

文章编号: 1674-5566(2021)01-0144-11

DOI:10.12024/jsou.20191202879

基于多元变量的南极磷虾拖网作业状态影响因素分析

陈明鑫¹, 许柳雄^{1,2,3,4,5}, 唐浩^{1,2,3,4,5}, 周成^{1,2,3,4,5}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306; 3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 4. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 5. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306)

摘要: 拖网作业过程中的网位、网身状态、拖网整体状态是评价拖网性能优劣的重要指标。以南极磷虾拖网为例, 通过测量拖网不同部位(上纲、第 3~4 节网身连接处和网囊口上部中点)深度, 以部位间深度差表示拖网作业状态, 分析捕捞操作、海洋环境和渔获量对拖网作业状态的影响, 确定中层拖网作业过程中状态的变化趋势。结果表明: 上纲与第 3~4 节网身连接处深度差范围为 -0.20~8.02 m, 上纲与网囊口上部中点深度差范围为 6.49~30.16 m; 曳纲长度、拖速、风速、150 m 水层流速对磷虾拖网上纲深度影响显著, 上纲深度与曳纲长度和 150 m 水层流速呈正相关关系, 与拖速呈负相关关系, 随风速增加, 上纲深度先减小后增大; 拖速、200 m 水层流速和浪高对上纲与第 3~4 节网身连接处深度差影响极显著; 上纲与第 3~4 节网身连接处深度差具有随拖速和 200 m 水层流速的增加, 先增大后减小的趋势, 其中拖速为 2.6 kn 以及 200 m 水层流速为 0.3 kn 时, 上纲与网囊口上部中点深度差最大, 2 m 浪高时, 深度差最小; 渔获量与上纲和网囊口上部中点深度差呈正相关关系; 曳纲长度是影响拖网作业状态的最重要因素, 其次是拖网速度、风速、浪高和水流速度。

关键词: 南极磷虾; 拖网状态; 捕捞; 海洋环境; 渔获量

中图分类号: S 972.13 **文献标志码:** A

南极磷虾 (*Euphausia superba*) 是南极海域中生物量最多的甲壳类动物, 具有块状集群和不同虾群分布水层多变的特点, 在南大洋生态系统中占有重要地位^[1-2]。随着捕捞技术的革新, 捕捞参与国为高效开发南极磷虾资源, 将中层拖网作为主要作业渔具^[3-5]。

中层拖网作业状态包括网位状态、网身状态、拖网整体状态等, 在水动力作用下会产生相应变化^[6-8]。拖网网位代表网具的空间位置, 常以上纲中点作为参考点, 是瞄准捕捞的基础^[9-10]。拖网网身作为导鱼区, 其状态的优劣直接影响捕捞对象与网衣的接触情况, 进而影响拖网选择性和渔获品质^[11-13]。拖网整体状态是拖网系统的直观表现, 通过对网具整体状态的监控, 可在网具受损等大型事故发生前进行规避与调整^[14]。

因此, 网位及网身状态是决定拖网捕捞效率的关键因素, 而拖网整体状态是实现安全作业的重要参考。影响拖网状态的因素包括捕捞操作、海洋环境和渔获量等^[15-20]。捕捞操作常被认为是影响网具状态的最主要因素, 苏志鹏等^[9]和韩曦^[21]指出, 调整曳纲长度是改变拖网网位最有效的方法。CHO 等^[22]发现, 韩国沿海底拖网网口高度随着拖速的增加或曳纲长度的增加而降低。WEINBERG 等^[23]提出, 两侧曳纲长度不等会造成拖网左右不对称, 网口有效水平扩张降低, 捕捞效率下降。21 世纪初, 部分学者探讨了单一环境变量与拖网捕捞效率间的关系, 但并未从网具状态方面着手^[24-26]。QUEIROLO 等^[17]指出, 智利甲壳类底拖网的网口水平扩张与风速呈正相关关系, 与浪高呈负相关关系。此外, 渔获量也

收稿日期: 2019-12-16 修回日期: 2020-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(31902426, 41806110); 上海市科学技术委员会青年科技英才扬帆计划(19YF1419800); 农业农村部南极生物资源开发利用专项(D-8002-18-0097)

作者简介: 陈明鑫(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔具与渔法。E-mail: 15040706675@163.com

通信作者: 唐浩, E-mail: htang@shou.edu.cn

会通过改变网囊受力而影响着拖网状态。BROADHURST 等^[20]根据底拖网模型试验发现,随着渔获量增多,网囊的菱形网目闭合明显,网囊末端深度大于网口中心深度。

使用海上实测方法研究以南极磷虾拖网为代表的大洋性拖网网具状态,无需简化网具,可获得真实工作下的拖网数据,但在状态研究的进程中,除拖网网位和捕捞操作数据外,其他拖网部位和影响因子并未受到足够的关注。为此,作者于2018年7月至8月期间赴南极南乔治亚岛水域进行海上实测,通过测量拖网不同部位深度,以各部位间深度差表示拖网作业状态,运用广义加性模型(generalized additive models, GAM)

分析捕捞操作和环境变量对上纲深度和上纲与第3~4节网身连接处深度差造成的影响,使用单因素方差分析(One-way ANOVA)探讨渔获量对上纲与网囊口上部中点深度差的影响,旨在确定作业过程中拖网状态变化的情况,以期对拖网最优作业状态的选取起到参考作用。

1 材料与方法

1.1 渔船与渔具

实验依靠辽宁远洋渔业有限公司专业磷虾拖网船“福荣海”(参数见表1)于南乔治亚岛东北部(35°50'W~36°00'W, 53°75'S~54°25'S)作业期间进行(实验站点见图1)。

表1 南极磷虾拖网渔船“福荣海”主尺度

Tab.1 Main dimensions of Antarctic krill trawler “FU Ronghai”

渔船总长 Overall length/m	主机功率 Main engine power/kW	总吨位 Total tonnage/t	型深 Moulded depth/m	型宽 Moulded breadth/m
110.75	4 189.5	5 306	11	17.8

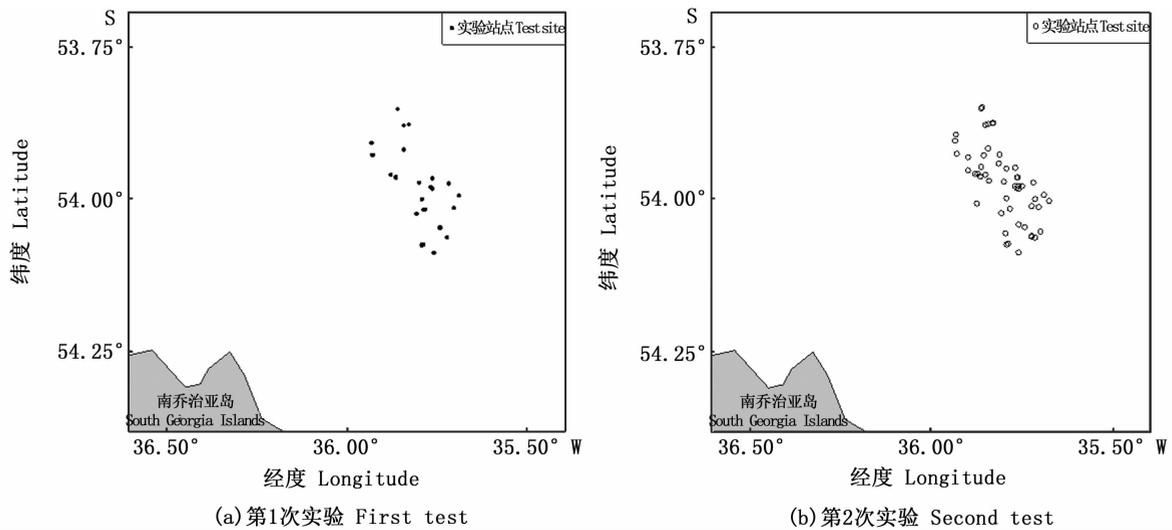


图1 “福荣海”南极磷虾拖网作业水域

Fig.1 Fishing area of Antarctic krill trawler “FU Ronghai”

实验网具为185.4 m × 128.5 m(上纲41.8 m)十片式中层拖网,网线材料为高强度聚乙烯(PE,34 tex),见图2。网袖长度18 m,网目尺寸240 mm。网身全长79.5 m,共11段,1~5节网目尺寸范围75~150 mm,6~11节网目尺寸范围100~120 mm,力纲使用钢丝绳。网囊长度30 m,网目尺寸从80 mm减小到65 mm,力纲使用超高分子量聚乙烯纤维材料(Dyneema)。内衬网材料为尼龙,网身内衬网从网身第6段开始附加,

网目尺寸从30 mm减小到20 mm。网囊内衬网网目尺寸15 mm。网口处配备直径360 mm浮子18个,直径450 mm浮子76个,提供25.9 kN浮力,网囊附加360 mm浮子14个,提供2.2 kN浮力。下纲附加内径25 mm铁链,370 kg(空气中质量,下同),两侧下端网袖各装配900 kg沉铁,网具附加质量2 170 kg。网具整体浮沉比1.2左右。配备1副15 m²曲面网板,网板总质量9.6 t。

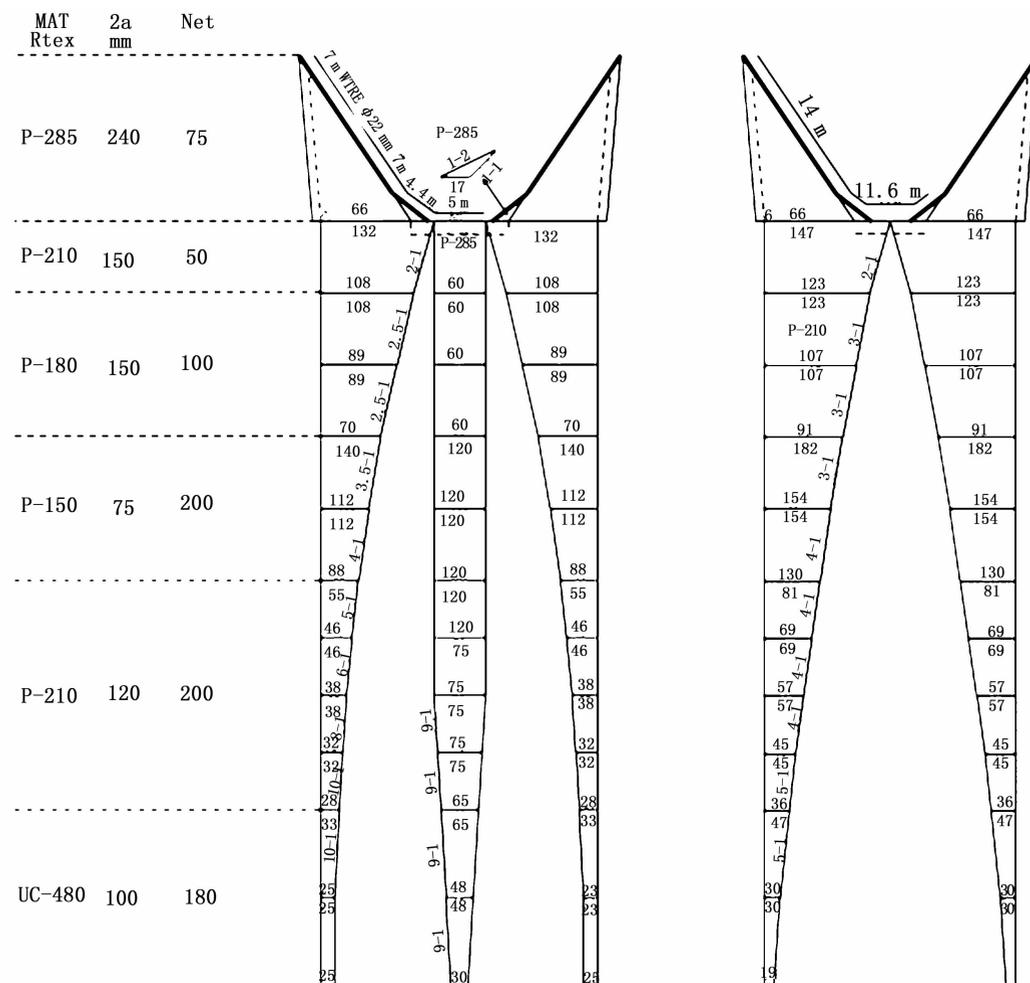


图2 185.4 m × 128.5 m (上纲 41.8 m) 南极磷虾拖网网图

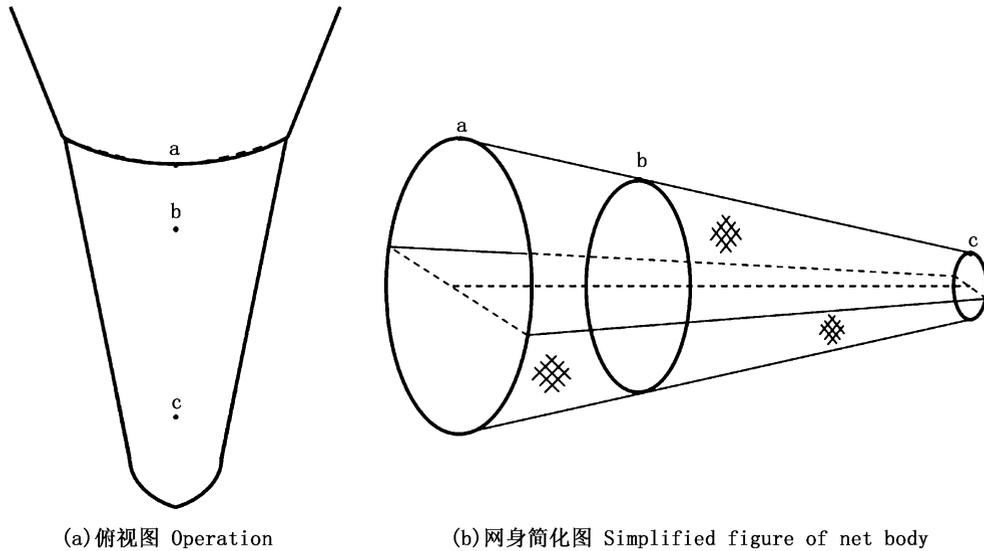
Fig.2 Net drawing of 185.4 m × 128.5 m (headline 41.8 m) Antarctic krill trawl

1.2 数据采集

因磷虾拖网尺寸巨大,难以全面观测,本研究采用拖网不同部位的深度差代表网具作业状态。拖网不同部位深度数据采集点沿网背中线分布,分别设置在上纲中点、第3~4节网身连接处和网囊口上部中点(图3,测量点以下简称上纲、网身1、网囊),将上纲中点作为拖网网位参考点,上纲与网身1的深度差代表局部网身状态,上纲与网囊深度差代表拖网整体状态。

使用自计式温深仪 TDR-2050 进行拖网不同部位深度测量。捕捞操作数据包括拖速、曳纲长

度和渔船航向。使用船用定位系统 GP-25 采集拖速与航向数据,拖速为渔船对地速度。曳纲长度采用船用曳纲控制系统数据。海洋环境数据包括:风向风速、150 m 和 200 m 水层深度的流向流速、浪高。风向风速与流向流速分别使用船用风向风速仪 DIC-AI-SI 和船用潮流计 CI-60G 进行数据采集。浪高无专业仪器测量,由超过 15 年捕捞经验的驾驶人员目测估计^[17]。渔获量通过倾倒进鱼槽的磷虾体积进行估算,得出相应湿质量。



a 点为上纲; b 点为网身 1; c 为网囊; ab、bc、ac 拉直距离分别为 22.5 m、57.0 m、79.5 m。

Point a is the headline; Point b is the net body 1; Point c is the cod-end. The straightening distances of ab, bc and ac were 22.5 m, 57.0 m and 79.5 m, respectively.

图 3 作业期间磷虾拖网俯视图及网身简化图

Fig. 3 Top view of krill trawl during operation and simplified figure of net body

1.3 数据分析

采用 GAM 模型对上纲深度和上纲与网身 1 深度差进行分析^[28-29]。在构建模型之前,对自变量间的相关性进行检验(数据共线性),通过矩阵条件数(conditional number of matrix),剔除重复影响因变量的因子。使用单因素方差分析检验渔获量对上纲与网囊深度差的影响。

完整 GAM 模型表达式如下:

$$D_s = s(X_{warp}) + s(X_{ts}) + s(X_{td}) + s(X_{ws}) + s(X_{wd}) + s(X_{fs-150}) + s(X_{fd-150}) + s(X_{fs-200}) + s(X_{fd-200}) + as.factor(X_{wh}) + \epsilon \quad (1)$$

$$D_l = s(X_{warp}) + s(X_{ts}) + s(X_{td}) + s(X_{ws}) + s(X_{wd}) + s(X_{fs-150}) + s(X_{fd-150}) + s(X_{fs-200}) + s(X_{fd-200}) + as.factor(X_{wh}) + \epsilon \quad (2)$$

式中: D_s 为拖网上纲深度,m; D_l 为上纲与网身 1 的深度差,m; X_{warp} 为曳纲投放长度,m; X_{ts} 为渔船拖速, kn; X_{td} 为渔船拖曳方向, ($^\circ$); X_{ws} 为风速, kn; X_{wd} 为风向, ($^\circ$); X_{fs-150} 和 X_{fs-200} 分别为 150 m 和 200 m 水层的流速, kn; X_{fd-150} 和 X_{fd-200} 分别为 150 m 和 200 m 水层的流向; X_{wh} 为海浪高度,是模型的类别变量,m; 函数 $s()$ 是模型中因变量的一维平滑函数; ϵ 表示残差, $E(\epsilon) = 0, \epsilon = \sigma^2$, 符合正态分布。

模型构建后得到拖网上纲深度和不同部位深度差的 95% 置信区间,并采用赤池信息准则

(akaike information criterion, AIC) 进行向后逐步剔除因子方法回归检验。根据模型结果 P 值评估各自变量对因变量是否存在显著性影响 ($P < 0.05$)。根据估计自由度 (estimated degrees of freedom, EDF) 和模型结果判定自变量与因变量是否属于线性关系 (EDF = 1, 自变量与因变量属于线性关系)。使用 R 3.5.1 软件进行 GAM 模型的构建及相关检验。

2 结果

第一次实验采集 25 网次有效数据,分析捕捞操作与海洋环境对上纲深度及上纲与网身 1 深度差的影响;第二次实验采集 54 网次有效数据,分析起网前 2 min 拖网各部位深度不发生剧烈变化时,渔获量对上纲与网囊深度差的影响。

实验期间,拖曳区域水深小于 500 m。上纲深度 145.82 ~ 302.27 m,网身 1 深度 150.61 ~ 310.15 m,网囊深度 89.10 ~ 301.83 m。曳纲投放长度 350.9 ~ 631.0 m。拖速区间为 2.0 ~ 3.5 kn,航向主要为西北方向。风速变化区间为 2 ~ 8 kn,主要为西北风。各水层流速均小于 1 kn。浪高集中在 2 m 及以上(表 2)。自变量间共线性较弱(矩阵条件数 32.275 33 < 1 000),所有自变量均不予剔除。

表 2 各模型自变量与因变量统计

Tab. 2 Statistics of models independent and dependent variables

变量 Variable	平均值 Mean	标准误差 S. D.	最大值 Max	最小值 Min	中位数 Median
上纲深度 Depth of headline/m	187.87	2.71	302.27	145.82	181.67
网身 1 深度 Depth of net body 1/m	193.67	2.73	310.15	150.61	187.42
上纲与网身 1 深度差 Depth difference between headline and net body 1/m	5.80	0.12	8.02	-0.20	6.11
网囊深度 Depth of cod-end/m	207.71	4.68	301.83	89.10	201.20
上纲与网囊深度差 Depth difference between headline and cod-end /m	17.10	0.68	30.16	6.49	18.14
曳纲长度 Warp length/m	504.07	6.69	631.00	350.90	515.20
拖速 Towing speed /kn	2.70	0.03	3.50	2.00	2.70
航向 Towing direction /($^{\circ}$)	267.98	6.43	340.00	125.00	290.00
风速 Wind speed /kn	4.70	0.19	8.00	2.00	4.00
风向 Wind direction /($^{\circ}$)	254.75	8.11	315.00	45.00	315.00
浪高 Wave height/m	2.10	0.07	3.00	1.00	2.00
150 m 水层流速 Flow speed(150 m) /kn	0.20	0.01	0.90	0	0.20
150 m 水层流向 Flow direction(150 m) /($^{\circ}$)	148.20	8.66	337.50	0	135.00
200 m 水层流速 Flow speed(200 m) /kn	0.25	0.01	0.80	0	0.20
200 m 水层流向 Flow direction(200 m) /($^{\circ}$)	149.69	8.24	337.50	0	157.50
渔获量 Catch/t	21.10	1.43	40.00	1.00	20.00

2.1 上纲深度模型结果

通过 AIC 检验发现,包含所有影响因子的模型 AIC 值最小(996.17),模型解释率最高(82.1%)。曳纲长度、拖速、风速和 150 m 水层

流速显著影响上纲深度($P < 0.05$)。上纲深度仅与曳纲长度和水层流速(150 m 和 200 m)呈线性关系(EDF = 1),见表 3。

表 3 上纲深度 GAM 模型结果

Tab. 3 Summary results of the "GAM = headline depth"

变量 Variable	估计自由度 EDF	参考自由度 Ref. df.	F	P	AIC
曳纲长度 Warp length/m	1.000	1.000	17.274	<0.001	1 005.40
拖速 Towing speed/kn	2.022	2.544	5.619	0.002 653	1 007.27
风速 Wind speed/kn	2.032	2.426	2.932	0.036 970	1 005.36
150 m 水层流速 Flow speed 150 m/kn	1.000	1.000	7.003	0.009 398	1 006.02
200 m 水层流速 Flow speed 200 m/kn	1.000	1.000	0.656	0.419 941	999.25

注:表中 AIC 值代表指定因子剔除后的结果。保留所有因子 AIC = 996.17;模型解释率 = 82.1%; $P < 0.05$ 表示变量显著。

Notes: The AIC value in the table represents the result of the elimination of the specified factor. After retaining all the factors, AIC = 996.17; Deviance explained = 82.1%; $P < 0.05$ indicates significant variables.

由图 4 可知:上纲深度与曳纲长度和 150 m 水层流速呈明显的正相关关系,与拖速呈负相关关系;随风速的增加,上纲深度先减小后增大;上纲深度与 200 m 水层流速和浪高无显著相关关系。

2.2 上纲与网身 1 深度差模型结果

通过 AIC 检验发现,包含所有影响因子的模型 AIC 值最小(293.62),模型解释率为 73.6%。拖速、200 m 水层流速和 2 m 浪高对上纲与网身 1 深度差影响显著($P < 0.05$)。上纲与网身 1 深度差仅与 150 m 水层流速呈线性关系(EDF = 1)。

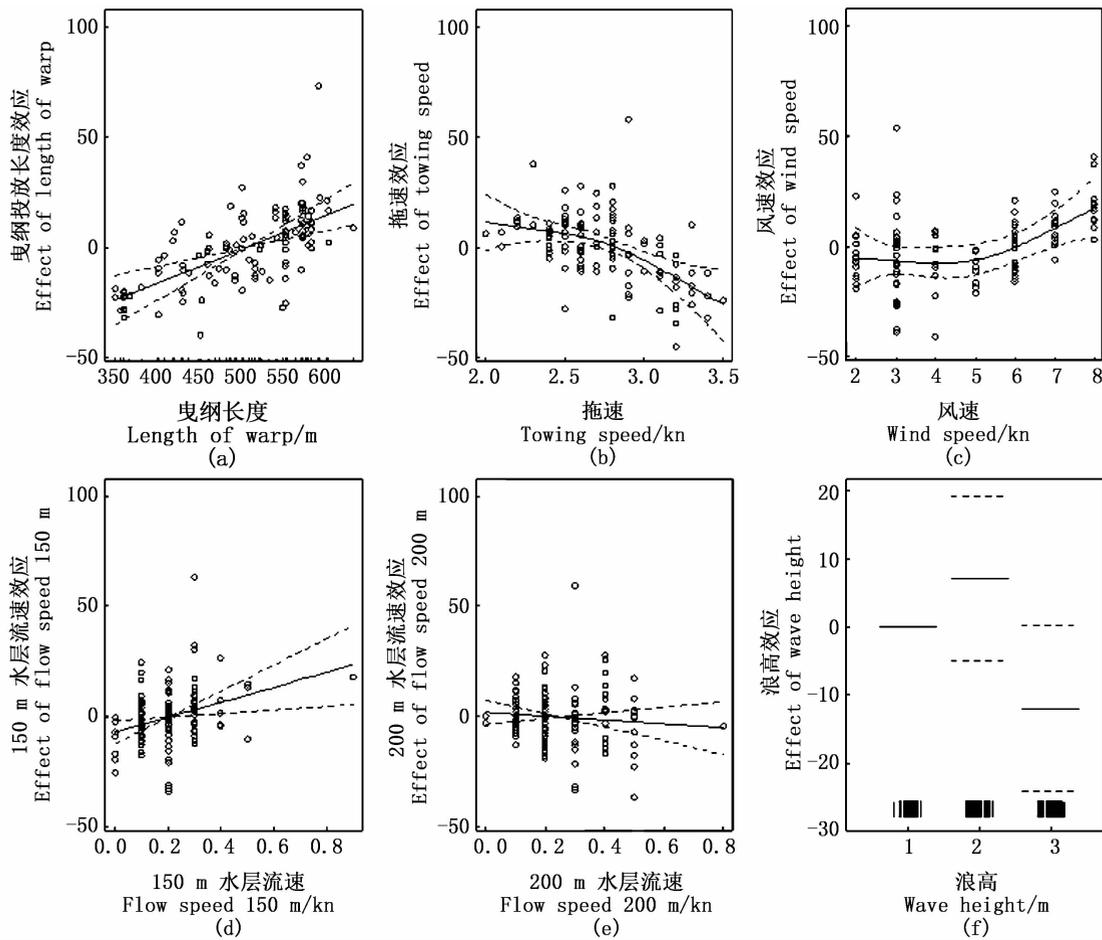
见表 4。

由图 5 可知:上纲与网身 1 深度差具有随拖速和 200 m 水层流速的增加先增大后减小的趋势,拖速 2.6 kn、200 m 流速 0.3 kn 时深度差达到最大;2 m 浪高时,上纲与网身 1 深度差最小。

2.3 渔获量对上纲与网囊深度差影响分析

单因子方差检验结果表明,渔获量仅对上纲与网囊深度差影响极显著(表 5, $P < 0.001$)。由图 6 可知,随渔获量增加网身的深度变化逐渐减小。当渔获量从 5 t 增加至 17 t 时,上纲与网囊深度差变化较快;当渔获量增至 32 t 时,深度差

变化减缓;当渔获量达到 40 t 时,深度差变化趋于平稳。



图中虚线代表置信区间范围,实线为响应曲线。

Dotted line in the figure represents the confidence interval range, and the solid line is the response curve.

图 4 捕捞操作,海洋环境与上纲深度之间关系的 GAM 模型分析图

Fig. 4 Relationship among fishing operation, marine environmental factors and headline depth based on the generalized additive model

表 4 上纲与网身 1 深度差 GAM 模型结果

Tab. 4 Summary results of the “GAM = Depth difference between headline and net body 1”

变量 Variable	估计自由度 EDF	参考自由度 Ref. df.	F	P	AIC
曳纲长度 Warp length/m	3.404	3.798	1.087	0.252 7	412.19
拖速 Towing speed/kn	2.373	2.929	2.688	0.038 7	412.02
风速 Wind speed/kn	2.051	2.447	2.475	0.511 0	389.18
150 m 水层流速 Flow speed 150 m/kn	1.000	1.000	2.558	0.112 9	309.23
200 m 水层流速 Flow speed 200 m/kn	1.000	3.766	15.800	9.07e-10	297.54

注:表中 AIC 值代表指定因子剔除后的结果。保留所有因子 AIC = 293.62; 模型解释率 = 73.6%; $P < 0.05$ 表示变量显著。

Notes: The AIC value in the table represents the result of the elimination of the specified factor. After retaining all the factors, AIC = 293.62; Deviance explained = 73.6%; $P < 0.05$ indicates significant variables.

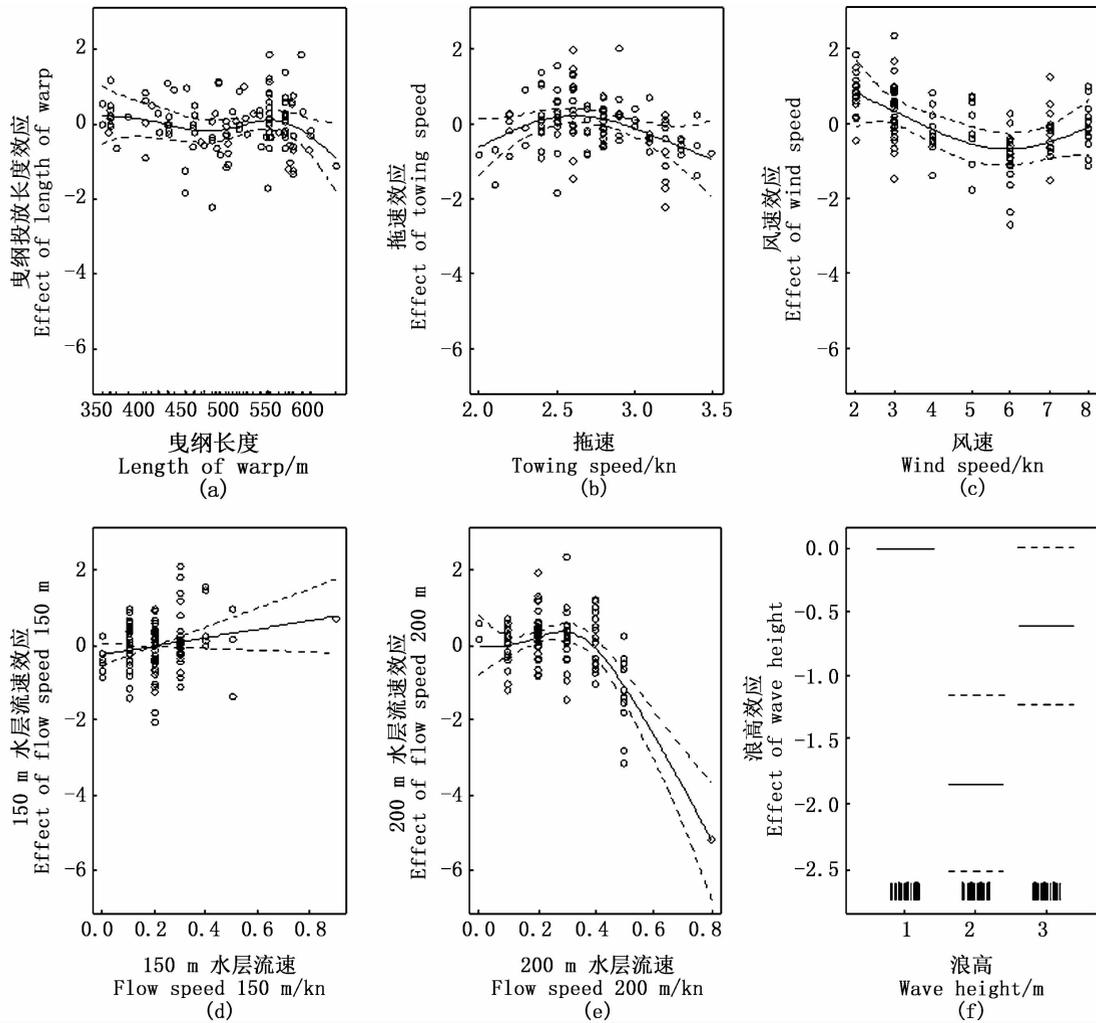


图 5 捕捞操作,海洋环境与上纲与网身 1 深度差之间关系的 GAM 模型分析图

Fig. 5 Relationship among fishing operation, marine environmental factors and depth difference between headline and net body 1 based on the generalized additive model

表 5 渔获量单因素方差检验结果

Tab.5 Results of one-way ANOVA test of catch

变量 Variable	自由度 df	平方和 Sum Sq	均方 Mean Sq	F	P
上纲深度 Depth of headline	1	46	46.02	0.402	0.529
残差 Residuals	53	6 063	114.40		
网囊深度 Depth of cod-end	1	270	270.30	2.453	0.123
残差 Residuals	53	5 839	110.20		
上纲-网囊深度差 Depth difference between headline and cod-end	1	4 598	4 598.00	161.200	<0.001
残差 Residuals	53	1 512	29.00		

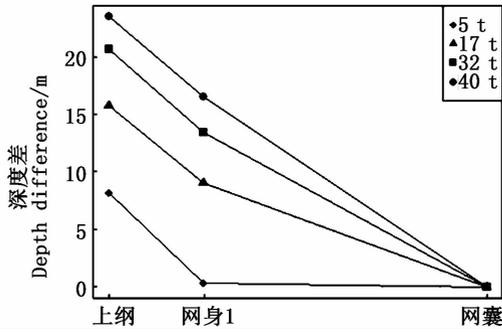


图6 不同网次代表性渔获量对上纲与网囊深度差造成影响示意图

Fig. 6 Representative catch caused by effect on trawl depth diagram

3 讨论

3.1 捕捞操作和海洋环境对上纲深度影响

上纲中点作为拖网网位参考点,操作人员会根据捕捞对象的种群密度和所处水层,调整捕捞操作,改变上纲深度,实现瞄准捕捞。本实验结果表明,曳纲长度、拖速、风速和 150 m 水层流速显著影响($P < 0.05$)拖网上纲深度。捕捞操作对上纲深度的影响,与苏志鹏等^[9]研究相符,上纲深度随着曳纲长度的增加而增加,随拖速的增加而减小。船只在生产时会受到风与海浪的影响^[30],但风与海浪对拖网的影响是不同的。上纲随风速的增加先上浮后逐渐下降,产生这一现象的原因是:风速较低时,渔船往往顺风拖曳;风速增大(风速大于 4 kn)后,为保证作业安全,渔船会顶风作业。研究拖网状态时,需要考虑网具的对水速度(相对速度)^[24]。当渔船顺风作业时,网具的相对速度降低,网身下沉,顶风作业时则相反。POLITIS 等^[31]表示,海浪会造成拖网渔船周期性纵向摇晃,而纵摇产生的船尾瞬时速度与拖曳速度平方成正比。基于上述观点,我们提出假设,当浪高较大时(大于 2 m),增加了渔船的纵向运动(纵摇),导致网具相对速度增加,拖网上纲深度减小。参考 WEINBERG 等^[16]的底拖网研究发现,网具横向扩张随流速的增加而增加。在不改变曳纲长度的情况下,以 150 m 水层为代表的拖网上方水流速度增加,导致网口横向扩张增加,垂直扩张减小,使上纲中点深度降低。

3.2 捕捞操作和海洋环境对上纲与网身 1 深度差的影响

拖网网身作为导鱼区,通过在网身附加内衬

网,可防止磷虾穿过网目逃逸。“福荣海”使用的磷虾拖网,第 1~5 段网身没有添加内衬网。保持良好的拖网状态,是降低磷虾直接碰触网片,减少磷虾逃逸的主要手段^[11,31]。因此,笔者将上纲与网身 1 深度差作为局部网身状态进行研究。

拖速、200 m 水层流速和 2 m 浪高是影响上纲与网身 1 深度差的显著因子。在“福荣海”常规作业拖速区间(2.5~3.2 kn)内,上纲与网身 1 深度差随拖速增加持续降低。产生这一现象的原因可归结为拖网网口处受力发生变化,随着拖速的增加,浮子纲与网身网衣垂直向下的分力增大,浮力不变,上纲下沉^[32]。受剪裁斜率影响,网身 1 的圆周小于网口圆周,下沉程度较上纲不明显,因此上纲与网身 1 深度差随拖速增加而减小。上纲与网身 1 深度差随 200 m 水层流速的增加,先增大后减小。分析现有数据发现:200 m 水层流速较小($X_{fs-200} < 0.4$ kn)时,流向与渔船航向的夹角较小,减小了网具的相对拖速,上纲与网身 1 深度差增大;200 m 水层流速大于 0.4 kn 时则相反。如已讨论部分,浪高会造成网具相对速度增加,从而使上纲与网身 1 深度差减小。

3.3 渔获量对上纲-网囊深度差的影响

PICHOT 等^[34]利用 PIV 技术(particle image velocimetry)发现网囊前段存在低流速区域,可使鱼类逗留。磷虾作为浮游动物,游泳速度弱^[13],无法在低流速区域停留,被动堆积于网囊末端。随着拖曳时间延长,渔获量增多,网囊内堆积情况加剧,贴近网壁的磷虾个体极易受损死亡^[32]。

受南极磷虾块状分布的影响,若假设磷虾以均匀等比例的方式进网,会造成较大误差。因此,本研究在不添加其他影响因子的情况下,运用单因素方差分析探讨渔获量对拖网整体状态的变化。方差检验结果表明,渔获量对上纲与网囊深度差影响极显著($P < 0.01$),但对上纲(网位)深度影响不显著。如图 6 所示,上纲与网囊深度差随渔获量的增多而增大。基于实验与起网后的网囊体积观察结果,做出有关福荣海南极磷虾拖网的推断:当渔获量小于 10 t 时,渔获体积小于网囊包围体积的 1/5,网囊形状主要依靠水流产生,装配在网囊上的浮子(浮力 2.2 kN)减弱了渔获对网具的影响,深度差增长缓慢,拖网整体状态近似于椭圆锥体^[18]。当渔获量为 10~30 t 时,渔获体积逐渐接近网囊包围体积,浮子作

用效果不变,深度差快速增加;当渔获量大于30 t时,渔获完全充满网囊,深度差达到临界值,渔获受损严重。网囊网目闭合,网线张力增大,防止网囊过度下沉,此时,拖网整体状态演变成椭圆台与部分圆环的组合。

3.4 捕捞建议

根据以上结果与相关研究,提出以下推论作为捕捞参考:(1)网位重要性大于网身状态,即确保南极磷虾进网量。放网期间,首要参考的环境因素为风速与浪高,在保证安全的情况下,可适当加快曳纲投放速度,降低拖速,使拖网快速到达预定水层。中层拖网稳定后,结合网具所处水层的流速,可适当提高或降低拖速。(2)结合自身网具规格,适当调整拖曳时间,参考拖网深度差(即上纲中点与网囊口上部中点),在渔获接近网囊包围体积时进行起网,保证产量的同时可提高渔获品质。

感谢辽宁远洋渔业有限公司“福荣海”轮的杨德军船长、吴卫政委、董永强水手长及各位船员在实验过程中给予的大力配合与帮助;感谢南极海洋生物资源开发利用项目相关科学观察员在获取数据过程中付出的辛勤劳动与努力;感谢课题组在数据处理与论文撰写过程中给予的帮助与建议。

参考文献:

- [1] NICOL S, FOSTER J, KAWAGUCHI S. The fishery for Antarctic krill-recent developments[J]. *Fish and Fisheries*, 2012, 13(1): 30-40.
- [2] JARVIS T, KELLY N, KAWAGUCHI S, et al. Acoustic characterisation of the broad-scale distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) off East Antarctica (30°-80°E) in January-March 2006[J]. *DeepSea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(9/10): 916-933.
- [3] BUDZINSKI E, BYKOWSKI P, DUTKIEWICZ D. Possibilities of processing and marketing of products made from Antarctic krill[J]. *FAO Fisheries Technical Paper (FAO)*, 1985, 268: 1-44.
- [4] KRAFFT B A, KRAG L A. Assessment of mortality of Antarctic krill (*Euphausia superba*) escaping from a trawl[J]. *Fisheries Research*, 2015, 170: 102-105.
- [5] 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.
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.
- [6] WAN R, JIA M X, GUAN Q L, et al. Hydrodynamic performance of a newly-designed Antarctic krill trawl using numerical simulation and physical modeling methods[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 179: 173-179.
- [7] 洪性完, 今井健彦. 円錐網の周りの流速分布[J]. 鹿児島大学水産学部紀要, 1996, 45: 21-28.
HONG S W, IMAI T. Distribution of flow velocity around conical nets[J]. *Memoirs of the Faculty of Fisheries Kagoshima University*, 1996, 45:21-28.
- [8] BALASH C, STERLING D, BINNS J, et al. Drag characterisation of prawn-trawl bodies[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 113: 18-23.
- [9] 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.
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 mid-trawl[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(4): 884-892.
- [10] 黄洪亮, 陈雪忠. 东南太平洋智利竹荚鱼中层拖网捕捞技术[J]. *中国水产科学*, 2005, 12(1): 99-103.
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.
- [11] SUURONEN P, LEHTONEN E, WALLACE J. Avoidance and escape behaviour by herring encountering midwatertrawls[J]. *Fisheries Research*, 1997, 29(1): 13-24.
- [12] HERRMANN B, KRAG L A, KRAFFT B A. Size selection of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in a commercial codend and trawl body[J]. *Fisheries Research*, 2018, 207: 49-54.
- [13] HE P G, GOETHEL D, SMITH T. Design and test of a topless shrimp trawl to reduce pelagic fish bycatch in the Gulf of Maine pink shrimp fishery[J]. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 2007, 38: 13-21.
- [14] KOELLER P A. Approaches to improving groundfish survey abundance estimates by controlling the variability of survey gear geometry and performance[J]. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 1991, 11: 51-58.
- [15] WALSH S J, MCCALLUM B R. Performance of the campelen 1800 shrimp trawl during the 1995 northwest Atlantic fisheries centre autumn groundfish survey [J]. *NAFO Scientific Council Studies*, 1997, 29: 105-116.
- [16] WEINBERG K L, KOTWICKI S. Factors influencing net width and sea floor contact of a survey bottom trawl[J]. *Fisheries Research*, 2008, 93(3): 265-279.
- [17] QUEIROLO D, HURTADO C F, GAETE E, et al. Effects of environmental conditions and fishing operations on the performance of a bottom trawl[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2012, 69(2): 293-302.
- [18] PARK H H. A method for estimating the gear shape of a mid-

- water trawl[J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(3/4): 470-478.
- [19] POULARD J C, TRENKEL V M. Do survey design and wind conditions influence survey indices? [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2007, 64(11): 1551-1562.
- [20] BROADHURST M K, MILLAR R B, WOODEN M E L, et al. Optimising codend configuration in a multispecies demersal trawl fishery [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2006, 13(2): 81-92.
- [21] 韩曦. 双船底拖网网位控制方法的探讨[J]. *水产科学*, 1995, 14(5): 26-28.
- HAN X. Analysis of the position control of bottom trawl for double dragging[J]. *Fisheries Sciences*, 1995, 14(5): 26-28.
- [22] CHO B K, GO G S. A study on the bottom trawl gear by the trial of a stern trawler II-On the net shape of a bottom trawl gear[J]. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, 2000, 36(4): 281-286.
- [23] WEINBERG K L, SOMERTON D A. Variation in trawl geometry due to unequal warp length[J]. *Fishery Bulletin*, 2006, 104(1): 21-34.
- [24] SOMERTON D A, WEINBERG K L. The affect of speed through the water on footrope contact of a survey trawl[J]. *Fisheries Research*, 2001, 53(1): 17-24.
- [25] GODØ O R, ENGÅS A. Swept area variation with depth and its influence on abundance indices of groundfish from trawl surveys[J]. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 1989, 9(2): 133-139.
- [26] STEWART I J, KELLERAA, FRUH E L, et al. Throwing in the towel: When do adverse conditions dictate a weather day during a bottom trawl survey? [J]. *Fisheries Research*, 2010, 102(1/2): 130-140.
- [27] MADSEN N, HANSEN K, MADSEN N A H. Behavior of different trawl codend concepts [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 571-577.
- [28] HASTIE T, TIBSHIRANI R. Generalized additive models [J]. *Statistical Science*, 1986, 1(3): 297-310.
- [29] TANG H, XU L X, ZHOU C, et al. The effect of environmental variables, gear design and operational parameters on sinking performance of tuna purse seine setting on free-swimming schools[J]. *Fisheries Research*, 2017, 196: 151-159.
- [30] O'NEILL G, MCKAY S J, WARD J N, et al. An investigation of the relationship between sea state induced vessel motion and cod-end selection [J]. *Fisheries Research*, 2003, 60(1): 107-130.
- [31] POLITIS P J, DEALTERIS J T, BROWN R W, et al. Effects of sea-state on the physical performance of a survey bottom trawl[J]. *Fisheries Research*, 2012, 123-124: 26-36.
- [32] KRAFFT B A, KRAG L A, ENGÅS A, et al. Quantifying the escape mortality of trawl caught Antarctic krill (*Euphausia superba*) [J]. *PLoS One*, 2016, 11(9): e0162311.
- [33] 孙满昌, 邹晓荣. 海洋渔业技术学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 125-147.
- SUN M C, ZOU X R. *Marine fishery technology* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014: 125-147.
- [34] PICHOT G, GERMAIN G, PRIOUR D. On the experimental study of the flow around a fishing net[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2009, 28(1): 103-116.

Factors influencing the trawling status of Antarctic krill fishery based on multivariate analysis

CHEN Mingxin¹, XU Liuxiong^{1,2,3,4,5}, TANG Hao^{1,2,3,4,5}, ZHOU Cheng^{1,2,3,4,5}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

Abstract: The net position, net body status and overall status of trawl are important indices to evaluate the trawling performance during trawling operation. The trawl operation status of an Antarctic krill trawl is expressed by the depth difference between the different parts of the trawl (headline, section 3 – 4 net body connection, upper midpoint of the cod-end mouth). In order to determine the trawling status of midwater trawl, the effects of fishing operations, marine environment and catch on the status of trawling operations were investigated in this study. The results showed that: The depth difference between the headline and the section 3 – 4 net body connection range from -0.20 to 8.02 m, and the depth difference between the headline and the upper midpoint of the cod-end mouth ranged from 6.49 to 30.16 m; Warp length, towing speed, wind speed and water velocity at 150 m depth had significant effects on the depth of the headline ($P < 0.05$); The headline depth was positively correlated with the warp length and water velocity at 150 m depth, there was a negative correlation between the headline depth and towing speed, and the headline depth decreased first and then increased with the increase of wind speed; Towing speed, water velocity at 200 m depth and wave height had significant effects on the depth difference between the headline and the section 3 – 4 net body connection ($P < 0.05$), The depth difference between the headline and the section 3 – 4 net body connection increased first and then decreased with the towing speed and water velocity at 200 m, When the towing speed was 2.6 kn and the water velocity at 200 m was 0.3 kn, the depth difference between the headline and the section 3 – 4 net body connection was the largest, and the depth difference was the smallest when the wave height was 2 m; The catch was positively correlated with the depth difference between the headline and upper midpoint of the cod-end mouth; Warp length was the most important factor affecting the status of trawling operations, followed by towing speed, wind speed, wave height, and water flow velocity.

Key words: Antarctic krill; trawl status; fishing; marine environment; catch