

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16288

南极磷虾四片式小网目中层拖网作业性能分析

李灵智^{1,2}, 陈帅^{1,2}, 杨嘉樑^{1,2}, 刘健^{1,2}, 吴越^{1,2}, 屈泰春^{1,2}, 饶欣^{1,2}, 黄洪亮^{1,2}

1. 中国水产科学研究院 东海水产研究所, 农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200090;
2. 中国水产科学研究院 海洋捕捞工程技术研究中心, 上海 200090

摘要: 为了促进南极磷虾(*Euphausia superba* Dana)渔业发展, 提出2种四片式小网目中层拖网网型设计(型号分别为dh256-1和dh256-2), 2种网型网口拉直周长相同, 背(腹)网与侧网拉直宽度比(以下简称“WRBS”)分别为1和1.11。通过模型实验对2种WRBS小网目南极磷虾拖网的作业性能进行比较, 并进行浮沉力(SBSW)、手纲长度和水平扩张系数(以下简称“L/S”)的匹配优化实验, 结果表明: 实验条件下, 当L/S介于0.5~0.6时或者L/S为0.45和0.65且拖曳速度 ≤ 1.5 m/s时, 2种网型网口垂直扩张差异显著($P < 0.05$), dh256-2型拖网网口垂直扩张明显高于dh256-1; 为了保持侧网衣受力均匀, dh256-1型拖网浮沉力配备要求显著高于dh256-2型拖网, dh256-1型拖网浮沉力配备应 ≥ 4.59 tf, dh256-2型拖网浮沉力配备应 ≥ 1.98 tf; 2种网型的能耗系数(C_e)差异不明显($P > 0.05$); L/S与能耗系数(C_e)呈反相关; 手纲长度 ≥ 50 m, 手纲长度对2种网型作业性能的影响不明显; 综上所述dh256-2型拖网网口垂直扩张性能较好, 浮沉力配备要求较低, 较适合拖曳较低南极磷虾捕捞, 适宜的手纲长度为50 m。以上结论可为小网目南极磷虾拖网网具设计提供参考。

关键词: 南极磷虾; 中层拖网; 浮沉力; 背腹网与侧网的宽度比; 手纲

中图分类号: S97

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)04-0893-09

南极大磷虾(*Euphausia superba* Dana)在南大洋生态系统中具有举足轻重的地位, 摄食浮游植物, 也是大型鱼类、鲸、企鹅、海豹等生物的主要饵料^[1-2], 因此南极磷虾资源开发一直谨小慎微, 管理严格。南极磷虾资源商业开发始于20世纪70年代, 90年代其产量达到顶峰, 由于加工技术、市场等原因, 产量随后逐渐回落, 近年来随着技术瓶颈的突破以及较高的营养价值, 南极磷虾日益受到世界各国的关注, 产量也逐步回升。2009年中国开始参与南极磷虾商业开发, 船队规模从最初的2艘发展至现在的8艘, 年产量达 3×10^4 t以上^[1-2]。

国内外南极磷虾渔业中应用的捕捞网具有3种, 分别为疏目拖网^[3]、小网目拖网^[4]、桁杆拖网^[5]。目前中国渔船主要由艉滑道式大型竹夹鱼拖网船改装而来, 因此作业网具为疏目拖网和小

网目拖网, 最初沿用竹荚鱼拖网和冰岛引进的832型疏目拖网, 网身和网囊部分加衬网, 衬网网目约为1.5 cm, 由于网型结构、衬网网目小等原因, 网身和网囊阻力非常大, 网口扩张并不理想, 且由于网具主尺度大, 起放网耗时较长; 小网目拖网有引进的日本185型拖网, 其作业性能不如疏目拖网, 但是操作便捷, 通过调整浮沉力、空纲长度等因子, 较好提升网具作业性能。

应南极磷虾渔业发展的需要, 近年来国内许多学者针对各型拖网作业性能展开了系列研究, 冯春雷等^[3]、徐国栋等^[6]通过模型实验对目前生产中使用的720型疏目拖网的作业性能以及优化调整进行研究, 徐鹏翔等^[4]、周爱忠等^[7]通过模型实验对日式185和韩式192小网目拖网进行作业性能比较, 以上研究均是目前生产用网的基础上进行的优化研究, 通过调整手纲、浮沉力等属具优

收稿日期: 2016-10-27; 修订日期: 2017-02-18

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203018); 南极磷虾专用拖网渔具的优化设计与开发专项(14391901100)

作者简介: 李灵智(1982-), 男, 硕士, 主要从事渔具渔法研究. E-mail: lilz@ecsf.ac.cn

通信作者: 黄洪亮, 研究员. E-mail: ecshhl@163.com

化网具作业性能。但是上述网型并不能完全满足国内商业渔船需要；另外早期研究表明除了属具之外，网型结构与网具作业性能关系密切。网型结构的主要参数有身周比、网袖长度、背(腹)网与侧网的宽度比等^[8-12]，陈雪忠等^[8]、万荣等^[9]、王永进等^[10]的研究表明上述参数对网具作业性能具有显著影响。

实现南极磷虾捕捞技术的国产化以及优化船网匹配是目前中国南极磷虾渔业发展的任务之一，基于近几年的技术引进和应用经验积累，本研究提出 2 种小网目南极磷虾拖网网型设计，通过模型实验对 2 种网型作业性能进行比较，并各自进行浮沉力、手纲和水平扩张系数的匹配优化实验，以期为中国南极磷虾渔业发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 网型设计

模型网制作参照模型网制作标准^[13-16]，大尺度比为 25，小尺度比为 5，两种拖网型号分别为 dh256-1 和 dh256-2，其网具展开图如图 1 所示，2 种网型差异主要为背(腹)网宽度与侧网宽度比值不同，其比值分别为 1.00 和 1.11，网口拉直周长相同，网具材料均为 PE。

1.2 实验设备

拖网模型实验在东海水产研究所渔具模型实验静水池进行，水池规格为：90 m×6 m×3 m，水池北端设置消波器。拖车驱动电机功率为 7.5 kW×4，拖速范围 0.1~4.0 m/s，配有微处理机调速系

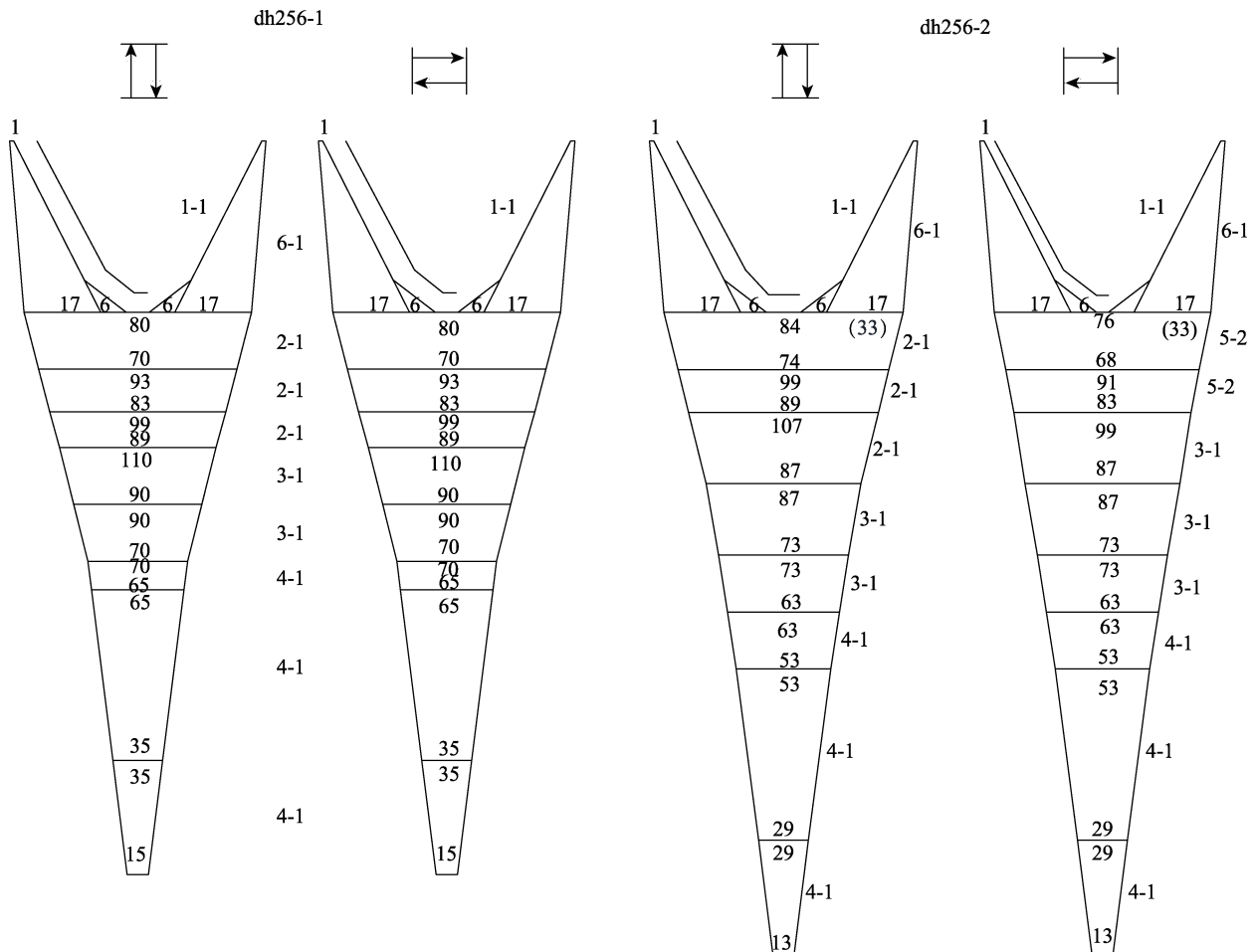


图 1 四片式小网目中层拖网网具展开图

左: dh256-1 型拖网; 右: dh256-2 型拖网. 横线附近的数字为网目数, 斜线附近的数字为剪裁斜率.

Fig. 1 Diagram of 4-panels trawls

Left: dh256-1; Right: dh256-2. The values near the line are mesh number and near the slash are cutting ratio.

统, 匀速精度 $P \leq 1\%$ 。光电测速仪精度为 $\pm 0.01\%$ 。测力传感器量程为 200 N, 非线性误差为量程的 0.05%。网口高度通过深度计测量(型号 Mini-Diver, 荷兰, Van essen INSTRUMENT), 量程 10 m, 分辨率为 0.25 cm 水柱。

1.3 实验方法

模型实验模拟至手纲如图 2 所示, 模型实验分为 2 组, 分别为 2 种网型(dh256-1 和 dh256-2)的作业性能比较(第 1 组)和 dh256-1 模型网的浮沉力调整实验(第 2 组)。第 1 组实验参数设置如表 1 所示, 选择拖速、水平扩张系数(L/S)、手纲长度 3 个影响因子, 进行正交实验, 浮沉力配备比为 1 : 1, 浮沉力合计 1.98 tf; 第 2 组实验手纲长度均为 87.5 m, 拖速和 L/S 设置与第 1 组实验相同, 浮沉力调整如表 2 所示。由于本研究中上下手纲长度等长, 浮沉比均为 1, 浮力和沉力对于网口垂直扩张的作用是相似的^[8], 因此将浮力和沉力合为一个影响因子。

2 组实验均以网口垂直扩张、网具阻力、能耗系数作为网具作业性能比较因子。

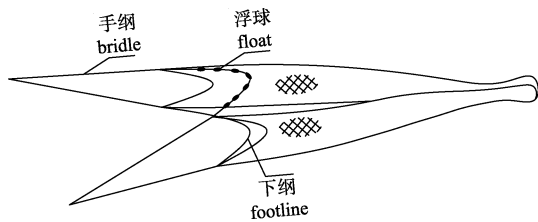


图 2 拖网模型水槽实验示意图
Fig. 2 Diagram of trawl model tests

表 1 第 1 组实验参数设置
Tab. 1 Parameter of model test in group 1

调整因子 adjustment factor	参数设置 parameter value
拖速/($m \cdot s^{-1}$) towing speed	0.75, 1.00, 1.25, 1.5, 1.75, 2
水平扩张系数 L/S horizontal opening coefficient	0.45, 0.5, 0.55, 0.60, 0.65
手纲长度/m bridle length	50, 62.5, 75, 87.5, 100

注: L 为翼端水平间距(m), S 为上纲长度(m).

Note: L is the horizontal distance between the wine tips (m); S is the length of headline (m).

1.4 数据处理

数据处理方法参照拖网模型水池实验方法^[13-17]。

实物网受力(F_s)与模型网受力(F_m)相关关系

表 2 第 2 组拖网模型实验参数设置
Tab. 2 Parameter of trawl model test in group 2

调整因子 adjustment factor	实验系列 series			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
浮沉力合计/tf sum of buoyance and sinker weight (SBSW)	1.978	2.734	3.834	4.59

如下所示:

$$F_s = F_m \lambda^2 \lambda'$$

式中, λ 为大尺度比, λ' 为小尺度比。

实物网网口垂直扩张(H_s)与模型网网口垂直扩张(H_m)的转换关系如下所示:

$$H_s = H_m \lambda$$

实物网的能耗系数(C_e)由下式求出:

$$C_e = 3.472 F_s / (H_s L_s)$$

式中, L_s 为实物网翼端间距(m)。

2 结果与分析

2.1 dh256-1 型拖网作业性能分析

不同实验条件下该网具网口垂直扩张、阻力和能耗系数如图 3 所示, 网口垂直扩张随拖速递增呈指数下降, 指数变化范围介于 $-0.85 \sim -0.70$; 手纲长度与网口垂直扩张性能相关性不明显。网具阻力受拖速、 L/S 、手纲长度等因素共同作用的影响, 随拖速增加呈指数递增, 指数变化范围介于 $1.50 \sim 1.68$; 低拖速时(拖曳速度 ≤ 1.5 m/s), 不同实验条件下拖网阻力差异不明显; 随拖速增大, 手纲长度越长阻力递增速率越快。未发现 L/S 或手纲长度与网具阻力存在明显单一的趋势性关系。能耗系数随拖速增加呈指数递增, 指数变化范围介于 $2.23 \sim 2.47$; 拖曳速度小于 1.5 m/s 时, 不同条件下拖网能耗系数差异不明显, 随着速度增大能耗系数趋势线出现分化; 能耗系数随 L/S 增加递减, 未发现手纲长度与能耗系数存在明显的趋势性关系。

生产中南极磷虾拖网作业速度约 1.5 m/s, 当 L/S 为 0.45 时, dh256-1 型拖网网口垂直扩张介于 18.3~19.6 m, 阻力介于 14.96~16.12 tf, 能耗系数介于 $1.05 \sim 1.17$ $kW \cdot h / (10^4 m^3)$ 。现场观察表明, 该网型背腹网受力均匀, 圆满光滑; 但是侧网中间部分网衣松弛, 随拖速增大, 网口垂直扩张减小,

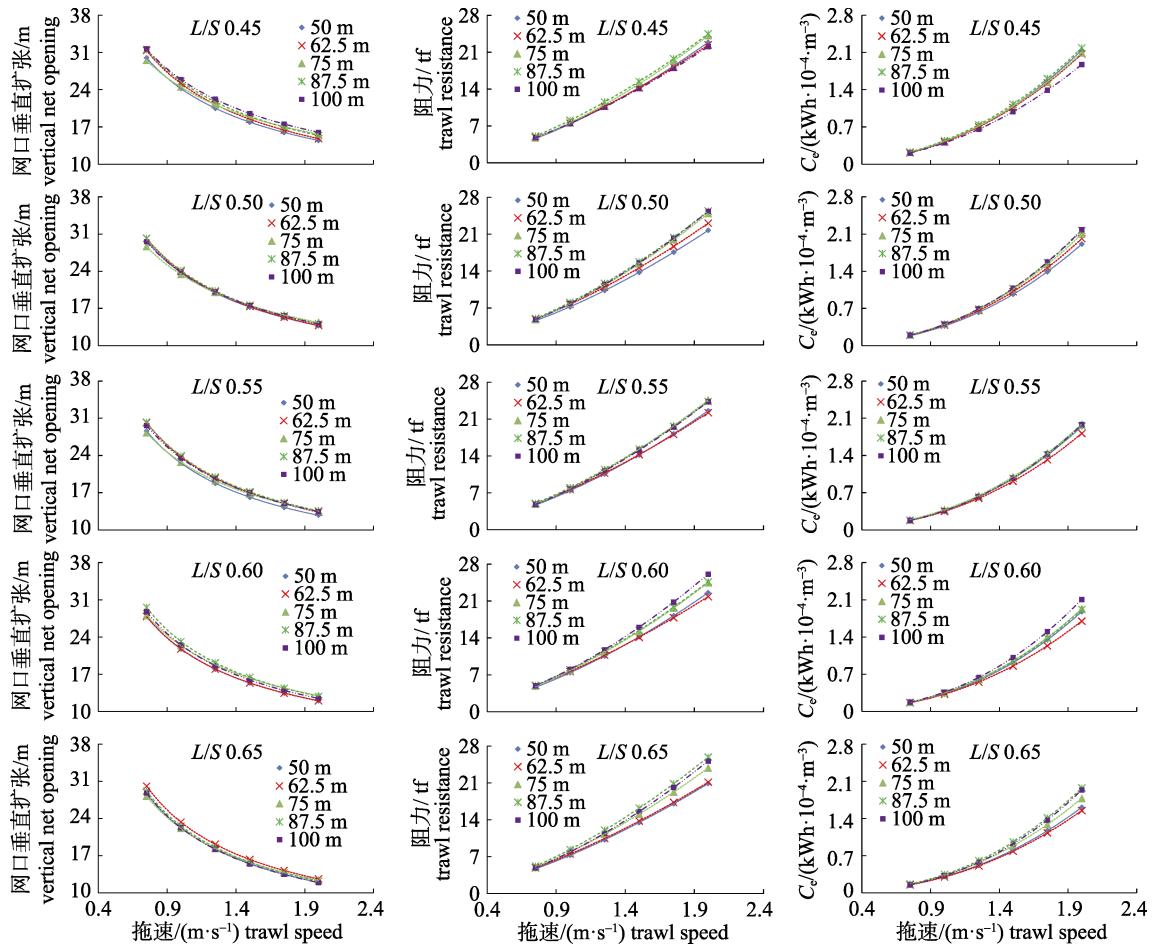


图 3 第 1 组模型实验中 dh256-1 型拖网作业性能特征(图例为手纲长度)

Fig. 3 The performance of the dh256-1 trawl in model test group 1 (the legends are bridle length)

侧网中间部分网衣松弛更明显,可能与浮沉力配备不足有关。增大 L/S 和增长手纲能有效改善侧网受力,但是效果并不明显。

dh256-1 型拖网浮沉力调整实验结果如图 4 所示,随浮沉力增加,网口垂直扩张递增明显;慢速拖曳时,能耗系数差异不明显,但是随拖速增加,浮沉力越大能耗系数越小。拖速为 1.5 m/s,不同 L/S 条件下, No. 1、No. 2、No. 3 和 No. 4 网口垂直扩张范围分别为 15.89~19.12、15.88~19.70、17.41~22.61 和 19.34~23.28 m,网具阻力分布范围为: 15.28~16.20、14.70~16.23、16.13~17.17 和 16.53~17.79 tf,能耗系数分布范围分布为 0.93~1.18、1.09~1.23、1.05~1.08 和 0.94~1.14 $kWh/(10^4 m^3)$ 。现场观察表明, No. 1、No. 2 浮沉力配置条件下,侧网中间部分网衣松弛明显, No. 4 条件下,在拖速 ≤ 1.5 m/s 时侧网受力均匀,但是随拖速增大,网口

垂直扩张减小,侧网中间部分网衣稍有松弛。

2.2 dh256-2 型拖网作业性能分析

不同实验条件下该网具网口垂直扩张、阻力和能耗系数如图 5 所示,网口垂直扩张随拖速递增呈指数递减,指数变化范围介于 $-0.96 \sim -0.80$;随 L/S 递增,网口垂直扩张下降明显;总体上手纲长度与网口垂直扩张相关性不明显。网具阻力随拖速增加呈指数递增,指数变化范围介于 1.46~1.62, L/S 与网具阻力呈正相关,未发现手纲长度与网具阻力存在明显趋势性的关系。能耗系数随拖速增加呈指数递增,指数变化范围介于 2.32~2.62,随 L/S 增加递减,未发现手纲长度与能耗系数存在明显趋势性的关系,总体上,拖曳速度 ≤ 1.5 m/s 时,不同实验条件下拖网能耗系数差异不明显,随着速度增大能耗系数趋势线出现分化;手纲长度为 100 m 时网具能耗系数始终较

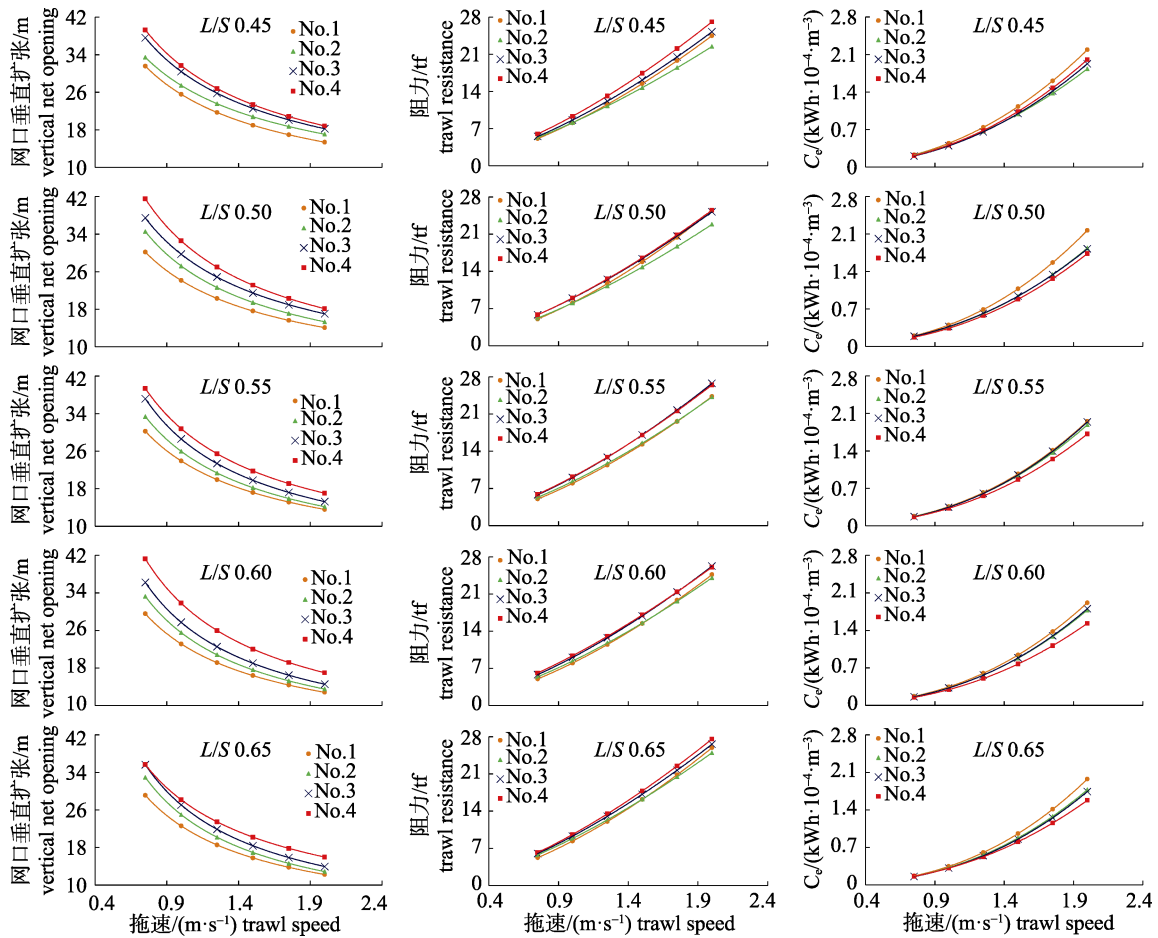


图 4 第 2 组模型实验中 dh256-1 型拖网作业性能特征
Fig. 4 Performance of the dh256-1 trawl in model test group 2

小, 手纲长度为 75 m 能耗系数较大。

生产中南极磷虾拖网作业速度约 1.5 m/s, 当 L/S 为 0.45 时, dh256-2 型拖网网口垂直扩张介于 19.43~20.29 m, 阻力介于 15.84~18.61 tf, 能耗系数介于 1.17~1.33 $\text{kWh}/(10^4\text{m}^3)$ 。现场观察表明, 该网型背腹网、侧网受力均匀, 网型饱满; 当拖速增至 2 m/s, 网口垂直扩张减小, 侧网中间部分网衣稍有松弛。

2.3 dh256-1 和 dh256-2 作业性能比较

2 种网型网口垂直扩张和能耗系数比较如图 6 所示, 网口垂直扩张递减指数 dh256-1 型拖网 < dh256-2, 即随拖速递增 2 种网型网口垂直扩张之间的差值减小; 阻力递增指数 dh256-1 型拖网 > dh256-2, 能耗系数 dh256-1 型拖网略 < dh256-2。差异显著性分析如表 3 所示, WRBS 对网口垂直扩张性能影响显著, 对于能耗系数影响不大。

拖速 $\leq 1.5 \text{ m/s}$ 、 L/S 介于 0.45~0.65 时或者拖速 > 1.5 m/s、 L/S 介于 0.5~0.6 时, dh256-2 型拖网网口垂直扩张显著大于 dh256-1 型拖网 ($P < 0.05$), dh256-2 型拖网垂直扩张性能优于 dh256-1。

现场观察表明, 当浮沉力和为 1.978 t 时, dh256-2 型拖网网型饱满, 侧网受力均匀; 而 dh256-1 型拖网在浮沉力配备增加至 4.59 tf 时, 才较好的改善网具受力情况, 因此 dh256-1 型拖网浮沉力配备要求要高于 dh256-2。

3 讨论

理论上, 手纲长度和 L/S 调整可引起手纲拉力在水平、垂直和迎流方向上的分力改变, 从而影响网具作业性能。适当的手纲长度能促进网具性能提升, 但是随着手纲继续增长, 对网具性能的影响会逐渐减弱。模型实验中手纲长度从 50 m

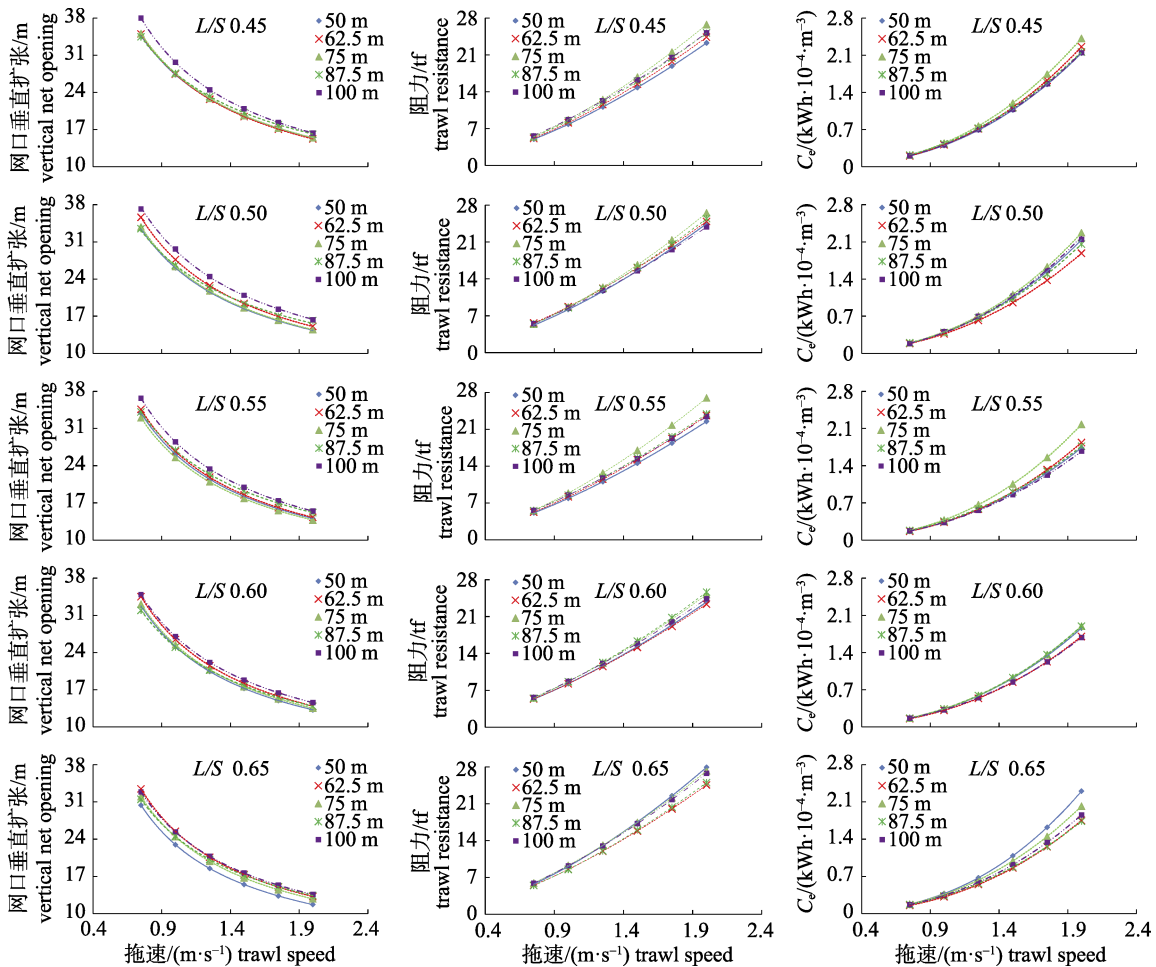


图 5 第 1 组模型实验中 dh256-2 型拖网作业性能特征(图例为手纲长度)

Fig. 5 Performance of the dh256-2 trawl in model test group 1 (the legends are bridle length)

增加至 100 m, dh256 型拖网网口垂直扩张、能耗系数等参数趋于稳定, 没有呈现出趋势性的变化, 表明手纲长度大于 50 m, 手纲长度对于 dh256 型拖网作业性能提升的影响不显著。由于生产中手纲长度越长, 单网次作业耗时增加, 作业操作难度增加, 因此对于 dh256 型拖网建议使用不超过 50 m 长度的手纲。模型实验表明 L/S 与能耗系数 (C_e) 呈明显反相关关系, 即增加网口的水平扩张能有效提升网具作业性能。单船拖网主要通过网板实现水平扩张, 由于捕捞对象的原因, 生产中南极磷虾拖网作业的拖速较慢, 目前适用的网板缺乏, 相关研究也有待于深入开展。

早期研究表明浮沉力调整对于网具性能的影响直接且高效, 甚至提出条件允许前提下, 浮沉力配备越大, 越有利于提高网具性能^[7, 12]。dh256-1 型小网目拖网模型实验表明浮沉力与网口垂直扩

张呈正相关关系, 当浮沉力增加至网具总阻力(拖速 1.5 m/s、不同 L/S 条件下网具的平均阻力)的 26.4% 以上时(No. 4), 相对于 No.1 网口垂直扩张平均提升 29.18% 左右; 浮沉力对于能耗系数的影响与拖速相关, 慢速拖曳时(拖速 ≤ 1.5 m/s), 浮沉力配备对于能耗系数影响不显著, 随着拖速递增, 能耗系数随浮沉力增加下降明显, 因此对于拖曳速度较慢的南极磷虾拖网, 通过增加浮沉力降低能耗的效果可能并不明显。且浮沉力增加会提高网具作业水层控制、起放网等作业操作的难度, 并对船载机械提出更高要求。

模型实验表明: WRBS 对于 256 型拖网网口垂直扩张和浮沉力配备的影响明显。WRBS 对网具作业性能的影响可能与网型结构差异引起的网衣迎流冲角改变有关^[4]。当 WRBS 为 1.1 时, 背(腹)网迎流冲角和迎流面相对较大, 则背(腹)网受水

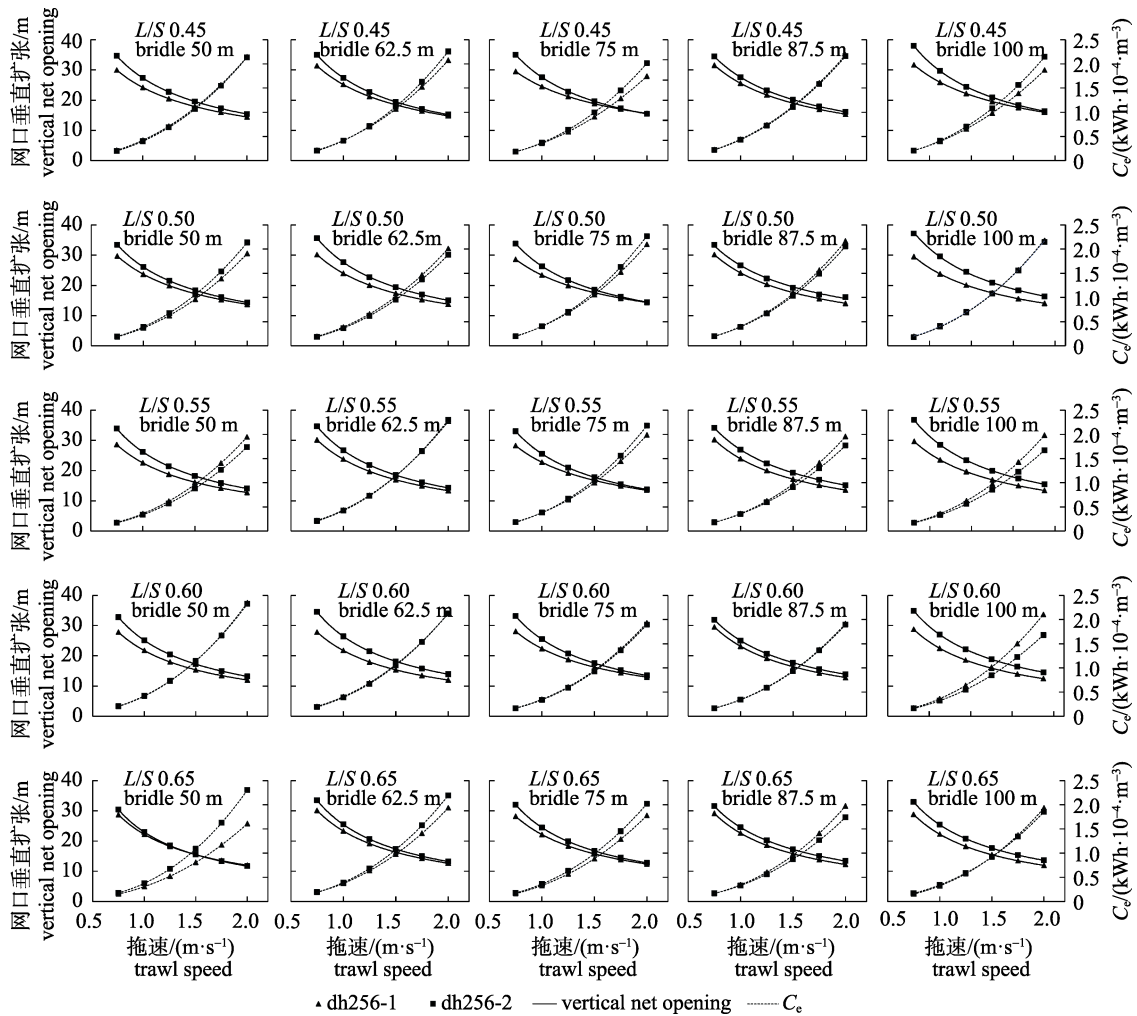


图 6 第 1 组模型实验中 dh256-1 和 dh256-2 型拖网作业性能比较
 Fig. 6 Performance comparison between dh256-1 and dh256-2 in model test group 1

流冲击, 向外扩张力增加, 而侧网相应较小, 降低侧网对手网的牵制, 促进网口垂直扩张, 此时对浮沉力配备要求较低, 反之 WRBS 为 1 时, 背(腹)网迎流冲角和迎流面相对减小, 则背(腹)网受水流冲击, 向外扩张力降低, 而侧网相应增加, 侧网对手网的牵制加强, 不利于网口垂直扩张, 此时对浮沉力配备要求提高。因此相同浮沉力配备条件下, WRBS 为 1.1(dh256-2 型拖网)时网口垂直扩张性能较好; 为了保持侧网受力均匀, WRBS 为 1.1 时网型浮沉力配备要求也较低。但是并非 WRBS 越大越好, WRBS 太大, 将导致侧网宽度窄, 进而影响网口垂直扩张, WRBS 的最佳值以及 WRBS 与浮沉力配备的相关关系有待进一步研究。

4 小结

综上所述, 浮沉力和 WRBS 调整均能有效促进网口垂直扩张性能提升; L/S 与能耗系数呈反相关; 浮沉力对能耗系数的影响与拖速有关, 慢速拖曳时(拖速 ≤ 1.5 m/s), 浮沉力配备对于能耗系数影响不显著, 随着拖速递增, 能耗系数随浮沉力增加下降明显; WRBS 为 1.1 的 dh256-2 型拖网网口垂直扩张性能较好, 浮沉力配备要求较低; WRBS 对 dh256 型拖网的能耗系数影响不显著; 手纲长度 ≥ 50 m, 手纲长度对 dh256 型拖网作业性的影响不明显; 由于南极磷虾拖网作业船速较慢, 因此建议使用 WRBS 为 1.1 的 dh256-2 型拖网, 适宜的手纲长度为 50 m。

表 3 第 1 组模型实验中 2 种拖网主要性能参数的差异显著性检验

Tab. 3 Significance test of difference of the main performance parameters between the 2 kinds trawl in model test group 1

L/S	拖速/(m·s ⁻¹) trawl speed	网口垂直扩张 vertical net opening			能耗系数 C _e		
		F	自由度 freedom	P	F	自由度 freedom	P
0.45	0.75	33.95	9	< 0.01	1.85	9	0.210
	1.00	27.16	9	< 0.01	0.03	9	0.867
	1.25	17.76	9	< 0.01	0.49	9	0.504
	1.50	9.70	9	0.014	1.65	9	0.235
	1.75	4.54	9	0.066	2.82	9	0.132
	2.00	1.77	9	0.220	3.81	9	0.087
0.50	0.75	66.14	9	< 0.01	1.55	9	0.249
	1.00	80.70	9	< 0.01	0.02	9	0.898
	1.25	85.14	9	< 0.01	0.05	9	0.837
	1.50	76.96	9	< 0.01	0.07	9	0.800
	1.75	62.11	9	< 0.01	0.09	9	0.777
	2.00	47.32	9	< 0.01	0.10	9	0.761
0.55	0.75	47.87	9	< 0.01	1.63	9	0.238
	1.00	38.60	9	< 0.01	1.76	9	0.221
	1.25	29.19	9	< 0.01	1.54	9	0.250
	1.50	21.53	9	< 0.01	1.33	9	0.282
	1.75	15.82	9	< 0.01	1.17	9	0.310
	2.00	11.68	9	< 0.01	1.06	9	0.334
0.60	0.75	61.16	9	< 0.01	2.26	9	0.171
	1.00	54.84	9	< 0.01	2.09	9	0.186
	1.25	44.30	9	< 0.01	1.87	9	0.209
	1.50	34.17	9	< 0.01	1.71	9	0.228
	1.75	26.07	9	< 0.01	1.59	9	0.242
	2.00	20.00	9	< 0.01	1.51	9	0.254
0.65	0.75	24.57	9	< 0.01	3.64	9	0.093
	1.00	16.84	9	< 0.01	2.95	9	0.124
	1.25	11.17	9	0.010	2.34	9	0.165
	1.50	7.53	9	0.025	1.95	9	0.200
	1.75	5.21	9	0.052	1.69	9	0.230
	2.00	3.70	9	0.091	1.51	9	0.255

参考文献:

[1] 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): 451-459. [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): 451-459.]

[2] Huang H L, Chen X Z, Feng C L. The Antarctic krill resource utilization state analysis[J]. Fishery Modernization,

2007(1): 48-52. [黄洪亮, 陈雪忠, 冯春雷. 南极磷虾资源开发现状分析[J]. 渔业现代化, 2007(1): 48-52.]

[3] 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.]

[4] 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.]

[5] Liu J, Huang H L, Li L Z, et al. Research progress of Antarctic krill (*Euphausia superba*) continuous fishing techniques[J]. Fishery Modernization, 2013, 40(4): 51-54. [刘健, 黄洪亮, 李灵智, 等. 南极磷虾连续捕捞技术发展状况[J]. 渔业现代化, 2013, 40(4): 51-54.]

[6] Xu G D, Chen X Z, Huang H L, et al. The fishing technology for *Euphausiasuperba*[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011, 19: 122-124. [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.]

[7] 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.]

[8] Chen X Z, Huang H L. Operational parameters of single mid-water trawl net[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004, 7(1): 63-68. [陈雪忠, 黄洪亮. 单船中层拖网网具操作参数变化的研究[J]. 中国水产科学, 2004, 7(1): 63-68.]

[9] Wan R, Hou E H. Effect of the construction at wing tips of trawl on its performance[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 1992, 14(3): 60-63. [万荣, 侯恩淮. 拖网的网袖结构对其性能的影响[J]. 海洋湖沼通报, 1992, 14(3): 60-63.]

[10] Wang Y J, Wan R, Wang L M, et al. Effects of bottom trawl body with large-size meshes on net performance[J]. Marine Fisheries, 2014, 36(3): 260-264. [王永进, 万荣, 王鲁民, 等. 大网目底拖网网身长度对网具性能的影响[J]. 海洋渔业, 2014, 36(3): 260-264.]

[11] Yu C D, Xiong P F. An initial mechanical study on the trawl wing[J]. 1994, 13(3): 162-167. [虞聪达, 熊鹏飞. 拖网网袖力学的初步研究[J]. 1994, 13(3): 162-167.]

[12] 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.]
- [13] Xu L X. Fishing Gear Theory and Design[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. [许柳雄. 渔具理论与设计学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.]
- [14] Chen X Z, Huang X C. Fishing Gear Model Testing Theory and Method[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technic Publishers, 2011. [陈雪忠, 黄锡昌. 渔具模型实验理论与方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2011.]
- [15] SC/T 4011—1995, Trawl model pool-test method[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995. [SC/T 4011—1995, 拖网模型水池实验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.]
- [16] SC/T 4014—1997, Trawl model making method[S]. Beijing: Standard Press of China, 1997. [SC/T4014—1997, 拖网模型制作方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.]
- [17] Zhou A Z, Feng C L. Experiment and research of krill trawl net[J]. Modern Fisheries Information, 2011, 26(8): 6–9. [周爱忠, 冯春雷. 南极磷虾拖网的实验研究[J]. 现代渔业信息, 2011, 26(8): 6–9.]

Performance analysis of the four-panel mid-water trawl for Antarctic krill fishery

LI Lingzhi^{1,2}, CHEN Shuai^{1,2}, YANG Jialiang^{1,2}, LIU Jian^{1,2}, WU Yue^{1,2}, QU Taichun^{1,2}, RAO Xin^{1,2}, HUANG Hongliang^{1,2}

1. Key Laboratory of East China Sea and Oceanic Fishery Resources Exploitation, Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;
2. Engineering Technology Research Center of Marine Fishing, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

Abstract: To promote the development of Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) fishery, we proposed two designs of the 4-panel trawl (dh256-1 and dh256-2). The net mouth perimeter of the two trawls was the same, and the width ratio of belly panel to side panel (WRBS) was different: 1.00 for dh256-1 and 1.10 for dh256-2. Model experiments were used to study trawl performance, and to determine the optimized nets and accessories, which include the sum of buoyance and sinker weight (SBSW), bridle length, and horizontal opening coefficient (L/S). The results showed that, under the test condition, when the L/S was between 0.5 and 0.6 or when the trawl speed was under 1.5 m/s and the L/S was 0.45 or 0.65, significant difference ($P < 0.05$) was noted in the vertical net opening between the two trawls: the vertical net opening of dh256-2 was remarkably faster than that for dh256-1. For improving the trawl performance, the SBSW should be larger for dh256-1: the minimum SBSW for dh256-1 was 4.59 tf and that for dh256-2 was 1.98 tf. These differences might be related to the flow attack angle of the nets. The WRBS of dh256-2 was larger than that of dh256-1; the flow attack angle and head surface of belly panels increased and improved the vertical net opening. Conversely, when the WRBS was smaller, the flow attack angle and head surface of side panels increased, and the pull of side line to bridle was strengthened, thereby limiting the vertical net opening. Therefore, when the WRBS is smaller, the SBSW should be larger. No significant difference in coefficient of the energy consumption (C_e) was found between dh256-1 and dh256-2. The L/S was inversely related to the C_e . No relationship was found between bridle length and C_e ; when the bridle length was ≥ 50 m, the effect of bridle length to both the trawls was not obvious. Therefore, 50 m bridle needs to be used for the two trawls. The effect of SBSW on the C_e of dh256-1 was related to the trawl speed: when the speed was ≤ 1.5 m/s, the effect of SBSW on C_e was not obvious; however, when the speed was > 1.5 m/s, C_e declined remarkably with an increase in SBSW. Since the trawl speed of the Antarctic krill is usually around 1.5 m/s, the dh256-2 was recommended for Antarctic krill fishery. These results can provide a basis for designing Antarctic krill trawls.

Key words: Antarctic krill; mid-water trawl; sum of buoyance and sinker weight; width ratio of belly panel to side panel; bridle

Corresponding author: HUANG Hongliang. E-mail: ecshhl@163.com