

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.18111

## 南极南奥克尼群岛 2017 年春季南极磷虾资源声学评估

王腾<sup>1</sup>, 朱国平<sup>2, 3, 4</sup>, 童剑锋<sup>2, 3, 4</sup>, 许柳雄<sup>2, 3, 4</sup>

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300;
2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
3. 上海海洋大学大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306;
4. 上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306

**摘要:** 南极磷虾(*Euphausia superba*)为南大洋中上层生态系统的关键种, 对其生物量的研究有助于更准确地掌握磷虾的生态和分布信息。基于 2017 年我国南极磷虾声学调查采集的断面回波映像, 应用声学回波后处理软件(Echoview), 评估了南奥克尼群岛周边水域的磷虾生物量。该海域磷虾体长范围为 25.50~49.21 mm, 平均体长为(33.01±4.06) mm; 其中雌性平均体长为(33.15±3.90) mm, 雄性平均体长为(32.68±4.43) mm, 雌、雄磷虾体长无显著性差异。本海域声学映像可分为 1338 个积分单元, 最大单元磷虾密度为 554.07 g/m<sup>2</sup>, 最小单元密度值为 0 g/m<sup>2</sup>。调查海域磷虾分布不均匀, 87.90%的积分单元无磷虾生物量。磷虾平均密度为 71.01 g/m<sup>2</sup>, 总生物量为 1.77×10<sup>6</sup> t, 密度差异系数为 97.4%。磷虾主要分布在水深<200 m 的南奥克尼群岛大陆架海域, 群岛东侧磷虾生物量多于西侧。积分单元中磷虾密度大于 450 g/m<sup>2</sup>但小于 600 g/m<sup>2</sup>的有 2 个, 群岛东西两侧各 1 个; 密度值大于 300 g/m<sup>2</sup>但小于 450 g/m<sup>2</sup>的积分单元有 6 个, 5 个位于群岛东侧。远离群岛的 2 个断面(1, 9)和调查海域中心的 2 个断面(5, 6)磷虾生物量较少。本海域磷虾的昼夜垂直移动对磷虾生物量评估也无影响。磷虾白天聚集在 60~180 m 水层, 随着时间推移, 磷虾逐渐向上或向下移动。光照强度是触发磷虾白天下沉、夜晚上浮的因素之一。

**关键词:** 南极磷虾; 生物量评估; 回波映像; 南奥克尼群岛; 声学调查

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)02-0333-09

南极磷虾(*Euphausia superba* Dana 1850, 简称“磷虾”)是南大洋高营养级生物的主要饵料<sup>[1-2]</sup>, 也是浮游生物的重要捕食者<sup>[3-4]</sup>, 在生态系统的能量流动过程中起着重要作用。磷虾早期研究主要集中在其生物学特性上, 对生物量的评估涉及较少<sup>[5-7]</sup>。20 世纪 70 年代, 磷虾资源成为南极海洋生物资源养护委员会(Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR)的重要管理对象, 磷虾生物量开始成为研究重点。研究人员使用不同的方法评估了南极磷虾的生物量, 如 Gullard<sup>[8]</sup>基于浮游动物干重与湿重间的转换系数, 初步评估了南极磷虾的总生物量,

但该方法评估精度较低, 稳定性差。此后, 研究人员<sup>[9-11]</sup>先计算磷虾生产量, 再根据生产量(简称“P/B 法”)与生物量之比评估其生物量, 该方法的评估精度较高, 但磷虾的集群行为导致其只适用于小尺度范围的生物量评估。P/B 法的缺点促使更多的研究人员使用网具采样法评估磷虾生物量<sup>[12-16]</sup>, 然而专业采样网低估生物量, 商业拖网高估生物量的缺点导致网具法仍存在一定误差。声学评估法以其采样时空范围广、评估精度高, 且不会对资源造成伤害等优点, 成为了现今磷虾生物量评估的主要方法。CCAMLR 于 2000 年对南极半岛的磷虾生物量进行了声学评估<sup>[17]</sup>。Nicol 等<sup>[18]</sup>发

收稿日期: 2018-06-08; 修订日期: 2018-10-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41776185, 41606210); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2018YB01); 农业部南极海洋生物资源开发利用项(D8002-16-8007-2)。

作者简介: 王腾(1989-), 男, 博士, 主要从事生物资源声学评估研究. E-mail: twangshanghao@163.com

通信作者: 许柳雄, 教授, 主要从事渔业资源学研究. E-mail: lxxu@shou.edu.cn

现南极半岛海域磷虾生物量最多, 罗斯海最少。Siegel<sup>[19]</sup>使用声学方法评估了南极海域的磷虾总生物量。

中国于 1985 年开始评估磷虾生物量, 多使用网具法, 如王荣等<sup>[20]</sup>使用 IKMT 网(Isaccs-Kidd midwater trawl, IKMT)估算出乔治王岛东北海域的磷虾平均丰度为 1.40 ind/m<sup>3</sup>, 郭南麟等<sup>[21]</sup>使用 IKMT 网估算出普里兹湾外海的磷虾平均密度为 32.59 g/m<sup>2</sup>, 张晔等<sup>[22]</sup>使用商业拖网评估出南奥克尼群岛海域的磷虾平均丰度为 44.40 ind/m<sup>3</sup>。需要指出的是, 网具法的评估精度有待完善。声学评估法是现今国际上研究磷虾生物量的主流方法, 也是我国今后的重点研究方向。

南奥克尼群岛海域是中国磷虾渔业的重要作业海域, 中国尚未开展该海域的磷虾声学生物量评估, 对该海域磷虾资源及其分布的科学研究有助于更好地预测磷虾渔场, 指导磷虾渔业生产。本文基于 2017 年 3—4 月断面调查采集的回波映像, 使用声学评估方法, 评估南奥克尼群岛海域的磷虾生物量, 研究结果可为 CCAMLR 现行的反馈式磷虾资源管理提供基础数据, 对于制定科学合理的磷虾渔业养护管理措施, 维护我国渔业利益, 均具有积极意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查海域

海上调查基于我国磷虾拖网渔船“龙腾”轮, 船舶总长 120.7 m, 宽 19 m, 吃水 6.63 m, 主机功率 2×2650 kW (7200 HP)。调查海域范围为 59°S~61°S, 41°W~49°W, 以经度 1°为间隔设置了 9 个

调查断面, 调查时间为 2017 年 3 月 27 日—4 月 4 日(因调查海域海况等, 实际航线如图 1 所示)。调查期间航速一般为 10 knots。

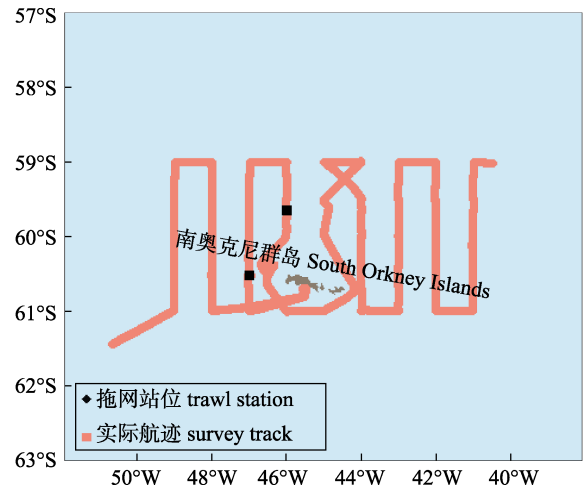


图 1 南奥克尼群岛声学调查实际航迹及拖网位置  
Fig. 1 Acoustic survey track and trawling location in the waters around the South Orkney Islands

### 1.2 磷虾样品采集网具

调查期间使用磷虾商业拖网采集磷虾样品, 拖网总长 108.8 m, 网口网目尺寸 400 mm, 网囊网目尺寸 14.4 mm。根据科学探鱼仪磷虾映像情况确定下网位置, 每次拖网 1 h, 从每网次磷虾样品中随机选择 200 尾磷虾测定其体长数据。

### 1.3 回波映像采集

使用渔船配置的 EK60 型(Simrad, Norway)科学探鱼仪采集磷虾回波映像, 探鱼仪包含 3 个工作频率(38 kHz、70 kHz 和 120 kHz), 参考 Watkins 等<sup>[23]</sup>设置采集参数(表 1)。因调查期间海上环境恶劣, 调查结束后在福克兰群岛的伯克利海峡(Berkeley

表 1 EK60 换能器参数设置  
Tab. 1 Main settings of EK60 transducer

换能器类型 transducer type	ES38B	ES70-7C	ES120-7C
波束类型 beam type	分裂 split	分裂 split	分裂 split
脉冲长度/ms pulse length	1.024	1.024	1.024
脉冲间隔/s pulse duration	2	2	2
功率/w power	2000	750	250
声速/(m/s) sound speed	1453	1453	1453
换能器增益/dB transducer gain	25.36	26.78	26.87
吸收系数/(dB/km) absorption coefficient	10.20	17.90	25.80
Sa 修正/dB Sa correction	-0.64	-0.72	-0.49

Sound, 51°34'S, 57°56'W)使用标准球法<sup>[24]</sup>对探鱼仪进行校正。

### 1.4 回波映像预处理

使用 Ecoview (v6.1, Echoview Software Pty. Ltd., Australia)软件预处理原始回波映像。换能器表面的船底气泡层回波对海表以下 15 m 范围内的回波映像产生干扰<sup>[25]</sup>, 软件中的“可视线(visual line)”变量可有效去除海表面及海底的干扰回波; 再使用“侵蚀滤波(erosion filter)”、“膨胀滤波 dilation filter)”, “中值滤波(median filter)”和“背景噪声移除(background noise removal)”等多个变量去除船载其他声学设备的干扰噪声<sup>[26]</sup>及海洋背景噪声<sup>[27]</sup>。

### 1.5 磷虾回波判定

预处理后的回波映像还包含磷虾信号和桡足类、樽海鞘, 鱼类等非磷虾信号, 本文使用  $\Delta S_{v120-38}$  频差法(120 kHz 和 38 kHz 磷虾目标强度差值)将非磷虾信号去除。 $\Delta S_{v120-38}$  的上限与下限根据海上采样确定的 99%磷虾体长频次分布, 使用磷虾目标强度模型(stochastic distorted-wave Born approximation model, SDWBA)计算得出<sup>[28]</sup>。磷虾目标强度模型公式如下:

$$TS(kL) = A \left[ \frac{\log_{10}(BkL)}{BkL} \right]^c + D(kL)^6 + E(kL)^5 + F(kL)^4 + G(kL)^3 + H(kL)^2 + IkL + J + 20 \log_{10} \left( \frac{L}{L_0} \right) \quad (1)$$

式中,  $A \sim J$ 为模型系数(表 2),  $L$ 为磷虾样本体长,  $L_0$ 为磷虾参考体长(38.35 mm),  $k$ 为脉冲数目。磷虾倾角(krill orientation)分布为 $(-20^\circ \pm 28^\circ)$ <sup>[28]</sup>, 其中  $0^\circ$ 代表磷虾处于水平位置, 此时声波从磷虾正上方入射, 正倾角表示磷虾头朝上, 负倾角表示磷虾头朝下。磷虾肥胖度(fatness coefficient)、磷虾相对于背景海水间的声速比(sound-speed contrast)和密度比(density contrast)参考 Fielding 等<sup>[25]</sup>。

### 1.6 磷虾密度和密度差异系数计算

调查海域存在两处磷虾明显聚集区, 将这两处的磷虾体长数据视作整个调查海域的磷虾体长数据, 以计算密度及生物量。参考相关文献[25, 27], 本文将回波判定后的各断面回波映像划分为  $1 \text{ nmi} \times$

250 m 的单元, 通过对单元中的磷虾回波积分, 得到各单元的磷虾单位平方海里声学散射系数 NASC (nautical area scattering coefficient, NASC), 再通过相关公式得出各断面的磷虾密度  $\rho_w$ , 最终得出调查海域的磷虾平均密度  $\bar{\rho}$  与总生物量  $B$ 。

表 2 目标强度模型系数  
Tab. 2 Krill target strength model coefficients

模型系数 model coefficient	系数值 value
<i>A</i>	6.64558746
<i>B</i>	$1.27909076 \times 10^{-1}$
<i>C</i>	$4.46318146 \times 10^{-1}$
<i>D</i>	$-1.19209591 \times 10^{-11}$
<i>E</i>	$7.42324712 \times 10^{-9}$
<i>F</i>	$-1.73916236 \times 10^{-6}$
<i>G</i>	$1.86327198 \times 10^{-4}$
<i>H</i>	$-8.67465215 \times 10^{-3}$
<i>I</i>	$1.32140873 \times 10^{-1}$
<i>J</i>	$-8.09830343 \times 10^1$

磷虾 NASC 计算公式为:

$$NASC = 4\pi \times 1852^2 \times 10^{10} \times \frac{S_v}{pT} \times 250 \quad (2)$$

式中,  $S_v$ 为磷虾体积散射强度(volume backscattering strength, dB re  $1 \text{ m}^{-1}$ ),  $pT$ 为单元脉冲采样比例。断面磷虾密度  $\rho_w$ (单位  $\text{g/nmi}^2$ )的计算参考 MacLennan 等<sup>[29]</sup>的公式:

$$\rho_w(\text{g/nmi}^2) = NASC \times C \quad (3)$$

式中,  $C$ 为磷虾 NASC-密度转换因子:

$$C = \frac{W}{\sigma_{sp}} \quad (4)$$

式中,  $W$ 为磷虾湿重(单位 g),  $\sigma_{sp}$ 为磷虾散射截面积(单位  $\text{m}^2$ ), 2个参数均是基于磷虾体长频次分布的加权平均值。

$$W_i = 5.5 \times 10^{-6} \times L_i^{3.2059} \quad (5)$$

$$\sigma_{sp}(l_i) = 4\pi 10^{TS/10} \quad (6)$$

式中,  $l_i$ 为  $i$ 体长分段区间长度(单位 mm),  $W_i$ 为  $i$ 体长分段的磷虾重量,  $TS$ 为磷虾单体目标强度。

$$W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \times W_i \quad (7)$$

$$\sigma_{sp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \times \sigma_{sp}(l_i) \quad (8)$$

$n$  为磷虾体长分段数目,  $f_i$  为  $i$  体长分段磷虾个数。因此  $\rho_w$  可另表示为:

$$\rho_w(\text{g}/\text{m}^2) = \text{NASC} \times \frac{W}{\sigma_{\text{sp}}} \times \frac{1}{1852^2} \quad (9)$$

其单位由  $\text{g}/\text{nmi}^2$  转换为  $\text{g}/\text{m}^2$ 。

调查海域磷虾平均密度  $\bar{\rho}$  的计算公式为

$$\bar{\rho}(\text{g}/\text{m}^2) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \rho_{wj} \quad (10)$$

式中,  $N$  为调查海域断面数目,  $\rho_{wj}$  为第  $j$  个断面的磷虾密度。

调查海域磷虾生物量  $B$  (单位 t), 计算公式为:

$$B = \bar{\rho} \times A \quad (11)$$

式中,  $A$  代表调查海域面积 (单位  $\text{km}^2$ )。

磷虾密度差异系数 (coefficient of variation, CV) 计算公式为

$$\text{CV} = 100 \frac{\sqrt{\text{Var}(\bar{\rho})}}{\bar{\rho}} \quad (12)$$

式中,  $\text{Var}(\bar{\rho})$  为磷虾密度方差, 公式为

$$\text{Var}(\bar{\rho}) = \frac{\sum_{j=1}^N (\rho_j - \bar{\rho})^2}{N(N-1)} \quad (13)$$

### 1.7 磷虾垂直分布

结合调查海域的日出日落时间, 本文参考 Watanabe<sup>[30]</sup> 方法, 将一昼夜分为 4 个时段: 6:00—8:00 为黎明 (DWN), 8:00—16:00 为白天 (DAY), 16:00—18:00 为黄昏 (DSK), 18:00—6:00 (次日) 为黑夜 (NIT)。根据 Ross 等<sup>[31]</sup> 的研究和本文回波映像处理深度, 垂直方向上划分为 15~60 m、60~120 m、120~180 m、180~250 m 共 4 个深度段, 以确定不同时段和深度段的磷虾分布比例。

### 1.8 统计分析方法

本文使用独立样本  $t$  检验分析雌雄磷虾体长间的差异性, Mann-Whitney U 检验分析调查海域 9 个声学断面的积分单元平均 NASC 和  $S_v$  值有无昼夜显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 磷虾体长组成

调查海域的磷虾样品体长范围为 25.50~49.21 mm, 平均体长为 (33.01±4.06) mm (图 2)。采

集的 400 尾磷虾中雌性 280 尾, 雄性 120 尾。雌性平均体长为 (33.15±3.90) mm, 雄性平均体长为 (32.68±4.43) mm。雌雄磷虾体长无显著差异 (独立样本  $t$  检验,  $P=0.19>0.05$ )。

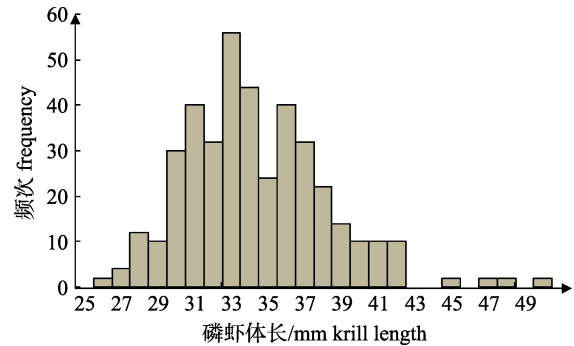


图 2 2017 年春季南奥克尼群岛海域南极磷虾的体长频次分布

Fig. 2 Length distribution of Antarctic krill around the South Orkney Islands in spring of 2017

### 2.2 调查海域磷虾生物量

本海域回波映像可分为 1338 个积分单元, 最大单元磷虾密度为  $554.07 \text{ g}/\text{m}^2$ , 最小单元密度值为  $0 \text{ g}/\text{m}^2$ 。调查海域磷虾不均匀分布, 87.90% 的积分单元无磷虾生物量, 磷虾平均密度为  $71.01 \text{ g}/\text{m}^2$ , 总生物量为  $1.77 \times 10^6 \text{ t}$ , CV 值为 97.4%。9 个声学断面的积分单元平均 NASC 和  $S_v$  值均无昼夜显著性差异 (表 3, Mann-Whitney U 检验,  $P_{\text{NASC}}=0.55>0.05$ ;  $P_{S_v}=0.39>0.05$ )。

### 2.3 磷虾垂直分布

黎明时段磷虾分散栖息在各水层 (图 3), 15~60 m 水层的磷虾密度最大 ( $32.36 \text{ g}/\text{m}^2$ )。白天时段 81.97% 的磷虾分布在 60~180 m 水深范围, 该深度段磷虾密度为  $58.21 \text{ g}/\text{m}^2$ 。黄昏时段磷虾从白天的 60~180 m 水层分别向上或向下移动, 15~60 m 水层的磷虾密度由  $5.03 \text{ g}/\text{m}^2$  增大到  $23.72 \text{ g}/\text{m}^2$ , 180~250 m 水层的磷虾密度由  $7.77 \text{ g}/\text{m}^2$  增大到  $10.42 \text{ g}/\text{m}^2$ 。夜晚时段磷虾继续向浅水层或深水层移动, 15~60 m 水层的磷虾密度增大为  $40.62 \text{ g}/\text{m}^2$ , 180~250 m 水深范围内的磷虾密度增大至  $12.87 \text{ g}/\text{m}^2$ 。

### 2.4 磷虾水平分布

磷虾主要分布在水深 <200 m 的南奥克尼群岛大陆架海域, 群岛东侧磷虾生物量多于西侧

表 3 调查海域断面昼夜平均单位平方海里声学散射系数(NASC)和体积散射强度( $S_v$ ) values in the nine transects survey area around the South Orkney Islands  $n=68; \bar{x}\pm SD$

断面编号 transect number	NASC/(m <sup>2</sup> /nmi <sup>2</sup> )		$S_v$ /dB	
	白天 day	夜晚 night	白天 day	夜晚 night
1	18.53±3.42	13.37±2.92	-77.20±3.82	-78.51±3.51
2	28.92±5.84	27.21±4.26	-76.94±2.82	-77.10±3.51
3	38.11±10.35	38.04±8.21	-76.81±2.94	-76.98±1.55
4	168.91±25.71	167.91±28.27	-76.03±1.67	-76.29±2.86
5	25.21±13.22	24.72±10.88	-76.57±1.49	-76.71±2.84
6	53.21±18.30	52.38±17.41	-76.43±1.93	-76.51±2.38
7	122.25±21.29	121.62±20.56	-76.22±3.86	-76.45±2.52
8	15.80±2.23	14.40±2.63	-77.93±2.10	-80.82±2.25
9	16.12±24.11	14.91±18.94	-77.85±3.41	-78.79±4.25

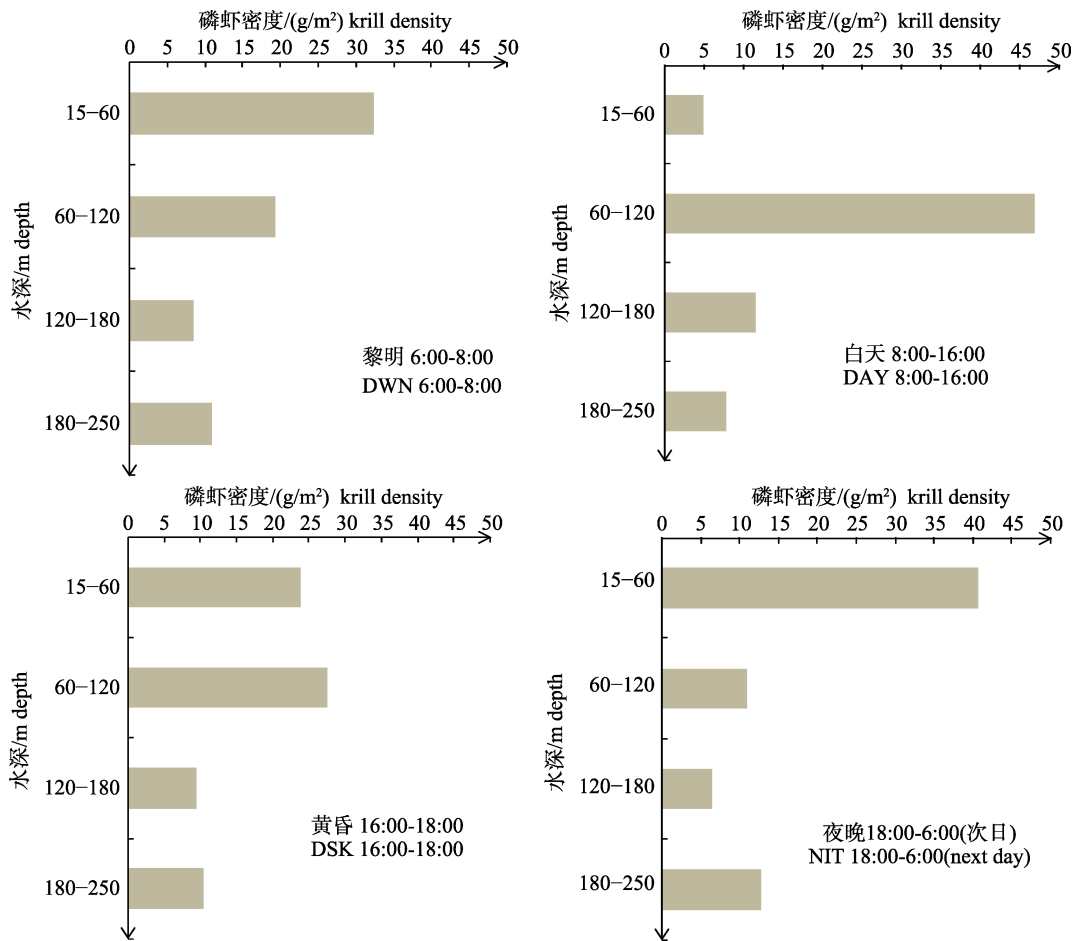


图 3 2017 年春季南奥克尼群岛海域南极磷虾垂直分布  
Fig. 3 Vertical distribution of Antarctic krill around the South Orkney Islands in the spring of 2017

(图 4)。积分单元中磷虾密度大于 450 g/m<sup>2</sup>但小于 600 g/m<sup>2</sup>的有 2 个, 群岛东西两侧各 1 个; 密度值大于 300 g/m<sup>2</sup>但小于 450 g/m<sup>2</sup>的积分单元有

6 个, 5 个位于群岛东侧。远离群岛的 2 个断面(1, 9)和调查海域中心的 2 个断面(5, 6)磷虾生物量较少。

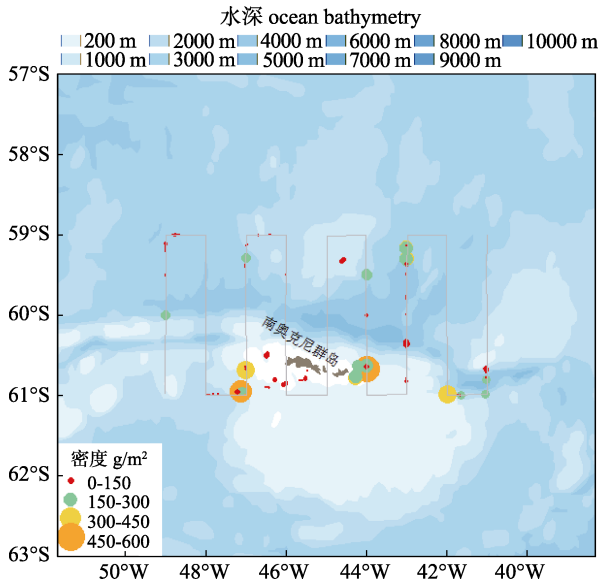


图 4 2017 年春季南奥克尼群岛海域  
南极磷虾密度水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of Antarctic krill density values around the South Orkney Islands in the spring of 2017

### 3 讨论

#### 3.1 渔船噪声去除

本文先后使用“侵蚀滤波”、“膨胀滤波”，“中值滤波”等变量去除船载声学设备干扰噪声并修复磷虾信号。侵蚀滤波变量可去除声强与磷虾回波重合的干扰噪声，但去噪声的同时会造成磷虾信号丢失，需要采用适当措施重构磷虾信号。膨胀滤波变量可重构磷虾回波，膨胀处理后磷虾信号强度范围增大。相比王新良等<sup>[26]</sup>的方法，本文在磷虾回波信号重构时，增加了中值滤波变量处理，可避免磷虾回波周围可能存在的极值噪声对信号重构的影响。

海底回波及海表面气泡层会造成生物量评估的误差，Fielding 等<sup>[25]</sup>将海表面以下 15 m 及海底以上 2 m 范围内的声学映像去除。Tarling 等<sup>[27]</sup>将海表面以下 13 m 及海底以上 5 m 范围内的声学映像去除。基于渔船吃水深度及声学映像中的虾群分布情况，本文去除海表面以下 15 m 及海底以上 5 m 范围内的声学映像，可在去除海底回波及海表面气泡层的同时不改变磷虾整体映像。

#### 3.2 磷虾回波判定

磷虾回波判定是磷虾生物量声学评估的关键

一环，回波判定的精度将直接影响生物量评估的准确性。相比 Fielding 等<sup>[25]</sup>和 Niklitschek 等<sup>[32]</sup>使用的 95%磷虾体长频次分布，本文 99%磷虾体长分布覆盖范围更广，能判定回波映像中的小个体磷虾信号。南极磷虾对 70 kHz 的声波响应最强，但以往使用的声学评估所用仪器频率主要有 38 kHz、120 kHz 和 200 kHz，导致现行的回波判定仍使用 120-38 的双频差或 120-38 及 200-120 的三频差<sup>[25, 27, 33]</sup>，本文据此使用 120-38 的双频差判定磷虾回波。此外，磷虾声学评估的深度一般不深于 250 m，也回避了 120 kHz 有限的探测水深对评估的影响。

#### 3.3 调查海域磷虾生物量

磷虾声学评估通常只使用白天的映像，以避免磷虾昼夜垂直移动对生物量评估的影响<sup>[34]</sup>。然而，La 等<sup>[35]</sup>发现调查断面的磷虾平均  $S_v$  值无昼夜显著性差异，认定磷虾昼夜垂直移动对生物量评估无影响。本海域磷虾的昼夜垂直移动对磷虾生物量评估也无影响(表 5)，因此调查海域的昼夜回波映像都用来评估磷虾生物量。调查海域的恶劣海况和较高的拖网采样成本导致渔船只采集了两个网次的磷虾体长数据，本文使用较少的体长数据可能导致生物量评估误差较大。将来可在渔船上配置专业磷虾采样网(如 RMT-8, IKMT)，同时增加采样次数以扩大海域覆盖度，获得更准确的磷虾体长频次分布数据，以提高生物量评估精度。

#### 3.4 磷虾分布

磷虾白天聚集在 60~180 m 水层，随着时间推移，磷虾逐渐向上或向下移动。光照强度是触发磷虾白天下沉、夜晚上浮的因素之一，然而部分磷虾在夜晚下沉到更深水层，可能是捕食深水层的饵料<sup>[36]</sup>。调查海域磷虾不均匀分布，大部分区域无磷虾生物量(图 4)。磷虾的不均匀分布是其重要的行为特征，受多种环境因素影响。Fielding 等<sup>[25]</sup>发现磷虾密度与海表温度有负相关关系；Leonori 等<sup>[37]</sup>发现罗斯海的磷虾主要集中于大陆架区域，与海水盐度有负相关关系，可能是磷虾聚集区域的海冰融化导致了海水盐度降低；Lawson 等<sup>[38]</sup>发现秋季垂直方向的磷虾密度与叶绿素浓度有负相关关系，水平方向流速梯度变化较小的区域，磷

虾生物量较大。本文采用声学方法评估了调查海域的磷虾生物量, 将来通过海上调查采集的环境数据和磷虾分布信息间的协同分析, 可研究磷虾资源分布的环境驱动机制, 有助于更好地预测磷虾渔场, 指导磷虾渔业生产。

**致谢:** 感谢中国水产公司“龙腾”轮船长和船员在取样过程中给予的大力配合与帮助。感谢南极海洋生物资源开发利用项目相关科学观察员在获取数据过程中付出的辛勤劳动与努力。

#### 参考文献:

- [1] Laws R M. Seals and Whales of the Southern Ocean[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 1977, 279(963): 81-96.
- [2] Nicol S, Clarke J, Romaine S J, et al. Krill (*Euphausia superba*) abundance and Adélie penguin (*Pygoscelis adeliae*) breeding performance in the waters off the Béchervaise Island colony, east Antarctica in 2 years with contrasting ecological conditions[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2008, 55(3-4): 540-557.
- [3] Ross R M, Quetin L B, Haberman K L. Interannual and seasonal variability in short-term grazing impact of *Euphausia superba* in nearshore and offshore waters west of the Antarctic Peninsula[J]. Journal of Marine Systems, 1998, 17(1-4): 261-273.
- [4] Bernard K S, Steinberg D K, Schofield O M E. Summertime grazing impact of the dominant macrozooplankton off the Western Antarctic Peninsula[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2012, 62: 111-122.
- [5] Astheimer H. A length class model of the population dynamics of the Antarctic krill *Euphausia superba* Dana[J]. Polar Biology, 1986, 6(4): 227-232.
- [6] Ikeda T, Dixon P, Kirkwood J. Laboratory observations of moulting, growth and maturation in Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana)[J]. Polar Biology, 1985, 4(1): 1-8.
- [7] Miller D G M. Variation in body length measurement of *Euphausia superba* Dana[J]. Polar Biology, 1983, 2(1): 17-20.
- [8] Gulland J. The development of the resources of the Antarctic seas[J]. Antarctic Ecology, 1970, 1: 217-223.
- [9] Laws R M. The ecology of the Southern Ocean[J]. American Scientist, 1985, 73(1): 26-40.
- [10] Clark A. Energy Flow in the Southern Ocean Food Web[M]//Siegfried W R, Condy P R, Laws R M. Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs. Heidelberg: Springer, 1985: 573-580.
- [11] Brinton E, Townsend A W. Regional relationships between development and growth in larvae of Antarctic krill, *Euphausia superba*, from field samples[J]. Journal of Crustacean Biology, 1984, 4(5): 224-246.
- [12] Latogursky V I, Makarov R R, Maklygin L G. Distribution, biomass and characteristics of the *Euphausia superba* fishery around South Georgia (Subarea 48.3)[R]. Selected Scientific Papers. WG-KRILL-90/19, Hobart: CCAMLR, 1991: 123-149.
- [13] Witek Z, Kittel W, Czykieta H, et al. Macrozooplankton in the southern Drake Passage and in the Bransfield Strait during BIOMASS-SIBEX (December 1983-January 1984)[J]. Polish Polar Research, 1985, 6(1): 95-115.
- [14] Miller D G M. Results from biological investigations of krill (*Euphausia superba*) in the Southern Indian Ocean during SIBEX I[R]. Memoirs of National Institute of Polar Research Special Issue, 1986, 40: 117-139.
- [15] Brinton E, Loeb V J, Macaulay M C, et al. Variability of *Euphausia superba*, populations near Elephant Island and the South Shetlands: 1981 vs. 1984[J]. Polar Biology, 1987, 7(6): 345-362.
- [16] Fedotov A C. Krill biomass assessment in statistical area 48 from the RV ATLANTNIRO data-autumn 1989/90[R]. Selected Scientific Papers, WG-KRILL-90/21, Hobart: CCAMLR, 1991: 115-122.
- [17] Hewitt R P, Watkins J, Naganobu M, 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): 1215-1236.
- [18] Nicol S, Constable A J, Pauly T. Estimates of circumpolar abundance of Antarctic krill based on recent acoustic density measurements[J]. CCAMLR Science, 2000, 7(1): 87-99.
- [19] Siegel V. Distribution and population dynamics of *Euphausia superba*: summary of recent findings[J]. Polar Biology, 2005, 29(1): 1-22.
- [20] Wang R, Chen S H. Swarm structure of Antarctic krill (*Euphausia Superba* dana) in water northeast of King George Island, January 1985[J]. Antarctic Research, 1988, 1(2): 15-21. [王荣, 陈时华. 乔治王岛东北海域大磷虾群构成分析[J]. 南极研究, 1988, 1(2): 15-21.]
- [21] Guo N L, Chen X Z, Xu Z Y, et al. Distribution and a preliminary observation of the biomass of Antarctic krill in the Prydz Bay region by echogram analysis[J]. Antarctic Research, 1993(4): 90-103. [郭南麟, 陈雪忠, 徐震夷, 等. 南极普里兹湾外海大磷虾回波映像的分布分析和生物量的初步估算[J]. 南极研究, 1993(4): 90-103.]

- [22] Zhang Y, Li C L, Liu M T, et al. Abundance and structure of dominant zooplankton species in austral summer near South Shetland Islands, Antarctic[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(5): 945-953. [张晔, 李超伦, 刘梦坛, 等. 南极夏季南设得兰群岛周边海域浮游动物优势种群的分布、丰度及种群结构分析[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(5): 945-953.]
- [23] Watkins J L, Reid K, Ramm D, et al. The use of fishing vessels to provide acoustic data on the distribution and abundance of Antarctic krill and other pelagic species[J]. *Fisheries Research*, 2016, 178: 93-100.
- [24] Foote K G, Knudsen H P, Vestnes G, et al. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide[R]. ICES: Cooperative Research Report, 1987: No. 144.
- [25] Fielding S, Watkins J L, Collins M A, et al. Acoustic determination of the distribution of fish and krill across the Scotia Sea in spring 2006, summer 2008 and autumn 2009[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 59-60: 173-188.
- [26] Wang X L, Zhao X Y, Tang Y, et al. Removal of the inter-instrument acoustic interference and its application in the study of Antarctic krill swarms[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(2): 22-29. [王新良, 赵宪勇, 汤勇, 等. 声学仪器间干扰信号的消除及其在南极磷虾集群研究中的应用[J]. *渔业科学进展*, 2014, 35 (2): 22-29.]
- [27] Tarling G A, Klevjer T, Fielding S, et al. Variability and predictability of Antarctic krill swarm structure[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(11): 1994-2012.
- [28] CCAMLR. Report of the Thirty-third Meeting of the Scientific Committee[R]. Hobart, CCAMLR, 2010: 156. <https://www.ccamlr.org/en/system/files/e-cc-xxix.pdf>.
- [29] MacLennan D N, Simmonds E J. Fish and Fisheries Series. 5: Fisheries Acoustic[M]. London: Chapman and Hall, 1992: 3-25.
- [30] Watanabe Y. A set of brightness categories for examining diel change of catch efficiency of saury larvae and juveniles by a neuston net[J]. *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography*, 1990, 54: 237-241.
- [31] Ross R M, Hofmann E E, Quetin L B. Distribution of Antarctic krill and dominant zooplankton west of the Antarctic Peninsula[J]. *Foundations for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula*, 1996, 70: 199-217.
- [32] Niklitschek E J, Skaret G. Distribution, density and relative abundance of Antarctic krill estimated by maximum likelihood geostatistics on acoustic data collected during commercial fishing operations[J]. *Fisheries Research*, 2016, 178: 114-121.
- [33] CCAMLR. Report of the Meeting of the Subgroup on Acoustic Survey and Analysis Methods[R]. Hobart, CCAMLR, 2016: 7. <https://www.ccamlr.org/en/system/files/e-sc-xxxv-a04.pdf>.
- [34] Brierley A S, Watkins J L, Murray A. Interannual variability in krill abundance at South Georgia[J]. *Marine Ecology Progress*, 1997, 150(1-3): 87-98.
- [35] La H S, Lee H, Kang D, et al. Volume backscattering strength of ice krill (*Euphausia crystallophias*) in the Amundsen Sea coastal polynya[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 123: 86-91.
- [36] Bernard K S, Steinberg D K. Krill biomass and aggregation structure in relation to tidal cycle in a penguin foraging region off the Western Antarctic Peninsula[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2013, 70(4): 834-849.
- [37] Leonori I, Felice A D, Canduci G, et al. Krill distribution in relation to environmental parameters in mesoscale structures in the Ross Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 166: 159-171.
- [38] Lawson G L, Wiebe P H, Ashjian C J, et al. Euphausiid distribution along the Western Antarctic Peninsula—Part B: Distribution of euphausiid aggregations and biomass, and associations with environmental features[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2008, 55(3-4): 432-454.



## Acoustic estimation of *Euphausia superba* in the South Orkney Islands in austral spring 2017

WANG Teng<sup>1</sup>, ZHU Guoping<sup>2,3,4</sup>, TONG Jianfeng<sup>2,3,4</sup>, XU Liuxiong<sup>2,3,4</sup>

1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China
2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;
4. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

**Abstract:** Antarctic krill (*Euphausia superba*) is a key species in the Southern Ocean ecosystem, and knowledge regarding its biomass is essential to understand the ecology and distribution of krill. The acoustic data was collected across extensive gradients in the South Orkney Islands on the commercial fishing vessel *Long Teng*. Krill targets were identified in acoustic data using a multi-frequency identification window and converted to krill density using the Stochastic Distorted-Wave Born Approximation target strength model. The average krill length was  $(33.01 \pm 4.06)$  mm, with a maximum length of 49.21 mm and a minimum length of 25.50 mm. There was no significant difference between male and female krill length. The whole ecogram could be divided into 1338 integration units, of which 586 units were in daytime and 752 units were at night. The maximum krill density was  $554.07 \text{ g/m}^2$  and the minimum density was  $0 \text{ g/m}^2$ . The Antarctic krill were mainly aggregated, with 87.90% integration units having no biomass. There was no significant difference in diurnal NASC and  $S_v$  values of the 9 transects, which suggested that the diurnal vertical movement had no effect on the estimation of krill biomass. The average krill density was  $71.01 \text{ g/m}^2$  and the total biomass was  $1.77 \times 10^6 \text{ t}$  in this area. The krill were mainly aggregated in a 60–180 m water depth range in the daytime, and gradually moved upwards or downwards at night. Light intensity is one of the factors that influence the krill diurnal vertical movement. However, a proportion of the Antarctic krill sunk to deeper waters at night, which may be to prey on the deep-water food. The results of this study provide abundant information on krill distribution in this area and basic data for current feedback on the krill resource management of CCAMLR. In future, the research on the correlation between krill biomass and external factors (environmental factors, predators) can help us understand the population structures more accurately and predict the distribution of krill resources.

**Key words:** *Euphausia superba*; biomass estimation; acoustic ecogram; South Orkney Islands; acoustic survey

**Corresponding author:** XU Liuxiong. E-mail: luxx@shou.edu.cn