

文章编号: 1000-0615(2018)10-1541-09

DOI: 10.11964/jfc.20170810919

## 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

朱国平<sup>1,2,3</sup>, 杨洋<sup>1</sup>, 王芮<sup>1</sup>, 童剑锋<sup>1,2\*</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 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)

**摘要:** 近年来, 南极磷虾渔业过于集中于布兰斯菲尔德海峡, 这也使得该海区磷虾资源状况及其生态学特征日益受到关注。南极磷虾群具有较为明显的昼夜垂直移动特征, 开展此方面的研究可为探索其渔场形成机制提供基础数据, 并为磷虾渔业反馈式管理提供参考。基于磷虾渔船上Simrad EK80记录的相关声学数据, 使用Echoview软件判别声学数据中的磷虾群体, 对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进行分析, 并进一步分析影响磷虾群昼夜垂直移动的因素。结果显示, 3月和4月磷虾群深度基本维持在250 m以浅, 虾群最大深度出现在日升时分的频次最高(22.9%), 而最浅深度出现在夜间时分的频次最高(36.0%), 同时在日升时分, 虾群厚度达到最大值; 白天磷虾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, 磷虾群平均深度总体呈现加深的趋势。光强和海底深度是影响磷虾群深度变化的2个主要因素。

**关键词:** 南极磷虾; 昼夜垂直移动; 声学; 南设得兰群岛

**中图分类号:** S 934

**文献标志码:** A

南极磷虾通常是指南极大磷虾(*Euphausia superba*), 作为地球上资源量最大的单种生物之一, 其在渔业资源、生态研究及南大洋海洋生态系统中均有着极为重要的地位<sup>[1]</sup>。与其他许多中上层浮游生物一样, 南极磷虾也具有典型的昼夜垂直移动特性<sup>[2-7]</sup>, 且这种特性存在着较为明显的时空变化<sup>[8]</sup>, 但目前关于斯科舍海海域南极磷虾昼夜深度变化的直接研究较为缺乏<sup>[9]</sup>。一些学者利用渔业数据对南极磷虾的昼夜垂直移动特性及其变化进行了研究<sup>[6-7]</sup>, 但这些研究均存在着一个较为明显的限制, 即研究水层限制在200 m以浅。此外, 有学者对昼夜垂直移动特性提出了几种机制上的解释<sup>[10]</sup>, 但迄今为止, 针对该研究尚无定论<sup>[4]</sup>, 这为通过声学手段评估

其资源量带来了较大的不确定性, 尤其是对目标强度估计的影响<sup>[11]</sup>。

除了科学调查船安装声学调查设备, 如Simrad EK60/80外, 为了更好地开展南极磷虾渔业调查及资源评估工作, 最近部分从事南极磷虾渔业作业的渔船也安装了此类设备, 这为更好地开展磷虾昼夜垂直移动特性研究提供了极好的平台。首先, 与科学调查船相比, 安装声学设备的磷虾渔船通常位于资源密度较高的水域, 这积累了大量的声学数据, 但目前此类数据的有效利用率较低。其次, 南极磷虾渔船通常跨季节及区域作业, 这为比较南极磷虾昼夜垂直移动特性的时空变化提供了可能。为此, 开展本研究为今后大批量处理分析渔船采集的

收稿日期: 2017-11-02 修回日期: 2018-02-05

资助项目: 国家自然科学基金(41776185, 41606210); 国家科技支撑计划(2013BAD13B03); 农业部南极海洋生物资源开发利用项目(D8002-17-0109)

通信作者: 童剑锋, E-mail: jftong@shou.edu.cn

声学数据奠定了基础。

近年来,布兰斯菲尔德海峡逐渐成为南极磷虾渔业的重要作业区域之一,尤其是2016年,一半南极磷虾产量来自于该水域。同时,考虑到该渔场距离多个以南极磷虾为摄食对象的企鹅[如帝企鹅(*Aptenodytes forsteri*)]聚集地较近,且南极磷虾渔船作业位置越来越靠近近岸水域,这也引起了多方关注。然而,相较于其他海域,目前对于布兰斯菲尔德海峡南极磷虾昼夜垂直移动方面的直接研究非常有限,这也阻碍了关于最近几年南极磷虾在该海峡大量聚集并形成良好渔场的机制解释。此外,针对秋季南极磷虾群昼夜垂直移动特性鲜有报道,而该季节较深水层南极磷虾群并未得到科学调查(含网具采样和声学调查)的重视<sup>[8]</sup>,这在较大程度上限制了该季节南极磷虾资源量的评估工作以及集群(渔场)时空分布研究。为此,本实验利用声学科学数据对秋季布兰斯菲尔德海峡南极磷虾群的昼夜垂直特征进行分析,以期为南极磷虾生态特征研究提供参考,并为该水域南极磷虾渔场形成机制的研究提供基础信息。

## 1 材料与方 法

### 1.1 声学数据采集

调查时间为2016年3月1日—4月30日。调查海域为布兰斯菲尔德海峡(62°~64°S, 56°~64°W)(图1)。调查船为中国大型拖网渔船“龙达”轮,声学数据由船上装备的Simrad EK80回声探测—积分系统采集,工作频率为38 kHz、70 kHz及120 kHz。利用声学数据后处理系统Echoview(V6.16)进行声学映像分析和积分值处理。声学仪器的主要参数设置见表1。

### 1.2 数据处理

本研究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),垂直方向为1 m。在输出的积分单元格中,每个积分单元格即视为1 m的水层,在此基础上,读取各积分单元格中平均体积反向散射强度(dB)的值,将无效数据(-999 dB)的积分单元排除,结合声学映像以及拖网数据对磷虾所在的水层深度进行分析,以水平方向不连续的集群为单位,仅对虾群的上、下限深度进行判定,由此辨识出1 012个磷虾群,其中3月和4月分别为508和504个。同时,根据声学回波图像,记录下磷虾群所处的海底

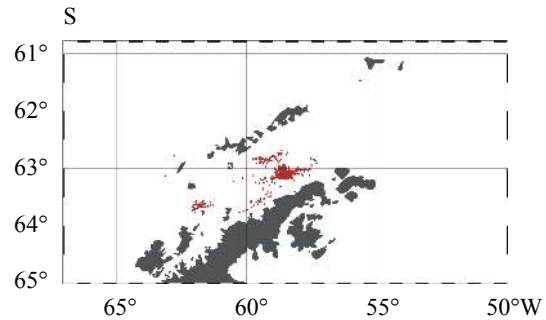


图1 调查区域及磷虾群位置分布

Fig. 1 Study area and distribution of krill swarms

表1 Simrad EK80主要参数设置

Tab. 1 Main parameter settings for Simrad EK80 echosounder system

技术参数 technical parameters	参数设置/kHz parameter settings		
	38	70	120
换能器型号 transducer type	ES38B	ES70-7C	ES120-7C
发射功率/W transmitting power	2 000	750	250
脉冲长度/ms pulse length	1.024	1.024	1.024
脉冲间隔/s pulse interval	1	1	1
等效波束角/dB equivalent beam angle	-20.6	-21.0	-21.0
换能器增益/dB transducer gain	27.0	27.0	27.0
纵向波束宽度/(°) alongship 3 dB beamwidth	7.1	7.0	7.0
纵向波束宽度/(°) athwartship 3 dB beamwidth	7.1	7.0	7.0
数据采集深度/m data collection depth	500	500	500

深度(大于500 m的记为none)。为了更好地了解磷虾昼夜垂直移动特性,本研究将虾群所在位置与海表温数据相匹配,对各温度区间虾群深度变化进行分析。考虑到环境因子的变化与磷虾的集群和移动息息相关,本研究将海表温及海底深度与磷虾群昼夜深度变化相结合,以每0.5 °C及50 m为区间,对虾群上、下限变化情况进行分析。

为了分析磷虾昼夜垂直移动的变化,依据声学数据中读取的准确时间和经、纬度信息,以1 h为时间间隔对磷虾群所处的位置进行记录。以太阳中心与真地平之间的角度为准,参考Watanabe<sup>[12]</sup>的估算方法将一天划分成10个时段,即黎明(DWN)、曙光(MTW)、日升(SRS)、早晨(MRN)、白天(DAY)、下午(AFT)、日落(SST)、

暮光(ETW)、黄昏(DSK)和夜间(NIT)。依据当地的实际时间, 将各数据点对应到时段中, 由此确定一天之中不同时段虾群深度的变化情况, 研究方法参见朱国平等<sup>[7]</sup>。

广义可加模型(generalized additive model, GAM)为广义线性模型的非参数化扩展, 其优点是能直接处理响应变量与多个解释变量之间的非线性关系<sup>[13]</sup>。本研究中, 采用逐步GAM构建模型, 以各月磷虾群深度(DK, m)为非独立变量, 时段(brightness)、表温(SST, °C)、一个月中的天数(day)、海底深度(bottom depth, m)、纬度(latitude)以及经度(longitude)为解释变量建立GAM模型, 分析各月磷虾群深度与各因子之间的关系, 从而了解影响磷虾昼夜垂直移动的关键因素。

GAM模型的表达方式:

$$\ln(DK_i) = s(\text{day}) + s(\text{SST}) + s(\text{brightness}) + s(\text{bottom depth}) + s(\text{latitude}) + s(\text{longitude}) + \varepsilon$$

式中,  $DK$ 为磷虾群深度(m),  $i$ 表示磷虾群的上限、中点或下限, 对磷虾群深度进行对数化处理;  $s$ 为自然立方样条平滑;  $\varepsilon$ 为误差项。模型的误差分布估计为高斯分布。利用赤池信息准则(AIC, akaike information criterion)检验逐步加入因子后模型的拟合程度, 其值越小, 表明模型的拟合效果越佳<sup>[14]</sup>。GAM模型的运算通过R软件实现。

利用百分比相似性指数(PSI)估算比例的相似性<sup>[7]</sup>。通常认为, 当 $PSI \geq 80$ 时, 即认为二者之间相似。统计结果利用Excel分析。

## 2 结果

### 2.1 磷虾群深度随时段的变化

3月和4月磷虾群厚度在时段上并无明显差异, 但3月磷虾群厚度明显小于4月, 其中3月平均厚度维持在35~45 m, 而4月则多处于50~60 m (图2)。3月, 磷虾群上限深度多维持在30 m以浅水域, 平均上限深度为(24.9±36.5) m (平均值±标准差, 下同); 磷虾群下限深度多在70 m以浅水域, 平均下限深度为(67.8±41.8) m。3月, 磷虾昼夜垂直移动现象并不明显, 夜间至日升时刻, 虾群缓慢地向下移动; 早晨时刻有一个较为明显的上移, 自白天后, 虾群又稍显现出向上移动的趋势(图3)。

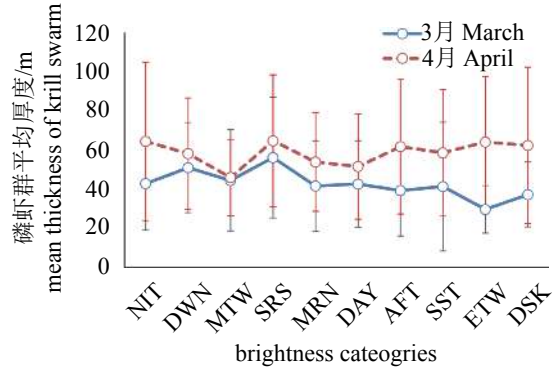


图2 布兰斯菲尔德海峡秋季各时段磷虾群平均厚度月变化

竖线表示±1标准差, 下同

Fig. 2 Monthly variation on mean thickness of krill swarm in the Bransfield Strait during austral autumn by brightness category

Vertical bar signifies ±1 standard deviation, the same below

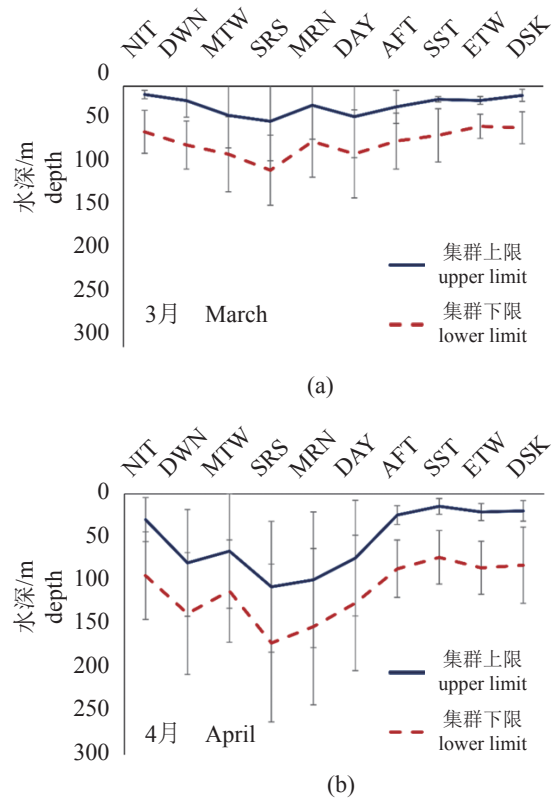


图3 布兰斯菲尔德海峡秋季各时段磷虾群平均深度分布月变化

Fig. 3 Monthly variation on mean depth of krill swarm in the Bransfield Strait during austral autumn by brightness category

4月, 磷虾群上、下限深度随时段出现了较为明显的变化, 上限深度范围处于14.4~106.9 m,

平均上限深度为(56.5±59.1) m；磷虾群下限深度多在70 m以浅水域，平均下限深度为(114.4±70.0) m。夜间至日升时刻，磷虾群呈现出显著的下移趋势，其下限甚至达到152.8 m，少数虾群的下限深度甚至达到350 m以深水层；自日升后，磷虾群又快速上升，至下午时分后，磷虾群保持在相对较为稳定的水层，其上限深度维持在20 m以浅水域，下限深度则维持在80 m以浅水域。

以磷虾群下限为质点，以20 m为间距，分析磷虾群在垂直水层中的分布。结果显示，3月，夜间磷虾群多集中于20~40 m (43.5%)；黎明与曙光时磷虾群主要集中在40~60 m；日升时，磷虾群大部分下移至80~100 m (30.0%)的水层；早晨时，磷虾群出现明显的上移，主要集中于20~40 m

(40.0%)水层；白天时，磷虾群在表层至250 m水层之间均有分布，但多集中于20~40 m (24.4%)的水层；下午时，磷虾群集中分布于20~40 m (36.3%)；暮光和黄昏时段磷虾聚集于20~60 m (分别占54.4%和80.0%)的水层(图4)。

4月，磷虾群在表层至300 m水层中的分布特征与3月存在着较为显著的差异。夜间，磷虾群在20~240 m水层中均有出现，其中20~120 m水层中的分布较为一致；黎明时，磷虾群垂直分布更广，达20~300 m，多分布在40~120 m (46.9%)水层；曙光时，磷虾群在40~100 m (63.6%)的分布占比最大；日升时，磷虾群又呈现出类似于黎明时的状况，但在180~220 m水层有着较高的分布；早晨时，40~120 m (36.7%)水层的磷虾群明显占优(81.8%)；白天，磷虾群分布范围类似

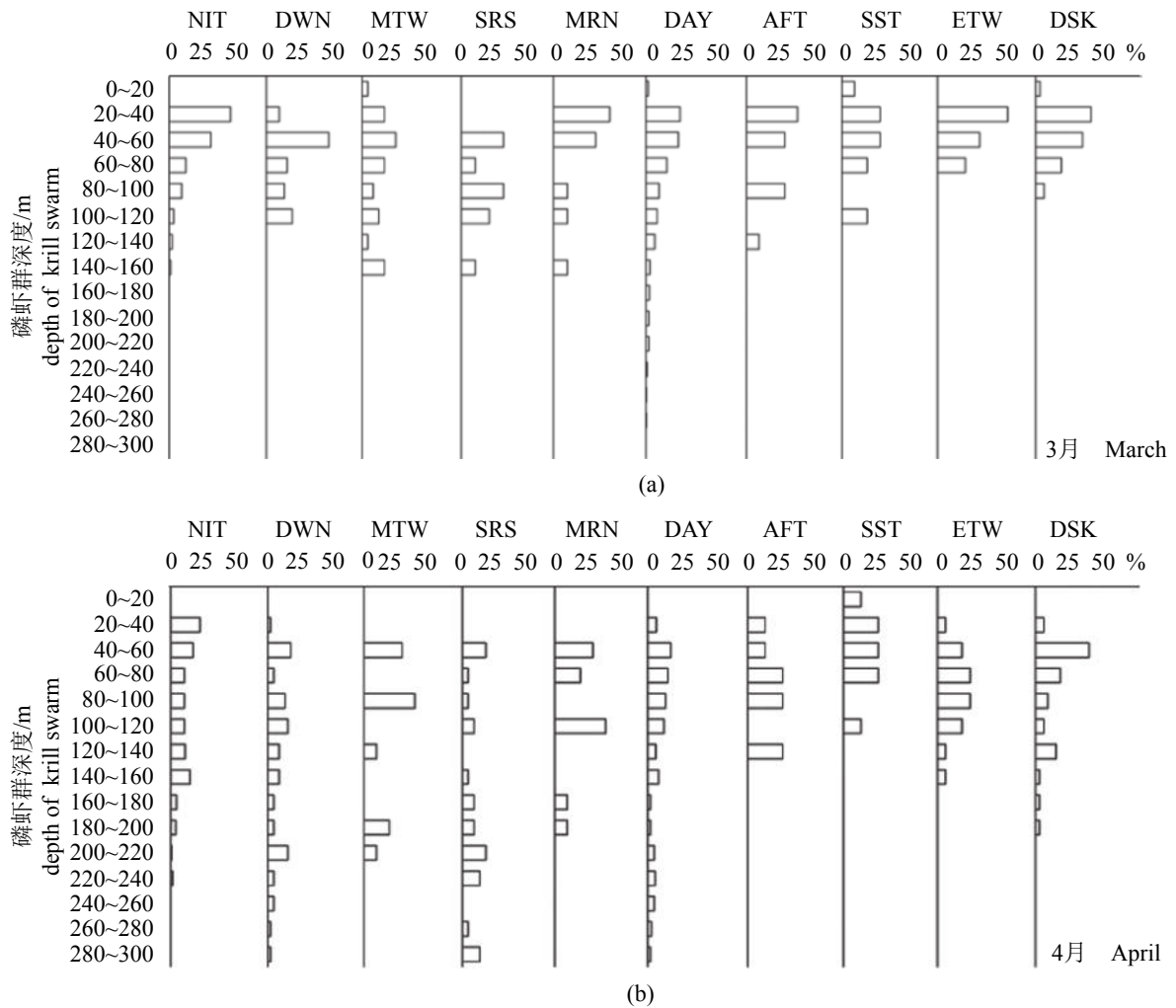


图 4 布兰斯菲尔德海峡秋季各时段磷虾群深度占比月变化

Fig. 4 Monthly variation on proportion of krill swarm depth in the Bransfield Strait during austral autumn by brightness category

于日升及黎明时刻, 但一半以上的磷虾群分布于40~120 m (55.6%); 下午至暮光时, 磷虾群分布模式较为一致, 基本集中在120 m以浅的水层中; 黄昏时, 磷虾群开始下移, 但主要分布区仍位于120 m以浅水层。

百分比相似性分析也显示, 3月, 随着时段的推移, 磷虾群深度分布并不存在相似性(PSI=38~68), 而4月, 除暮光与黄昏(PSI=88)之间存在相似性外, 其他时段磷虾群深度分布之间并无相似性。3月和4月, 各时段磷虾群在表层至300 m水层中的分布存在较为明显的差异, 即除了日落时段(PSI=90)外, 其他时段磷虾群垂直分布均不存在相似性(PSI=36~72)。

### 2.2 各因子对磷虾群深度的影响

GAM检验结果表明, 所构建的模型对磷虾群深度的总偏差解释率较高(68.8%~73.9%)。3月, 磷虾群深度的影响因素相对较多, 尽管以虾群上限、中点及下限为因变量时所得结果存在着差异, 但时段、天数、海底深度、表温、纬度及经度等因子均在不同程度上影响到磷虾群的深度变化, 其中时段、海底深度及纬度是3个非常重要的影响因素; 4月, 除了空间因子外, 其他因素均对磷虾群深度产生影响(表2, 图5),

而时段和天数是2个重要因子。整体上, 光强和海底深度是显著影响磷虾群深度的2个因子。

## 3 讨论

### 3.1 磷虾集群昼夜垂直移动

本研究利用声学手段对磷虾集群垂直移动特征进行分析。相较于包括渔业采样等其他研究方法, 声学方法具有覆盖面积大、快速准确、不伤资源等优点<sup>[15]</sup>。本研究结果显示, 秋季各月份磷虾群各时段垂直移动呈现出类似的模式, 但4月份的昼夜垂直移动更为明显(图3); 3月磷虾群最浅出现在夜间, 最深出现在日升时分, 而4月最浅出现在日落至黄昏时段, 最深也同样出现在日升。集群厚度上, 3月70%的磷虾群厚度在10~50 m, 而4月磷虾群厚度则有所增加, 超过60%的磷虾群处于20~70 m。基于磷虾拖网平均拖曳深度的昼夜变化, Taki等<sup>[6]</sup>发现, 磷虾集群呈现显著的昼夜垂直移动, 夏季和冬季白天南设得兰群岛和南奥克尼群岛水域磷虾群所处深度最深而夜间最浅, 但在南乔治亚岛水域冬季则并未呈现出这种昼夜模式; 南设得兰群岛3月平均拖曳深度维持在40~60 m, 而4月则处于60~80 m, 4月昼夜垂直移动较3月更为明

表2 布兰斯菲尔德海峡秋季磷虾群深度与各因素之间关系的GAM检验

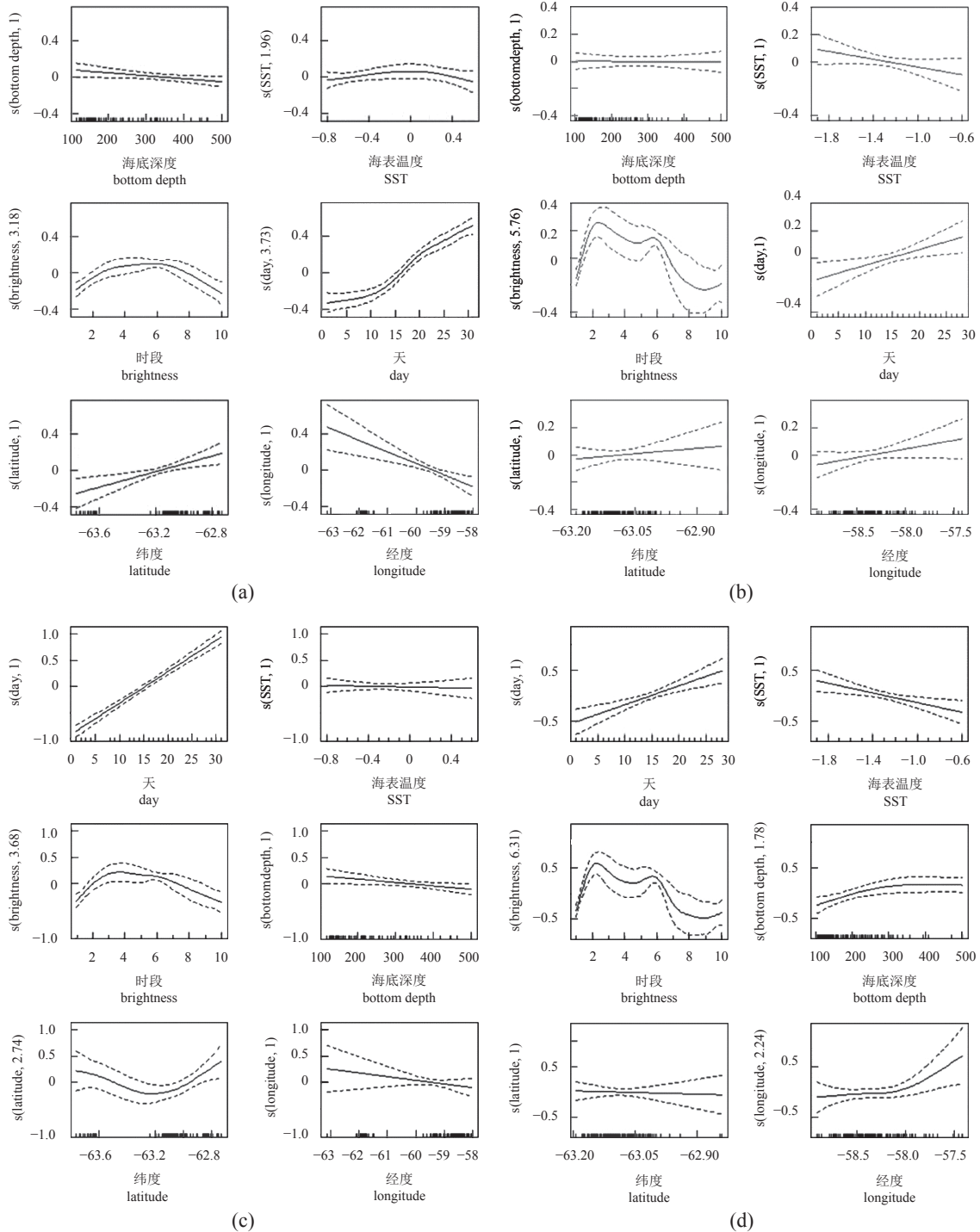
Tab. 2 GAM analysis of factors and depth of krill swarm in the Bransfield Strait during austral autumn

月份 month	虾群 krill swarm	统计量 statistics	变量 variables					
			时段 brightness	天数 days	海底深度/m bottom depth	表温/°C SST	纬度/(°) latitude	经度/(°) longitude
3月 March	上限	F值	14.48	58.02	4.30	0.96	10.34	14.28
		P值	<0.001**	<0.001**	0.04*	0.28	0.002*	0.000 2**
	中点	F值	287.44	0.14	12.35	4.98	3.03	1.39
		P值	0.001**	0.71	<0.001**	0.03*	0.03*	0.24
	下限	F值	218.67	0.04	8.91	3.10	2.78	0.001
		P值	<0.001**	0.85	<0.001**	0.08	0.04*	0.98
4月 April	上限	F值	12.72	7.12	0.01	2.87	0.55	2.70
		P值	<0.001**	0.008*	0.93	0.09	0.46	0.10
	中点	F值	17.80	8.51	15.59	5.08	0.08	2.48
		P值	<0.001**	0.004*	<0.001**	0.006*	0.78	0.06
	下限	F值	19.32	10.39	12.38	13.72	1.46	3.44
		P值	<0.001**	0.002*	<0.001**	0.000 3**	0.23	0.07

Notes: \*\* P<0.001, \* P<0.05

显。Lascara等<sup>[8]</sup>通过声学技术(BioSonics Model 102型声纳)对南极半岛西侧磷虾集群的昼夜垂直移动季节性变化进行了研究,但其只研究了200 m以浅水域(17~189 m)磷虾的昼夜垂直移动,结果表明超过70%的磷虾群厚度不足10 m,秋季磷虾群深度多处于70 m以浅水域。基于2013年冬季南乔治亚岛南极磷虾渔业调查期间收集的相关数

据,朱国平等<sup>[7]</sup>对冬季南乔治亚岛南极磷虾群昼夜垂直移动进行了研究,发现磷虾群平均深度维持在表层以下100~300 m,磷虾群最深出现在日升时分,最浅出现在夜间;随着时间的推移,磷虾群所处水层呈加深趋势。比较分析可知,布兰斯菲尔德海峡(南设得兰群岛南侧)秋季磷虾群昼夜垂直移动与南乔治亚岛冬季磷虾群呈类



(图5 Fig.5)

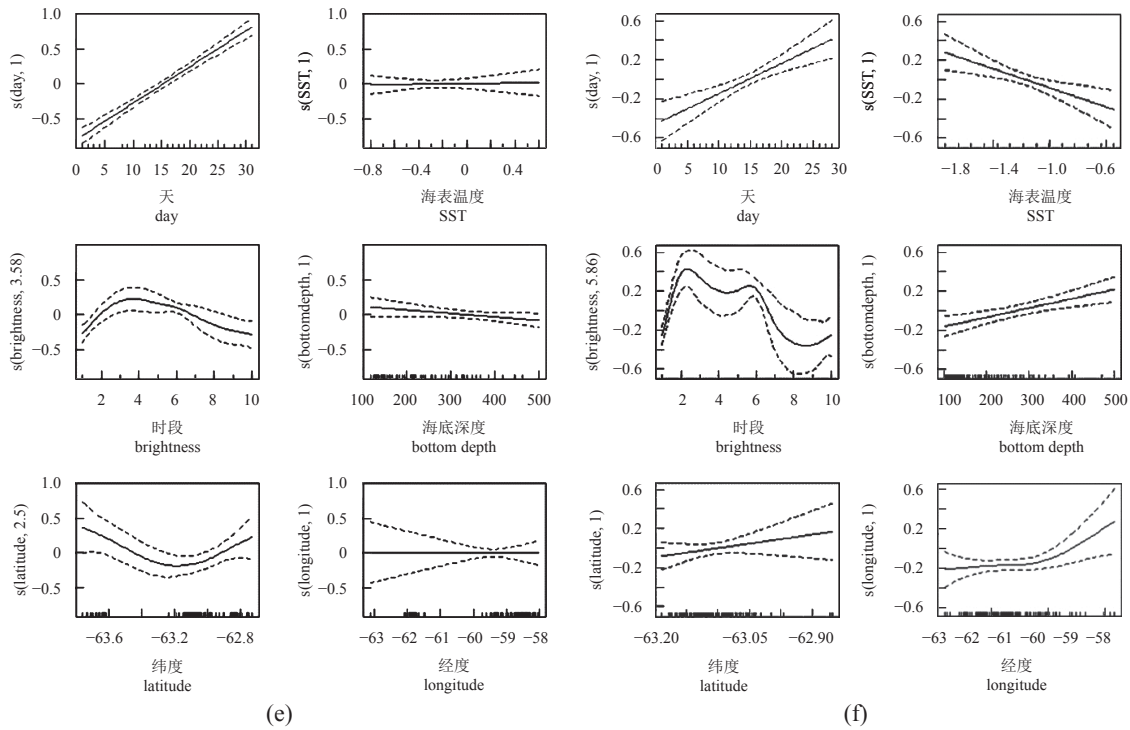


图5 布兰斯菲尔德海峡秋季磷虾群深度与各因子之间关系的GAM检验

(a)3月虾群上限; (b)4月虾群上限; (c)3月虾群中点; (d)4月虾群中点; (e)3月虾群下限; (f)4月虾群下限

Fig. 5 GAM analysis of relationships between factors and depth of krill swarm in the Bransfield Strait during austral autumn

(a) upper limit of krill swarm in March; (b) upper limit of krill swarm in April; (c) median of krill swarm in March; (d) median of krill swarm in April; (e) lower limit of krill swarm in March; (f) lower limit of krill swarm in April

似模式, 而在集群厚度上, 由于研究水层的不同, 虾群厚度分布存在着较大的变动。

### 3.2 影响磷虾集群垂直移动的因素

所有磷虾类集群均会展现出不同程度的垂直移动特性<sup>[2]</sup>, 这可能与其摄食或躲避捕食者<sup>[10]</sup>、光强变化<sup>[16]</sup>、环境因素<sup>[9]</sup>以及昼夜节律<sup>[17]</sup>等有关。本研究分析了光强的日变化(时段)和月变化(天数)、海底深度、表温以及空间(经、纬度)对磷虾群深度的影响。虽然3月和4月的影响因素有所差异, 但总体上时段和海底深度是显著影响磷虾群深度的2个因子。野外观察显示, 磷虾的昼夜垂直移动<sup>[18]</sup>主要由光强所导致<sup>[16]</sup>。夜间, 磷虾上升至近表层以进行觅食<sup>[19]</sup>; 白天则下潜至更深的水层以躲避表层的捕食者<sup>[20]</sup>。但Godlewska<sup>[16]</sup>则证实, 真正引发磷虾垂直移动过程的是光强的变化, 而非光强的实际大小, 且其他的生物和非生物因素也会调整磷虾的垂直移动范围<sup>[21]</sup>。这也佐证了本研究中时段(光强日变化)是显著影响磷虾群深度的主要因素, 而海底深度在某种

程度上反映了磷虾群所处的海域(近岸或近海)。3月和4月, 海底深度对磷虾群的影响效应呈现出相反的趋势, 且这种影响呈现出线性特质, 3月, 随着海底深度的增加, 其对磷虾群深度的影响逐渐削弱, 而4月则不同, 可能是磷虾群的季节性水平移动所导致。磷虾渔业的主要捕捞对象——大个体成体于春季移动至近海水域, 夏季多停留在外海无冰区索饵, 并于秋季再返回至沿岸水域<sup>[22]</sup>。Everson<sup>[4]</sup>也发现, 南乔治亚岛近岸和近海区域的磷虾昼夜移动呈现出不同的趋势, 近海区域磷虾夜间由深处移动到表面, 而近岸区域磷虾白天栖息于75 m以浅水域, 夜间则散布于表面至200 m水层。

其他因素也可能对磷虾群的深度变化产生影响。Gaten等<sup>[17]</sup>认为磷虾本身具有的昼夜节律钟(circadian clock)在其昼夜垂直移动中起着关键的作用, 但相关机制仍未得到较好地阐明。关于磷虾群昼夜垂直移动的机制, 更为广泛的认同是白天下潜到更深水层以躲避利用视觉摄食

的捕食者<sup>[10]</sup>。垂直移动至更深水层也可降低风险,尤其是针对表层下潜的捕食者,如威德尔海豹(*Leptonychotes weddelli*)等。更深的水层也就意味着更暗,这降低了下潜捕食者和以浮游动物为食的鱼类,如裘氏鳄头冰鱼(*Champscephalus gunnari*)的视觉敏锐性,并限制了这些捕食者定位和捕获摄食对象的能力<sup>[23]</sup>。考虑到这2种因素需要大量的海上调查以及数据收集,本研究并未开展相关分析,但在将来的工作中,这些因素也需要投入更多的关注。

感谢中国水产总公司及“龙达”轮船长和船员在取样过程中给予的大力配合。感谢执行南极海洋生物资源开发利用项目的科学观察员在海上数据收集过程中所付出的辛勤劳动。

#### 参考文献:

- [1] 朱国平,魏联. 南极鱼类年龄与生长研究进展[J]. 水产学报, 2017, 41(10): 1638-1647.  
Zhu G P, Wei L. Age and growth of Antarctic fish species: a review[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(10): 1638-1647(in Chinese).
- [2] Mauchline J. The biology of mysids and euphausiids[J]. Advances in Marine Biology, 1980, 18: 1-681.
- [3] Kalinowski J, Witek Z. Diurnal vertical distribution of krill aggregations in the Western Antarctic[J]. Polish Polar Research, 1980, 1(4): 127-146.
- [4] 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, 27: 84-92.
- [5] Siegel V, Kalinowski J. Krill demography and small-scale processes: A review[M]//El-Sayed S. Southern Ocean Ecology: the BIOMASS Perspective. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 145-163.
- [6] 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]. CCAMLR Science, 2005, 12: 163-172.
- [7] 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).
- [8] Lascara C M, Hofmann E E, Ross R M, et al. Seasonal variability 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.
- [9] Cresswell K A, Tarling G A, Thorpe S E, et al. Diel vertical migration of Antarctic krill (*Euphausia superba*) is flexible during advection across the Scotia Sea[J]. Journal of Plankton Research, 2009, 31(10): 1265-1281.
- [10] Ritz D A. Social aggregation in pelagic invertebrates[J]. Advances in Marine Biology, 1994, 30: 155-216.
- [11] Everson I. Diurnal variations in mean volume backscattering strength of an Antarctic krill (*Euphausia superba*) Patch[J]. Journal of Plankton Research, 1982, 4(1): 155-162.
- [12] 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 Japan's Fisheries Oceanography, 1990, 54(3): 237-241.
- [13] Guisan A, Edwards Jr T C, Hastie T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: Setting the scene[J]. Ecological Modelling, 2002, 157(2-3): 89-100.
- [14] Burnham K P, Anderson D R. Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2002.
- [15] 李斌,李沛杰,汤勇,等. 黄河小浪底水库主河道水域渔业资源声学评估[J]. 水产学报, 2015, 39(8): 1134-1142.  
Li B, Li P J, Tang Y, et al. Acoustic survey of the fisheries resources in the main channel of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(8): 1134-1142(in Chinese).
- [16] Godlewska M. Vertical migrations of krill (*Euphausia superba* Dana)[J]. Polskie Archiwum Hydrobiologii, 1996, 43: 9-63.
- [17] Gatén E, Tarling G, Dowse H, et al. Is vertical migration in Antarctic krill (*Euphausia superba*) influenced by an underlying circadian rhythm?[J]. Journal of Genetics, 2008, 87(5): 473-483.



- [18] Morris D J, Ward P, Clarke A. Some aspects of feeding in the Antarctic krill, *Euphausia superba*[J]. Polar Biology, 1983, 2(1): 21-26.
- [19] Watkins J L, Murray A W A. Layers of Antarctic krill, *Euphausia superba*: are they just long krill swarms?[J]. Marine Biology, 1998, 131(2): 237-247.
- [20] Burrows M T, Tarling G. Effects of density dependence on diel vertical migration of populations of northern krill: a genetic algorithm model[J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, 277: 209-220.
- [21] Watkins J L. Aggregation and vertical migration [M]//Everson I. Krill: Biology, Ecology and Fisheries. Oxford: Blackwell Science Ltd, 2000. 80-102.
- [22] Siegel V. A concept of seasonal variation of krill (*Euphausia superba*) distribution and abundance west of the Antarctic Peninsula[M]//Sahrhage D. Antarctic Ocean and Resources Variability. Berlin, Heidelberg: Springer, 1988. 219-230.
- [23] Aksnes D L, Giske J. A theoretical model of aquatic visual feeding[J]. Ecological Modelling, 1993, 67(2-4): 233-250.

## 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

ZHU Guoping<sup>1,2,3</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, TONG Jianfeng<sup>1,2\*</sup>

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

2. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

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

**Abstract:** Recently, krill fishery has concentrated increasingly in the Bransfield Strait, and krill abundance and ecological characteristics have received much attention. Antarctic krill (*Euphausia superba*) presents significant diel vertical migration (DVM) pattern, such studies were conducted to provide the basic data for exploring the formation mechanism of fishing ground and the reference for feedback management of krill fishery. Scientific acoustic device mounted in fishing vessels can reflect directly the distribution and vertical movement of krill in the water column. Based on the acoustic data recorded by Simrad EK 80 used in krill fishing vessel, krill swarms were identified using Echoview software. The present study analyzed DVM of krill in the Bransfield Strait during the austral autumn 2016 and the factors that impact DVM of krill were further explored. The results indicate that the depth of krill swarm maintained to above 250 m, the highest frequency of average deepest (shallowest) krill swarm occurs at sunrise (at night). The largest thickness of krill swarm presents at sunrise. Krill swarms are distributed in the deeper water column in the daytime, but move to the shallower depth at night. Compared to March, the average depth of krill swarms increased in April. Brightness and bottom depth are the main factors that impacted depth change of krill swarms.

**Key words:** *Euphausia superba*; diel vertical migration; acoustic; South Shetland Islands

**Corresponding author:** TONG Jianfeng. E-mail: jftong@shou.edu.cn

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (41776185, 41606210); Projects in the National Science & Technology Pillar Program (2013BAD13B03); Ministry of Agriculture Antarctic Marine Living Resources Development and Utilization Project (D8002-17-0109)