

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19367

流速和放网模式对金枪鱼围网网具形态的影响

刘伟¹, 许柳雄^{1, 2, 3, 4, 5}, 唐浩^{1, 2, 3, 4, 5}, 胡夫祥⁶, 周成¹, 孙佳星¹, 宋函欣¹

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306;
3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
4. 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;
5. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306;
6. 东京海洋大学学术研究院, 日本 东京 108-8477

摘要: 网具形态是金枪鱼围网作业性能的一个重要指标, 受网线材料、沉子配重、海流等诸多因素影响。为探究放网模式和流速对金枪鱼围网网具形态的影响, 本研究依照上海开创远洋渔业有限公司金枪鱼原型围网, 根据田内准则制作模型网, 在日本下关西日本日网公司专业动水槽进行模型实验。实验设置3种放网模式(顺流放网、侧流放网、背流放网), 3种流速(0 cm/s、5 cm/s、8 cm/s), 比较各放网模式下, 流速对金枪鱼围网网具沉子纲沉降深度、纵向网衣轮廓、浮沉子纲水平包围面积和浮沉子纲水平包围形状的影响。结果显示: (1) 0 cm/s 流速下放网, 网具沉子纲沉降深度最大(1.21 m), 浮沉子纲水平包围面积最大(8.44 m², 9.89 m²), 纵向网衣轮廓最佳; (2) 顺流5 cm/s 条件下放网, 网具浮沉子纲水平包围形状最佳; (3) 顺流、背流放网, 网具最大沉降深度随着流速增加逐渐减小[1.21 m (0 cm/s)>1.17 m (5 cm/s)>1.13 m (8 cm/s), 1.21 m (0 cm/s)>1.16 m (5 cm/s)>1.10 m (8 cm/s)], 网具最大沉降深度与流速显著相关($P<0.05$); (4) 侧流放网, 网具最大沉降深度与流速不相关($P>0.05$); (5) 3种放网模式下, 流速与网具浮沉子纲水平初始包围面积不相关($P>0.05$); (6) 不同放网模式及流速条件下, 网具浮沉子纲水平包围面积与时间的平方均呈线性关系($P<0.05$)。综上建议, 有流时为确保网具形态最佳及网具沉降深度最大, 应首先采用侧流放网。

关键词: 金枪鱼围网; 放网模式; 流速; 网具形态; 模型实验

中图分类号: S972

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)06-0727-12

金枪鱼围网主捕对象鲣(*Katsuwonus pelamis*)是一种集群性中上层鱼类, 具有行动敏捷、游速快等特点^[1]。作业中金枪鱼围网水平包围面积大于鱼群面积, 沉降深度大于鱼群深度, 在渔船圆周放网后收紧括网闭合网口, 才有可能将其捕获。鱼群被围捕后, 随着网衣收绞, 网具包围体积缩小, 鱼群活动范围减小, 鱼群个体之间碰撞挤压加剧, 造成个体死伤, 影响目标鱼种的经济价值, 且有可能使兼捕鱼在被释放后成活率下降^[2]。

因此, 网具的包围范围、沉降深度及水下形态是影响捕捞成功率、渔获物质量及兼捕鱼成活率的重要因素。

金枪鱼围网属柔性体, 其包围范围、沉降深度及水下形态受网线材料、沉子配重、网目尺寸、操作方式、海流等因素影响。小長谷庸夫^[3-4]通过模型实验发现, 围网包围形状与沉子配重、缩结系数有关, 沉子越重网具包围体积越大, 缩结系数为0.1时网形最好; Katiandagho等^[5]认为绞纲速

收稿日期: 2019-12-12; 修订日期: 2020-01-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31902426, 41806110); 上海市科学技术委员会青年科技英才扬帆计划项目(19YF1419800); 国家863计划项目(2012AA092302).

作者简介: 刘伟(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事于渔具渔法的研究. E-mail: 18817771740@163.com

通信作者: 唐浩, 讲师, 主要从事渔具水动力学、数值模拟. E-mail: htang@shou.edu.cn

度的平方与网具沉子纲包围面积呈线性关系; 卢伙胜^[6]将围网括纲在特殊时间点的形态假设为悬链线, 利用数学方法求得围网长、高比的理论黄金值, 并分析了包围体积与围网长、高比之间的关系; Lee 等^[7]采用集中质量弹簧模型建立金枪鱼围网物理模型, 获得了网具从释放至绞纲结束网具形态变化过程; Tang 等^[8]在之后的研究中发现, 放大网目尺寸, 有利于提高网具的沉降深度以及浮沉子纲包围面积。

以往的研究多集中于通过修改网具自身参数优化网具形态, 而海上环境因子对网具的形态也存在较大影响。Park^[9]曾提出海流是影响网具形态最重要的因子; Kim 等^[10]利用数值模拟方法模拟出网具在不同流速条件下呈心形; 唐浩^[11]通过研究发现, 海流超过 1 kn 时, 船长极少下网捕捞; Bag 等^[12]通过模型实验, 测量了不同流向(放网模式)对网具浮子纲包围形状的影响; 之后 Zhou 等^[13]利用模型实验探究了放网模式对网具浮沉子纲包围面积及形状的影响, 结果显示顺流放网可使浮子纲包围最大面积。以上研究多为单因素对围网网具形态的影响, 两个及两个以上因素对网具形态的影响鲜有报道。海流包括流速和流向, 渔民通过改变放网模式(根据放网结束后网口与流向

的夹角确定^[13])适应流向, 但不同流速条件下如何选择放网模式, 还有待研究。

本研究将依照上海开创远洋渔业有限公司在中西太平洋作业的“金汇 7 号”金枪鱼围网船使用的网具, 根据田内修正准则^[11]制作模型网进行动水槽模型实验, 探究流速和放网模式两种因素对金枪鱼围网网具形态(网具纵向形态、网具沉子纲深度、浮沉子纲包围形态、浮沉子纲包围面积)的影响, 为海上作业中根据不同流速选择相应的放网模式提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 原型网

原型网主尺度为 1637.70 m×321.60 m (网具上纲长度×网具最大拉直高度), 由 29 区尼龙结节网衣缝合而成。取鱼部网目尺寸 90 mm, 主网衣网目尺寸 260 mm, 翼端网目尺寸 300 mm 和 135 mm; 浮子纲长 1637.00 m, 配网网衣缩结系数 0.8; 沉子纲长 1963.70 m, 配网网衣缩结系数 0.92; 括纲为 3000 m 长硬钢丝, 跑纲为 1000 m 长硬钢丝。共配置 120 个底环, 每个空气中重 6 kg, 相邻两底环间隔 16 m。浮子和沉子空气中总重 26 t, 配重约 13.2 kg/m (图 1)。

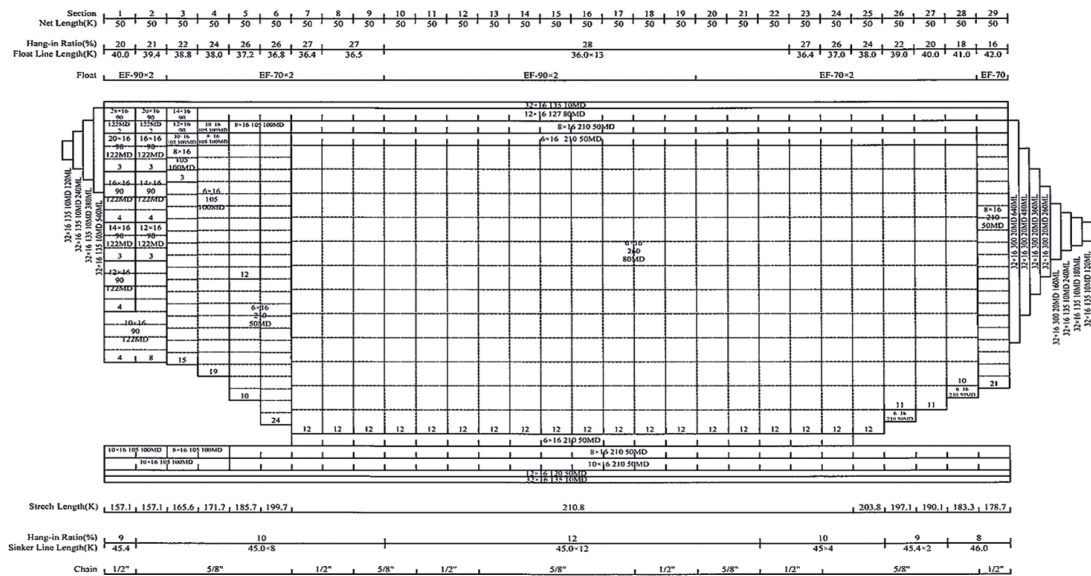


图 1 实物金枪鱼围网网具示意图

K 是长度单位(1 K=1.515 m)。

Fig. 1 Schematic diagram of the prototype commercial tuna purse seine
K is the unit of length (1 K = 1.515 m).

1.2 实验水槽

本实验采用的水槽为日本下关西日本日网公司研究开发室的循环动水槽, 该水槽的主尺度为 $10\text{ m}\times 4\text{ m}\times 1.6\text{ m}$ (图 2); 水槽侧面和底面均有金属网格($20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$)作为标尺; 在水槽正上方和正前方各设置一台摄像机, 用以记录网具在收放过程中的形态变化; 水槽上方开口处设有平台, 配以 6 台松放和收绞纲索的小型绞机, 绞机下方

配有专门用以实现圆周放网的摆动杆, 两摆动杆末端安装定滑轮用以传动, 在摆动杆 a 末端配有放网平台, 用以放置网具(图 2)。

1.3 模型网

在制作模型网时, 由于很难使模型网与原型网线面积保持一致, 因此本研究采用的模型网(图 3)是基于田内模型修正准则^[11], 根据原型网制作而成。根据原型网主尺度以及循环水槽主尺度,

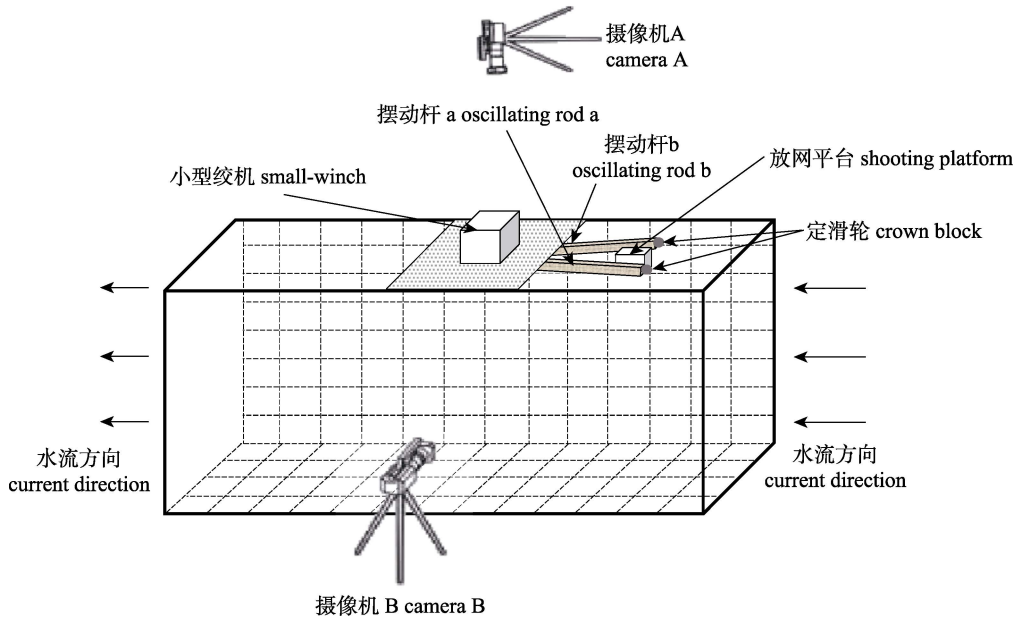


图 2 金枪鱼围网模型实验动水槽示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tuna purse seine model test flume

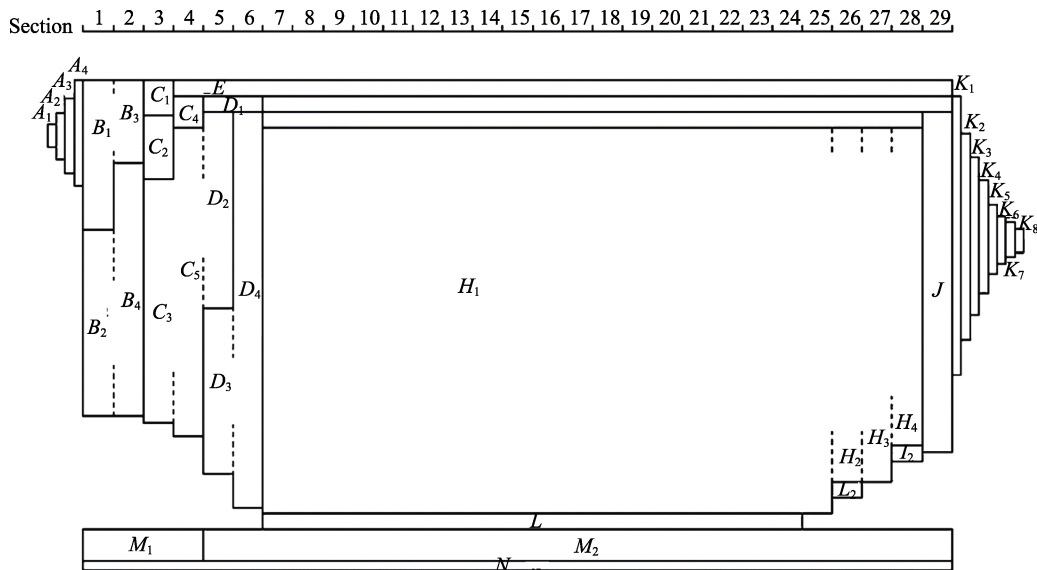


图 3 模型金枪鱼围网网具示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the model tuna purse seine

同时方便实验操作, 确定模型网与原型网主尺度比: $\lambda=1/185$, 网线直径比: $d_M/d_F=1/6.63$, 网目尺寸比: $a_M/a_F=1/8.96$ (d_M 为模型网网线直径; d_F 为原型网网线直径; a_M 为模型网网目尺寸; a_F 为原型网网目尺寸)。

通过换算, 模型网主尺度为: $8.85 \text{ m} \times 1.74 \text{ m}$ (网具上纲长度 \times 网具最大拉直高度)。为保持刚度相似, 实验网的括纲和跑纲均使用尼龙纲索代替硬纲丝^[14]。

根据田内模型准则, 在确定主尺度比、网线直径比及网目尺寸比的基础上, 进而确定速度比和时间比。

速度比^[14]:

$$\frac{V_M}{V_F} = \left[\left(\frac{d_M}{d_F} \right)^{1.031} \left(\frac{\rho_{sM} - \rho_M}{\rho_{sF} - \rho_F} \right) \frac{\rho_F}{\rho_M} \right]^{1.969} = \frac{1}{2.35} \quad (1)$$

式中, V_M 为模型网速度; V_F 为原型网速度; ρ_{sM} 为模型网网线材料密度; ρ_{sF} 为原型网网线材料密度; ρ_M 为模型实验流体密度; ρ_F 为实际海域流体密度。

时间比^[14]:

$$\frac{t_M}{t_F} = \lambda / \left[\left(\frac{d_M}{d_F} \right)^{1.031} \left(\frac{\rho_{sM} - \rho_M}{\rho_{sF} - \rho_F} \right) \frac{\rho_F}{\rho_M} \right]^{1.969} = \frac{1}{78.72} \quad (2)$$

式中, t_M 为模型实验操作时间; t_F 为实际操作时间。

1.4 实验设定

流速设定: 若动水槽流速过大, 模型网很难从上游端漂流到下游端期间完成放网及绞纲过程, 因此为比较流速对金枪鱼围网网具形态的影响, 同时便于实验操作和观察, 将模型试验的流速设置为 0 cm/s 、 5 cm/s 、 8 cm/s (相当于实际流速 0 kn 、 0.23 kn 、 0.37 kn), 进行试验。

放网模式设定: 根据流向确定 3 种放网模式。(A) 侧流放网(cross set), 完成放网后网口方向垂直于水流方向; (B) 背流放网(back set), 完成放网后网口方向正对来流方向; (C) 顺流放网(front set), 完成放网后网口方向与水流方向一致^[14] (图 4)。

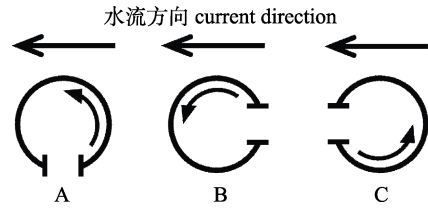


图 4 3 种放网模式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of three shooting patterns

1.5 实验流程

将模型网放置在放网平台, 括纲两端通过两摆动杆末端定滑轮与中间绞机连接, 浮子纲两端分别连接在摆动杆 a 末端和摆动杆 b 末端, 操作开始时, 启动绞机释放括纲, 同时摆动杆 b 保持静止, 摆动杆 a 做匀速圆周运动, 网具则因摆动杆 a 的运动被释放到水槽中, 当摆动杆 a 水平放网一周后停止(耗时 10 s), 同时将绞机更换为绞纲模式收绞括纲, 至括纲收绞完毕(耗时 50 s), 关闭绞机, 操作结束。

在整个实验操作过程中, 安置在水槽正上方和正前方的 2 台摄像机全程同步拍摄(图 2)。

1.6 图像处理及数据分析

将实验拍摄的视频以 6 s 间隔截取图片, 应用 ProDAD DeFisr1.0 软件, 通过调整参数, 对畸变图像进行矫正(图 5); 之后应用 GetData Graph Digitizer 软件, 以水槽侧面及底面的网格作为标尺, 获得网具节点空间坐标, 将参数和坐标值导出; 应用 Image J 软件捕捉俯视图节点获得网具浮子纲和沉子纲包围面积数据。利用 Microsoft Office 2013 软件对数据进行处理, 获得结果。

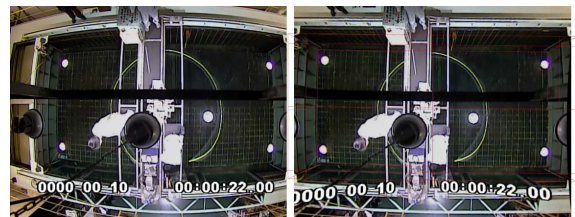


图 5 模型实验拍摄图片矫正前(左)和矫正后(右)

Fig. 5 The camera footages of model test before correction (left) and after correction (right)

2 结果与分析

2.1 3 种放网模式下, 流速对模型网具纵向形态的影响

图 6、图 7、图 8 分别为顺流、侧流、背流放

网时不同流速条件下模型网在收绞括网阶段的网具形态变化侧视图。3 种放网模式各流速条件下, 绞网前 14 s 网具主网衣各部沉子纲沉降深度存在差异, 之后沉降深度基本相同, 在绞网 38 s 后网具缺口逐渐缩小; 顺流放网, 模型网网衣轮廓均朝网圈中心方向内陷, 且随流速的增加内陷程度加强, 相同时刻浮子纲与侧纲之间夹角随流速的增加而增大; 侧流放网网具迎流面网衣均沿流向外凸, 背流面网衣均沿流向外凸, 并随流速的增加内陷或外凸程度加强, 且浮子纲与侧纲之间的

夹角随流速增加, 迎流面增大背流面减小; 背流放网模型网网衣轮廓均沿流向外凸, 且随流速的增加外凸程度增加, 相同时刻浮子纲与侧纲之间夹角随流速的增加而减小。

2.2 3 种放网模式下, 流速对模型网具纵向最大深度的影响

各放网模式中模型网在静水(0 cm/s)条件下放网沉子纲沉降深度最大(1.21 m), 对应原型网沉降深度为 223.85 m (网具最大拉直高度的 68.7%); 顺流放网和背流放网条件下, 网具沉子纲中点最

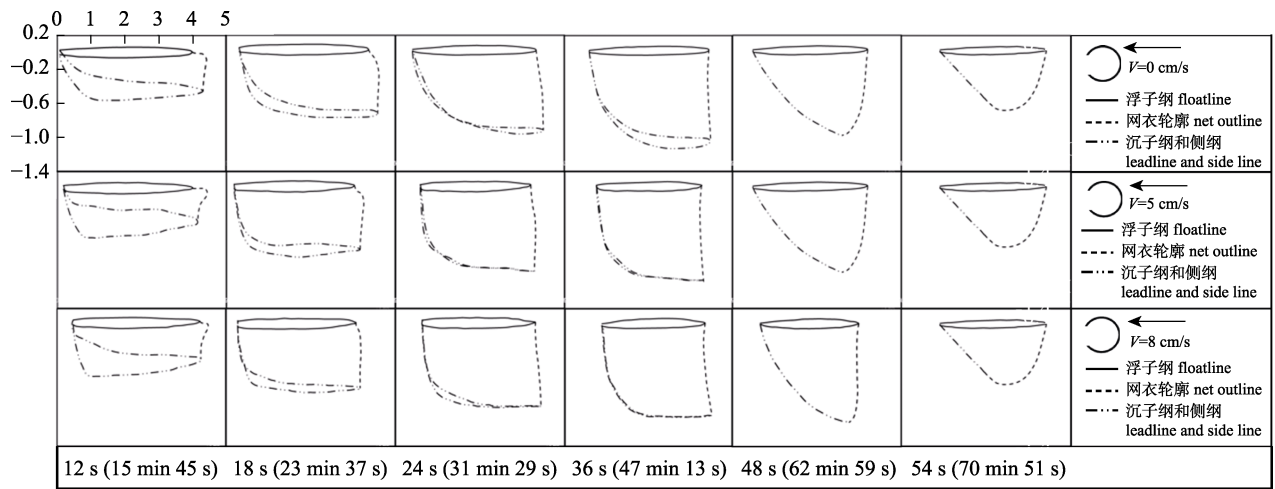


图 6 顺流放网不同流速下模型网在收绞括网阶段的网具形态变化侧视图
括号内为模型实验对应的实际时间。

Fig. 6 Side view of shape transformation for model net at different current speed by front set
The times in brackets correspond to the actual times.

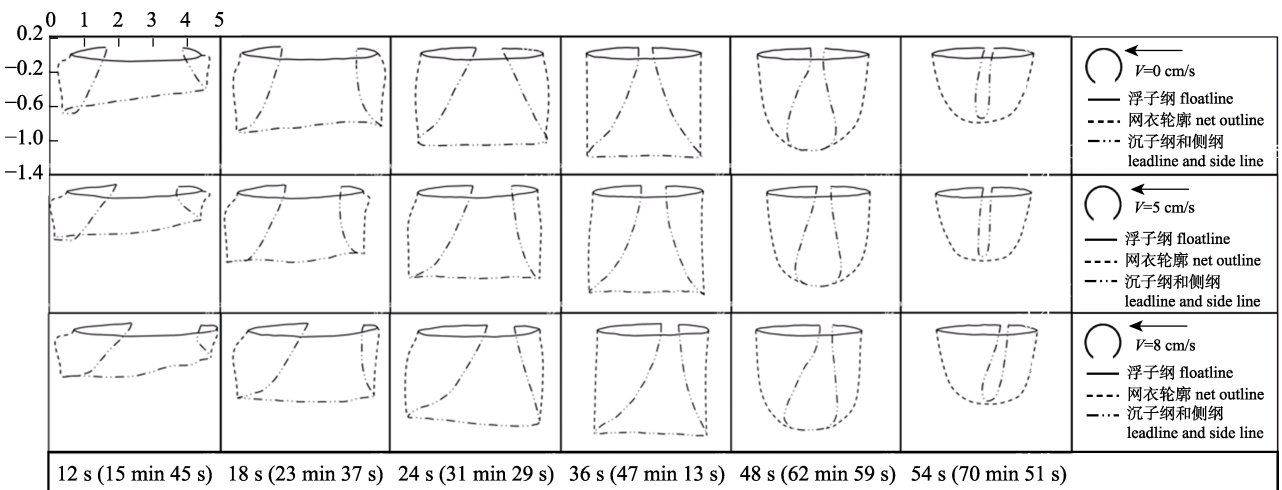


图 7 侧流放网不同流速下模型网在收绞括网阶段的网具形态变化侧视图
括号内为模型实验对应的实际时间。

Fig. 7 Side view of shape transformation for model net at different current speed by cross set
The times in brackets correspond to the actual times.

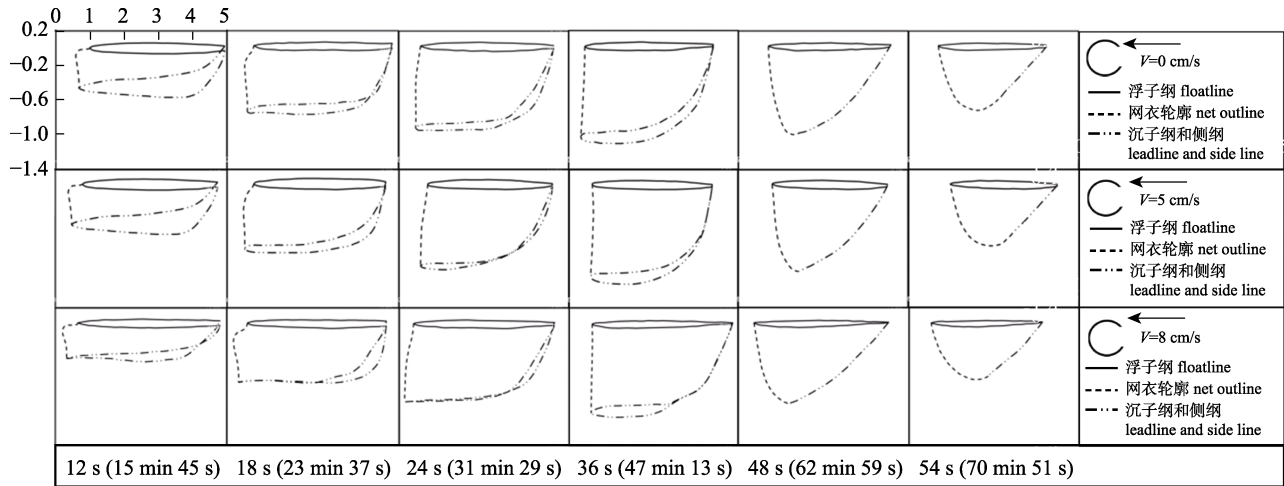


图 8 背流放网不同流速下模型网在收绞括网阶段的网具形态变化侧视图
括号内为模型实验对应的实际时间。

Fig. 8 Side view of shape transformation for model net at different current speed by back set
The times in brackets correspond to the actual times.

大沉降深度随流速的增大而减小, 表现为: 0 cm/s 流速条件(1.21 m, 1.21 m)>5 cm/s 流速条件(1.17 m, 1.16 m)>8 cm/s 流速条件(1.13 m, 1.10 m), 且差异显著($P<0.05$); 侧流放网时, 5 cm/s 流速和 8 cm/s 流速下放网, 沉子网中点最大沉降深度较 0 cm/s 流速下放网分别减少 1.1%和 0.6%, 差异不显著 ($P>0.05$, 图 9)。

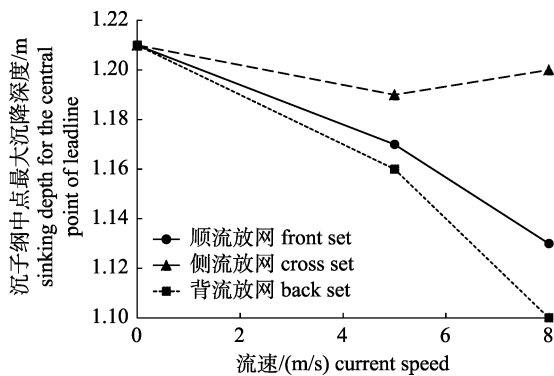


图 9 3 种放网模式下模型网沉子网中点最大沉降深度随流速变化

Fig. 9 Sinking depth changes for the central point of leadline with current speeds for model net at three shooting patterns

2.3 3 种放网模式下, 流速对浮沉子网形态的影响

为比较不同放网模式下, 流速对网具浮子网和沉子网包围区域形态变化的影响, 根据图像捕获的节点位置坐标进行描绘, 获得顺流(图 10)、侧流(图 11)、背流(图 12)放网时不同流速下模型

网在收绞括网阶段的浮子网和沉子网的形态变化俯视图。3 种放网模式各流速条件下放网, 模型网沉子网初始网圈均大于浮子网, 绞网进行 24 s 浮沉子网网圈基本相同, 绞网进行 48 s 沉子网收于一点, 绞网基本结束; 顺流放网网圈因挤压呈豌豆状, 侧流放网网圈基本为椭圆状, 背流放网网圈因拉伸呈水滴状; 各放网模式中, 相同时间点网具的受挤压或拉伸的程度随流速的增加而加强。

2.4 3 种放网模式下, 流速对浮子网包围面积的影响

3 种放网模式中各流速条件下模型网浮子网包围面积随绞网时间的增加而缩小(图 13)。为方便比较, 选取 3 个特征时刻(放网结束、绞网 24 s、绞网 48 s)。放网结束: 各放网模式下, 5 cm/s 流速和 8 cm/s 流速下放网浮子网平均包围面积(8.02 m², 8.18 m²)均小于无流(0 cm/s)放网(8.44 m²); 绞网 24 s: 其浮子网包围面积依旧为有流放网小于无流放网; 绞网 48 s: 除顺流 8 cm/s 条件下放网, 其浮子网包围面积(3.76 m²)略大于无流放网(3.72 m²)外, 其他条件下放网仍是有流放网浮子网包围面积小于无流放网。无流放网(0 cm/s), 从绞网初期到绞网末期, 模型网浮子网包围面积平均缩小 55.9%, 而 5 cm/s 流速和 8 cm/s 流速下放网, 浮子网包围面积平均缩小了 57.6%和 60.5%。

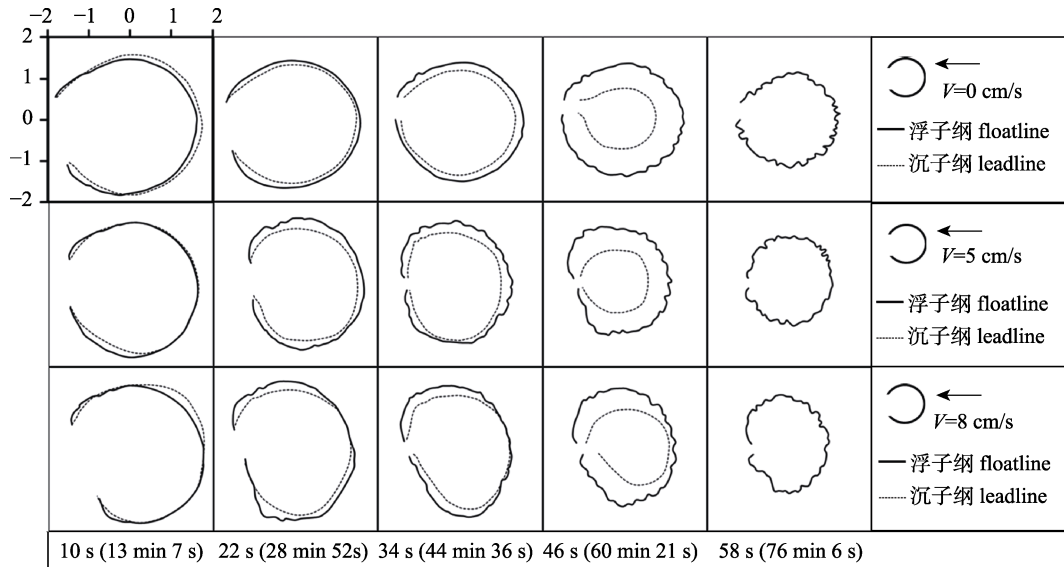


图 10 顺流放网不同流速下模型网在收绞括网阶段的浮子网和沉子网的形态变化俯视图
 括号内为模型实验对应的实际时间. 最右侧一栏沉子网聚拢至一点, 未画出.

Fig. 10 Vertical view of shape transformation of floatline and leadline for model net at different current speed by front set
 The times in brackets correspond to the actual times. In the far-right column, the leadline gathered together to a point, which is not shown.

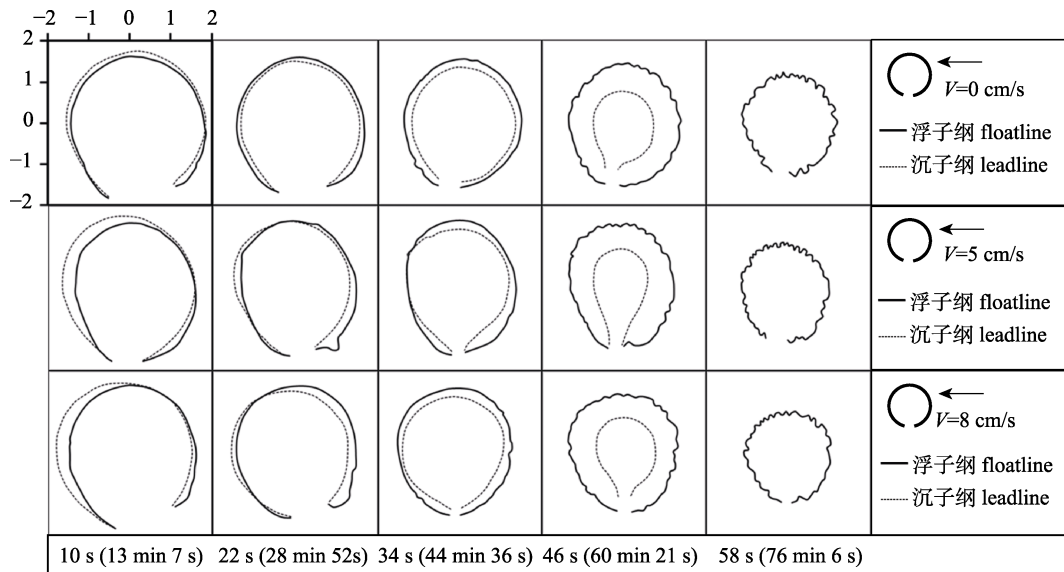


图 11 侧流放网不同流速下模型网在收绞括网阶段的浮子网和沉子网的形态变化俯视图
 括号内为模型实验对应的实际时间. 最右侧一栏沉子网聚拢至一点, 未画出.

Fig. 11 Vertical view of shape transformation of floatline and leadline for model net at different current speed by cross set
 The times in brackets correspond to the actual times. In the far-right column, the leadline gathered together to a point, which is not shown.

2.5 3 种放网模式下, 流速对沉子网包围面积的影响

各放网模式的 3 种流速下, 沉子网包围面积均随时间的增加而缩小; 其中, 无流条件下放网, 模型网沉子网初始包围面积最大(9.89 m²), 有流放网均小于无流放网; 绞网前半段(绞网进行 0%~50%), 侧流条件下放网, 不同流速之间, 模

型网沉子网初始包围面积基本相同, 而顺流和背流放网沉子网初始包围面积相差较大; 绞网后半段(绞网进行 50%~100%), 各放网模式的 3 种流速下, 沉子网包围面积基本保持 0 cm/s 放网 > 5 cm/s 放网 > 8 cm/s 放网, 存在显著性差异($P < 0.05$, 图 14)。

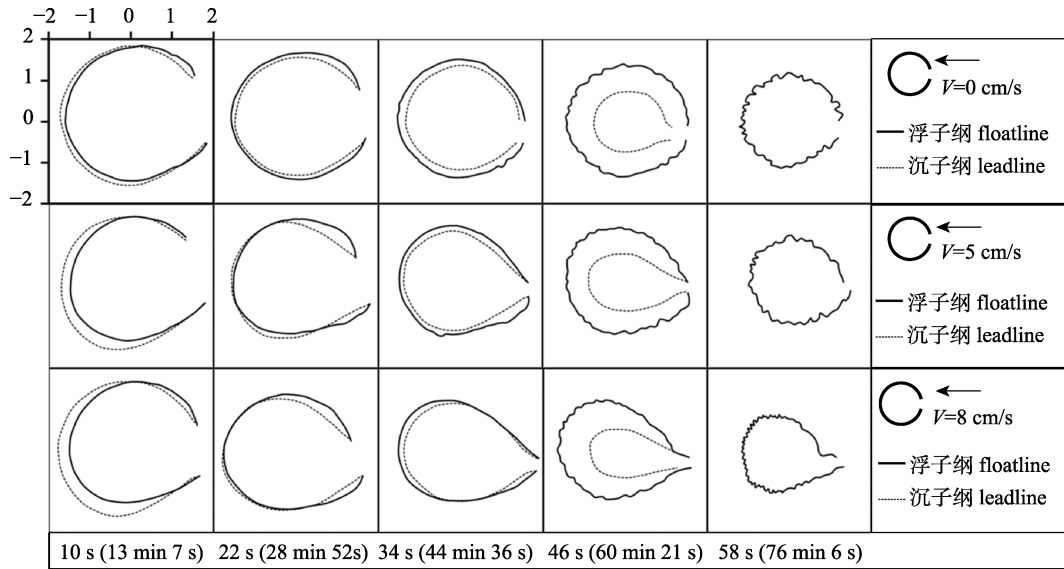


图 12 背流放网不同流速下模型网在收绞括网阶段的浮子纲和沉子纲的形态变化俯视图

括号内为模型实验对应的实际时间. 最右侧一栏沉子纲聚拢至一点, 未画出.

Fig. 12 Vertical view of shape transformation of floatline and leadline for model net at different current speed by back set. The times in brackets correspond to the actual times. In the far-right column, the leadline gathered together to a point, which is not shown.

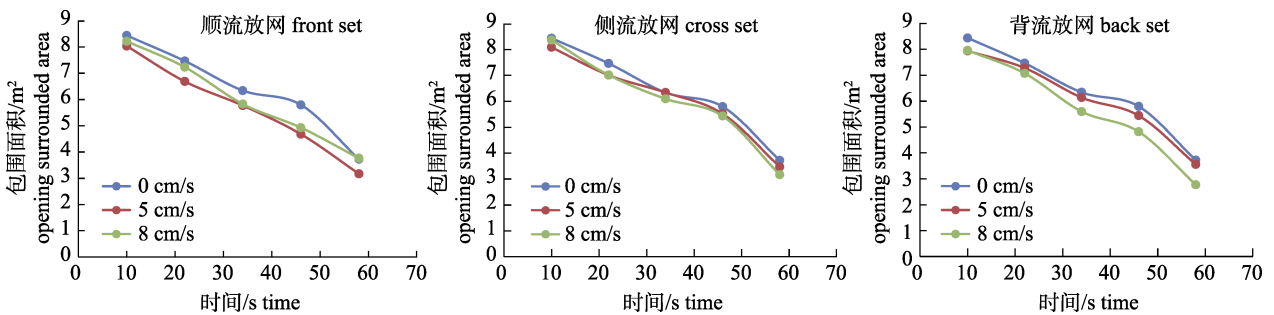


图 13 3 种流速下模型网浮子纲包围面积随时间变化

Fig. 13 Change of the surrounded area by floatline with time for model net at three current speeds

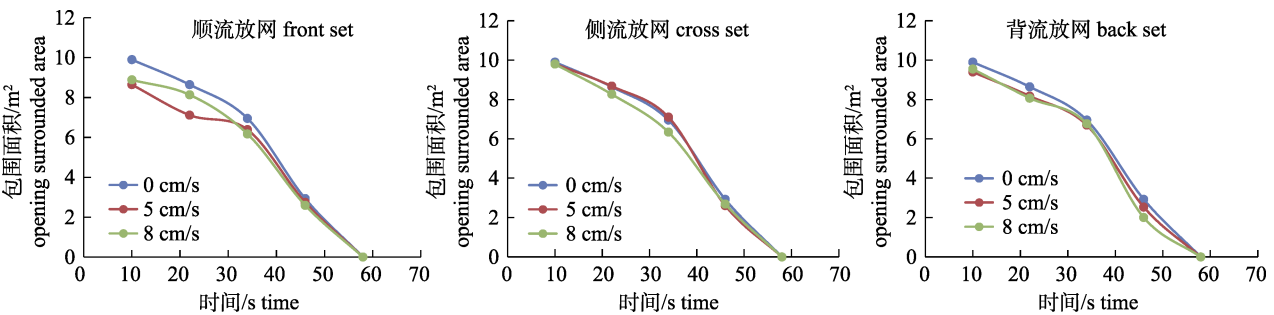


图 14 3 种流速下模型网沉子纲包围面积随时间变化

Fig. 14 Change of the surrounded area by leadline with time for model net at three current speeds

3 讨论

3.1 流速对金枪鱼围网网具沉子纲沉降深度的影响

流速是影响金枪鱼围网网具沉子纲沉降深度

的重要因素^[9], 多数学者研究结果认为, 随着流速的增加网具最大深度会减小^[15-17]。在顺流和背流放网情况下, 本研究结果同样显示, 网具最大沉降深度随流速的增加而减小, 并且存在显著性差异($P < 0.05$), 符合之前学者的研究结果, 但本

研究还发现围网渔具最大沉降深度不但与流速有关, 还与其放网模式有关, 在侧流放网时流速对网具沉降深度并无显著影响($P>0.05$)。产生此结果的原因可能是, 顺流和背流放网, 网具主网衣基本垂直流向, 此时主网衣正面受水流冲击, 同时网口部位没有网衣阻挡, 水体对网具的压力大部分施加给网具主网衣, 流速越大压力越大。图 6 中网衣轮廓显示, 网具主网衣因水流的冲击而内陷, 图 8 则因水流的冲击而外凸, 这两者均表现为随着流速的增加, 网具主网衣轮廓内陷或外凸的程度加强, 从而造成流速越大沉降深度越浅。而侧流放网的情况不同, 此时网具主网衣与水流方向基本平行, 处小冲角受力状态, 主网衣受流正面压力小, 倾斜或弯曲度小, 流速对网具主网衣的影响较小, 因此在不同流速对网具主网衣的冲击下, 网具最大沉降深度几乎相同。

本研究结果显示网具在静水条件下最大沉降深度为 1.21 m, 对应原型网沉降深度为 223.85 m (网具最大拉直高度的 68.7%), 同时经过拟合流速与最大沉降深度之间的关系式发现, 在顺流和背流放网时, 流速(V , kn)与网具最大沉降深度(D , m)的关系分别为 $D=-55.901V^2-19.317V+223.85$ 和 $D=-105.59V^2-15.932V+223.85$ 。据此公式可以推算, 若要保证网具最大沉降深度达到网具最大拉直高度的 50%, 顺流和背流分别要选择流速小于 0.88 kn 和 0.69 kn 条件下放网。而侧流放网, 因网具最大沉降深度与流速之间无明显相关性, 因此无法获得关系式, 但根据 Tang 等^[18]在海上实验结果发现, 当 60 m 水层平均流速为 0.33 kn, 平均流向与网口夹角为 80.92° (侧流放网), 网具最大沉降深度范围为 206.22~219.29 m, 本实验侧流 0.37 kn 放网, 网具最大沉降深度为 210.42 m。根据实测数据和本实验结果, 作者认为在流速较大的海域作业, 为保证网具下沉深度, 建议采用侧流放网。

3.2 流速对金枪鱼围网括网张力的影响

括网作为金枪鱼围网的重要属具, 起到收拢网具缺口, 保证被围鱼群无法从网具内逃逸的作用, 但在作业过程中, 括网需要克服网具自身重力和水体的冲击力。为了保证安全生产, 船长会根据使用次数及磨损程度更换括网, 或将易磨损

的中部钢索调至端部, 进而延长使用期限^[19]。

在实际作业中, 括网与水面夹角越小张力越大, 相反张力越小。本实验结果显示, 在顺流条件下绞网, 网具括网较背流条件与水面夹角更大, 侧流条件下则表现为上游处比下游处夹角更大; 随流速的增加, 顺流条件下网具括网与水面夹角越大, 背流时夹角越小, 侧流条件表现为下游处夹角越小, 上游处夹角越大。导致这种现象的原因可能是在顺流条件下绞网, 流向与收绞方向一致, 此时水流对收绞括网起到积极作用, 且流速越大, 产生的积极作用力越大, 绞网越省力; 侧流时, 网具上游处收绞方向与流向相同, 下游处相反, 因此表现出上游处较下游处括网与水面夹角更大; 背流条件下绞网, 括网收绞方向与流向相反, 收绞括网除克服网具自身重力的同时, 还需克服水体对网衣的冲击力。因此, 为降低括网的磨损程度, 延长其使用寿命, 作者认为可以在顺流条件下收绞括网。

3.3 流速对金枪鱼围网浮沉子纲包围面积的影响

在放网过程中, 金枪鱼围网船航行路线需要和鱼群边缘保持一定距离, 避免提前惊扰鱼群使其在网具未完全释放前逃逸, 因此, 网具包围水域面积大于鱼群面积。本实验结果显示, 在静水(0 cm/s)条件下放网, 网具浮沉子纲包围面积最大(8.44 m², 9.89 m²), 各放网模式条件下放网, 网具浮子纲包围面积与流速不相关($P>0.05$)。沉子纲在绞网前期(0~24 s)包围面积与流速不相关($P>0.05$), 但后期(24~48 s)存在相关性($P<0.05$)。对于浮子纲, 可能是因为它在整个操作过程中始终浮于水面, 并且在绞收括网的过程中, 浮子纲不会受到直接作用力; 但沉子纲不同, 在绞网前期, 由于此时受力主要是网具本身重力和浮力, 其受力方向与水流方向垂直, 因此受水流冲击作用较小; 绞网后期, 网具已达到最大沉降深度, 此时主要受括网收绞力的作用, 其受力方向与水流方向平行, 因此水流的大小直接影响网具沉子纲的包围面积(流速越大, 包围面积越小)。

本实验括网为匀速收绞, 通过拟合发现, 绞网时间的平方与沉子纲包围面积呈线性关系($R^2=0.98\pm 0.01$), 这与 Katiandagho 等^[5]的研究结果(绞

网速度的平方与网具沉子纲包围面积呈线性关系)基本相似,原因可能是网圈周长平方与网圈面积存在线性关系引起。

3.4 流速对金枪鱼围网浮沉子纲包围形状的影响

静水(0 cm/s)条件下,模型网在绞收过程中浮子纲由正圆逐渐变为椭圆,而沉子纲则由正圆逐渐变为水滴状。顺流放网,当流速达到 5 cm/s 时,网具浮沉子纲包围形状始终为正圆形,但流速达到 8 cm/s 后,网具浮沉子纲呈明显挤压状态,原因可能是网具收绞的方向并不是圆心,而是网圈的边缘,因此在静水条件下,随着绞网的进行,沉子纲逐渐被拉伸为水滴状;当存在一定流速,且水流的方向与绞网方向一致时,水流对网具的冲击力抵消了一部分收绞阻力,使主网衣部分受到向内的合力与取鱼部及翼端向内的合力基本相同,致使网具沉子纲在绞收过程中始终保持正圆形状;而当流速增加,主网衣受到向内的合力大于取鱼部和翼端,网具沉子纲就表现为被挤压状态。Kim 等^[10]的研究结果显示,网具在绞收过程中为心形,主要原因是,在 Kim 等^[10]的研究中,渔船的漂流速度较网具小,出现了渔船内陷情况,在 Zhou 等^[13]的研究中已给出解决方法,即利用辅助艇在网船右舷将网船拉离。因此,在顺流放网时,较小的流速可以使网具浮沉子纲在绞网过程中呈现较优的包围形态,但流速太大则会导致网船陷入网圈引发渔捞事故。

侧流放网时,流速对网具浮沉子纲包围形状并无明显影响。这可能是,金枪鱼围网包围形状基本为左右对称,侧流条件下,取鱼部受到水流冲击力的方向与翼端相同,且网具和网船整体随水流进行漂移,情况与静水放网相似。背流放网,网具浮沉子纲均表现为拉伸状态,且随流速增加,拉伸加剧,在此情况下,绞网所需要的力要大于侧流和顺流放网,但采用背流放网可以避免网船内陷。

4 结论

本研究比较了 3 种放网模式下,流速对金枪鱼围网沉子纲最大沉降深度、网具侧面形状、浮沉子纲水平包围面积和浮沉子水平包围形状的影响,

结果显示:在静水(0 cm/s)条件下放网,网具沉降深度和浮沉子纲包围面积最大;在 5 cm/s 条件下,顺流放网网具浮沉子纲包围形状最佳;8 cm/s 条件下,顺流放网收绞括网最省力。综上所述,为保证较高的沉降深度和浮沉子纲包围面积,建议采用侧流放网;顺流放网可以使收绞括网最省力,但有可能会导致网船陷入网圈引发渔捞事故。

致谢: 日本下关西日本日网公司研究开发室熊沢泰生研究员和平山完研究员对本研究模型实验操作的帮助与指导,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] Xu L X, Lan G C, Ye X C, et al. Effect of the leadline weight and net setting speed on sinking speed of the tuna purse seine[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(10): 1563-1571. [许柳雄, 兰光查, 叶旭昌, 等. 下纲重量和放网速度对金枪鱼围网下沉速度的影响[J]. *水产学报*, 2011, 35(10): 1563-1571.]
- [2] Tenningen M, Pobitzer A, Handegard N O, et al. Estimating purse seine volume during capture: Implications for fish densities and survival of released unwanted catches[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2019, 76(7): 2481-2488.
- [3] Konagaya T. Studies on the purse seine-III: On the effect of sinkers on the performance of a purse seine[J]. *The Japanese Society of Fisheries Science*, 1971, 37(9): 861-865. [小長谷庸夫. 巾着網の研究-III: 沈降力の効果[J]. *日本水産学会誌*, 1971, 37(9): 861-865.]
- [4] Konagaya T. Studies on the purse seine-IV: The influence of hanging and net depth[J]. *The Japanese Society of Fisheries Science*, 1971, 37(9): 866-870. [小長谷庸夫. 巾着網の研究-IV: 縮結と網たけについて[J]. *日本水産学会誌*, 1971, 37(9): 866-870.]
- [5] Katiandagho E M, Imai T. Fundamental studies on the fishing efficiency of purse seine[J]. *Kagoshima University Repository*, 1985, 6(2): 229-247.
- [6] Lu H S. Analysis on the fittingness of length-height ratio of purse seine[C]//China Fisheries Academic Symposium. Beijing: China Society of Fisheries, 1998. [卢伙胜. 围网长、高比的合理性分析[C]//中国水产捕捞学术研讨会论文集. 北京: 中国水产学会, 1998.]
- [7] Lee C W, Lee J H, Cha B J, et al. Physical modeling for

- underwater flexible systems dynamic simulation[J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(3-4): 331-347.
- [8] Tang H, Xu L X, Hu F X, et al. Effect of mesh size modifications on the sinking performance, geometry and forces acting on model purse seine nets[J]. *Fisheries Research*, 2019, 211: 158-168.
- [9] Park S J. A study on the fishing ability of the mackerel purse seine operating and the fishing condition in the sea area of Cheju Island[J]. *Marine Pollution Bulletin Research Institute Cheju National University*, 1986, 22(3): 42-46.
- [10] Kim Y H, Park M C. The simulation of the geometry of a tuna purse seine under current and drift of purse seiner[J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(14): 1080-1088.
- [11] Tang H. Study on hydrodynamic characteristic and sinking performance of tuna purse seine[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. [唐浩. 金枪鱼围网网具水动力特性及沉降性能研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.]
- [12] Bag J S, Aoyama T, Suzuki M. Studies on the mackerel purse seine operating in the sea area of Cheju Island-2. Model experiment on the deformation of net in two layer current[J]. *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*, 1986, 22: 32-40.
- [13] Zhou C, Xu L X, Hu F X, et al. The kinetic deformation of tuna purse seine: A model experiment on different shooting patterns at uniform current[J]. *Fisheries Research*, 2015, 169: 18-25.
- [14] Liu W, Xu L X, Tang H, et al. Influence of mesh size on sinking performance and the shape of tuna purse seine[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(6): 1527-1538. [刘伟, 许柳雄, 唐浩, 等. 网目尺寸对金枪鱼围网沉降性能及网具形态的影响[J]. *水产学报*, 2019, 43(6): 1527-1538.]
- [15] Tang H, Xu L X, Zhou C, et al. Impact factors of sinking performance for tuna purse seine based on the generalized additive model[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(6): 944-950. [唐浩, 许柳雄, 周成, 等. 基于 GAM 模型研究金枪鱼围网沉降性能影响因素[J]. *水产学报*, 2013, 37(6): 944-950.]
- [16] Xu L X, Wang M F, Ye X C, et al. Measurement and analysis of sinking characteristics of tuna purse seine[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, 18(5): 1161-1169. [许柳雄, 王敏法, 叶旭昌, 等. 金枪鱼围网沉降特性[J]. *中国水产科学*, 2011, 18(5): 1161-1169.]
- [17] Zhou C, Xu L X, Zhang X F, et al. Multiple regression analysis of the factors affecting the sinking performance of large-scale tuna purse seine[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(3): 672-681. [周成, 许柳雄, 张新峰, 等. 金枪鱼围网沉降性能影响因子的多元回归分析[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(3): 672-681.]
- [18] Tang H, Xu L X, Zhou C, et al. The effect of environmental variables, gear design and operational parameters on sinking performance of tuna purse seine setting on free-swimming schools[J]. *Fisheries Research*, 2017, 196: 151-159.
- [19] Cui J Z, Lu C. Testing and analyzing of the tension on bridle for purse seine[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1984, 8(4): 339-342. [崔建章, 陆赤. 围网底环纲张力的测试和分析[J]. *水产学报*, 1984, 8(4): 339-342.]

Effects of current speed and shooting pattern on the shape of tuna purse seine

LIU Wei¹, XU Liuxiong^{1,2,3,4,5}, TANG Hao^{1,2,3,4,5}, HU Fuxiang⁶, ZHOU Cheng¹, SUN Jiaying¹, SONG Hanxin¹

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;
3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China;
4. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;
5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;
6. Faculty of Marine Science, Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo 108-8477, Japan

Abstract: Net shape is an important indicator of the operative performance of tuna purse seine, and can be affected by many factors, such as twine material, leadline weight, fishing operation, and currents. In order to understand the effect of shooting pattern and current speed on the shape of tuna purse seine, a model net was manufactured from the prototype net used by Chinese tuna purse seiners, based on the Tauti law. The experiment was carried out in the circulating tank at Nichimo Co., Ltd. of the Shimonoseki Research Institute. The effects of three shooting patterns (front set, cross set, and back set) and three current speeds (0 cm/s, 5 cm/s, and 8 cm/s) on the shape of the model net (the sinking depth of the leadline, the profile of the net, the opening surrounding the areas of the floatline and leadline, and the shape of the floatline and leadline) were investigated in this study. The results showed that: (1) when the current speed was 0 cm/s, the sinking depth of the leadline, and the opening area surrounded by the floatline and leadline reached the maximum of 1.21 m, 8.44 m², and 9.89 m², while the net maintained a better shape; (2) when the current speed was 5 cm/s at the front set, the shapes of floatline and leadline were better compared with the other experimental conditions; (3) at the front set and back set, the sinking depth of the leadline decreased with increasing current speed (1.21 m for the front set and 1.21 m for the back set at 0 cm/s > 1.17 m for the front set and 1.16 m for the back set at 5 cm/s > 1.13 m for the front set and 1.10 m for the back set at 8 cm/s), and the sinking depth of the leadline significantly differed with current speed ($P < 0.05$); (4) at the cross set, there was no significant difference in the sinking depth of the leadline for different current speeds ($P > 0.05$); (5) for each shooting pattern, current speed did not significantly affect the initial opening areas surrounding the floatline and leadline ($P > 0.05$); (6) the opening areas surrounding the floatline and leadline had a linear relationship with the square of time ($P < 0.05$). Based on the above results, we recommend cross set in practice, because it ensures a better shape of the net and a greater sinking depth of the leadline.

Key words: tuna purse seine; shooting patterns; current speed; net shape; model test

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