

· 研究报告 ·

温跃层及其变化对被动声纳检测概率影响的研究*

高 飞^{1,2} 潘长明^{2†} 张 韬¹ 孙 磊² 王本洪²

(1 解放军理工大学 气象海洋学院 南京 211101)

(2 海军海洋测绘研究所 天津 300061)

摘要 根据被动声纳工作原理,构建被动声纳探测水下目标物概率数学模型。利用声学调查实测数据,综合考虑传播损失、环境噪声、和水文环境分布及季节变化,研究温跃层垂直分布及季节变化对声纳检测概率的影响。结果表明:温跃层对被动声纳影响巨大,逆温跃层环境中,声纳检测概率从海表向下逐渐减小;正温跃层对声纳总的影响与逆温跃层相反,在正温跃层上界,检测概率从表层向下先减小后增大;逆温跃层对被动声纳检测概率的影响随目标物与声纳距离的增大而增大,正温跃层影响相反。

关键词 被动声纳,温跃层,声纳检测概率

中图分类号: P733.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2014)02-0138-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2014.02.007

The effects of thermocline and its variability on the detection probability of passive sonar

GAO Fei^{1,2} PAN Changming² ZHANG Ren¹ SUN Lei² WANG Benhong²

(1 College of Meteorology and oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

(2 Naval Institute of Hydrographic Surveying and Charting, Tianjin 300061, China)

Abstract Based on the principle of passive sonar, the mathematical models of passive sonar detection probability was built up. Using acoustic experiment data, taking all-around factors (transmission loss, environment noise, and oceanography conditions and its seasonal variability) into consideration, the effects of the thermocline vertical distribution and seasonal variability to sonar detection probability was studied. The results show that the thermocline affects the Sonar function greatly. Under the conditions of negative thermocline, the detection probability decreases from the sea surface downwards; the whole variability tendency in positive thermocline is opposite to the former, and in the layer above the positive thermocline, the detection probability decreases first and the increases downwards; the effects of negative thermocline to the passive sonar increase with increasing distance between detecting object and the sonar, but the effects of positive thermocline is opposite to the former.

Key words Passive sonar, Thermocline, Detection probability of sonar

2013-07-09 收稿;2013-10-22 定稿

* 国家自然科学基金资助项目(41276088)、国家海洋公益性行业科研项目(2012050007-7)

作者简介:高飞(1988-),男,湖南人,硕士研究生,研究方向:海洋环境和水声学。

潘长明(1962-),男,高级工程师。张韧(1963-),男,教授,博士生导师。

孙磊(1982-),男,工程师。王本洪(1983-),男,工程师。

†通讯作者:潘长明,E-mail:gfei88_lgdx@163.com

1 引言

被动声纳的工作原理是利用接收换能器基阵接收目标自身发出的噪声或信号来探测目标^[1]。温跃层为水温垂直变化较快的水层,可分为两类:一类是主温跃层,也称永久温跃层,该温跃层常年位于较深的大洋中,且随季节变化较小;一类是季节性温跃层,该温跃层一般位于临近大陆的边缘海,从春季产生加强,到夏季达到最强,秋季又开始减弱,冬季消失^[2]。温跃层影响水声传播环境,对声纳探测水下目标概率影响重大。研究温跃层对被动声纳检测概率的影响,为水下航行器如何利用温跃层来躲避声纳探测,及如何布放水下声纳探测阵具有重要意义。

温跃层对水声传播具有重要影响^[3-6](Martine等,2007年;Song等,2008年;张旭等,2012年;Moestam等,2005年。),国内外相关学者进行了不少研究。关于温跃层对声纳探测水下目标物主要以模拟仿真研究为主^[7-9](于松标,1995年;高学强等,2007年,2008年。)。本文利用声学调查实测数据资料,将水听器阵比作被动声纳,拖曳声源即为水下目标物。通过被动声纳方程建立检测目标的声学模型,先分析对应的温跃层、传播损失、噪声场分布,然后研究温跃层及其变化对被动声纳检测概率的影响,对比逆温跃层和正温跃层分布及变化对声纳检测概率的影响,并分析其原因。

2 被动声纳探测目标概率模型

2.1 噪声条件下的声纳方程

声纳方程是平衡水声环境、水声目标参数、水声场和声纳设备本身性能参数的公式,是一种按照平均能量关系建立的一种表征声纳性能模型。被动声纳在噪声限制条件下的方程为

$$SL - TL = NL - DI + DT, \quad (1)$$

式中:SL为被动声纳声源级;TL为传播损失;NL为噪声级;DI为接收指向性指数;DT为接收机的检测阈。其中被动声纳声源无指向性发射可表示为: $SL = 170.8 + 10\lg P_a$;被动声纳声源指向性发射可表示为: $SL = 170.8 + 10\lg P_a + DI_r$ 。其中 P_a 为发射功率(W), DI_r 为发射指向性指数,下文使用的实测数

据源于近似无指向性声源。

传播损失通常有两部分组成,空间几何扩展损失,衰减损失^[10]。它是指从距声源1 m处到目标点或接收处的声能取比值的对数的10倍。

目标强度是指距目标1 m处的回声强度与入射强度取对数的10倍,必要时,可对目标强度进行实际测量。由于军事国防建设的需要,潜艇的目标强度备受关注。噪声级分为环境噪声级,自噪声级,在下文研究中主要考虑环境噪声。

对于各向同性噪声和平面波信号的特定情况,阵增益即为指向性指数。检测阈是在预定设置信号级下使用声纳信号处理机刚好能判断目标“有”或“无”时在输入端所需的信噪比。

2.2 水下目标物探测概率计算

对于被动声纳,将(1)式进行转化,并根据接收机的检测阈可得表达式:

$$DT = 10\lg(S/N)_{in} = SL - TL - NL + DI, \quad (2)$$

其中: S/N 为检测到的信噪比,同时我们假设接收机为能量检测,同时采用平方检波。则高斯噪声背景下接收机最佳性能为^[11]

$$(S/N)_{out} = B \cdot T \cdot (S/N)_{in}, \quad (3)$$

式中: T 为积分器的积分时间(s); B 为带宽(Hz)。高斯噪声条件下,小信噪比的接收机检测特征为

$$P_d = 1 - G(G^{-1}(1 - P_f) - (S/N)_{out}^{1/2}). \quad (4)$$

将输出信噪比联立声纳方程,整理可得

$$P_d = 1 - G \left(G^{-1}(1 - P_f) - \left(B \cdot T \cdot 10^{\frac{SL - NL - TL + DI}{10}} \right)^{1/2} \right), \quad (5)$$

其中: P_d 为在虚警概率 P_f 条件下的检测概率,也就是要计算的被动声纳探测目标概率, G 为标准正态函数。本文计算得到的是一个垂向检测概率场分布,在数据标准化过程中,应对整个航线断面各层次求取均值和方差。

3 声学调查与结果分析

3.1 调查方式与数据获取

航次声学调查在中国近海某同一海域进行,时间分别为2008-04(春季)、2009-09(夏季)。采用定

点调查和走航调查相结合的方式进行。两次调查使用的仪器、调查航线、作业方式完全相同，同时航速、海面气象、海浪情况相当。这就排除其他相关因子的影响，使得海洋水文环境（温跃层）成为了影响声传播损失和噪声的最主要因素，即不同季节的温跃层是影响传播损失季节性差异的最主要因素。不同季节温跃层下声传播损失和噪声不同，导致计算得到的被动声纳探测水下目标物的概率不同，从而得出温跃层及其季节变化对被动声纳探测水下目标物的概率影响。

调查作业方式如图 1 所示，海面浮标下挂八个各深度层水听器，并以铅鱼稳定其位置。同时利用拖曳声源，发射不同频率声波。配合声源和水听器获取该航线各深度层传播损失和噪声数据。春、夏季航行试验声源级都为 200 dB，信号长度为 500 ms。为全面测得调查航线上各种与声传播相关信息，同时利用 CTD 获取测量航线端点处的温、盐剖面，走航调查过程中使用投弃式温深计（XBT）对调查航线中温度剖面进行密集测量，多波束测水深和海底底质，ADCP 测海流，并实时记录海面风浪情况。研究航线上具体海面风浪、海底底质和水深信息如图 2 所示。

传播损失和噪声数据受声学测量设备和信号转化的影响会产生一定误差。例如，声源和水听器在实验室标定过程中，由声强转化成电信号时出现灵敏度标定误差；接收通道的增益误差；以及由模拟信号到数字信号的转化误差。

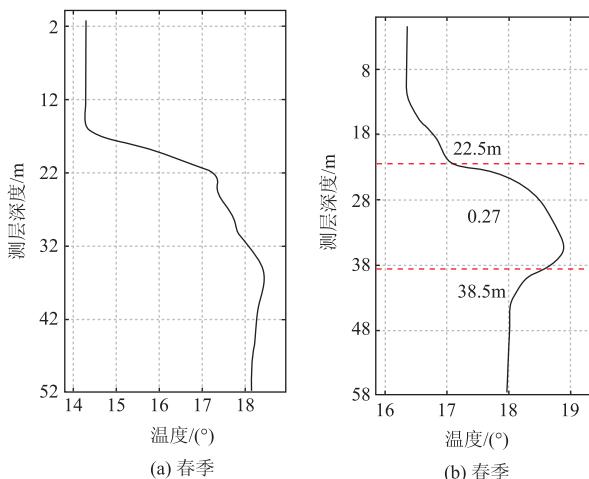


图 3 春、夏季节声学调查航线上的典型温度剖面

Fig. 3 Representative temperature profiles along acoustic investigation paths in spring and summer

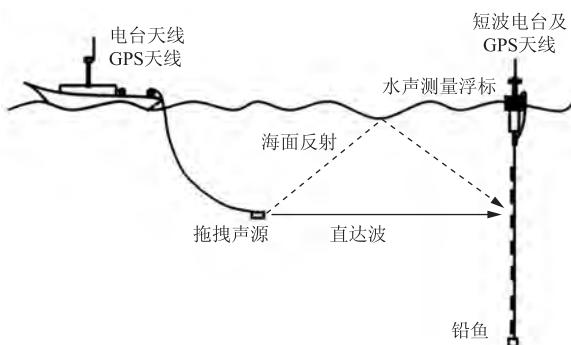


图 1 声学调查示意图

Fig. 1 Sketch of acoustic investigation

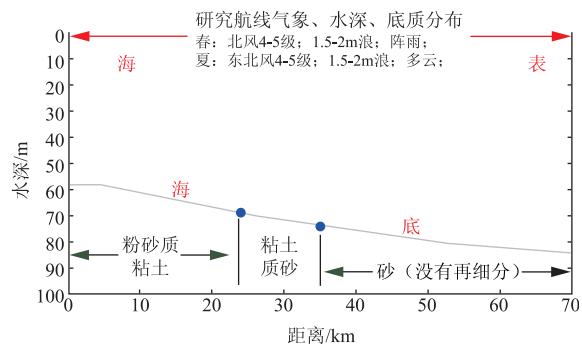


图 2 研究航线声学参数分布

Fig. 2 The distribution of acoustic parameters along analysis pathes

3.2 温跃层分析

取对应图 2 的走航测面上的典型温度剖面进行分析如图 3（下文中分析的传播损失、噪声都与

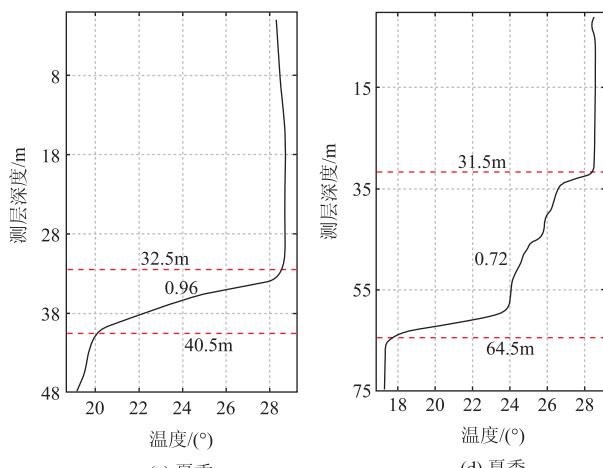


图2所示的航线相对应)。其中(a)、(b)为春季航向的典型剖面,春季(4月)该调查海区存在明显的逆温层现象,表层水混合较为均匀,通常逆跃层上界深度一般在17 m~18 m左右,下界可达35 m~37 m左右。逆温跃层在近岸一侧较强,最大强度可达-0.6 °C/m,从逆跃层向下靠近底层,为温度变化较小的均匀层。(c)、(d)为春季航向的典型剖面,夏季(8月)从海表向下有一定厚度的水层在风浪混合作用下成均匀层。正跃层一般开始于31.5 m左右,跃层厚度随水深变化较大,其中在水深较小时跃层厚度一般不超过10 m,垂直梯度可达0.96 °C/m;而水深较大时跃层厚度30 m左右,相

对跃层梯度有所减小,约为0.72 °C/m。

3.3 传播损失场分析

春季传播损失场(图4(a))对应逆温跃层海洋环境(图3(a)、(b)),其中上层三个水听器(5.7 m, 10.3 m, 14.5 m)随距离增加传播损失明显较下层三个水听器(20.5 m, 28.7 m, 43.5 m)小。损失最大水听器深度为28.7 m,位于逆温跃层以内。夏季传播损失场(图4(b))对应正温跃层海洋环境(图3(c),(d)),水听器位于正温跃层以上相对均匀水层之内,各层次随传播距离增加变化趋势相当。水听器位于10.2 m深度处接收到传播损失最大,22.5 m传播损失最小。

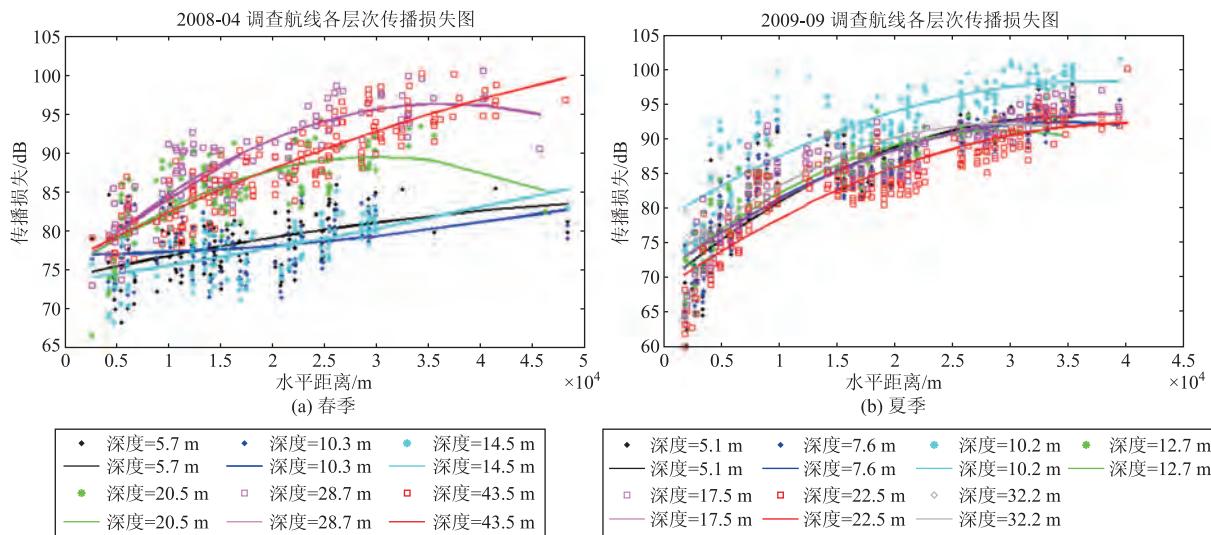


图4 春、夏季不同层次传播损失对比图(点为实测数据,线为拟合曲线)

Fig. 4 The comparison of TL among different layers in spring and summer, where dots are data detected and curves are fitted curves.

上文已排除其他因子的对传播损失的影响,指出温跃层是影响传播损失的最主要因素。通过对比春、夏两个季节的不同传播损失场不难发现,由于温跃层的存在,导致水听器工作效果产生巨大差异。Martine等^[3]指出夏季表层水听器相对于底层工作效果较差,并探讨了这是由于温跃层和声源、水听器几何位置的影响,这与本文分析夏季温跃层海洋环境中各层次传播损失分布特征对应较好。

3.4 噪声场分析

海洋环境信号是一种随机信号,在较短时间内(一般是数分钟内)它是平稳过程。海洋环境噪声的测量需要进行长时间的监测,辅助以海洋环境参数和气象参数的测量和记录,本文主要研究温跃

层对水下目标探测的影响,故不展示海面气象分布。本文使用功率谱估计方法来分析海洋环境噪声级别。

首先,按采样频率 f_s ,将需要的海洋环境噪声数据截取分成 L 个长度为 M 的数据分段 $u_l, l = 1, 2, \dots, L$ 。并对每一分段数据 u_l 进行处理,并对 L 个数据分段求和平均。

$$SL_k \equiv SL(f_k) = 10 \lg \left[\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |P_{u_l}|^2 \right] - M_v - m, \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (6)$$

其中: M_v 为水听器灵敏度。利用(1)式计算1/3倍频程内带声级 $SL_{1/3}(f_0)$ 以及测量频段内的总声级 SL :

$$SL_{1/3}(f_0) = 10 \lg \left[df \sum_k 10^{0.1SL(f_k)} \right], \quad (7)$$

$$SL = 10 \lg \left[df \sum_{k=1}^K 10^{0.1 SL(f_k)} \right]. \quad (8)$$

总体来讲,2008-04 与 2009-09 噪声相差甚小,同时由于深度差异较小,上下层噪声大小无明显规律(如图 5)。两个航次的噪声强度都维持在 90 dB ~ 98 dB 范围内,调查航线上存在微弱的波

动。由于声学调查过程中只对表层以及近表层噪声数据进行测量,只有 10 m 以内两个层次上数据,这在计算收索水下目标物概率中难以与传播损失数据对应。然而,本文旨在讨论温跃层对搜索水下目标物概率;同时,研究区域维持在 40 m 以上水层,噪声变化较小。故统一使用 2008 年 4 月 10.3 m 噪声数据计算搜索水下目标物概率。

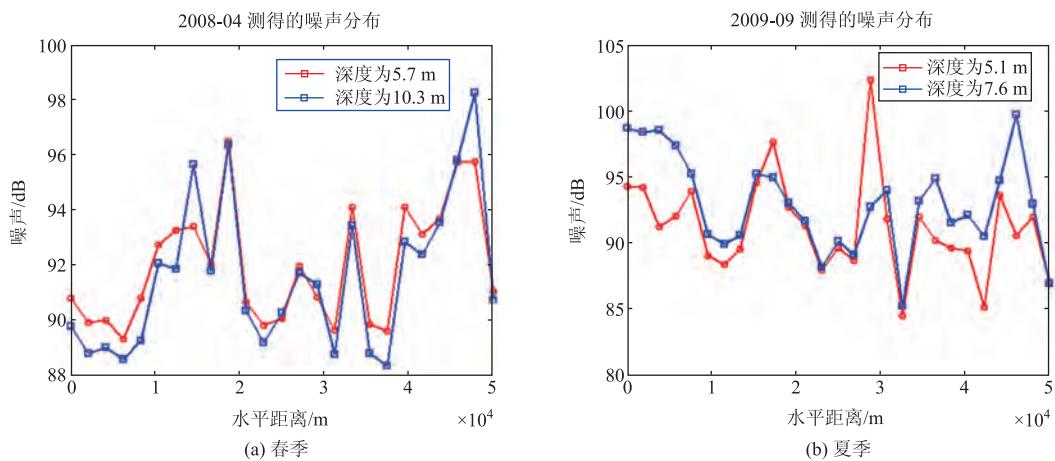


图 5 春、夏季不同层次噪声对比图

Fig. 5 The comparison of noise of different layers in spring and summer

4 搜索概率分析

本文使用的实测数据并非来源于声纳试验,但相关声学试验操作流程和数据后处理方法与声纳数据相当,具有一定的科学性。传播损失和噪声数据来源于频率为 580 Hz,深度约为 35 m 的拖曳声源。根据被动声纳工作原理,将拖曳声源当成水下目标物,水听器阵看成被动声纳阵。水听器接收来自拖曳声源的声信号,这一过程相当于被动声纳水下探测时接收的声信号。同时,受到实测噪声数据场在深度层次较传播损失数据场不足的限制,依据调查海域水深较浅,且空间变化较小,及春、夏噪声大小相当的原理,将各层次噪声数据统一等于最浅的水听器获取的数据,使得本文计算被动声纳检测概率存在一定的误差。

根据(3)式,并设定参数如下:拖曳声源频率 $f = 580$ Hz,声源级 $SL = 200$ dB。水听器带宽为 $B = 19880$ Hz,积分时间 $T = 500$ ms,接收指向性指数 $DI = 0$,虚警概率 $P_f = 10^{-4}$ 。以各航线所有的传播损失数据进行计算,得到搜索水下目标物的概率

如图 6 所示。

首先,从图 6 不难发现计算得到的检测概率场与上文分析中的传播损失场(图 4)存在明显的反相位关系。计算过程中将检测阈 ≤ 0 的数据点进行剔除。并利用二次多项式拟合各层次被动声纳检测概率随距离的变化趋势。由于随距离增加,水文环境发生变化;同时,水听器接收到的信号点减小,偶然性加大。导致部分拟合线条末端出现不同程度的上升趋势。总的来说,随着距离增加,检测概率逐渐减小。

春季,逆温跃层存在 17 m ~ 38 m 左右,如图 6(a)被动声纳深度分布于逆温跃层的上、中、下层。随水平距离的增加,深层和浅层检测概率之间的差异相应增大,这说明逆温跃层对被动声纳检测概率的影响随目标物与声纳距离的增加而增大。同时不难发现深层次 3 声纳检测概率明显小于浅层 3 声纳,根据声线总是弯向声速较小的方向原理,春季逆跃层条件下,表层声速较小,深层声速增大,使得从表层向下传播损失逐渐增大,检测概率逐渐减小。Jensen 等^[12]指出正跃层海洋环境中,声能向海底方向汇聚。Song 等^[4]基于浅海声学调查,指出夏

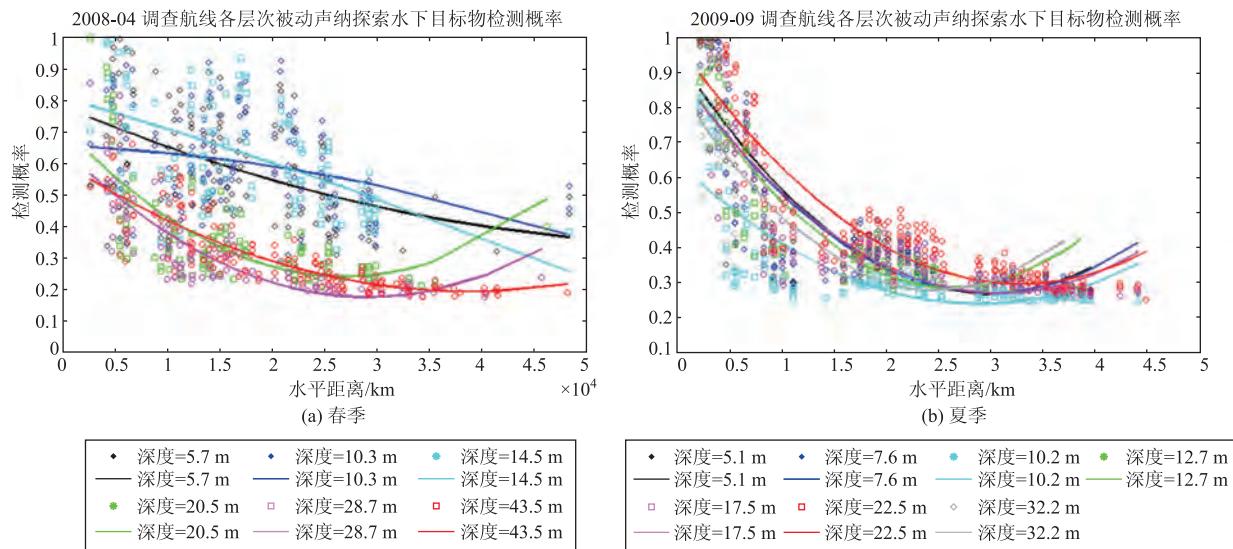


图 6 春、夏季不同层次检测概率随距离的变化对比图(点为实测数据,线为拟合曲线)

Fig. 6 The comparison of the detection probability varying with distance of different layers in spring and summer, where dots are data detected and curves are fitted curves.

季正温跃层类似于垂向某个深度处声传播的障碍层,声能趋于向正温跃层下界汇聚,温跃层下界信噪比相对较大。本文研究得出逆温跃层环境中声能向海表方向汇聚,与正温跃层声能汇聚方向相反。

受实测数据的限制,夏季受海表为一定厚度的混合层,正温跃层上界深度约在 33 m 左右,而被动声纳最大分布深度为 32.2 m(如图 6(b)),分布于正温跃层上层。因此,重点分析温跃层上界被动声纳检测变化规律。随着目标物与被动声纳距离增大,各层次检测概率差异逐渐减小。这说明正跃层对被动声纳检测概率的影响随目标物与声纳距离的增大而减小。Jensen 和 Song 指出正跃层声能向海底汇聚,可以得出检测概率在垂向总的变化趋势向下增大。然而,温跃层上界检测概率并不是单纯地向下增加的。上文分析夏季海洋环境中,位于正温跃层上界 10.2 m 处的水听器接收到的传播损失最大,22.5 m 处最小。对应于图 6(b)中,22.5 m 被动声纳检测概率最大,10.2 m 检测概率最小。对比图 6(b)各层次检测概率拟合曲线,发现在正温跃层上界被动声纳检测概率向下先减小后增大。这说明检测概率最小值出现在正跃层上界某一水层,而不是海表。同时,作者分析夏季其它调查航线,同样发现这个现象。

5 结论

本文将中国近海声学调查中使用的水听器阵比作被动声纳阵,拖曳声源看成水下发射声波的目标物,综合考虑水文环境、传播损失、环境噪声,得出春、夏季节跃层对被动声纳探测水下目标物的概率。

(1) 春季逆温跃层海洋环境中,跃层对声能的上下传播产生屏障作用,使得被动声纳在跃层以上部分的检测概率明显要大于跃层以下部分。

(2) 夏季正温跃层海洋环境中,检测概率总趋势向海底逐渐增加。在跃层以上水层,检测概率先减小后增加,最小值并非出现在海表,而是跃层以上水层某一深度。

(3) 逆温跃层环境中,各水听器检测概率差异随目标物与声纳距离的增大而增大,逆温跃层的影响距离的增大而增大;正温跃层中,各水听器检测概率差异随目标物与声纳距离的增大而减小,正温跃层的影响距离的增大而减小。

由于不同频率信号水下传播特性存在差异,本文用 580 Hz 的声信号代替被动声纳接收信号的传播损失,与被动声纳实际工作时必然存在一定的误差。

致谢 感谢东海声学调查团队提供数据支持和中科院声学研究所在传播损失和噪声数据处理方面给予的支持。

参 考 文 献

- [1] 田坦,刘国枝,孙大军. 声纳技术[M]. 哈尔滨工程大学出版社,1999.6-7.
- [2] 侍茂崇. 物理海洋学[M]. 济南:山东教育出版社,2004,49-61,73-74.
- [3] MARTIN S, MICHAEL B P, PAUL H, et al. Effects of ocean thermocline variability on noncoherent underwater acoustic communications [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, 12(4): 1895-1908.
- [4] SONG A J, BADIEY M, SONG H C, et al. Impact of ocean variability on coherent underwater acoustic communications during the Kauai experiment (KauaiEx) [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, 123, 856-865.
- [5] 张旭,张永刚. 浅海温跃层对声信道影响的仿真研究[J]. 系统仿真学报,2012,24(10):2167-2171.
ZHANG Xu, ZHANG Yonggang. Simulation for Acoustic Channel Influenced by Shallow Water Thermocline[J]. *Journal of System Simulation*, 2012,24(10):2167-2171.
- [6] MOESTAM R, DAVIDSON L. Numerical simulations of a thermocline in a pressure-driven flow between two infinite horizontal plates [J]. *Physics of fluids*,2005,17:101-109.
- [7] 于松标. 潜艇与鱼雷对抗中跃变层的利用[J]. 声学学报. 1995,20(4):289-297.
YU Songbiao. Impacts of thermocline in the confront between submarine and sonar[J]. *Atca Acustica*. 1995,20(4):289-297.
- [8] 高学强,杨日杰,周旭,等. 跃变层对主动声纳搜潜概率影响仿真研究[J]. 测试技术学报. 2008,22(1):55-58.
GAO Xueqiang, YANG Rijie, ZHOU Xu, et al. Simulation research on the effects of thermocline on active sonar search submarine[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*. 2008,22(1):55-58.
- [9] 高学强,杨日杰,杨春英. 潜艇规避对被动声纳浮标作战效能的影响[J]. 测试技术学报. 2007,21(6):476-480.
GAO Xueqiang, Yang Rijie, YANG Chunying. Research on the Influence of Submarine Evasion on Combat Effectiveness of Passive Sonobuoy [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*. 2007,21(6):476-480.
- [10] URICK R J. Principles of Underwater Sound (Third Edition) [M]. Los Altos, California, USA: Peninsula Pub, 1983.
- [11] 高东华,章新华. 舰艇规避策略对鱼雷捕获概率影响的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(3): 348-349.
GAO Donghua, ZHANG Xinhua. Simulations of the effects of decision of vessel evasion on torpedo capture probability [J]. *Journal of system simulation*. 2001, 13 (3): 384-349.
- [12] JENSEN F B, KUPERMAN W A, PORTER M B, et al. Computational Ocean Acoustics. 2nd [M]. New York:Springer, 2001: 489-519.