

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

王新良^{1,2} 赵宪勇^{2*} 汤勇³ 李显森² 左涛²

(¹中国海洋大学信息科学与工程学院, 青岛 266100)

(²农业部海洋渔业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

中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

(³大连海洋大学, 大连 116023)

摘要 为充分利用渔船采集的声学数据, 基于 Echoview[®] 渔业声学数据后处理软件的相关功能模块, 建立了一种强干扰背景下的回波映像集群信号提取方法, 并针对 2011 年 2 月在南奥克尼群岛周边水域采集的南极磷虾集群数据进行了应用研究, 有效消除了回声数据中的强干扰信号。还原后的磷虾集群数据显示, 南极磷虾集群具有明显的昼夜垂直移动特征, 白天虾群几何中心分布水层的平均深度为 77.4 m, 虾群平均厚度为 10.8 m; 夜间分布水层变浅, 平均深度为 41.2 m, 平均厚度为 8.8 m。

关键词 南极磷虾; 声学数据; 干扰; 集群特征

中图分类号 S963.7 **文献标志码** A **文章编号** 1000-7075(2014)02-0022-08

Removal of the inter-instrument acoustic interference and its application in the study of Antarctic krill swarms

WANG Xin-liang^{1,2} ZHAO Xian-yong^{2*} TANG Yong³ LI Xian-sen² ZUO Tao²

(¹College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(²Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture;

Shandong Provincial Key Laboratory for Fishery Resources and Eco-environment,

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

(³Dalian Ocean University, Dalian 116023)

ABSTRACT Collecting acoustic data from fishing vessels is an important trend in fishery resources study, yet the quality of the data may be seriously compromised by inter-instrument acoustic interferences due to the lack of signal synchronization apparatus for onboard acoustic instruments. In order to fully use the contaminated acoustic data, a method of extracting swarm signals from echogram with strong interference was established based on the relevant modules in the Echoview[®], an acoustic

中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2060302212011)、公益性行业专项(农业)科研专项(201203018)及农业部“南极海洋生物资源开发利用”项目共同资助

* 通讯作者。E-mail: zhaoxy@ysfri.ac.cn, Tel: (0532)85835363

收稿日期:2013-01-27;接受日期:2013-12-02

作者简介:王新良(1982-),男,助理研究员,主要从事渔业声学应用研究。E-mail: wangxl@ysfri.ac.cn

data post-processing software. The methods were then applied to the acoustic data on Antarctic krill collected onboard a fishing vessel operated around South Orkney Islands during February 2011, and the interference was effectively removed from the echogram. Distinct diel vertical migration was observed in the krill swarms. The geometrical center of the krill swarms was distributed in layers with a mean depth of 77.4 m and a mean thickness of 10.8 m in daytime, while the swarms tended to migrate upward nocturnally at a mean depth of 41.2 m and a mean thickness of 8.8 m.

KEY WORDS Antarctic krill; Acoustic data; Interference; Swarm characteristics

渔业资源声学调查与评估具有快捷、取样量大等优点,是渔业资源和生态系统研究的重要手段(赵宪勇等 2003; Simmonds *et al.* 2005),也是南极磷虾资源评估的标准方法(Hewitt *et al.* 2000; SG-ASAM 2010)。然而由于南极海域路途遥远,专业调查耗资大,迄今为止国际上仅开展过两次针对南极磷虾资源的大规模声学调查,分别为1981年南极研究科学委员会(SCAR)与国际海洋研究科学委员会(SCOR)联合组织的的首次BIOMASS实验(Everson *et al.* 1994)和2000年南极海洋生物资源养护委员会(CCAMLR)协调组织的CCAMLR 2000南极半岛和斯科舍海南极磷虾资源调查(Trathan *et al.* 1992; Hewitt *et al.* 2004; Lawson *et al.* 2008)。目前CCAMLR有关南极磷虾渔业的管理在很大程度上仍以这些历史调查数据为基础,迫切需要开展新的全面调查以掌握南极磷虾的资源现状。

为便于鱼群搜寻、提高渔业生产效率,渔船上一一般均装备声学助渔设备。随着经济的发展,许多渔船、尤其是大型远洋渔船的声学设备越来越先进,有的接近甚至达到科学研究的精度,使得利用渔船开展科学研究成为可能。与渔业资源专业调查船相比,渔船长期作业于各主要渔场,可以较低的成本获取丰富的渔业资源时空分布信息;因此利用渔船采集科学研究数据正在成为渔业资源研究的一个重要发展方向(Dalen *et al.* 2007)。

然而由于渔船一般同时装备有水平声纳、垂直探鱼仪以及测深仪等多种声学设备,且往往未采取声学仪器同步仪等预防声学仪器间相互干扰的防范措施,以致探鱼仪回声数据中极易存在来自其他仪器的强干扰信号(Simmonds *et al.* 2005; Parker-Setter *et al.* 2009),严重影响了所采数据的质量与可利用性。为此,本研究以渔业声学数据后处理软件的相关功能为基础,探索了一种强干扰声学信号的去除及回波映像中集群数据的还原方法,并以采自南奥克尼群岛周边水域的南极磷虾声学数据为例进行了示范应用,以期建立一种声学仪器间干扰信号的去除方案,为利用渔船开展南极磷虾资源分布规律研究提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 数据采集与处理

声学数据采自2011年2月4-28日在南奥克尼群岛周边水域开展南极磷虾探捕调查的“安兴海”号大型拖网渔船,该船吃水的平均深度为7.2 m。南极磷虾集群的声学数据采集位置如图1所示。形成回波映像的生物种类则以拖网取样验证。

声学数据采集系统由Furuno ETR30-SV回声探测-积分仪和船载Furuno FCV-1200L商用探鱼仪的换能器(50 kHz)组合组成,相关参数设置如表1所示。船载的其他声学设备还有另外

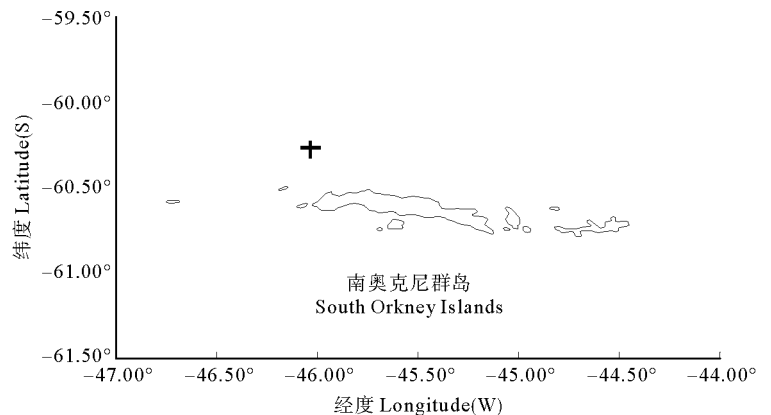


图1 南极磷虾集群声学数据的采集地点

Fig. 1 Sampling site of the acoustic data for Antarctic krill swarms
南奥克尼群岛西北,粗十字标注

Northwest of South Orkney Islands, shown as bold cross

1 台助渔用 Furuno FCV-1200L 商用探鱼仪 (50 kHz 和 200 kHz) 和 1 台 Furuno FSV-24 水平声纳 (24 kHz)。一般情况下,船上的声学设备均同时开机运行。调查中通过短暂关闭其他船载声学设备的方式获取无干扰状态下的磷虾映像数据,以对比分析干扰信号对调查用声学数据采集系统的影响。

声学数据的处理使用 CCAMLR 认可的渔业声学数据后处理软件 Echoview((V4.90)完成(SG-ASAM 2010)。

1.2 干扰信号的消除

如图2所示,ETR30-SV 采集的回波映像数据中既有磷虾集群信号(深蓝色调为主、横贯图2的映像),也存在大量源自其他声学设备的干扰信号(充斥整幅画面、近乎垂直的条带状映像)。可以看出,干扰信号中既包含强度明显高于磷虾回波的强干扰信号(红色映像),也有强度接近或低于磷虾回波的弱干扰信号(淡蓝色或灰色映像)。为开展磷虾集群特征研究,首先需将干扰信号从回声数据中消除。

1.2.1 强干扰和弱干扰信号的消除

干扰信号的消除首先采用设置信号强度阈值的方法进行。当知晓虾群回声强度的范围时,即可将虾群回声信号强度的上限和下限作为阈值,将更强或更弱的干扰信号消除。磷虾群回声强度的范围利用无干扰信号时典型磷虾集群映像数据获取,其中典型虾群反向体积散射强度(S_v , dB)的最大值即为去除强干扰信号的上限阈值,其反向体积散射强度的最小值为去除弱干扰信号的下限阈值。

强干扰和弱干扰信号的去操作利用 Echoview 软件中的声学数据信号强度范围选择(Data range bitmap)和屏蔽(Mask)虚拟变量模块(Higginbottom *et al.* 2008)完成。根据信号强度阈值确定欲保留信号的强度范围,利用软件的屏蔽功能将强干扰信号和弱干扰信号去消后,对存留下来的采样点回声数据作后续处理,并将其定义为 S (体积散射强度数据集)。另将作为干扰信号消除后的采样点赋以空白值(-999 dB)。空白值不参与磷虾集群特征的直接运算。

1.2.2 强度与磷虾回波重合干扰信号的消除

回波数据中的强干扰和弱干扰信号消除后,为进一步消除信号强度与磷虾回波重合的干扰信号,利用 Echoview 软件中的 3×3 侵蚀滤波器(Erosion filter)虚拟变量模块(Higginbottom *et al.* 2008)对回声数据 S 进行处理。

定义 S 中以采样点 $S_{p,s}$ 为中心的周围共 9 个采样点为 3×3 数据窗 $W_{p,s}$,如式(1)所示,

$$W_{p,s} = \begin{bmatrix} S_{p-1,s-1} & S_{p,s-1} & S_{p+1,s-1} \\ S_{p-1,s} & S_{p,s} & S_{p+1,s} \\ S_{p-1,s+1} & S_{p,s+1} & S_{p+1,s+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, p 为脉冲序号, s 为采样序号。

移动 $W_{p,s}$,使其中心 $S_{p,s}$ 遍历回声数据 S 中所有采样点。同时,令 $S_{v \rightarrow S_{p,s}} = S_{v_{\min}}$,其中, $S_{v \rightarrow S_{p,s}}$ 为采样点 $S_{p,s}$ 的体积散射强度值, $S_{v_{\min}}$ 为 $W_{p,s}$ 数据窗中采样点体积散射强度的最小值(当 $W_{p,s}$ 中存在空白值时,则 $S_{v_{\min}}$ 默认为 -999 dB)。当 $W_{p,s}$ 中心是位于磷虾集群外的干扰信号时,由于其附近的采样点以空白值为主,经侵蚀滤波器

表1 南极磷虾声学数据采集系统技术参数设置

Table 1 Technical parameter settings of the acoustic data collection system used for Antarctic krill study

技术参数	Technical parameter	参数设置	Parameter setting
频率	Frequency	50 kHz	
脉冲宽度	Pulse duration	1.2 ms	
系统增益	System gain	145.1 dB	
吸收系数	Absorption coefficient	13.0 dB/km	
数据采集量程	Data collection range	150 m	
声速	Sound speed	1 450 m/s	

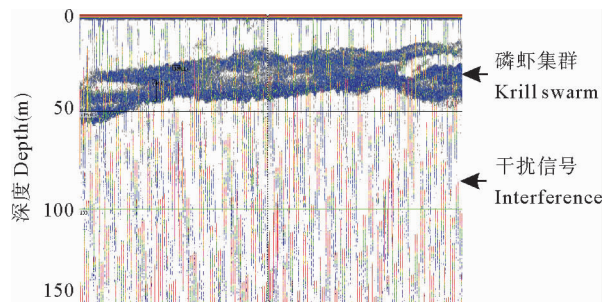


图2 存在强干扰(竖条状信号)的原始回波映像

Fig. 2 Raw echogram with strong interference (vertical spikes)

处理后,则该干扰信号以被赋以空白值的形式从回声数据中消除。

1.2.3 磷虾集群信号重构

当采样点 $S_{p,s}$ 是磷虾集群信号且以其为中心的 $W_{p,s}$ 中存在空白值时,经侵蚀滤波器处理后,则 $S_{p,s}$ 亦被替换为空白值,导致回声数据中磷虾的集群信号不完整。为最大限度地还原由此丢失的有效信号,重构磷虾集群信号,在经侵蚀滤波器处理后的回声数据中定义与 $W_{p,s}$ 相似的 7×7 数据窗并进行最大值赋值,即将数据窗内采样点的最大体积散射强度赋值给其中心位置的采样点,上述处理过程利用 7×7 膨胀滤波器(Dilation filter)虚拟变量模块(Higginbottom *et al.* 2008)完成。将膨胀滤波器处理后所得集群信号的回声数据定义为 D 。经膨胀滤波器处理后,磷虾集群信号 D 的空间位置得以重构,但其回波强度与原始采样数据存在一定的差异。

1.2.4 磷虾回波强度修正

为还原磷虾集群信号的回波强度,结合消除强干扰和弱干扰信号后的回声数据 S ,利用屏蔽(Mask)虚拟变量模块对回声数据 D 进行强度修正,即将回声数据 D 与 S 中对应位置的采样点进行比较,并令

$$S_{v_D_{p,s}} = S_{v_S_{p,s}} \quad (2)$$

式中, $S_{v_D_{p,s}}$ 和 $S_{v_S_{p,s}}$ 分别为采样点 $D_{p,s}$ 和 $S_{p,s}$ 的反向体积散射强度。

1.3 磷虾集群特征分析

选取当地时间2011年2月8日(03:30–23:30)渔轮连续拖网作业期间出现的南极磷虾集群映像,对其进行消除干扰信号处理后,再利用还原的集群映像数据研究磷虾的集群特征。界定磷虾集群的部分参数设置如下:最小集群长度为15 m,最小集群厚度为2 m,如果虾群水平间距小于15 m或垂直间距小于5 m则定义为同一虾群(Klevjer *et al.* 2010)。虾群几何中心的平均深度、虾群的平均厚度和声学密度的计算均采用Echoview中相应的算法(Higginbottom *et al.* 2008)。数据采集海域当天的日出和日落时间分别为当地时间04:10和20:08(Cornwall *et al.* 2012)。

磷虾集群特征分析利用统计软件SYSTAT完成,其中昼夜变化采用DWLS(距离加权最小二乘法)平滑算法进行变化规律分析,所用趋势线的张力参数为0.5(张吉昌等 2012),即当计算某时刻的趋势时,该时刻周围占总样本50%的数据参与该时刻趋势的预测。

2 结果

2.1 干扰信号消除效果

图3给出了无干扰信号时磷虾集群映像数据的回波强度(反向体积散射强度)分布。可以看出,南极磷虾集群信号的回波强度呈单峰分布,分布范围为 $-89.9 - -66.0$ dB,中值为 -76.8 dB。当无磷虾集群分布时,200个连续的脉冲回声数据(包含干扰信号)采样点的回波强度的分布范围为 $-111.8 - -23.5$ dB,呈双峰分布(图4)。对比图3和图4可以看出,存在干扰信号的脉冲采样数据按回波强度分为明显大于磷虾回波的强干扰(大于 -66.0 dB)、与磷虾回波重合的干扰信号($-89.9 - -66.0$ dB)以及小于磷虾回波的弱干扰和背景噪声(小于 -89.9 dB)三部分(图4)。

图5展示了对图2所示原始回波映像进行干扰信号消除各步处理的回波映像。通过设置回声数据信号强度处理阈值,回声数据中位于阈值外的强干扰信号、弱干扰信号和部分背景噪声被去除掉,在回波映像中表现为白色背景(图5a)。此后,经侵蚀滤波器处理后,位于虾群外的干扰信号被消除掉,但虾群信号变得不完整(图5b);再经膨胀滤波器处理后,虾群的空间位置得以重构,但其信号强度与原始采样数据的回波强度存在明显的差异(图5c);最后,经回波强度修正后(图5d),与原始回波映像(图2)相比,在回声数据中的干扰信号被去除掉的同时,存留的磷虾集群信号保持了几乎相同的几何形状和原始回波强度。

此外,为进一步分析干扰信号消除的效果及其对原始回声数据的影响,针对是否存在干扰信号两类回波映像,表2分别给出其在干扰信号消除处理前后输出的回声积分值($S_A, m^2/nmile^2$)。可以看出,当回波映像中存在强干扰时,在进行干扰消除处理前,无论磷虾集群密度相对较高(I_a 类)或较低(I_b 类),其输出的回声积分

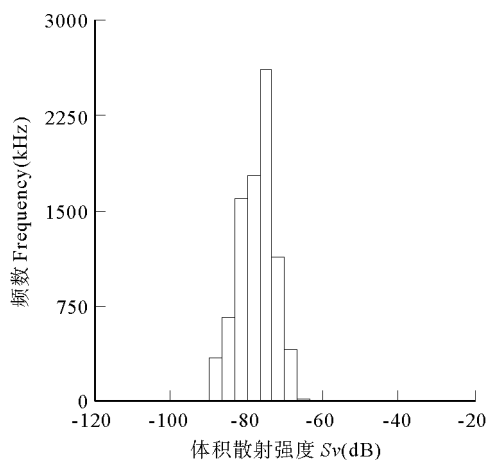


图3 磷虾集群信号体积散射强度分布
Fig.3 Distribution of the S_v of krill swarm signals

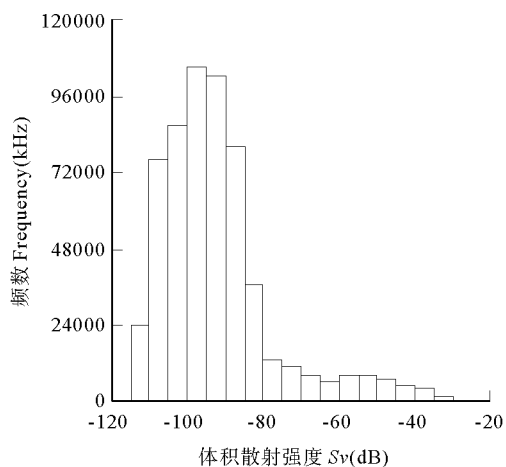


图4 干扰信号体积散射强度分布
Fig.4 Distribution of the S_v of interference signals

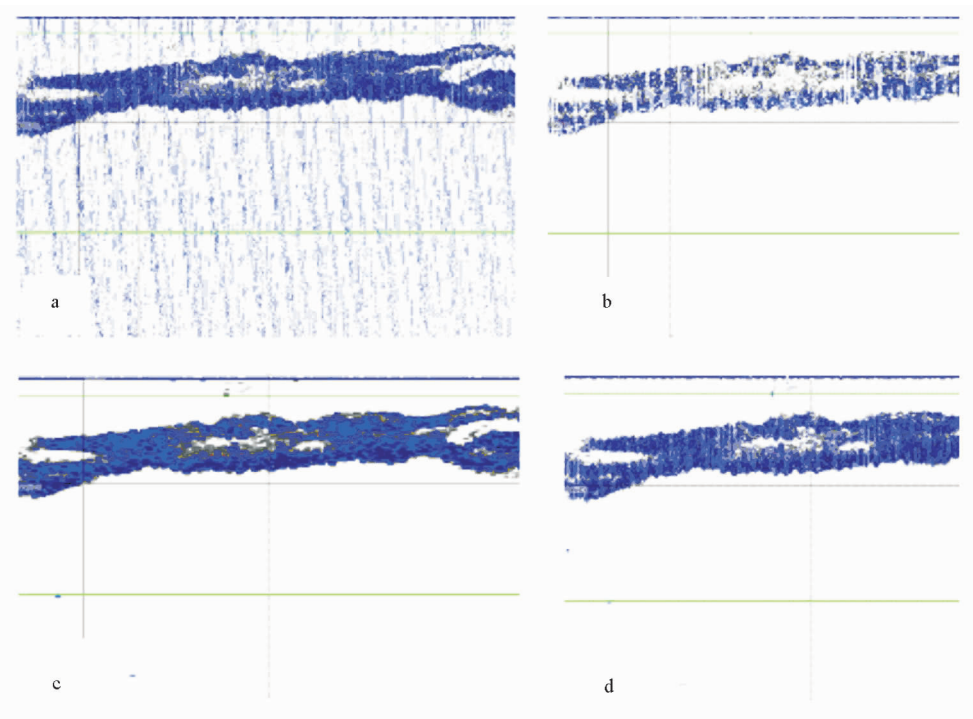


图5 磷虾集群信号提取各步骤回波映像

Fig.5 Echograms of krill swarms extraction in different processing steps

- a. 强干扰和弱干扰信号消除后; b. 侵蚀滤波器处理后; c. 膨胀滤波器处理后; d. 回波强度修正后
a. After strong and weak interference removed; b. After 3×3 Erosion filtering; c. After 7×7 Dilation filtering; d. After S_v correction

值(分别为 57239.2 、 $20763.6 \text{ m}^2/\text{nmile}^2$)都与不存在干扰信号的回波映像(Ⅱ类)存在较大的偏差。经干扰信号消除处理后,Ⅰ类回波映像输出的回声积分值已与无干扰时较为接近。当回波映像中不存在干扰信号时,经干扰信号消除处理后,其输出的回声积分值与原始回波映像的结果存在一定的误差,磷虾集群密度相对较高(Ⅱ_b类)时,明显小于集群密度较低时(Ⅱ_a类)的误差。

2.2 南极磷虾的集群特征

在分析的回波映像中共发现 86 个磷虾集群(其中白天发现虾群 73 个,夜间 13 个)。图 6 给出了虾群几何

表2 不同类型磷虾回波映像的输出积分值

Table 2 S_A for different types of krill swarms in the processing steps

处理步骤 Data processing step	回声积分值 S_A ($m^2/nmile^2$)			
	映像类型 I _a	映像类型 I _b	映像类型 II _a	映像类型 II _b
	Echogram type I _a	Echogram type I _b	Echogram type II _a	Echogram type II _b
原始回波映像 Original echogram	20763.6	57239.3	13.1	26.9
经干扰消除后集群回波映像 Swarm echograms with interference removed	10.9	15.4	12.0	26.8

注: I类为存在干扰信号的回波映像, II类为不存在干扰信号的回波映像;下标 a 和 b 分别表示磷虾集群密度相对较低和较高两种情况
 Note: Type I is the echograms with interference signals, and Type II is the echograms without interference signals. The subscripts 'a' and 'b' represent krill swarms in relatively low and high density respectively.

中心的平均深度和虾群平均厚度的分布。统计结果显示, 虾群几何中心平均深度的分布范围为 18.4 – 117.8 m, 均值为 69.5 m, 95% 置信区间为 (64.3 m, 74.7 m); 虾群平均厚度的分布范围为 3.1 – 33.7 m, 均值为 10.5 m, 95% 置信区间为 (9.2 m, 11.7 m)。

图7展示了南极磷虾集群特征参数的昼夜分布及其变化趋势。虾群白天分布水层的平均深度为 77.4 m, 夜间分布水层变浅, 平均深度为 41.2 m, 平滑趋势线同时呈现明显的昼夜变化规律(图7a); 白天虾群厚度的均值为 10.8 m, 略高于夜间的 8.8 m, 平滑趋势线无明显的昼夜变化(图7b); 白天虾群声学密度的均值为 $9.9 m^2/nmile^2$, 夜间为 $3.1 m^2/nmile^2$, 其平滑趋势线亦呈现明显的昼夜变化规律(图7c)。

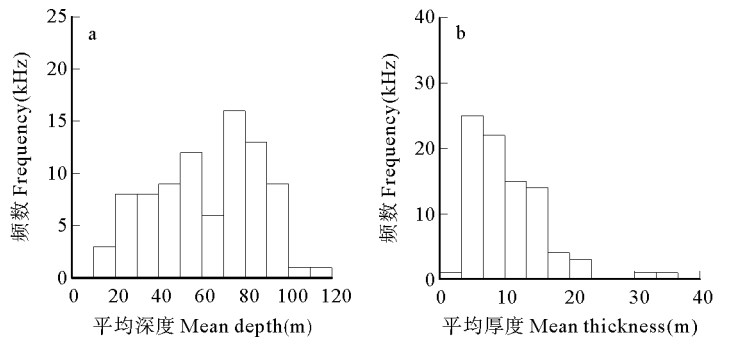


图6 南极磷虾集群特征参数分布

Fig. 6 Distribution of Antarctic krill swarm parameters

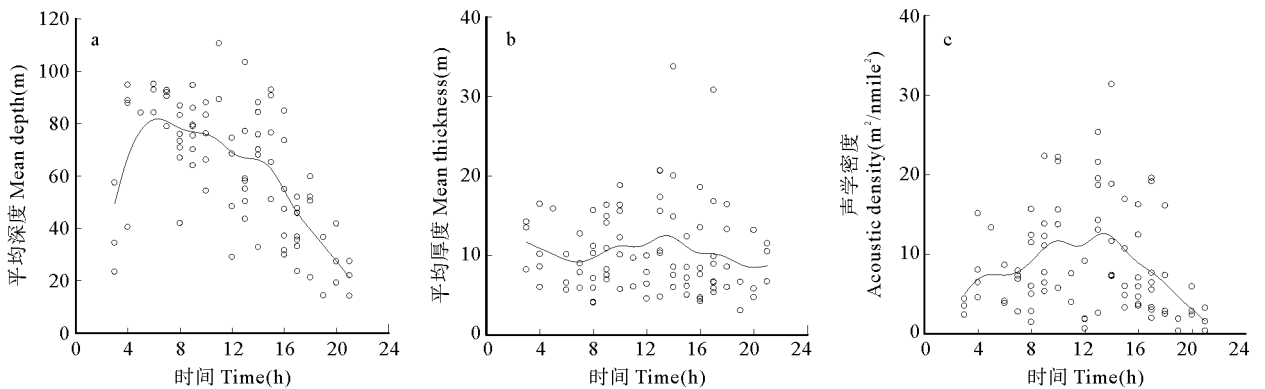


图7 南极磷虾集群特征参数昼夜变化

Fig. 7 Diel variations of Antarctic krill swarm parameters

当地日出时间为 04:10, 日落时间为 20:08
 local sunrise time 04:10, sunset time 20:08

3 讨论

3.1 干扰信号消除

为利用遭受干扰的回声数据,传统方法一般通过手工将干扰噪声定义为劣质数据的方式进行消除。该方法的明显缺点是既耗时,误差又较大(Martin *et al.* 2002; Parker-Setter *et al.* 2009)。鉴于此,本研究通过对比回声数据中干扰信号与目标的回波强度,按强度将干扰信号分为大于、小于及与磷虾回波重合的三部分(图3和图4),并基于通用的渔业声学数据后处理软件,建立了一种干扰信号消除及集群信号还原方法。该方法主要包括设置回波数据的信号强度上限和下限阈值、 3×3 侵蚀滤波器处理、 7×7 膨胀滤波器处理和回波强度修正处理等步骤。磷虾回声数据应用处理效果显示,经上述处理后,回波映像中的干扰被有效地去除掉,还原的磷虾集群映像保存了较为完整的几何形状和回波强度(图5d);同时,消除干扰后磷虾集群与无干扰时磷虾集群回声数据的积分值输出结果较为接近(表2),也说明了干扰信号消除方法的有效性。

信号强度阈值是参与数据处理的采样信号回波强度的临界值。通过设置信号强度阈值可消除回声数据中回波强度大于和小于目标信号的干扰以及部分背景噪声。本研究中信号强度上、下限阈值依据无干扰时目标典型磷虾集群映像的回波强度范围进行设置;对于经过校正的科学探鱼仪采集的声学数据,在知晓研究目标的体长分布时,亦可利用目标强度-体长经验公式计算其回波强度的分布范围设置信号强度阈值(Lawson *et al.* 2008; 张俊等 2011)。在此过程中,当数据量较大且目标的回波强度差异较为显著时,信号强度阈值应针对不同区域分别进行设置。

对于信号强度与研究目标回波强度重合的干扰,无法通过设置信号强度阈值的方式消除(图5a)。为消除此部分干扰并还原目标集群信号,本研究先后利用声学数据后处理软件中的侵蚀滤波器和膨胀滤波器等模块分别加以实现。侵蚀滤波器算法应用的基本原理是基于离散信号与集群信号分布密度的差异,实现从回声数据中提取集群信号(Higginbottom *et al.* 2008)。对比图5a和图5b可以看出,对位于磷虾集群信号外离散分布的干扰,利用 3×3 侵蚀滤波器可有效消除;而当干扰位于磷虾集群信号内,由于其附近采样点为有效的磷虾信号,侵蚀滤波器算法无法将该干扰信号与周围的磷虾信号区分开并消除掉,这可能是本方法中一个无法规避的局限。此外,对比表2中无干扰时不同密度磷虾集群映像(II_a 和 II_b 类)的输出积分值可以看出,当目标的集群密度较低时,干扰消除操作引起的误差较为明显;而当磷虾集群密度较高时,由此导致的误差则显著变小,表明干扰信号消除操作对较高密度的目标集群信号影响较小,应用效果更为理想。

3.2 南极磷虾的集群特征

回波映像分析是研究南极磷虾集群特征的重要手段(Greene *et al.* 1991; Siegel *et al.* 2004; Klevjer *et al.* 2010)。对2011年在南奥克尼群岛西北侧水域采集的声学数据研究表明,南极磷虾集群在白天分布的平均深度为77.4 m,明显大于夜间的42.1 m,此结果与南极磷虾集群在白天有往深水层迁移的昼夜垂直移动特征(Dermer *et al.* 1995; Zhou *et al.* 2004)相吻合;同时,虾群声学密度的平滑趋势线亦表现出明显的昼夜变化规律,显示南极磷虾在白天似乎具有相对较高的集群密度;但虾群的平均厚度并未呈现明显的昼夜变化。张吉昌等(2012)对本次调查期间采集的商用探鱼仪声学图像数值化处理结果显示,虾群重心分布水层的均值为77.3 m,略大于本研究中虾群的平均深度69.5 m,虾群的相对密度亦呈现相似的昼夜变化规律。同时,Taki等(2005)发现,该水域2月南极磷虾拖网的平均深度为74.9 m,且白天的拖网平均深度和单位捕捞努力量(CPUE)明显大于夜间,上述结论与文中所得南极磷虾的昼夜垂直分布研究结果也较为一致。在此,需要指出的是,考虑到捕捞作业对磷虾集群行为会产生潜在的影响(Everson *et al.* 1986; William *et al.* 2000),故本研究选取渔船连续拖网作业期间(03:30 - 23:30)出现的磷虾集群回波映像以作分析,由于夜间时间相对偏少,这可能对磷虾集群特征的分析结果产生一定的影响;但研究结果与理论分析较为一致,进一步证明了干扰信号消除方法的可用性和可信性。

参 考 文 献

- 张吉昌,赵宪勇,王新良,汤勇. 2012. 商用探鱼仪南极磷虾声学图像的数值化处理. 渔业科学进展,33(4):64-71
- 张俊,王新良,赵宪勇,李显森. 2011. 渔业声学数据后处理中积分阈的选择与优化 I:目标离散分布状态下积分阈的确定. 渔业科学进展,32(4):41-47
- 赵宪勇,陈毓帆,李显森,陈卫忠,李永振,孙继闽,金显仕,唐启升. 2003. 多种类海洋渔业资源声学评估技术和方法探讨. 海洋学报,25(S1):192-202
- Cornwall C, Horiuchi A, Lehman C. 2012. NOAA ESRL: Sunrise/Sunset Calculator. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/sunrise.html>
- Dalen J, William AK, Kloser R and 6 others. 2007. Collection of acoustic data from fishing vessels. ICES Cooperative Research Report 287
- Dermer DA, Hewitt RP. 1995. Bias in acoustic biomass estimates of *Euphausia superba* due to diel vertical migration. Deep-Sea Res I 42(4):455-461, 463-475
- Everson I, Miller DGM. 1994. Krill mesoscale distribution: results and implications of research during the BIOMASS Programme. In El-Sayed SZ (ed.), 1994. Southern Ocean ecology: the BIOMASS Perspective. Cambridge, UK: Cambridge University Press 129-144
- Everson I, Bone DG. 1986. Effectiveness of the RMT8 system for sampling krill (*Euphausia superba*) swarms. Polar Biol 6(2):83-90
- Hewitt RP, Demer DA. 2000. The use of acoustic sampling to estimate the dispersion and abundance of euphausiids, with an emphasis on Antarctic krill, *Euphausia superba*. Fish Res 47(2-3):215-229
- Hewitt RP, Watkins J, Naganobu M and 14 others. 2004. Biomass of Antarctic krill in the Scotia Sea in January/February 2000 and its use in revising an estimate of precautionary yield. Deep Sea Res II 51(12-13):1215-1236
- Hewitt RP, David AD. 2000. The use of acoustic sampling to estimate the dispersion and abundance of euphausiids, with an emphasis on Antarctic krill, *Euphausia superba*. Fish Res 47(2-3):215-229
- Higginbottom I, Woon S, Schneider P. 2008. Hydroacoustic data processing for standard stock assessment using Echoview. Echoview Technical manual
- Klevjer TA, Tarling GA, Fielding S. 2010. Swarm characteristics of Antarctic krill *Euphausia superba* relative to the proximity of land during summer in the Scotia Sea. Mar Ecol Prog Ser 409:157-170
- Lascara CM, Hofmann EE, Ross RM and 1 other. 1999. Seasonal variability in the distribution of Antarctic krill, *Euphausia superba* west of the Antarctic Peninsula. Deep-Sea Res I 46(6):951-984
- Lawson GL, Wibe PL, Stanton TK and 1 other. 2008. Euphausiid distribution along the Western Antarctic Peninsula-Part A: Development of robust multi-frequency acoustic techniques to identify euphausiid aggregations and quantify euphausiid size, abundance and biomass. Deep-Sea Res II 55(3-4):412-431
- Martin WD, William AK, Vidar GW and 2 others. 2002. Using fishing vessels to collect Acoustic data for scientific purpose: Preliminary results from midwater trawlers in the Eastern Bering Sea walleye pollock fishery. ICES Symposium: Acoustic in Fisheries and Aquatic Ecology
- Parker-Setter SL, Rudstam LG, Sullivan PJ and 1 other. 2009. Standard operating procedures for fisheries acoustic surveys in the Great Lakes. Great Lakes Fish Comm Spec Pub 09-01
- SG-ASAM. 2010. Report of the fifth meeting of the subgroup on acoustic survey and analysis method. Cambridge, UK, 1 to 4 June 2010. Submitted for: Report of the Twenty-ninth Meeting of the Scientific Committee(SC-CAMLR-XXIX/6). CCAMLR, Hobart, Australia: 23
- Siegel V, Kawaguchi S, Ward P and 4 others. 2004. Krill demography and large-scale distribution in the southwest Atlantic during January/February 2000. Deep-Sea Res II 51(12-13):1253-1273
- Simmonds EJ, MacLennan DN. 2005. Fisheries Acoustics: Theory and Practice. Second Edition. Oxford: Blackwell Science
- Taki K, Hayashi T, Naganobu M. 2005. Characteristics of seasonal variation in diurnal vertical migration and aggregation of Antarctic krill(*Euphausia Superba*) in the Scotia Sea, using Japanese fishery data. CCAMLR Science Shortnote 12:163-172
- Trathan PN, Agnew DJ, Miller DGM and 6 others. 1992. Krill biomass in Area 48 and Area 58: recalculations of FIBEX data. In: CCAMLR Selected Scientific Papers, (SC-CAMLR-SSP/9). Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, Hobart, Australia, 157-181
- Watkins JL, Brierley AS. 1996. A post-processing technique to remove background noise from echo integration data. ICES J Mar Sci 53:339-344
- William WM, Hamner PP. 2000. Behavior of Antarctic krill (*Euphausia superba*): schooling, foraging, and antipredatory behavior. Can J Fish Aquat Sci 57(Suppl. 3):192-202
- Zhou M, Dorland RD. 2004. Aggregation and vertical migration behavior of *Euphausia superba*. Deep-Sea Res II 51(17-19):2119-2137