

白令海西部小区域声传播特征研究

高飞¹, 张新睿², 孙磊¹, 潘长明¹, 李胜全¹, 李佳讯¹

(1. 海军海洋测绘研究所, 天津 300061; 2. 解放军 95871 部队, 湖南衡阳 421002)

摘要: 白令海是连接太平洋、北冰洋唯一要道, 经济、军事地位极其重要。利用中国第 5 次北极科学考察 CTD(Conductivity, Temperature, Depth)数据, 在分析白令海西部小区域水文环境基础上, 结合大陆坡地形, 利用 UMPE(University of Miami Parabolic Equation)抛物方程模型模拟声传播特征, 并利用 Bellhop 射线声学模型分析其形成的物理机制。陆坡区域受流混合影响, 50~350 m 形成低温、低盐水团。声波沿陆坡向深海传播时, 声能向 500 m 以上汇聚, 次表层 50 m 左右形成声道, 深层为声影区; 声波沿陆坡向浅海传播时, 50 m 左右出现声道, 深层传播损失较大, 无声影区; “斜坡增强效应”使得声源置于浅水海域时, 50 m 声道强度大于声源置于深水海域。

关键词: 白令海; 声传播特征; UMPE 模型; Bellhop 模型; 陆坡流

中图分类号: 733.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-04-0306-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.04.003

The analysis of acoustic propagation characteristics in the small area west of Bering Sea

GAO Fei¹, ZHANG Xin-ru², SUN Lei¹, PAN Chang-ming¹, LI Sheng-quan¹, LI Jia-xun¹

(1. Naval Institute of Hydrographic Surveying and Charting, Tianjin 300061, China; 2. 95871 Troops of the PLA, Hengyang 421002, Hu'nan, China)

Abstract: The Bering Sea is the only channel connecting the Pacific Ocean and the Arctic Ocean, which is of great economy and military significance. The discussion in this paper is based on the CTD data from Chinese Fifth Arctic Research Expedition, and the characteristics of the area in the west of Bering Sea are analyzed. The acoustic transmission propagation feature is simulated by UMPE model, and Bellhop model is used to explain it. Low temperature and salt water mass exists between the layers of 50-350m over the continental slope, resulted from vertical mixture. When the acoustic wave transmits along the slope from shallow-water to deep water, acoustic energy gathers to the upper 500 meters layer, underwater track appears in about 50 meters, the deep layer is shadow zone; When the acoustic wave transmits in the opposite direction, underwater track appears in about 50 meters, the transmission loss in deep layer is big with no shadow zone existing. Comparing the conditions as the source is putted in shallow water with in deep water, acoustic channel in 50m of the former is stronger due to “slope swelling phenomenon”.

Key words: the Bering Sea; characteristics of acoustic transmission; University of Miami Parabolic Equation model; Bellhop model; slope current

0 引言

北极是全球气候变化的重要窗口, 北极海洋生物、矿产资源引起了广泛的关注, 同时也成为各个大国争夺的战略要地^[1-4]。白令海是连接太平洋和北冰洋的唯一要道, 经济、军事地位极其重要。

白令海处于太平洋最北高纬度地区, 具有其独特的温、盐、流特征, 国内外对白令海水文环境研究较多^[5-8]。白令海陆架、海盆分布层次分明, 深度

差异巨大, 加之冰盖的影响, 具有相对独特的声传播特性, 国外相关公开的声学报道多是应用于海洋渔业资源的开发^[9-11]。

然而关于白令海声传播特性的研究较少, 特别是结合海底地形和水文特征探索白令海声传播特征的研究更为欠缺。本文利用中国第五次北极科学考察 CTD 数据, 国内首次在分析白令海西区实测温、盐特征获得声速分布基础上讨论声传播特征, 部分学者对中国周边海域也开展过类似的工作^[12,13]。本文得出的相关水文、声学方面的研究结论和其形成机制, 对于该海域航运安全、海洋资源尤其是鱼类资源开发、海洋鱼类和哺乳动物洄游规律以及军事活动均有着积极意义。

收稿日期: 2014-08-25; 修订日期: 2014-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41276088)

作者简介: 高飞(1989-), 男, 硕士, 湖南衡阳人, 助理工程师, 研究方向为海洋声学。

通讯作者: 高飞, E-mail: gfei88_lgdx@163.com

1 海洋环境特征分析

1.1 资料来源与处理方法

本文将研究范围定于白令海西部陆坡区域, 其空间范围为 $59.35^{\circ}\sim 60.69^{\circ}\text{N}$ 、 $178.77^{\circ}\sim 181.14^{\circ}\text{E}$ (图1)。选取中国第五次北极科学考察 CTD 站点数据, 位于陆坡小区域内共四个站点(编号 A、B、C、D), 测量时间为7月中旬, CTD 测量深度由西南向东北方向依次为 2392、2490、1055、201 m。各站点所处位置实际水深依次为 3540、2611、1138、223 m(通过多波束获取), 分别位于白令海海盆(站点 A)、大陆坡(站点 B、C)、大陆架(站点 D)。

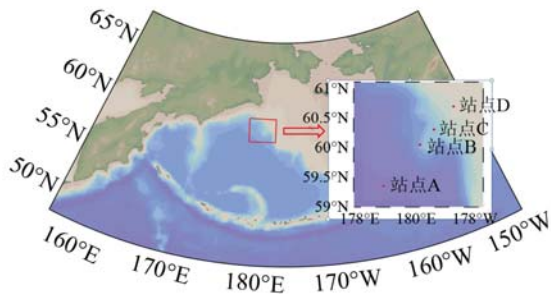


图1 研究区域与CTD站点分布

Fig.1 The area to be analyzed and the distribution of CTD stations

选取调查过程中 CTD 下放阶段的温度、盐度数据, 并利用上升过程中的数据对近海表数据进行补充。利用 Akima 插值^[14]将 CTD 数据处理到垂向间隔 1 m 的距离。

1.2 温盐特征分析

图 2(a)、2(b)分别为选取研究区域各站点的温度、盐度剖面。7月中旬, 研究海域表层温度由西南向东北有微弱的减小趋势, 部分源于昼夜太阳辐射差异(站点 A、B、C、D 的 CTD 采样时间分别为 13 点、15 点、19 点、21 点)。站点 A、B、C 处于深海, 站点 D 位于大陆架, 这里视为浅海。

该海域夏季温度分布总趋势海表温度最高, 约为 7.68°C , 向下至深度 50 m(次表层)左右温度迅速减小, 达到整个温度剖面的最小值, 为典型季节性温跃层, 平均跃层强度约为 $0.116^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (图 2(a))。对应深度层次处的盐度向下迅速增加(图 2(b))。夏季, 白令海太阳辐射增强, 表层迅速增温, 太阳辐射影响随深度增加逐渐减小, 导致强季节性温跃层产生。同时冰层融化, 对表层海水稀释作用致使盐度从 50 m 向上迅速减小。深海区域从约 420 m 温度向下缓慢减小, 符合常规中深层海水温度变化规律, 盐度变化向下缓慢增加。

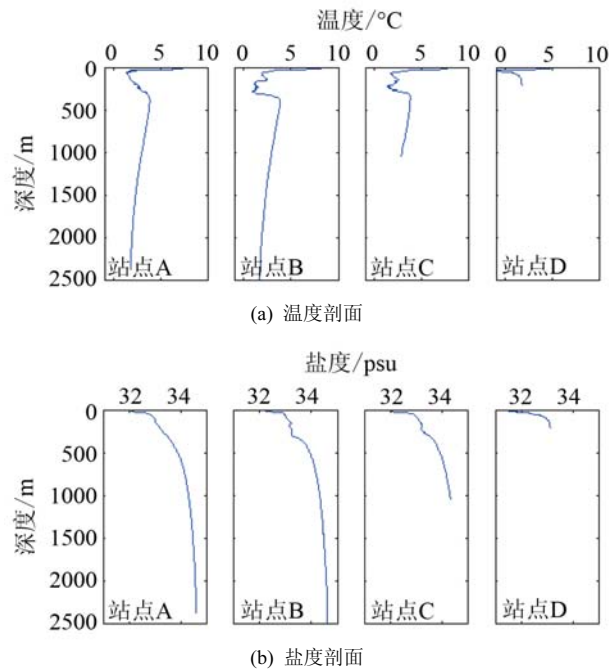


图2 温度盐度剖面图(A、B、C、D分别对应图1中站点A、B、C、D)
Fig.2 Diagrams of temperature and salt profiles(A、B、C、D corresponding to A、B、C、D in figure 1)

陆坡区域 50~420 m 温度(图 2a)、盐度(图 2b)垂向呈两段结构特征, 50~350 m 温度、盐度垂向变化小, 可近似当成混合均匀层, 对应于次表层水; 混合层下层温度(350~410 m)又复增加, 出现明显的负温跃层, 盐度也迅速增加。

该区域不同站点处 50~420 m 层次的水团及其形成机制与海底地形特征联系极为密切, 站点 A、站点 B 与 C、站点 D 处 50~420 m 深度层分别对应于海盆、陆坡、陆架中层水。海盆区域冬季表层温度降低, 密度增加, 导致表层、次表层对流混合均匀, 中层温度相对上混合层较高; 夏季表层增温, 海冰融化盐度降低, 影响深度主要分布于表层, 因此次表层温度最低, 中层水温仍相对较大(图 2(a)、2(b))。

国内外关于白令海东部、西部大陆坡 $58^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 处的陆坡流报道较多^[15,16], 图 3 引用了第五次北极科学考察报告, 在站点 C 处存在较强的东北向陆坡流, 其动力机制造成的该层次的海水混合能很好地解释站点 B、C 处的温度、盐度垂向分布特征。

大陆架海区水深不足 400 m, 站点 D 靠近陆坡区域, 深层仍受到陆坡一定的影响, 温度有所增长(图 2(a)中站点 D), 盐度变化较简单, 从表层向下层增长趋势(图 2(b)中站点 D)。

2 声传播特征数值模拟

本节结合海底地形、水文、底质等要素对该区

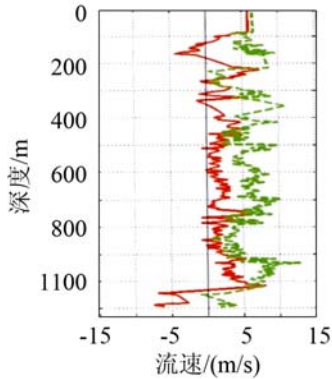


图3 站点 C 流速剖面(实线为东分量, 虚线为北分量)^[1]

Fig.3 Velocity profiles of sea current at station C (Real line shows east speed, and broken line shows north speed)

域声传播特征进行模拟仿真, 研究其声传播损失分布特征, 具有重要的科学意义和应用价值。

2.1 模拟条件与模型选取

利用研究区域内的 CTD 数据, 采用 Wilson(B 式)声速计算方法, 求取研究区域各站点声速剖面如图 4 所示。由于选取的研究区域部分站点 CTD 数据测量深度并未达到海底, 基于深海温度、盐度变化小, 声速主要随深度增加而缓慢增大, 利用外插方法, 将声速剖面补齐至海底, 以满足声学模型模拟真实的海洋环境的需要。

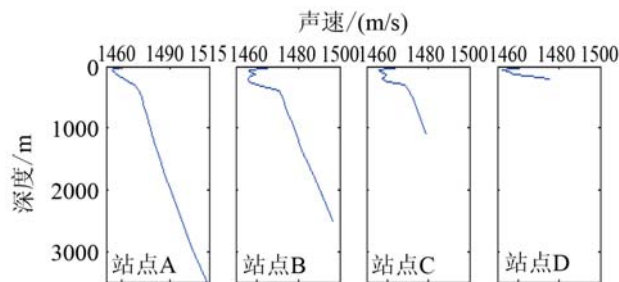


图4 研究区域各站点声速剖面

Fig.4 The sound speed profiles of different stations in the research area

深度较小时, 声速大小主要取决于温度, 与温度变化趋势类似, 盐度作用较小。深度较大时, 温度、盐度垂向变化缓慢, 声速随深度的增加而增加(图 4 中站点 A、B、C)。从图 4 中分析不难发现, 选取的断面上各站点都在 50 m 左右出现声速剖面的最小值点, 陆坡区域站点 B、C 声速剖面内出现一定厚度的近等声速层^[17]。表 1 为分析各站点浅层最大声速值和最小声速值, 及其对应的深度。

研究的断面海底底质以灰色-灰黑色粉砂质粘土为主^[1]。在数值模型中, 将声传播媒介分为三层, 海水、沉积物层(500 m)、岩石层。海底地形变化复杂, 水深变化较大。设无指向性声源频率为 150 Hz, 并将声源置于 50 m 处。模拟声线传播最大的水平

表 1 各声速剖面浅层极值大小及对应深度

Table 1 Extremum and its corresponding depth of every sound speed profile for small depth

| 站点 | 最大声速 /(m/s) | 最大声速 深度/m | 最小声速 /(m/s) | 最小声速 深度/m |
|----|----------------|--------------|----------------|--------------|
| A | 1476.9 | 0 | 1453.6 | 55 |
| B | 1479.5 | 0 | 1455.2 | 51 |
| C | 1478.8 | 0 | 1455.2 | 54 |
| D | 1463.8 | 0 | 1439.4 | 34 |

距离与站点 A、D 间水平距离相等, 约 180 km。将海表粗糙度值取为 0, 海面实现全反射。图 5 为模拟海区相关要素分布图。

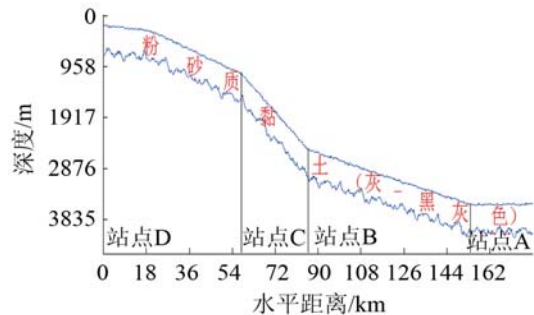


图5 模拟海区相关要素分布

Fig.5 Related parameters' distribution in the simulation area

UMPE 模型^[18]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, Tappert 等^[19]利用该模型模拟夏威夷附近海域的水声传播特征, 得出“泥流效应”; 孙磊等^[20]利用该模型研究日本以南海域温跃层对水声传播的影响, 得出不同跃层环境中水声传播的差异。该模型在计算水平变化的海洋环境中具有较好的效果, 且当方向散射较弱时也具有较高的计算精度, 能很好地满足本文的研究要求。

2.2 模拟结果及其机制分析

将声源分别置于浅海(站点 D)和深海(站点 A)50 m, 利用 UMPE 模拟该小区域内的声传播特征(见图 6)。

声源位于站点 D 附近时, 传播损失场如图 6(a)所示, 大陆架浅水区域声能传播损失整体较小; 向深海传播的过程中, 声能逐渐向 500 m 以上深度汇聚, 50 m 深度左右传播损失最小, 形成声道; 深海声能传播损失较大, 形成声影区。

声源位于站点 A 附近时, 传播损失场如图 6(b)所示, 由海盆海域向大陆架传播过程中, 声能爬坡, 深海声影区消失; 50 m 左右深度声传播损失仍较小, 声道现象仍很明显, 较声源位于浅水时, 声道强度有微弱降低。

为了探索上述现象形成的物理机制, 利用

Bellhop 射线声学模型^[21]计算对应于图 6 两种海洋环境中的声线传播路径分布(见图 7), 图 7(a)、7(b) 分别对应图 6(a)、6(b)环境中的声线, 其中红色声线掠射角较小。

声源位于浅水海域(图 7(a)), 大陆架区域有效声线掠射角变化较小, 故各层次声能分布差异较小, 传播损失分布较均匀, 大陆架海域声能垂向差异不明显。声线沿陆坡向深海海域传播时, 随传播距离的增大, 声线(特别是大掠射角声线)受边界反射次数增多, 掠射角逐渐减小, 根据声线总是弯向声速减小的方向原理^[22], 声线逐渐弯向 50 m 左右深度处, 故在该深度处会形成声道现象(图 6(a))。陆坡区域 350 m 以上受陆坡流影响(站点 B、C), 混合剧烈, 声速整体变化较小, 可合理地解释陆坡流区域较小的传播损失这一现象。部分声能向深层泄漏现象可理解为掠射角较大的声线导致这一现象, 经计算当声线掠射角大于 41° 时, 声线可以到达深海海底。

图 7(b)显示了研究剖面声线由深水区向浅水区传播分布特征。声线掠射角的变化主要是由声速梯度和海底反射界面的倾角引起的。与图 7(a)相比, 声线分布更为均匀。不难理解, 在浅水区比在深水区边界对声能影响更大, 与声源水平距离相等时, 深水区声线与边界接触的次数少很多, 特别是掠射角较大的声线, 如以(dB/反射一次)^[23]定量计算并比较深、浅海的传播损失, 深水区传播损失更小。同时, 声源位于浅水海域(图 7(a)), 声线沿着陆坡向深海传播过程中, 掠射角大的射线由于界面反射次数较多, 能量损失较大, 远距离传播只剩下小掠射角的声线, 故深层水体形成声影区; 声源位于深水海域(图 7(b)), 声线沿着陆坡向浅海传播过程中, 掠射角大的声线与海底界面作用次数减少, 能量损失较小, 且爬坡作用使声线掠射角增加, 故深层水体声影区消失。将之应用于研究区域声能向声道汇聚时, 易得出深海声道声能要小于浅海的结果。因为当声能相等, 声源位于海盆区域时, 声能垂向分布差异较小, 深海声道汇聚的声能较声源位于浅水时更少, 声道强度微弱降低, Northrop 等^[24]最早通过加利福尼亚海域实验数据, 并将之称为“斜坡增强效应”。

上述分析得到的白令海西部小区域内的声传播特征源于该区域内独特的海洋水文环境和海底地形特征, 两者缺一不可。为验证上述声传播特征形成的物理机制, 模拟海水声速剖面垂向相等时的声传播损失场(见图 8)和无陆坡地形的声传播损失场(见图 9)。

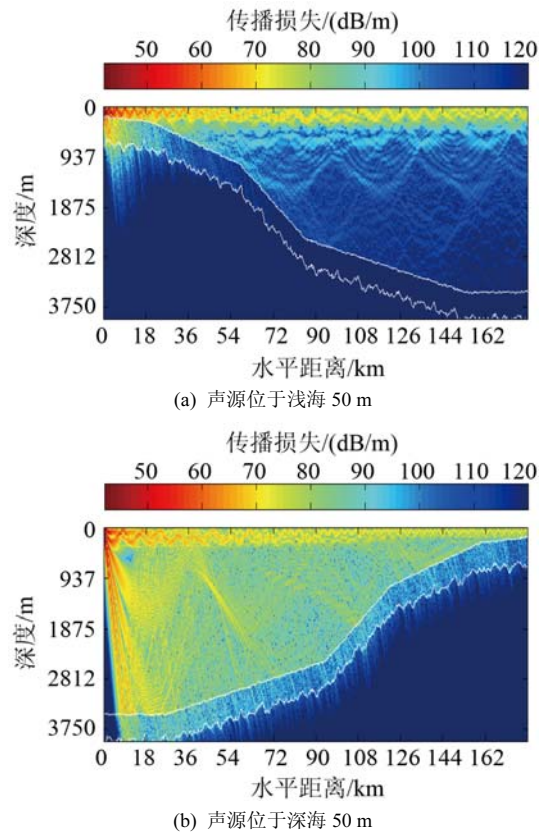


图 6 数值模拟水声传播损失场图

Fig.6 Figures of underwater acoustic transmission loss from model simulation

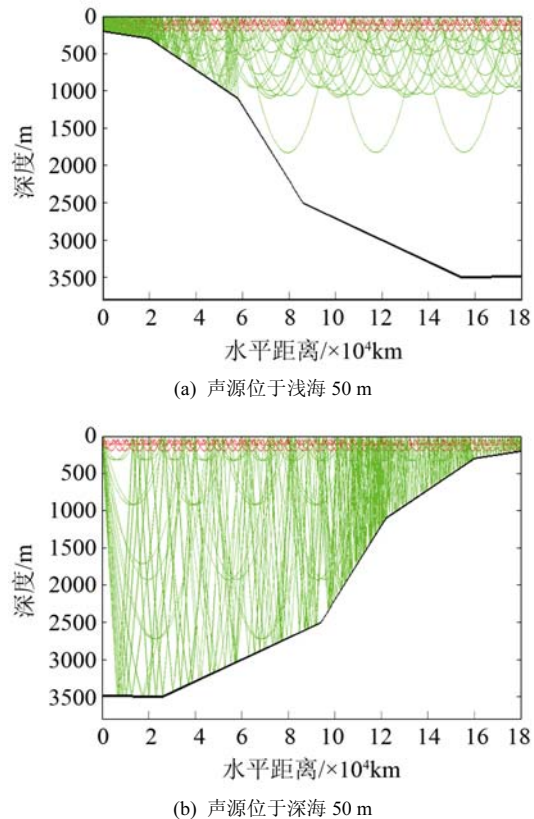


图 7 数值模拟声线传播图

Fig.7 Figures of underwater acoustic rays' transmission from model simulation

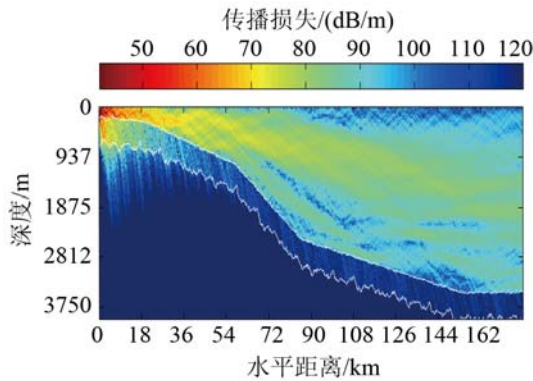


图 8 海水垂向声速分布均匀时的传播损失场

Fig.8 Acoustic transmission loss with sound speed profile changeless vertically

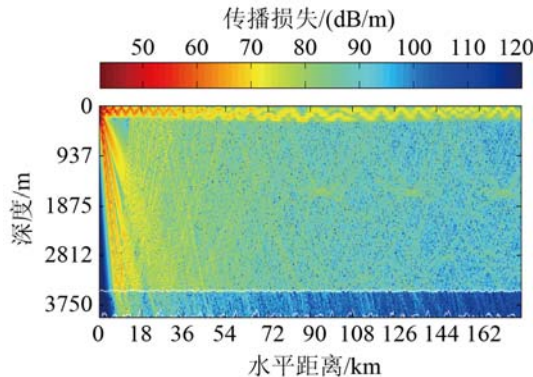


图 9 无大陆坡时的传播损失场

Fig.9 Acoustic transmission loss without a continental slope

由图 8 不难发现当声速分布垂向均匀时, 传播损失垂向分布也较均匀, “泥流效应”使得远距离浅层形成声影区, 同时浅层声道和深层声影区消失。分析图 9 可得, 整体模拟断面深层声能分布较均匀, 50 m 左右仍有声道形成, 但强度更弱, 且无声影区存在。

3 结论

本文结合北极科学考察数据, 在分析白令海西部海洋环境的基础上讨论大陆坡海域声传播特征, 主要结论如下:

(1) 研究小区域内的陆架、陆坡、海盆区调查站点温、盐、声差异较大, 形成机制各异。陆坡区域受陆坡流混合的影响, 在 50~350 m 形成低温、低盐水团。夏季盐度随深度增加而增加, 表层受融冰影响盐度最低。

(2) 声源位于陆架区域, 声波沿陆坡向深水传播过程中, 声能向 500 m 以上汇聚, 在 50 m 左右形成声道, 深层为声影区; 陆坡区域 50~350 m 受流影响, 声速整体较小, 传播损失小。

(3) 声源位于海盆区域, 声波沿陆坡向浅水传

播过程中, 50 m 左右形成声道现象, 其它层次传播损失相对较大, 无声影区。受“斜坡增强效应”, 声源置于浅水海域时, 50 m 声道强度大于声源置于深水海域时。

受研究区域内水文数据量和声学数据空缺的限制, 本文分析具有一定局限性, 下一步将深化北极海域的声学研究工作。

致谢: 感谢中国第五次北极科学考察队伍提供宝贵的 CTD 数据支持!

参 考 文 献

- [1] 马德毅. 中国第五次北极科学考察报告[M]. 青岛: 海洋出版社, 2013, 1-4, 47-48, 181-182.
Ma Deyi. The Report of 2012 Chinese arctic research expedition[M]. Qingdao: Ocean Press, 2013, 1-4, 47-48, 181-182.
- [2] Schabetsberger L, Brodeur R D, Ciannelli L, et al. Diel vertical migration and interaction of zooplankton and juvenile walleye poolock (*Theragra chalcogramma*) at a frontal region near the Pribilof Islands, Bering Sea[J]. *Journal of Marine Science*, 2000, **57**(1): 1283-1295.
- [3] 夏立平. 北极环境变化对全球安全和中国国家安全的影响[J]. *世界经济与政治*, 2011, **31**(1): 122-133.
XIA Liping. The effects of arctic environment change to the safety of the global and china[J]. *World Economy and Politics*, 2011, **31**(1): 122-133.
- [4] 潘敏, 周娥栋. 论北极环境变化对中国非传统安全的影响[J]. *极地研究*, 2010, **22**(4): 415-422.
PAN Min, ZHOU Edong. Discussion on the effects of environment change of arctic to China untraditional safety[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2010, **22**(4): 415-422.
- [5] 高郭平, 赵进平, 董兆乾, 等. 白令海峡海域夏季温、盐分布及变化[J]. *极地研究*, 2004, **16**(3): 229-239.
GAO Guoping, ZHAO Jinping, DONG Zhaoqian, et al. Distribution and variation of temperature and salinity around the Bering Strait[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, **16**(3): 229-239.
- [6] 王晓宇, 赵进平. 北白令海夏季冷水团的分布及其年际变化研究[J]. *海洋学报*, 2011, **33**(2): 1-10.
WANG Xiaoyu, ZHAO Jinping. Distribution and inter-annual variations of the cold water on the northern shelf of Bering Sea in Summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, **33**(2): 1-10.
- [7] Drucker R, Marint S, Moritz R. Observations of ice thickness and frazil ice in the St. Lawrence Island polynya from satellite imagery, upward looking Sonar, and salinity / temperature moorings[J]. *J Geophys. Res.*, 2003, **108**(2): 3149, doi: 0.1029 / 2001JC001213.
- [8] Mizobata K, Sairoh S I, Wang Jin. Interannual variability of summer biochemical enhancement in relation to mesoscale eddies at the shelf break in the vicinity of the Pribilof Islands, Bering Sea[J]. *Deep Sea ResearchII*, 2008, **55**(3): 1717-1728.
- [9] Sean M W, Mark A M, Lisa M M, et al. Waveguide propagation allows range estimates for north pacific right whales in the Bering Sea[J]. *Canadian Acoustics/Acoustique canadienne*, 2004, **32**(2): 146-154.
- [10] Stephane G, John K H. Acoustic characteristics of forage fish species in the Gulf of Alaska and Bering Sea based on Kirchhoff approximation models[J]. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 2004, **60**(117): 1839-1850.
- [11] Sara L H, David K M, Sharon L N, et al. Detecting humpback whale sounds in the Bering Sea: Confounding sounds in a cacophony

- phony of noise[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2009, **125**(3): 2647-2658. <http://dx.doi.org/10.1121/1.478310>.
- [12] 秦继兴, 张仁和, 骆文于, 等. 大陆坡海域二维声传播研究[J]. *声学学报*, 2014, **39**(2): 145-153.
QIN Jixing, ZHANG Renhe, LUO Wenyu, et al. Two-dimensional sound propagation over a continental slope[J]. *Acta Acustica*, 2014, **39**(2): 145-153.
- [13] 张旭, 刘艳, 孙杰. 典型东海黑潮锋环境下的声场分布异常分析[J]. *应用海洋学报*, 2013, **32**(3): 324-331.
ZHANG Xu, LIU Yan, SUN Jie. Analyze of abnormal sound field distribution in an environment of typical Kuroshio front in the East China Sea[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, **32**(3): 324-331.
- [14] Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures[J]. *J. Associ. Comput. Mach.*, 1970, **17**(2): 589-602.
- [15] Schumacher J D, Kinder T H, Pashinski D J, et al. A structural front over the continental shelf of the eastern Bering Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1979, **9**(1): 79-87.
- [16] 高郭平, 董兆乾, 赵进平, 等. 1999年夏季白令海陆坡区海流动力分析[J]. *极地研究*, 2003, **15**(2): 91-101.
GAO Guoping, DONG Zhaoqian, ZHAO Jinping, et al. Dynamic analysis of current over the continental slope of the east bering sea in summer 1999[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2003, **15**(2): 91-101.
- [17] 高飞, 潘长明, 冯盼盼, 等. 夏季白令海声速剖面分布特征[J]. *海洋通报*, 2014, **33**(2): 180-187.
GAO Fei, PAN Changming, FENG Panpan, et al. Characteristics of sound speed profile in bering sea in summer[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, **33**(2): 180-187.
- [18] Smith K B, Tappert F D. UMPE: The University of Miami Parabolic Equation Medal, Version 1.1[R]. Marine Physical Laboratory Technical, 1994.
- [19] Tapper F D, Spiesberger J L, Wolfson M A. Study of a novel range-dependent propagation effect with application to the axial injection of signals from the Kaneohe source[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2002, **111**(2): 757-762.
- [20] 孙磊, 高飞, 潘长明, 等. 基于 Argo 资料的生孩温跃层对水声传播的影响分析与仿真[J]. *声学技术*, 2014, **33**(2): 111-116.
SUN Lei, GAO Fei, PAN Changming, et al. Analysis and simulation of acoustic propagation affected by thermocline in deep water based on Argo data[J]. *Technical Acoustics*, 2014, **33**(2): 111-116.
- [21] Porter M B, Bucher H P. Gaussian beam sound propagation model for shallow water[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1987, **82**(3): 1349-1359.
- [22] Urick R J. Principles of Underwater Sound (Third Edition) [M]. Los Altos, California, USA: Peninsula Pub, 1983, 104-114.
- [23] Rogers P H. Onboard prediction of propagation loss in shallow water[J]. *Nav. Res. Lab.*, 1981, **21**(3): 1089-1094.
- [24] Northrop J, Loughridge M S, Werner E W. Effect of near-source bottom conditions on long-range sound propagation in the ocean[J]. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**(12): 3905-3908.