

阿根廷滑柔鱼底拖网水动力性能研究

郝玉鑫¹, 万荣^{1,2,3}, 周成^{1,2}, 叶旭昌^{1,2}, 管青龙³, 张孝先⁴

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306

2. 国家远洋渔业工程技术研究中心/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 201306

3. 中国海洋大学, 山东青岛 266100

4. 山东好运通网具科技股份有限公司, 山东荣成 264200

摘要: 阿根廷滑柔鱼 (*Illex argentinus*) 为短生命周期的大洋性浅海种, 是西南大西洋公海渔场重要的经济头足类, 主要捕捞方式为鱿钓和底拖网。在阿根廷滑柔鱼底拖网作业过程中存在能耗高、船网匹配差等问题, 需要对其水动力性能进行研究。以六片式小网目阿根廷滑柔鱼单船底拖网为母型网 [200 m×113.8 m (84.6 m)], 按照田内准则 (大尺度比 $\lambda=30$, 小尺度比 $\lambda'=5$) 制作模型网, 通过模型试验探究了拖速、浮沉比、水平扩张比 (袖端间距与下纲长度比值) 对底拖网网口高度、网具阻力、能耗系数和功率消耗的影响。结果表明, 拖速为3 kn、水平扩张比 (L/S) 为0.54时, 浮沉比从0.6增至0.7, 网口高度从9.66 m增至14.1 m, 阻力从73.73 kN增至83.48 kN, 但随着拖速的增大, 浮沉比对网口高度和阻力的影响降低; 拖网网口扫海面积小于200 m²时, 能耗系数受水平扩张比影响较大, 反之, 受网口高度影响较大; 功率消耗随拖速和水平扩张比的增加而增大, 拖速超过4.0 kn时, 功率消耗占比船舶主机功率超过10%。

关键词: 阿根廷滑柔鱼; 底层拖网; 水动力性能; 模型试验

中图分类号: S 972.13

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Hydrodynamic performance of Argentine shortfin squid (*Illex argentinus*) bottom trawl

HAO Yuxin¹, WAN Rong^{1,2,3}, ZHOU Cheng^{1,2}, YE Xuchang^{1,2}, GUAN Qinglong³, ZHANG Xiaoxian⁴

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

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries/Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China

3. Ocean University of China, Qingdao 266100, China

4. Shandong Haoyuntong Nets Technology Co., Ltd., Rongcheng 264300, China

Abstract: *Illex argentinus*, inhabiting in shallow waters with a short life cycle, is an important economic cephalopod in the high seas fishing ground of the southwest Atlantic Ocean. Squid jigging and bottom trawling are the main fishing patterns to catch this species. However, there are some problems in bottom trawl, such as high energy consumption, and poor matching between vessel and trawl. Thus, it is necessary to understand the hydrodynamic performance of bottom trawl for *I. argentinus*. In this paper, we conducted a model experiment in the dynamic water tank to explore the effects of towing speed, horizontal spreading ratio, buoyancy weight ratio on the hydrodynamic performance of height of net opening, resistance, coefficient of energy consumption and power consumption. The model net was designed based on the small mesh six-panel single boat bottom trawl

收稿日期: 2021-11-17; 修回日期: 2022-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41806110)

作者简介: 郝玉鑫 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔具渔法学。E-mail: m190200580@st.shou.edu.cn

通信作者: 万荣 (1963—), 男, 教授, 博士, 从事设施渔业工程水动力学和渔业资源养护研究。E-mail: rongwan@shou.edu.cn

used for the main capture of *I. argentinus* [Main scale: 200 m×113.8 m (84.6 m)]. According to the Tauti's Law, the model experiment was scaled with the large scale ratio of 1 : 30 and the small scale ratio of 1 : 5. When the towing speed V was 3 kn and the horizontal spreading ratio L/S was 0.54, the buoyancy weight ratio increased from 0.6 to 0.7, the height of the net opening increased from 9.66 m to 14.1 m, and the resistance increased from 73.73 kN to 83.48 kN. However, with the increase of towing speed, the influence of the buoyancy weight ratio on the height of the net opening and resistance decreased. When the sweeping area of trawl opening was less than 200 m², the energy consumption coefficient was greatly affected by the horizontal expansion ratio, on the contrary, it was greatly affected by the height of trawl opening. The power consumption increased with towing speed and horizontal spreading ratio. It accounted for more than 10% of main engine power for vessel when the towing speed was more than 4 kn.

Keywords: *Illex argentinus*; Bottom trawl; Hydrodynamic performance; Model experiment

阿根廷滑柔鱼 (*Illex argentinus*) 属枪形目、柔鱼科、滑柔鱼属, 为大洋性浅海种, 生命周期短, 基本为单一世代^[1]。种群广泛分布在西南大西洋 22°S—54°S, 栖息于水深 70~280 m、温度为 4~15 °C 的大陆架及大陆坡海域。高产区位于 42°S—49°S 的西南大西洋公海渔场^[2], 最高年产量可超过 10⁶ t, 但产量年际间波动较大^[3]。阿根廷滑柔鱼作为西南大西洋公海渔场重要的头足类资源, 提高其渔获量对提升经济效益具有重要意义^[4]。捕捞阿根廷滑柔鱼主要有鱿钓和底拖网两种方式, 相较于鱿钓作业, 底拖网作业受渔场风浪、流速流向复杂多变的环境条件影响较小, 根据鱼探仪图像推测鱼群中心位置, 能进行瞄准捕捞^[2]。目前我国在西南大西洋公海渔场捕捞阿根廷滑柔鱼使用的韩国小网目底拖网, 存在船网匹配差、拖网阻力较大等问题, 导致作业能耗增加、渔获产量下降, 因此有必要通过改进网具作业参数, 从而改善渔具性能, 以提升船网匹配性, 提高捕捞效率^[2]。

底拖网的渔具性能主要包括快速性、扩张性、经济性、水动力性能等^[5], 影响底拖网渔具性能的因素较多, 主要包括拖速、水平扩张比(袖端间距与下纲长度的比值, L/S)、浮沉比、配纲长度^[6]等作业参数, 以及网目尺寸与结构^[7]、网袖结构^[8]、侧网宽度^[9]、网身长度^[10]、网囊剪裁斜率^[11]等网具结构参数。诸多研究已经应用模型试验的方法探究了拖网结构优化和作业参数的调整, 如网袖结构对拖网性能的影响^[12]、浮沉比配备对网口高度的影响^[13]以及作业参数对拖网水动力性能的影响^[14]等。随着计算机技术发展, 基于数值模拟的方法在解析拖网水动力性能^[15]等方面也获得了较为广泛的应用。除此之外, 海上试验是最为直接的观测方法, 诸多学者应用海上实测方法探究了作业参数对

捕捞效率的影响^[16]和拖网作业中网位控制^[6]等。与此同时, 因可操作性、可视化强的特点, 模型试验在底拖网研究中也广泛应用。

作为近年来新引进的阿根廷滑柔鱼底拖网, 目前尚缺乏网具水动力性能方面的相关研究, 因此, 本文以连海渔业公司使用的主尺度为 200 m×113.8 m (84.6 m) 六片式小网目底拖网为母型网, 采用模型试验方法, 通过改变拖速、浮沉比配备、 L/S 3 个工况, 探究网口高度、网具阻力、能耗系数和功率消耗的变化规律, 探讨提升网口高度和船网匹配性、降低网具阻力和能耗系数的方法, 以期为高效节能型头足类拖网设计提供科学依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实物网与模型网

连海渔业公司在西南大西洋公海渔场捕捞阿根廷滑柔鱼, 作业方式为单船底拖网, 作业船长 58 m, 主机功率 2 350 kW, 总吨位 819 t, 使用网具为韩国引进的六片式小网目底拖网(图 1), 该网具网身长度为 113.8 m, 网口周径为 200 m, 网目形状为菱形, 网口网目尺寸 ($2a$) 为 250 mm, 网衣材料为聚乙烯 (PE), 网具主要参数为网具总长 113.8 m, 网口周径 200 m, 网身长度与网口周径比值 0.569, 上纲长度 84.6 m, 下纲长度 100.3 m, 浮力 6.47 kN, 沉力 10.78 kN。

本研究依据田内准则以及《拖网模型制作方法》(SC/T 4011—1997) 设计制作模型网, 参考动水槽试验段尺寸选取大尺度比 (λ) 为 30, 小尺度比 (λ') 为 5, 模型速度比 (λ_v) 为 $\sqrt{5}$, 模型网网图见图 2, 模型网网身长度为 3.79 m, 网口周径为 6.67 m, 网口网目尺寸 ($2a$) 为 50 mm, 模型网制作材料选择与实物网一致的聚乙烯 (PE) 网线。

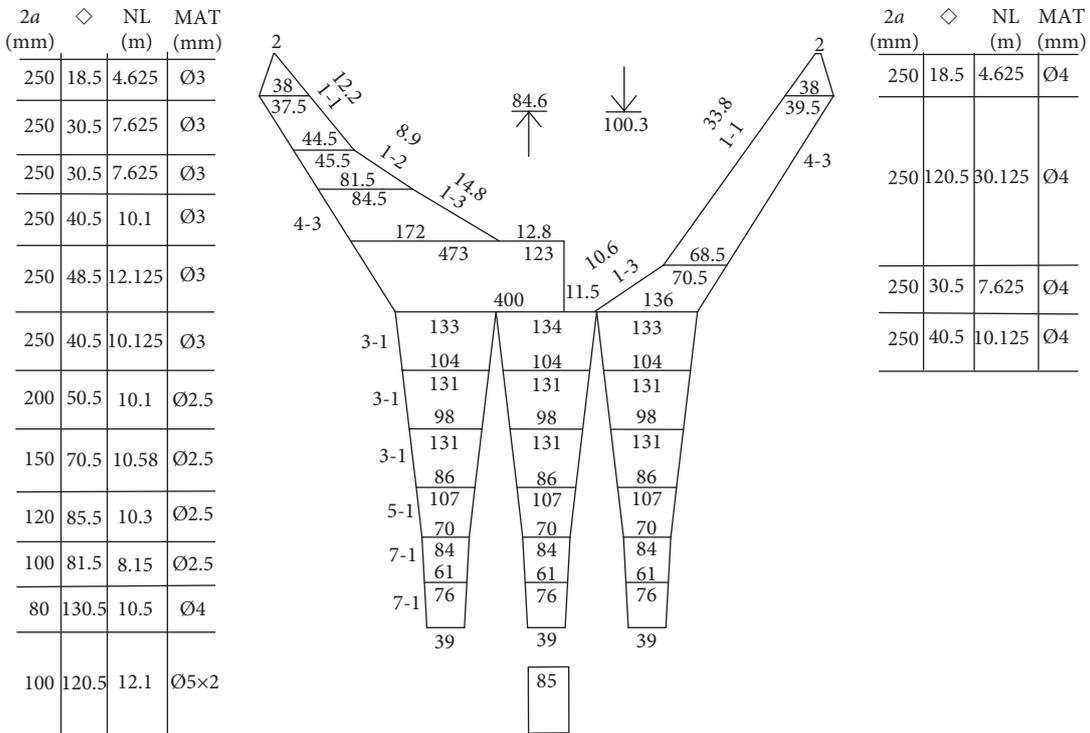


图1 阿根廷滑柔鱼底拖网网图

Fig. 1 Net drawing of *I. argentines* bottom trawl

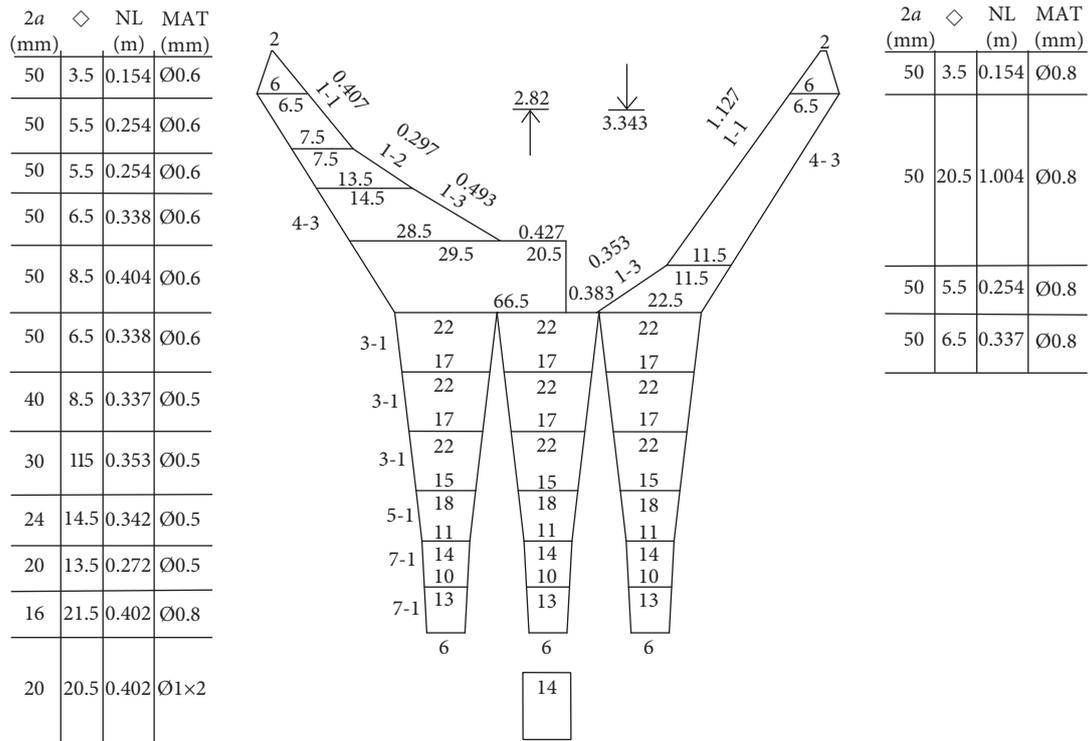


图2 阿根廷滑柔鱼模型网网图

Fig. 2 Net drawing of *I. argentines* model trawl

1.2 模型试验设备与方法

模型试验在上海海洋大学立式循环动水槽中进行，试验水槽测试段主尺度为长 15 m×宽 3.5 m×深 2.3 m，试验水深为 2.0 m。水槽设侧面(长 15 m、

宽 2 m) 和底部(长 6 m、宽 3.3 m) 玻璃观测窗，方便观察试验现象和测试数据。水槽上设移动小车两部，可拖曳升降装置和控制器来实现试验前布设与试验中网位、水平扩张等调节。试验中由控制系统

调整轴流泵转数实现水流速度连续调节, 流速可调范围为 $0 \sim 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 流速控制精度为 1%; 使用 LC-FW-200 型传感器测量网具阻力, 量程为 $0 \sim 20 \text{ N}$, 灵敏度为 $1.3517 \text{ mv}\cdot\text{v}^{-1}$ 。

根据 SC/T 4011—1995《拖网模型水池试验方法》进行模型试验, 试验中模型网的任何部分与池壁的距离不小于 0.15 m , 与水面距离不小于 0.3 m 。单船底拖网水平扩张由网板实现, 但受水槽尺寸限制, 本试验模拟至空纲末端部分, 原网上空纲等长为 45 m , 对应模型网上空纲长度为 1.5 m , 水槽试验布设见图 3, 试验中将测力传感器布设于牵引杆上, 通过改变两牵引杆间距实现水平扩张调整。网口高度通过侧面观测窗观察, 利用带有刻度的竖杆通过小型望远镜分别记录浮子纲中点深度和沉子纲中点深度, 两者差值即为网口高度。

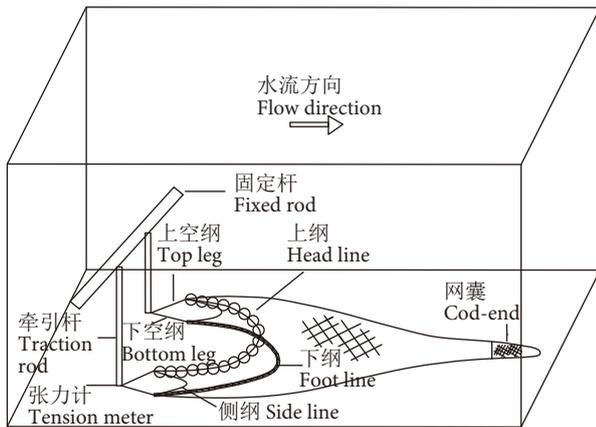


图3 模型试验水槽示意图

Fig. 3 Schematic diagram of water tank in model experiment

实际生产拖速范围为 $3 \sim 5 \text{ kn}$, 以 0.5 kn 为间隔, 设置 5 组拖速, 根据田内准则, 模型试验水流速度梯度为 1.34 、 1.57 、 1.79 、 2.01 和 2.24 kn ; L/S 设置 3 个水平, 分别为 0.46 、 0.50 和 0.54 ; 通过固定沉力, 改变浮力方式, 设置浮沉比为 2 个水平, 分别为 0.6 和 0.7 , 对应浮力为 1.51 和 1.76 N 。

1.3 网具性能评价指标

1.3.1 网口高度

网口高度是评价拖网扩张性能的重要指标, 适当增大网口高度有利于扩大扫海面积, 提高捕捞效率。实物网网口高度换算、袖端间距、扫海面积^[17]计算方法如下:

$$H = H' \cdot \lambda \quad (1)$$

式中: H 为实物网的网口高度 (m); H' 为模型网的网口高度 (m); λ 为大尺度比。

$$L = L' \cdot \lambda \quad (2)$$

式中: L 为实物网的袖端间距 (m); L' 为模型网的袖端间距 (m); λ 为大尺度比。

$$S = f \cdot H \cdot L \quad (3)$$

式中: S 为拖网网口的扫海面积 (m^2); f 为实物网网口的形状系数 (这里取 0.8); H 为实物网在该拖速下的网口高度 (m); L 为实物网的袖端间距 (m)。

1.3.2 网具阻力

网具阻力是评价拖网水动力性能的重要指标之一。根据减少渔具模型试验误差的方法^[18], 引入阻力修正系数 (K_f), 其值等于理论计算模型的线面积与实际制作模型线面积之比。实物网阻力 (F) 与模型网阻力 (F') 的力学比例关系为:

$$F = F' \cdot \lambda^2 \cdot \lambda_v \cdot K_f \quad (4)$$

式中: F 为实物网在某拖速下的计算阻力 (kN); F' 为模型网在某拖速下的测定阻力 (kN); λ 为模型大尺度比; λ_v 为模型速度比; K_f 为阻力修正系数, 本试验中为 0.9513 。

1.3.3 能耗系数

能耗系数 (网具滤过一定单位体积的水体所消耗的能量) 能较好地反映拖网的水动力性能, 也是评价拖网经济性能的重要指标, 能耗系数越低则说明网具的经济性能越好。能耗系数^[17]的计算公式为:

$$C_e = 3.472 \cdot F \cdot (H \cdot L)^{-1} \quad (5)$$

式中: C_e 为实物网在某设定拖速下的能耗系数 ($10^{-4} \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$); F 为实物网在该拖速下的计算阻力 (kN); H 为实物网在该拖速下的网口高度 (m); L 为实物网的袖端间距 (m)。

1.3.4 功率消耗

功率消耗影响船网匹配效果的好坏, 是评价船网匹配性的重要指标。实物网功率消耗计算公式为:

$$P = F \cdot V \quad (6)$$

式中: P 为实物网在某设定拖速下的功率消耗 (kW); F 为实物网在该拖速下的计算阻力 (kN); V 为拖速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

2 结果

2.1 网口高度

网口高度在不同拖速下的变化见图 4, 网口高度随浮沉比的增大而增大, 随拖速和 L/S 的增大而减小。在同一 L/S 下, 网口高度随浮沉比的增大而增大, 浮沉比为 0.6 和 0.7 试验组网口高度差随拖速的增大而减小。拖速小于 4 kn 时, 浮沉比为

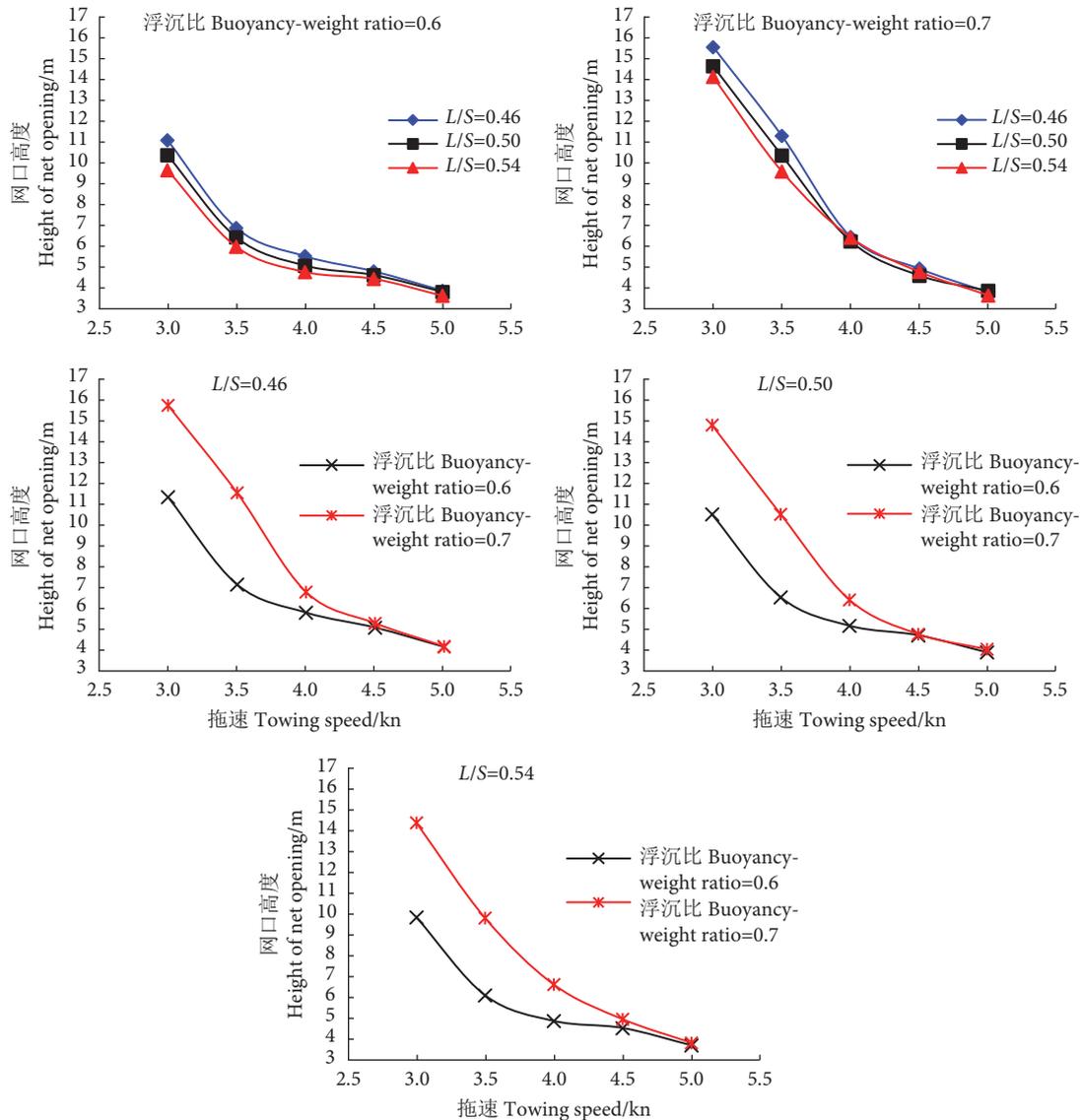


图4 原网网口高度和拖速的关系图

Fig. 4 Relationship between height of real net opening and towing speed

0.7 试验组网口高度明显优于浮沉比 0.6 试验组, 当拖速等于 4 kn, L/S 为 0.46、0.50 和 0.54 对应的两组浮沉比网口高度差分别为 0.99、1.23 和 1.71 m; 拖速增大至 4.5 kn 时, 浮沉比 0.6 和 0.7 试验组间网口高度差较小。在同一浮沉比下, L/S 为 0.46、0.50 和 0.54 的 3 组试验间网口高度差在拖速小于 4 kn 时较大, 而拖速大于 4 kn 时则较小。浮沉比为 0.7、拖速为 3 kn 时, L/S 为 0.46、0.50 和 0.54 对应原网具网口高度分别为 15.51、14.61 和 14.1 m; 而拖速为 5 kn 时, L/S 为 0.46、0.50 和 0.54 对应原网具网口高度分别为 3.99、3.93 和 3.78 m。

2.2 网具阻力

网具阻力在不同拖速下的变化情况见图 5, 网具被模拟部分阻力随着拖速、 L/S 和浮沉比的增大

而增大。在同一 L/S 下, 当拖速小于 4 kn 时, 浮沉比 0.6 和 0.7 试验组网具阻力差随拖速的增大而减小, 两试验组阻力的最大差约 13 kN; 而当拖速增大时, 浮沉比 0.6 和 0.7 试验组间阻力差变化不明显。在浮沉比为 0.6 时, 不同 L/S 试验组间阻力差随拖速增大呈现先减小后增大的波动变化趋势, 当拖速为 4.5 kn 时, L/S 为 0.46、0.50 和 0.54 对应的原网阻力分别为 110.57、114.99 和 118.53 kN; 而浮沉比增大至 0.7 时, 不同 L/S 试验组间阻力差变化为在拖速小于 4 kn 时较小, 在拖速大于 4 kn 时较大, 当拖速为 4.5 kn 时, L/S 为 0.46、0.50 和 0.54 对应的原网阻力分别为 109.64、116.65 和 124.63 kN。

2.3 能耗系数

能耗系数在不同拖速下变化见图 6。能耗系数

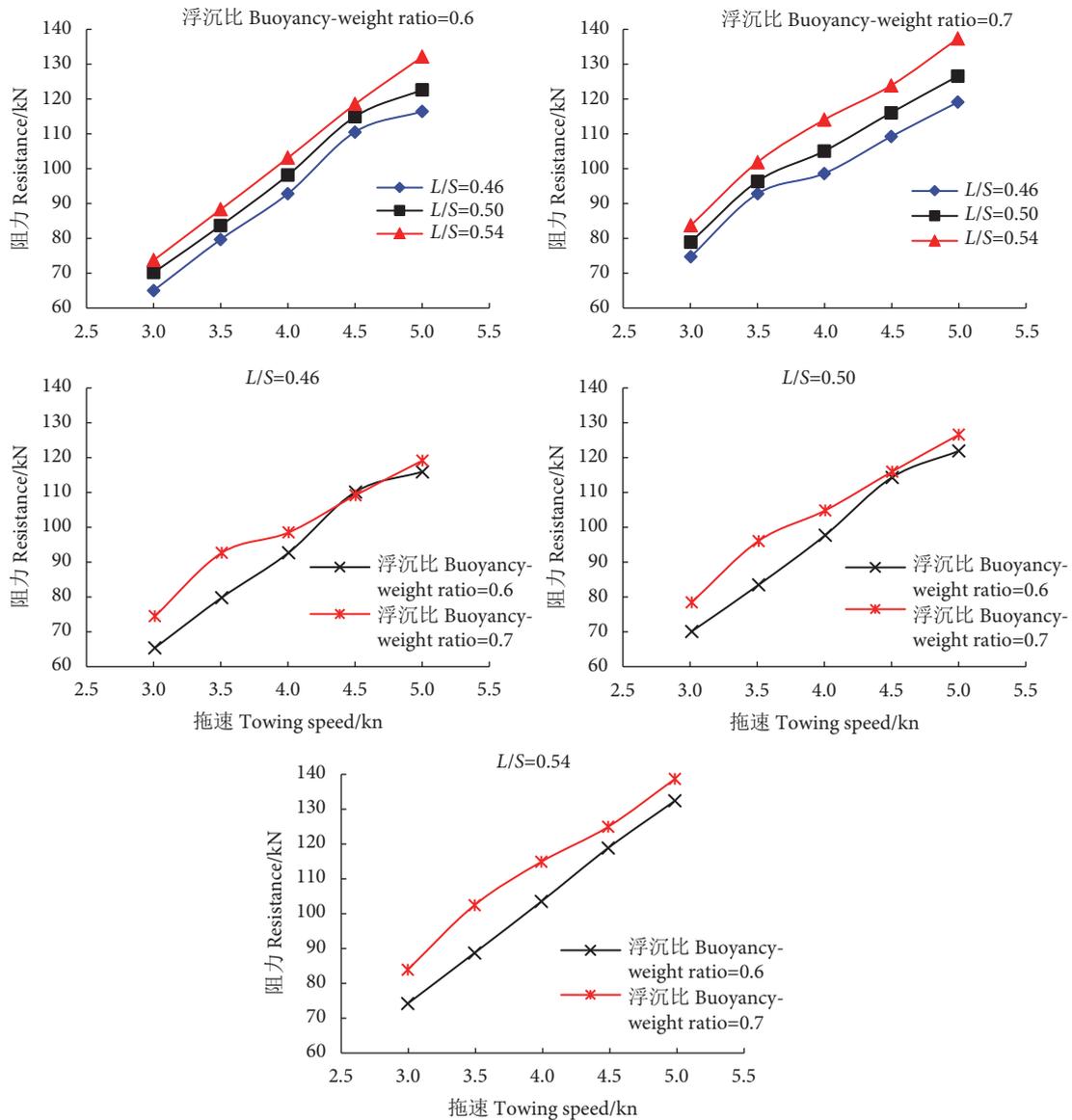


图5 原网阻力和拖速的关系图

Fig. 5 Relationship between resistance of real net and towing speed

随拖速的增大而增大, 随浮沉比的增大而减小。同一 L/S 下, 拖速小于 4 kn 时浮沉比 0.7 试验组的 C_e 低于 0.6 试验组, 当拖速为 4 kn 时, L/S 为 0.46、0.50 和 0.54 对应的两组浮沉比能耗系数差分别为 0.122 、 0.181 和 $0.249 \times 10^{-4} \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$; 拖速大于 4 kn 时浮沉比 0.6 和 0.7 试验组对应的 C_e 则较接近, 而当拖速等于 5 kn 时, 浮沉比 0.7 试验组的 C_e 高于浮沉比 0.6 试验组, 但差值较小。同一浮沉比下, 能耗系数受 L/S 改变影响并不明显。以原网浮沉比 0.6 为例, 能耗系数随扫海面积的增大而减小(图 7)。在相同扫海面积下, L/S 越大, 能耗系数则越高, 且随着扫海面积的增大, 能耗系数组间差变小。

2.4 功率消耗

底拖网作业的功率消耗来源于网具本身及其属

具部分。本试验中模拟至网具空纲末端, 试验结果代表被模拟部分功率消耗。网具功率消耗随着拖速、 L/S 和浮沉比的增大而增大(图 8)。同一 L/S 下, 浮沉比 0.6 和 0.7 试验组间的功率消耗差随拖速的增大而减小。在同一浮沉比下, L/S 为 0.46、0.50 和 0.54 的 3 组试验功率消耗差随拖速和 L/S 的增大而增大。浮沉比为 0.7、拖速为 5 kn 时, L/S 为 0.46、0.50 和 0.54 对应的功率消耗分别为 308.07、327.73 和 356.06 kW。

3 讨论

3.1 网口高度优化

阿根廷滑柔鱼具有昼夜垂直移动的特点, 白天多栖息于近底层, 夜晚上浮至表层附近^[19]。西南

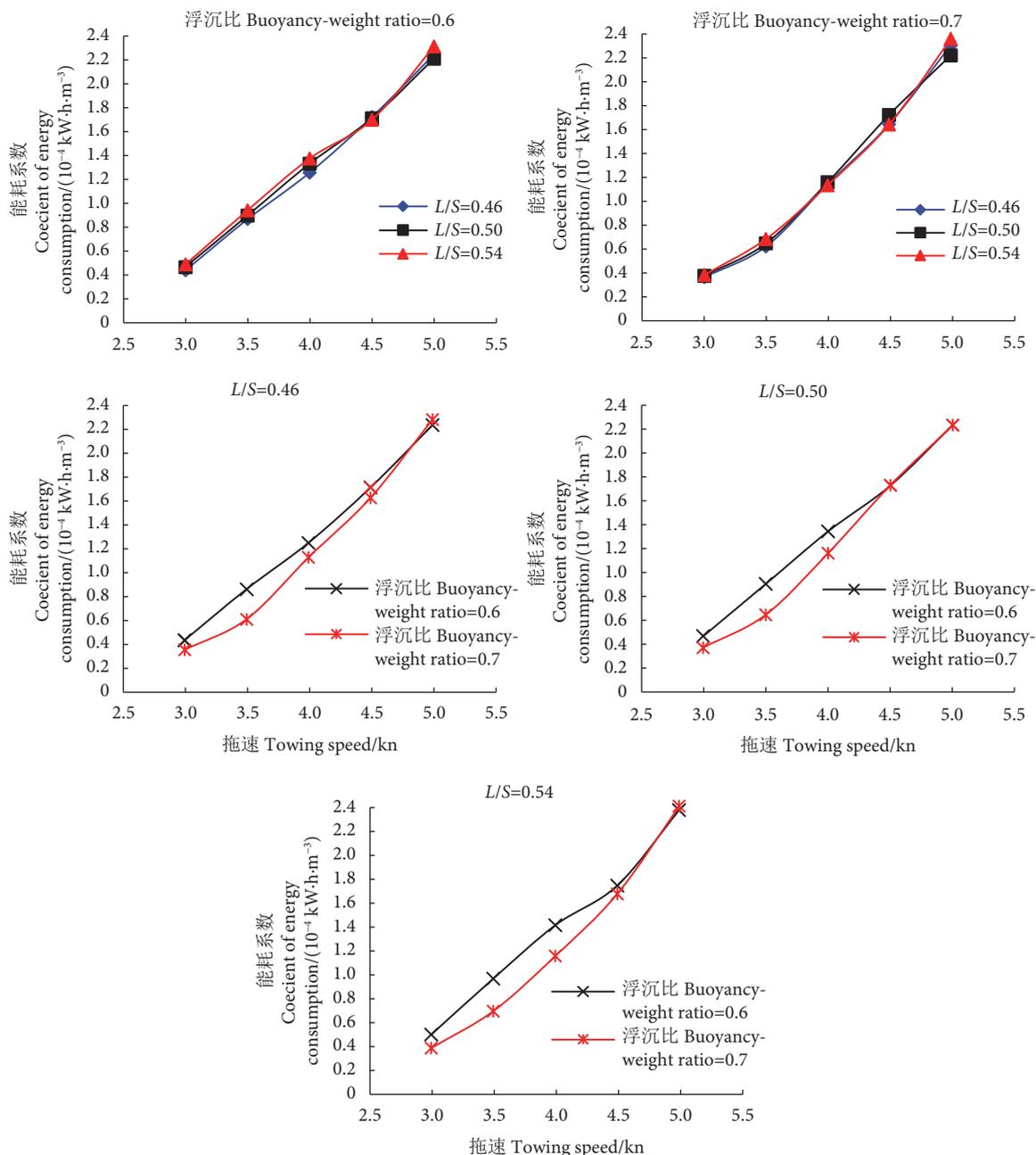


图6 能耗系数与拖速关系图

Fig. 6 Relationship between coefficient of energy consumption and towing speed

大西洋公海渔场阿根廷滑柔鱼鱼群分布特征呈“片状堆”^[20]，以昼夜垂直移动或集群鱼类为捕捞对象时，网口高度对于捕捞效果起决定作用，应尽量不损失网具的垂直扩张^[21-22]。根据以往研究，增加上纲浮力是常用的网口高度提升方法之一^[21-22]。拖速为 3 kn 时，六片式底拖网垂直扩张系数（网口高度与网口周径的比值， Ch ）大于 9%，说明拖网具有较好的垂直扩张性能^[23]，本试验中除拖速为 5 kn 的试验组外，其余试验组 Ch 均大于 9%，说明本网具垂直扩张性能较优。目前国内关于改变网具浮沉比从而优化网口高度的研究相对较少，一般

情况下，网口高度随浮沉比增大而增大^[24]，本研究中当浮沉比增大至 0.7 时，发现在拖速小于 4 kn 时不同 L/S 试验组间网口高度差较大，而拖速大于 4 kn 时高度差则较小，可能是由于在拖速小于 4 kn 时浮力对网口高度提升影响较大，而拖速大于 4 kn 时拖速对网口高度影响较大。在同一浮沉比下，拖速大于 4 kn 时不同 L/S 试验组间网口高度接近，表明不同的 L/S 不会对网口高度产生明显影响。此外，通过增加浮子纲长度、调小网板冲角的方法也可以提升网具的垂直扩张^[25]，但其影响程度的量化分析有待进一步探究。

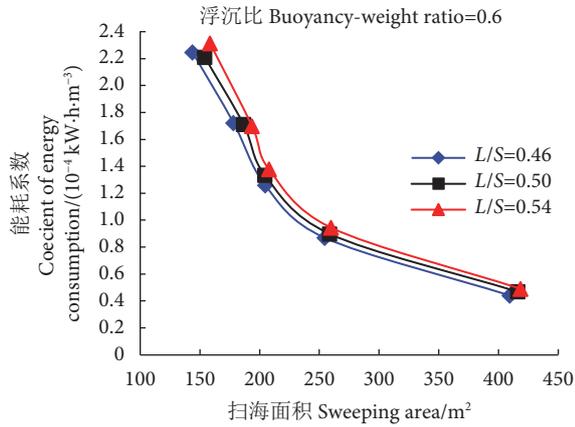


图7 能耗系数与扫海面积关系图

Fig. 7 Relationship between coefficient of energy consumption and sweeping area

3.2 阻力与能耗系数

本试验模拟部分在生产作业中的阻力包括水阻力和摩擦阻力两部分, 本文仅探讨水阻力部分。水阻力主要与迎风面积呈正相关, 拖速小于 4 kn 时, 增大浮沉比后网口提升明显, 网具迎风面积增大, 网具阻力增量较大, 拖速为 3.5 kn、 L/S 为 0.46 时网具阻力最大增量为 13.11 kN 时, 网口高度增量为 4.41 m; 而拖速大于 4 kn 时网口高度变化不明显, 网具阻力增量较小。同一浮沉比下, 在拖速小于 4 kn 时不同 L/S 试验组间网具阻力变化不明显, 而拖速大于 4 kn 时, 变化差随拖速增大而增大, 表明阻力在拖速大于 4 kn 时受 L/S

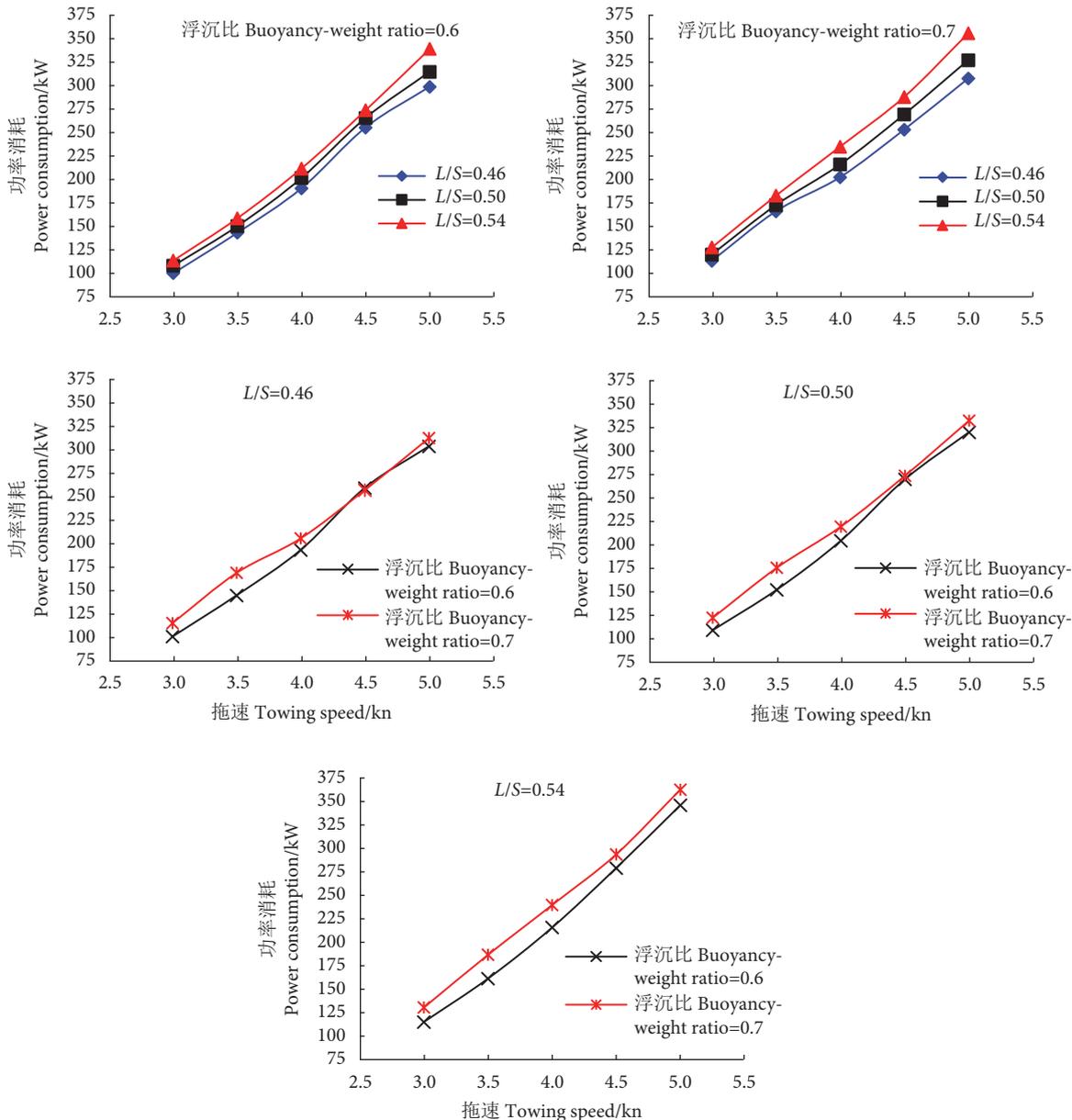


图8 功率与拖速关系图

Fig. 8 Relationship between power consumption and towing speed

影响较大。因此,在拖速大于 4 kn 作业情况下,应选择合适的水平扩张比,在保持网口高度的同时减小网具阻力,降低能耗。此外,可以适当增大网目尺寸,减少网具阻力以降低能耗,提升船网匹配性。阿根廷滑柔鱼个体较小(一般体长为 15~34 cm,体质量为 400 g,最大 1 000 g)且有垂直游动、受外部刺激反应大的特点^[26],因此综合捕捞对象生物学特征和移动速度快的特点,建议网口网目尺寸可适当放大,但不宜过大。

底拖网属于过滤性渔具,通过滤水留下捕捞对象而消耗一定能量,因此能耗系数可以用来评价拖网经济性能^[27]。通过水槽试验发现能耗系数受浮沉比的影响不明显,其主要受扫海面积影响,即网口垂直扩张与水平扩张的影响。本研究表明随着扫海面积的增大能耗系数会明显减小,因此扩大扫海面积对降低阻力、提高捕捞效率有较大帮助。由图 7 中能耗系数的变化趋势可见能耗系数在扫海面积小于 200 m² 时下降较快,且不同 L/S 试验组间差异较大,因此可认为在扫海面积较小时,水平扩张对能耗系数的影响更大,反之在扫海面积大于 200 m²,不同 L/S 试验组能耗系数变化较小,则说明网口高度会对能耗系数产生更大的影响,因此,通过调整网口高度对降低能耗更有意义。

3.3 船网匹配

渔具与渔船的匹配是渔船分配给渔具功率的匹配,崔建章^[28]对中型单拖网渔船拖力与渔具系统匹配的研究表明,渔船拖速范围内 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部分。对于目前连海渔业公司作业的单拖网渔船而言,可用于拖网部分的额定功率仅为 235 kW,考虑船舶老化等因素则可能更小。本研究中仅能测定被模拟部位的水阻力数据,而实物网贴底运动时的受力情况通常更为复杂,除水阻力外还包含摩擦阻力等,为简化计算近似考虑其仅受摩擦阻力,因此水阻力与摩擦阻力之和即为模拟部分所受总阻力。原网具生产作业海域底质为铁板沙底,因此,本研究中摩擦系数取 0.7^[29]。在拖速为 4 kn 时,网具被模拟部分受摩擦阻力产生的消耗功率为 17.32 kW,网具总功率消耗则超过主机功率的 10%,又由于作业区域海况复杂,所以不能在该海域进行拖速大于 4 kn 的底拖网作业。根据苏联学者水下摄像资

料以及相关研究,底拖网在作业时鱼类被下纲驱赶进入网口后,很难从下纲和网腹逃走^[30],因此建议将网腹前段网目放大到网背网目的 1.5~2 倍,形成网腹疏目的形式以过滤泥沙等脏物^[31],减轻拖网阻力,进而降低作业能耗,提升船网匹配性。此外,由于本研究中缺少网板性能探究,关于船与拖网系统的匹配性分析有待进一步研究。

致谢:山东好运通网具科技有限公司提供母型网,上海海洋大学的曹道梅老师、林军、郭绍健,中国海洋大学的龙翔宇、宋鹏波在模型试验中提供了帮助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 陈新军,刘必林,方舟,等.头足纲[M].北京:海洋出版社,2019:347-348.
- [2] 刘岩.西南大西洋公海底拖网资源探捕的初步研究[D].青岛:中国海洋大学,2012:9.
- [3] FAO. Global production statistics 1950-2019[DB/OL]. 2021-09-05. <http://www.fao.org/fishery/statistics/global-production/query/en>.
- [4] 刘赫威,余为,陈新军.西南大西洋阿根廷滑柔鱼资源及其对环境响应的研究进展[J].中国水产科学,2020,27(10):1254-1265.
- [5] 徐鹏翔.南极磷虾中层拖网性能研究[D].上海:上海海洋大学,2016:1.
- [6] 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.
- [7] 许永久,黄洪亮,王磊,等.六角形目经编网片和菱形目有结绞捻网片水动力性能比较研究[J].浙江海洋学院学报(自然科学版),2010,29(4):299-305.
- [8] 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(3):60-63.
- [9] 陈雪忠,郁岳峰,刘峰,等.四片式中层拖网主要部件尺寸变化对其性能的影响[J].水产学报,1997,21(1):50-57.
- [10] 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] LIU W, TANG H, YOU X X, et al. Effect of cutting ratio and catch on drag characteristics and fluttering motions of midwater trawl codend[J]. J Mar Sci Eng, 2021, 9(3): 256.
- [12] 王永进,万荣,张勋,等.网袖长度对底层大网目拖网性能的影响[J].中国水产科学,2015,22(2):332-339.
- [13] FUJIIISHI A. Model tests of a high-speed midwater rope trawl for estimating the optimum buoyancy-weight ratio[J]. Bull Jpn Soc Sci Fish, 1990, 56(12): 2011-2018.
- [14] 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.
- [15] 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 Eng, 2019, 179:

- 173-179.
- [16] 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.
- [17] 许柳雄. 渔具理论与设计学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 113.
- [18] 黄洪亮, 伍贻惠, 郁岳峰, 等. 减少渔具模型试验误差的方法: 200510027879. X [P]. 2009-06-03.
- [19] ROBERTA A S, MANUEL H. Food and feeding of the short-finned squid *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) off southern Brazil [J]. Fish Res, 1997, 55: 139-147.
- [20] 王晓晖, 林兴国. 阿根廷—福克兰鱿钓渔场特征与渔法特点 [J]. 海洋渔业, 2000, 22(1): 41-42.
- [21] 陈雪忠, 徐宝生, 项忆军, 等. 底拖网网口垂直扩张的分析研究 [C]//中国水产学会水产捕捞专业委员会. 中国水产捕捞学术研讨会论文集. 苏州: 苏州大学出版社, 1997: 167-170.
- [22] 郁岳峰, 张勋, 冯春雷, 等. 单船深水底拖网渔具渔法的试验研究 [J]. 现代渔业信息, 2008, 23(9): 9-12.
- [23] 伍贻惠, 郁岳峰, 林准, 等. 拖网模型试验若干问题的研究 [C]//中国水产学会水产捕捞专业委员会. 中国水产捕捞学术研讨会论文集. 苏州: 苏州大学出版社, 1997: 27-36.
- [24] 薄佳男. 远洋大网目底拖网设计和模型试验研究 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2020: 31.
- [25] 崔建章. 渔具渔法学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 270-280.
- [26] 刘新山. 对六片式底拖网在也门和阿曼渔场的适应性分析与研究 [J]. 大连水产学院学报, 1997(3): 61-67.
- [27] 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: 32.
- [28] 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(4): 289-296.
- [29] 弗里德曼. 渔具理论与设计 [M]. 侯恩准, 高清廉, 译. 北京: 海洋出版社, 1988: 70.
- [30] 赵俊钢. 鱼类的行动 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 179-183.
- [31] 许传才. 北方沿海小型单船底拖网的研制和试验 [J]. 大连水产学院学报, 1997(1): 29-36.