

# 基于 Argo 资料的深海温跃层对水声传播的影响分析与仿真

孙 磊<sup>1,2</sup>, 高 飞<sup>2,3</sup>, 潘长明<sup>2</sup>, 张 韧<sup>3</sup>, 王本洪<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 海军海洋测绘研究所, 天津 300061;  
3. 解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101)

**摘要:** 利用 Argo 网格化数据分析日本以南小范围海区内的温跃层时空特征, 其主跃层和季节性跃层的双跃层结构明显。依此利用 UMPE(University of Miami Parabolic Equation)抛物方程模型分析与仿真深海温跃层及其季节变化对水声场的影响。分析发现: 相似系数为 1 的两个声速剖面的传播损失几乎完全相同; 夏季声源较浅时, 会在以声源为中心小直径圆形区域内形成声影区; 声源深度相对于跃层越大, 跃层对水声场的影响越小; 高频较低频受跃层影响更大。

**关键词:** UMPE 模型; 温跃层; 水声传播

中图分类号: P733.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-02-0113-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.02.004

## Analysis and simulation of acoustic propagation affected by thermocline in deep water based on Argo data

SUN Lei<sup>1,2</sup>, GAO Fei<sup>2,3</sup>, PAN Chang-ming<sup>2</sup>, ZHANG Ren<sup>3</sup>, WANG Ben-hong<sup>2</sup>

(1. College of Underwater Acoustic Engineering Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

2. Naval Institute of Hydrographic Surveying and Charting, Tianjin 300061, China;

3. College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, Jiangsu, China)

**Abstract:** Based on gridded Argo data, the distribution feature of thermocline in a small sea area to south of Japan is analyzed, and the results of which show that the double thermocline structure of permanent and seasonal thermocline are obvious. Then the UMPE acoustic model is used to analyze and simulate the impact of thermocline on acoustic transmission loss. The results show that: two sound speed profiles with the same changing trends result in the same transmission loss; when the source is put at the small depth in summer, the TL is great in the small circle area with the source as the centre; when the depth of the source is greater, the impact of thermocline on acoustic propagation is smaller; and the impact on high frequencies is greater than on low frequencies.

**Key words:** University of Miami Parabolic Equation(UMPE) model; thermocline; water acoustic propagation

## 0 引言

声场的传播环境大体包括四种介质: 大气层、水层、沉积物层和岩石层。其中水声场受水层上下边界的限制, 声波在海表与海底之间反射和传播<sup>[1]</sup>。海温结构对水声传播影响显著, 而海温在铅直方向的重要分布特征表现为温跃层。海洋温跃层是指水温垂直梯度较大的水层, 可分为主温跃层和季节性温跃层。水声学在海洋工程、海洋科学和军事海洋环境保障方面有着广泛的应用前景, 因此开展海洋

环境特别是温、盐跃层对深海声场分布和传播影响的研究具有重要的科学意义和应用价值。

声波在深海和浅海中传播时性质明显不同, 跃层的作用各异。目前已经有不少关于浅海声速跃层对声场影响的研究<sup>[2-4]</sup>。而深海研究(王彦磊等<sup>[5]</sup>, 庄益夫等<sup>[6]</sup>, Bruce et al<sup>[7]</sup>)受实测数据的限制, 多集中于模拟仿真, 且没有详细区分温度大小与温度变化趋势对声场影响的差异。

本文基于 Argo 实测数据, 分析日本以南小范围海区的温跃层时空特征。这一海区主跃层稳居大洋深处, 上界深度在 350~375 m 间, 厚度一般为 200~250 m; 季节性跃层春季开始产生并上升至海表, 夏季强度达到最大。并利用目前甚少被国内学者使用的 UMPE 模型<sup>[8]</sup>仿真冬、夏季不同跃层海洋环境, 研究温跃层对水声场传播损失的影响, 对水下探测和航行器的隐身具有重要的意义。

收稿日期: 2013-08-15; 修订日期: 2013-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41276088)

作者简介: 孙磊(1981-), 男, 山东昌邑人, 博士研究生, 研究方向为海洋环境噪声场反演。

通讯作者: 孙磊, E-mail: dugulengfeng@hrbeu.edu.cn

# 1 UMPE 水声模型

UMPE 模型<sup>[8]</sup>是由美国迈阿密大学和海军研究院联合开发的一种海洋水下抛物方程模型。抛物方程方法由 Tappert F. D.<sup>[9]</sup>引入进行水声传播衰减的研究,其声场数值模型通常叫做抛物方程模型(PE models)<sup>[9,10]</sup>。柱坐标系下的 Helmholtz 方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k_0^2 n^2(r, z, \varphi) p = -4\pi P_0 \delta(\bar{x} - \bar{x}_s) \quad (1)$$

$$p(r, z, \varphi, \omega t) = p(r, z, \varphi) e^{-i\omega t} \quad (2)$$

式中:  $p(r, z, \varphi, \omega t)$  为声压;  $r$  为距离;  $\omega$  为圆频率;  $z$  为水深;  $k_0 = \omega/c_0$  为参考波数;  $n(r, z, \varphi) = c_0/c(r, z, \varphi)$  是声学折射率参数,  $c(r, z, \varphi)$  为声速;  $z_s$  为声源所在深度,  $\bar{x}_s$  为点( $r=0, z=z_s$ )。设解的形式为:

$$p(r, z, \varphi) = P_0 \sqrt{\frac{R_0}{r}} \psi(r, z, \varphi) e^{ik_0 r} \quad (3)$$

当  $r=R_0$  时,  $|\psi|=1, |p|=P_0$ , 经过计算可得到  $\psi$  满足的偏微分方程为

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + 2ik_0 \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0^2 \left( n^2 - 1 + \frac{1}{4k_0^2 r^2} \right) \psi = 0 \quad (4)$$

基于远场近似,对上式作近似简化处理,得到抛物型方程模型:

$$\frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{i}{2k_0} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{2i}{k_0} (n^2 - 1) \psi \quad (5)$$

利用降阶、初始边界、分裂一步近傅里叶算法(PE/SSF<sup>[11]</sup>)可得:

$$\psi(r + \Delta r) = e^{-ik_0 \int_r^{r+\Delta r} H_{op}(r') dr'} \psi(r) \quad (6)$$

将式(6)代入声压表达式(3),可以计算声压场。

该模式的灵活性较大,适用性较强,对低频远距离的传播衰减模拟效果较好。采用分裂一步近算法能有效解决纯初始值问题。本文研究深海温跃层对水声传播损失的影响,采用 200Hz 的低频声源,简正波模型的低频频散效应较为显著。而几何学理论则限制了射线理论模型,更适合于高频声源,故采用 UMPE 抛物模型理论上更加适合于研究低频中远场海洋环境传播损失场。

# 2 温跃层时空分布特征

本文使用中国 Argo 实时数据中心提供的网格

化数据<sup>[12]</sup>,利用 Akima 插值法将数据处理到间隔 1 m 的距离上,并利用垂直梯度法判别温跃层,分析日本以南小区域温跃层时空特征。张旭<sup>[2]</sup>在分析菲律宾海温跃层时将深海(深度>200 m)主跃层判定标准定义为 0.02 °C/m,季节性跃层为 0.05 °C/m。本文为了体现跃层的整体性,突出对声判定传播的影响,将主跃层和季节性跃层的判定标准统一为 0.02 °C/m。取两个剖面进行分析(如图 1 所示)。

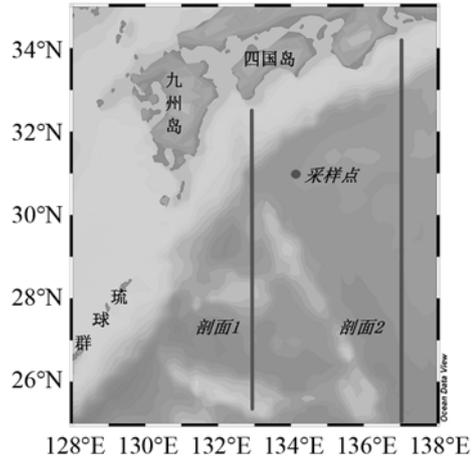


图 1 日本以南海域剖面位置  
Fig.1 Section positions in the sea area to the south of Japan

图 2 为剖面跃层分布。将温度垂直梯度小于 0.02 °C/m 视为非温跃层区域,如图 2 中空白处。其中图 2(a)、2(b)、2(c)、2(d)为剖面 1,图 2(e)、2(f)、2(g)、2(h)为剖面 2。不难发现东西两个断面的跃层分布特征类似,主跃层常年稳居深海,春季开始季节性跃层产生并上升至海表,夏季达到最强,秋季季节性跃层又复减弱。冬季(2 月)主跃层强度最大约为 0.036 °C/m,上界深度在 350~375 m 之间,厚度一般为 200~250 m,3~4 月主跃层开始抬升,厚度和强度较为稳定。夏季主跃层强度达到最大,约为 0.042 °C/m,跃层上界南部较北部深,平均厚度约为 250 m。秋季(11 月)主跃层的最大强度约为 0.0375 °C/m,南部主跃层向上抬升,逐步接近冬季跃层分布特征。

季节性跃层从春季开始产生,并上升至海表,夏季强度最大,秋季又复减弱,冬季消失。总体来说,季节性跃层相对于主跃层分布深度浅、厚度小、垂直梯度大、变化幅度大。3~4 月季节跃层开始产生,上界深度在 10~20m 之间,厚度在 30~45m。5 月跃层上升至海表,跃层厚度在 35~50m 之间,最大强度可达 0.11 °C/m。夏季跃层受太阳辐射影响进一步加强,最大强度约 0.28 °C/m,厚度南北较为一致,约为 126~151 m,最大强度出现在 20~50 m

的水层。从 8 月开始，跃层开始加深，到 9 月时上界在 30~35 m 之间，下界在 150~175 m；11 月上界在 60~80 m 之间，下界在 150~215 m 之间，最大强度减弱到 0.12 °C/m。

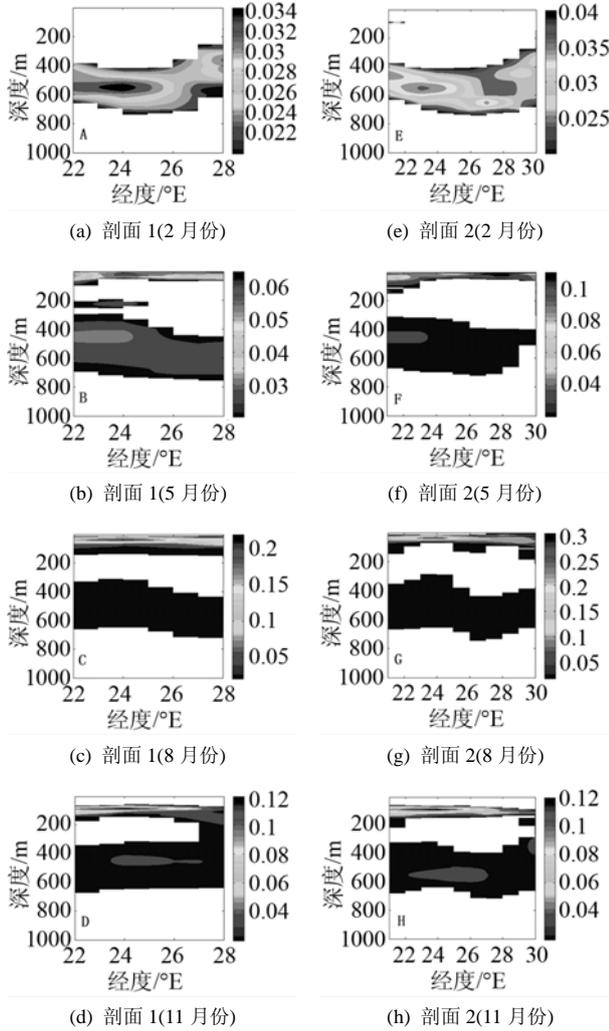


图 2 剖面 1 跃层分布(a(冬)、b(春)、c(夏)、d(秋))；剖面 2 跃层分布(e(冬)、f(春)、g(夏)、h(秋))

Fig.2 Thermoclines of Section 1 (a: winter, b: spring, c: summer, d: winter); Thermoclines of Section 2 (e: winter, f: spring, g: summer, h: winter);

值得注意的是日本以南海域 300 m 以下水层常年存在一个暖水团，该水团区域上下层混合较大，使得该区域的季节性跃层和主跃层之间存在一段明显的跃层空白，相关研究证实这是由于黑潮在该区域存在涡旋因子，造成该区域的水温垂直梯度较小的结果<sup>[12,13]</sup>。

### 3 数值试验

取 133°E、31°N 为代表点进行分析。利用 Argo 网格资料中的温度、盐度和深度资料，使用 Mackenzie 公式<sup>[14]</sup>计算出声速剖面(如图 3 所示)：

$$C=1448.96+4.591T-5.304\times 10^{-2}T^2+2.374\times 10^{-4}T^3+1.340\times(S-35)+1.630\times 10^{-2}D+1.675\times 10^{-7}D^2-1.025\times 10^{-2}T(S-35)-7.139\times 10^{-13}TD^3$$

式(7)中的 C、T、S、D 分别为声速、温度、盐度、水深。公式的适用范围为：0 °C ≤ T ≤ 30 °C，30 ≤ S ≤ 40，0 m ≤ D ≤ 8000 m。从图 3 不难发现，声速剖面与温度剖面的相关性较好，说明这一海区声速剖面大小主要由温度决定。盐度的作用相对较小，从

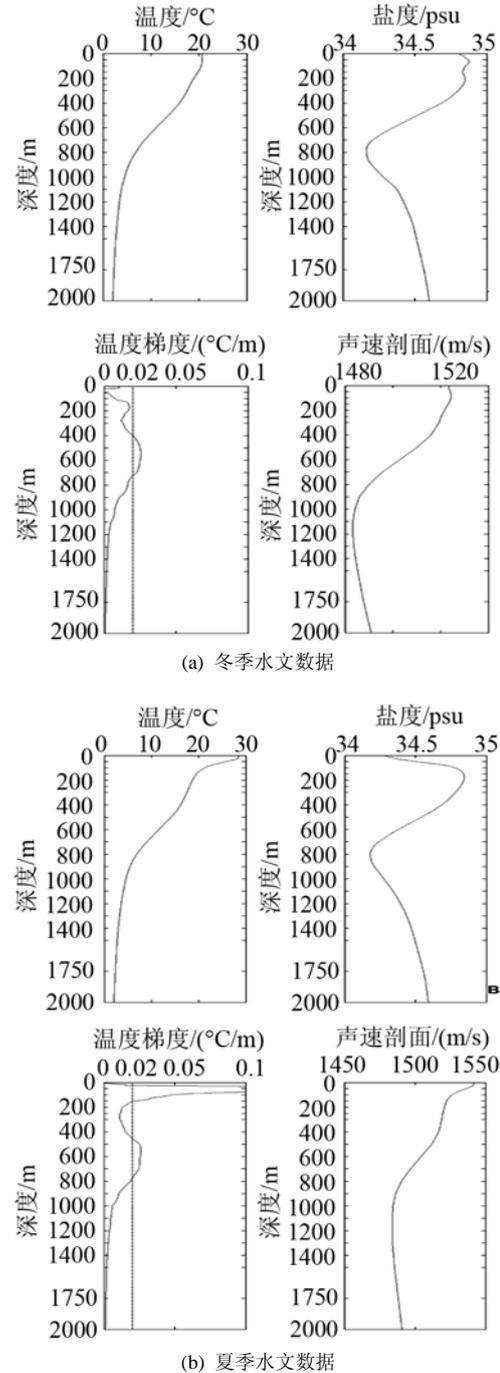


图 3 冬季(a)和夏季(b)的水文数据(4 个子图分别为温度、盐度、温跃层和声速剖面)  
Fig.3 Hydrological data in winter (a) and summer (b): Four subfigures are temperature, salinity, thermocline and ssp respectively

Mackenzie 计算公式也不难发现这一特点。

文中使用 UMPE 模式的水平计算范围为 100 km, 共 1001 个计算点; 垂直计算范围为 6 km, 共 256 个计算点。声源频率为 100 Hz, 假定海表面光滑, 粗超度等于 0, 该模式从海表向下分为三层, 依次为水层、沉积物层和岩石层, 吸收系数为 0, 相关参数见表 1, 采用全向声源。为讨论温跃层对水声场的影响, 分别从冬、夏两个季节, 同时分别将声源深度置于 5 m、250 m 和 1200 m, 在冬季时对应着近表层、主跃层和深海层, 在夏季时对应着季节性跃层、主跃层和深层。跃层从冬季到夏季增强, 分析水声场的变化, 得出跃层与水声场变化的关系。

表 1 UMPE 模型内相关声学参量  
Table 1 Related acoustic parameters in UMPE model

层次	参考密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	参考层次 $D/\text{m}$	参考声速 $C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
水层	1000	0~2000	1500
沉积物层	1500	2000~2500	1700
岩石层	3000	2500~6000	2000

分析温跃层对水声传播损失场的影响应正确区分声速大小和声速剖面的变化趋势对水声场的影响, 即当两个声速剖面变化趋势完全一致, 且对应深度的声速大小存在固定差异时, 对水声场的影响是否相同。图 4(a)为相同变化趋势的两条声速剖面。图 4(b)为剖面 1 的水声传播损失场, 图 4(c)为剖面 2 的声传播损失场。分析图 4(a)易知, 当对应水深处声速大小不同, 而声速剖面的变化趋势完全一致时, 水声传播损失场几乎完全一致。

分别对比图 5、图 6、图 7 中冬夏不同温跃层条件下声传播损失场, 不难发现温跃层对水声场存在显著影响。从各传播损失场图的左上角, 即声源的正上方可以看出, 夏季主跃层较强且存在季节性跃层条件下, 传播损失要明显大于冬季无季节性跃层且主跃层较弱情况。图 5(a)、图 6(a)中声源的右下区域形成小范围声影区, 传播损失可达 120 dB; 而这一现象在图 5(b)、图 6(b)对应区域传播损失相对较小, 分别为 70 dB、55 dB 左右, 这充分说明在深海强跃层深海声源较浅的情况下, 声源周围小直径圆形区域中存在声影区, 分析其形成原因主要是该区域较强的垂向声速梯度导致声线迅速弯向海洋深层。张旭利用 Kraken 模型模拟浅海温跃层对声信道影响中未曾发现该现象<sup>[2]</sup>, 而该现象对水面舰艇和 underwater 航行器发现近距离目标具有重要的指导意义。

水声传播损失场是声源级、声源深度、频率和

海洋环境综合作用的结果。通过控制声源深度, 调整声源和温跃层之间的相对位置, 图 5~7 中声源分别位于 5 m、250 m 和 1200 m, 对应着近表层(位于季节性跃层以上)、中间层(位于季节性跃层和主跃层中间)和深层(位于主跃层以下), 图 5 中声源位于 5 m 时浅层水层冬、夏季节传播损失差异巨大, 深度和水平传播距离增加时差别逐渐减小, 传播损失场左上角最大差异可达 50 dB; 当声源位于 250 m 时冬夏差异较小(图 6), 位于 1200 m 差异更不明显(图 7)。为了更好地研究不同声源深度时温跃层对水声传播损失场的影响, 将声场衰减数值取水平方

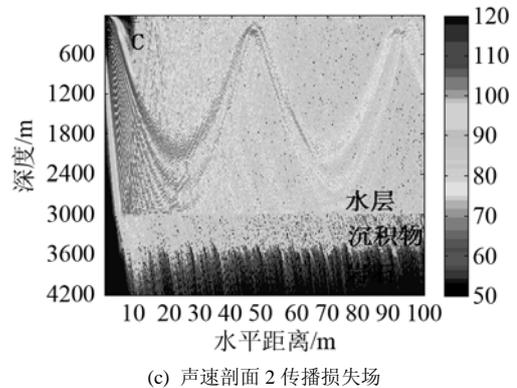
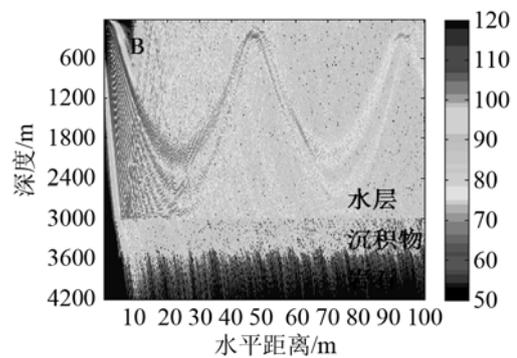
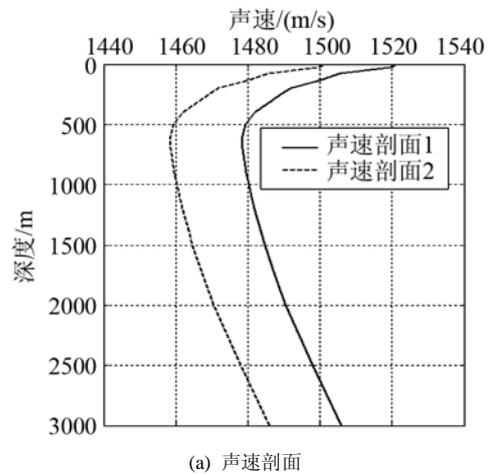


图 4 相同变化趋势声速剖面下的水声传播损失场  
Fig.4 Transmission loss fields under the sound speed profiles with the same trends

向的平均(图 8), 对比分析图 8 中三子图, 能很好地验证上述观点。这说明声源相对于温跃层深度越大, 温跃层对水声场传播损失的影响越小。

分析其原因可知, 根据声线总是弯向声速较小的方向, 当声源位于跃层之上时, 夏季声波在传播过程中, 迅速向深海弯曲, 而冬季由于声速梯度较

小, 其向深海弯曲的曲率较小; 当声源位于跃层之下时, 向上传播的声波总是逐渐减小, 只是夏季强声速梯度加强了这一过程, 因此差别不大。

当  $f=100\text{ Hz}$  时, 温跃层对声传播损失的影响在近场较为显著, 随着距离的增加, 冬、夏季节不同温跃层的影响不明显(图 9(a))。  $f=250\text{ Hz}$  时, 温跃层对声传播损失影响巨大, 夏季较冬季传播损失曲线斜率要大得多, 声能损失较大, 传播距离较短, 两者达到传播损失最大值对应的水平距离相差 55 km(图 9(b))。说明声源频率越高, 温跃层的影响作用越大。

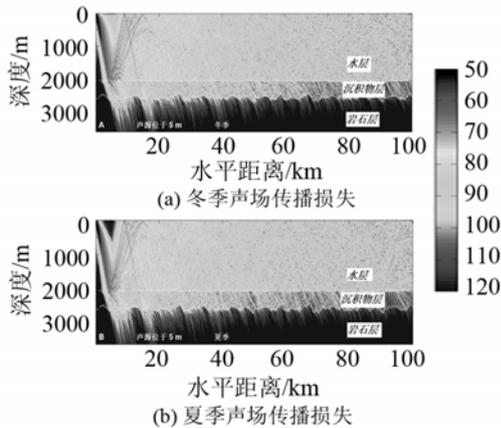


图 5 冬季(a)和夏季(b)的声场传播损失图(声源位于 5m)  
Fig.5 The transmission loss (TL) fields in winter (a) and summer (b) as the source depth is 5m

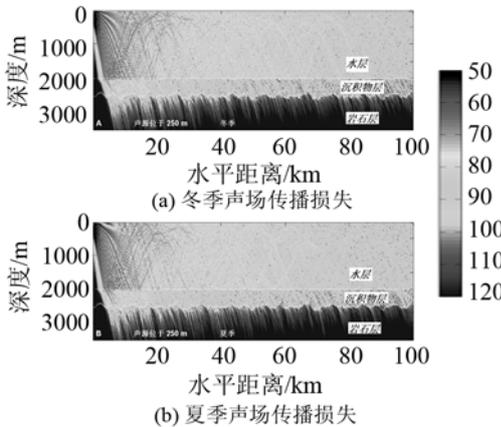


图 6 冬季(a)和夏季(b)的声场传播损失图(声源位于 250m)  
Fig.6 The transmission loss (TL) fields in winter (a) and summer (b) as the source depth is 250m

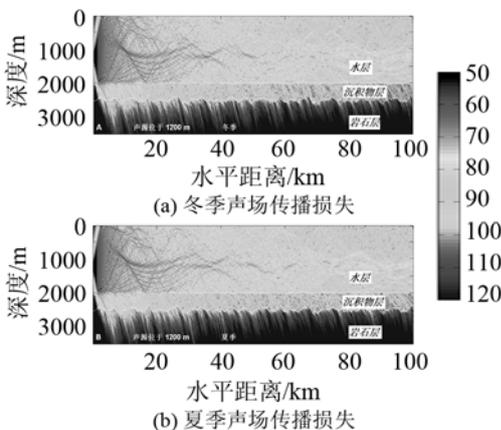


图 7 冬季(a)和夏季(b)的声场传播损失图(声源位于 1200m)  
Fig.7 The transmission loss (TL) fields in winter (a) and summer (b) as the source depth is 1200m

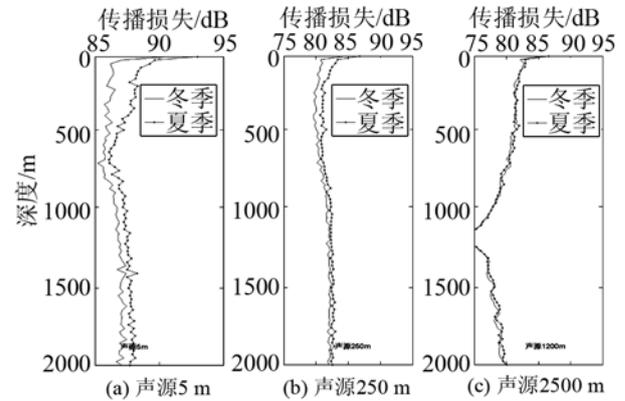


图 8 冬、夏垂直向平均声波衰减(a、b、c 声源分别位于 5、250、1200m)  
Fig.8 Average transmission loss profiles in winter and summer (The source depths of a, b and c are 5, 250 and 1200m respectively)

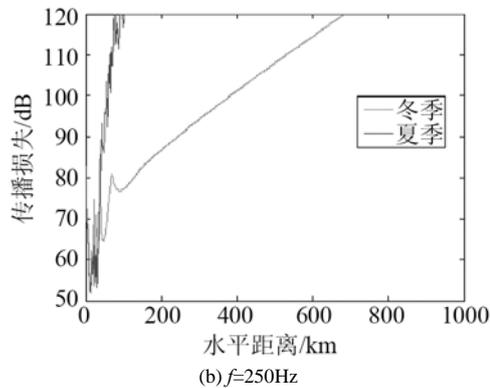
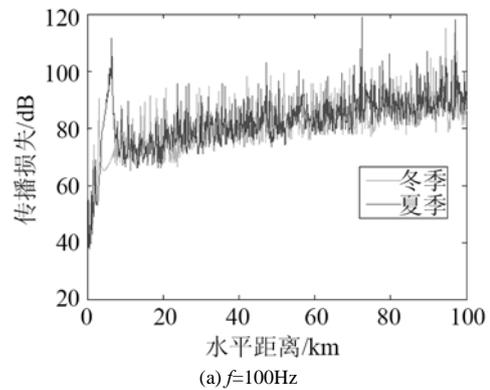


图 9 温跃层对不同频率的影响  
Fig.9 The impacts of thermocline on different frequencies

## 4 结 论

本文利用 Argo 观测资料和 UMPE 水声模型,分析了日本以南海洋环境,特别是温跃层的特征结构对声传播和衰减场的影响,进行了相关的仿真试验,得出如下结论:

(1) 日本以南海洋温跃层季节变化明显,主跃层较为稳定,深度较大;季节性跃层强度较大,春秋季节上升至海表;由于黑潮涡旋的影响,该海域的主跃层和季节性跃层之间存在一定距离的非跃层区域。

(2) 两个相似系数等于 1 的声速剖面模拟的传播损失场几乎完全相同。

(3) 温跃层对声传播损失场影响较大,特别是对近场有较大的影响。当声源深度较小时,夏季会在以声源为中心的小直径圆形区域内形成声影区,而冬季则无此现象。

(4) 声源相对于跃层深度越大,跃层对声传播损失场影响越小。高频较低频水声场受跃层的影响更大。

### 参 考 文 献

- [1] Urick R J. Principles of Underwater Sound (Third Edition)[M]. Los Altos, California, USA: Peninsula Pub, 1983.
- [2] 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.
- [3] Mackenzie K V. Long-Range Shallow-Water Transmission[J]. J. Acoust. Soc. Am. (S0001-4966), 1961, 33(11): 1505-1514.
- [4] Kibblewhite A C, Denham R A. Experiment on Sound Propagation in Shallow Water with Velocity Structure[J]. J. Acoust. Soc. Am.(S0001-4966), 1968, 44(1): 104-112.
- [5] 王彦磊, 高建华, 李杰, 等. 西北太平洋水声环境区域划分及声传播特征[J]. 海洋通报, 2013, 32(1): 85-91.  
WANG Yanlei, GAO Jianhua, LI Jie, et al. Acoustic Environment Division and Features of Transmission Propagation in Northwest Pacific[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(1): 85-91.
- [6] 庄益夫, 张旭, 刘艳, 等. 深海声速剖面结构变化对汇聚区偏移特征的影响分析[J]. 海洋通报, 2013, 32(1): 45-52.  
ZHUANG Yifu, ZHANG Xu, Liuyan, et al. Effects of sound speed structure on acoustic propagation in convergence zone in deep water[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(1): 45-52.
- [7] Bruce D C, Ganesh G, Matthew A D. Deeper acoustic Propagation in the northern Philippine Sea: Comparison of modeled and observed ray travel times.(A)[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2010, 128(3): 599-606.
- [8] Smith K B, Tappert F D. UMPE: The University of Miami Parabolic Equation Medal, Version 1.1[R]. Marine Physical Laboratory Technical, 1994.
- [9] Tappert F D. Parabolic equation method in underwater acoustics[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1974, 34(3): 1156-1162.
- [10] Tappert F D. The parabolic approximation method. in Lecture Notes in Physics, Vol.70, Wave Propagation and Underwater Acoustics[M]. edited by J. B. Keller and J. S. Papadakis, 1977, 224-287.
- [11] Hardin R H, Tappert F D. Applications of split-step Fourier method to the numerical solution of nonlinear and variable coefficient wave equations[J]. SIAM Rev, 1973, 15(1): 423-429.
- [12] Aoki S, Imawaki S. Eddy activities of the surface layer in the western North Pacific detected by satellite altimeter and radiometer[J]. J. Oceanogr, 1996, 52(2): 457-474.
- [13] QIU B. Seasonal eddy field modulation of the North Pacific subtropical countercurrent: TOPEX/Poseidon observations and theory[J]. J. Phys. Oceanogr., 1999, 29(6): 2471-2486.
- [14] David W C, Dale N C. Multibeam Data Processing of Hydrosweep DS[J]. Marine Geophysical Researches, 1996, 18(2): 631-650.