

黄海太平洋磷虾回波映像识别与资源密度评估

王新良^{1,2}, 赵宪勇^{1*}, 左涛¹, 李显森¹

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 农业部海洋渔业资源可持续发展重点实验室, 山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 山东青岛 266071;
2. 中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东青岛 266100)

摘要: 太平洋磷虾是黄海生态系统中浮游动物的关键种。为准确评估太平洋磷虾的资源密度, 基于2010年1月黄海渔业资源调查过程中采集的声学 and 生物学数据, 利用SDWBA目标强度理论模型, 研究了太平洋磷虾38和120 kHz目标的回声散射特性, 并根据2个频率平均体积散射强度的差值(简称频差技术), 开展了太平洋磷虾回波映像识别及资源密度评估研究。结果显示, 太平洋磷虾的目标强度与其倾角和体长密切相关; 120 kHz的目标强度明显高于38 kHz, 且两个频率的有效平均目标强度之差随着磷虾体长的增加而减小。数据处理结果显示, 两个频率回声数据的平均体积散射强度(MVBS)呈线性关系, 120 kHz的MVBS比38 kHz高约14.1 dB, 与理论仿真结果一致; 回声散射层内太平洋磷虾的资源密度为1.8~2531.8尾/m³, 均值为255.1尾/m³。本研究对利用渔业声学技术开展浮游动物资源评估具有借鉴意义, 未来还需要进一步对太平洋磷虾目标强度模型参数及目标识别方法进行完善, 以提高其资源密度声学评估的准确度。

关键词: 太平洋磷虾; 目标强度; 频差技术; 目标识别; 资源密度

中图分类号: S 934

文献标志码: A

太平洋磷虾(*Euphausia pacifica*)在黄、东海分布广泛, 作为黄海中南部日本鳀(*Engraulis japonicus*)等中上层鱼类及部分底层鱼类[如小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)]重要的饵料生物^[1-3], 在黄海生态系统中占据极其重要的地位^[4-5]。准确地评估太平洋磷虾(以下或简称为磷虾)的生物量及资源分布, 将有助于提高对黄海生态系统结构和能量流通的认知。利用浮游动物网在固定的站点进行垂直拖网取样, 可以对一定水层内太平洋磷虾的资源密度进行评估。然而, 由于磷虾类相对其他浮游动物具有较强的游泳能力, 对浮游动物网具有规避性^[6], 一定程度上会降低其取样结果的准确度。

渔业资源声学调查利用科学探鱼仪系统, 几乎可以对整个水层进行连续采样, 具有实时观测、取样率大等优点^[7], 已被成功应用于我国

近海重要经济鱼类的资源监测与评估^[8-9]。近年来, 随着声学调查设备和浮游动物声学散射研究的发展^[10-12], 国外学者逐渐尝试将声学方法应用于浮游动物, 尤其是磷虾类, 如南极大磷虾(*Euphausia superba*)和太平洋磷虾的资源调查评估^[13-17]。目前, 南极大磷虾资源声学调查与评估是南极海洋生物资源养护管理委员会(CCAMLR, Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources)制定南极大磷虾资源养护管理措施的主要依据。目标的回波映像识别是浮游动物资源声学调查评估过程的关键环节。频差(dB difference or MVBS difference)技术基于目标的声学散射特性, 通过对比目标群体对不同频率声波的回声强度差别进行种类识别^[18-19]。目前, 该技术已被成功应用于区分浮游动物和鱼类的回声映像^[20-22], 以及不同种类或年龄结构鱼类之

收稿日期: 2015-10-10 修回日期: 2016-03-25

资助项目: 国家自然科学基金(40976103)

通信作者: 赵宪勇, Email: zhaoxy@ysfri.ac.cn

间的识别与分类^[23-24]。太平洋磷虾相对于大多数鱼类尤其是有鳔鱼类, 其个体的回波散射较弱, 声阻抗与海水较为接近, 在120 kHz的回声散射强度理论上应明显大于38 kHz^[7, 25]。上述特性为利用频差技术进行太平洋磷虾回声映像识别提供了理论依据。

本研究基于2010年1月黄海渔业资源调查采集的声学及生物学数据, 结合太平洋磷虾的声学散射理论模型, 分析其38和120 kHz目标强度的频差特征, 并初步探索利用频差技术进行太平洋磷虾回波映像识别及资源密度评估。

1 材料与方法

1.1 数据采集

数据取自2010年1月份黄海渔业资源调查结果(图1)。调查采用声学断面走航和站点拖网生物学取样相结合的方式。在预设站点或存在明显集群映像的机动站点处, 根据回声映像的分布水层采取底拖网或中层拖网进行生物学取样。浮游动物样品利用孔径为500 μm的浮游生物垂直拖网采集。

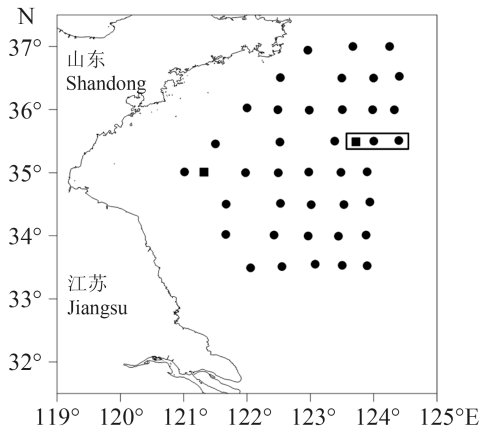


图1 调查取样站位

黑色圆点表示固定站位; 黑色方块表示增设机动底拖网站位; 黑色方框内区域表示太平洋磷虾资源密度评估的位置

Fig. 1 Sampling stations

Black dots were planned stations; black square were adaptive stations; black box indicated the location where the density of *E. pacifica* was estimated

声学数据利用“北斗”号渔业资源调查船上安装的Simrad EK500科学探鱼仪系统(38和120 kHz)采集。断面走航航速约10 kn。调查开始前, 在胶州湾锚地内利用标准球法对声学系统

进行校正^[26]。Simrad EK500 2个频率数据采集的相关参数设置如表1所示。

表1 Simrad EK500主要参数设置

Tab. 1 Main parameter settings for Simrad EK500 echosounder system

参数	parameters	参数值	settings
换能器型号	transducer type	ES120-7	ES38B
频率/kHz	frequency	120	38
发射功率/W	transmitted power	1000	2000
脉冲长度/ms	pulse length	1.024	1.024
脉冲间隔/s	ping interval	1	1
吸收系数/(dB/km)	absorption coefficient	40	10
等效波束角/dB	equivalent beam angle	-21.0	-20.6
换能器增益/dB	transducer gain	29.82	26.90
纵向波束宽度/°	alongship 3 dB beamwidth	7.44	6.82
横向波束宽度/°	athwarthship 3 dB beamwidth	7.29	6.71
数据采集深度/m	data collection range	100	100
声速/(m/s)	sound velocity	1522	1522

1.2 太平洋磷虾回波映像识别

目标强度 太平洋磷虾的目标强度(TS, target strength, dB)采用随机畸变波玻恩近似(SDWBA, stochastic distorted wave born approximation)理论模型^[27-31]计算。该模型根据太平洋磷虾的声阻抗特性及其形态特征, 将太平洋磷虾简化为沿中心轴线的多个连续圆柱体微元^[32], 则磷虾整体的目标强度可表示为多个圆柱体微元回声散射相叠加的结果。每个圆柱体的回声散射强度:

$$f_{bs_j}(\theta) = \frac{k_1^2}{4} \int [\gamma_\kappa - \gamma_\rho] \exp(-i2\bar{k}_i \bar{r}_0) \times \frac{a_j J_1(2k_2 a_j \cos \beta_{\text{tilt}})}{\cos \beta_{\text{tilt}}} d\bar{r}_0 \tag{1}$$

式中, $k_1=2\pi f/c$ 表示波数, $f(\text{Hz})$ 为入射波频率, $c(\text{m/s})$ 为声速, $\bar{k}_i = k_1 \begin{bmatrix} \sin \theta \\ 0 \\ \cos \theta \end{bmatrix}$; $\bar{r}_0(\text{m})$ 为位置矢量, $a_j(\text{m})$ 为第j个圆柱体的半径; $\gamma_\kappa = (\rho_1 c_1^2 / \rho_2 c_2^2) - 1$, $\gamma_\rho = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$; J_1 表示第一类1阶贝塞尔函数, $\beta_{\text{tilt}}(\text{°})$ 表示各圆柱体与入射波之间的夹角; 下标1和2分别表示海水和太平洋磷虾; $\theta(\text{°})$ 为磷虾的倾角^[30](定义从头部和背部入射时 θ 分别为0°和90°)。

磷虾的回声散射强度:

$$f_{bs}(\theta) = \sum_{j=1}^N f_{bs_j}(\theta) \cdot \exp(i\varphi_j) \quad (2)$$

式中, N 为圆柱体个数, φ_j 为第 j 个圆柱体的随机相位。

磷虾的回声散射截面 $\sigma_{bs}(\theta)$ 计算公式:

$$\sigma_{bs}(\theta) = \left\langle |f_{bs}(\theta)|^2 \right\rangle_{\varphi} \quad (3)$$

当磷虾倾角分布确定时, 则磷虾的有效平均目标强度:

$$\overline{TS} = 10 \lg \left(\int \sigma_{bs}(\theta) D(\theta) / \int D(\theta) d\theta \right) \quad (4)$$

式中, $D(\theta)$ 为磷虾的倾角分布函数。

太平洋磷虾与周围海水密度和声速的比值分别采用1.043和1.052^[25]; 随机相位采用正态分布 $\varphi=N(0^\circ, \sqrt{2}/2^\circ)$ ^[30]; 太平洋磷虾的倾角分布根据Miyashita等^[33]在实验室水槽内的观测结果, 采用正态分布 $\theta=N(30.4^\circ, 19.9^\circ)$ 。

回声数据频差计算 回声数据处理采用渔业声学后处理软件Echoview[®](v4.90)。为减小背景噪声对回声积分及频差计算的影响, 首先利用后处理方法对2个频率回声数据进行预处理^[34], 再分别计算并输出38和120 kHz回声数据各积分单元格的平均体积散射强度 $MVBS$ (mean volume backscattering strength, dB), 计算公式:

$$MVBS = 10 \lg(E) \quad (5)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^M \delta_i \gamma_i 10^{S_{vi}/10}}{\sum_{i=1}^N \delta_i} \quad (6)$$

式中, M 为积分单元格内采样点数量; S_{vi} (dB)为各取样点的体积反向散射强度; 当取样点 i 为劣质数据或不存在时 $\delta_i = 0$, 其他情况 $\delta_i = 1$; 当取样点 i 对应的 S_{vi} 位于积分阈值外时 $\gamma_i = 0$, 其他情况 $\gamma_i = 1$ 。

为使各个积分单元格内生物组成种类尽量单一, 根据Kang等^[35]的建议, 将积分单元格的尺寸设置为水平方向沿航线185.2 m (0.1 n mile), 垂直方向1 m, 将体积散射强度的积分阈值设置为-80 dB。在此基础上, 计算各积分单元格内2个频率回声数据平均体积散射强度的频差 $\Delta MVBS_{(120-38)}$, 即

$$\Delta MVBS_{(120-38)} = MVBS_{(120)} - MVBS_{(38)} \quad (7)$$

目标回波映像识别 根据回声积分基本原理及其线性假设, 当目标群体确定时, 其对应2个频率(f_1, f_2)回声数据的平均体积散射强度与平均目标强度之间存在如下关系:

$$\Delta MVBS_{(f_1-f_2)} = \Delta \overline{TS}_{(f_1-f_2)} \quad (8)$$

即平均体积散射强度的频差应与其目标强度之差的分布区间相一致^[7]。

基于上述假设, 根据生物学取样太平洋磷虾体长分布, 利用SDWBA目标强度理论模型, 计算其有效平均目标强度之差的最小值 $\Delta \overline{TS}_{(120-38)\min}$ 和最大值 $\Delta \overline{TS}_{(120-38)\max}$ 。将 $[\Delta \overline{TS}_{(120-38)\min}, \Delta \overline{TS}_{(120-38)\max}]$ 定义为太平洋磷虾的频差识别窗(dB-difference window), 从 $\Delta MVBS_{(120-38)}$ 中筛选出位于频差识别窗内的积分单元格数据, 则该部分积分单元格内的回声散射主要来自于太平洋磷虾。

1.3 太平洋磷虾资源密度评估

由于磷虾类浮游动物对38 kHz的回声散射强度较弱, 一般选择利用120 kHz的回声数据计算其资源密度^[21, 35-36]。根据筛选出的太平洋磷虾120 kHz各积分单元格的平均体积散射强度数据, 分别计算其回声散射系数 $S_{v(120)}$:

$$S_{v(120)} = 10^{MVBS_{(120)}/10} \quad (9)$$

则对应各积分单元格内太平洋磷虾的资源密度 ρ (尾/ m^3)为

$$\rho = \frac{S_{v(120)}}{\overline{\sigma}_{bs}} \quad (10)$$

式中, $\overline{\sigma}_{bs}(m^2)$ 为根据生物学取样太平洋磷虾的体长频率分布计算所得平均回声散射截面。

2 结果

2.1 体长分布

调查过程中, 浮游生物网共采集太平洋磷虾样品209尾。太平洋磷虾的体长分布范围为5.2~14.3 mm, mean±SD为(11.02±1.46)mm, 95%置信区间为[10.82, 11.22] mm (图2)。

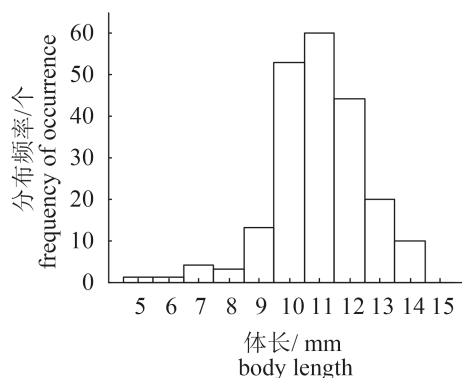


图2 太平洋磷虾的体长频率分布($n=209$)

Fig. 2 Length distribution of *E. Pacifica*

2.2 目标强度

两个频率的目标强度与入射波角度(或磷虾倾角)密切相关, 存在2个明显的主瓣, 且120 kHz的主瓣宽度明显小于38 kHz。当声波从背向和腹向入射时, 其目标强度明显高于从头部和尾部入射, 且在任意入射角度下, 太平洋磷虾在120 kHz的目标强度都明显高于38 kHz(图3)。

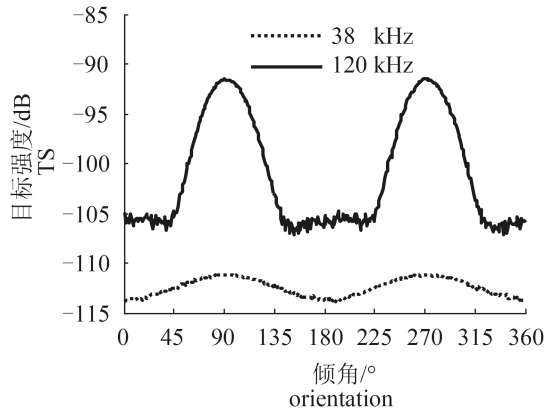


图3 太平洋磷虾目标强度与倾角关系

磷虾体长取11 mm

Fig. 3 Relationship between TS and orientation of *E. pacifica*

Krill length was 11 mm

当倾角取正态分布 $N(30.4^\circ, 19.9^\circ)$ 时, 随着磷虾体长的增加, 2个频率的 \overline{TS} 逐渐增加, 而二者之差 $\Delta\overline{TS}_{(120-38)}$ 则逐渐减小(图4)。根据2010年1月份调查中采集磷虾样品的体长分布(图2), 209尾取样磷虾在120 kHz的有效平均目标强度为

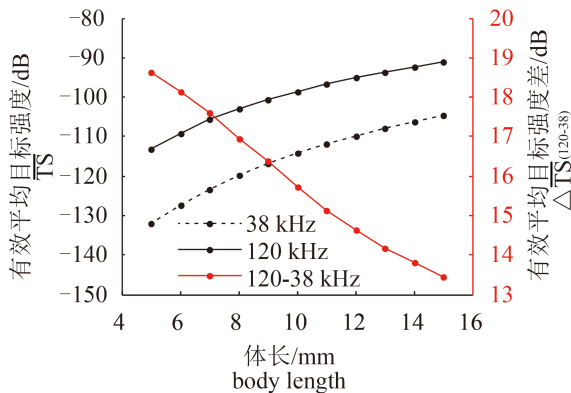


图4 太平洋磷虾有效平均目标强度与体长关系

磷虾倾角采用正态分布 $N(30.4^\circ, 19.9^\circ)$

Fig. 4 Relationship between \overline{TS} and length of *E. pacifica*

The orientation distribution of krill was $N(30.4^\circ, 19.9^\circ)$

-96.29 dB; $\Delta\overline{TS}_{(120-38)}$ 的最小值和最大值分别为13.7和18.6 dB, 均值为14.8 dB。

2.3 回波映像识别及资源密度

从120 kHz回波映像中可以看出, 在底层附近存在明显的回声散射层(图5-a)。经拖网验证, 该回声散射层主要由浮游动物组成, 其中, 太平洋磷虾为明显优势种; 同时, 在40~50 m水层和贴近海底的水层分别存在日本鳀集群及其他鱼类的回声散射映像。对比两个频率的回声映像(图5-a, b), 浮游动物回声散射层在120 kHz的回声强度明显高于38 kHz, 而鱼类集群38 kHz的回声强度则高于120 kHz。经频差分析识别后, 太平洋磷虾数据被从回声散射层中筛选出, 而日本鳀及其他鱼类的回声映像则被有效地消除(图5-c)。

为比较分析太平洋磷虾回声数据的频差特征, 对两个频率的平均体积散射强度进行了回归分析。结果显示, 平均体积散射强度 $MVBS_{(120)}$ 和 $MVBS_{(38)}$ 之间呈显著的线性关系(图6), 二者的关系如公式(11)所示, 斜率约为1, 截距(14.11 dB)与利用SDWBA模型计算的两个频率有效平均目标强度之差 $\Delta\overline{TS}_{(120-38)}$ (14.8 dB)相接近。

$$MVBS_{(38)} = 1.03MVBS_{(120)} - 14.11 \quad (11)$$

$(r^2 = 0.9126, P < 0.0005)$

为计算太平洋磷虾集群的资源密度, 分析了120 kHz回声数据的平均体积散射强度分布。结果显示, $MVBS_{(120)}$ 呈单峰正态分布, 分布范围为-93.8~-62.3 dB, 均值(\pm SD)为(-74.2 \pm 4.62)dB(图7)。根据模型法评估的太平洋磷虾有效平均目标散射强度-96.29 dB, 计算所得调查区域回声散射层内太平洋磷虾资源密度 ρ 的范围为(1.8~2531.8)尾/ m^3 , 均值为255.1尾/ m^3 。

3 讨论

3.1 太平洋磷虾资源密度声学评估

浮游动物声学是渔业声学的重要组成部分^[36], 目前, 水声技术已被成功应用于部分大型浮游动物的资源评估及生态研究^[15]。研究发现, 日本三陆海域内太平洋磷虾集群回声数据在120 kHz的平均体积散射强度比38 kHz高至少10 dB^[21, 35]。理论仿真结果显示, 本次调查取样的太平洋磷虾对2个频率声波的有效平均目标强度之差

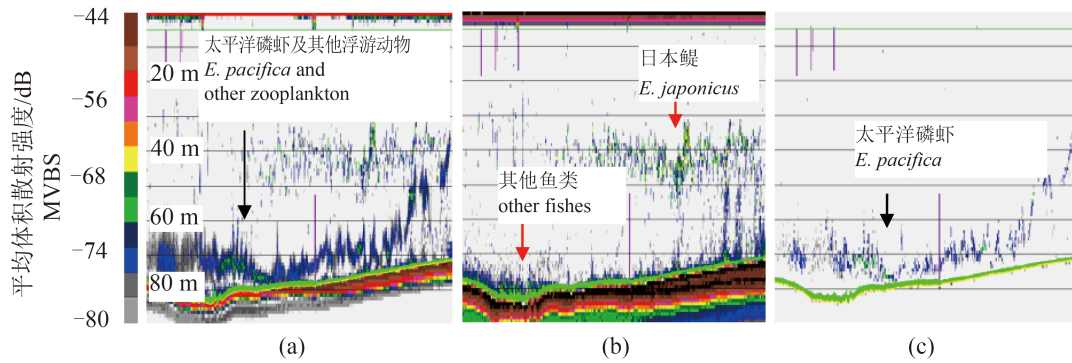


图 5 含有太平洋磷虾回声散射层的映像

回声映像采集时间为2010年1月14日07:00—17:00（白天时段）；走航速度约10 kn；数据采集地点为图1中黑框位置；(a). MVBS₍₁₂₀₎；(b). MVBS₍₃₈₎；(c). 利用频差窗识别出的太平洋磷虾集群MVBS_(120E)

Fig. 5 Echograms containing *E. pacifica* sound scattering layer

The echograms were collected from 07:00—17:00 (daytime), 14 January 2010; the cruising speed was about 10 kn; the data collecting location was shown by the black box in figure 1; (a). MVBS₍₁₂₀₎; (b). MVBS₍₃₈₎; (c). MVBS_(120E) of the identified *E. pacifica* swarms based on the dB difference

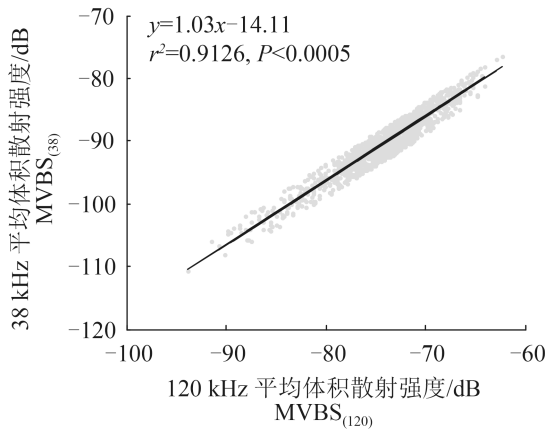


图 6 太平洋磷虾集群120和38 kHz MVBS关系

Fig. 6 Relationship between MVBS₍₁₂₀₎ and MVBS₍₃₈₎ of the *E. pacifica* swarms

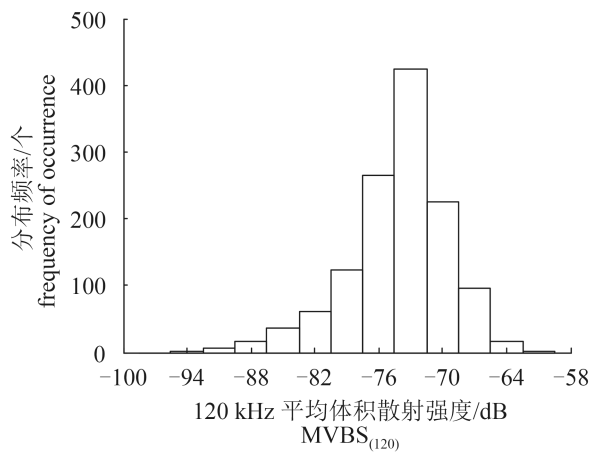


图 7 太平洋磷虾集群MVBS₍₁₂₀₎ 频率分布(n=1274)

Fig. 7 Frequency distribution of the MVBS₍₁₂₀₎ of the *E. pacifica* swarms

$\Delta\overline{TS}_{(120-38)}$ 均值为14.8 dB，与上述研究结果相吻合。经频差识别处理后，筛选出太平洋磷虾两个频率的平均体积散射强度(MVBS)呈线性关系(图6)，截距(14.11 dB)与理论仿真计算所得有效平均目标强度之差相近。两个频率平均体积散射强度回归所得线性方程的斜率约等于1，说明MVBS频差与磷虾的集群密度相关性较低，符合回声积分原理的线性假设^[7]。

黄海水域秋季太平洋磷虾高密度集群分布于深水区，且与底层冷水密切相关^[37]。同时，太平洋磷虾集群的资源密度分布差异明显^[38-39]，分布范围从小于1至大于5000尾/m³。本研究发现，在调查水域，太平洋磷虾集群白天分布于贴海底的水层且存在昼夜垂直迁移的现象(图5-c)。声学评估结果显示，取样海域处回声散射层内太平洋磷虾的资源密度分布范围约为1.8~2531.8尾/m³，均值为255.1尾/m³，此结果与该海域内浮游生物网取样结果的最高均值[(178.68±230.66)尾/m³]接近^[39]。同时，针对该回声散射层的鱼类底拖网生物学取样显示，在网衣及渔获物中均出现大量的太平洋磷虾，亦证明该水层内磷虾的资源密度较高。

3.2 误差来源分析

背景噪声的影响 除目标生物的回波外，来自海洋环境及船舶自身的背景噪声也是回声数据中不可忽视的组成部分^[7]。尤其是随着水深的增加，受到声传播衰减和时变增益补偿(TVG, time-varied-gain)的影响，信噪比(SNR, signal-to-

noise ratio)逐渐降低, 背景噪声可能成为回声积分值的主要贡献成分, 从而限制了声学设备的有效探测距离并可能导致频差计算产生误差^[35]。因此, 在利用声学方法进行目标回声映像识别或资源密度评估时, 首先需要评估各个频率的有效观测距离并消除各个频率回声数据中的背景噪声^[34, 40]。黄海海域水深较浅, 平均水深约为44 m, 最大水深一般不超过140 m, 位于38和120 kHz两个频率的有效探测范围内^[35]。同时, 研究还采用后处理方法消除了两个频率回声数据中的背景噪声, 以减少频差计算和资源密度评估的误差。

目标强度参数的影响 太平洋磷虾的目标强度是进行其回波映像识别及资源密度声学评估的关键参数。根据太平洋磷虾的声散射理论模型, 其目标强度与体长、声学阻抗特性(个体的声速和密度)和倾角分布等参数密切相关。数值仿真结果显示, 当声波从太平洋磷虾头部和背部入射时, 其120 kHz的目标强度相差超过20 dB(图3); 在入射角度分布确定时, 最小和最大体长太平洋磷虾对应的平均目标强度相差接近5 dB(图4)。由此可知, 当上述参数发生变化或不定时, 将直接影响其频差窗的选择和其资源评估结果的准确度。本研究中, 太平洋磷虾样品主要采自浮游生物网垂直拖网取样。但由于磷虾尤其是大个体对取样网具存在规避(逃逸)行为, 可能导致取样无法反映真实群体的体长分布。同时, 在实际海洋环境中, 当磷虾存在垂直迁移或摄食等行为时, 都可能导致其倾角分布发生变化。此外, 浮游动物的声学阻抗特性也会随着发育期的不同及环境(如水深、温盐等)的变化而变化^[41]。声学阻抗特性的微小差异可能导致目标强度发生较大变化, 从而使其资源密度或生物量声学评估结果发生数量级的误差^[41-42]。因此, 为提高太平洋磷虾资源声学评估的准确性, 需要在调查过程中采用连续水层采样或多个水层进行取样, 以获得准确的体长分布等生物学特征; 同时, 需要对太平洋磷虾的声学特性进行准确的测量, 并采用现场观测^[12-13]或反演等方法^[43]进一步研究太平洋磷虾的倾角分布。

回声散射层多种类生物组成的影响 回声散射层在黄海生物资源声学调查中普遍存在。除浮游动物外, 中上层小型鱼类(日本鳀)及水母

(*Rhopilema esculentum*)等都可能形成集群并在声学数据中表现为明显的回声散射层^[44-45]。同时, 生物学取样显示回声散射层内的种类组成也可能较为复杂。例如, 在本次调查的浮游动物声散射层内除优势种磷虾外, 还存在部分桡足类(如哲水蚤)和毛颚类等浮游动物, 同时也不排除存在少量的其他小型底栖鱼类的可能性。当某个积分单元格对应的取样水体中, 除太平洋磷虾外, 同时混栖其他浮游动物或鱼类时, 例如其他鱼类对太平洋磷虾进行摄食时^[1, 3], 则可能导致该单元格的MVBS位于频差识别窗外部。因此, 在进行频差分析时, 为尽量使得各单元格内的生物组成种类较为单一, 建议选择尺寸相对较小的积分单元格^[35, 46]。同时, 本研究对太平洋磷虾38和120 kHz两个频率的目标强度进行了理论仿真, 但尚未对该海域内其他鱼类及浮游动物的声散射特性进行研究, 不排除其他目标对上述两个频率的声波具有与太平洋磷虾相似的声散射特性, 在此情况下仅依靠频差方法可能无法对其有效地进行区分。综上所述, 为减少上述因素导致的误差, 未来还需对研究区域内海洋生物的声散射特性进行系统的现场观测或理论研究, 分析不同种类的频差特征。同时, 综合利用多种信息, 例如生物学拖网取样, 多个频率的声学数据、水深及温盐等环境数据、鱼类生态行为(如昼夜垂直迁移, 摄食)以及鱼类的集群形状等^[47-49], 以进一步提高多种类目标识别的准确度。

参考文献:

- [1] 孟田湘. 黄海中南部鳀鱼各发育阶段对浮游动物的摄食[J]. 海洋水产研究, 2003, 24(3): 1-9.
Meng T X. Studies on the feeding of anchovy (*Engraulis japonicus*) at different life stages on zooplankton in the Middle and Southern Waters of the Yellow Sea [J]. Marine Fisheries Research, 2003, 24(3): 1-9 (in Chinese).
- [2] 张波, 唐启升, 金显仕, 等. 东海和黄海主要鱼类的食物竞争[J]. 动物学报. 2005, 51(4): 616-623.
Zhang B, Tang Q S, Jin X S, et al. Feeding competition of the major fish in the East China Sea and the Yellow Sea [J]. Acta Zoologica Sinica, 2005, 51(4): 616-623 (in Chinese).
- [3] 张波, 金显仕. 黄海鱼类功能群及其对浮游动物捕食

- 的季节变化[J]. 水产学报, 2010, 34(4): 548-558.
- Zhang B, Jin X S. Seasonal variations of the functional groups of fish community and their consumption of zooplankton in the Yellow Sea [J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(4): 548-558 (in Chinese).
- [4] 刘会莲. 中国近海及南大洋磷虾关键种群生态学研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002: 45-55.
- Liu H L. Study on the population ecology of the deyr Euphausiid species in the waters off China coast and in the southern ocean [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2002: 45-55 (in Chinese).
- [5] 薛莹, 金显仕, 赵宪勇, 等. 秋季黄海中西部鱼类群落对饵料生物的摄食量[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(1): 75-82.
- Xue Y, Jin X S, Zhao X Y, *et al.* Food consumption by the fish community in the central and southern Yellow sea in autumn [J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(1): 75-82 (in Chinese).
- [6] Everson I, Bone D G. Effectiveness of the RMT8 system for sampling krill (*Euphausia superba*) swarms [J]. Polar Biology, 1986, 6(2): 83-90.
- [7] Simmonds E J, Maclellan D N. Fisheries Acoustics: Theory and Practice [M]. 2nd ed. Oxford: Blackwell Science, 2005.
- [8] 赵宪勇, 陈毓桢, 李显森, 等. 多种类海洋渔业资源声学评估技术与方法[J]. 海洋学报, 2003, 25(S): 192-202.
- Zhao X Y, Chen Y Z, Li X S, *et al.* Acoustic estimation of multi-species marine fishery resources [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(S): 192-202 (in Chinese).
- [9] 李永振, 陈国宝, 赵宪勇, 等. 南海北部海域小型非经济鱼类资源声学评估[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(2): 206-212.
- Li Y Z, Chen G B, Zhao X Y, *et al.* Acoustic assessment of non-commercial small-size fish resources in the northern waters of South China Sea [J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(2): 206-212 (in Chinese).
- [10] Stanton T K, Chu D Z, Wiebe P H, *et al.* Average echoes from randomly oriented random-length finite cylinders: Zooplankton models [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 94(6): 3463-3472.
- [11] Stanton T K, Chu D Z. Review and recommendations for the modelling of acoustic scattering by fluid-like elongated zooplankton: Euphausiids and Copepods [J]. ICES Journal of Marine Science, 2000, 57(4): 793-807.
- [12] Lawson G L, Wiebe P H, Ashjian C J, *et al.* Improved parameterization of Antarctic krill target strength models [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 119(1): 232-242.
- [13] Kristensen Å, Dalen J. Acoustic estimation of size distribution and abundance of zooplankton [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1986, 80(2): 601-611.
- [14] Everson I, Goss C, Murray W A. Comparison of krill (*Euphausia superba*) density estimates using 38 and 120 kHz echosounders [J]. Marine Biology, 1993, 116(2): 269-275.
- [15] Hewitt R P, Watkins J, Naganobu, *et al.* Biomass of Antarctic krill in the Scotia Sea in January/February 2000 and its use in revising an estimate of precautionary yield [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2004, 51(12-13): 1215-1236.
- [16] Handegard N O, Buisson L D, Brehmer P, *et al.* Towards an acoustic-based coupled observation and modelling system for monitoring and predicting ecosystem dynamics of the open ocean [J]. Fish and Fisheries, 2013, 14(4): 605-615.
- [17] Ressler P H, de Robertis A, Warren J D, *et al.* Developing an acoustic survey of euphausiids to understand trophic interactions in the Bering Sea ecosystem [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2012, 65-70: 184-195.
- [18] McKelvey D R. The use of two frequencies to interpret acoustic-scattering layers [D]. Seattle: University of Washington, 2000.
- [19] Korneliussen R J, Ona E. An operational system for processing and visualizing multi-frequency acoustic data [J]. ICES Journal of Marine Science, 2002, 59(2): 293-313.
- [20] Cochrane N A, Sameoto D, Herman A W, *et al.* Multiple-frequency acoustic backscattering and zooplankton aggregations in the inner Scotian Shelf Basins [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1991, 48(3): 340-355.
- [21] Miyashita K, Aoki I, Seno K, *et al.* Acoustic identification of isada krill, *Euphausia pacifica* Hansen, off the Sanriku coast, north-eastern Japan [J]. Fisheries Oceanography, 1998, 6(4): 266-271.
- [22] McKelvey D R, Wilson C D. Discriminant classification of fish and zooplankton backscattering at 38 and 120

- kHz [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2006, 135(3): 488-499.
- [23] Kloser R J, Ryan T, Sakov P, *et al.* Species identification in deep water using multiple acoustic frequencies [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2002, 59(6): 1065-1077.
- [24] Logerwell E A, Wilson C D. Species discrimination of fish using frequency-dependent acoustic backscatter [J]. ICES Journal of Marine Science, 2004, 61(6): 1004-1013.
- [25] Greenlaw C F. Acoustical estimation of zooplankton populations [J]. Limnology and Oceanography, 1979, 24(2): 226-242.
- [26] Foote K G, Knudsen H P, Vestnes G, *et al.* Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: A practical guide [R]. International Council for the Exploration of the Sea Cooperative Research Report No. 144, 1987.
- [27] Demer D A, Conti S G. Reconciling theoretical versus empirical target strengths of krill: Effects of phase variability on the distorted-wave Born approximation [J]. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60(2): 429-434.
- [28] Demer D A, Conti S G. Validation of the stochastic distorted-wave Born approximation model with broad bandwidth total target strength measurements of Antarctic krill [J]. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60(3): 625-635.
- [29] Demer D A, Conti S G. New target-strength model indicates more krill in the Southern Ocean [J]. ICES Journal of Marine Science, 2005, 62(1): 25-32.
- [30] Conti S G, Demer D A. Improved parameterization of the SDWBA for estimating krill target strength [J]. ICES Journal of Marine Science, 2006, 63(5): 928-935.
- [31] Calise L, Skaret G. Sensitivity investigation of the SDWBA Antarctic krill target strength model to fatness, material contrasts and orientation [J]. CCAMLR Science, 2011, 18: 97-122.
- [32] McGehee D E, O'Driscoll R L, Traykovski L V M. Effects of orientation on acoustic scattering from Antarctic krill at 120 kHz [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 1998, 45(7): 1273-1294.
- [33] Miyashita K, Aoki I, Inagaki T. Swimming behaviour and target strength of isada krill (*Euphausia pacifica*) [J]. ICES Journal of Marine Science, 1996, 53(2): 303-308.
- [34] De Robertis A, Higginbottom I. A post-processing technique to estimate the signal-to-noise ratio and remove echosounder background noise[J]. ICES Journal of Marine Science, 2007, 64(6): 1282-1291.
- [35] Kang M, Furusawa M, Miyashita K. Effective and accurate use of difference in mean volume backscattering strength to identify fish and plankton [J]. ICES Journal of Marine Science, 2002, 59(4): 794-804.
- [36] Foote K G, Stanton T K. Acoustical methods [M]//Harris R P, Wiebe P H, Lenz J, *et al.* Zooplankton Methodology Manual. London: Academic Press, 2000: 223-258.
- [37] 王荣, 陈亚瞿, 左涛, 等. 黄、东海春秋季节磷虾的数量分布及其与水文环境的关系[J]. 水产学报, 2003, 27(S): 31-38.
Wang R, Chen Y Q, Zuo T, *et al.* Quantitative distribution of euphausiids in the Yellow Sea and the East China Sea in spring and autumn in relation to the hydrographic conditions [J]. Journal of Fisheries of China, 2003, 27(S): 31-38 (in Chinese).
- [38] Terazaki M. Surface swarms of a euphausiid *Euphausia pacifica* in Otsuchi bay, northern Japan [J]. Bulletin of the Plankton Society of Japan, 1980, 27(1): 19-25.
- [39] 陈峻峰, 左涛, 王秀霞. 南黄海浮游动物主要种类数量分布年间比较[J]. 海洋学报, 2013, 35(6): 195-203.
Chen J F, Zuo T, Wang X X. Interannual abundance variations of the dominant zooplankton species in the southern Yellow Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(6): 195-203 (in Chinese).
- [40] Ryan T E, Downie R A, Kloser R J, *et al.* Reducing bias due to noise and attenuation in open-ocean echo integration data [J]. ICES Journal of Marine Science, 2015, 72(8): 2482-2493.
- [41] Chu D, Wiebe P H. Measurements of sound-speed and density contrasts of zooplankton in Antarctic waters [J]. ICES Journal of Marine Science, 2005, 62(4): 818-831.
- [42] Køgelier J W, Falk-Petersen S, Kristense Å, *et al.* Density-and sound speed contrasts in sub-Arctic zooplankton [J]. Polar Biology, 1987, 7(4): 231-235.
- [43] SC-CAMLR. Report of the fifth meeting of the subgroup on acoustic survey and analysis methods [C]//Report of the Twenty-ninth meeting of the Scientific Committee (SC-CAMLR-XXIX). Hobart, Australia: CCAMLR, 2010: 147-172.
- [44] Yoon W D, Cho S H, Lim D, *et al.* Spatial distribution of

- Euphausia pacifica* (Euphausiacea: Crustacea) in the Yellow Sea [J]. *Journal of Plankton Research*, 2000, 22(5): 939-949.
- [45] 左涛, 王俊, 吴强, 等. 2015年5月份黄海及东海北部大型水母分布及生物量估算[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(1): 195-204.
- Zuo T, Wang J, Wu Q, *et al.* Spatial distribution and biomass of large jellyfish in the Yellow Sea and northern part of the east China Sea in May 2015 [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(1):195-204 (in Chinese).
- [46] Madureira L S P, Everson I, Murphy E J. Interpretation of acoustic data at two frequencies to discriminate between Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) and other scatterers [J]. *Journal of Plankton Research*, 1993, 15(7): 787-802.
- [47] Brierley A S, Ward P, Watkins J L, *et al.* Acoustic discrimination of southern ocean zooplankton [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1998, 45(7): 1155-1173.
- [48] Lawson G L, Barange M, Fréon P. Species identification of pelagic fish schools on the South African continental shelf using acoustic descriptors and ancillary information [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2001, 58(1): 275-287.
- [49] Woodd-Walker R S, Watkins J L, Brierley A S. Identification of Southern Ocean acoustic targets using aggregation backscatter and shape characteristics [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2003, 60(3): 641-649.

Acoustical identification and density estimation of *Euphausia pacifica* in the Yellow Sea

WANG Xinliang^{1,2}, ZHAO Xianyong^{1*}, ZUO Tao¹, LI Xiansen¹

(1. Key Laboratory for Fishery Resources and Eco-environment, Shandong Province (FRES),

Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture,

Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

2. College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: *Euphausia pacifica* is a key species of zooplankton in the Yellow Sea ecosystem. To estimate the biomass and distribution of *E. pacifica* is essential for better understanding local ecosystem structure and energy flow. However, due to its avoidance to zooplankton net, it is difficult to quantify the krill biomass using traditional vertical net sampling method. Based on acoustic and biological data of *E. pacifica* swarms collected in the Yellow Sea in January 2010, the target strength (*TS*) of *E. pacifica* at 38 and 120 kHz was analyzed using SDWBA theoretical model. Moreover, the *E. pacifica* swarms were identified using dB-differencing method based on 38 and 120 kHz acoustic data and the krill density in the sound scattering layers (SSL) was estimated subsequently. Numerical simulation showed that the *TS* of *E. pacifica* was sensitive to its orientation and length distribution. The *TS* at 120 kHz was obviously higher than 38 kHz, while the difference decreased with increasing krill length. A linear relationship with an intercept of 14.1 dB was observed for the mean volume backscattering strength (MVBS) between the two frequencies. Based on 120 kHz data, the density of *E. pacifica* in the SSL was estimated between 1.8 and 2351.8 ind/m³ with a mean of 255.1 ind/m³. This paper preliminarily introduced the species identification and density estimation of *E. pacifica* based on the dB-differencing method, which provides useful reference for the acoustical estimation of zooplankton biomass. To improve the accuracy and precision, further investigations on the parameters in the *TS* model and the target discrimination method are needed.

Key words: *Euphausia pacifica*; target strength; dB-differencing; target discrimination; stock density

Corresponding author: ZHAO Xianyong. E-mail: zhaoxy@ysfri.ac.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (40976103)