

DOI: 10.12264/JFSC2021-0118

南极磷虾拖网渔具系统动态变化

银利强¹, 唐浩^{1, 2, 3}, 许柳雄^{1, 2, 3}, 刘志强¹, 刘伟¹, 张天舒⁴, 贾明秀⁴

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. 中国水产有限公司, 北京 100160

摘要: 为了研究南极磷虾拖网系统在实际作业过程中的动态变化规律, 于2020年1—4月随“龙发”轮在南极48.2°S~49.2°S, 60°E~61°E进行海上试验, 采集了拖速、曳纲长度、曳纲张力、网具和网板深度等信息, 分析了投放和收绞曳纲的速率对拖网渔具的动态特性影响规律, 以及在稳定拖曳状态下拖速和曳纲长度与网口高度、曳纲张力、网位的关系。结果表明: (1) 放网阶段平均拖速为(2.96±0.36) kn, 收网阶段平均拖速为(1.35±0.26) kn; (2) 网具自然沉降阶段曳纲投放速率为(54.1±5.9) m/min, 起网阶段曳纲收绞速率为(47.15±7.02) m/min; (3) 随着投放速率的增大, 曳纲张力逐渐减小, 网口高度增加; 投放速率与网位下沉速率成正比; (4) 收绞速率与曳纲张力呈负相关关系, 网具上调阶段的曳纲张力要比起网阶段的曳纲张力大。随着收绞速率的增加, 网口高度增加; (5) 稳定拖曳过程中, 拖速和曳纲长度对网口高度均产生显著影响($P < 0.01$), 随着拖速和曳纲长度的增加, 网口高度减小; (6) 在自然沉降阶段, 当投放速率过大, 网板带动网具急速下沉, 网板会出现“超调”现象。研究结果不仅有助于南极磷虾拖网网位的有效调整, 提高拖网瞄准捕捞效率, 还可为验证中层拖网性能模型试验和数值模拟提供基础资料。

关键词: 南极磷虾; 中层拖网; 收绞速率; 网位调整; 超调现象

中图分类号: S971

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)06-0928-10

南极磷虾通常指南极大磷虾(*Euphausia superba* Dana), 是地球上已知生存着的资源量最大的单种生物资源, 在南大洋生态系统中占有重要地位^[1]。在世界海洋渔业资源普遍衰退的背景下, 具有巨大商业价值的南极磷虾受到世界各国关注^[2]。迄今为止, 中国南极磷虾捕捞企业主要使用传统单船中层拖网的作业方式, 又称变水层拖网, 其作业原理主要是根据南极磷虾的集群和垂直移动的生活习性, 通过有效控制曳纲长度和拖速, 调节网具的拖曳水层, 始终将网口对准虾群所处的水层, 从而达到瞄准捕捞的目的^[3-4]。

中层拖网系统主要由渔船、曳纲、网板和网具组成^[5], 其中网具的上下空纲长度、浮沉力配额以及重锤重量等作业参数对拖网网口高度、网具阻力等性能有重要影响^[6]。网板的作用不仅要实现网具水平扩张、扩大扫海面积, 而且要带动网具加速沉降, 其对拖网系统稳定性和捕捞效率有重要影响^[7]。在拖网过程中, 拖速和曳纲长度对拖网渔具系统有重要影响, 是影响其网位水深、网板水深、曳纲张力、网口高度和网袖间距等动态特性的主要因素^[8]。

目前对中层拖网网具性能的研究方法主要有

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-06-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31902426); 上海市青年科技英才扬帆计划资助项目(19YF1419800); 农业农村部南极海洋生物资源开发利用项目(D8002-17-0109).

作者简介: 银利强(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔具与渔法. E-mail: 3379056511@qq.com

通信作者: 唐浩, 博士, 讲师, 研究方向为渔具与渔法. E-mail: htang@shou.edu.cn

海上实测、模型试验、数值模拟。周爱忠等^[9]利用模型试验研究不同作业参数对磷虾拖网性能的影响,发现重锤和空纲长度是影响网具性能的重要因子。冯春雷等^[10]和李灵智等^[11]通过模型试验对磷虾拖网结构和性能进行优化,得出缩短磷虾网具总长度和网身长度可提高捕捞效率和水动力性能。徐国栋^[12]、孟涛^[13]和徐鹏翔等^[14]对南极磷虾拖网设计及性能进行研究,优化其作业参数,从而提高作业性能和捕捞效率。与模型试验相比,海上实测能够获得网具在真实工况下的性能指标。韩曦^[15]通过海上实测得出,曳纲长度和浮沉力是影响网位的主要因素。苏志鹏等^[16]和刘志强等^[17]研究发现,拖速和曳纲长度对南极磷虾拖网网位、网口高度、捕捞效率有显著影响。陈明鑫等^[18]发现,捕捞操作、海洋环境和渔获量是影响磷虾拖网作业状态的重要因素。Hu 等^[8]和 Lee 等^[19]通过分析拖速和曳纲长度的变化对拖网渔具系统的影响,得出网口高度、曳纲张力等动态变化规律,以及网板的“超调”(overshoot)现象。与其他 2 种方法相比,数值模拟已经成为世界主要渔业国家研究的前沿领域^[20]。Hu 等^[21]利用集中质量法和拉格朗日法对整个中层拖网系统实现数值模拟。Lee 等^[22]对中层拖网的垂直运动进行建模,用计算机模拟拖网系统运动。陈英龙等^[23]通过数值模拟建立拖网网具系统,分析拖曳速度和曳纲长度对拖网网位和网口高度的影响。孙霄峰等^[24]对中层拖网建模仿真,仿真结果与水槽试验相近。综上所述,目前对于南极磷虾中层拖网的网具性能和稳态分析研究较丰富,但对拖网渔具系统的动态变化特性及全过程变化规律研究较少,而中层拖网的动态变化规律的研究为理解和设计拖网控制系统和网具性能优化提供重要的参考,也为渔捞作业安全生产提供建议。

为查明中层拖网投放和收绞曳纲的速率对曳纲拉力、网口高度和网位变化等的影响,作者于 2020 年 1—4 月随中国水产有限公司“龙发”轮执行农业农村部南极海洋生物开发利用项目,期间对该轮拖网作业性能进行海上实测,利用全自动曳纲控制仪和水下自动深度记录仪记录拖网整个

过程中的拖速、曳纲长度、曳纲张力、网具和网板深度等作业参数等信息,分析投放和收绞曳纲的速率对拖网渔具动态特性的影响规律,以及在稳定拖曳状态下拖速和曳纲长度与网口高度、曳纲张力、网位的关系,以了解南极磷虾拖网系统动态变化过程。研究结果不仅有助于南极磷虾拖网网位的调整,提高拖网瞄准捕捞效率,还可为验证中层拖网性能模型试验和数值模拟提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验水域

实验时间为 2020 年 1 月至 4 月,实验地点为南奥克兰群岛周围水域(图 1),经度范围为 45°W~48°W,纬度范围为 60°S~61°S。

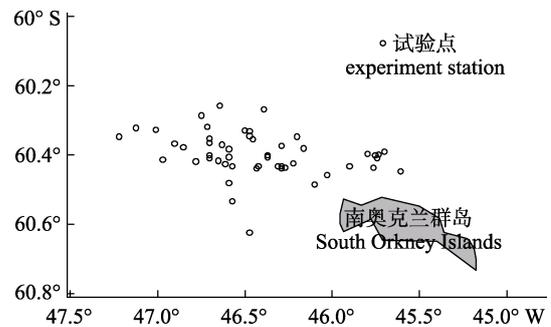


图 1 南极磷虾拖网渔具性能测试水域

Fig. 1 The test area of Antarctica krill trawl net performance

1.2 渔船与渔具

实验渔船为中国水产有限公司大型冷冻加工拖网船“龙发”轮,渔船主尺度见表 1。“龙发”轮使用的是从冰岛引进的四片式小网目磷虾拖网,分类上属于单船有袖单囊拖网。网具总长 132.8 m,网口周长 300 m,网袖长度 20 m,网身长度 88.8 m,网囊长度 30 m,上、下纲长度均为 52 m,侧纲长度 55 m。网身共有 11 节,网目尺寸从网口的 400 mm 逐渐减少到第 11 节的 144 mm。内衬网从网身第 2 节开始附加直至网囊,网身部分内衬网网目尺寸 16 mm,网囊部分网目尺寸 11 mm。浮力 2300 kg,沉力 2300 kg,配备 500 kg 沉铁,左右袖端各 250 kg (空气中)。配置 13 m²立式曲面网板,展弦比为 1.66,空气中重 3.6 t。

表 1 南极磷虾拖网渔船“龙发”轮主尺度

Tab. 1 Main dimension of Antarctic krill trawler “LongFa”

渔船总长/m total length	主机功率/kW main engine power	总吨位/t total tonnage	最大航速/kn max speed	型深/m moulded depth	型宽/m moulded breadth
120.7	5296	7765	13	12	19

1.3 数据采集

本实验采集的捕捞作业数据包括拖网全过程中的拖速、曳纲长度、曳纲张力和网具不同部位所处的深度。拖速为渔船对地拖速，记录船 GPS 雷达显示的数据。曳纲长度和曳纲张力采用船上配置的 NAUST MARINE ATW 曳纲系统控制器显示的数据，该仪器由冰岛公司制造，精度 ≤ 1%。网具各部位所处深度(离海面的距离)由加拿大生产的 DR-1050 型水深测量仪(简称 DR)自动记录和存储，该仪器测量范围为 0~750 m，测量精度为满量程的 ±0.05%，测量部位为拖网上纲中点、下纲中点、网囊上部中点、网板中部，设定每 1 s 记录 1 次。拖曳整个过程中，用摄像机拍摄雷达的拖速和曳纲系统控制器显示的曳纲拉力和曳纲长度，在后续数据分析时，将每 1 s 的拖速、曳纲张力和曳纲长度与 DR 不同部位深度数据相匹配。由于拖网实验时间较长，设定时间间隔为 30 s，取 30 s 内的平均数为 1 个单位，获得每一网次全过程的拖速、曳纲长度、曳纲张力、网具不同部位深度、网口高度等数据。

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。可用式(1)表示。本研究中涉及的“网口”和“网位”均指网具拖曳过程中任一时刻的情况。

$$D = \frac{H_1 + H_2}{2} \tag{1}$$

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)。

1.4.2 网口高度 网口高度取网口中间部位上、下纲中点之间的距离。

$$H = H_2 - H_1 \tag{2}$$

式(2)中， H 为网口高度(m)， H_1 为上纲中点深度(m)， H_2 为下纲中点深度(m)。

1.4.3 收绞和投放速率 收绞和投放速率定义为

单位时间的曳纲收绞或投放长度。网位相对变化率定义为单位时间的网位深度变化，可分为网位上升速率和网位下沉速率。

$$V = \frac{|D_2 - D_1|}{T} \tag{3}$$

$$S = \frac{|L_2 - L_1|}{T} \tag{4}$$

式(3)~(4)中， V 为网位下沉速率和网位上升速率(m/min)， D_2 为变化后网位(m)， D_1 为变化前网位(m)， S 为曳纲收绞或投放速率(m/min)， L_2 为变化后曳纲长度(m)， L_1 为变化前曳纲长度(m)， T 为时间变化(min)。

1.4.4 拖网阶段划分 拖网捕捞作业全过程分为放网、拖网、收网 3 个阶段(图 2)，放网是指从网囊进入水面到网板进入水面的阶段。收网是指从网板露出水面到网囊露出水面的阶段。拖网过程又可划分为从网板入水到第 1 次到达指定深度的网具自然沉降阶段，通过改变曳纲长度或拖速来改变网具所处深度的网位调整阶段(网具上调阶段、网具下调阶段)，和曳纲长度和拖速至少保持

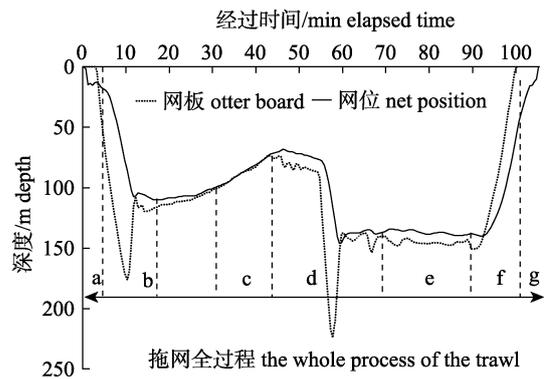


图 2 拖网捕捞作业网次全过程

a. 放网阶段; b. 自然沉降阶段; c. 网具上调阶段; d. 网具下调阶段; e. 稳定拖曳阶段; f. 起网阶段; g. 收网阶段.

Fig. 2 The whole process of trawling operation

a. The shooting net stage; b. The natural sinking stage; c. The upward adjustment stage; d. The downward adjustment stage; e. The stable towing stage; f. The pursing stage; g. The hauling stage.

2 min 以上不变的稳定拖曳阶段, 以及从下达上
网指令后收绞曳纲至网板露出水面的起网阶段。

1.4.5 数据处理方法 运用 Excel 2019 整理所有
数据, 获得每一网拖速、曳纲长度、曳纲张力、
网口高度、网具不同部位深度随时间的变化, 分
阶段对所有网次动态变化进行分析。最后, 基于
R3.4.1 和 SPSS 20 软件对数据进行相关性检验,
分析曳纲投放速率和收绞速率对曳纲张力、网口
高度、网位的影响, 以及在稳定拖曳状态下拖速
和曳纲长度与曳纲张力、网口高度和网位的关系。

2 结果与分析

实验期间共测定 50 网次, 作业水深范围为
30~180 m。放网过程平均拖速为(2.96±0.36) kn,
持续时间为(5.85±0.46) min; 收网过程平均拖速
为(1.35±0.26) kn, 持续时间为(10.75±1.49) min。
收放网过程中网口平均高度为(27.75±6.14) m, 网
位平均深度为(14.74±3.69) m。网具自然沉降阶段
平均拖速为(2.83±0.57) kn, 网具调整阶段平均拖
速为(2.33±0.31) kn, 起网阶段平均拖速为(0.90±
0.31) kn。

**2.1 投放速率与曳纲张力、网口高度、网位变化
率的关系**

曳纲张力与曳纲投放速率成负相关关系, 曳
纲张力随曳纲投放速率的增加逐渐减小($P<0.01$,
 $R^2=0.90$)(图 3)。投放速率在 0~15 m/min 时, 网位
下降缓慢, 曳纲张力没有明显变化; 当曳纲投放
速率进一步增大时, 曳纲张力会明显下降。曳纲

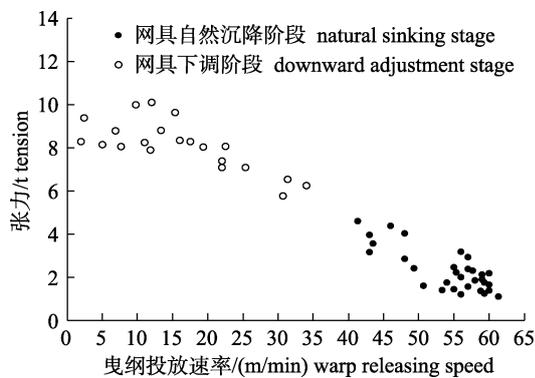


图 3 曳纲投放速率与曳纲张力关系
Fig. 3 The relationship between warp releasing
speed and warp tension

张力范围为(1.1~10.1) t。由 Mann-Whitney 非参数
检验, 网具自然沉降阶段和网具下调阶段的曳纲
张力差异显著($P<0.01$)。在网具自然沉降阶段中,
平均投放速率为(53.5±6.8) m/min, 平均张力为
(2.44±1.19) t; 网具下调阶段中, 平均投放速率为
(14.4±8.1) m/min, 平均张力为(8.34±0.92) t。

网口高度与曳纲投放速率成正相关关系, 网
口高度随着投放速率的增加逐渐增大($P<0.01$,
 $R^2=0.78$)(图 4)。当曳纲投放速率低于 20 m/min, 网
口高度范围为 26~28 m; 当投放速率大于 30 m/min,
网口高度随着投放速率的增加而显著增加($P<0.01$,
 $R^2=0.67$)。在网具下调阶段, 网口高度范围为(25.5~
29.9) m, 平均高度为(27.33±1.11) m。

网位下沉速率与曳纲投放速率存在显著正相
关关系($P<0.01$), 网位下沉速率随着曳纲投放速率
的增大而增大(图 5)。曳纲投放速率为 5~25 m/min
时, 网位下沉速率比较平缓。当投放速率为 45~

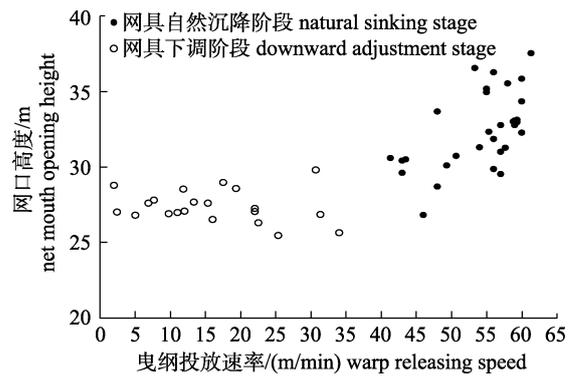


图 4 曳纲投放速率与网口高度的关系
Fig. 4 The relationship between warp releasing
speed and net mouth opening height

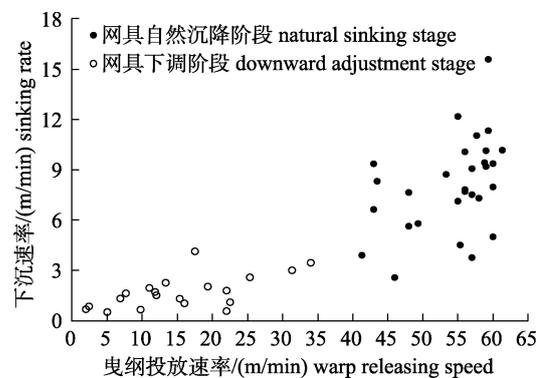


图 5 曳纲投放速率与网位下沉速率的关系
Fig. 5 The relationship between warp releasing
speed and net position sinking rate

60 m/min 时, 网位下沉速率波动较大。网位下沉速率与曳纲投放速率拟合关系为 $S=0.0014v^2+0.0572v+0.9015$ ($R^2=0.90$)。式中, S 表示网位下沉速率(m/min), v 表示曳纲投放速率(m/min)。

2.2 收绞速率与曳纲张力、网口高度、网位变化率的关系

曳纲张力与曳纲收绞速率成负相关关系, 曳纲张力随着曳纲收绞速率的增加逐渐减小($P<0.01$, $R^2=0.77$)(图 6)。在网具上调阶段中, 曳纲收绞速率与曳纲张力存在负相关关系($P<0.01$, $R^2=0.60$), 收绞速率集中在 8~9 m/min 间, 呈缓慢上升状态, 曳纲最大张力为 13.3 t。在起网阶段中, 曳纲收绞速率与曳纲张力不存在相关关系($P=0.16$), 收绞速率集中在 50~60 m/min 间, 最大张力为 10.88 t。Mann-Whitney 非参数检验表明, 曳纲张力在网具上调阶段和起网阶段有差异显著($P<0.01$)。在网具上调阶段中, 平均收绞速率为(6.98±1.3) m/min, 曳纲平均张力为(11.85±1) t; 而起网阶段中, 平均收绞速率为(47.15±7.02) m/min, 曳纲平均拉力为(9.52±1) t。

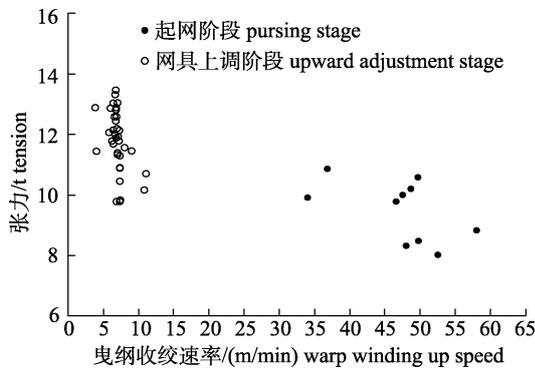


图 6 曳纲收绞速率与曳纲张力的关系
Fig. 6 The relationship between warp winding up speed and warp tension

网口高度与曳纲收绞速率成正相关关系, 网口高度随着收绞速率的增加逐渐增大($P<0.01$, $R^2=0.65$)(图 7)。在网具上调阶段中, 曳纲收绞速率与网口高度不存在相关关系($P=0.36$)。收绞速率为 5~10 m/s 和 45~50 m/s 两个区间时, 平均网口高度分别为(26.76±0.83) m 和(28.3±0.85) m。在网具上调阶段, 网口高度范围为(25.38~29.2) m, 平均网口高度为(26.83±0.89) m。

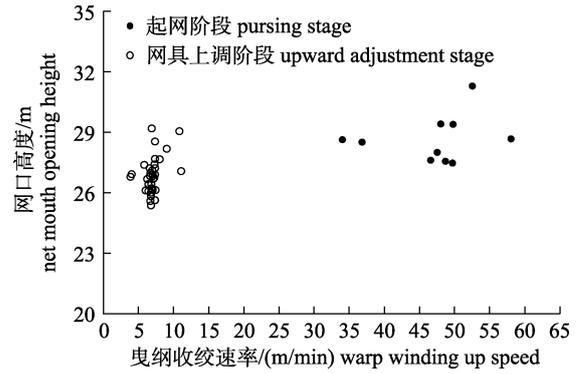


图 7 曳纲收绞速率与网口高度的关系
Fig. 7 The relationship between warp winding up speed and net mouth opening height

网位上升速率与收绞速率存在正相关关系($P<0.01$), 网位上升速率随着曳纲收绞速率的增加而增加(图 8)。网位上升速率(S)与收绞速率 V 拟合关系为 $S=0.0042v^2-0.0766v+1.3843$ ($R^2=0.91$)。网位上调阶段的曳纲收绞速率主要集中在 5~10 m/min, 网位平均上升速率为 1.5 m/min, 而起网阶段的曳纲收绞速率主要集中在 45~55 m/min, 网位平均上升速率为 7 m/min。

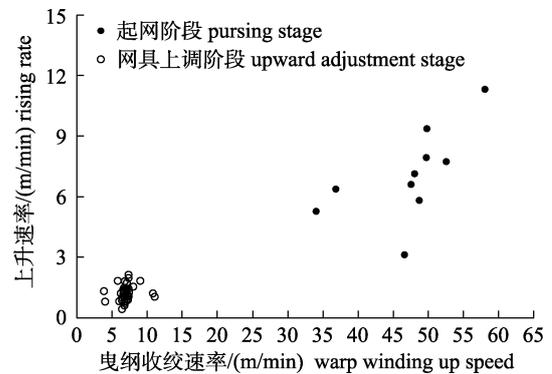


图 8 曳纲收绞速率与网位上升速率的关系
Fig. 8 The relationship between warp winding up speed and net position rising rate

2.3 稳定拖曳过程中拖速和曳纲长度与曳纲张力、网口高度和网位的关系

在稳定拖曳阶段, Spearman 相关性检验表明, 拖速显著影响曳纲张力($P<0.05$)和网口高度($P<0.01$)(表 2)。随着拖速的增加, 曳纲张力增加, 而网口高度下降, 但拖速对网位的影响不显著。作业时拖速范围主要集中在 2~2.5 kn 之间。当拖速为 2 kn 时, 曳纲平均张力为(10.63±1.06) t, 网口平均高

度为(26.69±1.28) m。在稳定拖曳阶段, 曳纲长度对网口高度($P<0.01$)和网位($P<0.01$)都存在显著影响。随着曳纲长度的增加, 网位增大, 网口高度减小, 而曳纲长度对曳纲张力没有显著影响。

稳定拖曳阶段中, 曳纲长度变化范围为 128~595 m, 网口高度变化范围为 24.18~29.46 m, 网位变化范围为 13.7~156 m。由图 9 可以看出, 网位随着曳纲长度的增加而增大。

表 2 稳定拖曳阶段中操作参数与拖网系统动态特性的关系

Tab. 2 The relationship between operating parameters and dynamic characteristics of trawl net system during stable towing

参数 item	斯皮尔曼相关性检验 Spearman test for correlation	曳纲张力 warp tension	网口高度 net mouth opening height	网位 net position
拖速 towing speed	相关系数 R^2	0.15	-0.32	0.051
	P	<0.05	0.01	0.46
曳纲长度 warp length	相关系数 R^2	0.05	-0.50	0.98
	P	0.46	<0.01	0.01

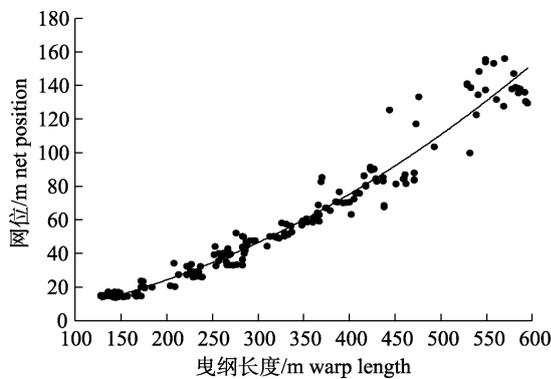


图 9 曳纲长度与网位的关系

Fig. 9 The relationship between warp length and net position

2.4 网板“超调”(overshoot)现象

图 10 为网板在不同网次不同曳纲长度下的自然沉降阶段。随着曳纲长度的增加, 网具在网板的重力带动下快速下沉, 网板由于惯性力的作用而沉至更深处, 当曳纲投放结束后, 网板受拉力和水作用力, 上升至平衡水深, 最后通过提速或微调曳纲长度来维持网位在目标水层稳定拖曳。网板的这种先急剧下降后上升的运动特性被认为是“超调”现象。由图 10 可以看出, 曳纲投放长度越大, “超调”程度越大。当曳纲长度 333 m 时, “超调”深度差为 21.9 m, 当曳纲长度为 443 m 时, “超调”深度差为 60.3 m。在自然沉降阶段, 曳纲平均投放速率为(59.36±0.53) m/min, 网板的变化速率先增大后减小, 然后反向增大逐渐稳定不变。网板的沉降速率范围为 14.13~23.79 m/min, 网板平均沉降速率为(18.57±4.79) m/min, 网位平均沉降速率为(10.28±2.69) m/min。网板与下纲距

离最大为 77.9 m, 稳定拖曳过程中, 网板深度要比下纲深度浅约 6 m, 处于上下纲之间上下摆动。

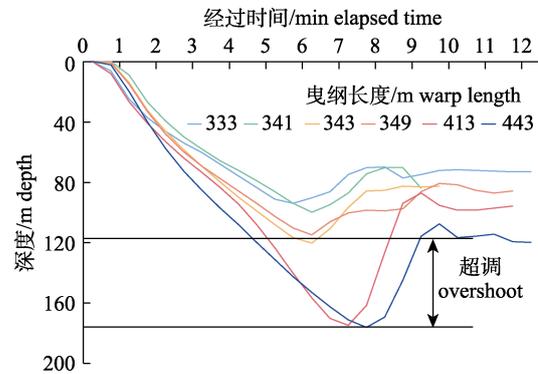


图 10 网板自然沉降阶段

Fig. 10 The natural sinking stage of otter board

3 讨论

3.1 曳纲张力和网口高度的变化

拖网系统在作业过程中的动态行为十分复杂, 是由于拖网系统由网板和受不同外力的网具等各种要素组成。渔船通过曳纲连接拖网, 传递张力并带动网具, 因此曳纲的形状与张力决定了网具在水中的位置^[25]。船速的变化和曳纲的收绞或投放均会造成拖网系统的不稳定运动^[26]。此外, 风浪、底质、渔获量的变化及海底障碍物等也会引起曳纲张力的变化, 因此曳纲张力变化蕴含着拖网状态的信息^[27]。王志勇等^[28]研究表明, 曳纲张力波动过大会影响拖网网口扩张, 引起网口形状变形, 可能会降低捕捞效率。曳纲张力和网口高度的变化对作业安全和捕捞效率有着重要的影

响。本研究表明,拖网处于不同拖曳阶段的曳纲张力和网口高度变化不同。当网具处于自然沉降阶段时,网口高度会随着曳纲投放速率的增大而增加,而曳纲张力会减小。原因是曳纲投放速率越大,网板带动网具下沉速率越快,网板和网口水平扩张不足,在浮力的作用下网口高度有所提升。当网具处于上调或下调阶段,网板受曳纲和叉纲束缚仍处于相对稳定状态,该阶段收绞和投放速率的变化对网口高度的影响较小。当网具处于起网阶段时,网口高度会随着曳纲收绞速率的增大而增加。这是因为曳纲带动网具上升速率的加快,致使网板处于非稳定状态,网板水平扩张力不足,造成网口高度增加。余显炜^[28]利用理论计算得出,加速收绞曳纲则会导致曳纲张力增加,与本实验测得的随着收绞速率的增大,曳纲张力减小结果不同。其原因是前者是在上调阶段下收绞曳纲,曳纲张力会随着收绞速率增加而增大,而本实验是在全过程不同阶段下收绞曳纲的研究结果。

在稳定拖曳阶段,曳纲长度和拖速对网口高度均有显著影响。随着曳纲长度和拖速的增加,网口高度减小。这与苏志鹏等^[16]和陈英龙等^[23]的海上实测结果相同,即网口高度会随着曳纲长度和拖速的增大而减小。随着拖速的增加,网板水平扩张效果增大,导致网口水平宽度增加,网口高度降低。此外,曳纲投放长度越长,相同拖速下增加了曳纲和网板的水平扩张,进而影响拖网网口水平扩张,造成网口高度减小^[29]。同时,拖速对曳纲张力有显著影响,曳纲张力会随着拖速增加而增大。这与陈英龙等^[23]的数值模拟结果和 Prat 等^[30]的海上实测结果相同,随着拖速的增加,网线张力提高,网具阻力显著增大。在拖速不变的情况下,投放一定曳纲长度时,曳纲张力会突然减少,而后恢复到原来的张力状态。与之相反,收绞一定曳纲长度时,曳纲张力会突然增大,而后恢复到原来的张力状态^[8]。本研究发现,曳纲投放或收绞速率变化太大会导致曳纲张力剧减或剧增,这不仅会导致网口变形,影响网口扩张,而且对渔船造成冲击,加快曳纲损坏。因此,为避免对曳纲的冲击,投放和收绞速率一般都应缓慢增加或减少。

3.2 网位动态控制

中层拖网的网位从根本上取决于拖网渔具在水中的重力、阻力和拉力之间的平衡点,是关于拖网渔具重量、水动力阻力、拖曳速度和曳纲长度的函数^[24]。影响中层拖网网位的因素不仅包括曳纲长度、拖速、重锤重量、沉浮力配备等作业参数,还包括航向、风速、风向和流速等海洋环境因素^[17-18]。黄洪亮等^[4]认为控制拖速仅适用于调低网位,用来提升网位的效果不明显,一般不常使用。苏志鹏等^[16]的研究得出,拖速和曳纲长度对调整磷虾拖网网位变化有显著影响,拖速和曳纲长度的改变能有效地调整网位变化。陈英龙等^[23]通过数值模拟得出,拖速的增加会提高网板和网具系统的阻力,而网具在水中的重量不变,平衡后的曳纲与水平方向夹角减小,则网位上升。韩曦^[15]认为,通过改变拖速调整的网位幅度较小,而调整曳纲长度的方法不仅简单易掌握,而且能准确有效地控制网位,尤其当鱼群所在水层与网位相差太大时。渔船拖网消耗功率约等于网具阻力与拖速的乘积^[31]。南极磷虾拖网网具为防止磷虾从网目中逃逸,网囊及网身部分需要较小尺寸的内衬网,所以阻力较大^[32]。其次,南极磷虾游泳速度较慢,最快在 1 kn 左右,南极磷虾拖网的拖速一般在 2~3 kn^[14]。因此,调节曳纲长度是显著调整南极磷虾拖网网位和降低能耗的最佳方法。本研究发现,在稳定拖曳阶段,曳纲长度是影响网位的主要因素,而拖速对网位影响较小。这与苏志鹏等^[16]研究得出的拖速与网位的关系不同,可能是实验中拖速调整时间、速度变化范围、流速和流向等因素的差异导致。在自然沉降阶段,投放速率相同,网位下沉速率有较大差异,其原因可能与拖速、曳纲长度、渔获量、流速、流向和下沉深度等有关。

实际作业中,船长一般根据鱼探仪测出的磷虾水层位置和网位仪探测的网口水层,调整曳纲长度和拖速,保持网位对准磷虾群所处的水层。由于磷虾群水层经常上下变动,及时调整网位使网口始终处在磷虾群水层是瞄准捕捞能否成功的关键。“龙发”轮上使用的曳纲系统控制器分手动和自动两种模式。当处于上调阶段和下调阶段时,

船长会使用手动模式通过调节曳纲长度和拖速, 以达到调整网位的目的。而处于起网阶段和自然沉降阶段时, 船长首先会降低拖速, 然后根据经验设定曳纲长度使用自动模式来收绞和投放曳纲达到网具的目标位置。本研究定义的网位变化率和曳纲变化率关系, 不同于以往有关学者仅仅考虑网位与曳纲长度的静态关系^[4,13], 作者还考虑了时间因素, 即从动态角度考虑网位和曳纲长度的关系。通过查明曳纲投放和收绞速率与网位变化速率的关系, 就能判断能否及时把网位调整到目标水层, 从而通过控制合适的曳纲投放和收绞速率来改变网位, 实现瞄准捕捞的目的。苏志鹏等^[16]发现, 不同拖速条件下通过曳纲改变网位的速率存在差异。拖速在 0.5~1.5 kn 时网位变化速率最大; 而拖速在 2.0~2.5 kn 之间变化时, 网位变化速率很小或保持不变。这与本实验的研究结果相一致。究其原因是: 降低拖速, 增加曳纲长度, 会减少曳纲拉力, 使网板扩张力减弱, 网板可以有效地带动网具改变网位; 而在较大拖速条件下, 网具阻力加大, 水平扩张力增强, 从而改变曳纲长度来调节网位的范围。当发现虾群深度变化显著, 需要大幅度地向上或向下调整网位时, 首先要降低船速, 然后再缓慢增加曳纲收绞速率或投放速率, 使网板加快上升或下沉, 从而缩短网具到达预设水层时间。当虾群垂直深度变化不明显, 则可透过微调曳纲长度和拖速来达到改变网位的目的。因此, 在改变网位时, 可根据具体情况通过调整拖速和曳纲长度相结合的方式, 加快网位的快速有效调整, 从而迅速到达目标水层, 实现瞄准捕捞。

放网阶段的拖速要比收网阶段大, 原因在于放网阶段增加拖速不仅加快网具投放, 避免缠绕, 而且减少网具停留在海面与海鸟、哺乳动物接触的时间。在收网阶段, 降低拖速可减少网具水阻力, 从而加快网具的上升以及收网速度。在磷虾拖网作业过程中, 有时会出现上网时间过长的现象, 究其原因可能是由于渔获量太多, 增加了起网难度。网产过多, 不仅会由于挤压影响磷虾品质, 也会对网具造成过劳性损坏, 增加操作困难和危险。

3.3 网板“超调”现象分析

在拖网渔具自然沉降阶段中, 网板急速下沉又上浮至平衡水深, 这种现象称为“超调”现象(overshoot)^[33]。本研究发现, 在拖速和海况相近的情况下, 曳纲投放长度越长, 网板的“超调”程度越大, 这证明了 Hu 等^[8]实验中的研究预想, 曳纲长度变化越大, 网板的“超调”程度越大。研究发现, 曳纲投放长度相同, “超调”程度也不相同, 这可能是由于拖速、流速等外界环境不同而导致的。相同曳纲长度下, 拖速越大平衡网位越小, 从而“超调”程度相对较大。在相同的曳纲投放速率下, 网板沉降速率也存在差异, 这可能是由于拖速、流速和曳纲长度不同等共同作用的结果。其他条件相同, 拖速越小, 网板沉降速率越快。因此, 在自然沉降过程中, 拖网作业不仅要考虑网位距海底距离, 而且要考虑沉降过程中网板是否会与海底发生接触, 以免发生意外事故。

参考文献:

- [1] Huang H L, Chen X Z. Status and development trend of resource operate for Antarctic krill (*Euphausia superba*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004(S1): 114-119. [黄洪亮, 陈雪忠. 南极磷虾资源开发利用现状及发展趋势[J]. 中国水产科学, 2004(S1): 114-119.]
- [2] Chen X Z, Xu Z L, Huang H L. Development strategy on Antarctic krill resource utilization in China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(3): 451-458. [陈雪忠, 徐兆礼, 黄洪亮. 南极磷虾资源利用现状与中国的开发策略分析[J]. 中国水产科学, 2009, 16(3): 451-458.]
- [3] 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.]
- [4] 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.]
- [5] Gao S, Yin Y, Sun X F, et al. Research on simulation platform of single-boat mid-water trawl system[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2015, 41(2): 23-29. [高帅, 尹勇, 孙霄峰, 等. 单船中层拖网系统仿真平台的研究[J]. 大连海事大学学报, 2015, 41(2): 23-29.]
- [6] Feng C L, Huang H L, Chen X Z. Significance analysis on

- the main parameters of single boat mid-water trawl[J]. *Marine Fisheries*, 2007, 29(1): 8-12. [冯春雷, 黄洪亮, 陈雪忠. 主要作业参数对单船中层拖网性能的显著性分析[J]. *海洋渔业*, 2007, 29(1): 8-12.]
- [7] Liu Z Q, Xu L X, Tang H, et al. Hydrodynamic performance and around flow field of biplane-type otter board with different working positions[J]. *South China Fisheries Science*, 2020, 16(2): 87-98. [刘志强, 许柳雄, 唐浩, 等. 不同工作姿态下立式双曲面网板水动力及周围流场特性研究[J]. *南方水产科学*, 2020, 16(2): 87-98.]
- [8] Hu F X, Matuda K, Sato K. Characteristics of dynamic control of midwater trawl system in field experiments[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1994, 60(4): 493-497.
- [9] Zhou A Z, Feng C L, Zhang X, et al. Influence of adjustment of operation parameters on small-mesh Antarctic krill trawl[J]. *Marine Fisheries*, 2016, 38(1): 74-82. [周爱忠, 冯春雷, 张勋, 等. 调整作业参数对小网目南极磷虾拖网水动力性能的影响[J]. *海洋渔业*, 2016, 38(1): 74-82.]
- [10] Feng C L, Liu J, Zhang Y, et al. Structure improvement design and performance experiment of Antarctic krill trawl net[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(7): 75-81. [冯春雷, 刘健, 张禹, 等. 南极磷虾拖网结构优化设计与网具性能试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(7): 75-81.]
- [11] Li L Z, Chen S, Yang J L, et al. Performance analysis of the four-panel mid-water trawl for Antarctic krill fishery[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(4): 893-901. [李灵智, 陈帅, 杨嘉樑, 等. 南极磷虾四片式小网目中层拖网作业性能分析[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(4): 893-901.]
- [12] Xu G D. The Antarctic krill trawl design and performance analysis[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011. [徐国栋. 南极磷虾拖网设计与性能分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.]
- [13] Meng T. The expansion performance of Antarctic krill mid-water trawl used by Chinese fishing fleets-examination by modeling experiments[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. [孟涛. 基于模型试验的我国南极磷虾中层拖网扩张性能研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.]
- [14] Xu P X, Xu L X, Meng T, et al. Comparative analysis on the performance of Japan and South Korea Antarctic krill mid-water trawls with small mesh sizes[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(4): 837-846. [徐鹏翔, 许柳雄, 孟涛, 等. 日韩小网目南极磷虾拖网性能对比分析[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(4): 837-846.]
- [15] 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.]
- [16] 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. [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.]
- [17] Liu Z Q, Xu L X, Tang H, et al. Effects of trawling operation parameters on the fishing efficiency of Antarctic krill[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2019, 26(6): 1205-1212. [刘志强, 许柳雄, 唐浩, 等. 拖网作业参数对南极磷虾捕捞效率的影响[J]. *中国水产科学*, 2019, 26(6): 1205-1212.]
- [18] Chen M X, Xu L X, Tang H, et al. Factors influencing the trawling status of Antarctic krill fishery based on multivariate analysis[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(1): 144-154. [陈明鑫, 许柳雄, 唐浩, 等. 基于多元变量的南极磷虾拖网作业状态影响因素分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(1): 144-154.]
- [19] Lee C W, Jang C S, Kim M S, et al. Measurements of midwater trawl system and dynamic characteristics[J]. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, 1998, 34(3): 294-301.
- [20] Zhang X F, Hu F X, Xu L X, et al. Development of numerical computer simulation on fishing nets[J]. *Marine Fisheries*, 2015, 37(3): 277-287. [张新峰, 胡夫祥, 许柳雄, 等. 网渔具计算机数值模拟的研究进展[J]. *海洋渔业*, 2015, 37(3): 277-287.]
- [21] Hu F X, Matuda K, Tokai T, et al. Dynamic analysis of midwater trawl system by a two-dimensional lumped mass method[J]. *Fisheries Science*, 1995, 61(2): 229-233.
- [22] Lee C W, Lee J H. Modeling of a midwater trawl system with respect to the vertical movements[J]. *Fisheries Science*, 2000, 66(5): 851-857.
- [23] Chen Y L, Zhao Y G, Zhou H, et al. Simulation study of large mid-water trawl system[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(4): 625-632. [陈英龙, 赵勇刚, 周华, 等. 大型中层拖网网具系统的仿真研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(4): 625-632.]
- [24] Sun X F, Gao S, Yin Y, et al. Modeling and simulation of midwater trawl in fishing vessel simulator[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2012, 27(3): 284-288. [孙霄峰, 高帅, 尹勇, 等. 渔船模拟器中层拖网的建模与仿真[J]. *大连海洋大学学报*, 2012, 27(3): 284-288.]
- [25] Lee C W. Depth control of a midwater trawl gear using fuzzy logic[J]. *Fisheries Research*, 1995, 24(4): 311-320.
- [26] She X W. A study on dynamic forces acting upon a trawl warp[J]. *Journal of Zhejiang College of Fisheries*, 1993, 12(1): 1-13. [余显炜. 拖网曳纲动力学问题的研究[J]. *浙江水产学院学报*, 1993, 12(1): 1-13.]

- [27] Ou Y Y. Traction tension monitoring and the development of the monitor[J]. *Fishery Machinery and Instrument*, 1992, 19(4): 27-29. [欧阳弋. 曳纲张力监测及其监测仪的研制[J]. *渔业机械仪器*, 1992, 19(4): 27-29.]
- [28] Wang Z Y, Tang T L, Xu Z Q, et al. Design and experiment of automatic tension control system for trawl winch on fishing boat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1): 90-94. [王志勇, 汤涛林, 徐志强, 等. 渔船拖网绞车张力自动控制系统设计及试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 90-94.]
- [29] Chen Y L. Research on modeling and control strategies for the trawling system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. [陈英龙. 拖网捕捞拖曳系统的建模及控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.]
- [30] Prat J, Antonijuan J, Folch A, et al. A simplified model of the interaction of the trawl warps, the otterboards and netting drag[J]. *Fisheries Research*, 2008, 94(1): 109-117.
- [31] Chen X Z, Huang X C. Fishing Gear Model Testing Theory and Method[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2011. [陈雪忠, 黄锡昌. 渔具模型试验理论与方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2011.]
- [32] 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.]
- [33] Yang L. Characteristics of Dynamic control of mid-water trawl system in field experiments[J]. *Fisheries Science and Technology*, 1995, 3(3): 37-40. [杨齐. 中层拖网系统动态控制特性的海上试验[J]. *水产科技*, 1995, 3(3): 37-40.]

The dynamic change of net system for Antarctic krill trawl

YIN Liqiang¹, TANG Hao^{1,2,3}, XU Liuxiong^{1,2,3}, LIU Zhiqiang¹, LIU Wei¹, ZHANG Tianshu⁴, JIA Mingxiu⁴

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

2. National Engineering Research Center for Pelagic Fishery; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Ocean Fisheries Resources, Ministry of Education; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. China National Fisheries Corporation, Beijing 100160, China

Abstract: To investigate the dynamic change characteristics of Antarctic krill (*Euphausia superba*) trawling, we conducted sea trials on the krill trawler “Long Fa” of the China Fisheries Corporation from January to April 2020 in subarea 48.2 of Antarctic waters (45°W–48°W, 60°S–61°S). Information was collected on the towing speed, warp length, warp tension, and depth of the net and otter board, and the effects of the warp winding up and releasing speed on the dynamic change of the net were analyzed. The relationships between towing speed, warp length, net mouth opening height, warp tension, and net position were also examined during the stable towing stage. The main results are as follows: (1) the average speed of the shooting net stage was (2.96±0.36) kn and the average speed of the hauling stage was (1.35±0.26) kn. (2) The warp releasing speed was (54.1±5.9) m/min in the natural sinking stage, and the warp winding up speed was (47.15±7.02) m/min in the pursuing stage. (3) The warp tension decreased gradually with the increasing of the warp releasing speed, which is proportional to the net position sinking rate. (4) The warp winding up speed was inversely related to the warp tension. The warp tension of the upward adjustment stage was larger than that of the pursuing stage. As the warp winding up speed increased, the net mouth opening height increased. (5) During the stable towing stage, the towing speed and the warp length had a significant influence on the net mouth opening height. As the towing speed and warp length increased, the net mouth opening height decreased. (6) In the natural sinking stage, when the warp releasing speed was too high and the net sinking speed increased, the phenomenon of “overshoot” occurred. These results can inform adjustments to the net position during Antarctic krill trawling and improve the efficiency of future trawling. They also serve as essential data for the verification model test and numerical simulations of the performance of a mid-water trawl.

Key words: Antarctic krill; mid-water trawl; warp winding up speed; net position adjustment; overshoot

Corresponding author: TANG Hao. E-mail: htang@shou.edu.cn