

海洋内波对水下声场的影响*

胡涛[†] 宋文华

(中国科学院水声环境特性重点实验室 北京 100190)

2014-07-15收到

[†] email: Hutaot76@aliyun.com

DOI: 10.7693/wl20141004

Effect of internal waves on sound propagation in the ocean

HU Tao[†] SONG Wen-Hua

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 海洋内波是海水内部的波动之一,它与海洋表面的海浪运动有着非常不同的物理特征。海洋内波会引起海水温度剖面发生剧烈的波动,这种波动具有很强的方向性和时变性,对水下声传播影响巨大,并展现出一些很奇特的声波导效应(包括二维波导效应和三维波导效应),给水下目标的探测与定位以及水声通信等带来严重影响。海洋内波对声场的影响研究涉及到海洋动力学和水声学两个学科领域,文章重点介绍海洋内波对声场影响研究领域的相关进展,并对内波环境下典型声波导现象进行了讨论,最后对该领域未来的发展进行了总结和展望。

关键词 海洋内波, 声波导, 二维波导效应, 三维波导效应

Abstract Internal waves, i.e. waves moving within the ocean's interior, have different physical features from ocean surface waves, and can cause great fluctuation of the temperature profile in the water. This temperature fluctuation has high directivity and varies markedly with time, strongly affecting underwater acoustic propagation. Internal waves give rise to some very interesting acoustic waveguide effects (including 2- and 3-dimensional effects), which greatly influence the detection and localization of underwater targets, as well as acoustic communications. Research on these effects of internal waves involves two disciplines: ocean dynamics and underwater acoustics. In this paper, we first review the effect of internal waves on sound propagation. Then some discussion about the typical acoustic waveguide effect is given. Finally, future prospects of this field are summarized.

Keywords internal waves, acoustic waveguide, 2-dimensional waveguide effect, 3-dimensional waveguide effect

1 海洋内波

海洋内波是广泛存在于近海大陆架、岛链等附近的一种中尺度海洋现象。夏季,由于海水沿重力方向的温度分布不均匀,海水中会形成一定

的密度分层结构。如果有一个内扰动,浮力将使离开平衡位置的海水质点返回到它的初始位置,从而产生一种周期震荡,形成海洋内波^[1]。海洋内波的产生需要具备两个条件,一个是稳定的密度分层,另一个是扰动源。在海洋中,当潮流通过具有突变海底地形的海域时,就会形成激发海洋内波的扰动源。因此,在突变海底地形(如大

* 国家自然科学基金(批准号: 11004214, 11274338, 10874199)、国防科研基金(批准号: 9140A03050312ZK0201)资助项目

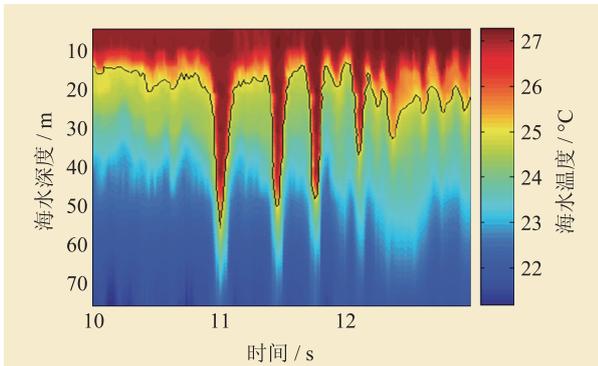


图1 实测非线性内波引起海水温度剖面发生剧烈波动^[5]

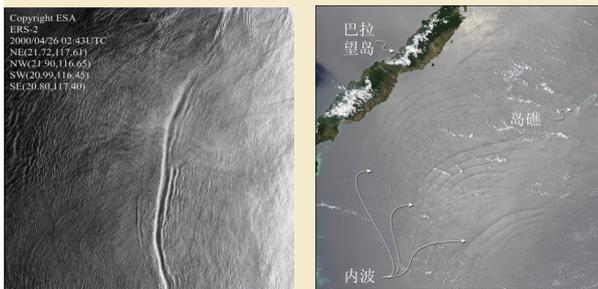


图2 南海北部(左)和苏禄海(右)非线性内波的卫星遥感图像

陆坡、海山、海沟以及岛链)附近极易产生内波,内波的幅度最大可达几百米^[2]。

海洋内波一般分为内潮、非线性内波(孤子内波)和线性内波3种。内潮是具有全日潮或半日潮频率的内波,非线性内波是指由单个和多个波包组成的大振幅离散波群,线性内波往往用来表示高频的随机内波。

在夏季,内潮和线性内波几乎存在于所有的浅海海域,幅度可达几十米,其空间连续分布的特征会引起整个声传播路径上声速(温度)剖面水平非均匀变化。非线性内波的情况比较特殊,但对水下声场影响最为严重,其特征波长从几百米至上百公里^[2],波群的先导波包往往具有最大的振幅,能够引起水体流速的剧烈变化和水体大幅度的波动,会对海洋工程、石油钻井平台以及潜艇活动造成严重的威胁^[3, 4]。图1给出了100 m海深所观测到的一组非线性内波,其波动幅度达40 m。

内波特别是非线性内波会引起水质点的快速运动,导致在海表面出现会聚流和发散流区域^[6, 7]。会聚流和发散流区域具有不同的光散射特性,从

而使海面显现出明暗相间的条纹。随着卫星遥感技术的发展,使得研究人员通过卫星遥感来观测内波的活动成为可能。图2给出了我国南海北部和苏禄海(Sulu Sea)出现的非线性内波的卫星遥感图像,可以看到内波传播具有明显的方向性,其波阵面也具有一定的曲率。

非线性内波虽然特殊,但发生的区域和出现的时间大体上是相对确定性的,因此研究它有非常实际的意义。图3给出了全球已有记录的非线性内波活跃海域^[8],主要集中在大陆架边缘、海峡及岛链附近,我国东南沿海也是非线性内波的活跃海域。

2 内波对声场影响的研究进展

内波活动使海水的声速分布产生剧烈变化,对水下声场影响巨大。近30年来,海洋内波对声场的影响研究得到了国内外研究者的广泛重视,取得了许多研究成果。内波与声场相互作用研究大致可分为两个方面:一个是当声传播路径与内波波阵面近似垂直时,主要分析和研究内波对声场影响的二维效应,研究手段多基于声场简正波耦合效应的分析^[9, 10];另一种情况是当声传播路径与内波波阵面近似平行或者夹角很小时,主要分析和研究内波引起声场显著的三维效应,如声线的水平声折射、聚焦和发散效应等^[11-13]。目前,内波引起声场起伏的二维效应研究取得了很多成果,但内波引起声场三维效应的研究才刚刚起步,许多成果大多是建立在数值分析基础上,缺乏海上实测数据的支持。

特别要提到的是,美国相关研究机构专门组织了两次具有里程碑意义的大型实验(1995年的SWARM95实验和2006年的SW06实验)来研究内波活动对声场的影响^[14, 15],其中SWARM95实验的目的是分析研究内波引起二维声场起伏的机理和规律,SW06实验则更加偏重于获取内波引起声场三维效应的数据。这两次实验动用了美国水声学方面的多家研究机构和大量先进实验设备。实验地点均位于美国新泽西州的外海,该海域位

于大陆架边缘，内波活动频繁，两次实验分别进行了1个多月的时间，并通过卫星遥感获得实验期间整个海区的内波活动情况，图4给出了实验的具体位置。以这两次实验为基础，发表了多篇有重要影响的论文。

2.1 内波对声场的二维影响

当声传播路径与内波波阵面近似垂直时，会导致声传播路径上出现强烈的声速梯度变化，引起声场传播损失异常，声场简正波耦合(传播路径、发射以及接收位置的局地简正波变化)，接收信号能量起伏，到达时延起伏，声场的退相关性等现象。

Zhou 等人^[16, 17]发现非线性内波能引起某些频率的声传播出现异常衰减，通过假设内波波数与声场某些简正波的干涉结构相吻合时会引起“共鸣散射”，解释了某些频率声传播的异常衰减，并给出了发生共鸣散射的条件：

$$k_{iw} \approx k_n - k_m, \quad (1)$$

其中 k_{iw} 为内波的水平波数， k_n 和 k_m 分别代表声场任意两号简正波的水平波数。当内波的水平波数与声场两号简正波的水平波数差接近时，内波就会引起声场这两号简正波能量的相互耦合，从而导致声场能量在传播过程中的剧烈变化。图5给出了声传播通过内波时声场能量(单位分贝)空间分布的改变，图中横坐标为声传播的距离，纵坐标为海水深度。

海洋内波都是不断运动的，这样会引起接收端接收到的声场能量产生强烈的时变性起伏^[18, 19]，这种时变性起伏主要由声源深度(激发的简正波成分)、内波尺度、发射和接收的相对距离等因数决定。利用 SWARM95 实验的数据，Headrick 等人^[20, 21]验证了非线性内波引起声场简正波的耦合效应，并研究了内波引起接收端接收到的声场能量、各号简正波强度、信号到达时间的时变

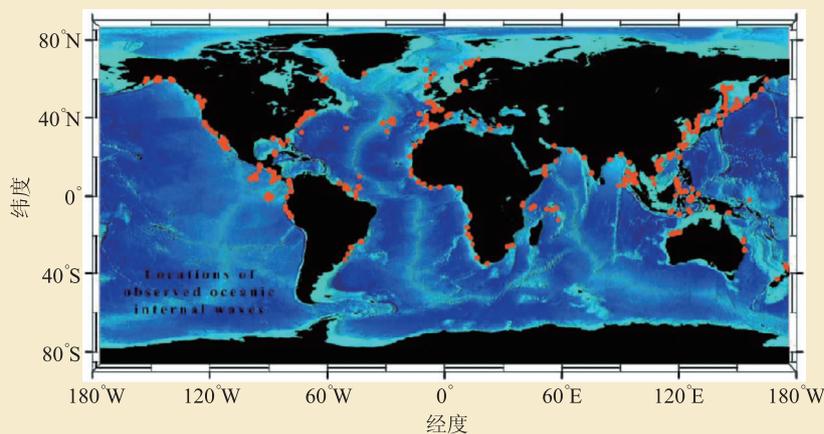


图3 全球非线性内波的活跃海域

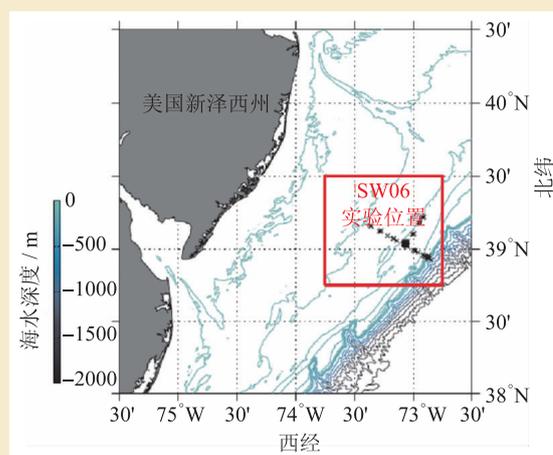


图4 SWARM95 和 SW06 实验的地点

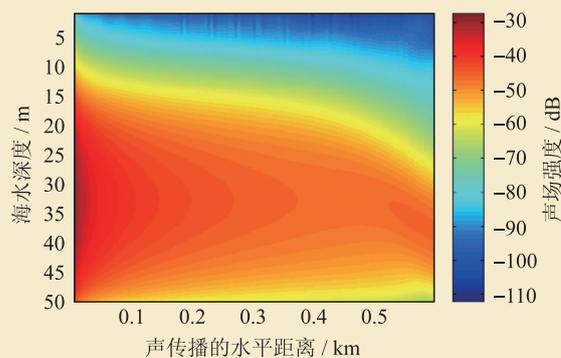


图5 内波引起声场能量的空间分布向海底扭曲的现象(图中声场强度用颜色表示，颜色越红，声场强度越大)

性起伏以及脉冲信号的展宽和时间上的退相关。SWARM95 实验中内波引起接收信号到达时间的起伏超过了 40 ms。

内波对声场时空干涉结构影响的研究目前尚

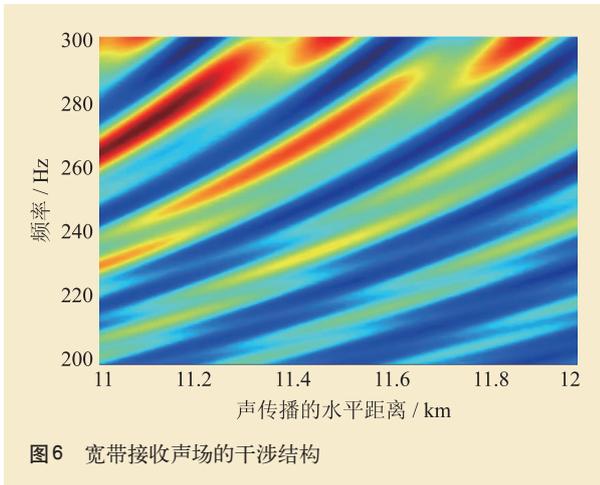


图6 宽带接收声场的干涉结构

未引起足够重视。在稳定的海洋波导中, 宽带传播声场在空间上能形成一种干涉结构(或干涉条纹), 如图6所示, 这种干涉结构的出现是由于不同频率的声波在水下传播时具有不同的群速度和相速度, 当多个频率的声波同时在水下传播时, 由于彼此的相位差而在传播路径上出现稳定的干涉结构, 即称为宽带声场水平距离—频率域上的干涉结构。宽带声场干涉结构的条纹斜率往往是稳定不变的, 因此条纹斜率也被称为波导不变量, 波导不变量已经被应用在声源定位^[22-24]、区分水面和水下目标、阵处理^[25]、时反聚焦^[26]、地声参数反演^[27]等方面。内波活动引起环境参数的变化会导致声场干涉条纹的异常变化, 使波导不变量不再保持稳定, 给波导不变量的应用带来很大的困扰。Daniel Rouseff^[28]和 V. M. Kuz'kin^[29, 30]等人研究了内波活动对声场时空干涉结构的影响后指出, 内波会引起波导不变量的取值范围发生改变, 甚至会出现多个可能值。当内波引起两簇简正波(性质相近的相邻简正波称为一簇)之间的相互耦合时, 就会使波导不变量的取值显著改变, 因此, 假定波导不变量是常数在某些情况下会出现问题。

2.2 内波对声场的三维影响

当声传播路径与内波波阵面近似平行或者夹角较小时, 内波

会引起声线水平折射的三维效应, 使在内波通道内的声场产生聚焦效应, 而通道外的声场产生发散效应^[11-13]; 水平折射效应也会引起声场强度的起伏, 并具有频率选择性^[11]。当考虑内波的波阵面为曲面而不是平面时, 斜入射的声传播也会引起强烈的三维通道效应^[12]。

图7给出了两列内波波包形成的声通道效应的示意图, 左图为俯视图, 右图为侧视图。当声源位于两列内波波包中间时, 两个波包会像“管道”一样把一部分声能量束缚在管道中传播, 形成三维通道效应。B. G. Katznelson 和 S. A. Pereselkov 利用“水平射线和垂直简正波(horizontal rays and vertical modes)”的方法从理论上分析了这种现象^[11], 实验数据^[12, 13]也证明了三维通道效应的存在。

在研究内波的三维效应时, 一般都将在内波的波阵面近似看作一条直线, 但在实际情况下, 内波的波阵面具有一定曲率, James F. Lynch 等人^[31]研究了内波弯曲波阵面对声传播的影响, 分析了内波弯曲波阵面导致声传播的水平折射效应, 并给出了发生水平折射效应时临界掠射角与声源频率、简正波号数的关系(见图8)。可以看出, 频率越高, 临界掠射角越小; 简正波号数越大, 该号简正波发生水平折射效应的临界角越大。即频率较低的高号简正波容易发生水平折射效应。

图9为内波波阵面形成的三维声通道效应照片^[31], 它给出了一个内波引起声场水平折射效应的数值算例, 图9(a)为二维平面($x-y$ 平面)上100 Hz声场的分布图(深度方向进行了积分), 从图中可

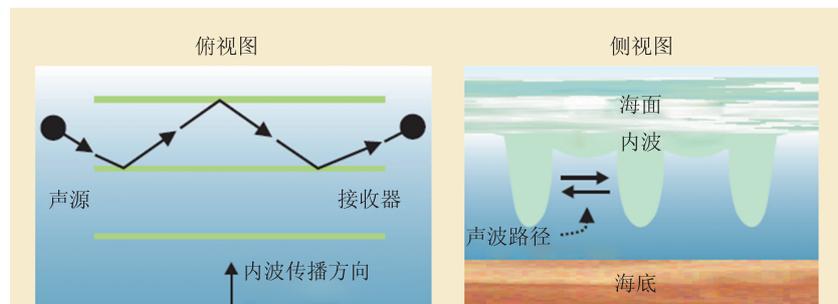


图7 内波引起声传播的三维通道效应示意图

以看到，内波的波阵面使一部分声传播发生了水平折射，其能量被两列波包形成的通道截获，并在通道内传播。图9(b), (c)分别为1号筒正波声场和2号筒正波声场，其中1号筒正波声场没有水平折射效应发生，而2号筒正波声场在某些水平角度的声传播出现了比较明显的水平折射，这说明筒正波号数越大，越容易发生水平折射。图9(d)给出了零度角的传播路径上声场在 $x-z$ 平面的分布图，从图中可以看出，由于有水平折射的发生，在12—16 km范围内(内波波包形成的声通道位置)，声场的能量得到了加强。根据前面的分析可知，这部分声能量是某些水平方向2号筒正波的能量被两列内波波包形成的声通道截获而传递过来的。

3 结束语

海洋内波对声场的影响是一个具有挑战性的研究领域。在过去几十年里，对海洋内波的认识，以及对内波与声场相互作用的研究取得了很大进展，其中包括：发展了多种内波模型，并随着观测手段的进步，能够从更高的视角去研究内波的起源地和传播；对内波导致声场筒正波耦合效应的分析，促进了内波引起声能量传播损失异常、接收信号的能量和到达时间起伏、声场的退相关以及波导不变量取值变化等现象的深入研究；从理论和实验上也证实了内波引起声场水平折射的三维效应。

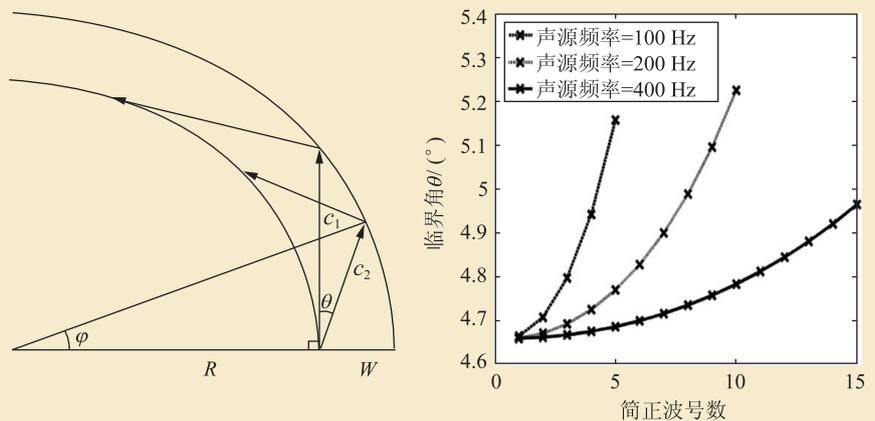


图8 水平折射的临界角与声源频率和筒正波号数的关系(左图中 c_1 和 c_2 为声场中1号和2号筒正波(筒正模态)水平折射临界角所对应的传播路径; θ 为临界角, R 为内波波阵面的曲率半径, W 为内波波包的宽度, φ 为水平折射所对应的内波波阵面的弧度)

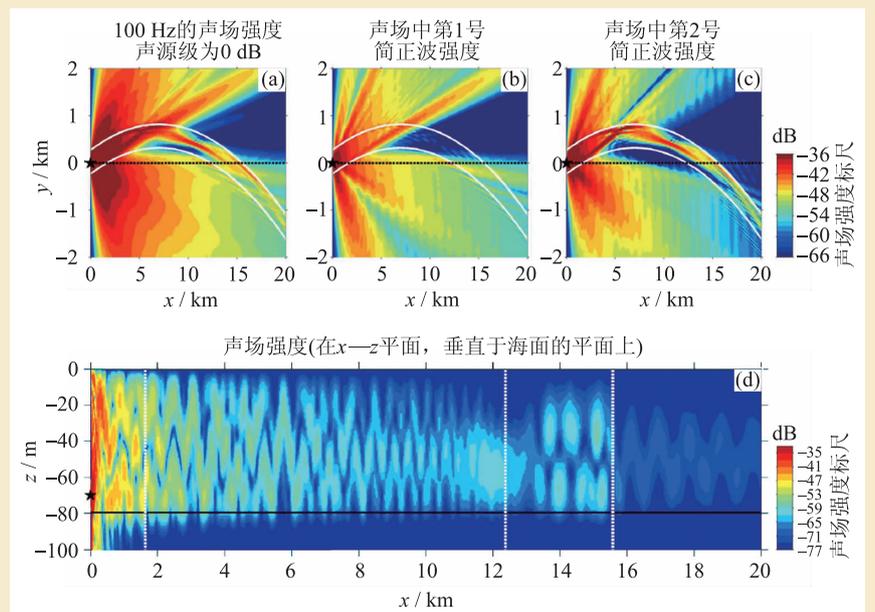


图9 内波波阵面形成的三维声通道效应照片(图中 $x-y$ 为平行于海面的平面, z 坐标为垂直于 $x-y$ 平面向下,即海深方向。从声场在 $x-y$ 平面的分布图可以看出声波传播的方向性,即各向异性。从声波在 $x-z$ 平面的分布图可以看出声波在一个垂直于水平面的切片方向上的分布情况)

但是还有很多问题需要海洋学和水声学的研究人员去解决。首先是对内波起源的认识，内波产生的原因虽然比较清楚，但对内波起源机理的数学描述至今无法准确给出，因此无法根据实际环境判断内波发生时的物理参数，虽然可以利用遥感卫星和航行器来观测内波的活动，但具体的内波参数还需要进行更深入的海洋学测量来获得，这也是制约人们对内波认识的瓶颈之一。

在研究内波对声场的影响方面, 简正波耦合效应是分析内波引起声场各种二维效应的关键, 但是, 对耦合矩阵系数与内波特征的关联以及内波引起不同简正波耦合的条件和规律(如高号向低号耦合还是低号向高号耦合、内波引起哪两号简正波的耦合等), 都还缺乏深入认识。而这些问题

都是进一步分析和总结内波物理特征对声场各种影响规律的关键, 从而也影响了对逆问题(内波的声学反演)的深入研究。内波对声场的三维效应研究起步较晚, 许多研究工作多基于数值仿真分析, 缺乏实验数据支持, 因此许多结论都需要海上实验验证, 并通过海上实验发现更多的现象和规律。

参考文献

- [1] 徐肇廷. 海洋内波动力学. 北京: 科学出版社, 1999
- [2] 蔡树群, 甘子钧. 地球科学进展, 2000, (2): 251
- [3] Osborne A R, Burch T L. Science, 1980, 208: 451
- [4] Ebbesmeyer C C, Coomes C A, Hamilton R C *et al.* New Observation on Internal Wave(solitons) in the South China Sea Using an Acoustic Doppler Current Profiler. In: Marine Technology Society 91 Proceedings. New Orleans, U.S., 1991. 165—175
- [5] Xu Z H, Yin B S. Highly Nonlinear Internal Solitary Waves and Their Actions on Acylindrical Pile in the Northwestern South China Sea. In: Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), 2011 International Conference, Nanjing, 2011, June, 3191—3194
- [6] Alpers W. Nature, 1985, 314: 245
- [7] Apel J R, Holbrook J R. J. Phys. Oceanogr., 1985, 15(12): 1625
- [8] John R A, Lev A O, Yury A S. J. Acoust. Soc. Am., 2007, 121(2): 695
- [9] Duda T F. IEEE J. Oceanic Eng., 2004, 29: 118
- [10] Duda T F. J. Acoust. Soc. Am., 2006, 119: 3717
- [11] Katsnelson B G, Pereselkov S A. Acoustical Physics, 2000, 46: 684
- [12] Badiy M, Katsnelson B G, Lynch J F. J. Acoust. Soc. Am., 2005, 117: 613
- [13] Frank S D, Badiy M, Lynch J F. J. Acoust. Soc. Am., 2005, 118: 723
- [14] Apel J R, Badiy M, Chiu C S *et al.* IEEE J. Ocean. Eng., 1997, 22(3): 465
- [15] Newhall A E, Duda T F, Irish J D *et al.* Acoustic and Oceanographic Observations and Configuration Information for the WHOI Moorings for the SW06 Experiment. 2007, WHOI2007-4
- [16] Zhou J, Zhang X, Rogers P H. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 90: 2042
- [17] Chin-Bing S A *et al.* Effects on Acoustics Caused by Ocean Solitons, Part B: Acoustics, Nonlinear Analysis. 2009, doi: 10.1016/j.jna. 2009. 04. 069
- [18] Preisig J C, Duda T F. IEEE J. Ocean. Eng., 1997, 22: 256
- [19] Rubenstein D. IEEE J. Ocean. Eng., 2000, 24: 346
- [20] Headrick R H, Lynch J F, Kemp J N *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 2000, 107: 201
- [21] Headrick R H, Lynch J F, Kemp J N *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 2000, 107: 221
- [22] 李启虎等. 声学学报, 2011, 36(3): 253
- [23] 余赞, 惠俊英, 殷敬伟等. 声学学报, 2011, 36(3): 258
- [24] Thode A M. J. Acoust. Soc. Am., 2000, 108: 1582
- [25] Tao H, Krolik J L. J. Acoust. Soc. Am., 2008, 123(3): 1338
- [26] Kim S, Kuperman W A, Hodgkiss W S *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 2003, 114: 145
- [27] Gervaise C, Kinda B G, Bonnel J *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 2012, 131 (3): 1999
- [28] Rouseff D. Waves Random Media, 2001, 11: 377
- [29] Kuz'kin V M, Pereselkov S A. Acoustical Physics, 2007, 53 (1): 103
- [30] Kuz'kin V M, Lavrova O Y *et al.* Acoustical Physics, 2006, 52 (1): 74
- [31] Lynch J F, Lin Y T, Duda T F *et al.* IEEE J. Ocean. Eng., 2010, 35(1): 251

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

均有稿酬及全年《物理》杂志相送。

请将封面素材以附件形式发至: physics@iphy.ac.cn; 联系电话: 010-82649470; 82649029

期待您的参与!

为充分体现物理科学的独特之美, 本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。封面素材要求图片清晰, 色泽饱满, 具有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。被选用的封面素材提供者,

《物理》编辑部