

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2018.18008

## 基于声学映像的南奥克尼群岛海域南极磷虾集群特征

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

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 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;
3. 上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
4. 中国水产科学院南海水产研究所, 广东 广州, 510300

**摘要:** 为确定南奥克尼群岛海域南极磷虾(*Euphausia superba*)集群特征, 本研究根据 2017 年 3—4 月我国南极磷虾探捕项目采集的断面声学数据, 使用通用声学数据后处理软件, 研究了该海域的南极磷虾集群特征信息。本研究共检测并提取了 2539 个磷虾集群的高度、长度、分布深度、集群间距、集群面积及集群磷虾密度信息, 其中白天集群 1389 个, 夜晚集群 1150 个。通过集群特征值的统计, 将该海域集群分为 3 类。聚类 A 的虾群密度最大 [ $(19.24 \pm 27.00) \text{ ind/m}^3$ ], 聚类 B 的虾群最深 [ $(174.74 \pm 53.30) \text{ m}$ ], 聚类 C 的虾群面积最大 [ $(2868.62 \pm 2149.75) \text{ m}^2$ ]。聚类 A 和聚类 B 的集群长度无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 聚类 A 和聚类 C 的集群深度无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。A 类集群主要分布在南奥克尼群岛北部及西北部的深水区, 水深  $> 1000 \text{ m}$ 。B 类和 C 类集群在整个调查海域均有分布, 其中 B 类集群多分布在群岛大陆架海域, 水深  $< 200 \text{ m}$ 。不同区域的集群分布信息不同, 离岛屿最近的东西两个断面集群较少, 分布比较分散。本研究结果表明大部分的磷虾个体位于少数的大型集群中, 集群磷虾密度和集群间距间存在正相关关系; 未来通过磷虾集群与外界因子(环境因子, 捕食者)相关性的研究, 可以帮助我们更为准确地了解集群结构与形成机制, 预测磷虾资源分布。

**关键词:** 南极磷虾; 集群特征; 声学调查; 南奥克尼群岛海域

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2018)06-1317-08

南极磷虾(*Euphausia superba*, 本文简称磷虾)是南大洋生态系统的关键种, 在生态系统的能量流动中起着重要的作用。磷虾是海洋中上层的集群生物, 集群行为伴随其生活史的大部分时间<sup>[1-2]</sup>。集群行为有助于磷虾个体获取食物<sup>[3]</sup>、增大繁殖几率<sup>[4]</sup>, 减少游泳的能量消耗<sup>[2]</sup>及躲避捕食者<sup>[5]</sup>。对磷虾集群特征及集群形成机制的研究有助于更全面地了解磷虾种群的生态习性, 同时集群与环境因子的关系也有助于在多层次上预测磷虾及其捕食者的时空分布<sup>[6-7]</sup>。

磷虾集群的研究已有多年历史, 涉及多个方

面。海表面荧光和光照强度会影响集群特征<sup>[8]</sup>, 集群内部的含氧量决定了内部磷虾个体之间的距离<sup>[9]</sup>。空间分布上, 不同海域磷虾的集群特征不同<sup>[10]</sup>, 小尺度范围内 ( $< 100 \text{ km}^2$ ), 集群内的磷虾个体没有生物学上的差异性<sup>[11]</sup>; 中尺度范围内 ( $100 \sim 10000 \text{ km}^2$ ), 大型磷虾集群内的个体小, 未成熟体多<sup>[8]</sup>, 同时不同类别的集群在垂直分布上也存在差异性<sup>[12-14]</sup>。此外集群结构还有季节与昼夜上的差异性<sup>[8]</sup>。

南极南奥克尼群岛海域是传统的磷虾渔业渔场, 也是磷虾幼体随海流补充进入种群的重要过

收稿日期: 2018-01-06; 修订日期: 2018-02-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41776185, 41606210); 国家重点研发计划项目(2018YFC1406801); 农业部南极海洋生物资源开发利用项目(D8002-18-0097).

作者简介: 王腾(1989-), 博士研究生, 研究方向为渔业资源声学评估. E-mail: twangshanghao@163.com

通信作者: 许柳雄, 教授, 研究方向为渔具渔法、金枪鱼渔业技术. E-mail: lxxu@shou.edu.cn

渡区域<sup>[15]</sup>, 对该海区的研究具有重要价值。对于集群的磷虾, 使用垂直波束探测的声学探测方法, 通过走航可以获得磷虾的高分辨率大时空尺度连续断面回波数据<sup>[1, 8]</sup>, 进而有效研究磷虾集群结构与特性。Coetzee<sup>[16]</sup>开发的 SHAPES 算法为研究磷虾集群的回波特征提供了便利条件。Tarling 等<sup>[8]</sup>基于该算法检测了斯科舍海的南极磷虾集群, 输出了该海域 4525 个集群的集群长度、集群高度、集群面积、集群深度、集群密度及集群间距信息。Krafft 等<sup>[17]</sup>基于该算法检测了南极海域西南大西洋区域 4791 个磷虾集群的相关信息。Bernard 等<sup>[18]</sup>使用 SHAPES 算法检测了南极半岛西部生态热点区域的磷虾集群。本研究利用 2017 年 3—4 月南奥克尼群岛海域磷虾资源调查期间采集的声学数据, 探究本海域南极磷虾的集群特征, 为了解南极海域磷虾生态行为, 提高南极磷虾资源探捕效率, 以期为南极海洋生物资源养护委员会(Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR)现行的反馈式磷虾资源管理提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查海域

海上调查基于我国商业磷虾拖网渔船“龙腾”轮, 渔船总吨位 7765 t, 船舶总长 120.7 m, 型宽 19 m, 型吃水 6.63 m, 主机功率 2×2650 kW (7200 HP)。南奥克尼群岛海域调查范围为 59°S~61°S, 41°W~50°W(图 1), 以经度 1°为间隔设置了 9 个声学调查断面, 每个断面以纬度 0.5°为间隔共设置了 43 个环境数据(温度、深度、盐度, 叶绿素等)采样站点。调查时间为 2017 年 3 月 27 日至 4 月 4 日, 调查期间航速一般为 10 kn。

### 1.2 磷虾样品采集网具

调查期间使用中层磷虾商业拖网进行磷虾采样, 拖网总长 108.8 m, 网口网目尺寸 400 mm, 网囊长度 28.8 m, 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, 调查期间共发现两处磷虾明显集群区域, 分别拖网 1 h 采集磷虾样品(图 1), 从中随机选择 400 尾磷虾进行生物学测定, 获取磷虾体长频率分布数据。

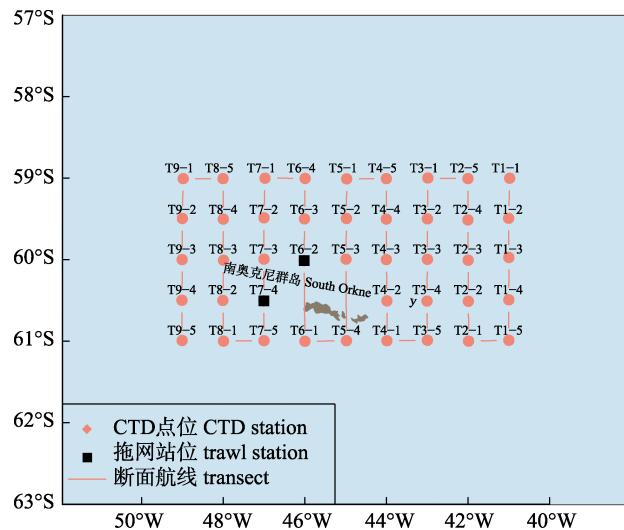


图 1 南奥克尼群岛声学调查断面、CTD 站位  
(黄色方块)及拖网位置(黑色方块)

Fig.1 Acoustic survey transects, CTD position  
(yellow squares) and trawling location (black squares)  
in the waters around South Orkney Islands

### 1.3 声学数据采集

声学数据由“龙腾”轮配置的科学探鱼仪(EK60 型, Simrad, Norway)采集, 该探鱼仪包含 3 个工作频率(38、70 和 120 kHz)。探鱼仪的参数参考 Watkins 等<sup>[19]</sup>设置(表 1)。因调查期间海上环境恶劣, 调查结束后选择海洋环境相近的区域使用标准球法<sup>[20]</sup>对探鱼仪进行了校正, 校正地点为福克兰群岛的伯克利海峡(Berkeley Sound 51°34'S, 57°56'W)。

表 1 EK60 科学探鱼仪参数设置  
Tab. 1 Main settings of EK60 echosounder

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

### 1.4 声学数据预处理

使用 Ecoview (v6.1, Echoview Software Pty. Ltd., Australia)软件预处理采集的校正声学数据。

受航行海况条件限制, 换能器表面以下的船底气泡层回波对海表面以下 15 m 水深范围内的声学数据产生覆盖干扰<sup>[21]</sup>, 本研究利用软件变量中的“可视线(Visual Line)”模块去除海表面及海底干扰的回波数据, 选定处理范围; 再使用软件变量中的多种过滤模块去除声学数据中的强噪声<sup>[8]</sup>及海洋背景噪声<sup>[22]</sup>。预处理后的声学数据用于磷虾的集群检测。

### 1.5 磷虾集群回波检测和提取

基于 EV 软件中的“集群检测模块(Detect Schools)”对 120 kHz 回波映像数据进行磷虾集群回波的检测和提取, 模块基于 SHAPES 算法, 包含 7 个参数: 最小单元长度(minimum candidate length)、最小单元高度(minimum candidate height)、最大水平连接距离(maximum horizontal linking distance)、最大垂直连接距离(maximum vertical linking distance)、最小集群长度(minimum total length)、最小集群高度(minimum total height)及声学回波阈值(data threshold)。最小单元长度与最小单元高度表示聚集的磷虾被检测为 1 个集群单元的长度和高度阈值下限。最大水平连接距离与最大垂直连接距离表示 2 个集群单元连接形成 1 个集群单元组的水平和垂直间距阈值上限, 集群检测时, 以这两个连接距离为长、短半轴的椭圆中心沿集群单元边界移动, 若其他集群单元的任意部分出现在椭圆内, 则 2 个集群单元就会被连接起来。最小集群长度与最小集群高度表示聚集的磷虾被判定为集群的长度与高度阈值下限。声学回波阈值表示参与集群检测的回波阈值下限。

集群检测原理如下: 先将最小单元长度和高度内的声学回波定义为“集群单元”, 再设置集群单元间的最大水平连接距离与垂直连接距离, 来判定两个回波单元能否组成新的集群单元组, 最后设置集群单元组的最小总长度和总高度。当多个集群单元通过连接的方式形成一个大的集群单元组, 且长度与高度达到设定的单元组最小总长度和总高度时, 就将该单元组定义为一个集群回波。参考 Tarling 等<sup>[8]</sup>的设置磷虾集群回波检测参数: 换能器的脉冲发射间隔为 2 s, 船速为 10 kn, 声学映像的最小水平分辨率为 10 m, 设置最小集

群长度为 20 m, 即 2 倍的最小水平分辨率; 脉冲周期为 1.024 ms, 垂直方向最小分辨率约为 0.75 m, 设置最小集群高度为 2 m, 略大于 2 倍的最小垂直分辨率。最小单元长度设置为 10 m, 最小单元高度设置为 1 m。最大水平连接距离设置为 15 m, 最大垂直连接距离定义为 5 m, 回波阈值为 -70 dB。集群检测完成后, 使用  $\Delta S_{v120-38}$  频差法去除集群内的非磷虾信号,  $\Delta S_{v120-38}$  的上限与下限根据海上采样确定的 95% 磷虾体长分布, 使用磷虾目标强度模型(SDWBA, stochastic distorted wave-borne approximation)计算得出。

### 1.6 集群特征的统计分析

集群特征的统计分析参考 Krafft 等<sup>[17]</sup>。表征磷虾集群特征的参数包括: (1)集群深度(m), 表示检测的磷虾集群所处深度; (2)集群厚度(m), 表示集群回波区域最大与最小深度差值; (3)集群长度(m), 表示集群区域脉冲发射数目时间内的渔船运动距离; (4)集群面积( $m^2$ ), 代表声学图像中集群不规则轮廓所包含的面积; (5)集群间距(m), 通过 R 语言中的‘sp’算法计算两个集群中点间距; (6)集群磷虾密度(ind/ $m^3$ ), 表示单位体积内的磷虾数目, 计算公式为  $N_v = 10^{(S_v - TS)/10}$ , 其中  $S_v$  是集群后向反射体积(dB re/1 m), TS 为磷虾的目标强度(dB); (7)集群丰度  $N_t$ (ind/m), 表示单个集群的磷虾总数, 计算公式为  $N_t = N_v A$ , 其中  $N_v$  为集群磷虾密度, A 为集群面积, 本参数不用于分析集群结构。将检测的磷虾集群分为昼夜集群, 使用 Mann-Whitney U 检验研究昼夜集群特征间总体分布的差异性, 该检验为零假设, 即假设昼夜集群特征值间无显著性差异; 如果  $P < 0.05$ , 则拒绝零假设, 即昼夜集群特征值间存在显著性差异。

将上述 6 个参数通过  $\log_{10}(x+1)$  转换及数据标准化, 再将标准化后的特征值进行主成分分析(Principal Component Analysis, PCA), 当 1 个主成分对各特征值的影响因子绝对值大于 70% 的最大影响因子绝对值时, 该主成分对集群特征有显著影响<sup>[13]</sup>。PCA 分析的结果输入 K-means 聚类分析<sup>[23]</sup>, 研究磷虾集群的聚类信息, 聚类数的估算参考 Calinski-Harabasz 准则<sup>[24]</sup>。聚类分析完成后, 使用 Kruskal-Wallis 检验研究不同类别集群特征

值的差异性。为了评估上述统计分析的稳定性,从集群特征值中随机选择 1000 组数据为样本,重新进行 PCA 分析和聚类分析,分析样本与总体的差异性。

## 2 结果与分析

### 2.1 磷虾集群特征值

南奥克尼群岛海域断面调查采集的声学映像数据共检测到 2539 个磷虾集群,其中白天集群 1389 个,夜晚集群 1150 个,白天集群数目多于夜晚。磷虾集群特征值如表 2 所示。

白天磷虾集群尺寸(集群长度、厚度,面积)小于夜晚集群。与夜晚相比,磷虾白天在深水层聚集,集群磷虾密度较低,集群间隔较近。昼夜磷虾集群各项特征值均存在显著性差异(表 3)。

### 2.2 集群特征值主成分分析

主成分分析确定了 3 个显著成分,可以解释集群特征值 87.43% 的方差(表 4)。第一个成分与集群厚度和集群面积有关,其中与集群面积的相

关性最大(0.93)。第二个成分与集群深度和集群磷虾密度有关,对集群磷虾密度的影响最大(0.87)。第三个成分可以解释 17.12% 的方差,对集群间距的影响最大(0.89)。3 个成分影响的磷虾集群特征值不同。

### 2.3 磷虾集群聚类分析

本海域磷虾集群可分为 2 个集群数目较多的聚类和 1 个集群数目较少的聚类(表 5),根据聚类集群数目分为 A、B、C 类(A>B>C)。A 类集群数目最多,集群密度最大,但集群面积最小,导致集群磷虾丰度最小,仅占总丰度的 10.17%。C 类集群数目虽最少,但集群面积最大,磷虾丰度也最大,占总丰度的 76.90%。A 类和 B 类集群长度无显著性差异,A 类和 C 类集群深度无显著性差异,B 类和 C 类集群各项特征值之间均存在显著性差异(表 6)。

3 次稳定性检验的结果表明,本研究 PCA 分析的结果可靠。3 次检验中,3 个成分均足以解释总的差异性,检验结果与原始结果的差异性在

表 2 南奥克尼群岛海域南极磷虾集群特征值

Tab. 2 Swarm characters of *Euphausia superba* in the area of South Orkney Islands

$\bar{x} \pm SD$

集群特征值 swarm character	整体 all	白天 day	夜晚 night
集群深度/m swarm depth	127.37±70.01	150.26±65.86	99.73±64.71
集群长度/m swarm length	48.52±127.74	36.28±78.52	63.31±167.92
集群厚度/m swarm thickness	6.63±7.63	6.09±6.29	7.28±8.95
集群面积/m <sup>2</sup> swarm area	409.88±2465.91	244.44±1157.46	609.69±3426.38
集群磷虾密度/(ind/m <sup>3</sup> ) swarm density	13.81±22.10	11.25±20.89	16.91±23.11
集群间距/m intra-swarm distance	1559.95±1975.12	1270.54±1184.94	1909.55±1286.38

表 3 南奥克尼群岛南极磷虾昼夜集群特征值差异性

Tab. 3 Diurnal variation of *Euphausia superba* swarm characters in the area of South Orkney Islands

集群特征值 swarm character	集群深度/m swarm depth	集群长度/m swarm length	集群厚度/m swarm thickness	集群面积/m <sup>2</sup> swarm area	集群磷虾密度 (ind/m <sup>3</sup> ) swarm density	集群间距/m swarm distance
Mann-Whitney U	468297	718216	727108	690400	640948	610409
渐进显著性(双侧) Asymp. Sig. (2-tailed)	0	0	0	0	0	0
精确显著性(双侧) Monte. Sig. (2-tailed)	0*	0*	0*	0*	0*	0*

注: \*表示有显著性差异( $P<0.05$ )。

Note: \* denotes significant difference ( $P<0.05$ ).

**表4 南奥尼克岛南极磷虾集群特征值的主成分分析结果**  
**Tab. 4 The principal component analysis of 6 different swarm characters of *Euphausia superba* in the area of South Orkney Islands**

集群特征值 swarm characters	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
方差/% variance	50.45	19.86	17.12	6.51	5.94	0.12
集群深度/m swarm depth	-0.06	<b>-0.82</b>	-0.36			
集群长度/m swarm length	0.65	-0.09	<b>0.66</b>			
集群厚度/m swarm thickness	<b>0.89</b>	0.31	-0.09			
集群面积/m <sup>2</sup> swarm area	<b>0.93</b>	0.15	0.32			
集群磷虾密度/(ind/m <sup>3</sup> ) swarm density	0.26	<b>0.87</b>	-0.04			
集群间距/m intra-swarm distance	0.06	0.23	<b>0.89</b>			

注: 黑体表示有显著影响。

Note: The bold font denotes significant impact.

**表5 不同聚类集群的特征值**  
**Tab. 5 Swarm characters of different cluster krill groups in the area of South Orkney Islands**

集群特征值 swarm character	$\bar{x} \pm SD$		
	A类 Cluster A (n=1179)	B类 Cluster B (n=1092)	C类 Cluster C (n=268)
集群深度/m swarm depth	93.97±61.01	174.74±53.30	81.08±48.10
集群长度/m swarm length	26.44±19.10	20.98±6.85	258.76±322.88
集群厚度/m swarm thickness	4.77±3.31	6.47±6.33	15.50±15.78
集群面积/m <sup>2</sup> swarm area	108.44±79.81	134.49±146.74	2868.62±2149.75
集群磷虾密度/(ind/m <sup>3</sup> ) swarm density	19.24±27.00	6.65±8.67	19.13±27.44
集群间距/m intra-swarm distance	2193.29±1857.93	8.92±29.60	5109.14±2206.61
集群丰度/(ind/m) swarm abundance	185.36±157.21	1058.09±1134.51	5692.94±3089.62

注: n 为聚类中的集群数目。

Note: n is the number of swarms.

**表6 不同聚类集群特征值的差异性分析**  
**Tab. 6 Comparison of differences in swarm characters from the 3 identified cluster groups**

聚类比较 cluster comparison	集群深度/m swarm depth	集群长度/m swarm length	集群厚度/m swarm thickness	集群面积/m <sup>2</sup> swarm area	集群密度/(ind/m <sup>3</sup> ) swarm density	集群间距/m inter-swarm distance
Avs. B	0*	0.12	0*	0*	0*	0*
Avs. C	0.07	0*	0*	0*	0*	0*
Bvs. C	0*	0*	0*	0*	0*	0*

注: \*表示有显著性差异( $P<0.05$ )。

Note: \* denotes significant difference ( $P<0.05$ ).

3%以内, 每个成分对各集群特征值的影响基本一致。聚类分析也确定了集群分为3类的可靠性, 分类后的集群特征与原始聚类特征的差异在5%以内。

## 2.4 不同聚类集群的水平分布

3个聚类集群的水平分布如图2所示: A类集群主要分布在南奥克尼群岛北部及西北部的深水区, 水深>1000 m。B类和C类集群在整个调查海

域均有分布, 其中B类集群多分布在群岛大陆架海域, 水深<200 m。不同区域的集群分布信息不同, 离岛屿最远的东西两个断面, 集群较少, 分布比较分散。

## 3 讨论

### 3.1 集群分布

本研究基于声学调查数据, 使用多个参数研

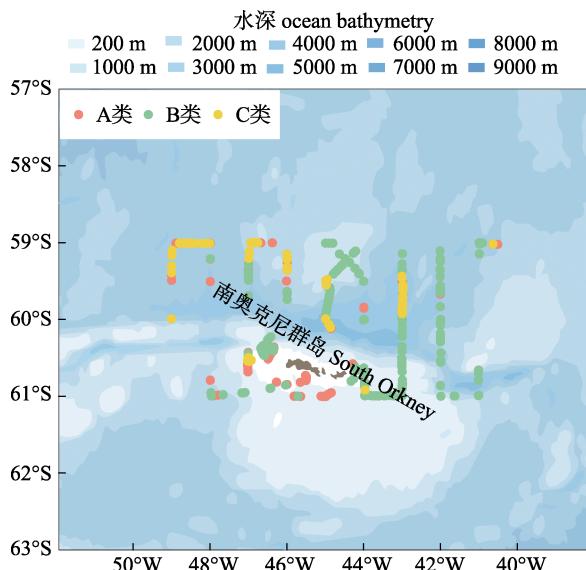


图 2 不同聚类磷虾集群水平分布图

Fig. 2 Distribution of krill swarms in different cluster groups

究了南奥克尼群岛海域南极磷虾的集群结构与特征。声学方法可以研究大时空尺度的磷虾集群特征信息, 是集群研究的现行有效方法。不同海域的深度差异可能会影响磷虾的集群结构<sup>[25]</sup>: 本研究中 3 个聚类分布海域的深度不同(图 2), 聚类 A 主要分布在群岛北部及西北部, 水深最深, 聚类 B 的集群分布深度最深且主要出现在白天, 聚类 C 的集群分布深度最浅且主要出现在夜晚。白天集群分布深度较深可能是磷虾个体在躲避捕食者, 也可能是在捕食深水区的饵料生物<sup>[3]</sup>。

### 3.2 集群特征值

夜晚磷虾集群面积和集群密度均大于白天集群(表 2), 与通常认为的磷虾在白天下沉聚集, 夜晚上浮分散的认知相反, 需要未来的更多研究确认原因。南奥克尼群岛海域不同聚类集群特征值间存在显著性差异(表 6)。研究表明集群密度与集群间距存在一定正相关关系, 集群密度大的聚类, 集群间距也大, 如聚类 C 所示(表 5)。Zhou 等<sup>[26]</sup>发现磷虾集群在有捕食者存在时更为密集。Tarling 等<sup>[8]</sup>认为, 集群密度增大可能是因为个体通过减小间距来维持集群完整, 降低磷虾个体被捕食者发现的几率。此外集群密度与捕食者的运动也有关, 磷虾个体间距随集群外捕食者游泳速度的增大而降低, 从而增大了集群密度<sup>[27]</sup>。与之前的集群研究相比<sup>[8, 13, 17]</sup>, 本研究聚类 A 的磷虾

集群密度最大, 其集群深度与 Klevjer 等<sup>[13]</sup>的结果一致, 集群长度、厚度, 面积等低于 Tarling 等<sup>[8]</sup>的研究结果。此外, 地理上的差异性会影响集群特征, 本研究的磷虾集群特征值与 Krafft 等<sup>[17]</sup>的研究结果存在差异, 可能是 Krafft 等研究的磷虾集群主要分布在深水区域, 遇到捕食者的概率小, 导致集群形态学特征值较大。

### 3.3 基于集群的磷虾生物量评估

磷虾在南极海域分布广泛, 断面调查覆盖的时空尺度较大, 采集的断面声学数据量也较大。传统的生物量评估方法将声学数据分为 50 ping×5 m 的单元(grid-based approach), 计算单元内的磷虾声学散射值, 再结合散射值-磷虾密度转换因子 c(conversion factors), 得到调查海域的磷虾密度与生物量。由于积分单元包含磷虾信号区域和更大范围的空白区域, 生物量评估过程中, 大部分时间用于空白区域的积分计算, 降低了大时空尺度断面声学数据的处理效率。磷虾在海洋中通常以集群的形式存在, 磷虾集群是磷虾种群的基本结构单元。Fielding 等<sup>[28]</sup>的研究表明, 磷虾个体主要集中在集群内部, 可用集群的磷虾密度代表调查海域磷虾的总密度, 即可以集群为单元评估磷虾生物量。应用集群法(swarm-based approach)评估生物量时, 只要积分映像中的磷虾集群区域, 无集群区域无需处理, 将会节约大量时间, 可以高效处理大时空尺度的断面声学数据, 这对于南极海域的磷虾生物量评估特别重要。

### 3.4 基于磷虾集群聚类信息提高探捕效率

磷虾集群动态对磷虾渔业的影响较为显著, 集群海域、时间、深度及生物量等都会影响磷虾渔业的捕捞策略。调查海域的磷虾集群可分为多个聚类, 不同聚类的集群特性、个体生物学信息<sup>[8]</sup>及外界环境因子<sup>[13, 17]</sup>均存在差异。通过增大网具采样频率获取更准确的磷虾个体生物学信息, 再结合环境因子, 可预测不同聚类集群的分布信息, 确定集群生物量大且个体多为成体的聚类分布海域, 以便于开展更准确的商业捕捞, 提高探捕效率。

基于我国渔船南极探捕期间采集的断面声学数据, 本研究探讨了南极南奥克尼群岛海域的磷

虾结构与特征,研究结果提供了该海域的磷虾集群与资源分布信息,也可为CCAMLR现行的反馈式磷虾资源管理提供基础数据。未来通过磷虾集群与外界因子(环境因子,捕食者)相关性的研究,可以帮助更为准确地了解集群结构与形成机制,预测磷虾资源分布。

### 参考文献:

- [1] Hamner W M, Hamner P P. Behavior of Antarctic krill (*Euphausia superba*): schooling, foraging, and antipredatory behavior[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, 57(S3): 192-202.
- [2] Ritz D A. Is social aggregations in aquatic crustaceans a strategy to conserve energy?[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, 57(S3): 59-67.
- [3] Buchholz F. Moult cycle and growth of Antarctic krill *Euphausia superba* in the laboratory[J]. Marine Ecology Progress Series, 1991, 69: 217-229.
- [4] Nicol S. Population structure of daytime surface swarms of the euphausiid *Meganyctiphanes norvegica* in the Bay of Fundy[J]. Marine Ecology Progress Series, 1984, 18: 241-251.
- [5] O'Brien D P. Description of escape responses of krill (Crustacea: *Euphausiacea*), with particular reference to swarming behavior and the size and proximity of the predator[J]. Journal of Crustacean Biology, 1987, 7(3): 449-457.
- [6] Zamon J E, Greene C H, Meir E, et al. Acoustic characterization of the three-dimensional prey field of foraging chinstrap penguins[J]. Marine Ecology Progress Series, 1996, 131: 1-10.
- [7] Mori Y, Boyd I L. The behavioral basis for nonlinear functional responses and optimal foraging in Antarctic fur seals[J]. Ecology, 2004, 85(2): 398-410.
- [8] 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.
- [9] Brierley A S, Cox M J. Shapes of krill swarms and fish schools emerge as aggregation members avoid predators and access oxygen[J]. Current Biology, 2010, 20: 1758-1762.
- [10] Miller D G M, Barange M, Klindt H, et al. Antarctic krill aggregation characteristics from acoustic observations in the Southwest Atlantic Ocean[J]. Marine Biology, 1993, 117(1): 171-183.
- [11] Ricketts C, Watkins J L, Priddle J, et al. An assessment of the biological and acoustic characteristics of swarms of Antarctic krill[J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1992, 39(2): 359-371.
- [12] Lascara C M, Hofmann E E, Ross R M, et al. Seasonal variation in the distribution of Antarctic krill, *Euphausia superba*, west of the Antarctic Peninsula[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1999, 46(6): 951-984.
- [13] Klevjer T A, Tarling G A, Fielding S. Swarm characteristics of Antarctic krill *Euphausia superba* relative to the proximity of land during summer in the Scotia Sea[J]. Marine Ecology Progress Series, 2010, 409: 157-170.
- [14] Cox M J, Borchers D L, Demer D A, et al. Estimating Antarctic krill (*Euphausia superba*) density from multibeam echosounder observations using distance sampling methods[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 2011, 60(2): 301-316.
- [15] Hewitt R P, Demer D A, Emery J H. An 8-year cycle in krill biomass density inferred from acoustic surveys conducted in the vicinity of the South Shetland Islands during the austral summers of 1991-1992 through 2001-2002[J]. Aquatic Living Resources, 2003, 16(3): 205-213.
- [16] Coetzee J. Use of a shoal analysis and patch estimation system (SHAPES) to characterize sardine schools[J]. Aquatic Living Resources, 2000, 13(1): 1-10.
- [17] Krafft B A, Skaret G, Knutsen T, et al. Antarctic krill swarm characteristics in the Southeast Atlantic sector of the Southern Ocean[J]. Marine Ecology Progress Series, 2012, 465: 69-83.
- [18] Bernard K S, Cimino M, William F W, et al. Factors that affect the nearshore aggregations of Antarctic krill in a biological hotspot[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2017, 126: 139-147.
- [19] 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.
- [20] Foote K G, Knudsen H P, Vestnes G, et al. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide[R]. Copenhagen: ICES Cooperative Research Report, 1987.
- [21] 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.
- [22] 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.]
- [23] Hartigan J A, Wong M A. A K-means clustering algorithm[J]. Applied Statistics, 1979, 28(1): 100-108.
- [24] Calinski T, Harabasz J. A dendrite method for cluster analysis[J]. Communications in Statistics, 1974, 3(1): 1-27.
- [25] Miller D G M, Hampton I. Krill aggregation characteristics:

- spatial distribution patterns from hydroacoustic observations[J]. *Polar Biology*, 1989, 10: 125-134.
- [26] Zhou M, Dorland R D. Aggregation and vertical migration behavior of *Euphausia superba*[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, 51(17-19): 2119-2137.
- [27] Pitcher T J, Partridge P. Fish school density and volume[J]. *Marine Biology*, 1979, 54(4): 383-394.
- [28] Fielding S, Watkins J L, Trathan P N, et al. Interannual variability in Antarctic krill (*Euphausia superba*) density at South Georgia, Southern Ocean: 1997–2013[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2014, 71(9): 2578-2588.

## ***Euphausia superba* swarm characteristics in the South Orkney Islands by the echogram of acoustic survey**

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

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

**Abstract:** Knowledge about swarm dynamics and underlying causes is essential to understand the ecology and distribution of *Euphausia superba*. We examined swarms across the South Orkney Islands in March and April 2017 using the Simrad EK60 (38 and 120 kHz) echosounder, concurrent with net sampling. The acoustic data were analyzed by applying a swarm-identification algorithm, and then filtering out all non-krill targets. A total of 2539 krill swarms with swarm characters including swarm height and length, packing density, swimming depth, and inter-swarm distance were extracted, of which 1389 were daytime swarms and 1150 night swarms. Compared with those of the night swarms, krill aggregated in deep waters during the daytime with lower packing density and smaller inter-swarm distance. There were significant differences between day and night krill swarms. Through the multivariate analysis, the krill swarms were divided into three categories, which differed in both their dimensions and packing density. Group A presented the highest swarm density [(19.24±27.00) ind/m<sup>3</sup>], Group B swarms presented the deepest distribution depth [(174.74±53.30) m], Group C presented the largest swarm area [(2868.62±2149.75) m<sup>2</sup>] with the longest swarm length [(258.76±322.88) m]. There was no significant difference in swarm length between Groups A and B and no significant difference in swarm depth between Groups A and C. Group A swarms were mainly distributed in deep water areas in the north and northwest regions of the South Orkney Islands at a depth of >1000 m, and mainly occurred during daytime. Groups B and C swarms were distributed throughout the survey area; Group B swarms were aggregated in the continental shelf at a water depth of <200 m. The results suggest that the majority of krill were contained within a minor fraction of the total number of swarms, and there was a positive correlation between packing density and inter-swarm distance. The results also provide valuable information on the distribution of krill swarms in this area and basic data for the current feedback krill resource management of Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR). In the future, studies on the correlation between krill swarms and external factors, such as environmental factors and predators, can help understand the swarm structure and formation mechanism more accurately and predict the distribution of krill resources.

**Key words:** *Euphausia superba*; swarm character; acoustic survey; South Orkney Islands

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