



2018 年夏季南奥克尼群岛南极磷虾集群特征

万树杰^{1,2}, 黄开¹, 杨洋^{1,2}, 刘慧^{1,2}, 朱国平^{1,2,3,4*}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学极地研究中心, 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, 极地海洋生态系统研究室, 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 210306)

摘要: 基于 2018 年夏季南奥克尼群岛南极磷虾资源声学调查数据, 本研究对该海域南极磷虾集群进行了分析。结果显示, 检测到南极磷虾集群 3 224 个, 反映集群特征的 5 个参数即深度、长度、厚度、面积及密度分别为 (96.00 ± 64.33) m、 (218.52 ± 455.66) m、 (11.19 ± 13.98) m、 $(1\ 894.40 \pm 9\ 345.72)$ m² 和 (114.11 ± 159.60) 尾/m³; 不同时间段之间集群密度无显著性差异, 但集群深度、长度、厚度及面积之间均存在显著性差异。不同水层间集群厚度和面积之间无显著性差异, 但集群深度、长度和密度均存在显著性差异。南极磷虾集群共分为三类, 其中第 I 类集群密度最大, 为 (325.90 ± 221.30) 尾/m³; 集群规模最小, 为 (379.64 ± 433.73) m²; 深度最深, 为 (158.06 ± 67.54) m。第 II 类集群的长度最长, 为 $(1\ 089.60 \pm 1\ 189.56)$ m; 集群面积为 $(15\ 601.25 \pm 30\ 243.33)$ m², 远大于其他集群。第 III 类集群深度最浅, 为 (78.91 ± 52.88) m; 密度最小, 为 (48.87 ± 50.33) 尾/m³, 但数量最多。

关键词: 南极磷虾; 集群; 声学; 南奥克尼群岛

中图分类号: S 931

文献标志码: A

就生物量而言, 南极磷虾 (*Euphausia superba*) 是地球上多细胞生物中进化最为成功的生物, 其行动的灵活性和强大的集群能力毫无疑问是其繁衍进化成功的重要保证^[1]。集群行为是南极磷虾生活的基础部分之一, 伴随着其生活史的绝大部分时间^[2-3], 对南极磷虾的生长和种群分布有着较强的影响。通过集群, 南极磷虾可以更加容易地获取食物, 利于雌雄个体间的交配, 降低单个个体游泳所消耗的能量, 以及防止来自捕食者的攻击^[3-6]。此外, 在集群内部, 一定数量的个体会自然生成一个微小环境, 这些环境中南极磷虾个体又是一种竞争关系, 它们会争夺氧气和食物, 同时排出自身的代谢废物, 引起寄生虫和疾病的发生^[7]。

集群行为不仅对南极磷虾自身有着显著的

影响, 也会影响周围捕食者的分布, Klevjer 等^[7]通过研究发现, 当南极磷虾集群的密度和大小达到一定值时, 会引起海鸟和一些哺乳动物聚集在一起进行觅食, 当集群的密度发生变化时, 这些捕食者的行为也会发生改变。对于南极磷虾渔业来说, 渔船也可视为一种“捕食者”^[8], 它通过鱼探仪发现周边水域虾群的位置和大小, 当虾群的密集程度较高时开始进行拖网作业, 当虾群密度降低至无法满足捕捞要求时, 就利用鱼探仪在附近渔场寻找新的可捕虾群。因此, 南极磷虾集群行为对渔业生产也有着非常重要的影响。作为重要的经济渔业资源, 自 20 世纪 70 年代开始, 南极磷虾就成为多个国家在南大洋水域的主要捕捞对象。我国于 2010 年开始南极磷虾的商业性探捕, 至今南极磷虾渔业已发

收稿日期: 2019-07-12 修回日期: 2019-09-28

资助项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1406801); 国家自然科学基金 (41776185)

通信作者: 朱国平, E-mail: gpzhu@shou.edu.cn

展成我国远洋渔业的一个重要组成部分^[9]。因此,开展南极磷虾集群行为方面的研究,可掌握集群分布,为提高渔捞效率提供重要的科学信息。

受限于南大洋复杂多变的海洋环境,以及现有观测技术的不足,诸多关于南极磷虾集群的问题一直悬而未决。随着声学调查技术和数据分析方法的不断提高,南极磷虾集群研究也有了一定的发展。本研究以 2018 年 1—2 月南奥克尼群岛南极磷虾资源调查期间所采集的声学数据为基础,对南极磷虾集群特征值和类型进行分析,并探究了南极磷虾集群特征值的时空变化,结果可为南极磷虾资源评估与管理和商业捕捞提供基础信息。

1 材料与方法

1.1 数据采集

本研究的海上调查依托中国水产有限公司大型拖网南极磷虾渔船“龙腾”轮,调查海域位于南极磷虾渔业传统渔场——南奥克尼群岛(59°00′~61°00′S, 41°00′~50°00′W),共设计 9 个断面,共计 43 个采样站点(图 1)。调查期间采用不间断走航的形式,利用船上配备的 SIMARD EK60 声学鱼探仪连续采集断面的声学回波数据,共包含 3 个工作频率(38、70 和 120 kHz)。鱼探仪参数的设置以朱国平等^[10]和 Watkins 等^[11]的参数为标准。调查时间为 2018 年 1 月 27 日至 2 月 7 日,调查期间航速约为 10 kn。

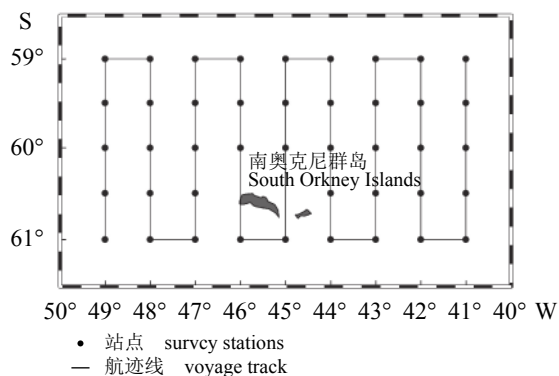


图 1 研究海域位置和站点分布

Fig. 1 The South Orkney Islands with survey stations

调查期间,根据 EK60 科学鱼探仪探测到的南极磷虾群映像,使用中层南极磷虾商业拖网进行南极磷虾采样,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。由调查的 2 个网次中分别随机选择 200 尾南极磷虾个体,共计 400 尾南极磷虾进行生物学测定,获取南极磷虾体长频率分布数据。2 次采样的位置分别为 60°23′S、46°34′W 和 60°28′S、46°33′W,拖网时长分别为 1.25 h 和 1 h。

南极磷虾目标强度(TS)基于拖网采集到的南极磷虾体长数据,采用南极海洋生物资源养护委员会(Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR)现阶段使用的简化版随机畸变波恩近似(SDWBA)模型计算得到^[12]。

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

式中, k 为波数,($k=2\pi/\lambda$), L 为磷虾体长,单位 m; L_0 为通用的磷虾标准体长,其值为 38.35 mm; λ 为鱼探仪所使用的声波波长; $A \sim J$ 为数值已知的系数。

1.2 数据处理

声学数据处理 原始回波中频率为 38 和 120 kHz 的回波数据为本研究需要处理的目标数据。数据处理基于 Echoview V 6.3 软件。数据处理流程基于 CCAMLR 声学调查与评估方法子工作组(Subgroup on Acoustic Survey and Analysis Method, SG-ASAM) 2009 年第 4 次小组会议制定的声学数据处理过程^[13],根据调查的实际走航情况进行调整。根据本研究的需要,此次声学数据处理主要包括海表、海底混响噪声剔除、环境背景噪声剔除和目标生物信号的检测^[14]。

南极磷虾集群检测 基于声学数据处理中处理完成的南极磷虾回波数据,利用 Echoview 软件中提供的“Detect Schools”模块对 120 kHz 频率的回波数据进行南极磷虾集群的检测。“Detect Schools”的原理是基于集群分析与块状评估系统(Shoal Analysis and Patch Estimation System, SHAPES)算法^[15],共涉及南极磷虾集群的最小单元长度、最小单元高度、最大水平连接距离、最大垂直连接距离、最小集群长度、最小集群高度及声学回波阈值等 7 个参数。考虑到南极磷虾集群检测参数因研究目的和研究地点不同而有所差异,本实验参考 Tarling 等^[16]的设置原理,根据本研究海上实际调查情况进行参数设置。

将集群的检测结果直接输出, 用于集群特征值的提取与分析。

集群检测后处理 参考 Krafft 等^[17] 采取的描述南极磷虾集群特征的方法, 本研究选取了 5 个南极磷虾集群的特征值: ①集群深度 (m), 表示检测的南极磷虾集群所处深度; 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), 表示在集群区域, 若干脉冲发射周期内渔船的运动距离; ④集群面积 (m²), 表示声学图像中集群不规则轮廓所包含的面积; ⑤集群密度 (尾/m³), 表示单位体积内南极磷虾的数目。其中, 集群密度 (N_v) 需要根据南极磷虾目标强度 (TS) 和南极磷虾集群后向散射体积 (S_v) 计算得出:

$$N_v = 10^{\frac{S_v - TS}{10}}$$

(2)

为了研究不同时间段南极磷虾集群特征值的变化情况, 本研究在 Watanabe^[18] 和朱国平等^[19-20] 研究的基础上, 考虑到本次调查时间处于南极夏季, 且调查时间跨度较短, 光照时长变化较小, 故将一昼夜划分为 4 个时间段, 分别为黎明 DWN(06:00—08:00)、白天 DAY(08:00—16:00)、黄昏 DSK(16:00—18:00) 和夜晚 NIT(18:00—次日 06:00)。此外, 按深度将南极磷虾集群所在水深划分为不同的栖息水层, 在前期的原始回波数据处理过程中, 集群水层的范围界定为 20~250 m, 故划分了 4 个水层, 即 20~60、60~120、120~180 和 180~250 m。

采用 Kruskal-Wallis 检验将以上不同时间段、不同栖息水层的集群特征值作显著性分析, 该检验为零假设, 即 $P<0.05$ 时拒绝零假设, 认为集群特征值之间存在显著性差异。然后, 将集群特征值进行对数转换, 并利用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 和 K-means 聚类分析将集群进行分类。在进行主成分分析时, 当一个主成分对各集群特征值的影响因子绝对值大于最大影响因子绝对值的 0.7 倍时, 即表明具

有显著性影响^[21]。将 PCA 分析得到的主成分结果作为 K-means 聚类的初始聚簇中心, 以避免 K-means 聚类初始中心随机选择导致结果不确定^[22]。聚类数的估算参考 Calinski-Harebasz 准则^[23]。以上所有分析均利用 SPSS v25.0 软件完成。

2 结果

2.1 体长频率分布与目标强度

采集到的 400 尾南极磷虾个体体长范围为 23.37~52.66 mm, 平均体长 (40.96±4.64) mm, 雄性 322 尾、雌性 72 尾, 其中 6 尾未成熟, 雌、雄南极磷虾个体体长之间存在显著性差异 (独立样本 t 检验: $t=-7.91$, $P<0.05$) (表 1)。利用 SDWBA 模型计算得到南极磷虾的平均目标强度为 -76.2 dB。

2.2 集群特征

本次调查 9 个声学断面的回波数据中, 共检测到 3 224 个集群。

按不同时间段划分, 黎明 387 个、白天 1 490 个、黄昏 230 个、夜晚 1 117 个 (表 2)。按不同水层划分, 20~60 m 水层 1 311 个 60~120 m 水层 695 个、120~180 m 水层 725 个、180~250 m 水层 493 个 (表 3)。

通过 Kruskal-Wallis 分析可知, 不同时间段间集群密度无显著性差异 ($P=0.127>0.05$), 深度 ($P=0.026<0.05$)、长度 ($P=0.013<0.05$)、厚度 ($P=0.003<0.05$) 和面积 ($P=0.01<0.05$) 均存在显著性差异。在深度上, 夜间集群稍有上升, 黄昏时集群处于一天中的最深位置, 黎明时期最浅, 但整体变化幅度不大; 在长度上, 由黎明至白天有所增长, 但变化幅度较小, 至黄昏时, 集群长度急剧增大, 至夜晚又有较大幅度的减小; 在厚度上, 自黎明至白天, 厚度快速减小, 至黄昏及夜晚又持续增大, 最终与黎明时持平; 在面积上, 随着时间的推移, 呈现先降低又快速增加, 最终保持稳定状态; 在密度上, 自黎

表 1 南极磷虾体长频率分布

Tab. 1 Length frequency distribution of *E. superba*

性别 sex	数量/尾 number	最小体长/mm minimum length	最大体长/mm maximum length	平均值±标准差/mm mean±SD
雄性 male	322	30.73	52.32	40.37±3.40
雌性 female	72	35.38	52.66	40.37±3.40
总体 total	400	23.74	52.66	40.96±4.64

表 2 一天中不同时间段的集群特征值

Tab. 2 Aggregation characteristics in different periods of a day

集群特征值 aggregation characteristics	黎明(n=387) DWN	白天(n=1 490) DAY	黄昏(n=230) DSK	夜间(n=1 117) NIT	整体(n=3 224) total
集群深度/m aggregation depth	85.93±52.90	98.87±63.91	111.60±11.60	105.52±68.70	96.00±64.33
集群长度/m aggregation length	178.4±407.17	188.83±332.61	368.02±957.18	274.16±492.50	218.52±455.70
集群厚度/m aggregation thickness	11.30±14.45	9.58±12.02	10.23±10.92	11.25±15.41	11.19±13.98
集群面积/m ² aggregation area	1 762.03±7 637.71	1 187.92±3 565.25	2 936.56±12 134.56	2 852.53±14 578.97	1 894.40±9 345.72
集群密度/(尾/m ³) aggregation density	88.51±114.83	120.10±1 787.24	105.24±136.42	116.82±149.99	114.11±159.60

表 3 不同深度的集群特征值

Tab. 3 Aggregation characteristics at different depths

集群特征值 aggregation characteristics	20~60 m (n=1 311)	60~120 m (n=695)	120~180 m (n=725)	180~250 m (n=493)	整体(n=3 224)
集群深度/m aggregation depth	37.63±11.06	88.36±17.77	149.43±17.16	213.04±21.63	96.00±64.33
集群长度/m aggregation length	212.0±440.73	206.54±350.17	224.83±371.43	317.89±747.97	218.52±455.66
集群厚度/m aggregation thickness	9.00±9.55	12.22±16.70	11.54±16.47	9.96±12.30	11.19±13.98
集群面积/m ² aggregation area	1 756±8 286.34	2 573.3±15 176.71	1 786.31±5 976.27	1 879.94±8 832.13	1 894.40±9 345.72
集群密度/(尾/m ³) aggregation density	89.53±103.31	84.52±126.94	84.86±127.45	264.22±255.18	114.11±159.60

明开始持续变大,由白天至夜晚呈上下波动,但变化幅度不大(表 2)。

针对不同水层南极磷虾集群特征进行 Kruskal-Wallis 检验,结果发现,各水层间集群厚度 ($P=0.124>0.05$) 和面积 ($P=0.226>0.05$) 无显著性差异,但各水层间集群深度、长度以及密度间均存在显著性差异 ($P<0.05$)。在集群深度上,可以发现随着深度的增加,集群的数目整体上呈逐渐下降的趋势,其中 60~120 m 和 120~180 m 水层的集群数目相近;在集群长度上,20~180 m 水层内的集群长度相近,而在 180~250 m 水层,集群长度急剧增大并达到最大值;在集群厚度上,随着水深的增加,集群的厚度呈先增后减的趋势;在集群面积上,20~180 m 水层内,集群面积呈现先急增后骤减的趋势;在集群密度上,20~180 m 水层内,集群密度变化较小,但 180~250 m 水层中集群密度骤增,并达最大(表 3)。

2.3 集群类型

集群特征主成分分析 主成分分析过程中,基于数据分析结果,将特征值大于 0.9 的成分确定为主成分,最终得到三个主成分,累计解释了集群特征值 92.21% 的方差。第一个主成分对集群长度、厚度和面积具显著影响 ($P<0.05$),与集群面积相关性更强,第二个和第三个主成分

均对集群深度和密度有着显著性的影响 ($P<0.05$),其中第二个主成分与集群深度的相关性更强,第三个主成分与集群密度的相关性更强(表 4)。

表 4 主成分对特征值的影响因子

Tab. 4 Factors of principal component analysis

	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2	第三主成分 PC3
集群深度 aggregation depth	0.047	0.799	-0.599
集群长度 aggregation length	0.894	-0.057	-0.134
集群厚度 aggregation thickness	0.897	-0.031	-0.012
集群面积 aggregation area	0.990	-0.090	-0.019
集群密度 aggregation density	0.208	0.627	0.749

集群聚类分析 研究显示,南极磷虾集群共分为 3 类。Kruskal-Wallis 检验结果发现,3 类集群的特征值均有显著性差异 ($P<0.05$)。其中第 I 类 654 个,其集群密度最大,集群尺寸最小,深度最深;第 II 类 276 个,集群尺寸最大,集群面积远大于其他集群;第 III 类 2 294 个,集群深度最浅,密度最小,个数最多(表 5)。根据每类集群特征值的特点,将第 I 类集群定义为块状集群,第 II 类集群定义为带状集群,第 III 类集

表 5 不同类型南极磷虾集群特征值

Tab. 5 Aggregation characteristics of different types of *E. superba*

集群特征值 aggregation characteristic	I 类(n=654) type I	II 类(n=276) type II	III类(n=2 294) type III	整体(n=3 224) total
集群深度/m aggregation depth	158.06±67.54	143.90±58.46	78.91±52.88	96.00±64.33
集群长度/m aggregation length	134.62±151.69	1 089.60±1 189.56	153.68±200.20	218.52±455.66
集群厚度/m aggregation thickness	6.44±4.43	39.85±26.82	8.0±7.1	11.19±13.98
集群面积/m ² aggregation area	379.64±433.73	15 601.25±30 243.33	766.94±1 679.25	1 894.40±9 345.72
集群密度/(尾/m ³) aggregation density	325.90±221.30	153.73±132.12	48.87±50.33	114.11±159.60

群定义为散点状集群。

通过比较不同时段 3 类集群的深度可知,散点状的南极磷虾群深度最浅,整体的变化幅度不大,块状和带状南极磷虾群的深度由黎明至黄昏深度不断增加,至夜晚有所降低,而带状南极磷虾群变化幅度较大,带状南极磷虾群深度最深(表 6)。在集群长度上,块状和散点状南极磷虾群的长度相近,且整体变化幅度较小,带状南极磷虾群长度最大,且远大于其他两类,约为后者的 7 倍,且自白天至黄昏集群长度骤增,至夜间又迅速下降,变化幅度较大;在集群厚度上,带状南极磷虾群厚度最大,约为其他两类的 5 倍,由黎明至黄昏,集群厚度持续减小,

至夜晚又开始变大,块状和散点状南极磷虾群的厚度整体比较平稳,变化不大;在集群面积上,带状南极磷虾群厚度最大,且远大于其他两类,约为 20 倍,由黎明至白天,厚度骤减,至黄昏又开始骤增,夜间又稍有降低,块状和散点状南极磷虾群的厚度整体较为平稳,变化不大;在集群密度上,块状集群的密度最大,自黎明至夜间,呈下降—上升—下降的趋势,变化幅度较大,散点状的密度值最小,且较平稳,带状南极磷虾群由黎明至黄昏密度持续增大,夜晚又有所下降(表 6)。

不同水层的南极磷虾集群中,3 类虾群在 180~250 m 水层所在深度差最大,为 25 m; 60~

表 6 不同类型集群在不同时间段的集群特征值

Tab. 6 Aggregation characteristics by type in different periods of a day

集群特征值 aggregation characteristics	集群类型 aggregation type	黎明 DWN	白天 DAY	黄昏 DSK	夜间 NIT
集群深度/m aggregation depth	第 I 类 type I	134.23±64.50	152.86±73.02	176.77±65.61	167.25±58.55
	第 II 类 type II	127.19±65.80	139.56±53.94	183.50±69.11	142.68±55.79
	第 III 类 type III	71.21±38.39	80.27±50.67	72.95±61.82	81.07±58.40
集群长度/m aggregation length	第 I 类 type I	90.74±87.60	153.20±181.29	99.93±139.77	132.95±121.37
	第 II 类 type II	994.36±1374.57	886.83±831.86	1 957.84±2 328.3	1 104.04±1 000.43
	第 III 类 type III	135.53±137.09	131.22±160.17	204.12±223.12	183.00±254.78
集群厚度/m aggregation thickness	第 I 类 type I	7.40±4.80	6.44±4.23	6.40±3.95	6.18±4.66
	第 II 类 type II	53.62±26.83	38.35±24.86	31.05±19.00	40.35±28.99
	第 III 类 type III	8.92±8.09	7.66±6.89	8.21±6.13	8.08±7.21
集群面积/m ² aggregation area	第 I 类 type I	329.20±362.10	400.35±429.85	340.52±512.79	378.32±437.52
	第 II 类 type II	18 939.00±25 628.00	9 497.32±9 624.33	21 320.14±31 640.20	19 025.40±40 183.37
	第 III 类 type III	759.00±1 686.27	600.80±1146.50	837.71±1 139.71	992.83±2 272.25
集群密度/(尾/m ³) aggregation density	第 I 类 type I	258.20±164.20	377.16±241.56	207.85±186.58	310.73±197.72
	第 II 类 type II	116.74±76.80	154.59±138.83	199.62±155.95	150.58±127.96
	第 III 类 type III	45.88±42.31	46.91±48.60	47.62±47.71	53.34±55.60

120 m 和 120~180 m 两个水层 3 种虾群的深度差最小, 均约为 5 m, 其中 20~60 m 和 180~250 m 两个水层中, 均为块状虾群深度最深, 散点状虾群最浅; 60~120 m 水层中带状虾群深度最深, 块状虾群最浅; 120~180 m 水层中带状虾群最深, 但散点状虾群深度最浅(表 7)。各个水层带状南极磷虾群的长度均远大于其他两类; 对于 20~60 m, 60~120 m 和 120~180 m 之间的 3 个水层, 带状南极磷虾群的长度值逐渐下降, 至 180~250 m 水层, 又有所增大, 块状和散点状南极磷虾群在各个水层长度值变化较小。各个水层带状南极磷虾群的长度均大于其他两类; 对于 20~250 m 之间的 4 个水层, 带状南极磷虾群的长度值逐渐下降, 块状和散点状南极磷虾群在各个水层长度值变化较小。各个水层带状南极磷虾群的长度均远大于其他两类; 对于 20~180 m 之间的 3 个水层, 带状南极磷虾群的长度值逐渐下降, 至 180~250 m 水层, 又有所增大, 块状和散点状南极磷虾群在各个水层长度值变化较小。块状南极磷虾群的密度值最大; 对于 20~180 m 之间的 3 个水层, 密度值呈现出持续下降, 至 180~250 m 水层又开始上升, 变化幅度较大, 散点状的密度

值最小, 且呈现出持续下降的趋势, 带状南极磷虾群的密度值随着水层深度增加, 呈现出先下降, 又上升, 再下降的趋势, 变化幅度较大(表 7)。

3 讨论

3.1 集群特征值

南极磷虾的集群行为受到非常复杂的非生物因素, 如光强变化^[16]、海流^[17]以及生物因素, 如南极磷虾自身的成熟度和体长等^[16]的影响, 均导致其集群一直处于动态的变化之中, 集群结构极不稳定。因此, 长期以来, 小尺度下的集群特征, 如集群所处深度、集群长度、厚度、面积及密度等往往难以定量描述, 而通过声学手段获取到的大尺度南极磷虾集群特征信息, 则可有效地反映集群的结构特征。如 Cox 等^[24]通过对南乔治亚群岛 1997—1999 年连续 3 年的夏季声学调查数据进行检测, 共发现南极磷虾集群 2 990 个, 提取到南极磷虾集群的平均深度为 87.77 m, 平均长度 875.9 m, 平均面积 19 001.77 m², 平均密度 26.47 g/m³。Bernard 等^[25]检测了 2011—2015 年连续 4 年南极半岛西侧帕尔默站和安特卫普岛附近的声学调查数据, 得到南极

表 7 不同类型集群在不同水层的特征值

Tab. 7 Aggregation characteristics by type at different depths

集群特征值 aggregation characteristics		集群类型 aggregation type	20~60 m	60~120 m	120~180 m	180~250 m
集群深度/m aggregation depth		第 I 类 type I	45.83±9.10	86.53±17.74	150.21±17.89	219.30±20.89
		第 II 类 type II	43.15±9.96	91.34±19.15	152.98±16.01	213.06±20.31
		第 III 类 type III	36.93±10.94	88.37±17.58	148.37±17.07	196.31±14.52
集群长度/m aggregation length		第 I 类 type I	53.14±30.93	83.62±83.61	148.37±137.70	168.56±182.12
		第 II 类 type II	2 075.00±1 588.90	965.73±750.50	813.93±704.61	1 193.89±1 584.61
		第 III 类 type III	178.00±257.66	137.75±113.57	118.60±87.40	112.28±70.34
集群厚度/m aggregation thickness		第 I 类 type I	6.25±3.72	7.80±5.38	6.41±4.20	6.02±4.26
		第 II 类 type II	47.94±22.24	48.23±31.45	39.91±27.32	29.79±19.56
		第 III 类 type III	8.25±7.04	8.65±8.11	6.91±6.39	6.81±5.25
集群面积/m ² aggregation area		第 I 类 type I	218.00±200.77	441.59±575.70	427.20±418.09	376.39±418.36
		第 II 类 type II	37 385.00±40 770.00	21 667.00±45 624.75	9 967.16±13 056.70	9 958.59±20 470.52
		第 III 类 type III	1 001.00±2 183.00	637.87±925.40	412.50±561.40	321.83±335.60
集群密度/(尾/m ³) aggregation density		第 I 类 type I	368.40±186.10	271.58±169.65	256.71±154.80	370.37±260.21
		第 II 类 type II	125.09±73.50	172.69±159.80	113.67±109.04	201.99±134.61
		第 III 类 type III	69.36±57.86	33.48±35.18	19.74±11.12	23.48±8.58

磷虾集群 5 858 个, 集群的平均深度为 41.67 m, 平均面积 530 m², 集群平均密度 27.33 g/m³。Klevjer 等^[7] 和 Tarling 等^[16]对斯科舍海 2003 年 1、2 月期间的声学调查数据进行检测, 分别得到 11 723 个和 4 525 个南极磷虾集群。Tarling 等^[16]的研究结果发现, 集群的平均深度为 43.18 m, 平均厚度为 6.87 m, 平均长度 109.24 m, 平均面积 543.08 m², 平均密度 29.92 尾/m³。Klevjer 等^[7]的研究结果则表明, 南极磷虾集群的平均深度 47.58 m, 平均长度 47.5 m, 平均密度为 44.42 尾/m³。以上研究均根据研究目的不同提取了南极磷虾集群长度、高度、面积、深度和密度等多种信息。通过比较可以发现, 各研究中南极磷虾集群特征之间均存在一定的差异。本研究中的南奥克尼群岛南极磷虾集群特征值的整体水平均大于其他海域。究其原因, 首先与 Bernard 等^[26]相比, 本研究集群特征值的提取方法不同, Bernard 等^[26]基于 MATLAB 图像处理工具中的邻近元素分类方法对集群特征值进行提取, 该方法首先根据回波强度的大小识别出南极磷虾个体, 再以该南极磷虾个体为中心进行邻域搜索, 直至不满足条件时停止, 最后将识别出的所有南极磷虾个体作为一个南极磷虾集群, 并作为结果输出。而 SHAPES 算法^[15]则通过设置 7 个参数的最低阈值, 直接将满足条件的南极磷虾声学映像作为集群进行结果输出。Klevjer 等^[7]、Tarling 等^[16] 和 Cox 等^[24] 与本研究相同之处在于均采用 SHAPES 算法提取南极磷虾集群, 但该算法的各个参数值却不完全相同(表 8), 因此各研究所得结果也存在较大差异。其中, Klevjer 等^[7] 和 Tarling 等^[16] 的研究最具有代表性, 因为这 2 个研究的声学数据均源于同一调查航次, 仅最

小单元高度这一个参数不同, 但所提取到的集群个数和集群特征值之间却存在明显不同, 所以 SHAPES 算法的参数敏感度对研究结果有较大的影响。除了集群提取方法的影响, 研究区域地理位置和物理化学因素也会对集群的特征值产生一定的影响, 如 Bernard 等^[26]发现, 当研究区域的风向以西风为主, 且混合潮发生在白天时, 南极磷虾集群会变得非常密集, 即集群的面积和密度会变大, 而小型集群, 即面积和密度较小的南极磷虾集群在日潮发生期间更易形成, 却又与浮游生物的生物量呈负相关。本研究表明, 在一天的不同时间段中, 集群的深度和长度均为先增加, 后下降的倒 V 字型变化趋势。集群的厚度、面积和密度则为先下降, 后增加, 再下降的波浪形变化趋势。而不同栖息水层中, 由于本研究中数据与南极磷虾渔业捕捞关系密切, 且数据处理过程中为了剔除噪声影响, 将水深范围划定为 20~250 m, 因此研究的重心为中层分布的南极磷虾群, 这可能也会引起研究结果之间的差异。

3.2 集群类型

本研究采用主成分分析和 K-means 聚类相结合的方法, 通过对南极磷虾群特征值的分析将南奥克尼群岛的南极磷虾集群分为 3 类, 分别为密度最大、尺寸最小的块状集群; 尺寸最大的带状集群和密度最小、数量最多的散点状集群。本研究主要基于集群自身的结构特点, 如集群的密度、尺寸和数量等进行虾群类型的划分。除此之外, 关于南极磷虾集群类型的划分方法还有多种, 如南极海洋系统与资源生物调查计划 (Biological Investigations of Marine Ant-

表 8 不同研究中的 SHAPES 算法参数
Tab. 8 Parameters of SHPAES algorithm in different studies

集群判定参数	parameters of detecting aggregations	Klevjer等 ^[7]	Tarling等 ^[16]	Cox等 ^[24]	本研究 this study
最大水平连接距离/m	maximum horizontal linking distance	15	15	30	15
最大垂直连接距离/m	maximum vertical linking distance	5	5	10	5
最小单元高度/m	minimum candidate height	0.5	1	10	1
最小单元长度/m	minimum candidate length	10	10	30	10
最小集群高度/m	minimum total height	2	2	10	2
最小集群长度/m	minimum total heigh	15	15	30	20
回波强度阈值/dB	data threshold	-70	-70	-80	-70

arctic Systems and Stocks, BIOMASS) 中, 根据南极磷虾在水平空间尺度的分布, 将其密度分为 3 种类型, 即大型 (>1 000 km)、中型 (10~1 000 km) 和小型 (<10 km); 时间尺度上的分布也分为密集 (数月)、斑块 (数天至数月) 和群聚 (数小时至数天); 小尺度的群聚又可分为超狹集、狹集、层集、不规则型和非群聚型等^[23, 27]。朱国平等^[20]根据渔船现场作业时鱼探仪屏幕上实时探测到的虾群映像形状将虾群分为散点状、块状和带状。总体上, 本研究与 BIOMASS 项目中关于集群类型的划分有较大不同, 主要是因为 BIOMASS 项目中以大尺度的虾群形成的时间和虾群的分布空间为划分依据, 而本研究与朱国平等^[20]的研究结果相近, 主要是因为源数据均来自于鱼探仪。虽然数据分析方法不同, 但在虾群形状的判别上较为一致。可以发现, 不同的数据分析方法和南极磷虾集群类型分类标准, 往往得到不同的虾群类型, 且由于南极磷虾集群结构在协调性和无组织性之间不断变化, 所以仍未有统一的集群分类方法。对本研究所采取的方法来说, 可得到的南极磷虾集群类型应不止 3 种。例如, 朱国平等^[28]就利用声学鱼探仪数据根据南极磷虾集群特征辨识出更多的集群类型, 以便了解这些集群与外界环境之间的关系。但考虑到本研究的海上调查属单次连续观测, 有限的调查面积和观测时间均限制了更多类型南极磷虾集群的观测。然而, 本研究结果表明, 这 3 类集群的特征值之间均存在着显著性差异, 说明不同集群类型之间的辨识度较高, 为 3 类结构差异较大的集群类型。开展此类集群分类工作, 一方面可更好地掌握不同类型集群的时空分布特性, 另一方面也可为南极磷虾渔业的海上生产提供较为科学的信息, 以指导渔业作业。

3.3 集群分布

南极磷虾具有明显的昼夜垂直移动现象。一般来说, 白天下沉、夜间上浮^[29-31]。本研究发现, 由黎明至黄昏, 南极磷虾集群的整体位置向深处移动, 至夜间则开始上浮。但集群在黎明时段所处水深最浅, 在黄昏时段所处水深最深, 这与 Taki 等^[32]的研究有一定差异, 后者发现, 夏季南奥克尼群岛南极磷虾群白天时段水深最浅, 夜间时段水深最深。朱国平等^[10]在布兰斯菲尔德海峡的研究显示, 3 月和 4 月白天,

南极磷虾集群多集中在较深水层, 夜间会上浮到较浅水层; 随着月份的推移, 南极磷虾群平均深度总体呈现加深的趋势。Tarling 等^[16]发现, 尽管夜间斯科舍海南极磷虾集群的数量要大于白天, 但这一现象不足以解释南极磷虾集群在白天下沉、夜间上升的行为, 所以认为该海域南极磷虾集群没有明显的昼夜垂直移动现象。考虑到南极磷虾垂直移动的季节性差异和年际变化特征仍未有统一的定论^[33], 目前仍无法给出较为合理的解释。但总体上, 各调查的时空差异可能是起因之一。

感谢中国南极磷虾渔业科学观察员的辛勤工作及南极磷虾渔船“龙腾”船长与船员在调查和取样过程中给予的大力支持; 感谢中国水产科学研究院南海水产研究所王腾在数据处理上提供的协助; 本研究还得到了南极海洋生物资源开发利用项目、南极磷虾渔业科学观察员派遣与履约项目、上海海洋大学大学生创新项目等的资助。

参考文献 (References):

- [1] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E A, et al. A reappraisal of the total biomass and annual production of Antarctic krill[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(5): 727-740.
- [2] 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.
- [3] Ritz D A. Is social aggregation in aquatic crustaceans a strategy to conserve energy[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 57(S3): 59-67.
- [4] Buchholz F. Moulting cycle and growth of Antarctic krill *Euphausia superba* in the laboratory[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1991, 69: 217-229.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] Wang R, Zhu G P. Inferring behavior of Chinese krill fishing vessel using a simple walk model[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(4): 939-946.
- [9] 朱国平. 南极磷虾种群生物学研究进展 I-年龄、生长与死亡[J]. *水生生物学报*, 2011, 35(5): 862-868.
- Zhu G P. Population biology of Antarctic krill *Euphausia superba*. I-age, growth and mortality[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(5): 862-868(in Chinese).
- [10] 朱国平, 杨洋, 王芮, 等. 采用声学方法研究2016年秋季布兰斯菲尔德海峡南极磷虾群昼夜垂直移动特征及其影响因素[J]. *水产学报*, 2018, 42(10): 154-159.
- Zhu G P, Yang Y, Wang R, *et al.* Diel vertical migration of Antarctic krill (*Euphausia superba*) swarm in the Bransfield Strait during austral autumn 2016 inferred from acoustic data and its relations to environmental factors[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(10): 154-159(in Chinese).
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] O' Driscoll R, Watkins J. Report of the fourth meeting of the Subgroup on Acoustic Survey and Analysis Methods, Scientific Committee of the Commission for the Conservation of Marine Living Resources (CCAMLR) [R]. Ancona, Italy, 2009: 37.
- [14] 杨洋, 朱国平. 海洋渔业资源声学评估技术及在南极磷虾资源声学评估中的应用[J]. *海洋渔业*, 2018, 40(3): 368-376.
- Yang Y, Zhu G P. Assessment on marine living resources based on acoustic technology and its application in Antarctic krill abundance estimation[J]. *Marine Fisheries*, 2018, 40(3): 368-376(in Chinese).
- [15] Coetzee J. Use of a shoal analysis and patch estimation system (SHAPES) to characterise sardine schools[J]. *Aquatic Living Resources*, 2000, 13(1): 1-10.
- [16] 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.
- [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] 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(3): 237-241.
- [19] 朱国平, 王芮, 朱小艳, 等. 2013年冬季南乔治亚岛南极磷虾群昼夜垂直移动研究[J]. *水产学报*, 2015, 39(8): 1242-1249.
- Zhu G P, Wang R, Zhu X Y, *et al.* Diel vertical migration of Antarctic krill aggregation in South Georgia Island in the austral winter season of 2013[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(8): 1242-1249(in Chinese).
- [20] 朱国平, 朱小艳, 夏辉, 等. 2011年夏秋季南奥克尼群岛水域南极磷虾集群时空分布[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(4): 912-919.
- Zhu G P, Zhu X Y, Xia H, *et al.* Spatiotemporal distribution patterns of Antarctic krill aggregations around the South Orkney Islands in austral summer-autumn 2011[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(4): 912-919(in Chinese).
- [21] Caliński T, Harabasz J. A dendrite method for cluster analysis[J]. *Communications in Statistics*, 1974, 3(1): 1-27.
- [22] Hartigan J A, Wong M A. A K-means clustering algorithm[J]. *Applied Statistics*, 1979, 28(1): 100-108.
- [23] Kalinowski J, Witek Z. Scheme for classifying Antarctic krill[J]. *Biomass Handbook Series*, 1985, 27: 1-12.
- [24] Cox M J, Watkins J L, Reid K, *et al.* Spatial and temporal variability in the structure of aggregations of Antarctic krill (*Euphausia superba*) around South Georgia, 1997-1999[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2011, 68(3): 489-498.
- [25] Bernard K S, Cimino M, Fraser 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.
- [26] 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.
- [27] Siegel V, Kalinowski J. Krill demography and small-

- scale processes: a review[M] //El-Sayed SZ. Southern Ocean Ecology: The BIOMASS Perspective. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 145-164.
- [28] 朱国平, 李慧婷, 李烨, 杨洋. 2018 年夏秋季南设得兰群岛周边水域南极磷虾集群类型及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1265-1272.
- Zhu G P, Li H T, Li Y, *et al.* Antarctic krill (*Euphausia superba*) aggregation type and its affecting factors around the South Shetland Islands, Antarctic during austral summer-autumn 2018[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1265-1272.
- [29] Mauchline J. The biology of mysids and euphausiids (advances in marine biology, 18)[M]. New York: Academic Press, 1980: 670-681.
- [30] Everson I. Variations in vertical distribution and density of krill swarms in the vicinity of South Georgia[J]. Memoirs of National Institute of Polar Research: Special Issue, 1983: 84-92.
- [31] Siegel V, Kalinowski J. Krill demography and small-scale processes: a review//El-Sayed S Z. Southern Ocean Ecology: the biomass perspective[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 145-163.
- [32] Taki K, Hayashi T, Naganobu M. Characteristics of seasonal variation in diurnal vertical migration and aggregation of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the Scotia Sea, using Japanese fishery data[J]. CCALMR Science, 2005, 12: 163-172.
- [33] Ross R M, Quetin L B, Lascara C M. Distribution of Antarctic krill and dominant zooplankton west of the Antarctic Peninsula//Ross R M, Hofmann E E, Quetin L B (eds). Foundations for ecological research West of the Antarctic Peninsula, Volume 70[M]. Washington, DC: American Geophysical Union, 1996: 199-217.

Aggregation characteristics of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the South Orkney Islands in summer 2018

WAN Shujie^{1,2}, HUANG Kai¹, YANG Yang^{1,2}, LIU Hui^{1,2}, ZHU Guoping^{1,2,3,4*}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Center for Polar Research, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Polar Marine Ecosystem Lab, Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Aggregation is a typical behavior of Antarctic krill (*Euphausia superba*). The distribution and type of aggregation is also the focus of *E. superba* behavior study. Based on acoustic data collected by *E. superba* resource survey, the aggregation of *E. superba* around the South Orkney Islands from January to February 2018 was investigated using the Simrad EK60 (38 and 120 kHz) echosounder. The results indicated that a total of 3 224 *E. superba* aggregations were detected, and the depth, length, thickness, area and density of *E. superba* aggregation were (96.00 ± 64.33) m, (218.52 ± 455.66) m, (11.19 ± 13.98) m, $(1\ 894.40 \pm 9\ 345.72)$ m², and (114.11 ± 159.60) ind/m³, respectively. In different periods of a day, significant differences were found between depth, length, thickness and area of *E. superba* aggregations, but density of *E. superba* aggregation had no significant difference. At different depths of *E. superba* aggregation, there were significant differences between depth, length, area of *E. superba* aggregation, but no significant differences were found between thickness and area of *E. superba* aggregation, respectively. Three types of *E. superba* aggregation were classified clearly. Type I had the highest density (325.90 ± 221.30) ind/m³, smallest area (379.64 ± 433.73) m² and deepest depth (158.06 ± 67.54) m; type II had the greatest length $(1\ 089.60 \pm 1\ 189.56)$ m and the area $(15\ 601.25 \pm 30\ 243.33)$ m² was much larger than other two types; type III had the smallest depth (78.91 ± 52.88) m and smallest density (48.87 ± 50.33) ind/m³, but it had the greatest number of *E. superba* in the aggregation.

Key words: *Euphausia superba*; aggregation; acoustics; South Orkney Islands

Corresponding author: ZHU Guoping. E-mail: gpzhu@shou.edu.cn

Funding projects: National Key R & D Program of China (2018YFC1406801); National Natural Science Foundation of China (41776185)