DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.19064

拖网作业参数对南极磷虾捕捞效率的影响

刘志强1, 许柳雄1,2,3, 唐浩1,4, 王腾5, 周成6, 贾明秀7

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. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海海洋大学, 上海 201306;

4. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092;

5. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300;

6. 中国海洋大学水产学院,山东 青岛 266003;

7. 中国水产有限公司, 北京 100160

摘要:为了解南极磷虾(*Euphausia superba* Dana)拖网作业中捕捞效果及影响因素,根据 2017 年 12 月—2018 年 6 月随 "龙腾"轮在南极海域生产时收集的作业参数、网具深度和声学数据等信息,利用声学方法获取磷虾集群质量 中心深度与期望入网渔获量,结合网位变化和渔捞统计情况量化捕捞效率;利用广义可加模型(GAM)分析不同拖 速和曳纲长度下,网位与磷虾集群质量中心的偏离程度,研究其对网具捕捞效率的影响。结果表明:(1)磷虾集群质 量中心水深为(37.29±9.72) m,拖网稳定拖曳期间网位深度为(30.72±10.41) m,网位调整幅度为(11.52±7.09) m。网 位与磷虾集群质量中心深度偏离(6.33±3.58) m。(2)网次渔获量为(16.25±6.77) t,拖曳过程中网口始终对准磷虾集群 质量中心进入网口的磷虾总量为(27.06±10.19) t,捕捞效率为(63±19)%。(3)网位与磷虾集群质量中心深度差值对捕 捞效率影响极显著(*P*<0.001),两者吻合较好时捕捞效率高;拖速与捕捞效率相关性不明显(*P*=0.087)。研究结果将 有助于南极磷虾拖网作业中有效利用磷虾行为特征,改善网具性能,提高拖网捕捞效率。

南极大磷虾(*Euphausia superba* Dana),俗称 南极磷虾,估计生物量约 6.5~10 亿 t^[1],为地球资 源量最大的单种生物之一。南极磷虾不但具有很 大的商业开发价值,包括医药价值和食用价值^[2], 而且在南大洋海洋生态系统中有着极为重要的地 位^[3],因此得到人们的广泛关注。

根据南极磷虾的群聚性和栖息水层,国内 外普遍采用中层拖网进行瞄准捕捞^[4]。中层拖网 瞄准捕捞作业时,成败关键在于拖网网口位置是 否始终处于磷虾群所在的水层^[5]。黄洪亮等^[6]发现 竹筴鱼中层拖网网位是否对准鱼群位置,捕捞效 率有明显差异,网位与鱼群位置偏离较远时捕捞 效率低。因此,网位是否控制得当将直接影响着 捕捞效率^[7]。根据探鱼仪映像及时改变拖速或曳 纲长度来调整网位,使网口始终处在磷虾集群中 心^[8],是磷虾拖网作业时通常的做法。韩曦等^[9] 和王文硕等^[10]海上实测发现,曳纲越长网位越深; 万荣等^[11]和王尔光^[12]理论计算结果显示,网位随

收稿日期: 2019-03-20; 修订日期: 2019-04-25.

基金项目:国家自然科学基金项目(41776185; 41806110);农业农村部南极海洋生物资源开发利用项目(D8002-17-0109);上海 市青年科技英才扬帆计划资助(19YF1419800).

作者简介: 刘志强(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事渔具与渔法研究. E-mail: lzhiqiang716@126.com

通信作者:许柳雄,教授,博士生导师. E-mail: lxxu@shou.edu.cn

拖速增加而上升。拖网捕捞效率一般是指网具单 位时间内的捕鱼量,通常使用网次产量与拖网作 业持续时间之比表示[13]。但该方法通常没有考虑 网具在捕捞过程中是否始终对准密度最大鱼群或 虾群,因此无法了解网具是否达到(理论上)最大 捕捞效率。评估南极磷虾拖网的捕捞能力,不但 需要了解拖网过程中被网口拖进的磷虾数量,同 时还要判断拖网过程中网位是否始终与磷虾集群 的密集中心位置一致,即拖进的磷虾是否数量最 多。声学评估具有快捷、取样量大^[14]、评估结果 精度高的特点, 且能提供更准确的磷虾分布信息^[15]。 利用声学方法可快速评估出拖网稳定拖曳期间各 水层的磷虾生物量, 然后通过加权法可计算出磷 虾集群垂直方向的质量中心,即磷虾群体最大密 度中心。只要知道实际拖网产量与假设拖网稳定 拖曳过程中网口始终对准磷虾集群中心进入网口 的磷虾总量之比, 就可了解磷虾拖网捕捞效率或 捕捞能力。本文以声学评估得到的磷虾集群质量 中心水层以及拖网稳定拖曳过程中网口始终对准 该中心进入网口的磷虾总量,建立网位与虾群质 量中心深度差和拖网捕捞效率的关系,量化拖网 瞄准捕捞的效果,为改善拖网瞄准捕捞效果提供 参考。

广义可加模型^[16](general additive model, GAM) 是目前较先进的关于多变量因素与响应变量关系 的研究方法,获得的结果信息更为丰富,已在渔 业上广泛应用。作者自 2017 年 12 月至 2018 年 6 月,随中国水产有限公司拖网渔船"龙腾"轮执行 农业农村部南极海洋生物开发利用项目期间,基 于海上实测的拖网作业参数和采集的磷虾声学数 据,利用 GAM 统计模型分析拖速、曳纲长度以及 网位与磷虾集群质量中心深度差对捕捞效率的影 响,以期为提高南极磷虾拖网捕捞效率提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验水域

试验水域为南极半岛与南舍得兰群岛之间 (图1), 经度范围59°W~61°W, 纬度范围63°S~64°S。



Fig. 1 The experiment area of Antarctic krill trawler "LongTeng"

1.2 渔船与渔具

渔船为中国水产有限公司大型加工拖网船 "龙腾"轮,主尺度见表1。

	表 1	南极磷虾拖网渔船"龙腾"轮主尺度
Tab. 1	Main di	mensions of Antarctic krill trawler "LongTeng"

渔船总长/m	主机功率/kW	总吨位/t	最大航速/knot	型深/m	型宽/m
total length	main engine power	total tonnage	max speed	moulded depth	moulded breadth
120.7	2×2650	7765	14.3	12.22	19

"龙腾"轮使用 300 m×138.8 m 四片式磷虾拖 网, 网袖长度为 20 m, 网口网目尺寸为 400 mm, 网身长度 88.8 m, 网囊长度为 30 m。网身共 11 节, 网目尺寸从 400 mm 逐渐减少到 144 mm, 内 衬网从网身第 2 节开始附加, 网目尺寸为 16 mm, 网囊内衬网网目尺寸 12 mm。网板为 13 m² 立式 曲面网板, 展弦比 1.66, 空气中重 3.6 t。

1.3 网位与声学数据采集

网具深度由加拿大生产的 DR-1050 型水深测 量仪(简称 DR-1050)自动记录和储存,测量范围 为 0~750 m,测量精度为满量程的±0.05%。测试 前,分别将 DR-1050 固定在网具上、下纲中点,设 定每 5 s 记录一次数据。曳纲长度采用船上曳纲 系统控制器显示的数据为网具稳定拖曳过程中时 刻值,拖速为对地拖速,通过 GPS 显示器读取。 记录网具入水时刻,并通过船用网位仪记录网具 稳定后的时刻,用于后续数据的筛选和处理,本 文使用的网产量为整个拖网作业过程产量。

声学数据由"龙腾"轮配置的 Simrad EK60 科 学探鱼仪采集。该探鱼仪包含 3 个工作频率(38、 70 和 120 KHz),本文采用 120 KHz 工作频率下采 集的声学数据进行计算。探鱼仪的参数设置参考 CCAMLR 规范^[17]如表 2 所示,于 2017 年 4 月在 福克兰群岛的伯克利海峡对探鱼仪进行了校正。

表 2 EK60 科学探鱼仪参数设置 Tab. 2 Main settings of EK60 ecosounder

换能器参数 transducer parameters	38 kHz	70 kHz	120 kHz
波束类型 beam type	分裂	分裂	分裂
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)	10.20	17.90	25.80
absorption coefficient			
Sa 修正/dB Sa correction	-0.64	-0.72	-0.49

1.4 参数定义与计算

1.4.1 网位 网位定义为网口中心离水面的距离,即网口中心点的水深^[18],可表示为:

$$D = \frac{h_1 + h_2}{2} \tag{1}$$

式(1)中, *D* 为网位(m), *h*₁ 为上纲中点深度(m), *h*₂ 为下纲中点深度(m)。本文中涉及的"网口"和"网 位"深度均指拖网稳定拖曳过程中的情况。

1.4.2 网位深度差 网位深度差(简称"深度差")*d* 为网位与磷虾集群质量中心的深度差值,即:

$$d = |D - H| \tag{2}$$

$$H = \frac{\int_{H_{min}}^{H_{max}} S_{v} dz}{\sum_{H_{min}}^{H_{max}} S_{v}}$$
(3)

式(2)~(3)中: d 为深度差(m), D 为网位(m), H 为磷

虾集群质量中心至水面深度(m), *H_{max}*为磷虾集群 出现最大深度, *H_{min}*为磷虾集群出现最小深度, *S_v* 为平均磷虾体积散射强度。

1.4.3 捕捞效率 捕捞效率 η 为网次产量与网口 始终对准磷虾集群质量中心进入网口的磷虾总量 之比,即:

$$\eta = \frac{C}{B} \tag{4}$$

式(4)中,η为捕捞效率,C为网次产量(t),B为网口 始终对准磷虾集群质量中心进入网口的磷虾总量 (t),计算方法参照 Simmonds 等^[19]如下:

$$B = \rho_w \times A \tag{5}$$

式(5)中, A 为调查海域面积(km²), ρ_w 为磷虾表面 密度(g/m²)

$$\rho_w = s_A \times C \tag{6}$$

$$C = \frac{WW}{\sigma_{sp}} \times \frac{1}{1852^2} \tag{7}$$

$$\sigma_{sp}(l_i) = 4\pi 10^{TS/10}$$
(8)

$$\sigma_{sp} = \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} f_i \times \sigma_{sp}(l_i) \tag{9}$$

$$WW(l_i) = 5.5 \times 10^{-6} \times L^{3.2059}$$
(10)

$$WW = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} f_i \times WW(l_i) \tag{11}$$

式(6)~(11)中 s_A 等同于 NASC, C 为磷虾 NASC-密 度转换因子, WW 为磷虾湿重(g), σ_{sp} 为磷虾散射 截面积(m²),根据磷虾体长频率分布计算出的加 权平均值, l_i 为i体长分段区间长度,TS为 SDWBA 模型计算出的磷虾单体目标强度^[20], n 为磷虾体 长分段数目, f_i 为 i 体长分段磷虾个数。

1.5 分析模型

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^[21]。本研究以捕捞效率为非独立变量, 网位与磷虾集群质量中心深度差值、拖速和曳纲 长度作为解释变量建立 GAM 模型,表达方式为:

$$g(\eta) = s(d) + s(V) + s(L) + \varepsilon$$
(12)

式(12)中, η 为捕捞效率,d为网位与磷虾集群质量 中心深度差值(m),V为拖速(kn),L为曳纲长度(m), ε 为误差项,s为自然立方样条平滑(natural cube spline smoother)。利用 AIC (Akaike Information Criterion)准则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。利用 F 检验评估因子的显著性。

1.6 数据处理方法

运用 EXCEL 2013 处理网具深度数据,获得 稳定拖曳过程中网位的深度变化,Echoview 6.1 软件处理声学数据,对映像中的回波积分得到磷 虾的 NASC 值和平均磷虾体积散射强度 \overline{s}_v ,结合 网位深度和磷虾质量中心深度数据(图 2),分析两 者不同位置关系对捕捞效率的影响,最后基于 R 3.4.1 软件编程实现 GAM 模型运算并分析拖速、 曳纲长度和网位与磷虾集群质量中心深度差对捕 捞效率的影响。



2 结果与分析

试验期间共测定 25 网次,试验网次中磷虾在 垂直方向上均无分层,拖网过程中网位所处水深 范围 0~80 m,其中 5 网次网位水深范围在 0~20 m, 此深度下声学映像因受船体运动产生气泡影响误 差较大,故可用于有效分析的有 20 网次。

2.1 网位变化

如图 3 所示, 网位为网具稳定拖曳过程中所 处深度的平均值, 正负误差值表示网位的变化范 围。其中, 网位变化幅度较大的是第 10~12 和第 17~20 网次, 变化均大于 15 m, 其余网次网位变 化幅度较小。网位平均水深(30.72±10.41) m, 其中 第 12 网次最深为 54 m, 第 9 网次最浅仅为 16 m, 第 1、10~12、18、19 网次网位均大于 38 m, 第 2~9、13~17、20 网次网位在 10~38 m 之间。



2.2 磷虾栖息水层和生物量

图 4 中磷虾集群质量中心深度表示磷虾集群 平均栖息深度。由图可知,磷虾集群质量中心平 均深度为(37.29±9.72) m,其中第 12 网次最深为 55 m,第 13 网次最浅为 21 m,第 2~5、8、9、 13~16、20 网次该中心深度在 20~40 m之间,第 1、 6、7、10~12、17~19 网次该中心深度在 40~55 m 之间。



Fig. 4 Antarctic krill mass center distribution in the water layer

如图 5 所示,磷虾生物量为网口始终对准磷 虾集群中心进入网口的磷虾总量,平均为(27.06± 10.19) t。其中第6 网次磷虾总量最大为47 t,第1 网次磷虾总量最小,仅为8.7 t。

2.3 捕捞效率和网位深度差

如图 6 所示, 捕捞效率平均值为(63±19)%, 深度差平均为(6.33±3.58) m, 其中第 6 网次捕捞 效率最低为 25 %, 此时深度差最大为 13.5 m, 表





明网位与磷虾集群中心偏离较远,捕捞效果差, 第13 网次捕捞效率最高为92%,而此时深度差最 小为0.8 m;第14~16 网次捕捞效率均大于80%, 此时深度差均较小,表明网位与磷虾集群中心吻 合程度较高,捕捞效果好。第2、5、6、8 网次深 度差值均大于 10 m,表明网位与磷虾集群中心深 度偏离较远,第 1、4、11~15、17、18 网次深度 差均小于 5 m,表明网具经过磷虾密度大的集群, 捕捞效果较好。

2.4 影响捕捞效率的因素

基于 GAM 模型分析拖速、曳纲长度和网位 深度差对捕捞效率的影响。结果显示,模型对捕捞效率总偏差解释率为 76.4%, F 检验表明, 网位 深度差与捕捞效率呈极显著相关关系(P<0.001),拖速与捕捞效率呈显著负相关关系(P<0.05),随 着拖速增大,捕捞效率呈下降趋势,拖速 2.3 kn (最小值)时,捕捞效率公 92%,拖速 3.1 kn(最大值)时,捕捞效率仅为 25%。曳纲长度对捕捞效率影响不显著(P=0.087),曳纲长度增大导致网位下降,捕捞效率逐渐减小,曳纲长度大于 200 m 时,捕捞效率均小于 50%。总之,分析 GAM 模型统计结果可知,拖速、曳纲长度和网位深度差是影响雨极磷虾拖网捕捞效率的关键因素(见表 3, 图 7)。

表 3 GAM 模型统计结果 Tab. 3 Statistical results of GAM

模型因子 model factors	估计自由度 estimated df	参考自由度 referred df	F	Р
拖速(V) towing speed	1.000	1.000	5.502	0.032202
深度差(d) depth differences	1.000	1.000	16.330	0.000876
曳纲长度(L) warp length	1.277	1.492	3.888	0.086712



图 7 各影响因子与南极磷虾捕捞效率之间关系的 GAM 分析图

Fig. 7 GAM analysis diagram of the relationship between each influencing factor and Antarctic krill catch efficiency

3 讨论

3.1 网位对捕捞效率的影响

在磷虾拖网捕捞过程中对网位的调整极其重 要,因为网位与磷虾集群中心偏离较远时,密度 较大的磷虾集群往往不能进入网具,从而导致捕 捞效率低;反之,网位与磷虾集群中心吻合较好 时,可捕捞密度较大的虾群,捕捞效率高。黄洪亮 等^[13]将网位定义为网具上中纲至水面的距离,苏 志鹏等^[16]将网位定义为网口中心位置离水面的 距离,本文引用后者的网位定义进行计算,因为 网口中心点位置是上、下纲深度共同决定,将网 具在拖曳过程中位置的变动情况表示的更加准 确。在磷虾拖网作业过程中,网位变化取决于磷 虾集群栖息水层的变化,试验中网位变化范围较 大的网次均在夜间和黎明时间段,其分别占总试 验网次的 25%和 35%,可能原因与磷虾昼夜垂直 移动规律相关^[22]。

3.2 捕捞效率误差分析

本文定义捕捞效率为网产量与拖网稳定拖曳 过程中网口始终对准磷虾集群中心进入网口的磷 虾总量比值,区别于网次产量与拖曳时间比值的 方法^[13],其优点主要为考虑了网具与磷虾集群之 间相互位置关系,能准确评估磷虾拖网作业过程 中网位是否始终与磷虾最大密度集群中心一致, 是否达到最大捕捞效率。造成捕捞效率误差的原 因来于一方面声学评估磷虾生物量时需去除声学 映像中非生物信号,渔船在作业中,船体运动产 生的气泡层会对海表面以下一定深度(本文为 20 m)的声学映像产生覆盖干扰,本文应用"固定 深度线"变量去除海表面声学映像[23],并只评估 了网具稳定拖曳过程中磷虾生物量,导致磷虾生 物量评估偏低;另一方面本文网产量为网具从进 入水面到离开水面,整个拖网作业过程的产量, 并没有与评估的网具稳定拖曳过程中的磷虾生物 量匹配。尽管捕捞效率计算有一定误差,但可为 评估拖网捕捞性能和提高声学方法资源评估精度 提供参考。

3.3 影响捕捞效率因素

拖速、曳纲长度和网位深度差是影响捕捞效

率的关键因素,其中拖速增大时网位上升,网口 高度也随之下降[18],无法与磷虾集群质量中心对 准,导致进入网具的磷虾数量减少,进而降低捕 捞效率。分析网位深度差和捕捞效率的关系,更 直观的表现出拖网捕捞作业中是否达到瞄准捕捞 的目的, 为评判中层拖网捕捞成败提供更有力的 依据。本文中曳纲长度对捕捞效率影响不明显, 可能原因是实测数据较少,不足以使研究结果呈 现规律性。拖网捕捞作业中如浮沉力配备、网板 等均对捕捞效率有一定影响,本次海上实测没有 记录,因此没有进行上述因子对捕捞效率影响的 研究,今后可将上述因子加入对捕捞效率影响分 析中,使结果更具科学性。由于海上实测不可重 复性及条件有限,会出现操作误差,对研究结果 有一定影响, 但海上实测数据的研究更加符合拖 网捕捞真实性。尽管如此,本文的研究结果对于 有效调整南极磷虾拖网网位以及为实现瞄准捕捞 的目的提高作业水平均有参考价值。

参考文献:

- Feng C L, Huang H L, Zhou A Z, et al. Performance optimization of a trawl for Antarctic krill[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(4): 662-670. [冯春雷,黄洪亮,周爱忠,等. 南极磷虾拖网的性能优化分析[J]. 中国水产科学, 2012, 19(4): 662-670.]
- [2] Wu W P, Xie Y L. Antarctic krill and krill fishery[J]. Modern Fisheries Information, 2010, 25(1): 10-13. [吴伟平,谢 营樑. 南极磷虾及磷虾渔业[J]. 现代渔业信息, 2010, 25(1): 10-13.]
- [3] Wang R, Sun S. Krill fishery in the Southern Oceanits present and future[J]. Marine Sciences, 1995, 19(4): 28-32. [王 荣, 孙松. 南极磷虾渔业现状与展望[J]. 海洋科学, 1995, 19(4): 28-32.]
- [4] Huang W Q, Lin D F, Guan C T. Experimental study on fishing pelagic fishes by using pelagic trawl of pair-boat[J]. Marine Fisheries Research, 2003, 24(1): 49-55. [黄文强,林 德芳,关长涛. 变水层拖网捕捞小型中上层鱼类的试验[J]. 海洋水产研究, 2003, 24(1): 49-55.]
- [5] Sun M C. Marine Fishery Technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014: 83-154. [孙满昌. 海洋渔业技术学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 83-154.]
- [6] Huang H L, Chen X Z. Min-water trawl techniques for fishing Chilean jack mackerel in the southeastern Pacific Ocean[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(1):

99-103. [黄洪亮, 陈雪忠. 东南太平洋智利竹筴鱼中层拖 网捕捞技术[J]. 中国水产科学, 2005, 12(1): 99-103.]

- [7] Yang J L, Huang H L, Wu Y, et al. Impact factor analysis of fishing efficiency of *Trachurus murphyi* in abnormal marine environment[J]. Marine Fisheries, 2016, 38(6): 588-596. [杨 嘉樑, 黄洪亮, 吴越, 等. 异常海洋环境年份智利竹筴鱼 捕捞效率的影响因素分析[J]. 海洋渔业, 2016, 38(6): 588-596.]
- [8] Xu G D, Chen X Z, Huang H L, et al. The fishing technology for *Euphausia superba*[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011(19): 122-124, 128. [徐国栋,陈雪忠,黄洪亮,等. 南 极磷虾捕捞技术探讨[J]. 湖南农业科学, 2011(19): 122-124, 128.]
- [9] Han X. Analysis of the position control of bottom trawl for double dragging[J]. Fisheries Science, 1995, 14(8): 26-28.
 [韩曦. 双船底拖网网位控制方法的探讨[J]. 水产科学, 1995, 14(8): 26-28.]
- [10] Wang W S, Wu L S. The relationship between the warp length and the water layer of the net position[J]. Fisheries Science, 1983, 2(3): 16-18. [王文硕, 武连胜. 曳纲长度与 网位水层的关系[J]. 水产科学, 1983,2(3): 16-18.]
- [11] Wan R, Zhu W B, He X, et al. Static analysis of the position control of mid-water trawl for double dragging[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(1): 61-64. [万荣,朱 文斌,何鑫,等. 双船中层拖网网位控制的静力学解析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(1): 61-64.]
- [12] Wang E G. The control in waterlayer on middle level trawl[J]. Journal of Dalian Fisheries College, 1991, 6(2): 21-29. [王尔光. 中层拖网的水层控制[J]. 大连水产学院 学报, 1991, 6(2): 21-29.]
- [13] Zhu G P, Wang R. Catch per unit effort of Antarctic krill (*Euphausia superba*) fishery and its suitability to abundance estimation[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(7): 1072-1079. [朱国平, 王芮. 南极磷虾渔业 CPUE 及其丰度 估算适用性[J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1072-1079.]
- [14] 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.]

- [15] 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(12-13): 1215-1236.
- [16] de Veaux R D. Generalized additive models[J]. Technometrics, 1992, 34(2): 225-226.
- [17] CCAMLR. Report of the ninth meeting of the Subgroup on Acoustic Survey and Analysis methods. SC-CCAMLR-XXIX/6, 2016.
- [18] Su Z P, Xu L X, Zhu G P, et al. Effects of towing speed and warp length on the net position of Antarctic krill midtrawl[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(4): 884-892. [苏志鹏, 许柳雄, 朱国平, 等. 拖速和曳纲长度 对南极磷虾中层拖网网位的影响[J]. 中国水产科学, 2017, 24(4): 884-892.]
- [19] Simmonds J, Maclennan D. Fisheries Acoustics: Theory and Practice[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2005.
- [20] CCAMLR. Report of the fifth meeting of the Subgroup on Acoustic Survey and Analysis methods.SC-CCAMLR-XXIX/6, 2010.
- [21] Zhu G P, Zhu X Y, Xu Y Y, et al. The spatiotemporal distribution of fishing grounds for Antarctic krill (*Euphausia Superba*) around the south Orkney islands in austral summer autumn and its relation to environmental factors based on a generalized additive model[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2012, 24(3): 266-273. [朱国平, 朱小艳, 徐怡瑛, 等. 基于 GAM 模型分析夏秋季南奧克尼群岛南极磷虾渔场时空分布及与环境因子之间的关系[J]. 极地研究, 2012, 24(3): 266-273.]
- [22] 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. [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.]
- [23] Foote K G. A critique of Goddard and Welsby's paper "The acoustic target strength of live fish"[J]. ICES Journal of Marine Science, 1986, 42(3): 212-220.

Effects of trawling operation parameters on the fishing efficiency of Antarctic krill

LIU Zhiqiang¹, XU Liuxiong^{1, 2, 3}, TANG Hao^{1, 4}, WANG Teng⁵, ZHOU Cheng⁶, JIA Mingxiu⁷

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

- 2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
- 3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
- 4. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;
- 5. South China Sea Fisheries Research Institute, Guangzhou 510300, China;
- 6. College of Fishery, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;
- 7. China National Fisheries Corporation, Beijing 100160, China

Abstract: To understand the effects of fishing and factors influencing the Antarctic krill (Euphausia superba) trawl operations, operation parameters, net depth, acoustic data, and other information were collected by the krill trawler "Long Teng" of the China National Fisheries Corp., Ltd. fishing in the Southern Ocean from December 2017 to June 2018. The mass center depth and expected catches in the net of the Antarctic krill swarm were obtained by an acoustic method, and the fishing efficiency was quantified based on the net position and fishing log. Then, the GAM statistical model was used to analyze the degree of deviation between the net position and mass center of the krill swarm under different towing speeds and warp lengths to study the fishing efficiency of the net. The results showed that: (1) The depth of the krill swarm mass center was (37.29±9.72) m, the depth of the net position during stable towing of the trawl was (30.72 ± 10.41) m, the adjustment range of the net position was (11.52 ± 7.09) m. The deviation between the net position and the mass center depth of the krill swarm was (6.33 ± 3.58) m. (2) The catch per haul was (16.25±6.77) t, the total amount of krill entering the net mouth when the net mouth was always aligned with the krill swarm mass center during the towing process was (27.06±10.19) t, and the fishing efficiency was $(63\pm19)\%$. (3) The depth difference between the net position and the mass center of the krill swarm had an extremely significant influence on fishing efficiency (P < 0.001), and when the two were in good agreement, the fishing efficiency was high. The net position went up with the increase in the towing speed and a significant correlation was found between towing speed and fishing efficiency (P < 0.05). The net position went down with the increase of the warp length, but there is no significant correlation between the change in the warp length and fishing efficiency (P=0.087). The results of this study will contribute to the effective use of krill behavior in Antarctic krill trawling operations, the improvement of net performance, and improvement of trawling efficiency. Key words: Antarctic krill; net position; acoustic method; trawl fishing efficiency; krill swarm mass center

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