



南极磷虾桁杆拖网网型结构与作业性能之间的关系

冯超^{1,2}, 李灵智², 张港琛^{1,2}, 刘健²,
杨嘉樑², 饶欣², 黄洪亮^{2*}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部远洋与极地渔业创新重点实验室, 上海 200090)

摘要: 桁杆拖网是南极磷虾连续泵吸桁杆拖网捕捞系统重要组成部分之一, 为深入了解该系统中桁杆拖网的作业性能特征, 促进网具作业性能优化, 本研究通过模型试验开展了网型结构和沉子重量对网具作业性能影响的探索, 网型结构包括 6 种 (3 种腹网宽度, 每种宽度采用 2 种缝合方式), 分别以 A、B、C、AA、BB 和 CC 表示, 沉子重量 3 种。综合比较表明, 不同试验网型作业性能优劣排序为 BB>CC>C>A>B>AA, 但差异不显著。缩小腹网宽度和斜目缝合均能有效提高网口垂直扩张、降低能耗系数, 提高网具作业性能, 尤其适用于较高拖速的作业场景。沉子重量与网具阻力、网口垂直扩张均呈显著正相关, 但与能耗系数相关性不明显; 为促进网口垂直扩张, 合适的沉子重量配备随拖速增加而递增, 拖速 1.5 m/s 的条件下, 各试验网型其沉子配重应不低于 3.05 t。试验条件下, 各网型的网具阻力、能耗系数变化趋势较平稳, 递变斜率变化较小, 网具阻力与拖速呈幂函数关系, 指数介于 1.49~1.64。以上结论可为南极磷虾桁杆拖网属具配备以及优化设计提供参考。

关键词: 南极磷虾; 桁杆拖网; 作业性能; 网型结构; 沉子重量

中图分类号: S 931

文献标志码: A

南极磷虾 (*Euphausia superba*) 通常指南极大磷虾, 隶属于磷虾科 (Euphausiidae) 磷虾属 (*Euphausia*), 广泛分布于南大洋, 是南极海洋生态系统中的关键物种^[1-3]。南极磷虾生物量巨大, 被认为是目前地球已知的多细胞动物中生物量最大的单一物种。据评估, 整个南大洋南极磷虾生物量约为 6.5~10.0 亿 t^[4-5], Atkinson 等^[6]应用多年的调查数据评估的南极磷虾生物量约为 $3.0 \times 10^8 \sim 5.0 \times 10^8$ t, 其年可捕量可达 1 亿 t^[4-5]。

南极磷虾商业开发始于 20 世纪 60 年代, 先后有 20 多个国家参与南极磷虾资源开发, 历史最高年产量达到 52.8 万 t, 后来由于加工技术瓶颈、

国际政治等多重因素的影响, 多个国家退出南极磷虾商业捕捞, 其年产量回落至 10 万 t 左右。近年来随着捕捞和加工技术的突破, 南极磷虾年捕捞量逐年上升, 年产量升至 30 万 t 左右, 其生产区域均集中于 48 区^[7-8]。据 2000 年和 2018 年南极海洋生物资源养护委员会 (CCAMLR) 组织开展的多国联合调查显示, 目前 48 区磷虾的资源量分别为 6 030 万和 6 260 万 t, 资源状况保持稳定, 确定的总可捕捞量为 561 万 t, 触发水平捕捞产量为 62 万 t (约为总生物量的 1%)^[9], 显著大于实际年捕捞量, 因此理论上南极磷虾资源仍具有较大开发潜力。我国南极磷虾商业探捕始于 2009—2010

收稿日期: 2021-10-19 修回日期: 2022-01-21

资助项目: 山东省重点研发计划 (2019JZZY010819); 国家重点研发计划 (2018YFC1406803); 中国水产科学研究院基本科研业务费专项 (2021TD03)

第一作者: 冯超, 从事远洋渔业资源开发利用研究, E-mail: fengch2021@163.com

通信作者: 黄洪亮 (照片), 从事渔具渔法与渔业工程研究, E-mail: ccshhl@163.com



渔季,目前每年参与生产的渔船约5艘,年产量约4万t。

南极磷虾商业捕捞中采用的作业方式有2种,即常用的单船有袖单囊拖网捕捞和连续泵吸桁杆拖网捕捞系统^[10]。大部分渔船采用的是单船有袖单囊拖网捕捞,使用的网具有疏目拖网和小网目拖网,探捕初期,我国曾有多位学者对该作业方式的网具和属具进行优化研究,通过模型试验分析现有网具的作业性能并进行了作业参数优化^[11-15],冯春雷等^[16]、黄洪亮等^[17]和李灵智等^[18]自主设计四片式小网目中层拖网网型,刘健等^[19]开展了网板优化研究,饶欣等^[20]和冯春雷等^[13]开展了网具与网板的匹配优化研究,为促进南极磷虾的高效捕捞提供了重要技术支撑。实际生产表明单船有袖单囊拖网作业不仅具有网具成本低、操作便捷的优点,且单位网产较高。但由于该作业方式起放网耗时较长,总体捕捞效率受到影响,且渔获在拖曳过程中容易受水流冲击、网具挤压等因素影响,导致渔获质量不佳。连续泵吸桁杆拖网捕捞系统可在不起网的情况下通过泵吸将渔获从网囊实时输运至加工车间,实现持续捕捞,显著提高了捕捞效率和渔获品质,较好地弥补了单船有袖单囊拖网作业存在的不足。挪威的“saga sea”和“Atlantic Navigator”号渔船采用了该作业系统,单船年产量超过10万t,在2018年世界南极磷虾商业捕捞中,挪威贡献了64%的年产量。但该捕捞系统具有操作技术复杂、装备配备要求较高的特点,2019年我国建造的“深蓝”号南极磷虾捕捞船引进该作业方式,但至今仍未投入生产,对网具作业性能、属具调整等仍不甚了解。

桁杆拖网是连续泵吸桁杆拖网捕捞系统重要组成部分之一,本研究基于国际上连续泵吸桁杆拖网结构特点,通过模型试验分析网型结构、缝合方法和沉子重量对网具作业性能的影响,以期深入了解该系统中网具作业性能特征提供参考,为促进该系统中桁杆拖网的国产化进程提供支撑。

1 材料与方法

1.1 模型网制作

母型网网具主尺度为20 m×124 m(上纲长×网具全长),按SC/T 4014—1997“拖网模型制作方法”^[21]制作模型网(A),大尺度比为20,小尺度比为10。模型A网型结构如图1-a所示,A与调整

网的模型网(B和C)的背网和侧网结构相同,B和C的腹网网口端网目数设置为147和140目。每种网型(A、B和C)采用2种装配方式制作6顶模型网,A、B和C通过直目缝合前后网片连接各段身网,网片侧边无剪裁(以下简称直目缝合网型);AA、BB和CC通过侧边剪裁、前后网片斜目缝合连接各段身网,网型结构如图1-b所示。两种装配方式侧边均采用绕目缝合(以下简称斜目缝合网型)。模型网材料为聚乙烯,上纲长度均为1 m,网型A和AA、B和BB、C和CC下纲长度分别为1、0.91和0.88 m。

1.2 试验设备和模型实验网具安装

模型试验在上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心动水池中进行,水池主尺度:9 m(长)×3.5 m(宽)×2 m(深)。测力传感器:型号为LC-FW-100;量程为100 N;非线性误差为0.5% F.S.C。应用高清摄像机拍摄网具在水中的形态,通过图片修正获取网口高度数据。

模型实验网具安装如图2所示。左右手纲平行,前端连接测力传感器,后端分别与桁杆两端抓手连接。配备重锤2个,分别安装于下纲两端,下纲中间不配重。

1.3 模型实验和数据分析

为了深入了解上述6种网型结构的网具作业性能特征,根据拖网模型水池试验方法^[22-24],分别开展了3种沉降力[248×2(g)、318×2(g)和381×2(g)]、5种拖曳速度(0.26、0.35、0.44、0.53和0.62 m/s)条件下共计90组模型实验。沉子重量为空气中重量,由于沉子制作中重量精准控制较难,重量并未严格按照等差设置,对应的实际沉降力配备约为1.98、2.54和3.05 t。南极磷虾拖网作业拖速范围通常为1.00~2.00 m/s,兼顾实验室条件和试验需求设置试验拖曳速度,采用修正的田内相似准则将模型试验拖速转换为实际作业拖速^[25],分别为0.86、1.14、1.43、1.72和2.00 m/s,转换系数为3.25。

观测的网具作业性能参数包括网具阻力、网口高度和能耗系数。实物网阻力和网口高度的转换如式(1)和(2)所示,能耗系数的计算如式(3)所示:

$$F_s = F_m \times \lambda^2 \times \lambda' \quad (1)$$

$$H_s = H_m \times \lambda \quad (2)$$

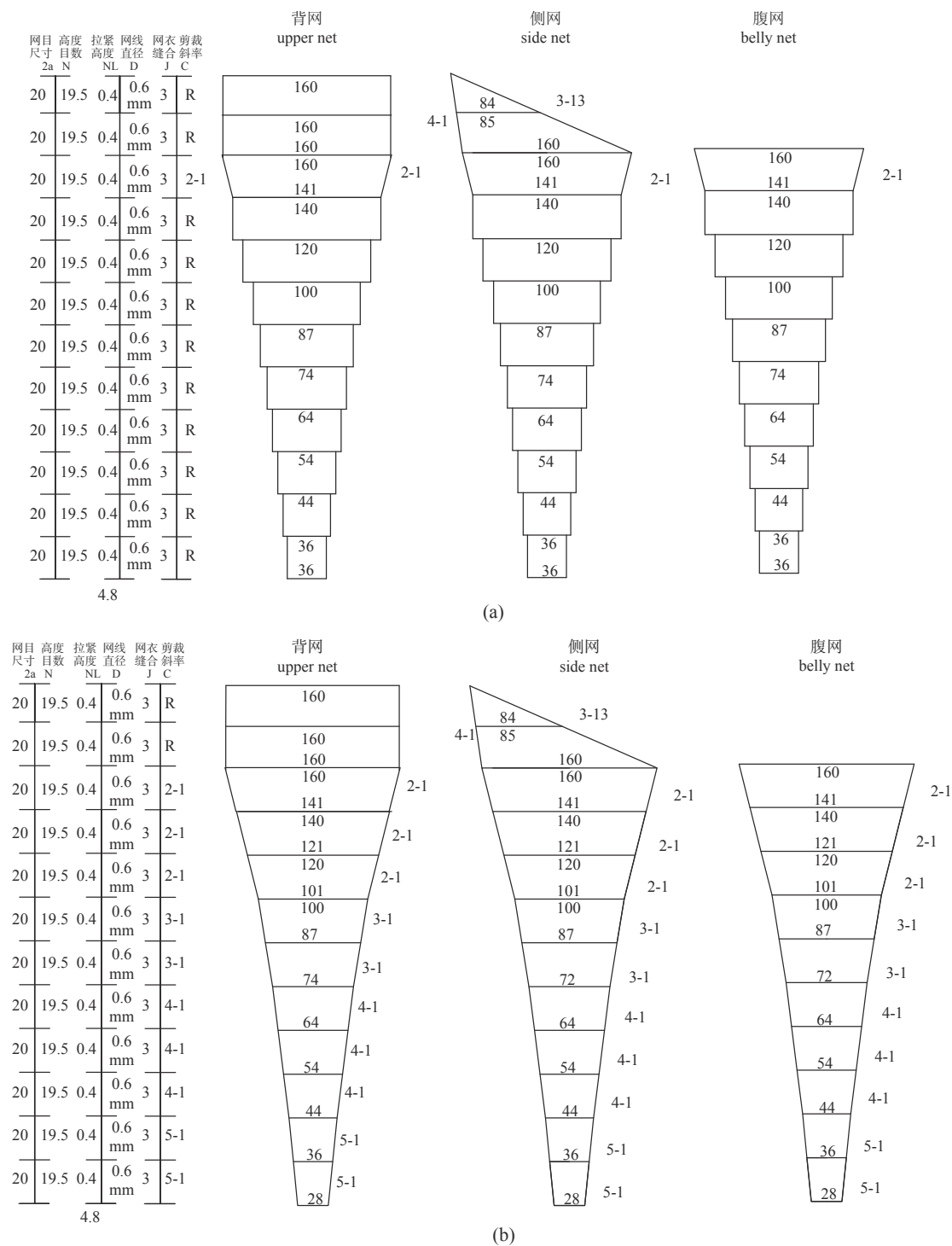


图 1 模型网结构示意图

Fig. 1 Drawing of model beam trawl

$$C_e = \frac{3.472 \times F_s}{H_s \times L_s} \quad (3)$$

式中, F_s 为实物网总阻力 (N), F_m 为模型网总阻力 (N), λ 为大尺度比, λ' 为小尺度比, H_s 为实物网网口高度 (m), H_m 为模型网网口高度 (m), C_e 为实物网能耗系数 ($\text{kW}\cdot\text{h}/10^4 \text{ m}^3$), L_s 为实物网

桁杆长度 (m)。

应用 K-W 检验分析不同网型之间网具作业性能差异的显著性, 双因子方差分析进行影响因子与网具作业性能相关关系显著性检验, 统计参数计算均在 R 软件中完成。

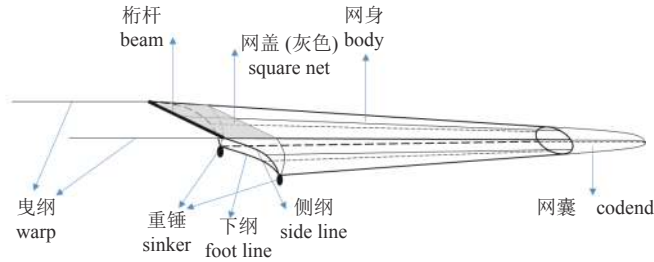


图2 模型实验网具安装

Fig. 2 Schematic diagram of model beam trawl test

2 结果

表1 不同试验网型作业性能差异 K-W 检验

Tab. 1 K-W test of performance difference of different nets

比较 comparison	阻力 resistance		网口高度 mouth height		能耗系数 C_e	
	chi-squared	P	chi-squared	P	chi-squared	P
A vs. B vs. C	0.52	0.77	1.08	0.58	0.32	0.85
AA vs. BB vs. CC	0.13	0.94	0.71	0.70	0.98	0.61
A vs. AA	0.02	0.88	0.25	0.62	0.27	0.60
B vs. BB	0.87	0.35	0.59	0.44	0.47	0.49
C vs. CC	0.65	0.42	0.12	0.72	0.65	0.42

2.1 网型与网具作业性能

直目缝合网型 尽管 K-W 显著性检验表明, 在试验条件下 3 种网型 (A、B 和 C) 作业性能差异不显著 ($P>0.05$) (表 1), 但存在一定程度差异 [图 3, 各小图上方的数字表示沉降力配备, 单位为 g, 图 4~图 6 同]。B 和 C 网型网具阻力相近,

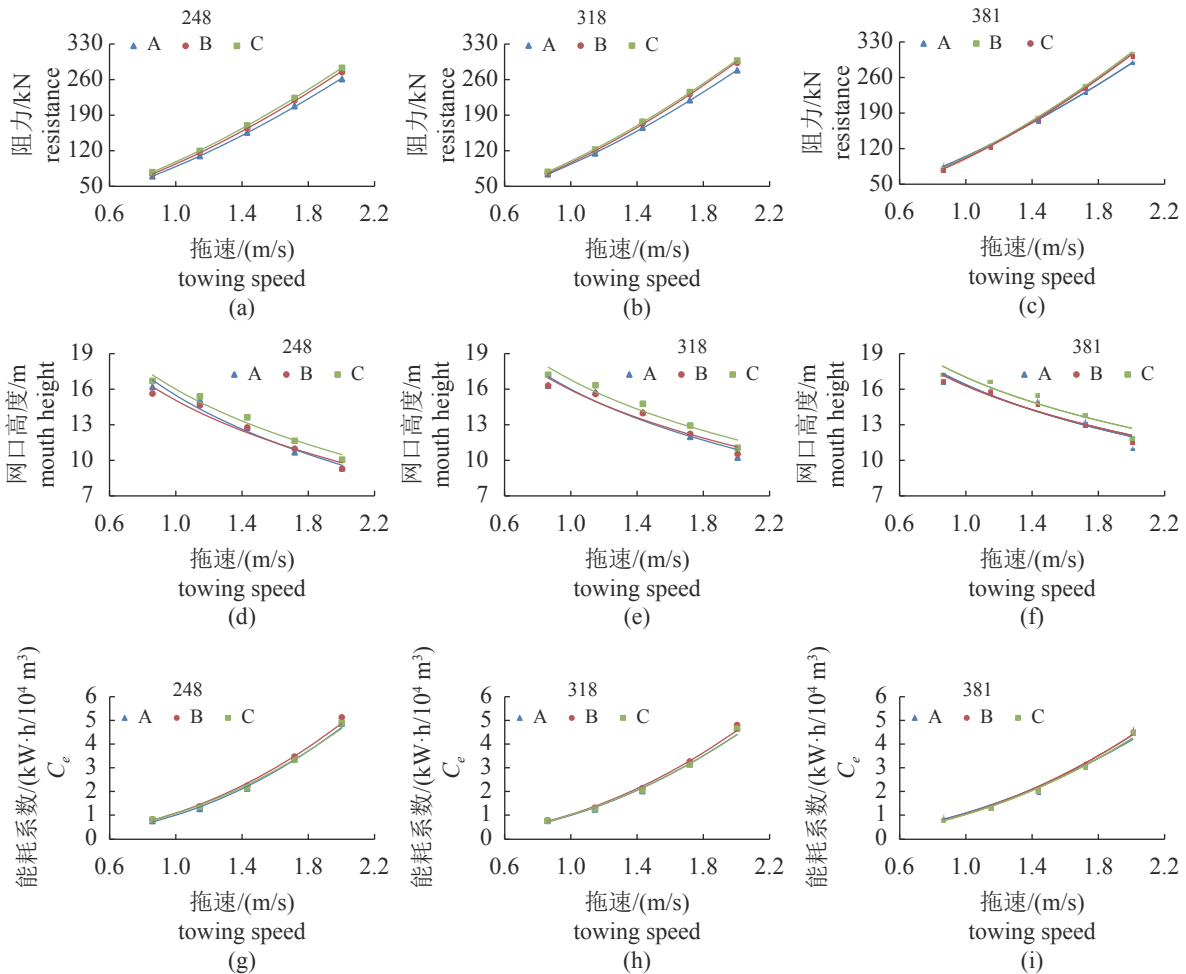


图3 直目缝合网型 (A、B 和 C) 作业性能比较

Fig. 3 Performance comparison between A, B and C

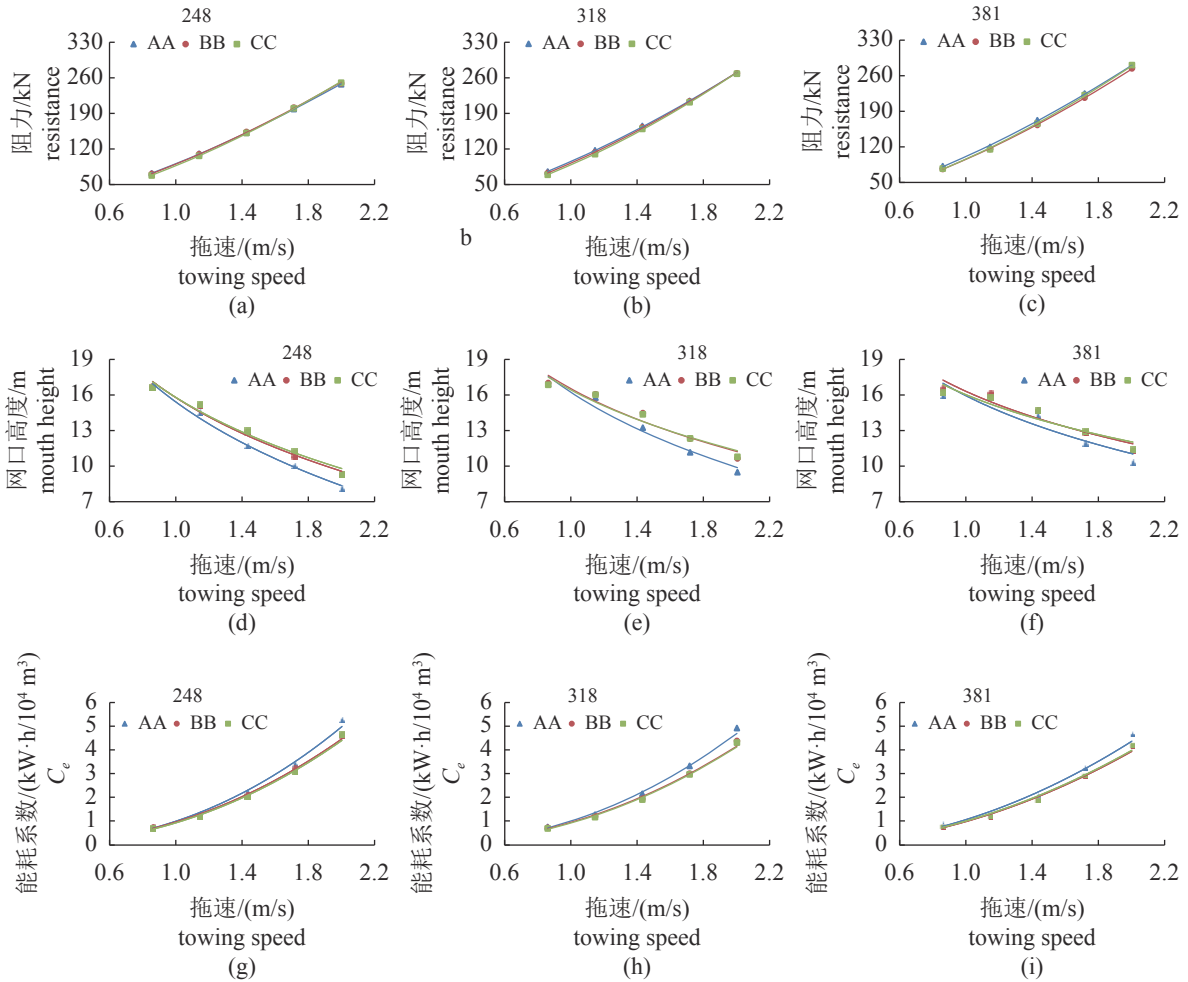


图 4 斜目缝合网型 (AA、BB 和 CC) 作业性能比较

Fig. 4 Performance comparison between AA, BB and CC

略高于 A；C 网型网口高度最大，A 和 B 网口高度相似；B 网型能耗系数略高于 A 和 C，A 和 C 能耗系数相近。随拖速增加，B 和 C 网型与 A 之间的阻力差异增大，但随沉子重量增加，差异减小。不同试验条件下 3 种网型之间的网口高度差异变化较小；沉子重量和拖速对于不同网型间能耗系数的差异影响不明显。总体上，试验条件下 C 网型能耗系数较低，网口高度较大，作业性能优于 A 和 B 网型。

斜目缝合网型 (AA、BB 和 CC) 与直目缝合网型相似，K-W 显著性检验表明，在试验条件下 3 种网型 (AA、BB 和 CC) 网具作业性能差异不显著 ($P>0.05$) (表 1)。3 种网型网具阻力相近，但相对 AA 网型，BB 和 CC 网口高度均有所增加，且随拖速增加增幅越大；BB 和 CC 网型能耗系数均低于 AA 网型，且拖速越大差异越明显，BB 和 CC 网型的作业性能参数相近。沉子重量对网

型之间作业性能差异的影响不明显 (图 4)。总体上 BB 和 CC 网型网具作业性能优于 AA 网型。

直目缝合与斜目缝合网具作业性能比较

K-W 显著性检验表明，在试验条件下，A 与 AA、B 与 BB、C 与 CC 的网具性能均不存在显著差异 ($P>0.05$) (表 1)，但 3 种直目缝合网型 (A、B 和 C) 的网具阻力均大于相应的斜目缝合网型 (AA、BB 和 CC)，且差异与拖速成正比；A 和 C 网型的网口高度大于 AA 和 CC 网型，B 和 BB 网型的网口高度相近；A 网型能耗系数小于 AA 网型，而 B 和 C 网型能耗系数大于 BB 和 CC 网型，且差异与拖速成正比 (图 5)。

综上比较，不同试验网型作业性能优劣排序为 $BB>CC>C>A>B>AA$ ，但差异并不明显。缩小腹网宽度和斜目缝合均能有效提高网口垂直扩张、降低能耗系数，提高网具作业性能，尤其适用于较高拖曳速度的作业场景。

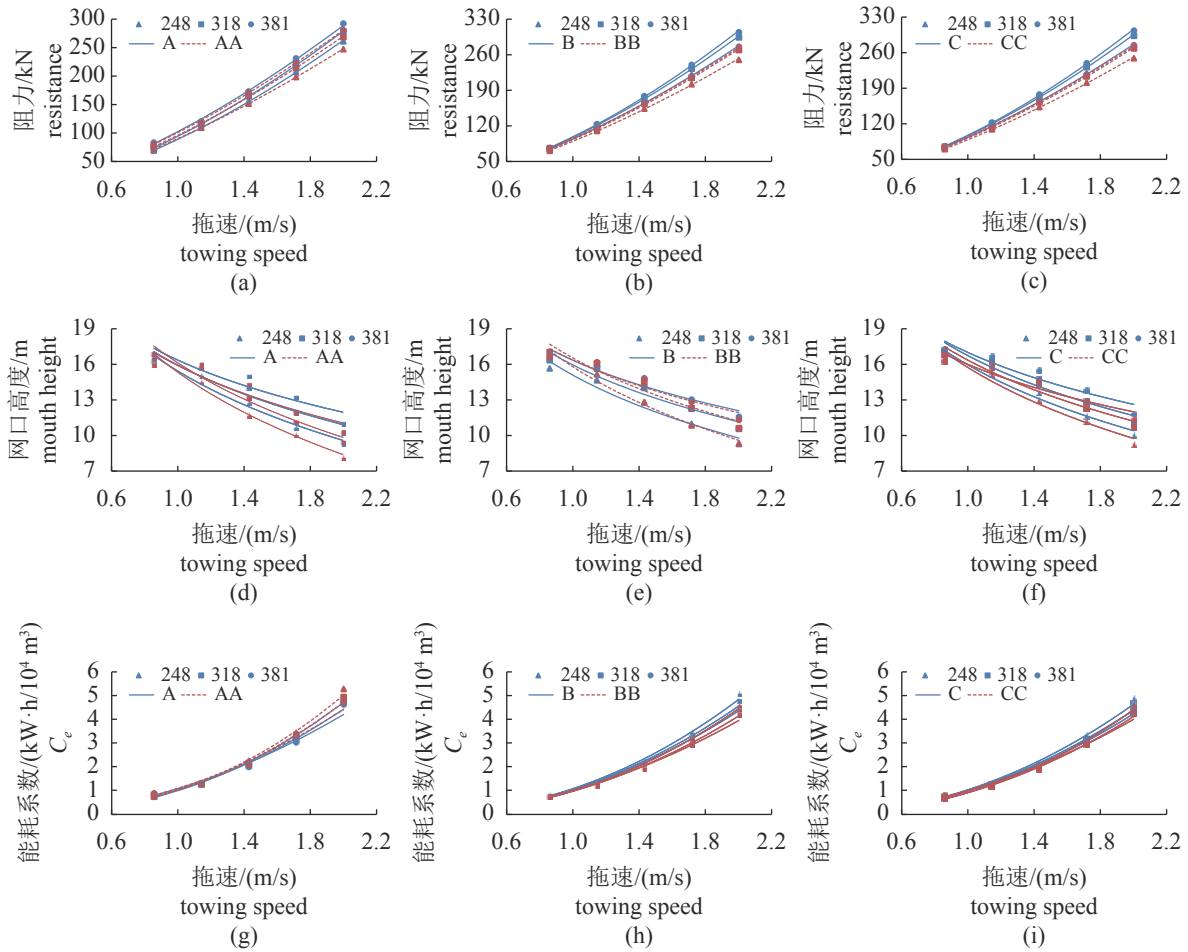


图5 网具(A和AA、B和BB、C和CC)网口高度性能比较

Fig. 5 Performance comparison between A and AA, B and BB, C and CC

2.2 沉子重量和拖速对网具作业性能的影响

双因子方差分析表明沉子重量与网具阻力、网口垂直扩张均呈显著正相关(表2),沉子重量增加能有效促进网口垂直扩张,且随拖速增加,促进作用更明显。虽然沉子重量与网具能耗系数相关性不明显,但在拖速较高时能适当降低网具能耗系数,且效果随拖速递增。拖速与网具阻力、能耗系数呈显著正相关,与网口垂直扩张呈显著负相关(表2)。总体上,试验拖速条件下,各种网型的网具阻力、能耗系数变化趋势较平稳,递增斜率变化较小(图6)。

3 讨论

直目缝合和斜目缝合是目前捕捞网具加工中的两种主要缝合方式,直目缝合在张网类网具中应用较为广泛,而拖网类渔具通常采用斜目缝合。直目缝合具有简化加工工艺、网型较好的优点,但直目缝合的网具通常耗材较多、线面积较大,

而网具线面积与阻力呈正比^[11,23],因此直目缝合的网具通常阻力较大、能耗系数高,与本研究中模型试验所测数据总体相符。所测数据中出现B和AA网型能耗系数略大于A网型的情况,可能与各试验网型之间差异较小、模型网制作、模型试验条件等因素有关。

拖速是拖网类渔具作业性能重要的影响因素之一,通常认为拖速与捕捞效率密切相关,但能耗也随拖速增加呈指数递增,选择合适的拖曳速度是目前拖网渔业应对能源成本上涨、提高生产效益的主要措施^[26-27]。研究认为拖速大于1 m/s时,南极磷虾对拖网刺激的趋避行为有限^[28-29]。而低拖速条件下,各试验网型能耗系数和阻力均较小,水动力性能较好。因此选择较低作业速度也不失为改善南极磷虾拖网作业效率的一个较好方法^[11,18]。当然,拖速的选择可能还受外部竞争、海况、作业稳定性等因素影响^[26]。

南极磷虾主要栖息于中上层水域,网口高度

表2 沉子重量和拖速与网具作业性能相关关系显著性检验

Tab. 2 Significant test for correlation of sinker weight and trawling speed with nets performance

作业性能参数 performance parameters		沉子重量 sinker weight			拖速 towing speed		
		<i>F</i>	<i>P</i>	显著性 significance	<i>F</i>	<i>P</i>	显著性 significance
网具阻力 resistance	A	27.56	<0.01	***	1 145.78	<0.01	***
	B	7.15	0.02	*	881.51	<0.01	***
	C	9.28	<0.01	***	788.58	<0.01	***
	AA	17.32	<0.01	***	590.75	<0.01	***
	BB	15.63	<0.01	***	804.07	<0.01	***
	CC	10.25	<0.01	***	855.36	<0.01	***
网口高度 towing speed	A	15.31	<0.01	***	95.97	<0.01	***
	B	31.08	<0.01	***	180.30	<0.01	***
	C	50.27	<0.01	***	219.22	<0.01	***
	AA	7.65	0.01	*	66.92	<0.01	***
	BB	7.90	0.01	*	74.24	<0.01	***
	CC	12.47	<0.01	***	96.4	<0.01	***
能耗系数 C_e	A	1.61	0.26		781.98	<0.01	***
	B	6.99	0.02	*	1 212.42	<0.01	***
	C	4.22	0.06		579.34	<0.01	***
	AA	1.84	0.22		515.58	<0.01	***
	BB	1.61	0.26		688.99	<0.01	***
	CC	3.83	0.07		667.32	<0.01	***

注：“***”表示差异极显著，“*”表示差异显著

Notes: “***” means extremely significant difference, “*” means significant difference

是南极磷虾桁杆拖网捕捞效率的主要影响因素，其主要受垂直向下的沉子重力、侧纲和网衣张力的影响，网衣张力和沉子重量是2个主要可调整因素。网口高度与网衣张力呈负相关，即减小网衣张力可促进网口垂直扩张，如模型试验中低拖速条件下，网口垂直扩张通常较好。网口高度与沉子重力呈正相关，试验观测结果表明，相同网型条件下，合适的沉子重量配备与拖速关系密切。拖速0.86 m/s条件下，不同沉子重量条件下网口高度为16.39~16.76 m，沉子重量调整对网口高度影响甚微(表3)，假设以此网口高度均值作为0.86 m/s拖速下该类网型理想网口高度的近似值，需要配备的沉子重量为1.98 t；拖速为1.14 m/s时，理想的网口高度近似值约为16.00 m，需要配备的沉子重量为2.54 t；随着拖速增加，为达到理想的网口垂直扩张，需要配备的沉子重量也越大。南极磷虾拖网的拖速通常为1.5 m/s，各试验网型的沉子配重应不低于3.05 t。需要明确的是沉子重量增加并不能较好地改善网具的整体水动力性能，且较大的沉子重量将增加操作的难度。在条件(主机功率、辅助机械和加工效率等)许可的情况下，探索网和属具的精准匹配、合适的拖曳速度等是

表3 试验条件下各网型的网口高度均值

Tab. 3 Vertical opening averages of different net under test condition

拖曳速度/(m/s) towing speed	网口高度/(m) mouth height		
	1.98 t	2.54 t	3.05 t
0.86	16.39	16.76	16.58
1.14	14.98	15.92	16.08
1.43	12.77	14.14	14.85
1.72	10.91	12.15	12.96
2.00	9.25	10.05	11.24

实现高效捕捞的关键。

本研究所测各网型在1.43 m/s的拖速下，能耗系数为1.92~2.25，高于传统网板拖网^[11,13,16,18]。除网型结构、主尺度差异以外，可能还与网具长周比有关，本研究所测的网型长周比为0.75，均大于目前普遍应用的南极磷虾网板拖网，身网长度通常与网具阻力、能耗系数呈正相关。能否通过适当减少身网长度优化南极磷虾桁杆拖网网具水动力性能有待进一步研究。此外，试验观测发现，受网衣张力影响，随拖速增加，试验网网口收缩，下纲向后弯曲，腹网部分网衣松弛明显。

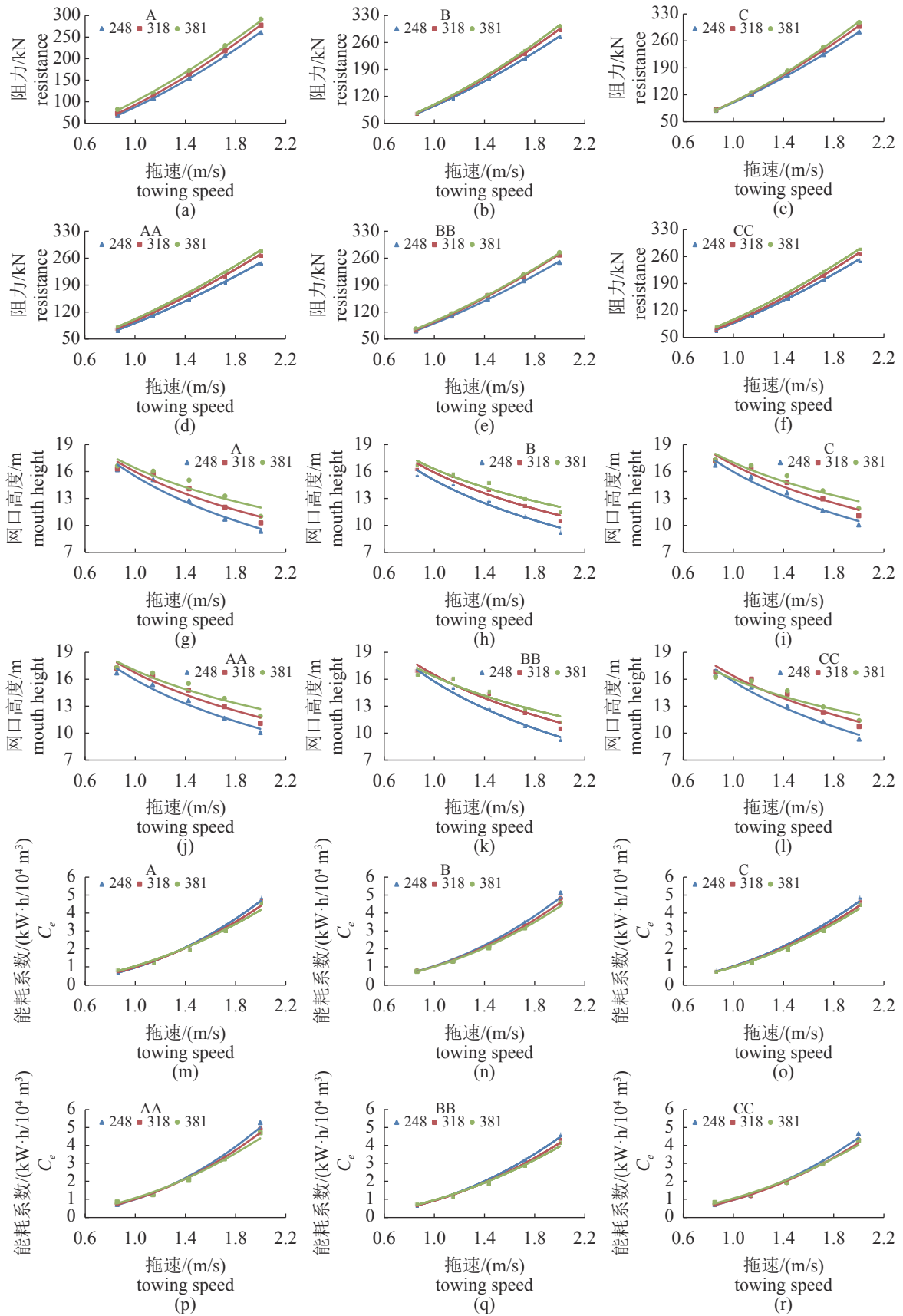


图 6 沉子重量和拖速对网具作业性能的影响

Fig. 6 Effect of sinkers and current speeds on the performance of beam trawls

生产中通过分隔栅将下纲分段直接连接至桁杆, 不仅可减少哺乳动物等非目标生物的兼捕, 可能还可减少腹网、下纲的形变。

为了便于模型试验的开展, 本研究并未在模型网中添加衬网、桁杆和泵吸系统, 以上部分的添加将使整体阻力和能耗系数增大、网口高度降低, 在船、网、属具匹配设计时应予以考虑。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Zhou M, Dorland R D. Aggregation and vertical migration behavior of *Euphausia superba*[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, 51(17-19): 2119-2137.
- [2] Atkinson A, Nicol S, Kawaguchi S, *et al.* Fitting *Euphausia superba* into southern ocean food-web models: a review of data sources and their limitations[J]. *CCAMLR Science*, 2012, 19: 219-245.
- [3] Stowasser G, Atkinson A, McGill R, *et al.* Food web dynamics in the Scotia Sea in summer: a stable isotope study[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 59-60: 208-221.
- [4] 刘永新, 李梦龙, 方辉, 等. 南极磷虾的资源概况与生态系统功能[J]. *水产学杂志*, 2019, 32(1): 55-60.
Liu Y X, Li M L, Fang H, *et al.* Resources status and ecosystem function in Antarctic krill[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2019, 32(1): 55-60 (in Chinese).
- [5] 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, 34(1): 48-51.
Huang H L, Chen X Z, Feng C L. Status of *Euphausia superba* resource exploration[J]. *Fishery Modernization*, 2007, 34(1): 48-51 (in Chinese).
- [6] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E A, *et al.* A reappraisal of the total biomass and annual production of Antarctic krill[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(5): 727-740.
- [7] Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources. Fishery report 2020: *Euphausia superba* in area 48[R]. Tasmania, Australia: Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, 2020.
- [8] Cruz F S, Ernst B, Arata J A, *et al.* Spatial and temporal dynamics of the Antarctic krill fishery in fishing hotspots in the Bransfield Strait and South Shetland Islands[J]. *Fisheries Research*, 2018, 208: 157-166.
- [9] Hill S, Atkinson A, Darby C, *et al.* Is current management of the Antarctic krill fishery in the Atlantic sector of the Southern Ocean precautionary?[J]. *CCAMLR Science*, 2016, 23: 31-51.
- [10] Moir C J, Davis M, Peatman T. A descriptive review of the trawl systems used in the Antarctic krill fishery[R]. Bergen: Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, 2009.
- [11] 徐鹏翔. 南极磷虾中层拖网性能研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
Xu P X. Performance of Antarctic krill midwater trawl[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016 (in Chinese).
- [12] 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.
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 (in Chinese).
- [13] 冯春雷, 黄洪亮, 周爱忠. 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.
Feng C L, Huang H L, Zhou A Z. Performance optimization of a trawl for Antarctic krill[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(4): 662-670 (in Chinese).
- [14] 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.
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 (in Chinese).
- [15] 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.
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 (in Chinese).
- [16] 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.
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 (in Chinese).

- [17] 中国水产科学研究院东海水产研究所. 一种南极磷虾拖网网具: 中国, CN201410200253.3[P]. 2016-03-30. East China Sea Fishery Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences. Antarctic krill trawl fishing net: CN, CN201410200253.3[P]. 2016-03-30 (in Chinese).
- [18] 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. 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 (in Chinese).
- [19] 刘健, 黄洪亮, 陈勇, 等. 南极磷虾拖网网板水动力性能分析[J]. 渔业现代化, 2015, 42(2): 50-54. Liu J, Huang H L, Chen Y, *et al.* Analysis on the hydrodynamic characteristics of Antarctic krill trawl otter board[J]. Fishery Modernization, 2015, 42(2): 50-54 (in Chinese).
- [20] 饶欣, 黄洪亮, 刘健, 等. 立式曲面V型网板在拖网系统中的力学配合计算研究[J]. 水产学报, 2015, 39(2): 284-293. Rao X, Huang H L, Liu J, *et al.* Studies on mechanical matching calculation of vertical cambered V type otter board in trawl system[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(2): 284-293 (in Chinese).
- [21] 沈德昌. SC/T 4014—1997 拖网模型制作方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004. Shen D C. SC/T 4014-1997 Preparation of trawl model[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004 (in Chinese).
- [22] 全国水产标准化技术委员会渔具分技术委员会. SC/T 4011—1995 拖网模型水池试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996. Fishing Gear Sub-Technical Committee of National Technical Committee on Fisheries Standardization. SC/T 4011—1995 Method for testing model trawl in tank[S]. Beijing: Standards Press of China, 1996 (in Chinese).
- [23] 许柳雄. 渔具理论与设计学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2004. Xu L X. Fishing gear theory and design[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004 (in Chinese).
- [24] 陈雪忠, 黄锡昌. 渔具模型试验理论与方法 [M]. 上海: 上海科学与技术出版社, 2011. Chen X Z, Huang X C. Theory and method for model fishing gear experiment [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2011 (in Chinese).
- [25] Hu F X, Matuda K, Tokai T. Effects of drag coefficient of netting for dynamic similarity on model testing of trawl nets[J]. Fisheries Science, 2001, 67(1): 84-89.
- [26] Jaap P J, Turenhout M, Hans A E V O, *et al.* Adaptive response of beam trawl fishers to rising fuel cost[J]. Ices Journal of Marine Science, 2013, 70(3): 675-684.
- [27] Beare D, Machiels M. Beam trawlermen take feet off gas in response to oil price hikes[J]. Ices Journal of Marine Science, 2012, 69(6): 1064-1068.
- [28] Everson I. Krill: biology, ecology and fisheries[M]. London, Blackwell Science, 2000: 228-261.
- [29] Krag L A, Herrmann B, Iversen S A, *et al.* Size selection of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in trawls[J]. PLoS ONE, 2014, 9(8): 1-14.

Effect analysis of gear structure and sinker on the performance of Antarctic krill beam trawl

FENG Chao^{1,2}, LI Lingzhi², ZHANG Gangchen^{1,2}, LIU Jian²,
YANG Jialiang², RAO Xin², HUANG Hongliang^{2*}

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

2. Key Laboratory of Oceanic and Polar Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

Abstract: Beam trawl is an important part of Antarctic krill (*Euphausia superba*) continuous fishing system. In order to further understanding the gear performance under different conditions, a series of model test were designed to study the effect of gear structure and sinker on gear performance. The gear structures include 3 kinds of belly width and 2 types of knitting for each belly width, represented by A, B, C, AA, BB and CC respectively. Modified Tauti's law was used to designed beam trawl models. The full scale was 20, mesh size or twine diameter scale was 10. Based on the energy efficiency coefficient, vertical opening and resistance, the performance of different gear structure were compared. The result showed that: the performance of different gear structure was in the order of BB>CC>C>A>B> AA, but the difference was not obvious ($P>0.05$). Less total line area of net can effectively improve the vertical opening of the beam trawl and reduce the energy efficiency coefficient, especially under the high trawling speed. Sinker weight was significantly correlate with gear resistance and vertical opening, and not significantly correlate with energy efficiency coefficient. In order to keep good performance in vertical opening of test nets, heavier sinker were needed under higher trawling speed. According to the model test, sinker weight should not be less than 3.05 t at the trawling speed of 1.5 m/s for test nets; a power function was observed between net resistance and trawling speed, and the index ranged from 1.49 to 1.64. These conclusions can be used as reference for the performance optimization of *E. superba* beam trawl and promote the development of *E. superba* fishery.

Key words: *Euphausia superba*; beam trawl; performance; gear structure; sinker weight

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

Funding projects: Shandong Province Key R & D Program Project (2019JZZY010819); National Key R & D Program (2018YFC1406803); Funded Project for Fundamental Scientific Research Business Expenses of Chinese Academy of Fishery Sciences (2021TD03)