

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018042401

# 海底冷泉气泡羽流声学探测参数研究

余翼<sup>1,2</sup>, 栾锡武<sup>2,3</sup>, 刘鸿<sup>2,3</sup>, 郭龙祥<sup>4</sup>, 秘丛永<sup>3</sup>, 石艳锋<sup>1,2</sup>, 刘嘉程<sup>1,2</sup>, 张豪<sup>1,2</sup>

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071

4. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001

**摘要:**对气泡羽流的声学探测是目前海底冷泉调查的主要手段。在声学探测理论上,分析了声学探测过程中CW声波脉冲信号的发射频率、发射功率、声波脉冲宽度(脉冲持续时间)3个参数对海底冷泉气泡羽流探测成像的影响。同时,结合黄、渤海老铁山水道海域海底冷泉外业调查和人工模拟冷泉实验的数据,进一步明确了这些参数的选取原则和范围。针对声学水体剖面上出现的异常干扰带,还提出了改变脉冲发射时延值来消除水体声学剖面图中干扰带的方法,从而进一步优化海底冷泉气泡羽流的声学成像效果。

**关键词:**海底冷泉;气泡羽流;声学探测参数;时延;干扰带

**中图分类号:**P738 **文献标识码:**A

## Research on acoustic detection parameters for bubble plume in cold seeps

YU Yi<sup>1,2</sup>, LUAN Xiwu<sup>2,3</sup>, LIU Hong<sup>2,3</sup>, GUO Longxiang<sup>4</sup>, MI Congyong<sup>2,3</sup>, SHI Yanfeng<sup>1,2</sup>, LIU Jiacheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Hao<sup>1,2</sup>

1. College of Geoscience and Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

3. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

4. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

**Abstract:** Acoustic detection is an important method for investigation of cold seep bubble plumes. On the basis of acoustic theory, this paper studies the influence of three detection parameters on the bubble plume acoustic detection and imaging, i.e. the emission frequency, the transmitting power, and the width of the pulse (pulse duration) of the CW sonic pulse signal. The principles and ranges for selection of the acoustic detection parameters are further clarified with the data from field investigation and simulation experiment of cold seep at the Laotieshan water channel at the border between the Yellow Sea and the Bohai Sea. In order to reduce the abnormal interference bands in the acoustic water section, the authors proposed a method to eliminate the interference band in the acoustic profile by changing the time delay of pulse emission. It is proved that the method is effective to further optimize the acoustic detection and imaging for the detection of bubble plume of cold seep.

**Key words:** cold seep; bubble plume; acoustic detection; time delay; interference band

海底冷泉(狭义上也被称为天然气泄漏)是一种以水、碳氢化合物(天然气和石油)、硫化氢、细粒沉积物等为主要成分,温度较低,与海水温度接近的流体<sup>[1]</sup>。海底冷泉是一种普遍发育于主动大陆和被动大陆边缘的海洋地质现象,目前在世界各大洋都有发现<sup>[2-4]</sup>。潜在的能源因素和环境效应使海底冷泉

及相关研究倍受关注<sup>[4-6]</sup>,海底冷泉研究在海洋工程安全、天然气水合物开发、常规油气勘探、全球气候变化、碳循环和极端生物群落等研究方面具有重要意义<sup>[7-8]</sup>。大量观测结果表明,海底之下的天然气水合物处在动态平衡中,会不断的分解并释放出甲烷气体,这些气体通过断层、裂隙等运移通道进入海水

**资助项目:**国土资源部公益性行业科研专项“海底冷泉拖曳式快速成像系统”(201511037);青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目“深海地质过程与资源环境效应”(2016ASKJ13)

**作者简介:**余翼(1993—),男,硕士生,研究方向为海底冷泉声学探测成像, E-mail: yuyi\_mail@qq.com

**通讯作者:**栾锡武(1966—),男,研究员,从事海洋地球物理测量方法及数据处理方法以及大陆边缘构造演化研究, E-mail: xluan@cgs.cn

**收稿日期:**2018-04-24; **改回日期:**2018-06-03. 蔡秋蓉编辑

中后,会以气泡的形式向上运移,从而形成气泡羽流,或称甲烷羽流<sup>[8]</sup>。海底冷泉区的气泡羽流同海底天然气水合物的分布密切相关,气泡羽流的下部往往能发现富含天然气水合物的沉积储层。近年来的一些研究发现,海水中气泡羽流的分布对水合物稳定带的边界有较好的指示作用<sup>[8-11]</sup>。因此,研究气泡羽流的特征,对确定水合物的赋存区域、了解水合物的成藏机制与成藏环境等均有重要意义。

在海底直接观测气泡羽流的成本比较高,而且无法适用于大面积海域的海底冷泉地质调查。因此,目前观测冷泉气泡羽流的主要手段是基于声学特性的探测方法。调查船的声学探测设备通过换能器向海底发射声波脉冲,声波在水体传播过程中,当气泡尺寸与声波波长达到发生散射的条件时,高频声波后向散射会被记录下来形成水体声学剖面。由于冷泉气泡和海水可以形成一个强波阻抗界面,水体声学剖面可以清楚地看到冷泉气柱和海底。图 1 是俄罗斯调查船在鄂霍次克海获得的海底冷泉气柱水体声学剖面<sup>[6]</sup>。

声波脉冲信号是海洋声学探测过程中的常见信号,它是人类探测、观测海洋的重要载体。脉冲信号

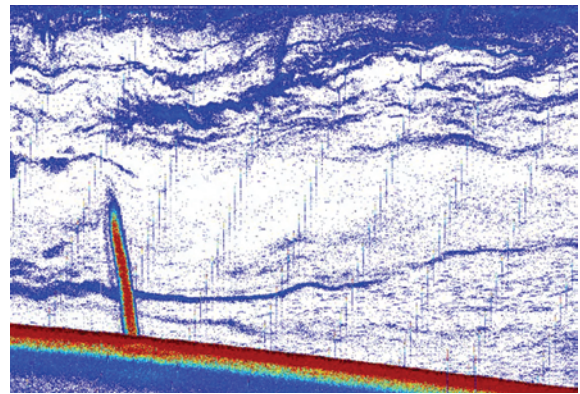


图 1 海底冷泉气柱的声学剖面(据文献[6])  
Fig.1 Acoustic profile of a seep gas column

的频率是声学探测中最重要的参数之一。以脉冲信号频率参数为例,低频声发射信号在传播过程中能量衰减小于高频声发射信号,但是低频声发射信号在浅水层成像效果较差。另一方面,高频声发射信号的振幅在传播途中衰减很大,传播距离较小,不适合水层成像。因此,声学探测频率范围的选取对冷泉气泡羽流探测成像影响很大<sup>[12,13]</sup>。表 1 中列出了世界不同海区的声学探测实例<sup>[14-25]</sup>,从中可以看出脉冲的发射频率从浅层剖面仪的几千赫兹到单波束测深系统的几十万赫兹不等。但当前,海底冷泉气泡羽流的最佳探测成像频率我们仍无法得知。

表 1 世界不同海区的声学探测实例(据文献[25])

Table 1 Example of acoustic detection in different sea areas of the world

位置	水深/m	声学方法与参数	资料来源
美国圣巴巴拉海峡		3.5kHz 浅层剖面仪;带通滤波 3~4kHz;	Derek C Quigley 等 <sup>[14]</sup>
伊比利亚半岛 Cadiz 湾	50~1300	Simrad EM12S-120 多波束系统;主频 13kHz; TOPAS 系统;主频 15~18kHz,差频 0.5~5 kHz,垂向分辨率 0.5~1.0m;单道地震;声源 3.5~7kJ,频率 50Hz~4kHz	L Somoza 等 <sup>[15]</sup>
加拿大 St. Lawrence 河口	100~300	Simrad EM 1200 多波束系统;频率 95 kHz;单道地震;声源 2~8kJ 电火花和 40in <sup>3</sup> 气枪;主频 200Hz,穿透深度 300m,最大垂向分辨率 1.5m	Nicolas Pinet 等 <sup>[16]</sup>
Barents 海	180~450	Simrad EM 1002 多波束系统;频率 95kHz;常规 2D、3D 地震系统	Helge Leth 等 <sup>[17]</sup>
非洲西南部 Congo Fan 海区	500~3500	Hydrosweep 多波束系统;频率 15kHz;深拖侧扫声纳;频率 75kHz,最大分辨率 0.75m;参量阵浅剖;主频 18kHz 和 22kHz,差频 4kHz	Heiko Sahling 等 <sup>[18]</sup>
黑海	<2000	Simrad EM 12S-120 多波束系统;主频 13kHz; MAK1 海洋声学系统(侧扫声纳;低频 30kHz,高频 100kHz;浅剖;主频 4.5kHz,穿透深度 60m)	R P Kruglyakova 等 <sup>[19]</sup>
埃及尼罗河深海扇	1000~1300	AUV(Simrad EM 2000 多波束系统;频率 200kHz, 111 波束,120°开角,作业深度距海底 70m,分辨率 1.0m)	S Dupre 等 <sup>[20]</sup>
爱尔兰 Porcupine 盆地	300~900	3.5kHz 浅剖;侧扫声纳频率 30kHz;单道地震声源 500J 电火花;常规 2D、3D 地震系统	P Van Rensbergen 等 <sup>[21,22]</sup>
北海 Gullfaks 油气田	150~250	ROV(多波束系统、侧扫声纳、浅地层剖面)	M Hovland 等 <sup>[23]</sup>
南黄海济州岛近海	40~100	3.5kHz 浅剖;Simrad EA 500 单波束测深;频率 208kHz	K S Jeong 等 <sup>[24]</sup>

同样地,在海底冷泉气泡羽流的声学探测过程中,目前国内在发射的声波脉冲信号的宽度(持续时间)、发射功率方面也无准确的选取范围和原则。声学探测过程中,影响海水中气泡探测的主要因素是气泡的大小、共振频率、散射截面<sup>[26]</sup>,因此,需要根据气泡羽流的声学特性,合理地设置声波脉冲参数(发射脉冲信号的频率、功率和脉冲持续时间)的范围;同时,还要结合外业采集数据和人工模拟冷泉实验数据进行分析,进一步优化声学探测参数范围,只有这样才能获得高质量的海底冷泉气泡羽流声学剖面。

## 1 气泡的声学探测分析

### 1.1 脉冲信号的发射

一般水声换能器发射的脉冲信号属于 CW 信号,即单频矩形脉冲信号。它所需的设备简单、占用频带窄、发射效率高,同时能量被限定在某个单一频率内,在同等条件下通信距离更远,是声学探测中常用的脉冲信号<sup>[27]</sup>。

气泡是某些频率范围内声波的有效散射体。海底冷泉逸出的羽流状气泡可视为一个空腔,它的存在使介质出现了不连续性。声波在传播途中,遇到气泡时产生强烈的散射过程,使得气泡通过气泡群后,其强度大大减弱,这就是气泡的散射作用。海底冷泉产生的羽流状气泡可以看做是海底散射体,探测声波投射到散射体上产生散射,散射声波在接收点处叠加形成海底混响。散射强度 Sv 值是表征海底混响的一个基本比值,它的定义是:距离 1m 处被单位面积或体积所散射的声强度与入射平面波强度比值的分贝数<sup>[28]</sup>。

对于气泡的散射作用产生的海底混响,可以用 Sv 值来量化。体积混响的反向散射强度值为 -70 ~ -100dB,远小于海面 and 海底的值。混响虽然是主动声纳检测中主要的背景干扰,常被看作是一个非平稳的随机过程,但利用这一特性,我们可以通过散射强度 Sv 值来区分海底冷泉气泡和普通的水体<sup>[29]</sup>。采集的声学信号经过信号处理单元可以形成海底水体声学剖面,解释人员就可以根据声学图像了解海底的粗糙程度和气泡羽流分布情况。

### 1.2 海底冷泉羽流气泡的共振频率

Spitzer 给出了单个气泡的散射截面  $\sigma_s$  的经典公式<sup>[30]</sup>,表示如下:

$$\sigma_s = \frac{4\pi a^2}{\left[\left(\frac{f_0^2}{f^2}\right) - 1\right]^2 k^2 a^2} = \frac{4\pi}{k^2 \left[\left(\frac{f_0^2}{f^2}\right) - 1\right]^2} \quad (1)$$

其中  $a$  为气泡的半径,单位是 cm。 $f_0$  为气泡共振频率, $f$  为换能器基阵发射的入射声波频率,频率单位均是 Hz。 $k$  为共振频率时的波数。气泡的散射截面在共振频率时达到极值,利于声学目标成像。因此,用于声学探测的换能器工作频率范围必须和海底冷泉气泡羽流的气泡共振频率相匹配。

水声换能器的发射脉冲的过程是将电能转化为声能。换能器中的电子发射机的电功率先转变为机械振动的机械功率,再把机械功率转变为声功率,并以声波脉冲的形式发射出去。发射声功率是指换能器在单位时间内向介质中辐射能量多少的物理量,功率的单位用“瓦”表示。换能器的发射功率受额定电压(或电流)、动态机械强度、温度及介质特性等因素的制约<sup>[29]</sup>。

气泡在水声换能器发射的声波脉冲作用下,气泡壁作受迫振动,遵循 Rayleigh-Plesset 方程<sup>[30]</sup>。气泡在共振频率时振幅最大,产生强烈的非线性振动,作为次级声源向周围介质中辐射声能。我们需要合理设置换能器的工作参数,以达到在保证声学目标强度足够大的同时,又要考虑到外业调查的经济性和实用性的目的。气泡的共振频率公式经过前人的不断完善深化<sup>[30-35]</sup>,可表示为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho}} \quad (2)$$

式中  $a$  为羽流气泡半径,单位是 cm; $\rho$  为气泡周围水体的密度,单位是  $\text{g}/\text{cm}^3$ ; $\gamma$  是气体等压比热和等容比热的比值; $P_0$  为气泡的流体静压力。

在近海、河口地区,海水温度、盐度、悬沙浓度等因素变化较大, $P_0$  和  $\rho$  的取值显然处于较大的变量区间,不同深处的羽流气泡的流体静压力取值也不同。实际的声学探测过程中,可对常见大小的气泡的共振频率先做粗略的估算,划定一个粗略的共振频率区间。对水中的气泡, $\rho$  取  $1\text{g}/\text{cm}^3$ ,在标准大气压下,空气的  $\gamma=1.41$ ;如果将  $P_0$  与海水深度联系起来<sup>[28]</sup>,则深度  $d$  处的气泡共振频率为:

$$f_0 = \frac{326}{a} \sqrt{1+0.1d} \quad (3)$$

其中气泡半径  $a$  的单位为 cm,深度  $d$  的单位为 m,气泡共振频率  $f_0$  的单位为 Hz。根据共振频率简化的公式,可以计算不同大小的气泡在不同深度情况下的共振频率,这样在选择用于声学探测的换能器频率时就有了参考范围。换能器基阵基本上



都是安装在水下拖体或者调查船船底,因此,粗略认为最低吃水深度是 2m,表 2 是根据共振频率简化公

式计算的水下 2~500m 水深时冷泉羽流气泡的共振频率。

表 2 不同水深时冷泉羽流气泡的共振频率

Table 2 Resonant frequency of seep bubbles in different water depths

单位: Hz

水深/m	2	10	20	30	40	50	100	200	500
常见气泡(直径 0.5~5mm)	1429~	1844~	2259~	2608~	2916~	3194~	4325~	5976~	9312~
	14285	18441	22586	26080	29158	31941	43249	59757	93124
中等气泡(直径 2.5mm)	2857	3688	4517	5216	5832	6388	8650	11951	18625
易破碎的大气泡(直径 8mm)	893	1153	1412	1630	1822	1996	2703	3735	5820

从羽流气泡的共振频率值或者估算的范围中可以看出,浅层水体气泡的共振频率要小于深层水体气泡的共振频率,小气泡的共振频率要大于大气泡的共振频率。这样一来,换能器的发射频率太低时,会造成远低于深层气泡共振频率的问题,不利于深层水体成像;发射频率太高时,又容易造成远高于浅层气泡共振频率的问题,无法对浅层水体成像。用于声学探测的水声换能器的发射频率范围选区对于气泡羽流的探测尤为重要。此外,由于物理尺度原因,低频的地震波成像技术在海底冷泉探测上有着先天不足的问题。

不仅如此,气泡是某些频率范围内声波的有效吸收体。由于流体的粘滞力作用,气泡振动时,水介质与气泡面之间的摩擦也使一部分声能变成了热能,这是气泡对声波的吸收作用。声波在气泡群中传播的过程中,衰弱最强,在声纳中反映出来就是回声源级的强烈衰减<sup>[28]</sup>。

### 1.3 羽流气泡的散射截面分析

气泡在声学探测时,其散射截面最大时,探测到的声学目标最大,成像效果好,愈有利于外业调查人员迅速发现海底冷泉气泡羽流。根据单个气泡散射截面的公式(1)表达式,可知气泡的散射截面和气泡半径没有关系,气泡的散射截面在共振频率时达到极值,即截面在共振频率时有一最大值,而在偏离共振频率时,随频率偏移而减小。

图 2 为气泡半径分别为 20、200、2000 $\mu\text{m}$  的情况下,散射截面与频率的关系<sup>[36]</sup>。由图 2 可知,气泡在共振频率 70kHz 时散射截面最大;当声学探测频率过低时,气泡的散射截面急剧下降,不利于声学探测成像;而当频率大于共振频率时,气泡的散射截面虽然减小,但仍然保持在较大的水平。因此,在具体工区冷泉羽流气泡共振频率范围内考虑发射脉冲频率时,可以在范围内适当增大脉冲的发射频率。

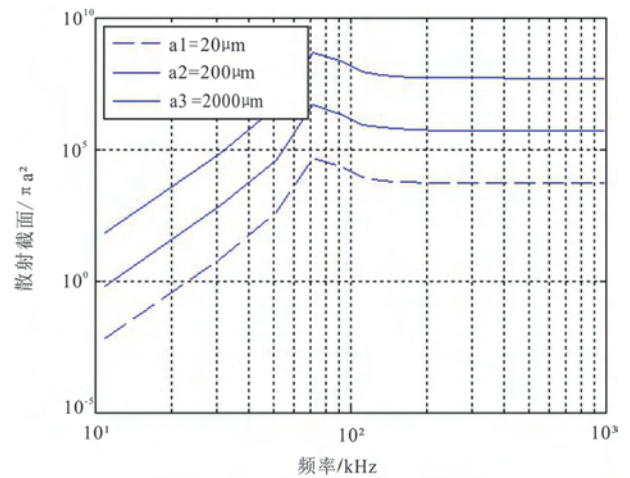


图 2 散射截面与频率的关系(据文献[36])

Fig.2 The relationship between the scattering cross section and the frequency

## 2 数据来源

本文所使用的数据为中国调查船“浙嘉渔科 002”号于 2017 年 10—11 月在中国黄、渤海老铁山水道海域海底冷泉外业调查和实验的声学探测成像结果。

调查航次搭载了由青岛海洋地质研究所研制的海底冷泉拖曳式快速成像系统。该系统基于声学探测原理,能够实现对海底冷泉的快速成像,可以辨识海底冷泉的位置以及冷泉气泡群的形态。不仅如此该系统还能够对水体中的藻团、藻层、鱼群、营养盐层、富氧层、温盐等引起的密度层、内波、涡旋、冷涡等进行成像,将传统的以计算为主的物理海洋学发展为直观成像的海洋学,大大推动了地震海洋学。

航次的主要目的是调查渤海海域设计工区海底冷泉喷口的存在。在航次执行之前,海底冷泉调查团队在褚岛附近通过人工方法模拟海底冷泉,检验成像设备换能器在设置不同的发射频率、发射功率

和发射脉冲持续时间情况下对声学目标探测的成像效果。实验中将换能器矩阵搭载在水面拖体上,换能器拖体采用了多频率基阵结构,包含12、18、38和120kHz换能器,波束开角 $6.5^\circ$ 。

### 3 声学探测实验参数分析

声学探测实验参数分析是基于人工模拟冷泉实验之上的。外业实验组在威海褚岛北部海域进行海底冷泉人工模拟试验,水深 $60\sim 75\text{m}$ 。空压机制造气体通过高压气管注入海底的方式来产生气泡羽流,形成模拟的海底冷泉气泡羽流,人工模拟冷泉的结构设计和高压气管压载方案如图3所示。用于实验的多频换能器基阵搭载在一艘自带动力的小船上,小船保持匀速向羽流气泡冒出位置(模拟的冷泉气泡喷口)靠近,驶过海面冒出气泡位置,记录并观察声学剖面特征。

人工模拟海底冷泉实验的目的主要是检验不同声学探测参数对海底冷泉声学探测成像效果的实际影响,因此,模拟冷泉的气量输出量应接近实际冷泉的气体输出量,鉴于前人提出的 $0.01\sim 509.82\text{L}/\text{min}$ 这个输出量估算范围<sup>[37]</sup>,我们考虑实际声学显示效果,调节空压机功率,将冷泉实验输出气量设置为 $100\sim 500\text{L}/\text{min}$ 。声学探测参数分析是根据人工模拟海底冷泉的实验数据图像对比结果而得出的,主要分析了声学探测的声波脉冲发射频率、发射功率和脉冲持续时间等声学探测参数对海底冷泉气泡羽流成像的影响。实验人员将连接着空压机的高压气管沉底,将空压机制造的气体注入海底从而产生模拟的海底气泡羽流。

#### 3.1 声波脉冲发射频率分析

声学探测实验参数调节是通过调节换能器发射脉冲的声学参数来实现的。海水中气泡的最小稳定直径大约是 $1\mu\text{m}$ <sup>[38]</sup>,海底逸出形成的气泡直径通常为 $0.5\sim 5\text{mm}$ <sup>[35]</sup>。根据前文所述的气泡共振频率估算公式,在 $2\sim 100\text{m}$ 水深情况下,常见气泡(直径 $0.5\sim 5\text{mm}$ )的共振频率范围为 $1.429\sim 43.249\text{kHz}$ ,而直径大约是 $1\mu\text{m}$ 的气泡共振频率高达 $21624\text{kHz}$ 。一般的测深系统声源发射频率为 $10\sim 250\text{kHz}$ <sup>[39]</sup>,除了可以获得高密度的海底地形数据,还可以检测到逸出海底、进入水体中的气泡、羽状流以及在水体中伴生出现的声反射现象。羽状流在这个频率段的声学剖面上随潮流的变化表现为垂直或倾斜柱状和双曲状混浊反射条带。为了对绝大多数羽流气泡都能较好成像,参数研究进一步结合了表1世界不同海区的声学探测实例,初步选定了脉冲发射频率范围为 $3.5\sim 250\text{kHz}$ 。实验人员所采用海底冷泉成像设备的水声换能器基阵是在这一讨论范围内根据实际换能器厂家生产情况引进了4种不同频率(12、18、38、120kHz)的水声换能器,这4种换能器组成的多频率换能器探测基阵搭载在调查船拖体上,完全可以满足本实验的要求。在保持相同激发功率和脉冲持续时间的情况下,多频率的换能器基阵可允许比较试验区不同频率声波脉冲对人工模拟的海底冷泉的成像效果。

从现场采集的水体声学图像(图4)和 $S_v$ 强度分布直方图(图5)分析来看,12和18kHz换能器得到的图像剖面上,声波的体积散射强度 $S_v$ 值较大,气泡在散射过程中在 $-55\text{dB}$ 到 $-70\text{dB}$ 之间,分布

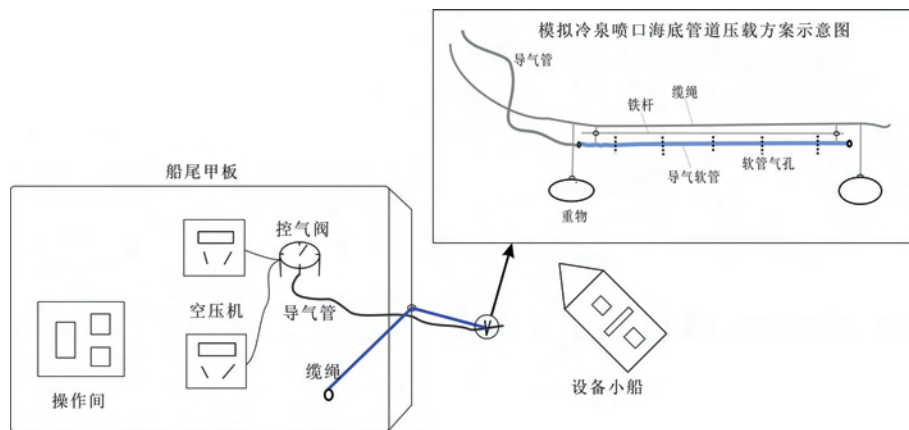


图3 人工模拟冷泉实验示意图

Fig.3 Schematic diagram of artificial cold seep experiment



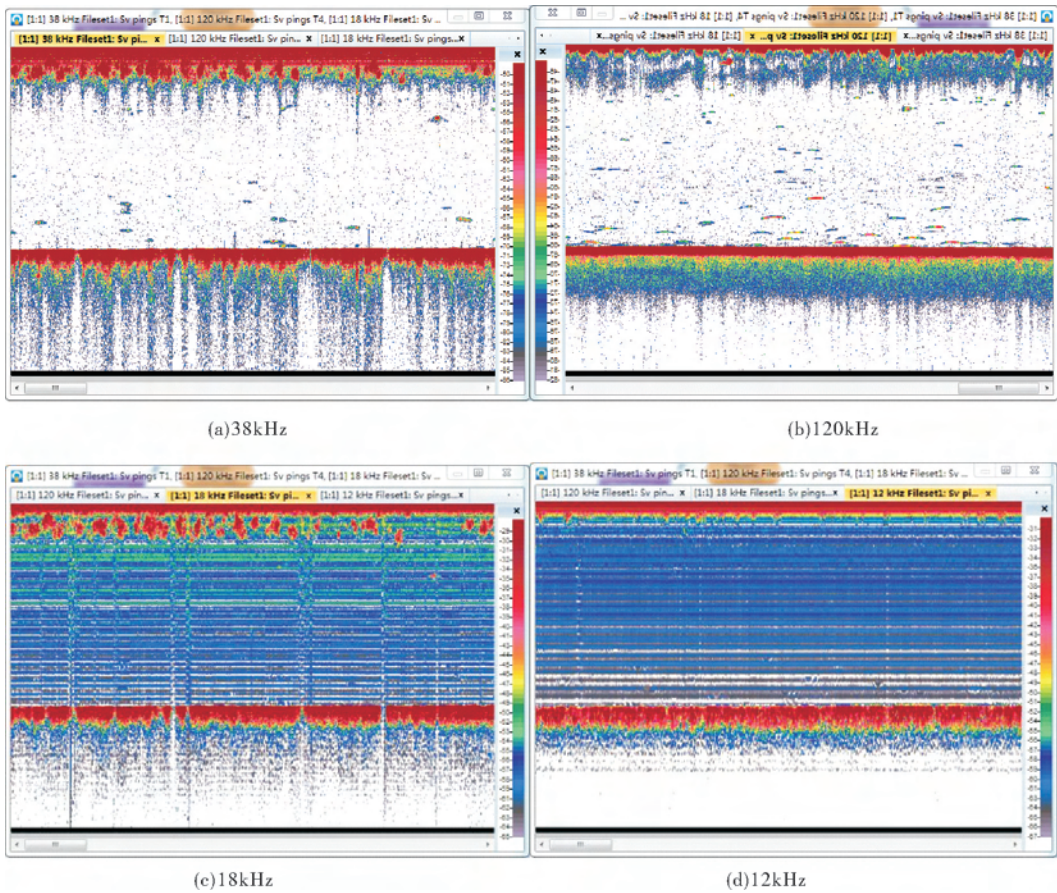


图 4 不同频率脉冲声学成像效果对比

Fig.4 Acoustic imaging comparison of different frequency pulse

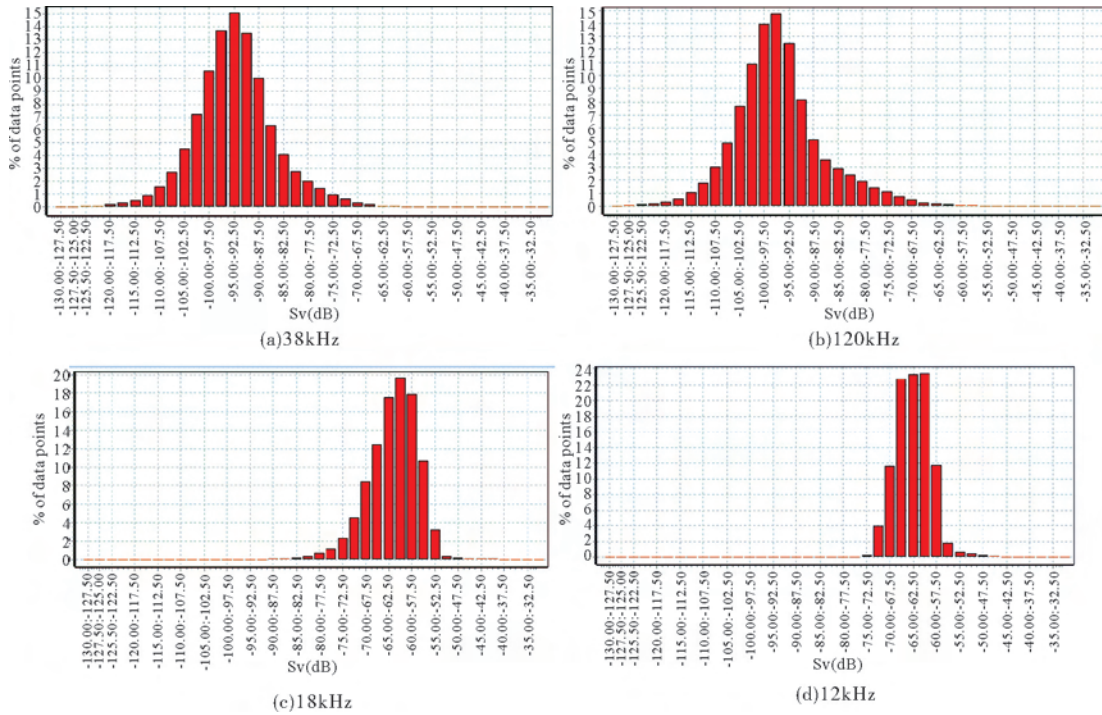


图 5 不同频率 Sv 强度分布直方图对比

Fig.5 Comparison of different frequency pulse for acoustic imaging

布范围小,图像分辨率低,无法辨识剖面异常区。38和120kHz换能器得到的图像清晰,Sv值分布在-90~-115dB。与120kHz相比,38kHz的图像表层扰动较大,水体异常区边界更明显,信噪比更高,而海底的连续度相比较弱。

分析结合实验表明,在浅水区(0~100m),如图5所示,实验中采用的38和120kHz两个频率的水声换能器收发脉冲得到的模拟冷泉图像分辨率较好,海底和水体波阻抗界面明显。

在保持水声换能器其他参数一致的情况下,换能器发射脉冲的频率在选择38和120kHz,对人工模拟的海底冷泉进行声学探测成像,成像效果如图5。因此,假定在外界风浪随时间不变化,试验区外部环境稳定,当船匀速通过冷泉区的理想情况下,这个实验的频率范围对于黄、渤海地区的海底冷泉外业调查成像具有很大的实践意义。这一实验频率范围也符合前文所述的声学共振频率理论。

从图6两张剖面中部红色标记处均可观察到呈上升状态的羽流气泡群,气泡群周围杂乱分布微弱的背景噪声;由采集剖面对比可知,38kHz的换能器对试验环境中的气泡识别更敏感,对剖面中部气泡群、剖面下方海底波阻抗界面的成像更清晰,但与此同时38kHz的剖面中背景噪声也相对较强;在相同的激发功率和脉冲时间条件下,发射频率选用38kHz时声学图像气泡群的识别更明显;发射频率选用120kHz时,对背景噪声的压制更明显。综合以上实验数据分析,在换能器激发功率和脉冲时间相同时,38kHz效果略优于120kHz。根据实验结果,确定38到120kHz范围可以用于该实验海域海底冷泉气泡羽流的声学探测。

### 3.2 声波脉冲发射功率和脉冲宽度(脉冲持续时间)

在声学探测实验过程中,除了发射频率,水声换能器的可调变量还有激发功率和脉冲持续时间,在本研究中,实验人员也分别针对这2个参数做了多组试验。

海底冷泉人工模拟实验中还设计了多组参数组合,分别对同一测线进行往返测量。实验人员在水体声学成像较好的38和120kHz两组声波脉冲发射频率下设计了十多组工作参数进行试验对比(表3),得到了比较理想的采集剖面,羽流气泡群在剖面中形态显示清晰。

表3 功率和脉冲宽度实验参数

Table 3 Experimental parameters for power and pulse width

序号	38kHz		序号	120kHz	
	发射功率/W	脉冲持续时间/ms		发射功率/W	脉冲持续时间/ms
A1	200	0.256	B1	100	0.064
A2	400	0.256	B2	50	0.128
A3	1000	0.256	B3	100	0.128
A4	2000	0.256	B4	50	0.256
A5	200	0.512	B5	100	0.256
A6	400	0.512	B6	125	0.256
A7	1000	0.512	B7	200	0.256
A8	2000	0.512	B8	250	0.256
A9	400	1.024	B9	50	0.512
A10	1000	1.024	B10	100	0.512
A11	2000	1.024	B11	50	1.024
A12	200	2.048	B12	100	1.024
A13	400	2.048	B13	250	1.024
A14	1000	2.048			
A15	400	4.096			

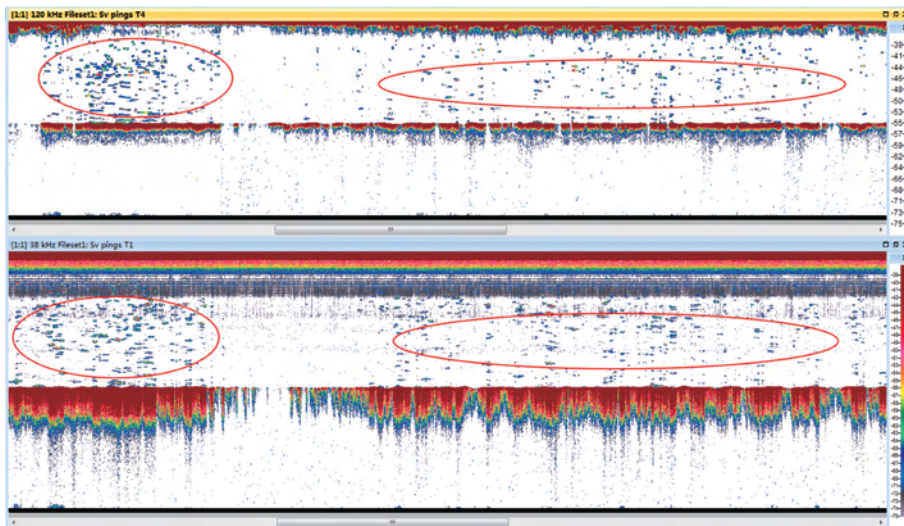


图6 38和120kHz采集剖面对比  
Fig.6 Comparison of 38 and 120kHz profiles



如图 7,针对水声换能器发射功率的实验中,遵循控制变量法的原则,在保持相同发射频率和脉冲时间的情况下,在不同发射功率情况下采集的 4 张水体声学剖面中部红色标记处均可观察到呈上升状态的羽流气泡群,同时也发现气泡群周围存在杂乱分布较模糊的背景噪声;通过对比 4 张水体声学剖面的背景噪声可知,随着发射功率增加,电子发射机的电功率增加,气泡羽流的边界都比较清晰。但是在声波信号频率较高的情况下,声学探测图像的质量越高;在峰值功率一定的情况下,脉冲宽度越窄,包含的能量越小,信噪比就越差。因此,当声学探测频率较高时,换能器可以适当增加功率,保证造高频情况下声学探测的信噪比。另外在换能器频率和脉冲时间相同条件下,过度增加换能器激发功率,会同时提升背景噪声,不利于羽流气泡成像。在实际外业调查过程中,也要考虑到能源损耗的问题。总体来说,声学探测过程中,换能器对探测成像影响不大,适当地增加激发功率可以保证声学剖面的信噪比。

从图 8 可见,3 张水体声学剖面中部上升状态的气泡群形态有所不同,同时气泡群周围杂乱分布有较模糊的背景噪声;通过对比 3 张剖面的背景噪声可知,随着声波脉冲持续时间增加,气泡羽流的探测识别更加明显。但是另一方面,气泡的背景噪声强度却也在增加,气泡群的边界清晰度降低,剖面信

噪比也明显降低。在换能器频率和激发功率相同的条件下,脉冲持续时间的提升可以突出气泡羽流的分布,但同时会提升背景噪声,如果脉冲时间过大就会显著降低气泡群的清晰度。综合考虑,本实验认为适当缩短脉冲时间有利于提升气泡群的成像精度。

## 4 声学探测异常干扰带分析和消除方法

### 4.1 声学探测异常干扰带分析

在对水体声学剖面的观察中,可以发现除了正常的海面反射层、羽流目标体与海底反射层之外,在海面与海底之间还存在一条干扰带,该干扰带普遍存在于部分数据之中,其深度位置处在海底以上一定距离,随着海底起伏上下波动,其强度低于海底与海面反射层的强度。

当水声换能器发射一列声波脉冲信号时,设备就开始信号采集,采集时长即声呐数据一个 Ping (信号的一次发射与接收)的帧长  $\tau_p$  根据所设定的观测深度  $d$  换算出,  $\tau_p = \frac{2d}{c}$  ( $c$  为海水中声速),声呐数据帧时序结构图如图 9 所示。所采集的数据在经过处理后存储为一个数据帧;数据采集结束后,经

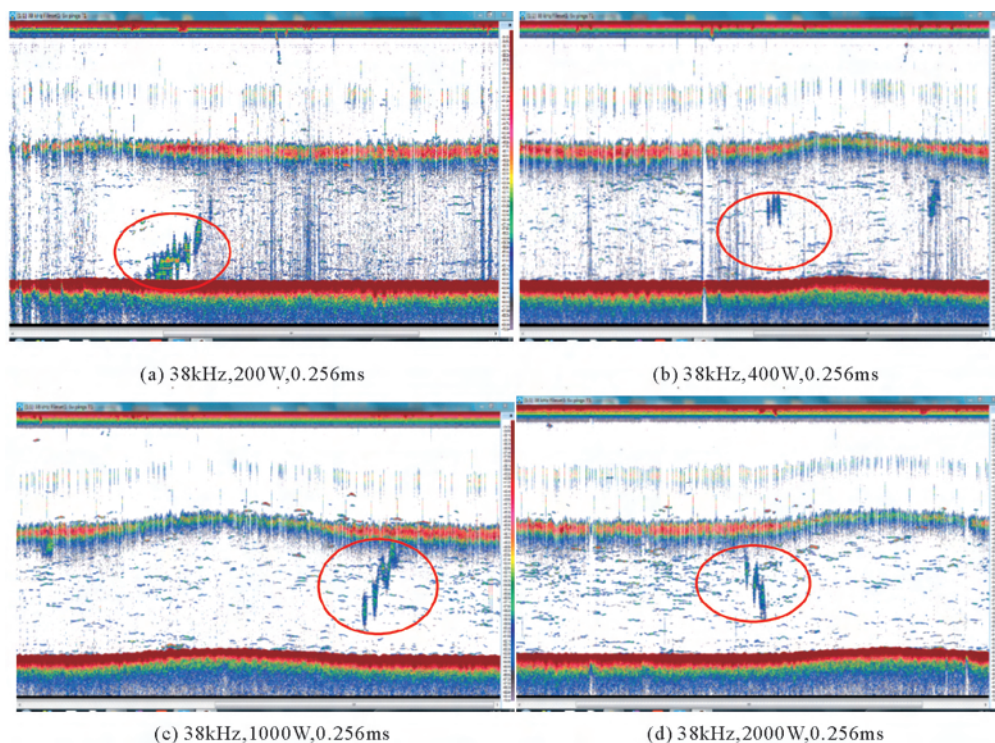


图 7 激发功率不同的条件下采集剖面对比

Fig.7 Acoustic profile comparison with different power conditions



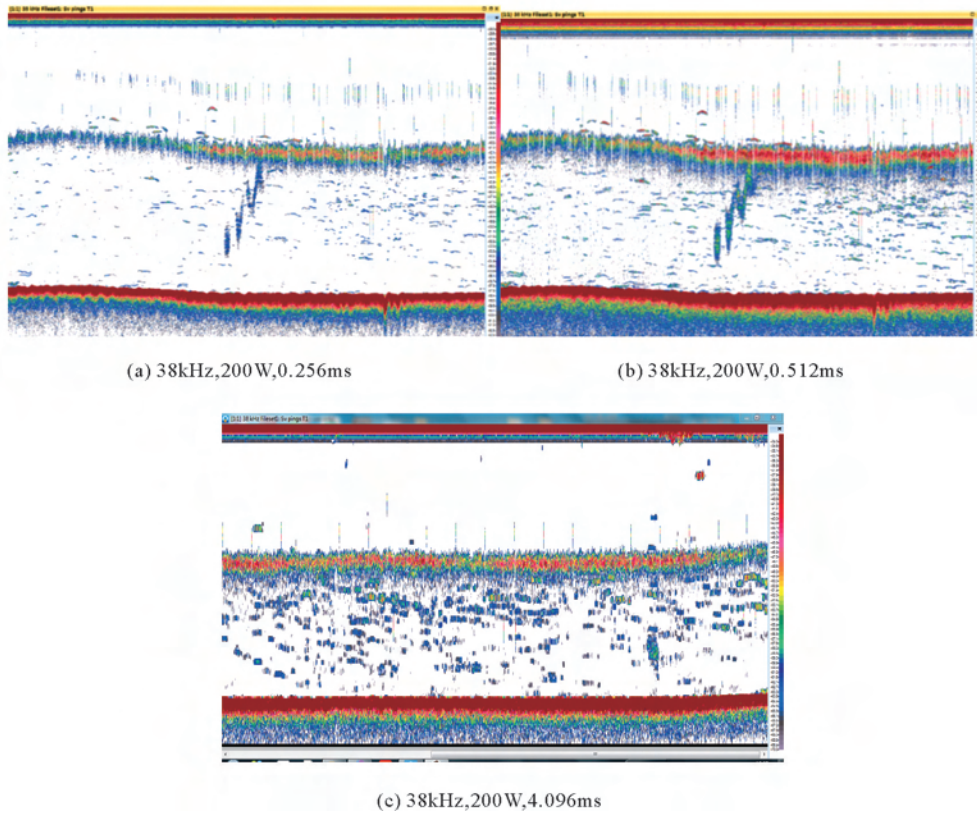


图8 脉冲持续时间不同的条件下声学剖面对比

Fig.8 Comparison of acoustic profiles with different pulse duration

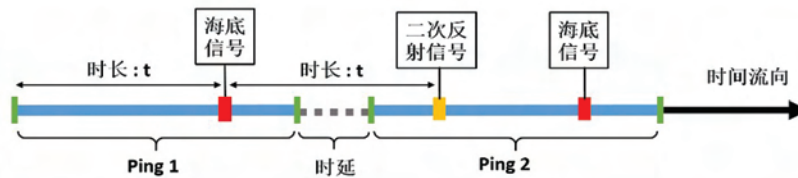


图9 声呐数据帧时序结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of the timing structure of a sonar data frame

过时延  $\tau_D$  设备开始执行下一个 Ping 的工作,时延主要受处理器的数据处理速度与数据保存速度所影响。一般来讲,探测深度越大,时延则越长。通过对换能器设备工作方式与实际工况的结合分析,这里认为声学图像干扰带为声波二次反射所形成的海底残像。

在声波脉冲扫描探照的过程中,当声波传播至海底处,声波发生发射,反射波由换能器接收,接收到的声学信号经过处理单元处理便形成了海底的声学剖面图。同时,当海底反射声波传播到海面时,由于海面波阻抗差较大,声波会在海面发生二次反射,二次反射波传播至海底则会造成再次成像。设海底距海面深度为  $h$ ,以开始采集时间为时间 0 点,则该段海底对应的时序位置为  $t' = 2t = 4d/c$ ,而海底的

二次反射成像的时序位置为,若该时序位置落在当前 Ping 内,即  $t' \leq \tau_p$ ,二次反射的像则会出现在当前 Ping 内,位置为二倍海底深度,如图 10;若该时序位置落在该 Ping 与下一 Ping 的采集时段之间,即  $\tau_p < t' < \tau_p + \tau_D$ ,则像不会显示在声呐数据中;若该时序位置落入下一 Ping 的采集时段内,即  $t' > \tau_p + \tau_D$ ,则像会显示在下一 Ping 的数据之中,即为海底之上的干扰带,如图 11。

以图 11 中数据为例,该次记录中的观测深度为 80m, Ping 时延为 35.56ms,对其进行海底线检测,对海底线进行探测深度与 Ping 时延的位置补偿,另外修正由于船体吃水造成的时延差,最终可以看到经过时延处理的海底线十分准确地与干扰带上缘相贴合,因此,以证明干扰带即是海底的二次反射信号。

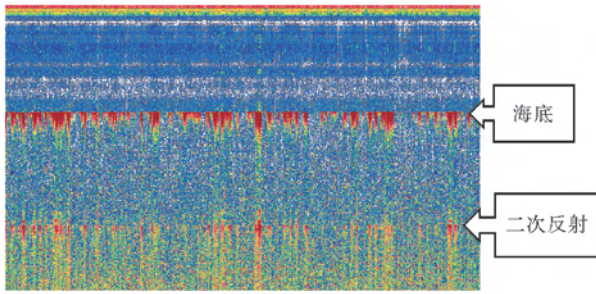


图 10 声图中较浅海底与干扰带位置关系  
Fig.10 The position relationship between the shallow seabed and interference band in the sonogram

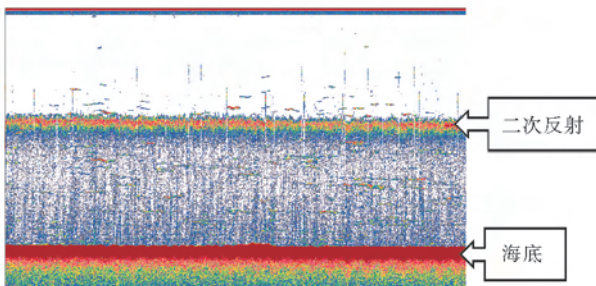


图 11 声图中较深海底与干扰带位置关系  
Fig.11 Position relationship between the deep seabed and the interference band in the sonogram

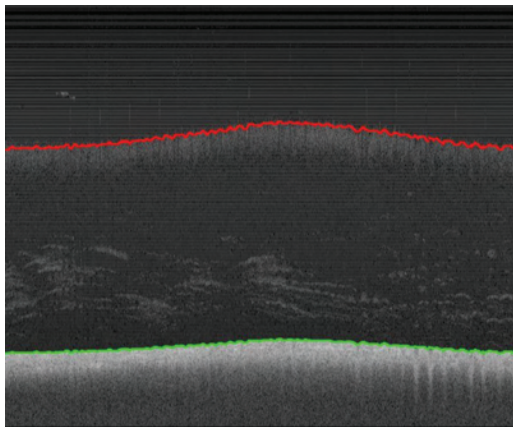


图 12 海底描线(下)与时延处理描线(上)  
Fig.12 Submarine line (green line) and delay line (red line)

#### 4.2 声学探测异常干扰带消除方法

水体声学剖面上出现的干扰带,若想对其进行消除,有以下 2 个解决方法:

(1)直接消除:由于海底位置能基本确定干扰带出现的位置,可以根据这一点对干扰带区域进行定向抑制,其处理效果如图 12 所示,对比未经处理的

原始声图,可以看到经过处理的声图中红色框标注区域有明显的改善。由于受实际工作中海面与海底起伏的不确定性,干扰带的强度与位置都存在较大的随机性,这种定向抑制消除效果有限。

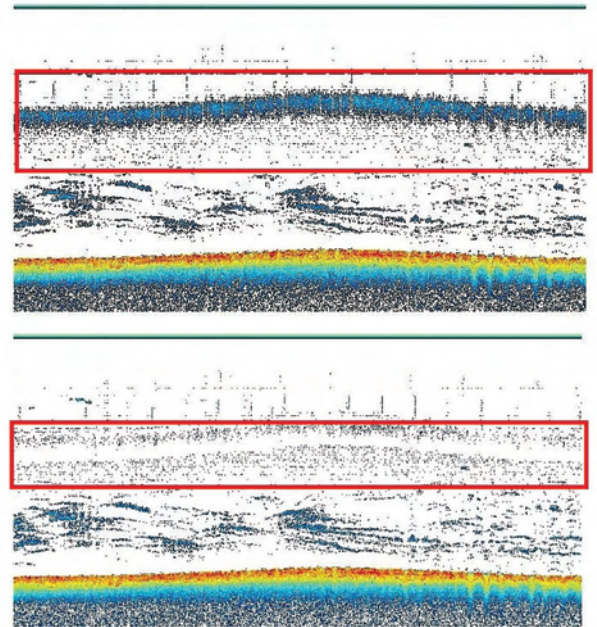


图 13 声学干扰带消除前后对比  
Fig.13 Comparison of acoustic interference band before and after elimination

(2)避免干扰产生:对于干扰带最优的解决方法就是直接避免其产生,可以通过控制声学探测参数的方法来实现从根本上消除干扰带。当海底的二次反射波信号于相邻两 Ping 之间传播到换能器时,换能器不会接受该信号,从而不会成像。因此,可以通过延长声呐观测 Ping 之间的时延,在二次反射像结束之后才开始下一 Ping 的采集。由以上分析可知,声学探测可以人为设置换能器 Ping 值(Ping 代表信号的一次激发与接收)时延的方式来实现干扰带的消除。但是若一味增加声呐观测 Ping 时延,则会降低成像精度。因此,在实际工作中还需要根据具体工区情况进行处理。

#### 5 结论

(1)通过以上分析和实验我们可以知道,对于未知工区的海底冷泉外业调查,基于声学探测理论,不同尺寸的冷泉羽流气泡在不同深度的水体上有不同的共振频率,因此,须根据调查工区的水深范围计算出常见气泡的理论共振频率范围,并进行相应的



海底冷泉人工模拟实验来检验水体声学剖面成像效果,从而先一步优化,确定合适的探测频率范围;

(2) 对于已发现的海底冷泉气泡羽流,需要加密观测测线。在冷泉区人工模拟冷泉实验的基础上,进一步在海底冷泉气泡羽流喷口处鉴于常见大小气泡的理论共振频率范围内进行频率梯度实验,从而选择最优成像探测频率。适当增加换能器的激发功率可以提升对气泡群识别的精度,适当缩短脉冲时间有利于提升气泡群的成像精度。因此,声学探测中需要适当调节换能器的发射功率和发射脉冲宽度(脉冲持续时间),这样在不影响脉冲探测距离的前提下,起到适当增加脉冲发射声功率和减小脉冲宽度的作用,使得声学探测成像效果更好;

(3) 对于水体声学剖面图中出现的干扰带,可以通过控制换能器 Ping(Ping 代表信号的一次激发与接收)时延的方式来实现。但时延不可过长,避免对海底冷泉气泡羽流成像精度的干扰。

### 参考文献 (References)

- [1] 席世川,张鑫,王冰.海底冷泉标志与主要冷泉区的分布和比较[J].海洋地质前沿,2017,33(2):7-18. [XI Shichuan,ZHANG Xin,WANG Bind,et al. The indicators of seabed cold seep and comparison among main distribution areas[J]. Marine Geology Frontiers,2017,33(2):7-18.]
- [2] 陈多福,陈先沛,陈光谦.冷泉流体沉积碳酸盐岩的地质地球化学特征[J].沉积学报,2002,20(1):34-40. [CHEN Duofu, CHEN Xianpei,CHEN Guangqian. Geological and geochemical characteristics of Cold Seepage sedimentary carbonate rocks [J]. Journal of Sedimentation,2002,20(1):34-40.]
- [3] 栾锡武.海底冷泉的成因机制[C].中国地球物理学会第二十四届年会论文集,2008.[LUAN Xiwu. The genetic mechanism of the seabed cold seep[C]. The twenty-fourth annual meeting of the Chinese Geophysical Society,2008.]
- [4] Kowsmann R O,Carvalho M D. Erosional event causing gas-venting on the upper continental slope[J]. Campos Basin, Brazil, 2002.
- [5] 栾锡武,秦蕴珊.冲绳海槽古段西部槽底海底气泉的发现[J].科学通报,2005,50(8):802-810. [LUAN Xiwu,Qin Yunshan. Discovery of submarine gas springs in Western trough of Miyako Island section of Okinawa trough[J]. Chinese Science Bulletin,2005,50(8):802-810.]
- [6] 栾锡武,刘鸿,岳保静.海底冷泉在旁扫声纳图像上的识别[J].现代地质,2010,24(3):474-480. [LUAN Xiwu,LIU Hong,YUE BaoJing. Recognition of a cold seep on a side scan sonar image[J]. Geoscience, 2010, 24(3):474-480.]
- [7] 刘伯然.利用地震海洋学方法探测海底冷泉[C].中国地球物理学会,2012.[LIU Boran. Detecting submarine spring with multi-channel seismic data[C]. Chinese Geophysics Society of Chinese Geophysics,2012.]
- [8] 樊栓狮,刘锋,陈多福.海洋天然气水合物的形成机理探讨[J].天然气地球科学,2004,15(5):524-530,2315. [FAN Shuan-shi,LIU Feng,CHEN Duofu. Discussion on the formation mechanism of marine gas hydrate[J]. Natural Gas Geoscience, 2004,15(5):524-530,2315.]
- [9] 栾锡武,赵克斌,A Obzhurov,等.鄂霍次克海浅表层天然气水合物的勘查识别和基本特征[J].中国科学 D 辑:地球科学,2008,1:99-107. [LUAN Xiwu,ZHAO Kebin,A Obzhurov,et al. Exploration identification and basic characteristics of shallow surface gas hydrates in Okhotsk sea[J]. Science in China (Series D). 2008,1:99-107.]
- [10] Garcia Gil S,Vilas F,Garcia Garcia A. Shallow gas features in incised-valley fills (R1a de Vigo,NW Spain): a case study[J]. Continental Shelf Research,2002,22(16):2303.
- [11] 李智敏,苟先太,金炜东,等.微地震信号的频率特征[J].岩土工程学报,2008,30(6):830-834. [LI Zhimin,GOU Xiantai,JIN Weidong,et al. Frequency characteristics of micro-seismic signals[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008,30(6):830-834.]
- [12] 陈江欣,宋海斌,关永贤,等.海底冷泉的地震海洋学初探[J].地球物理学报,2017,60(2):604-616. [CHEN Jiangxin,SONG Haibin,GUAN Yongxian,et al. Preliminary study on the earthquake Oceanography of the submarine cold seep[J]. Chinese Journal of Geophysics,2017,60(2):604-616.]
- [13] Urick R J. Principle of underwater sound for engineers[J]. MacGraw-Hill,New York P,1967,384.
- [14] Derek C Quigley,J Scott Hornafius,Bruce P Luyendyk,et al. Decrease in natural marine hydrocarbon seepage near Coal Oil Point,California,associated with offshore oil production[J]. Geology,1999,27(11):1047-1050.
- [15] Somoza L,Diaz-del-Riob V,León R. Seabed morphology and hydrocarbon seepage in the Gulf of Cadiz mud volcano area: Acoustic imagery, multibeam and ultra-high resolution seismic data[J]. Marine Geology,2003,195:153-176.
- [16] Nicolas Pinet,Mathieu Duchesne,Denis Lavoie,et al. Surface and subsurface signatures of gas seepage in the St. Lawrence Estuary (Canada): Significance to hydrocarbon exploration [J]. Marine and Petroleum Geology,2008,25:271-288.
- [17] Helge Leth, Marita Gading, Lars Wensaas. Hydrocarbon leakage interpreted on seismic data[J]. Marine and Petroleum Geology,2009,26:1304-1319.
- [18] Heiko Sahling, Gerhard Bohrmann, Volkhard Spiess, et al. Pockmarks in the Northern Congo Fan area, SW Africa: Complex seafloor features shaped by fluid flow[J]. Marine Geology,2008,249:206-225.
- [19] Kruglyakova R P,Byakov Y A,Kruglyakova M V,et al. Natural oil and gas seeps on the Black Sea floor[J]. Geo-Mar Lett,2004,24:150-162.
- [20] Dupre S, Buffet G, Mascle J, et al. High-resolution mapping of large gas emitting mud volcanoes on the Egyptian continental margin (Nile Deep Sea Fan) by AUV surveys[J]. Mar. Geophys. Res,2008,29:275-290.
- [21] Van Rensbergen P, Rabaute A, Colpaert A. Fluid migration

- and fluid seepage in the Connemara Field, Porcupine Basin interpreted from industrial 3D seismic and well data combined with high-resolution site survey data[J]. *Int. J. Earth Sci. (Geo Rundsch)*, 2007, 96: 185-197.
- [22] Huvenne V A I, Bailey W R, Shannon P M, et al. The Magellan mound province in the Porcupine Basin[J]. *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch)*, 2007, 96: 85-101.
- [23] Hovland M. Discovery of prolific natural methane seeps at Gullfaks, northern North Sea[J]. *Geo-Mar Lett*, 2007, 27: 197-201.
- [24] Jeong K S, Cho J H, Kim S R, et al. Geophysical and geochemical observations on actively seeping hydrocarbon gases on the south-eastern Yellow Sea continental shelf[J]. *Geo-Mar Lett*, 2004, 24: 53-62.
- [25] 赵铁虎, 张训华, 冯京. 海底油气渗漏浅表层声学探测技术[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(6): 149-156. [ZHAO Tiehu, ZHANG Xunhua, FENG Jing. Acoustic detection techniques for seabed hydrocarbon seepage[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(6): 149-156.]
- [26] 顾兆峰, 刘怀山, 张志珣. 浅层气逸出到海水中的气泡声学探测方法[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(2): 129-135. [GU Zhaofeng, LIU Huaishan, ZHANG Zhixun. Acoustic detecting method for bubbles from shallow gas to sea water[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(2): 129-135.]
- [27] 宋春云, 雷亚辉, 丁士圻. 混响背景下的 CW 信号检测[J]. *信号处理*, 2008, 24(6): 992-994. [SONG Chunyun, LEI Yahui, DING Shiyang. CW signal detection under reverberation background[J]. *Signal Processing*, 2008, 24(6): 992-994.]
- [28] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨工程大学出版社, 2010. [LIU Bosheng, LEI Jiayu. *Theory of Underwater Acoustics*[M]. Harbin Engineering University press, 2010.]
- [29] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声呐技术[M]. 哈尔滨工程大学出版社, 2000: 14-16. [TIAN Tan, LIU Guozhi, SUN Dajun. *Sonar Technology*[M]. Harbin Engineering University press, 2000: 14-16.]
- [30] Spitzer L Jr. *Acoustic properties of gas bubble in a liquid*[R]. New York: Columbia University, 1943.
- [31] Minnaert M. XVI. On musical air-bubbles and the sounds of running water[J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1933, 16(104): 235-248.
- [32] Smith F D. XCVIII. On the destructive mechanical effects of the gas-bubbles liberated by the passage of intense sound through a liquid[J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1935, 19(130): 1147-1151.
- [33] Briggs H B, Johnson J B, Mason W P. Properties of liquids at high sound pressure[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1947, 19(4): 664-677.
- [34] Houghton G. Theory of bubble pulsation and cavitation[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1963, 35(9): 1387-1393.
- [35] Shima A. The natural frequency of a bubble oscillating in a viscous compressible liquid[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1970, 92(3): 555-561.
- [36] 林芳. 海洋热液声学探测的方法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2010. [LIN Fang. *Methods of ocean hydrothermal acoustic detection*[D]. Harbin Engineering University, 2010.
- [37] Artemov Y G, Egorov V N, Polikarpov G G, et al. Methane emission to the hydro-and atmosphere by gas bubble streams in the Dnieper paleo-delta, the Black Sea[J]. *Rep. Natl. Acad. Sci. Ukraine*, 2007, 5: 110-116.
- [38] Greinert J, Artemov Y, Egorov V, et al. 1300-m-high rising bubbles from mud volcanoes at 2080 m in the Black Sea: Hydroacoustic characteristics and temporal variability[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2006, 244(1-2): 1-15.
- [39] 尤立克 R J. 水声原理[M]. 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990: 199-203. [Yutsk R J. *Principles of Underwater Acoustic Engineering*[M]. Harbin Institute of Ship Engineering, 1990: 199-203.]