引用格式：李国富，刘颉，齐占峰，等. 爆炸声源投放间隔对会聚区声传播损失测量的影响[J]. 声学技术, 2020, **39**(4): 419-424. [LI Guofu, LIU Jie, QI Zhanfeng, et al. Impact of the release interval of explosive sound source on measurements of acoustic transmission loss in convergence zone[J]. Technical Acoustics, **39**(4): 419-424.] **DOI**: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.04.006

爆炸声源投放间隔对会聚区声传播损失测量的影响

李国富，刘 颉，齐占峰，张 爽，彭家忠，李 琦
(国家海洋技术中心，天津 300112)

摘要：会聚区声传播损失测量是水声调查的重要内容。爆炸声源投放间隔对会聚区声传播损失结构的刻画具有直接影响。基于 Argo 资料、与距离有关声学模型(Range-dependent Acoustic Model, RAM)和实验数据，对不同投放间隔下获得的会聚区声传播损失进行了比较。结果表明，在不同声源深度和频率下，0.5 km 的投放间隔能够很好地刻画出会聚区声场结构的精细特征；1 km 的投放间隔基本满足对会聚区结构精细测量的要求；2 km 的投放间隔能够测量到会聚区的大致结构，但可能出现对会聚区峰值结构的漏测或欠精确的会聚区增益。考虑到实际条件难以支持全测线 0.5 km 的投放间隔，建议对会聚区精细测量时，在可知会聚区范围的海域使用在会聚区 0.5 km 的投放间隔、在影区 1 km 的投放间隔；在未知海域使用全测线 1 km 的投放间隔；对了解会聚区大致结构的调查，使用 2 km 的投放间隔。

关键词：会聚区；声传播损失；爆炸声源；投放间隔
中图分类号：P733.21 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2020)-04-0419-06

Impact of the release interval of explosive sound source on measurements of acoustic transmission loss in convergence zone

LI Guofu, LIU Jie, QI Zhanfeng, ZHANG Shuang, PENG Jiazhong, LI Qi
(*National Ocean Technology Center*, *Tianjin* 300112, *China*)

Abstract: Measurements of acoustic transmission loss in convergence zone are an important part of underwater acoustic survey. Among various parameters of the explosive sound source, the release interval has a direct effect on the characterization of the acoustic transmission loss structure in convergence zone. Based on Argo data, RAM acoustic propagation model and experimental data, the structures of acoustic transmission loss in convergence zone for different release intervals are compared. The results indicate that under the conditions of different sound source depths and frequencies, the fine characteristics of the acoustic field structure in convergence zone can be well described at the release interval of 0.5 km, the requirement for fine measurement of the convergence zone structure can be met at the release interval of 1 km, and a release interval of 2 km can be used to measure the general structure of the convergence zone, but the peak structure of the convergence region may be missed or the convergence region gain may not be accurate. In consideration of these results and the fact that 0.5 km release interval is impracticable for the whole survey line under the existing conditions, it is suggested that fine measurement of convergence zone, 0.5-km release interval in the convergence zone and 1-km release interval intervals in the shadow zone should be used in the sea area where the range of convergence zone can be known in advance, 1-km release interval can be used on the whole survey line in the unknown sea area; for a survey which aims at getting the general structure of acoustic transmission loss in convergence zone, 2-km release distance interval can be adopted.

Key words: convergence zone; acoustic transmission loss; explosive sound source; release interval

0 引 言

在水声调查试验中，声传播损失测量是一项非常重要的作业内容。目前用于海洋声传播损失测量的声源主要有爆炸声源和可控声源两类。爆炸声源包括手榴弹、声弹、气枪、灯泡等。可控声源包括拖曳声源、吊放声源、潜标声源等。由于爆炸声源能够产生宽频带的脉冲信号，一次发声过程便可获得几百乃至几千赫兹带宽内的传播损失，因而是当前海洋声学调查中最常见的发射声源[1]。在测量过程中，按照一定距离间隔投放爆炸声源，并在设定深度上起爆，发出气泡脉冲，利用事先布放的水听

收稿日期：2019-03-20; **修回日期：**2019-04-18
基金项目：国家海洋技术中心科技创新基金(Z-17007-1B, Z-18047-1B)、海洋经济创新发展示范项目(BHSF2017-26)
作者简介：李国富(1987－)，男，山东章丘人，博士，助理研究员，研究方向为海洋声学。
通讯作者：张爽, E-mail: maymayed2007@126.com

器阵列接收经过海洋声信道的声传播信号，最终通过回放分析接收数据，得到声传播损失。

在深海中，会聚区现象是特有的声传播特征，更是深海水声调查的重要研究内容。会聚区传播的重要性在于它能够高强度、低失真地远距离传播声信号。利用会聚区效应，可实现对水中目标的远程探测以及水下装备的远距离通信等[2]。会聚区距离、宽度、增益等特征的精细测量在水声设备研制和水下对抗等方面具有重大的研究意义。在爆炸声源的诸多参数之中，与会聚区声传播损失特征测量的精细程度最直接相关的是爆炸声源的投放间隔，理论上较小的投放间隔可获得更精细的会聚区特征。然而实际海上作业的可操作性、成本等因素限制了爆炸声源的密集投放。过大的投放间隔则可能会导致测量数据过于稀疏化而不能完整刻画聚区声传播损失的结构。对于这一问题，在实际海上调查作业中已有许多实践经验，但系统的分析研究还未见报道。本文基于 Argo 资料计算了西太平洋某海域典型深海声速剖面，并应用水声学数值模型结合实验数据分析了爆炸声源投放间隔对会聚区声传播损失测量的影响，最后结合实际海上作业要求，给出了爆炸声源投放间隔的设计原则。

1 声传播损失定义与计算

声传播损失定量地描述了声波在海洋中传播一定距离后声强度的衰减情况，它定义为

$$L_{\mathrm{T}}=10\lg\frac{I_1}{I_r} \tag{1}$$

式中：I_1、I_r 分别是距离声源的声学中心 1 m 处和 r 处的声强；对于瞬态信号以及在传播中或在遇到目标后信号有严重失真的情况，用声波的能流密度 E 表示声传播损失更有意义，其定义为

$$E=\int_0^{\infty} p(t)u(t)\mathrm{d}t \tag{2}$$

其中：$p(t)$ 是声压；$u(t)$ 是质点振速。对应的声传播损失为

$$L_{\mathrm{T}}=10\lg\frac{E_1}{E_r} \tag{3}$$

其中：E_1 是位于距离声源声学中心 1 m 处的声能流密度，E_r 是距离声源声学中心 r 处的声能流密度。

对于利用水听器阵列获取的实测数据，选取从声源发出经过所有途径到达接收点的声传播信号离散时间序列，不同距离处的声传播损失为[3-4]

$$L_{\mathrm{T}}(r|f_0)=10\lg[\tilde{E}(f_0)]-M_v-G-L_{\mathrm{S}}(f_0) \tag{4}$$

式中：f_0 为中心频率；r 为接收水听器与爆炸声源的水平距离；$\tilde{E}(f_0)$ 为以 f_0 为中心频率的单位带宽内的声能流密度；M_v 为水听器的电压灵敏度；G 为接收系统的放大增益；$L_{\mathrm{S}}(f_0)$ 为声源级。

2 环境数据来源及声场计算方法

本研究所用的 Argo 资料是由中国 Argo 实时资料中心提供的全球海洋 Argo 网格数据集，时间范围 2004 年 1 月～2017 年 12 月，采样数据主要包括水温、盐度和压力，空间分辨率为 1°×1°，剖面测量范围 0～2 000 m，垂直层数 58 层。该网格数据集是中国 Argo 实时资料中心在各国 Argo 资料中心的实时和部分延时质量控制的基础上，利用逐步订正法，并结合混合层模型构建完成的全球海洋三维网格温、盐度资料集[5]。

本文选取西太平洋 130.5°E、20.5°N 附近海域，该位置水深大约为 5 950 m(根据 ETOPO1 数据)，有较大深度余量，利于产生声场会聚现象。考虑到 Argo 剖面数据的最大取样深度为 2 000 m，因此无法提供深海部分的声速剖面，因而不能直接用于深海声传播的计算。针对这个问题，2 000 m 以深部分，假设温度、盐度不变，只是压力增加，补齐温度、盐度剖面数据，最后通过 Chen&Millero 海水声速经验公式获得全海深的声速剖面[6-7]。

图 1 是利用上述方法计算得到的西太平洋某海域 5 月份平均声速剖面，可见该海域的声速剖面呈现出典型深海 Munk 剖面结构特征[8]。因受到春季温暖阳光照射，近表层表现为季节性跃层条件下的负梯度声速结构，表面声速最大值位于海面附近，为 1 543 m·s^{-1}。深海内部，水温低且稳定，形成深海等温层，声速随海洋深度增加呈现正梯度变化，近海底声速达到最大 1 559 m·s^{-1}，深度余量达 950 m。位于深海等温层和主跃变层中间的声道轴在 1 000 m 深度，其声速为 1 482 m·s^{-1}。

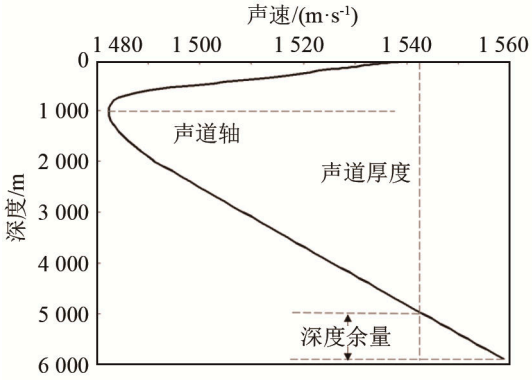


图 1 西太平洋某海域 5 月份平均声速剖面

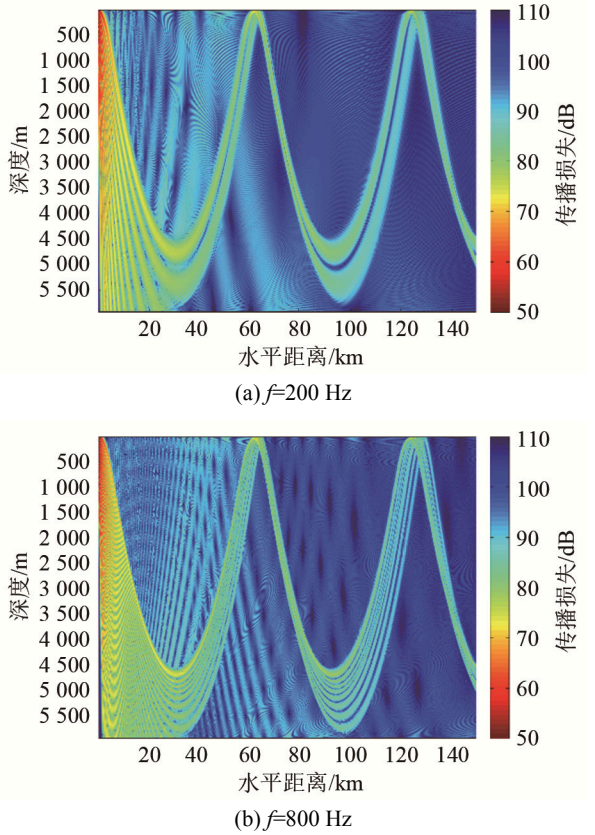
Fig.1 Average sound speed profile in May in a certain area of Western Pacific Ocean

将以上声速剖面输入与距离有关声学模型(Range-dependent Acoustic Model, RAM)[9]中，对该区域的声传播损失进行计算。RAM 基于分裂步进帕德近似，可允许较大的水平步进距离，计算速度快，对环境适应能力强，特别是在处理大多数海洋环境中存在的低频远距离声传播衰减问题时比较准确。声场计算过程中的主要参数设置如下：声源频率 f 为 200、800 Hz，声源深度 D_S 为 50、100、300 m，接收深度 D_R 为 300 m，爆炸声源投放间隔 d 为 0.5、1、2 km，海底深度 H 为 5 950 m，海底声速 c_b 为 1 600 m·s^{-1}，海底密度 ρ_b 为 1.5 g·cm^{-3}，海底衰减系数 α_b 为 0.5 dB·λ^{-1}。

3　结果与分析

3.1　声源深度 50 m 时的声传播损失

图 2(a)和 2(b)分别给出了声源深度为 50 m、声源频率 f 为 200、800 Hz 时的全海深声场。由图 2 可见，由于近海面的负梯度声速结构和较大的深度余量，除海底反射能量之外，一部分声波在水中反转形成会聚区声场。在水平距离小于 140 km 范围内，具有两个明显的深海会聚区：第一会聚区的中心距离在 62.5 km 左右，第二会聚区的中心距离在 125 km 左右。图 2(a)中，当声源频率 f=200 Hz 时，小角度反转声线的干涉使得第一、第二会聚区的左侧分支分为两个声束。图 2(b)中，当声源频率 f=800 Hz 时，第一会聚区左右两侧分支因不同反转声线之间的干涉形成多个间隔较近的声束，而第二会聚区左右两侧分支不同声束之间的间隔则稍远。



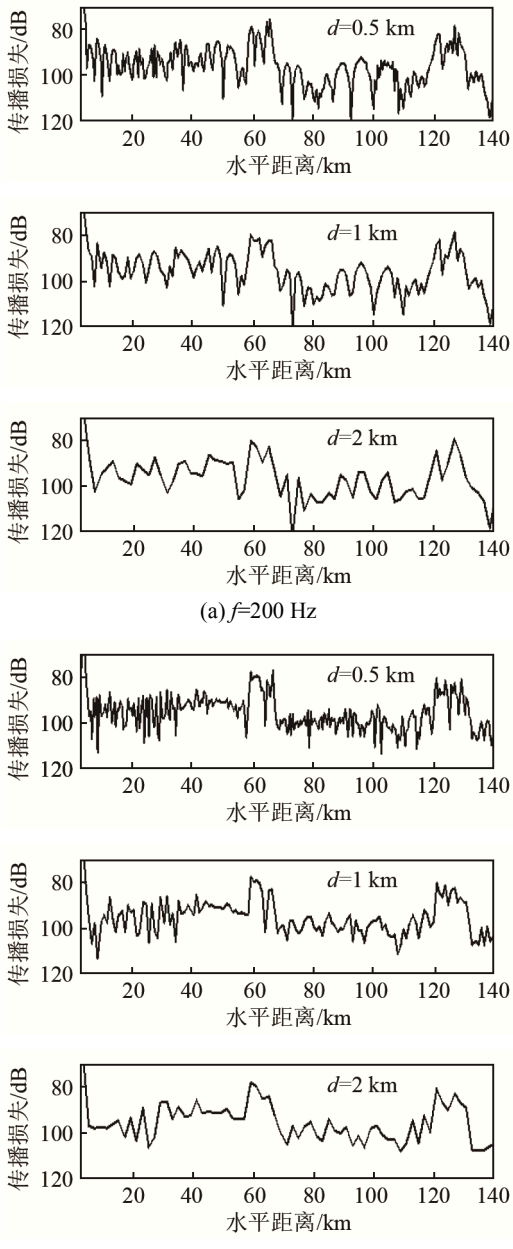
(a) f=200 Hz

(b) f=800 Hz

图 2　声源位于 50 m 深度时的声场

Fig.2　Acoustic fields of a sound source at the depth of 50 m

为比较爆炸声源投放间隔对声传播损失测量的具体影响，图 3 给出了声源深度 D_S=50 m，接收深度 D_R=300 m 时，投放间隔 d=0.5、1、2 km 3 种情况下的声传播损失。图 3 中，第一会聚区与声源



(a) f=200 Hz

(b) f=800 Hz

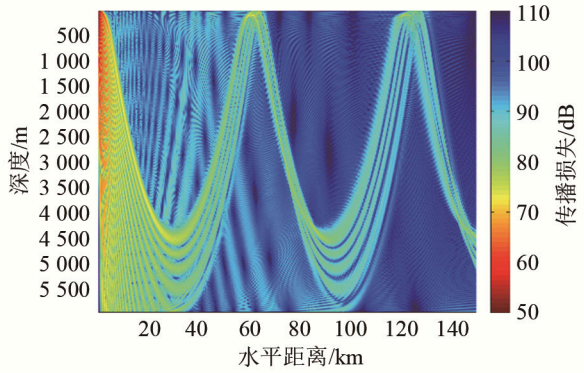
图 3　不同爆炸声源投放间隔下的声传播损失(D_S=50 m，D_R=300 m)

Fig.3　Transmission losses for different release intervals of the explosive sound source at the depth of 50 m, and the receiver is at the depth of 300 m

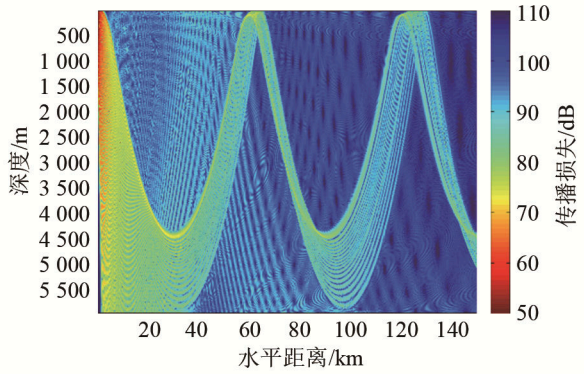
的距离为 58～67 km，第二会聚区的范围在 120～131 km，会聚区宽度仅为 10 km 左右。由图 3(a)中可见，当声源频率 f=200 Hz 时，3 种投放间隔下的声传播损失曲线都能够刻画出对应于第一、第二会聚区左右两侧分支的“双峰”特征，但是只有投放间隔 d=0.5 km 能够测量到第一会聚区左侧分支的两个峰值结构。当声源频率 f=800 Hz 时，如图 3(b)所示，投放间隔 d=0.5 km 和 d=1 km 均能捕捉到对应于第一会聚区左右分支的“双峰”特征，而当投放间隔 d=2 km 时测量到的对应于右侧分支的第二个峰值不明显。对于图 3(a)和 3(b)中的第二会聚区，当投放间隔 d=0.5 km 时，可清晰地看出在对应左右两侧分支的“双峰”结构上存在着许多细小的峰值。随着投放间隔的继续增大，除测得的会聚区位置、宽度基本一致之外，这些细小峰值的精细程度明显依次下降。

3.2 声源深度 100 m 时的声传播损失

图 4 为声源深度 D_S=100 m，声源频率 f 为 200 、800 Hz 下的全海深声场。与图 2 的声场结构相似，图 4 中的声场结构也呈现出明显的深海会聚区特征，第一会聚区的中心距离约在 62 km 处，第二会聚区的中心距离约在 124 km 处。与声源深度 D_S=50 m 时声场的不同之处在于：随着声源深度的增大，声源深度处的声速值减小，更多小掠射角出射的声线在水中反转并在会聚区位置干涉，导致会聚区宽度增大。特别地，当声源频率 f=200 Hz 时，与图 2(a)相比，第二会聚区的左侧分支形成更多的离散声束。



(a) f=200 Hz

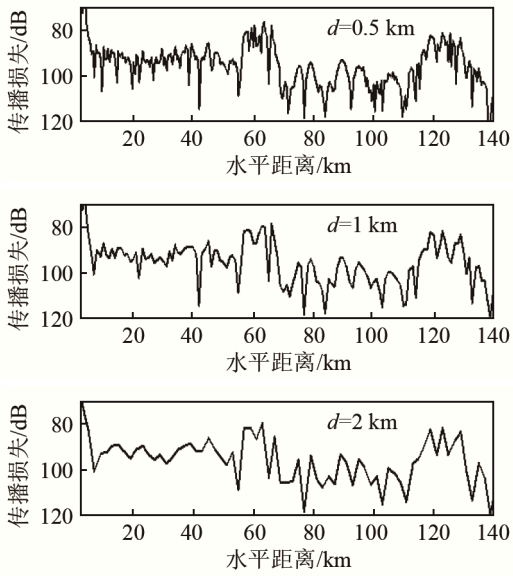


(b) f=800 Hz

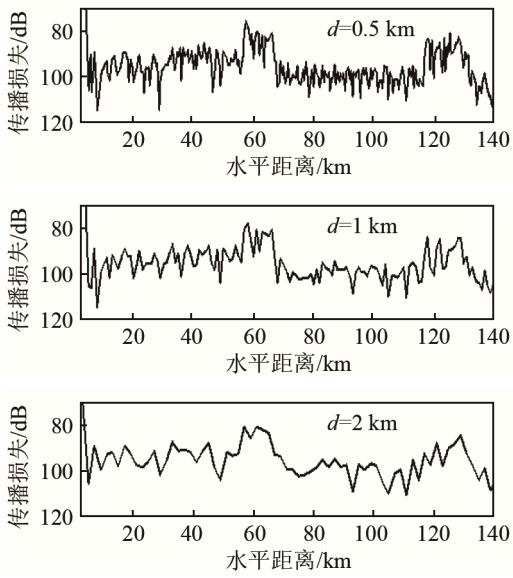
图 4 声源位于 100 m 深度的声场

Fig.4 Acoustic fields of a sound source at the depth of 100 m

图 5 比较了声源深度 D_S=100 m，接收深度 D_R=300 m 时，投放间隔 d=0.5、1、2 km 3 种情况下的声传播损失。图 5 中，第一会聚区距离的变化范围在 56～68 km，第二会聚区离声源的水平距离在 116～130 km。由图 5(a)可见，当声源频率 f=200 Hz 时，投放间隔 d=0.5 km 能够测量到与第一会聚区左



(a) f=200 Hz



(b) f=800 Hz

图 5 不同爆炸声源投放间隔下的声传播损失(D_S=100 m，D_R=300 m)

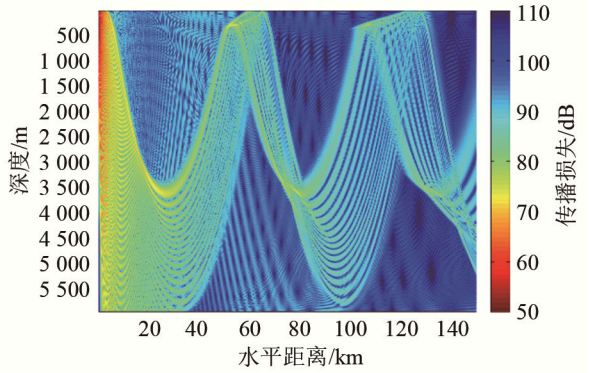
Fig.5 Transmission losses for different release intervals of the explosive sound source at the depth of 100 m, and the receiver is at the depth of 300 m

侧分支离散声束相对应的多个峰值结构，投放间隔 d=1 km 和 2 km 仅能刻画出第一会聚区左侧分支中最明显的两个峰值，投放间隔 d=2 km 获得的第一会聚区右侧分支峰值的增益明显变低，增益衰减值达 7.5 dB。在第二会聚区，d=0.5 km 投放间隔可以捕捉到许多细小的峰值结构，而 d=1 km 和 d=2 km 投放间隔仅能测量到 3 个主要的峰值。当声源频率 f=800 Hz 时，如图 5(b)所示，投放间隔 d=0.5 km 和 d=1 km 能刻画出第一、第二会聚区 3 个主要的峰值结构，而投放间隔 d=2 km 时则只能测到一两个峰值。

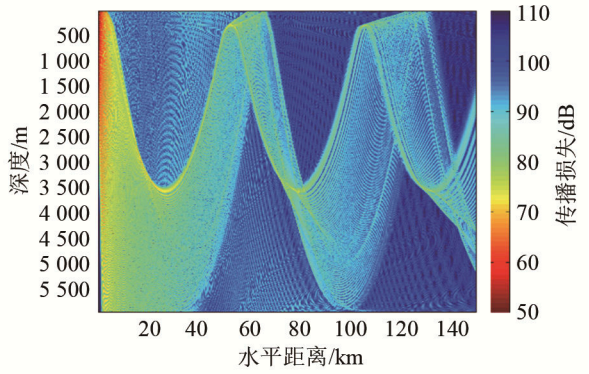
3.2　声源深度 300 m 时的声传播损失

图 6 为声源深度 D_S=300 m，声源频率 f=200、800 Hz 下的全海深声场。与图 2、图 4 所示声源深度 D_S=50 m 和 D_S=100 m 时的会聚区声场相比，具有明显不同的特征：首先会聚区距离显著缩短，第一会聚区的中心距离在 58 km 左右，第二会聚区的中心距离在 117 km 左右；其次随着声源深度继续增大，在负梯度声速条件下，声源深度处的声速值减小，更大角度的声线得以在水中反转，导致会聚区左右两侧分支在近海面附近重叠在一起，会聚区的宽度大幅度展宽。

图 7 为 D_S=300 m，D_R=300 m 时，投放间隔 d=0.5、1、2 km 3 种情况下的声传播损失。图 7 中，



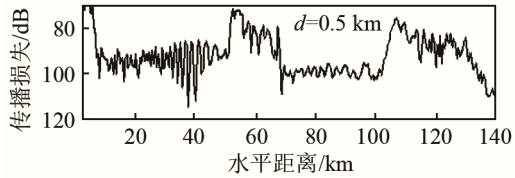
(a) f=200 Hz

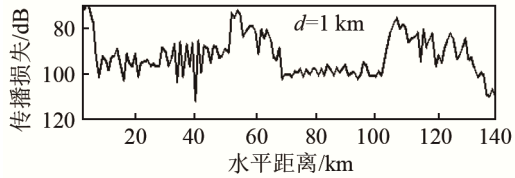


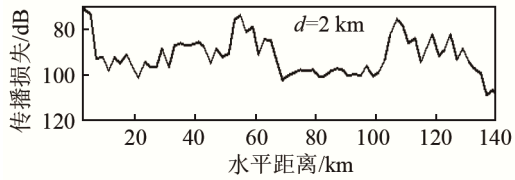
(b) f=800 Hz

图 6　声源位于 300 m 深度的声场

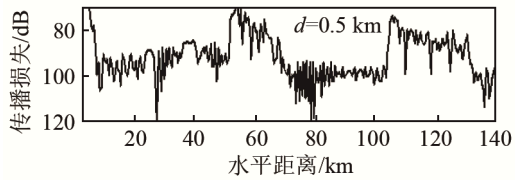
Fig.6　Acoustic fields of a sound source at the depth of 300 m

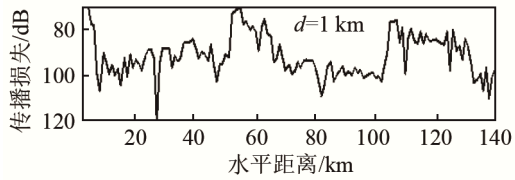


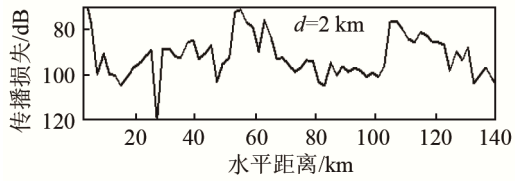




(a) f=200 Hz







(b) f=800 Hz

图 7　不同爆炸声源投放间隔下的声传播损失(D_S=300 m，D_R=300 m)

Fig.7　Transmission losses for different release intervals of the explosive sound source at the depth of 300 m, and the receiver is at the depth of 300 m

第一、第二会聚区的宽度分别达到 17、20 km。与图 3、图 5 相似，随着投放间隔的增大，所获得的会聚区峰值结构越来越粗糙。但同时应注意到，声源处于较大的深度时，3 种投放间隔所测得的会聚区位置、宽度、增益基本相同。

最后，为进一步分析投放间隔对会聚区声传播损失测量的实际影响，对某次声传播损失调查获得的实验数据进行了分析，如图 8 所示。声源深度 D_S=200 m，接收深度 D_R=300 m。从图 8(a)可以看到，当声源频率 f=200 Hz 时，声源投放间隔 d=1 km 和 d=2 km 所刻画的 60 km 附近的第一会聚区声传播损

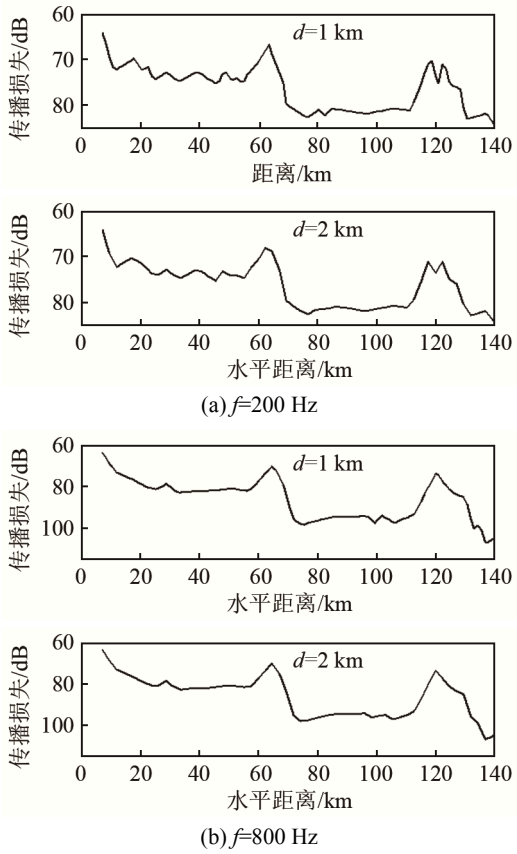


图 8 不同投放间隔下的声传播损失实验数据(D_S=200 m，D_R=300 m)

Fig.8 The measured transmission losses for different release intervals of the explosive sound source at the depth of 300 m and the receiver is at the depth of 300 m

失结构，除峰值增益略有差别之外，总体上基本一致，但 120 km 附近第二会聚区的双峰结构有明显不同，两种投放间隔下双峰之间的低谷深度差异约 2 dB。另外，从图 8(b)可以看出，在这次实验中，当声源频率 f=800 Hz 时，声源投放间隔 d=1 km 和 d=2 km 所获取的声传播损失曲线结构基本相同。

4 结 论

本文基于 2004～2017 年的 Argo 浮标资料，选取西太平洋某海域典型深海声速剖面，利用 RAM 计算了不同声源深度和频率下的声场，并结合某次声传播损失实测数据，分析了 3 种爆炸声源投放间隔下获得的会聚区声传播损失，得到如下结论：(1) 不同的声源深度和频率时，3 种投放间隔测量到的会聚区位置、宽度基本一致，而会聚区增益受投放间隔的影响较大。(2) 投放间隔 d=0.5 km 能很好地刻画出会聚区声场结构的细节特征；投放间隔 d=1 km 基本满足对会聚区声传播损失精细测量的要求；投放间隔 d=2 km 能测量到会聚区的大致结构，但精细程度不足，可能会对会聚区峰值结构漏测或获得不精确的会聚区增益。(3) 当声源深度较深时，较大的投放间隔(d=2 km)也可获得较好的会聚区增益和声传播损失峰值结构。

基于以上结论，采用 d=0.5 km 甚至更小的投放间隔对于会聚区结构的精细测量最为有利。但鉴于实际海上作业经费、船时、操作方便程度、声源延爆时间等因素的限制，在声传播测线上全程使用 d=0.5 km 投放间隔的可行性不高。同时考虑到投放间隔 d= 1 km 可以基本满足会聚区精细测量的要求，因此建议爆炸声源投放间隔采用如下设计方案：对深海会聚区声传播损失开展精细测量时，在已有海洋环境或声学数据的情况下，对会聚区距离和宽度的大致范围进行预先估计，采用会聚区 d=0.5 km 投放间隔、影区 d=1 km 投放间隔的会聚区加密投放方式；在未知海域采用全测线 d=1 km 的投放间隔，兼顾会聚区空间采样间隔和实际调查条件。而对于以了解会聚区大致结构为目标的一般声传播损失调查，特别是当声源深度较大时，可以采用全测线 d=2 km 的投放间隔获得会聚区位置、宽度、增益等参数的基本情况。

参 考 文 献

[1] 刘清宇, 马树青, 杨华. 爆炸声源声源级数据分析方法[J]. 声学与电子工程, 2014, **116**(4): 1-4.
LIU Qingyu, MA Shuqing, YANG Hua. Sound source level data analysis method of explosive sound source[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2014, **116**(4): 1-4.

[2] 李玉阳, 笪良龙, 晋朝勃, 等. 海洋锋对深海会聚区特征影响研究[J]. 声学技术, 2010, **29**(6): 78-79.
LI Yuyang, DA Lianglong, JIN Chaobo, et al. Research on the effects of ocean front on characteristics of convergence zone[J]. Technical Acoustics, 2010, **29**(6): 78-79.

[3] 韩引海, 江国进, 李春风. “海底山”地形的水下声传播分析[J]. 声学技术, 2018, **37**(6): 545-548.
HAN Yinhai, JIANG Guojin, LI Chunfeng. Analysis of underwater acoustic propagation under the terrain of “seabed mountain”[J]. Technical Acoustics, 2018, **37**(6): 545-548.

[4] 胡治国, 李整林, 秦继兴, 等. 深海海底斜坡环境对声传播规律的影响[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, **46**(9): 18-27.
HU Zhiguo, LI Zhenglin, QIN Jixing, et al. The effects of the sloping bottom environment on sound propagation in deep water[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2016, **46**(9): 18-27.

[5] 中国 Argo 实时资料中心. 全球海洋 Argo 网格数据集(BOA_Argo) [DB/OL].2018[2018-12-21]. ftp://data.argo.org.cn/pub/ARGO/BOA_Argo.

[6] 阮海林, 杨燕明, 牛富强, 等. 基于 Argo 数据的吕宋海峡东部海域的会聚区特征分析[J]. 海洋学报, 2015, **37**(7): 78-84.
RUAN Hailin, YANG Yanming, NIU Fuqiang, et al. Analysis the characteristics of convergence zone in the east of Luzon Strait based on Argo data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, **37**(7): 78-84.

[7] FOFONOFF P, MILLARD R C. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater[R]. Paris：UNESCO Tech Rap in MAR SCI, 1983, 44: 1-53.

[8] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993: 64-65.

[9] COLLINS M D. A split-step pade solution for the parabolic equation method[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1993, **93**(4): 1736-1742.