

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.140444

日韩小网目南极磷虾拖网性能对比分析

徐鹏翔¹, 许柳雄^{1,2,3}, 孟涛¹, 黄洪亮⁴, 张勋⁴, 周爱忠⁴, 李灵智⁴, 徐国栋⁴

1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306;
2. 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;
3. 上海海洋大学 上海市远洋渔业协同创新中心, 上海 201306;
4. 中国水产科学院 东海水产研究所, 上海 200090

摘要: 南极磷虾(*Euphausia superba*)是目前已知的地球上最大的单种生物资源之一, 其巨大的生物量和潜在的开发价值日益受到各国的关注。本研究以中国南极磷虾捕捞船队引进的日韩小网目南极磷虾拖网为原型网, 采用田内准则进行网具模型试验, 比较分析其网具性能。模型网大尺度比 λ 分别为 14(韩式网, Net B)和 16(日式网, Net A), 平均小尺度比约为 3, 速度比为 3。模型试验于东海水产研究所拖曳水池中进行。模型网试验速度分别为: 0.345 m/s、0.428 m/s、0.513 m/s、0.599 m/s、0.685 m/s。 L/S 取网具下袖端间距与下纲长度的比值, 范围取 0.4–0.55, 以 0.05 为间距分 4 档。模型试验记录各档拖速和 L/S 下模型网的阻力和网口高度数据。按照模型换算准则换算得到原型网相应拖速下的阻力、网口高度和能耗系数等指标, 分析网具的水动力性能。试验结果表明: (1)韩式磷虾拖网(192.60 m×110.50 m)网具阻力小于日式磷虾拖网(185.40 m×128.50 m); (2)日式磷虾拖网在扩张性(网口高度、扫海面积)、经济性(能耗系数)以及滤水性(水动力性能)方面优于韩式磷虾拖网; (3)两顶拖网在水槽模型试验时, 网口与网身水下运动时均可保持稳定, 网身呈流线型, 未出现凹凸现象; (4)日式南极磷虾拖网的阻力估算公式为:

$R_A = \frac{1}{2}\rho(0.24R_e^{-0.5})S_T V^2$; 韩式拖网为: $R_B = \frac{1}{2}\rho(0.177R_e^{-0.54})S_T V^2$; 综合两顶拖网得到的小网目南极磷虾拖网的阻力估算式为: $R = \frac{1}{2}\rho(0.209R_e^{-0.52})S_T V^2$ 。

关键词: 南极磷虾; 中层拖网; 模型试验; 网具性能

中图分类号: S97

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2015)04-0837-10

南极磷虾(*Euphausia superba*)是目前已知的地球上最大的单种生物资源之一^[1], 资源储量可达 $5\times 10^8\sim 10\times 10^8$ t^[2], 巨大的生物量和潜在的开发价值日益受到各国的关注^[3-6]。南极磷虾的商业性开发始于 20 世纪 60 年代, 前苏联率先试捕, 随后日本、波兰、德国和智利等国也相继开展了南极磷虾的开发、利用和研究^[7]。至今, 已有近 20 个国家和地区参与南极磷虾资源的开发与利用^[8]。1993–2007 年, 累计捕捞南极磷虾 1.58×10^6 t, 年

均产量 1.05×10^5 t^[9]。2012 年, 南极磷虾捕捞产量 1.61×10^5 t^[10]。

日本是参与南极磷虾开发较早的国家之一。1976–1977 年, 先后有“阿苏丸”和“吉野丸”两艘拖网加工船进行生产, 均使用八片式、双层网衣结构的中层拖网。之后, 网具结构由此前的八片式改为十片式, 网袖网目尺寸增加, 内网装配部位由以前的网身第二段变为身网第六段, 并以此为基础网型延用至今。

收稿日期: 2014-10-30; 修订日期: 2014-12-26。

基金项目: 南极海洋生物资源开发与利用项目(D-8003-09-0158); 上海市重点学科建设项目(S30702)。

作者简介: 徐鹏翔(1984–), 男, 博士研究生, 研究方向为鱼类行为、渔具渔法。E-mail: xupengxiang1984@qq.com

通信作者: 许柳雄, 教授, 博士生导师, 研究方向为远洋渔业资源开发、渔具渔法。E-mail: lxxu@shou.edu.cn

中国 2009 年开始参与南极磷虾资源的开发与利用。2013 年以前, 每年有 3~4 艘渔船进行南极磷虾生产^[11], 使用的拖网可分为 2 大类: 一为船舶引进时随船配置的小网目磷虾拖网, 二是根据捕鱼拖网改进设计的网具, 网具前部的网目较大(网口网目尺寸 20 m)。后者的优点是除用于磷虾生产外, 也可用于竹筴鱼作业, 但缺点是作业时网具水平扩张不理想, 单船年产量不到 2 000 t^[1]。

2010 年, 中国公司使用韩国引进的 192.60 m×110.50 m 小网目南极磷虾拖网。该网具与日本较早生产的网具结构类似, 主尺度相近, 内网装配位置相同。生产作业表明, 网具扩张效果不佳、产量不甚理想, 较少使用。

2012 年, 辽宁远洋渔业有限公司自日本引进专业南极磷虾捕捞加工船“福荣海”(原日本“福荣丸”), 并使用随船配置的 185.40 m×128.50 m 小网目南极磷虾专业拖网。2013 年投入生产, 当年捕捞磷虾 2.7×10^4 t, 大大增加了中国企业发展南极磷虾渔业的信心。也引起了国内渔业科学工作者对其渔具性能的研究兴趣。国内学者对南极磷虾生产网具的研究较少, 且研究主要针对中国基于捕鱼拖网改进的大网目拖网。例如, 周爱忠等^[12]、冯春雷等^[13]曾基于模型试验对中国非专业南极磷虾拖网的性能进行过研究, 而有关小网目南极磷虾拖网性能和特点的研究尚未见到报道。南极磷虾个体较小(体长不超过 65 mm), 游泳能力较低(游泳速度不超过 1 kn)^[14], 较大的网目尺寸未必能起到很好的拦截效果。因此, 本文选择主尺度为 185.40 m×128.50 m 的日式南极磷虾拖网(Net A)和 192.60 m×110.50 m 的韩式南极磷虾拖网(Net B)作为研究对象。两顶网具的主尺度差异较小, 网身均为双层网衣结构, 但内网装配位置

有所区别, 生产表明捕捞效果也存在较大的差异。作者通过模型试验, 对两顶拖网的扩张性能、滤水性能和经济性能进行对比分析, 寻找导致捕捞效果存在差异的原因, 为今后南极磷虾专业网具的优化、设计及国产化研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原型网 以日式南极磷虾拖网(Net A)和韩式南极磷虾拖网(Net B)为原型网, 两拖网分别为十片式和八片式结构, 均采用菱形网目, 网口网目尺寸均为 150 mm; 均采用双层网衣结构, 内层网衣分别由网身的第六段和第二段开始装配。网具的各主要参数见表 1。

1.1.2 试验仪器设备 试验在中国水产科学院东海水产研究所的静水槽内进行, 水槽主尺度为 90 m×6 m×3 m, 拖车的驱动电机功率为 7.5 kW×4, 拖速范围 0.1~4 m/s, 采用微机处理机调速系统, 匀速速度 $P \leq 1\%$; 力学传感器(KYOWA-LU-20KA)量程为 100 N, 非线性误差 0.4%F.S.C; 日产 FE-6300 型网位探深仪测定模型网上纲和下纲深度, 距离分辨率 30 mm。

1.1.3 模型网 模型网根据田内相似准则换算, 按《拖网模型制作方法(SC/T4014—1997)》制作^[15]。大尺度比 λ 分别为 16(Net A)和 14(Net B), 平均小尺度比约为 3。因模型网制作与试验条件限制, 采用虚拟小尺度比对速度比进行换算^[13]。本研究采用虚拟小尺度比为 9, 换算得速度比为 3。模型网示意图分别如图 1、图 2 所示。

1.2 试验方法

南极磷虾拖网速度一般在 2.5~3.5 kn, 因此, 取原型网拖速范围 2.0~4.0 kn, 间隔 0.5 kn 确定相

表 1 实物网的主要规格和结构

Tab. 1 Main specification and configuration of full scale trawls

规格 scale	L/m	C/m	L/C	S ₁ /m	S ₂ /m	F/kgf	G/kgf
Net A	128.50	185.40	0.69	41.80	41.80	2548	1566
Net B	110.50	192.60	0.56	42	42	1135	1044

注: C: 网口周长, L: 网具拉直总长, L/C: 长周比, S₁: 上纲长度, S₂: 下纲长度, F: 浮力, G: 沉力。

Notes: C: net mouth circumference, L: total stretched length, L/C: net length-circumference ratio, S₁: length of head line, S₂: length of ground rope, F: buoyancy, G: sinking force.

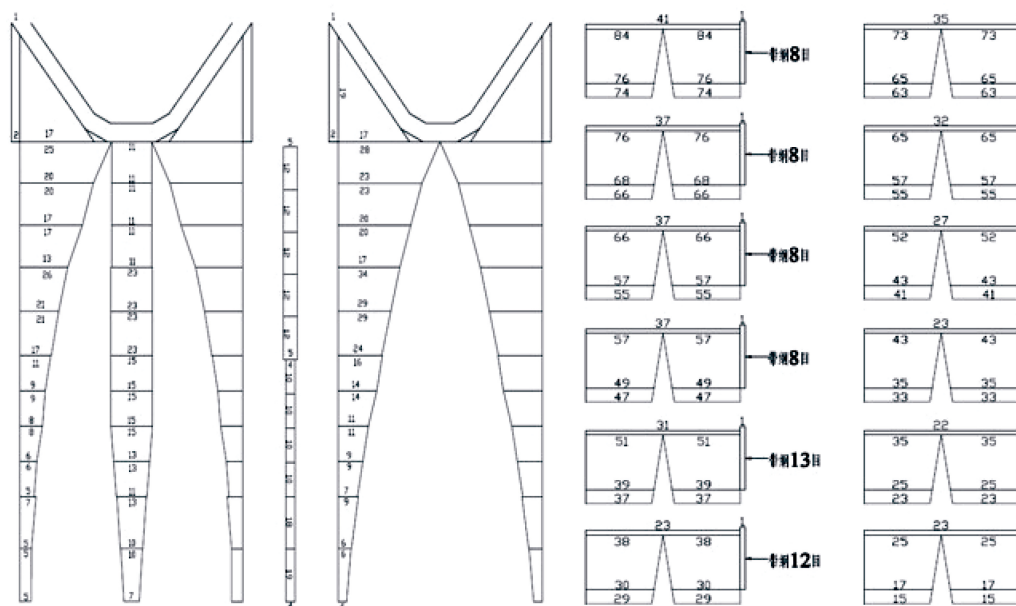


图 1 日式南极磷虾拖网(185.40 m×128.50 m)模型网网图

Fig. 1 Model net drawing of Net A (185.40 m×128.50 m)

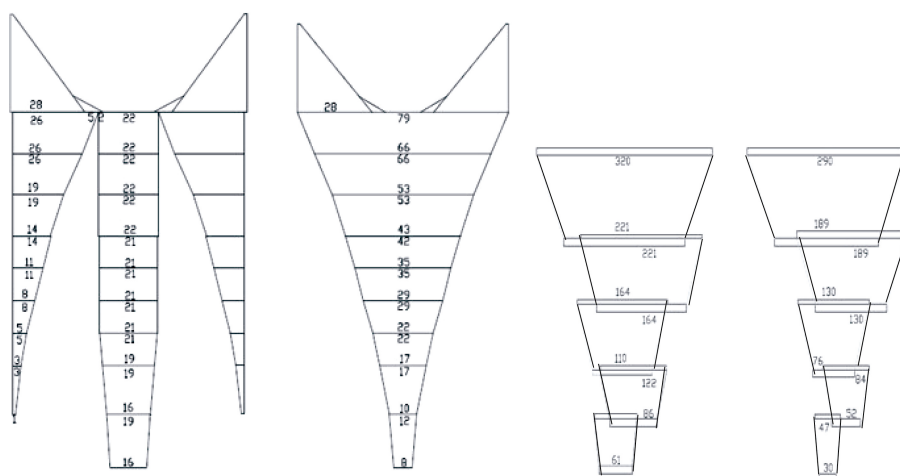


图 2 韩式南极磷虾拖网(192.60 m×110.50 m)模型网网图

Fig. 2 Model net drawing of Net B (192.60 m×110.50 m)

应的模型网试验拖速。根据速度比为 3, 相应的模型网试验拖速分别为: 0.345 m/s、0.428 m/s、0.513 m/s、0.599 m/s、0.685 m/s。L/S 取网具下袖端间距与下纲长度的比值, 范围取 0.4~0.55, 以 0.05 为间距, 分 4 档进行。记录各档拖速和 L/S 下模型网的阻力及网口高度数据。然后通过模型试验准则换算原型网的阻力、网口高度。使用摄像机记录网口及网身网形。

1.3 主要参数定义与计算

1.3.1 能耗系数和水动力性能 能耗系数(C_e)通常被定义为拖网渔具每过滤 10^4 m^3 海水所消耗的电

度数^[16]。参考能耗系数(C_e)定义, 将水动力性能(M)定义为拖网渔具消耗单位电度数所过滤的海水体积, $10^4 \text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。拖网水动力性能 M ^[18]可以表示为:

$$M = \frac{fHW}{R} \quad (1)$$

式中, M 为拖网水动力性能, $10^4 \text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$; R 为网具阻力(kN); H 为网口高度(m); W 为袖端间距(m); f 为网口形状系数(一般为 0.8)。其中, 分子部分可由扫海面积 S 表示。扫海面积 S 定义为, 以袖端水平扩张与网口高度的一半距离分别为长轴、短

轴所组成的椭圆形的面积。

因此, 根据能耗系数(C_e)的定义, 可以认为水动力性能 M 与能耗系数 C_e 呈倒数关系, 即:

$$M = \frac{1}{C_e} \quad (2)$$

1.3.2 网具冲角 根据圆锥网的相关理论^[17], 将网具看作椭圆锥体, 以网口高度为短轴, 袖端宽度为长轴与水流形成 2 个冲角, 通过长轴、短轴长度与网具长度换算网具的平均冲角。

1.4 阻力估算方程

拖网阻力的估算^[18]采用下式表示:

$$R = \frac{1}{2} \rho C_D S_T V^2 \quad (3)$$

式中, R 为网具阻力(kN); ρ 为流体密度(kg/m^3); S_T 为网具总线面积(m^2); V 为拖速(m/s)。

C_D 为网具的阻力系数, 可用下式表示:

$$C_D = k R_e^{-n} \quad (4)$$

式中, R_e 为雷诺数, 可表示为:

$$R_e = \frac{lV}{\nu} \quad (5)$$

式中, l 为网具拉直长度(m); ν 为运动黏性系数, $1.356 \times 10^{-6} (10^\circ\text{C})$ 。

1.5 试验数据处理

试验数据根据《拖网模型水池试验方法 (SC/T4011—1995)》^[19], 应用 Excel 2007 进行处理。每顶网实验数据中随机选取 4 组数据, 用于验证公式估算值的准确性。

2 结果与分析

2.1 拖速、 L/S 与网具阻力

拖速、 L/S 与网具阻力关系如图 3 所示。两顶网具的阻力均随拖速和 L/S 的增加而增加, L/S 对阻力无显著影响($P>0.05$), 而拖速对阻力有极显著影响($P<0.01$)。总体来看, 日式南极磷虾拖网 (Net A) 的网具阻力均明显高于韩式南极磷虾拖网 (Net B) ($P<0.01$)。从回归曲线关系式来看, 相同 L/S 条件下, 日式南极磷虾拖网的阻力增加速率大于韩式网具。相同拖速、不同 L/S 条件下, 韩式南极磷虾拖网网具阻力相差不大, 且随着拖速的增加, 阻力值逐渐接近。

2.2 拖速、 L/S 与网口高度

从拖网网口高度与拖速的关系(图 4)可以得到, 网口高度随拖速和 L/S 的增加而减小, L/S 对网口高度无显著影响($P>0.05$), 而拖速对网口高度有显著影响($P<0.05$)。总体来看, 日式南极磷虾拖网 (Net A) 的网口高度均大于韩式南极磷虾拖网 (Net B)。对于后者来说, 拖速 2 kn (1.028 m/s) 时, 各 L/S 组的网口高度比较接近; 但随着阻力的增大, 网口高度降低的趋势明显。 $L/S=0.55$ 时, 日式磷虾拖网网口高度下降明显, 较 $L/S=0.5$ 时的网口高度平均下降 11%。

2.3 拖速、 L/S 与扫海面积

扫海面积与袖端间距和网口高度有关, 扫海

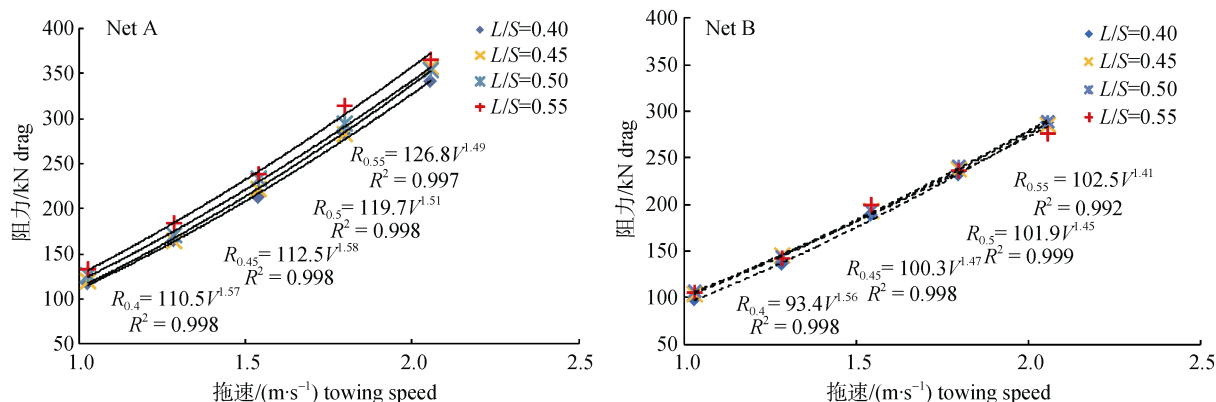
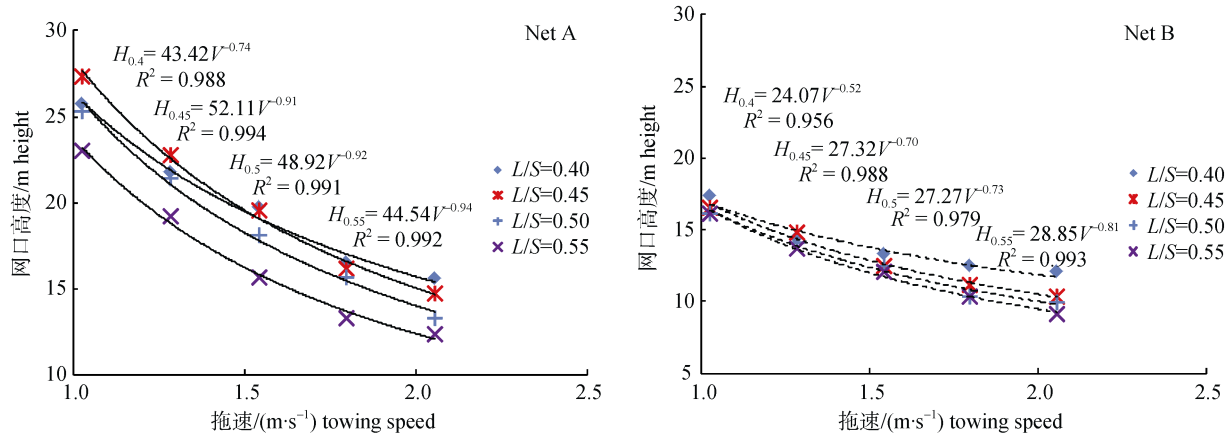


图 3 阻力与拖速、 L/S 的关系

Fig. 3 The relationship between towing speed, L/S and drag

图 4 网口高度与拖速、 L/S 关系Fig. 4 The relationship between towing speed, L/S and heights of net's mouth

面积与拖速的关系如图 5 所示。扫海面积随拖速的增加呈现减小的趋势, 而随 L/S 的增加而增加, 但 L/S 对扫海面积无显著影响($P>0.05$), 而拖速对扫海面积有显著影响($P<0.05$)。总体来看, 日式南极磷虾拖网的扫海面积大于韩式南极磷虾拖网。随拖速的增加, 不同 L/S 组之间的扫海面积的差异趋于减小。对于日式南极磷虾拖网(Net A)而言, L/S 为 0.4 时的扫海面积与其他 L/S 组有较大差异, 但随拖速的增加, 差异趋于缩小。对于韩式南极磷虾拖网(Net B)而言, 各 L/S 组之间扫海面积随拖速变化的趋势相对平均, 差异亦随拖速的增加趋于减小。

2.4 拖速、 L/S 与能耗系数(C_e)

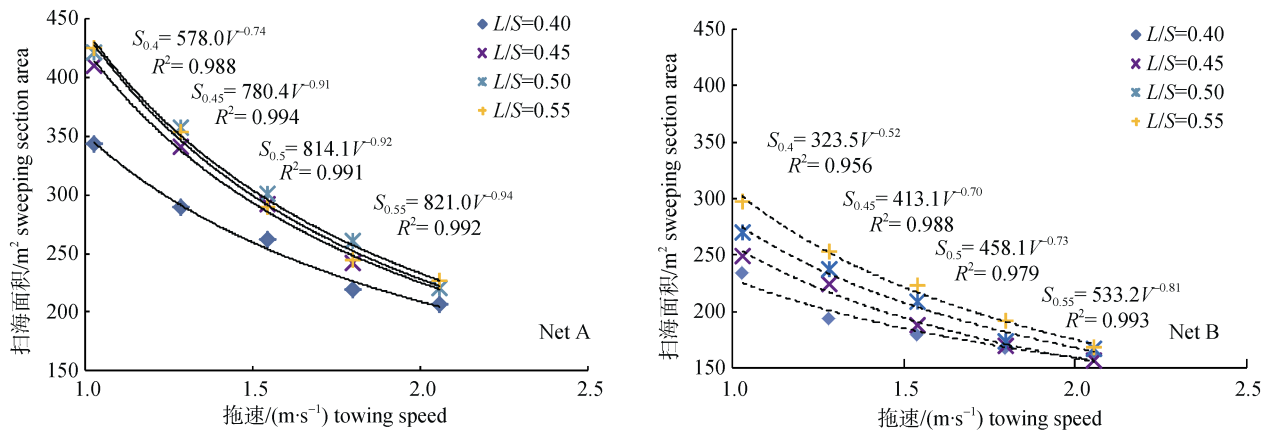
拖速相同时, C_e 随 L/S 的增加呈递减趋势(图 6);

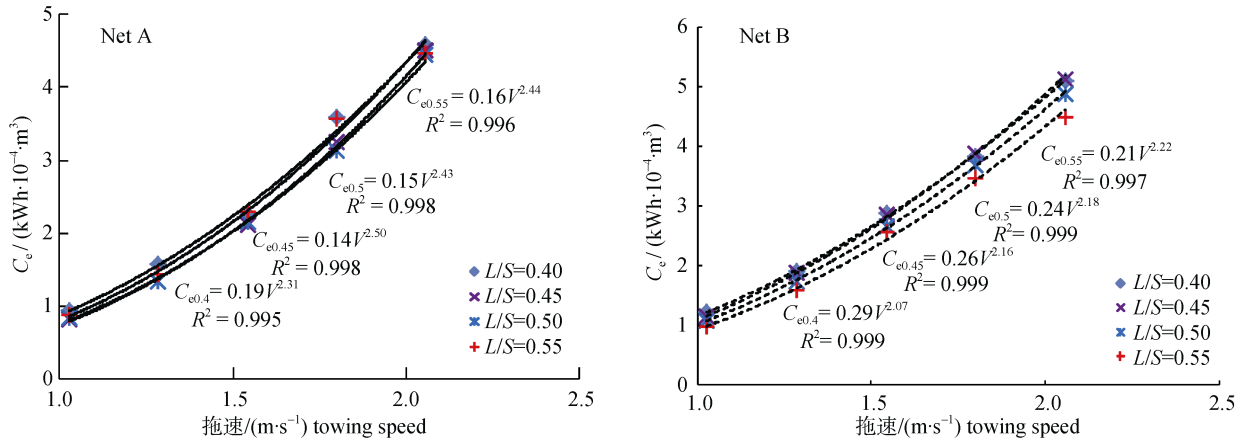
在相同 L/S 条件下, C_e 随拖速的增加呈增加趋势。因扫海面积随 L/S 的增加而增加, 故也可以认为, C_e 随扫海面积的增加呈递减趋势。总体来看, 日式南极磷虾拖网(Net A)的能耗系数(C_e)值小于韩式南极磷虾拖网(Net B)。

2.5 拖网阻力估算

根据两顶南极磷虾中层拖网网图, 将两顶网的参数分别带入公式(3)~(5), 可以得到日、韩南极磷虾拖网的 k 与 n 值分别为: $k_A=0.24$, $n_A=-0.5$; $k_B=0.177$, $n_B=-0.54$; 以及两网具平均 k 与 n 值为: $k=0.209$, $n=-0.52$ 。即小网目南极磷虾中层拖网的阻力估算公式分别表示为:

$$R_A = \frac{1}{2} \rho (0.24 R_e^{-0.5}) S_T V^2 \quad (6)$$

图 5 扫海面积与拖速、 L/S 的关系Fig. 5 The relationship between towing speed, L/S and sweeping section area

图 6 能耗系数与拖速、 L/S 的关系Fig. 6 The relationship between towing speed, L/S and power consumption coefficient

$$R_B = \frac{1}{2} \rho (0.177 R_e^{-0.54}) S_T V^2 \quad (7)$$

$$R = \frac{1}{2} \rho (0.209 R_e^{-0.52}) S_T V^2 \quad (8)$$

其中, R_A 为日式南极磷虾拖网阻力(kN); R_B 为韩式南极磷虾拖网阻力(kN); R 为综合上述两顶拖网后的小网目南极磷虾拖网阻力(kN)。

模型试验换算值与阻力公式估算值比较如图 7 所示。两顶网具的阻力估计值分别与其实验值比较接近, 但平均值有一定差异。由图 7 可以看出, 平均估算值与实验值之间的误差呈随拖速增加而增加的趋势。

2.6 拖速、 L/S 与网型

摄像观察的网口和网身形状表明(图 8), 网具进行匀速运动后, 网口形状呈规则的椭圆形并保持稳定。拖速增加, 网口张开高度迅速下降, 速度稳定后, 网口形状保持不变。网身网形保持流线型, 各段连接平滑, 没有出现凹、凸现象。

2.7 拖速、 L/S 与网具冲角

网具平均的冲角随拖速的增加而减小 ($P < 0.05$), 并且差异趋于减小。当拖速增加至 4 kn (2.056 m/s) 时, 两顶网具的平均冲角差异在 0.5° 之内; L/S 增加, 平均冲角亦增加 ($P > 0.05$)。总体来看, 日式南极磷虾拖网的平均冲角大于韩式南极磷虾拖网(图 9)。由于网具的平均冲角与网具的扫海面积有关, 因此两顶网具的平均冲角变化规律与扫海面积的变化规律较为相似。

3 讨论

3.1 网具阻力

根据网图计算, 日式南极磷虾拖网(Net A)的线面积为 964.51 m^2 , 韩式南极磷虾拖网(Net B)线面积为 1011.24 m^2 , 后者比前者大 46.79 m^2 。从网具线面积考虑, 较小线面积的网具阻力应相对较小。但从浮、沉力配备情况分析来看, 日式拖网配置的浮、沉力均超过韩式拖网 500 kgf。冯春雷等^[13]的研究表明, 南极磷虾拖网沉力的改变对网具阻力影响不大, 但是作者认为浮子和沉子产生的形状阻力不变的情况下, 浮、沉力的增加导致合力的增加, 使日式拖网网口高度(短轴)更优于韩式拖网。虽然随 L/S 的增加袖端水平扩张(长轴)增加网口高度降低, 但日式拖网网口高度的降低幅度小于韩式拖网, 加之两顶网具袖端水平扩张相差很小, 从而导致了日式拖网的扫海面积增加, 进而改变了网具前部的冲角。网具前部冲角的增大(图 9)导致网具阻力增加, 这可能是线面积相对较少的日式南极磷虾拖网的阻力反而超过韩式南极磷虾拖网的原因。图 3 表明, L/S 相同时, 日式南极磷虾拖网的阻力均高于韩式南极磷虾拖网。由此可以得出, 拖网的网线面积不是影响其阻力的唯一因素。此外, 模型网大尺度比差异和尺寸较小网目在手工编织过程产生的误差也可能对试验结果产生一定的影响。

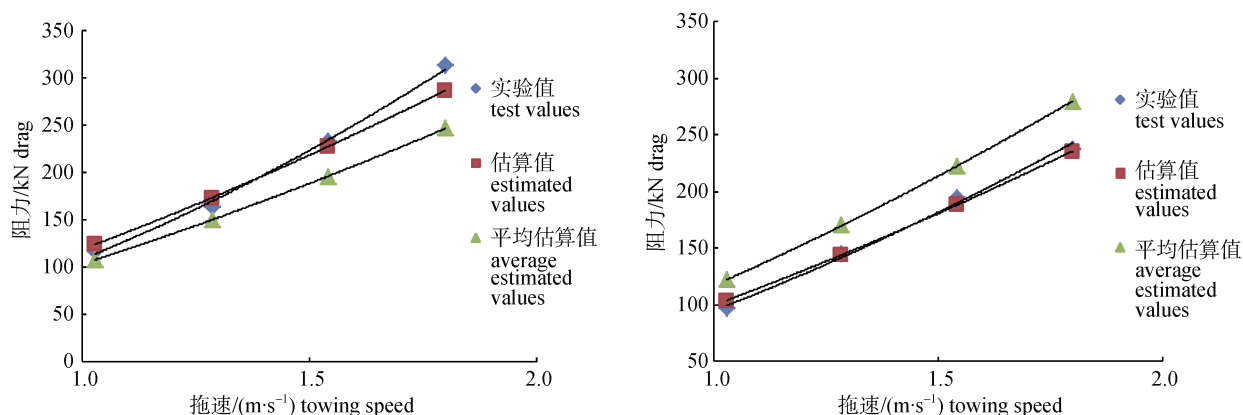


图7 阻力试验值与估算值比较

Fig. 7 Comparisons of test values and estimated values of the drag

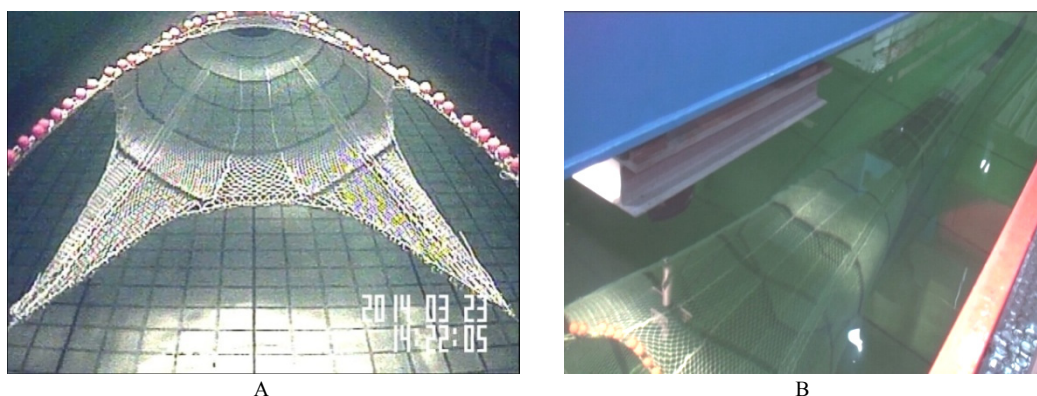
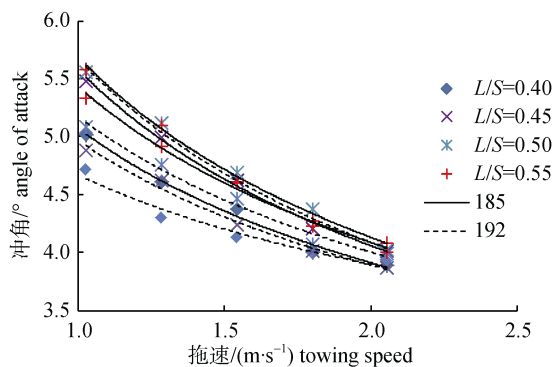


图8 网口(A)与网身(B)形状

Fig. 8 Shape of mouth (A) and body (B)

图9 平均冲角与拖速、 L/S 的关系Fig. 9 The relationship between towing speed, L/S and average angle of attack

冯春雷等^[13]认为, 增加沉力可提高网具的垂直扩张性能, 但鉴于浮沉力变化可通过改变网具的冲角而导致网具阻力的增加。再考虑生产中沉力的增加可能导致网位降低, 不利于捕捞表层虾

群。因此, 作者认为, 通过增加浮、沉力来增加网具网口垂直扩张的做法值得探究。

3.2 网口高度与扫海面积

除浮力和沉力的配备对网具网口高度造成影响外(表1, 图4), 内网的结构和安装位置也可能对网口的高度产生影响。对比图1和图2, 韩式南极磷虾拖网的内网位置靠前, 这样就增加了网口附近外网衣垂直方向的力; 再者, 由于韩式拖网每段内网对应两段外网, 使外衣的受力相对集中于网具更靠前的位置。基于以上两点理由, 作者认为韩式南极磷虾拖网的内网装配可能对网口的高度会造成一定的影响。

从图4和图5可以得到, L/S 对网口高度和扫海面积有一定的影响, 但不显著($P>0.05$)。增加 L/S 会造成网口高度的降低, 网具的扫海面积反

而增加。因此, 本文作者认为实际作业中, 拖速为 3 kn (1.542 m/s) 以下时, 通过增加 L/S 可使网口在相同拖速下过滤更多的海水。拖速在 3 kn (1.542 m/s) 以上时, 随着拖速的提高, 不同 L/S 之间扫海面积的差异明显减小, 通过调整 L/S 来增加网口过滤海水的效果就不甚理想。这也从另一个方面反映出网具在作业时的拖速不宜太高。

3.3 能耗系数与水动力性能

由图 6 可以得到, 日式南极磷虾拖网的能耗系数低于韩式南极磷虾拖网。虽然日式拖网的阻力高于韩式拖网(图 3), 但前者在扫海面积方面的优势(图 5), 在过滤同体积的海水情况下, 消耗的功率相对更少。根据公式(2), 网具的水动力性能与能耗系数成倒数关系, 表明日式南极磷虾拖网的水动力性能更佳。也意味着在消耗相同功率条件下, 日式南极磷虾拖网可以获得更好的渔获效果。即使日式拖网在快速性(阻力)方面略逊于韩式拖网, 但从其经济性(能耗系数)和水动力性能方面考虑, 作者认为日式南极磷虾拖网的综合性能仍优于韩式南极磷虾拖网。

3.4 渔船与网具的功率消耗

网具消耗功率可通过网具阻力与拖速的乘积求得^[20]。南极磷虾游泳速度较慢, 最快在 1 kn 左右^[12], 一般巡航速度在 0.04~0.4 kn^[21-23]。因此, 南极磷虾中层拖网的拖速不宜超过 3 kn, 一般控制在 2~2.5 kn。计算发现, 日式南极磷虾拖网消耗功率在 119~752 kW, 韩式南极磷虾拖网在 100~594 kW, 均远高于周爱忠等^[12]得出的结果。这也反映出增加网目尺寸对降低网具阻力的重要性。崔建章^[24]在研究中型单拖网渔船拖力与渔具系统匹配问题后认为, 在渔船拖速范围内, 有 18%~25%的额定功率可以转换为拖力(包括 8%的储备拖力), 即在生产过程中, 仅有 10%左右的额定功率可以用于网具的部分。使用日式和韩式南极磷虾拖网的渔船主机额定功率分别为 3 700 kW 和 3 824 kW, 在拖速为 3 kn 时, 日式拖网消耗功率的最小值与最大值分别为 326 kW 和 368 kW; 韩式拖网消耗的相应功率分别为 289 kW 和 307 kW。可见, 两顶网具在拖速为 3 kn 时消耗的最大功率

已接近渔船所能提供的拖力。因此, 从拖速对阻力的影响、 L/S 对网具滤水性能的影响(拖速为 3 kn 以下时)以及渔船功率消耗 3 个方面综合考虑, 中国现有双层网衣结构的小网目南极磷虾拖网生产作业的拖速不宜超过 3 kn, 并且建议在现有网具的基础上改进网具, 降低网具阻力。

3.5 南极磷虾拖网阻力估算

虽然从南极磷虾行为方面考虑, 小网目拖网更适合南极磷虾的生产捕捞。但与大网目南极磷虾中层拖网的试验结果^[13]相比, 其阻力较大。适当增加网目尺寸有利于减小阻力, 增加网具的水动力性能和经济性(即能耗系数)。从阻力估算与实验值的比较结果(图 7)来看, 两顶网各自的估算值与其模型试验实验值相差较小, 平均误差在 6%以下; 若采用平均值, 则误差平均误差有所增加, 平均误差均在 20%以下。可以通过海上实测值验证模型试验值的准确性, 从而对阻力估算公式进行修正。

有专家认为, 阻力的试验换算值与实测值的差异随大尺度比的增加而增加^[20]。国内其他学者研究大网目南极磷虾拖网性能均在东海水产研究所拖曳水槽进行网具模型试验, 本试验的原型网规格相对较小, 采用更小的大尺度比, 更有利于提高试验换算值的精度, 减小与海上实测值的误差。

参考文献:

- [1] Xie Y L. Status and trend of exploitation of Antarctic krill *Euphausia superba*[J]. Modern Fisheries Information, 2004, 19(4): 18-20.[谢营梁. 南极磷虾(*Euphausia superba*)开发利用的现状和趋势[J]. 现代渔业信息, 2004, 19(4): 18-20.]
- [2] Li X S, Zuo T, Zhao X Y, et al. Antarctic krill (*Euphausia superba*) fishery: recent fishing situations[J]. Shandong Fisheries, 2010, 27(1): 8-12.[李显森, 左涛, 赵宪勇, 等. 南极磷虾商业捕捞动态[J]. 齐鲁渔业, 2010, 27(1): 8-12.]
- [3] 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, 11(suppl.): 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, 11(Suppl.): 114-119.]
- [4] 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.]
- [5] Tang J Y, Shi G H. Management of Antarctic krill and its implications for China's distant water fisheries[J]. Resources Science, 2010, 32(1): 11–18.[唐建业, 石柱华. 南极磷虾渔业管理及其对中国的影响[J]. 资源科学, 2010, 32(1): 11–18.]
- [6] Zhu G P. Population biology of Antarctic krill *Euphausia superba*. I—age, growth and mortality[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(5): 862–868.[朱国平. 南极磷虾种群生物学研究进展 I—年龄、生长与死亡[J]. 水生生物学报, 2011, 35(5): 862–868.]
- [7] Guo N L, Chen X Z, Chen S X, et al. On the development of Antarctic krill fisheries in China[J]. Marine Fisheries, 1996, 18(2): 58–66.[郭南麟, 陈雪忠, 陈思行, 等. 发展中国南极磷虾渔业的探讨[J]. 海洋渔业, 1996, 18(2): 58–66.]
- [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] Li L N, Wang Q. Latest trend on Antarctic krill industry development[J]. Modern Fisheries Information, 2011, 26(12): 6–9.[李励年, 王茜. 南极磷虾产业发展最新动向[J]. 现代渔业信息, 2011, 26(12): 6–9.]
- [10] CCAMLR. CCAMLR 2013 Statistical Bulletin Volume 25, 2013. <http://www.ccamlr.org>.
- [11] 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.]
- [12] 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. 南极磷虾拖网的试验研究[J]. 现代渔业信息, 2011, 26(8): 6–9.]
- [13] 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.]
- [14] Murphy D W, Webster D R, Kawaguchi S, et al. Metachronal swimming in Antarctic krill: gait kinematics and system design[J]. Mar Biol, 2011, 158(11): 2541–2554.
- [15] SC/T4014—1995, Trawl Model Making Method[S]. Beijing: Standard Press of China, 1995.[SC/T4014—1995, 拖网模型制作方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.]
- [16] 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.]
- [17] Zhou Y Q. Mechanics of Fishing Gear[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001.[周应祺. 渔具力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.]
- [18] Hu F X, Matsuda K. Estimation of the Drag of Midwater Trawl Net[J]. Journal of the Tokyo University of Fisheries, 1991, 78(1): 19–25.[胡夫祥, 松田皎. 中層トロール網の抵抗の推定[J]. 東京水産大學研究報告, 1991, 78(1): 19–25.]
- [19] SC/T4014—1995, Trawl Model Pool-Test Method[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995. [SC/T4014—1995, 拖网模型水池试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.]
- [20] 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.]
- [21] Nicol S. Population structure of daytime surfaces swarms of the euphausiid *Meganctiphanes norvegica* in the Bay of Fundy[J]. Mar Ecol Prog Ser, 1984, 18: 241–251.
- [22] Hamner W M. Aspects of schooling in *Euphausia superba*[J]. J Crustac Biol, 1984, 4(Spec.No.1): 67–74.
- [23] O'Brien D P. Surface schooling behavior of the coastal krill *Nyctiphanes australis* (Crustacea: Euphausiacea) off Tasmania[J]. Mar Ecol Prog Ser, 1988, 42: 219–233.
- [24] Cui J Z. On matching towing power and gear system for medium stern trawler[J]. Journal of Fisheries of China, 1993, 17(4): 289–296.[崔建章. 中型单拖网渔船拖力与渔具系统匹配的研究[J]. 水产学报, 1993, 17(4): 289–296.]

Comparative analysis on the performance of Japan and South Korea Antarctic krill mid-water trawls with small mesh sizes

XU Pengxiang¹, XU Liuxiong^{1,2,3}, MENG Tao¹, HUANG Hongliang⁴, ZHANG Xun⁴, ZHOU Aizhong⁴, LI Lingzhi⁴, XU Guodong⁴

1. Collage of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;
3. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

Abstract: Antarctic krill (*Euphausia superba*) is one of the largest single biological resources on the earth, its large biomass and potential to support a large fishery has received increasing attentions of many countries. China began to be involved in the Antarctic krill fishery in 2009 when two large scale factory trawlers from Chinese fishing enterprises went down to the Southern Ocean for exploratory fishing. At the beginning, large mesh size trawl net redesigned based on Chilean Jack Mackerel trawl was used, and the fishing efficiency was not satisfactory due to poor match between the net and the trawl doors, consequently the catch was much lower than those of Norway, Korea and Japan fishing fleets. In 2010, Chinese fishing vessel introduced 192.60 m×110.50 m krill trawl, a small mesh size specialized krill trawl from Korea, and fishing operation indicated that catch was also not satisfactory because of the limitation of the opening of net mouth. This was changed in 2012 when Liaoning Province Dalian Ocean Fishery Group of Corporations introduced the specialized krill trawler “Fu Rong Hai” from Japan and used the Japanese krill trawl (185.40 m×128.50 m small mesh size krill trawl) on board the fishing vessel, and the catch increased greatly. This study analyzes the performance of the two krill trawl nets described above, i.e., Korean krill trawl (referred to as Net B) and the Japanese krill trawl (referred to as Net A) by carrying out model experiment based on the Tauti’s law. Large scale ratio λ of the model net was chosen as 14 and 16, respectively, for Nets A and B. The average small scale ratio of the model net was 3; the ratio of towing speed between the full scale and the model net was 3. Model experiments were conducted in the towing tank of the East China Sea Fisheries Research Institute. The towing speeds of the model net ranged from 0.345 m/s to 0.685 m/s with the interval 0.085m/s (equivalent to 2.0–4.0 kn with the interval of 0.5 kn for the full scale net). The ratio of the distance between two lower wing ends to lead line length (L/S) ranged from 0.4–0.55 with the interval of 0.05. During the model experiment, drag and net mouth height at varied towing speed and L/S level were recorded, and the drag, mouth height and energy consumption coefficient of the prototype net were recorded at corresponding towing speeds according to model conversion rules and the hydrodynamic performance of the net was analyzed. The results indicate: (1) the drag of Korean krill trawl (192.60 m×110.50 m, Net B) was lower than that of Japanese krill trawl (185.40 m×128.50 m, Net A); (2) Japanese krill trawl was superior to Korean net in opening performance (net mouth height, swept area), economical efficiency (energy consumption coefficient) and filtration (hydrodynamic performance); (3) the net mouth and net body of both model nets remained stable in the water during the tank tests, and body of nets was streamlined when towed in the tank; (4) the drag of full-scale trawls could be calculated as:

$$R_A = \frac{1}{2} \rho (0.24 R_e^{-0.5}) S_T V^2 \quad \text{for Japanese krill trawl (Net A)}, \quad R_B = \frac{1}{2} \rho (0.177 R_e^{-0.54}) S_T V^2 \quad \text{for Korean krill trawl (Net B)}$$

$$\text{and } R = \frac{1}{2} \rho (0.209 R_e^{-0.52}) S_T V^2 \quad \text{for the combination of the above two trawls.}$$

Key words: Antarctic krill; mid-water trawl; model experiment; trawl performance

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