. Corrections and Analysis of Wide Angle Seismic Data from the Sea. *Marine Science Bulletin*, 30(5): 487-491 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Zhao, M. H., Wang, J., et al., 2013. Correction of OBS Position and Recent Advances of 3D Seismic Exploration in the Central Sub-Basin of South China Sea. *Earth Science*, 38(1): 33—42 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. H., Du, F., Wang, Q., et al., 2018. Current Status and Challenges for Three-Dimensional Deep Seismic

- Survey in the South China Sea. *Earth Science*, 43(10): 3749—3761 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. H., Qiu, X. L., Xia, S. H., et al., 2010. Seismic Structure in the Northeastern South China Sea: S-Wave Velocity and $V_{\rm p}/V_{\rm s}$ Ratios Derived from Three-Component OBS Data. *Tectonophysics*, 480(1-4): 183-197. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.10.004
- Zhu, J. J., Li, S. Z., Lu, J. A., et al., 2020. Scientific Implications and Preliminary Surveying Results of Geological and Physical Oceanography Environment in the Shenhu Area of the Northern South China Sea. *Earth Science*, 45(4): 1416—1426 (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.
- 冯士筰,李凤歧,李少菁,1999.海洋科学导论.北京:高等教育出版社.
- 胡家赋,徐华宁,丘学林,等,2012.精密枪控计时器设计及 在海底数据采集中的应用.热带海洋学报,31(3): 97-102.
- 黎雨晗,黄海波,丘学林,等,2020.中沙海域的广角与多道地 震探测.地球物理学报,63(4):1523-1537.
- 牛雄伟,2014. 西南印度洋中脊2D/3D广角地震层析成像 (博士学位论文). 杭州:浙江大学.
- 牛雄伟, 高金耀, 吴招才, 等, 2016. 南极洲普里兹湾岩石圈各向异性: 海底地震仪观测. 地球科学, 41(11): 1950-1958.
- 牛雄伟, 阮爱国, 吴振利, 等, 2014. 海底地震仪实用技术探讨. 地球物理学进展, 29(3):1418-1425.
- 丘学林,施小斌,阎贫,等,2003.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,13(3):231-236.
- 阮爰国,李家彪,冯占英,等,2004.海底地震仪及其国内外发展现状.东海海洋,22(2):19-27.
- 夏常亮,2009.OBS 地震数据关键处理环节研究(硕士学位论文).北京:中国地质大学.
- 夏少红, 敖威, 赵明辉, 等, 2011. 海洋广角地震数据校正方 法探讨. 海洋通报, 30(5): 487-491.
- 张莉,赵明辉,王建,等,2013.南海中央次海盆OBS位置校正及三维地震探测新进展.地球科学,38(1):33-42.
- 赵明辉, 杜峰, 王强, 等, 2018. 南海海底地震仪三维深地震探测的进展及挑战. 地球科学, 43(10):3749-3761.
- 朱俊江,李三忠,陆敬安,等,2020.南海北部神狐海域地质环境综合调查及科学意义.地球科学,45(4):1416-1426.