



水螅类污损生物附着网片水动力特性实验

刘融萍, 黄六一, 毕春伟*, 孙名山, 张远茂
(中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266000)

摘要: 污损生物的大量附着会堵塞网箱网目、降低网箱内水流交换、增大网箱结构荷载和变形, 从而导致在恶劣海况下网箱损坏风险加大, 可能造成重大经济损失。为了研究污损生物附着对网箱网衣水动力特性的影响, 本研究通过在海上网箱养殖区进行现场挂网实验, 获得不同生物附着程度的网片 ($S_n=0.213\sim0.442$), 分析污损生物组成结构, 并利用水槽实验探究不同水流速度 ($u=0.2\sim0.5$ m/s) 及不同冲角 ($\theta=0^\circ\sim90^\circ$) 条件下水螅类污损生物附着网片的水动力特性。结果显示, 水螅类生物附着程度随网片浸没时间先增后减, 附着程度最大出现在第 4 周水深 4.5 m 处, 网片湿重与附着程度正相关; 水螅类污损生物的附着显著改变了网片水动力特性, 附着程度最严重的网片 ($S_n=0.442$) 阻力与干净网片 ($S_n=0.146$) 的最大阻力相比增大至 6.09 倍, 最大升力增大至 5.99 倍; 水螅类生物附着的网片在不同冲角下对水动力系数的影响存在明显差异, 阻力系数相对于干净网片可增大 2.1 倍, 升力系数也相应地增大 2.0 倍; 冲角为 90° 时, 水螅类生物附着网片的阻力系数与密实度的拟合关系式为 $C_d=0.42+8.98S_n-7.78S_n^2$ ($R^2=0.803$, $S_n=0.145\sim0.442$)。研究表明, 水螅类污损生物的附着将明显增大网箱网衣的水动力荷载并将加剧网衣受力不均, 导致迎流面网衣面临更高的损坏风险, 在网箱设计和安全评估过程中必须综合考虑网衣升阻力变化对网箱结构安全性的影响, 同时在网箱养殖生产过程中应及时清除网衣污损生物以确保结构安全。本研究可为网箱的设计和优化以及网衣清洗提供参考, 有助于提升网衣系统的耐用性。

关键词: 污损生物; 生物附着网片; 水动力特性; 现场挂网实验; 水槽实验

中图分类号: S 969

文献标志码: A

近年来, 海水网箱养殖的迅速发展, 为人类提供了大量优质蛋白质。网衣系统是网箱的重要组成部分, 能够为养殖对象提供安全的生长环境, 具有防止养殖对象逃逸的重要作用。由于网衣长期浸设在海水环境中, 其表面极易遭受污损生物附着 (图 1)。污损生物是生长在船底和海洋设施 (如用于水产养殖的网箱) 上的动植物和微生物的总称, 这些生物附着使海洋设施结构性能下降或结构损坏的过程称为生物污损^[1-2]。海水养殖网箱

的生物污损已成为影响海水养殖产业的全球性问题^[3]。生物污损对养殖网箱的结构安全具有诸多负面影响, 如增大养殖设施在海流和波浪中受到的荷载, 加剧网箱变形和结构疲劳, 造成使用寿命缩短, 污损生物附着量的变化会导致网衣水动力特性及其他物理性质发生变化^[4]。据估算, 与生物污损相关的防治成本约占海水养殖业总生产成本的 5%~10%^[4]。中国海洋污损生物研究始于 20 世纪 30 年代, 研究重点为污损生物的种类组

收稿日期: 2024-07-30 修回日期: 2024-08-29

资助项目: 国家自然科学基金 (32473215); 山东省泰山学者工程专项经费 (tsqn202312091); 青岛市海洋科技创新示范工程项目 (23-1-3-hysf-2-hy)

第一作者: 刘融萍 (照片), 从事网箱水动力学研究, E-mail: liurongping@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 毕春伟, 从事深远海养殖设施与装备研究, E-mail: bichunwei@ouc.edu.cn



成、分布、发展变化规律及其防治。相关研究发现, 网衣除污技术主要包括物理法、化学法和生物法^[5], 但由于海洋污损生物的多样性及复杂性, 尚未有一种技术能够解决所有的生物污损问题^[6]。近年来一些可适当减缓网衣生物污损的新材料(超高分子质量聚乙烯网、半刚性 PET 网和金属网等)在海水网箱设施上逐渐得到使用^[7]。网衣作为网箱的基本构件, 其水动力性能直接影响渔业生产的效率与安全, 掌握污损生物附着下网衣的水动力性能十分重要。



图 1 污损生物贻贝 (a) 和水螅 (b) 的附着情况

Fig. 1 Fouling organisms attachment of mussels (a) and hydroids (b)

目前, 国内外学者针对污损生物附着对网线、网片和网箱等设施阻力变化的影响已经开展了部分研究。Swift 等^[8]通过水槽实验和海上实验研究了柔性污损生物附着网片的受力特性, 发现生物污损网片的阻力系数增加了 6%~240%。Gansel 等^[9]通过水槽实验对干净网片和生物附着网片进行测试, 研究发现相对于干净网片, 生物附着网片的阻力系数增大了 43%。Lader 等^[10]采用人工制作水螅模型的方法研究了生物附着网线的阻力, 结果表明生物附着网线阻力为干净网线的 1.5~3.8 倍。Bi 等^[11-12]对多组生物附着网片进行了水流和波浪作用下的水动力实验, 研究表明在水流作用下, 污损生物可使网片增加 10 倍以上的阻力荷载, 并计算得出波浪作用下的网片拖曳力系数和惯性力系数。Chen 等^[13]采用人工模型模拟了不同污损生物类型的网片, 研究发现附着程度最大的网片 ($S_n=0.661$) 阻力可增大 30 倍, 严重影响网状结构的安全性。前人的研究大多以阻力和阻力系数为主, 忽略了升力对网箱安全的重要性, 未综合考虑水动力特性的影响。

此外, 在自然海域环境中, 网箱网衣常面临水螅、麦秆虫、钩虾等不同生物类型的污损生物附着问题, 值得注意的是, 麦秆虫和钩虾作为活动型生物, 其附着能力弱, 在较大水流冲击下容

易脱落, 清除简单; 相比之下, 水螅作为固着型生物, 其附着能力强, 附着量大, 具有较强的再生能力, 去除难度大^[14-16], 对网衣水动力的影响更为严重。由于污损生物群落存在的这种复杂性和多样性, 污损生物附着对网箱网片的影响并未得到系统研究。目前针对生物附着网片水动力特性的研究, 主要有两种方法: 一是对现场挂网获得污损生物附着网片进行试验, 二是对布设的人工合成材料模拟污损生物的网片进行测试。现场采集的生物附着网片具有更准确地重现污损生物附着在网上的分布状态和附着效应的优点。因此, 本研究通过现场挂网获得不同附着程度的网片, 分析其优势种组成, 随后利用水槽实验研究优势种水螅类生物附着网片在水流作用下的水动力特性, 分析在不同水流速度和不同冲角条件下, 水螅类生物附着网片的水动力及水动力系数, 以期更深入地了解生物附着网片的水动力特性, 为网箱系统的安全性评估、养殖网箱的结构优化和设计提供依据。

1 材料与方方法

1.1 现场挂网

为获取不同生物附着程度的网片, 现场挂网于 2023 年 5 月至 7 月在山东省日照市东港区海源海洋牧场区 (35°14.558'N, 119°31.797'E) 进行。实验网片选用该海洋牧场区养殖网箱使用的黑色聚乙烯 (PE) 网片, 网片目脚长度为 22.5 mm, 网线直径为 1.67 mm。实验网片固定于直径为 6 mm、大小为 40 cm×40 cm 的不锈钢方形框架。为获得不同水深污损生物附着情况, 每组挂网各设置 3 个采样深度, 分别为 0.5 m、2.5 m、4.5 m (图 2), 网片间采用不锈钢链条和绳索连接, 底部悬挂沉子以保持网片稳定性。实验共设置 8 组挂网, 采样间隔为 1 周。以上采样方法参考《海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查》(GB/T 12763.6—2007)^[17]。

1.2 水槽实验

实验在中国海洋大学水产学院增养殖水动力实验室进行。实验水槽观察段尺寸为 4.0 m (长)×1.2 m (宽)×1.0 m (水深)。实验流速 (u) 设置为 0.207~0.509 m/s, 利用小威龙 (vectrino) 点式流速仪 (量程 0~2.0 m/s, 精度±0.5%) 测定 (表 1)。网片在水流作用下的阻力和升力通过标定的三分力传感器 (量程 100 N, 精度±0.3%) 测定。实验布设见图 3,

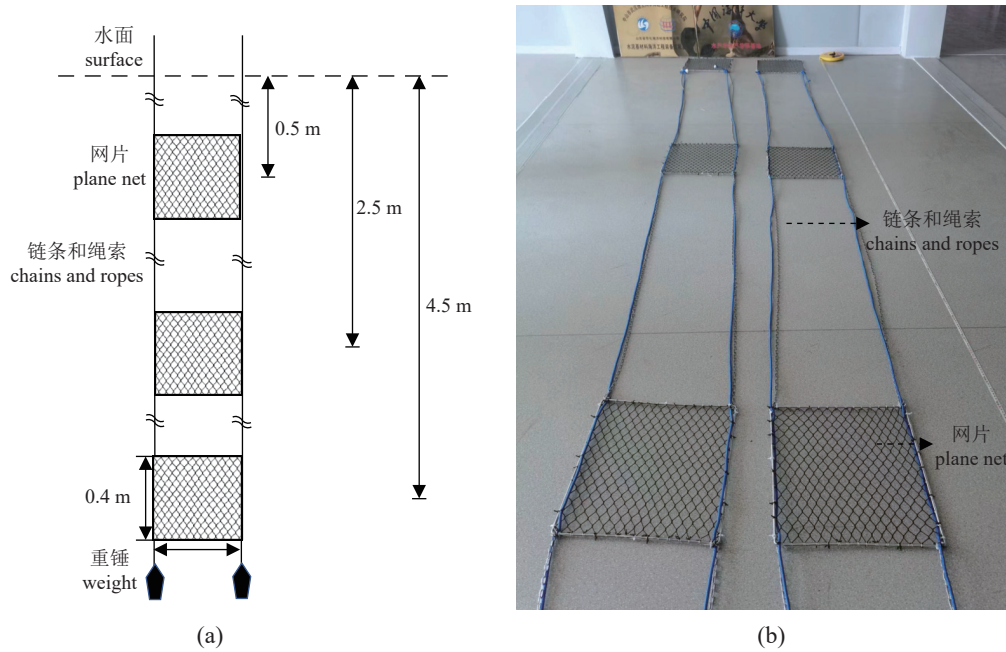


图 2 挂网结构简图 (a) 和实物图 (b)

Fig. 2 Sketch of the structure of the net (a) and actual picture of the net (b)

X 方向沿水流方向, Y 方向与水槽侧壁垂直, Z 方向垂直向上。实验开始前测量污损生物长度、网片重量以及计算网片密实度 (由于存在麦秆虫等附着能力弱的生物, 离开海水后易死亡脱落, 实验以开展实验时网片的最终密实度为准), 将网片固定于方形框架上, 网片上缘距离水面 0.1 m, 网片中心与流速仪距离 1.5 m。网片与水流冲角 (θ) 设置为 $0^\circ\sim 90^\circ$, 间隔 10° 。网片所在平面与水流方向平行时为 0° , 与水流方向垂直时为 90° 。数据采集时间为 20 s, 采集频率为 20 Hz, 每个工况重复 3 次, 最终实验结果取 3 次测量值的平均值。每次测试间隔 5~6 min, 待水面无波动后进行下次实验, 以减少水面波动对实验的干扰。实验平均水温为 28°C 。实验过程中操作人员均严格遵守实验动物伦理规范。

1.3 数据分析

物种优势度 Y 计算方法见公式 1:

$$Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i \quad (1)$$

表 1 水槽实验流速

Tab. 1 Actual velocity for flume test		m/s			
序号 no.		u_1	u_2	u_3	u_4
均值	average value	0.207	0.306	0.407	0.509
标准差	standard deviation	0.006	0.005	0.004	0.004

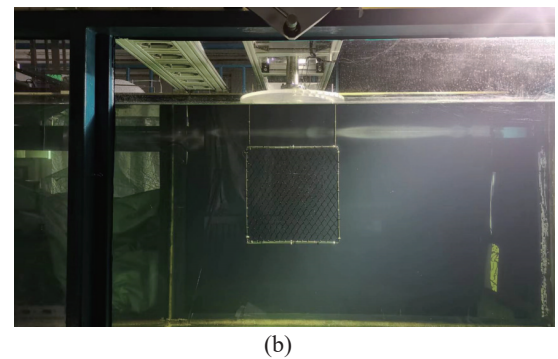
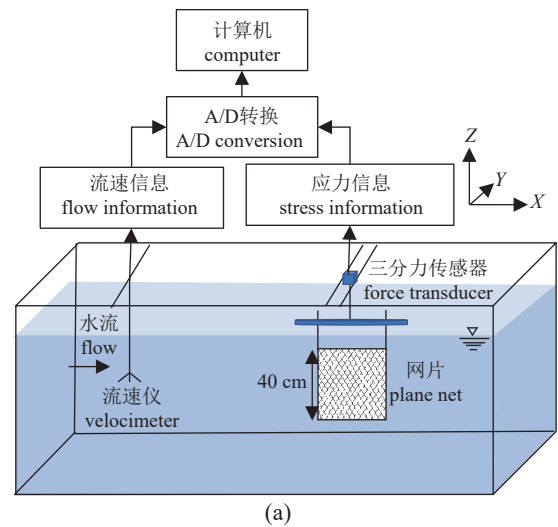


图 3 水槽实验示意图 ($\theta=0^\circ$)

(a) 实验装置简图; (b) 实际网片布设情况。

Fig. 3 Schematic diagram of the flume test ($\theta=0^\circ$)

(a) sketch of the experimental setup; (b) actual plane net deployment.

式中, n_i 为第 i 种的个体数量 (个); N 为某片网的总个体数 (个); f_i 为 i 种的出现频率。

网片密实度 S_n 采用密实度 (污损生物和网片投影面积之和与网片轮廓面积的比值^[6]) 定量分析污损生物在网片上的附着程度, 计算方法见公式 2。本研究采用图像法将图片进行二值化处理获得网片投影面积 (图 4)。

$$S_n = \frac{A_{\text{pro}}}{A_{\text{out}}} \quad (2)$$

式中, A_{pro} 为网片投影面积 (m^2); A_{out} 为网片轮廓面积 (m^2)。

网片水动力系数 网片的阻力和升力由网片带框架时受到的阻力和升力减去空框架阻力和升力。水动力系数是描述水动力性能的重要参数, 可以无量纲化物体在流体环境中的阻力和升力, 计算方法见公式 3、4^[18]:

$$C_{D_\theta} = \frac{2F_{D_\theta}}{\rho A_{\text{out}} S_n u^2} \quad (3)$$

$$C_{L_\theta} = \frac{2F_{L_\theta}}{\rho A_{\text{out}} S_n u^2} \quad (4)$$

式中, F_{D_θ} 为阻力 (N); F_{L_θ} 为升力 (N); C_{D_θ} 为阻力系数; C_{L_θ} 为升力系数; ρ 为水密度 (kg/m^3); u

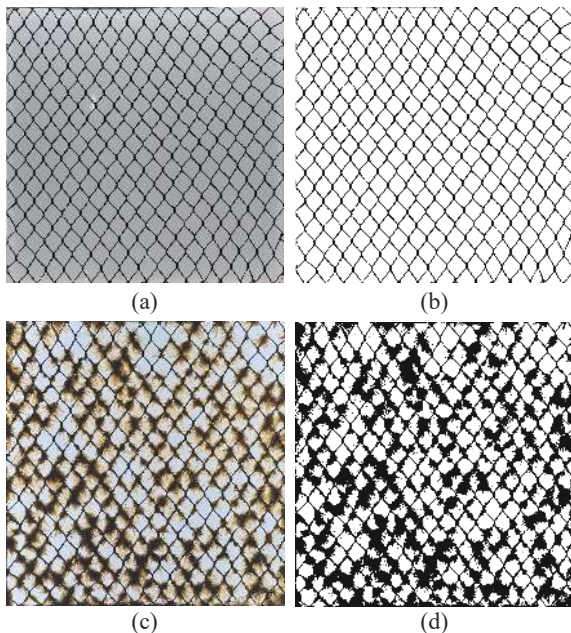


图 4 二值化计算密实度

干净网片 (a) 及其二值化图片 (b); 生物附着网片 (c) 及其二值化图片 (d)。

Fig. 4 Calculated solidity by binarization

clean net (a) and its binarized picture (b); bio-fouled net (c) and its binarized picture (d).

为实验流速 (m/s)。

2 结果

2.1 污损生物组成

现场挂网共鉴定出 3 种污损生物优势种, 分别为爱式麦秆虫 (*Caprella aino*, $Y=0.582$, 简称麦秆虫)、理石叶钩虾 (*Jassa marmorata*, $Y=0.049$, 简称钩虾) 及中胚花筒螭 (*Tubularia mesembryanthemum*, $Y=0.261$, 简称水螭), 三类优势种的出现频率均高于 0.8 (表 2)。由于麦秆虫、钩虾等属于活动型生物, 在运输中极易死亡, 且其附着能力弱, 去除简单, 对水动力特性的影响较小, 因此本研究按照开展水槽实验时以水螭类生物为主要附着物的网片密实度作为最终密实度以保证准确性, 并按照密实度大小将网片排序为 BN1 至 BN7, CN0 为干净网片 (表 3)。不同水螭类生物附着程度的网片 (简称生物附着网片) 随浸没时间和浸没深度的密实度变化如表 3 所示, 水螭附着程度随浸没时间增加略有减少, 水螭附着在第 4 周, 水深为 4.5 m 处出现最大值 ($S_n=0.442$), 与干净网片 ($S_n=0.146$) 相比, 附着程度增大约 203%; 随后水螭生物量逐渐减少, 在第 6 周, 水深 0.5 m 处, 网片 ($S_n=0.213$) 附着程度增大约 45.9%。网片湿重与密实度呈正相关关系, 密实度最大的网片 (BN7) 湿重为 0.245 kg, 密实度最小的网片 (BN1) 湿重为 0.060 kg。水螭最大平均长度 35.8 mm 出现在第 6 周, 最小平均长度 18.5 mm 出现在第 5 周。

2.2 网片水动力

不同冲角条件下污损生物附着程度变化对网片升力和阻力的影响如图 5 所示。结果显示, 在流速 $u=0.5$ m/s 时, 随着生物附着程度的加剧, 网片的阻力和升力均呈现不同程度的增长趋势。具体而言, 生物对网片的附着程度达到最高

表 2 网片污损生物的优势种类

Tab. 2 Dominant species types of net fouling organisms

污损生物种类 species of fouling organisms	出现频率 f_i frequency of occurrence	优势度 Y dominance	生活方式 lifestyle
爱式麦秆虫 <i>C. aino</i>	1.00	0.582	M
中胚花筒螭 <i>T. mesembryanthemum</i>	0.88	0.261	S
理石叶钩虾 <i>J. marmorata</i>	0.83	0.049	M

注: S. 固着或附着型, M. 活动或游泳型。

Notes: S. sessile or attached, M. motile or swimming.

表 3 不同水螅类生物附着程度的网片

Tab. 3 Net with different biofouling levels of hydroids

序号 no.	密实度 solidity	浸没深度/m depth	浸没周期 weeks	湿重/kg weights	平均长度/mm lengths
CN0	0.146	0.0	0	0.000	0.00
BN1	0.213	0.5	6	0.060	20.6
BN2	0.258	4.5	5	0.070	21.3
BN3	0.315	2.5	5	0.105	18.5
BN4	0.326	4.5	6	0.145	30.8
BN5	0.355	2.5	4	0.125	18.8
BN6	0.406	2.5	6	0.190	35.8
BN7	0.442	4.5	4	0.245	24.4

($S_n=0.442$) 时, 其阻力在冲角为 80° 达到峰值, 最大值为 26.22 N , 此时干净网片阻力最大值仅为 4.83 N ; 另一方面, 在冲角为 60° 时, 生物附着网片的升力达到最大值, 为 4.07 N , 此时干净网片升力最大值仅为 1.13 N 。不同附着程度网片的阻力均随着冲角的增大而增大, 在冲角达到 70° 后趋于稳定。相比之下, 网片升力呈现出先增后减的趋势, 总体上在冲角为 $50^\circ\sim 60^\circ$ 达到最大值。图 6 描绘了不同附着程度的网片阻力和升力与流速的变化关系。不同污损生物附着程度下, 网片阻力和升力均随着流速增加呈现非线性增长趋势, 并随着流速的逐步提升, 不同生物附着网片之间的受力差异逐渐扩大。为更清晰地揭示污损生物附着对网片升力和阻力的具体影响, 图 7 展示了生物附着网片与干净网片的最大阻力和最大升力的比值。结果表明, 在流速为 0.2 m/s 时, 生物附着网片 (BN) 与干净网片 (CN0) 的阻力比值最大, 其中, BN7 与 CN0 网片的阻力比值最大达 6.09 。整体而言, 生物附着网片与干净网片的阻力比值均

随着流速的增加呈现缓慢下降态势。相比之下, 升力比值最大值为 5.99 , 整体上随着流速增加而显著下降, 且附着程度越高的网片, 其升力比值的下降趋势越明显。生物附着网片阻力增幅为 $81.6\%\sim 443.2\%$, 升力增幅为 $94.0\%\sim 258.7\%$ 。

2.3 网片水动力系数

水流作用下不同附着程度的网片和干净网片的水动力系数随冲角的变化趋势如图 8 所示。对于阻力系数而言, 生物附着网片与干净网片的变化趋势相似: 随着冲角的增加, 先迅速增大随后趋于平缓。此外, 随着流速的提升, 污损生物附着网片的阻力系数存在小幅度降低, 与干净网片在阻力系数上的差异略有缩小。在冲角小于 30° 时, 不同附着程度网片的阻力系数接近, 而当冲角超过 30° 后, 差异明显增大。网片升力系数在冲角 $0^\circ\sim 50^\circ$ 内呈递增趋势, 在 50° 左右达到最大值, 之后随冲角增大升力系数开始下降。同时结果显示, 在流速 $u<0.3\text{ m/s}$ 时, 生物附着网片和干净网片之间的升力系数差异显著, 随着流速增大, 二者之间的差异逐渐减小。图 9 分别展示了冲角为 90° 以及冲角为 50° 时不同密实度的网片阻力系数和升力系数结果。由图可知, 生物附着网片的阻力系数随着密实度增加而增大, 最大值为 3.39 ($S_n=0.442$), 相较于干净网片增大 2.1 倍。网片的升力系数随密实度增大并无明显的线性关系, 存在先上升后略有下降, 紧接着又再度上升的趋势, 最大值为 0.823 ($S_n=0.442$), 较干净网片增大 2.0 倍。通过多项式拟合, 冲角 90° 时阻力系数与密实度的拟合公式为 $C_d=0.42+8.98S_n-7.78S_n^2$ ($R^2=0.803$, $S_n=0.145\sim 0.442$)。

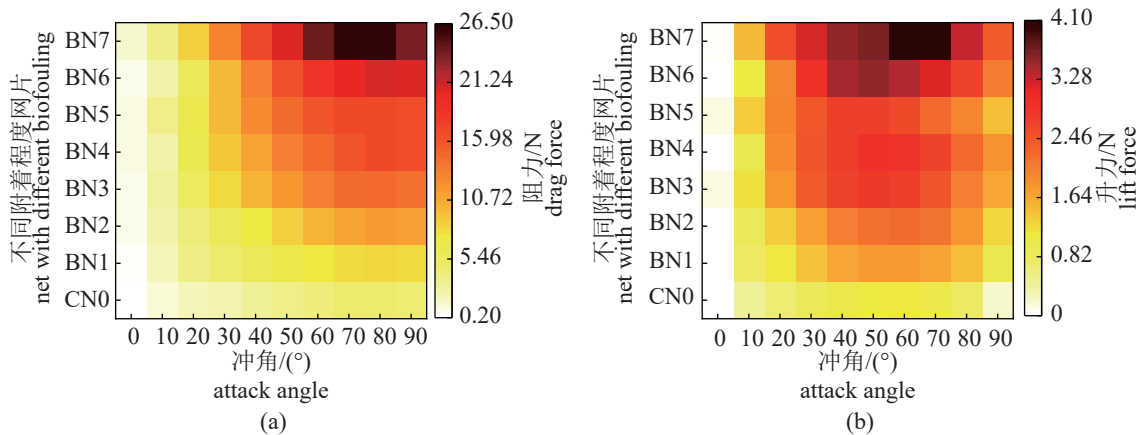


图 5 不同冲角下附着程度的变化对网片阻力 (a) 和升力 (b) 的影响 ($u=0.5\text{ m/s}$)

Fig. 5 Influence of biofouling levels on the drag force (a) and lift force (b) of net under different angles ($u=0.5\text{ m/s}$)

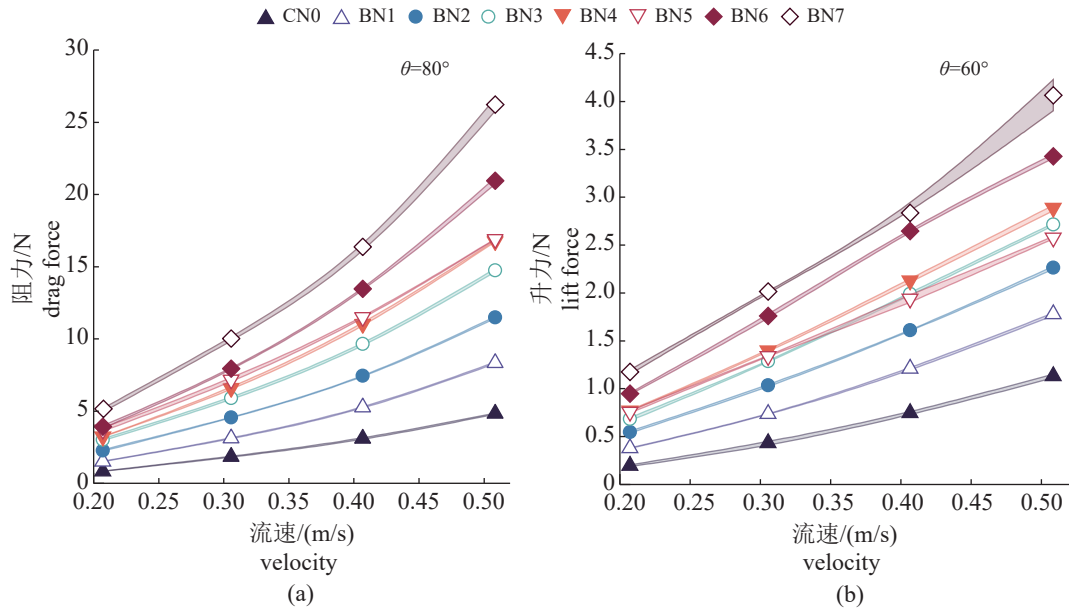


图 6 不同附着程度的网片阻力 (a) 和升力 (b) 随流速的变化

阴影区域为标准差。

Fig. 6 Variation of net drag force (a) and lift force (b) with velocity for different levels of biofouling

Shaded areas are standard deviations.

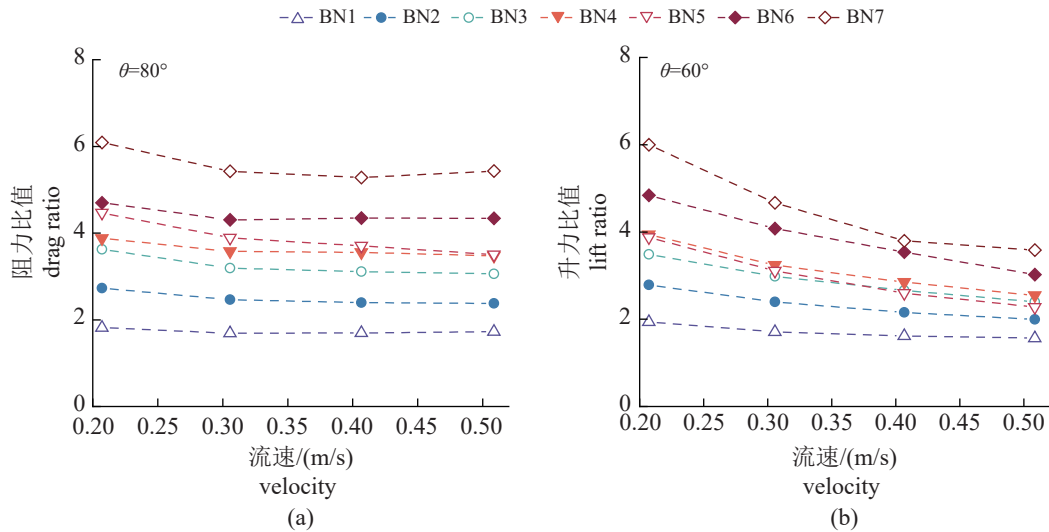


图 7 不同附着程度的网片与干净网片的阻力 (a) 和升力 (b) 比值

Fig. 7 Drag ratio (a) and lift ratio (b) for net with different levels of biofouling versus clean net

3 讨论

3.1 污损生物附着对网片水动力的影响

本研究聚焦于水螅类污损生物对网片水动力的影响, 发现其附着会显著增大网片阻力, 且阻力随着附着程度的加深而逐渐增加。这是由于污损生物堵塞了网目, 导致网片迎流面积增大, 进而改变了网片的水动力特性^[11, 19]。具体而言, 当污损生物的密实度增加 2.0 倍, 网片阻力增大为

干净网片的 6.09 倍, 这一增幅与 Chen 等^[13]对利用人工合成材料模拟柔性污损生物附着网片的研究结果存在一定差异。猜测此差异主要源于实验条件或网片类型不同导致: 本研究采用现场挂网方法获取生物附着网片, 这种方法使得污损生物在网片上的分布更接近自然状态, 即不均匀分布, 而其他学者的研究可能采用了不同的实验条件或网片类型 (如人工合成模型), 导致生物组成及分布形式有所差异。因此, 为更全面深入地理解污

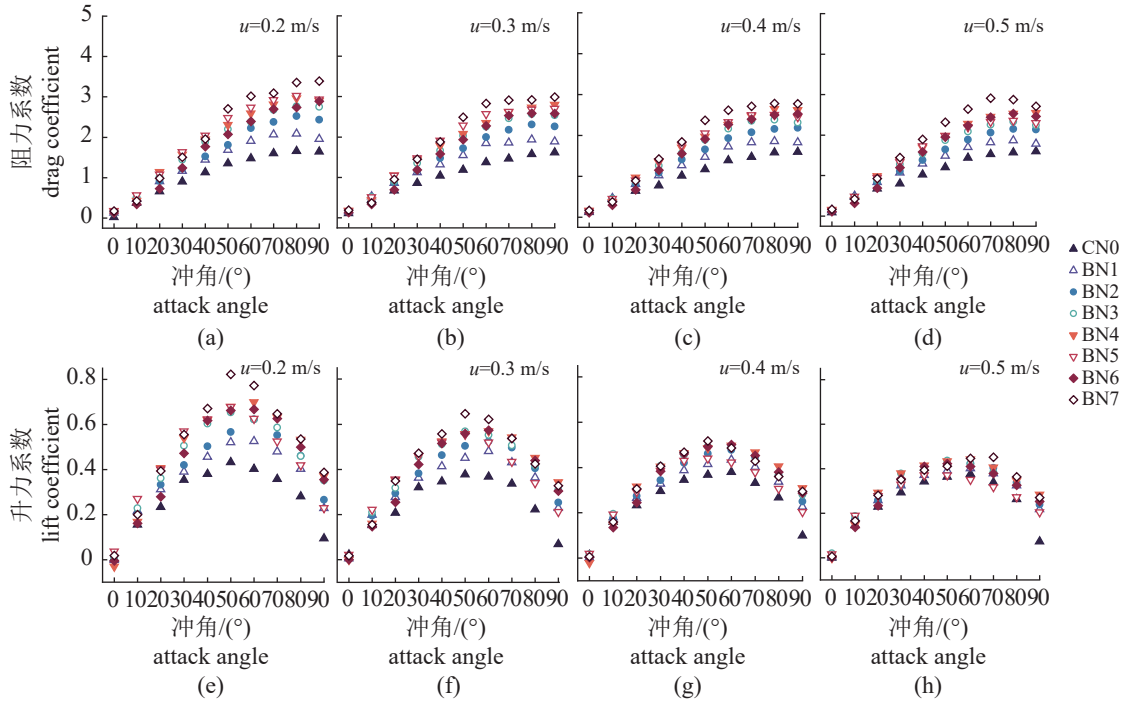


图 8 不同附着程度网片的阻力系数 (上) 和升力系数 (下)

Fig. 8 Drag coefficient (top) and lift coefficient (bottom) for nets with different levels of biofouling

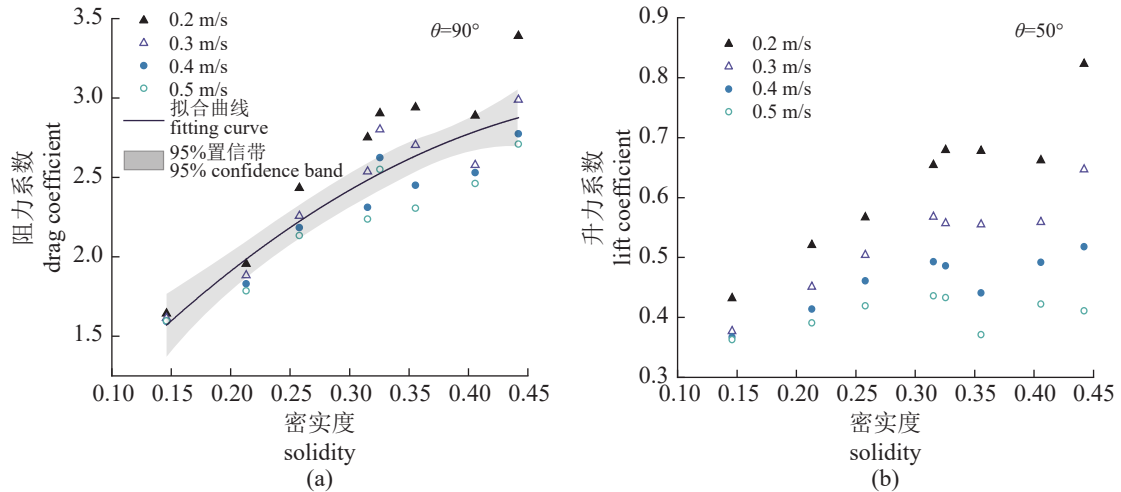


图 9 不同密实度的网片阻力系数 (a) 和升力系数 (b)

Fig. 9 Drag coefficient (a) and lift coefficient (b) of nets with different solidity

损生物附着对网片受力的影响, 未来研究应区分污损生物类型, 并考虑其在网片上的真实分布状态。

污损生物附着同样会导致升力增加, 且增大倍数与阻力的增大倍数相近。一方面是因为污损生物附着增加了网片厚度, 当冲角发生变化时, 网片厚度增大了迎流面积, 进而促使升力提升^[20-22]; 另一方面, 污损生物的长度亦对水动力性能产生影响。例如, Lader 等^[10]研究表明, 长度为 21 mm

的水螅较 9 mm 者更能显著增加阻力。Nobakht-Kolur 等^[23-24]进一步证实在规则波和不规则波环境中, 网衣系统受力状况与污损生物长度紧密相关。这也解释了为何在本研究中, 出现生物附着程度不同的网片 (如网片 BN4 和 BN5) 阻力接近, 但升力存在差异的现象。生物附着网片与干净网片的阻力和升力随流速增加均呈现非线性增加趋势, 二者的阻力比值则随着流速的增大呈现缓慢下降的态势, 升力比值则随流速的增加呈现明显的下

降趋势。这一现象可归因于水螅柔软、易变形的生物特性：当流速增大时，它们趋于直线排列并紧贴网片后方，有效减小了迎流面积，从而降低了升力和阻力增加幅度^[9-10]。Gansel 等^[25]对糖海带 (*Saccharina latissima*) 附着网片的阻力进行研究时也同样发现了类似现象。然而，在关于硬质生物附着网片的研究中并未观察到此现象^[13, 26]。

综上所述，污损生物附着程度增加即网片的密度增加，会在不同程度上导致网片的水动力增大，显著改变其水动力特性，对网箱整体结构的稳定性构成威胁。鉴于网衣污损生物种类及附着量在季节和海域间的差异性，本研究仅探究了密度小于 0.5 的生物附着网片水动力特性，今后还应进一步拓展至高密度情况，以全面、系统地量化生物附着对网片水动力的影响。

3.2 污损生物附着对网片水动力系数的影响

网片升阻力系数与冲角存在密切的关系^[27]。由于圆形网箱的独特形状，网衣在与水流交互过程中自然形成多角度，这使得网片与水流冲角的关系成为研究网片水动力系数的关键因素之一^[28-29]。计算水动力系数时，基于网片投影面积的阻力系数主要与网线面积或污损生物附着量有关^[11]。据此，本研究采用投影面积作为基准计算水动力系数。研究发现，无论冲角如何变化，生物附着网片升阻力系数的总体变化趋势均与干净网片相似，这表明污损生物的附着并不会改变网片在水流作用下的受力模式。然而，阻力系数随着污损生物量的增加，在不同冲角区间内表现出较大差异，小冲角下 ($\theta < 30^\circ$)，污损生物对网片的影响较小，但当冲角不断增大，污损生物对网片水动力系数的影响愈发突出。这是由于不同冲角条件下的污损生物附着加剧了网片周围流场的波动，导致水流扰动和分离现象增强，以及污损生物堆积与冲角间复杂的相互作用机制，共同影响着网片下游的水动力特性^[30-31]。在网箱实际生产环境中，当水流方向保持不变时，原本就存在的网衣受力不均问题会因为污损生物的逐渐附着而进一步加剧，特别是迎流面网衣的变形程度将远高于背流面网衣以及水流大致平行的网衣部分^[32-33]，其受力状况更为恶劣，从而增加了网箱结构的损坏风险。

对于网衣材质、网目大小等条件一致的网片，其水动力系数变化与密度 S_n 有关，这一参数

<https://www.china-fishery.cn>

可作为生物附着网片水动力变化的重要预测指标^[11, 13]，可估算出养殖网箱网衣系统的水动力载荷，从而有效评估网箱结构安全性。本研究预测了网片阻力系数与密度之间的关系，从而可有效估算出网片的阻力大小。然而，在污损生物附着情况下，未发现密度与升力系数有明显的定量关系，这可能是由于升力系数受流速变化的影响较大。鉴于此，未来研究应进一步聚焦于污损生物附着对网片升力系数的具体影响机制。

4 结论

污损生物的附着会影响网衣的水动力特性，本研究通过现场挂网分析了日照网箱养殖区域的污损生物优势种构成，获取了具有不同生物附着程度的网片，并在不同水流流速和冲角条件下深入探讨了水螅这类固着型生物附着对网衣水动力和水动力系数的影响。具体结论如下：①在日照海域的网箱养殖生产中，水螅是较为常见的网衣污损生物，其对网箱结构所受的海洋环境荷载影响显著，不容忽视。②污损生物的附着在不同程度上改变了网片阻力和升力。相较于干净网片，生物附着网片在阻力和升力方面均表现出相近的荷载增幅 (约 6 倍)，这一发现表明，在实际网箱养殖中必须考虑污损生物附着所导致的升力变化对网箱结构安全性的影响。③冲角的变化对生物附着网片升阻力系数的总体变化趋势并未产生根本性影响，而是主要作用于升阻力系数的增大幅度。当冲角大于 30° 时，不同附着程度网片的升阻力系数相对于干净网片可增加至 2 倍。④基于本研究实验结果，建立了冲角为 90° 时网片密度与阻力系数之间的数学关系式 ($C_{dF} = 0.42 + 8.98S_n - 7.78S_n^2$, $R^2 = 0.803$)，该公式适用于预测密度在 0.145~0.442 范围内的污损生物附着网片的阻力特性。然而，升力系数的变化受流速的影响明显，单纯依赖密度难以准确预测其变化。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Anisimov A V, Mikhailova M A, Uvarova E A. Modern approaches to the development of marine antifouling coatings[J]. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2019, 10(6): 1384-1389.
 - [2] 张俊波, 孙名山, 万荣. 海洋渔业装备生物附着控制技
- 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- 术研究进展 [J]. *中国水产科学*, 2021, 28(11): 1489-1503.
- Zhang J B, Sun M S, Wan R. Research progress of biofouling prevention techniques for marine fishery equipment[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(11): 1489-1503 (in Chinese).
- [3] Phillippi A L, O'Connor N J, Lewis A F, *et al.* Surface flocking as a possible anti-biofoulant[J]. *Aquaculture*, 2001, 195(3-4): 225-238.
- [4] Fitridge I, Dempster T, Guenther J, *et al.* The impact and control of biofouling in marine aquaculture: a review[J]. *Biofouling*, 2012, 28(7): 649-669.
- [5] 石建高, 余雯雯, 赵奎, 等. 海水网箱网衣防污技术的研究进展 [J]. *水产学报*, 2021, 45(3): 472-485.
- Shi J G, Yu W W, Zhao K, *et al.* Progress in research of antifouling technology of offshore cage netting[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(3): 472-485 (in Chinese).
- [6] 段继周, 刘超, 刘会莲, 等. 海洋水下设施生物污损及其控制技术进展 [J]. *海洋科学*, 2020, 44(8): 162-177.
- Duan J Z, Liu C, Liu H L, *et al.* Research progress of biofouling and its control technology in marine underwater facilities[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(8): 162-177 (in Chinese).
- [7] 石建高, 余雯雯, 卢本才, 等. 中国深远海网箱的发展现状与展望 [J]. *水产学报*, 2021, 45(6): 992-1005.
- Shi J G, Yu W W, Lu B C, *et al.* Development status and prospect of Chinese deep-sea cage[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(6): 992-1005 (in Chinese).
- [8] Swift M R, Fredriksson D W, Unrein A, *et al.* Drag force acting on biofouled net panels[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 35(3): 292-299.
- [9] Gansel L C, Plew D R, Endresen P C, *et al.* Drag of clean and fouled net panels—measurements and parameterization of fouling[J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0131051.
- [10] Lader P, Fredriksson D W, Guenther J, *et al.* Drag on hydroid-fouled nets —an experimental approach[J]. *China Ocean Engineering*, 2015, 29(3): 369-389.
- [11] Bi C W, Zhao Y P, Dong G H, *et al.* Drag on and flow through the hydroid-fouled nets in currents[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 161: 195-204.
- [12] Bi C W, Chen Q P, Zhao Y P, *et al.* Experimental investigation on the hydrodynamic performance of plane nets fouled by hydroids in waves[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 213: 107839.
- [13] Chen Q P, Bi C W, Zhang Z X, *et al.* Hydrodynamic effect of different biofouling types on aquaculture netting[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 279: 114430.
- [14] 许文军, 徐君卓, 陈连源. 几个养殖海区网箱附着生物主要种类及季节变化 [J]. *浙江海洋学院学报 (自然科学版)*, 2003, 22(2): 167-170.
- Xu W J, Xu J Z, Chen L Y. Main fouling organisms attaching to net cage & their seasonal change in Zhejiang sea areas[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition)*, 2003, 22(2): 167-170 (in Chinese).
- [15] 刘丽慧. 舟山市近海海域设施养殖用网生物附着特性及防护技术研究 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2018.
- Liu L H. Study on the characteristics of biological adhesion and protection technology of nets in Zhoushan coastal waters[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2018 (in Chinese).
- [16] 宋希坤, 冯碧云, 郭峰, 等. 中胚花筒媳辐射幼体附着和变态及其温盐效应 [J]. *厦门大学学报 (自然科学版)*, 2006, 45(S1): 211-215.
- Song X K, Feng B Y, Guo F, *et al.* Settlement and metamorphosis of actinula of *Tubularia mesembryanthemum* and effect of temperature and salinity[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science Edition)*, 2006, 45(S1): 211-215 (in Chinese).
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查: GB/T 12763.6—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey—part 6: marine biological survey: GB/T 12763.6—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese).
- [18] 周应祺, 许柳雄. 渔具力学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- Zhou Y Q, Xu L X. Mechanics of fishing gear[M]. Beijing: Science Press, 2017 (in Chinese).
- [19] 林旻, 邬骞力, 田会元, 等. 海上风机与养殖网箱融合系统中网箱系泊绳张力与导管架基础结构的安全性 [J]. *水产学报*, 2024, 48(6): 069517.
- Lin M, Wu Q L, Tian H Y, *et al.* Mooring rope tension

- and jacket infrastructure safety in integrated system of offshore wind turbine and fish cage[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2024, 48(6): 069517 (in Chinese).
- [20] Cha B J, Kim H Y, Bae J H, *et al.* Analysis of the hydrodynamic characteristics of chain-link woven copper alloy nets for fish cages[J]. *Aquacultural Engineering*, 2013, 56: 79-85.
- [21] Wu Q L, You X X, Huang L Y, *et al.* Hydrodynamic characteristics of rigid net panels for mariculture facilities as determined in flume-tank experiment[J]. *Applied Ocean Research*, 2024, 147: 103969.
- [22] Niño Y, Vidal K, Tamburrino A, *et al.* Normal and tangential drag forces of nylon nets, clean and with fouling, in fish farming. An experimental study[J]. *Water*, 2020, 12(8): 2238.
- [23] Nobakht-Kolur F, Zeinoddini M, Aalami Harandi M M, *et al.* Effects of soft marine fouling on wave-induced forces in floating aquaculture cages: physical model testing under regular waves[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 238: 109759.
- [24] Nobakht-Kolur F, Zeinoddini M, Ghalebi A. Hydrodynamic forces in marine-fouled floating aquaculture cages: physical modelling under irregular waves[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2021, 105: 103331.
- [25] Gansel L C, Endresen P C, Steinhovden K B, *et al.* Drag on nets fouled with blue mussel (*Mytilus edulis*) and sugar kelp (*Saccharina latissima*) and parameterization of fouling[C]//ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Trondheim: ASME, 2017: V006T05A008.
- [26] 赖艳. 硬质生物附着下网衣水动力特性实验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- Lai Y. The experimental study on hydrodynamic characteristics of hard-fouled nets[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021 (in Chinese).
- [27] 李玉成, 桂福坤. 平面无结节网衣水阻力系数的试验研究 [J]. *海洋学报*, 2006, 28(5): 145-151.
- Li Y C, Gui F K. Study on the drag coefficient of nodeless plane fishing net[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(5): 145-151 (in Chinese).
- [28] 陈鹿. 网片水动力系数实验研究及数值模拟 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- Chen L. Experimental study on the hydrodynamic coefficients of plane nettings and numerical simulation[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015 (in Chinese).
- [29] 王磊, 王鲁民, 万荣, 等. 铜合金编织网网片阻力水槽试验研究 [J]. *渔业现代化*, 2022, 49(3): 55-62.
- Wang L, Wang L M, Wan R, *et al.* Experimental research on resistance of copper alloy woven net in water tank[J]. *Fishery Modernization*, 2022, 49(3): 55-62 (in Chinese).
- [30] Yu S C, Qin H D, Li P, *et al.* Impact of the biological fouling on the hydrodynamic characteristics of nets under different current and attack angle conditions[J]. *Aquacultural Engineering*, 2024, 106: 102416.
- [31] Liu Z C, Guedes Soares C. Experimental study of the behaviour of a circular gravity cage in linear waves[J]. *Aquacultural Engineering*, 2022, 99: 102291.
- [32] Xu Z J, Qin H D. Fluid-structure interactions of cage based aquaculture: from structures to organisms[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107961.
- [33] 王笑, 黄六一, 鄂骞力, 等. 配重系统对 HDPE 圆形重力式网箱水动力特性影响研究 [J]. *渔业现代化*, 2024, 51(1): 29-38.
- Wang X, Huang L Y, Wu Q L, *et al.* Study on the influence of different weight systems on hydrodynamic characteristics of HDPE circular gravity fish cage[J]. *Fishery Modernization*, 2024, 51(1): 29-38 (in Chinese).

Experimental on hydrodynamic characteristics of the hydroid-fouled net

LIU Rongping, HUANG Liuyi, BI Chunwei*, SUN Mingshan, ZHANG Yuanmao

(Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266000, China)

Abstract: The massive attachment of fouling organisms will clog the net of fish cages, reduce the water exchange within the cages, and increase the structural load and deformation, which will lead to an increased risk of damage to the cage under severe sea conditions, and may cause significant economic losses. This study conducted a field test by deploying nets in marine cage aquaculture areas, obtaining nets with varying levels of biofouling ($S_n=0.213-0.442$) to study the effects of fouling organisms on the hydrodynamic characteristics of fish cage nets. The composition of the fouling organisms was analyzed, and flume tests were conducted to explore the hydrodynamic characteristics of hydroid-fouled nets for different flow velocities ($u=0.2-0.5$ m/s) and angles of attack ($\theta=0^\circ-90^\circ$). The results indicated that attachment of fouling organisms initially increased and then decreased with the duration of immersion time, with the maximum attachment occurring at a depth of 4.5 meters during the fourth week. There was a positive correlation between the wet weight of the net and the degree of attachment. Notably, the attachment of fouling organisms like hydroids significantly alters the hydrodynamic characteristics of the nets. The net with the most severe fouling ($S_n=0.442$) exhibited a 6.09-fold increase in maximum drag force and a 5.99-fold increase in maximum lift force compared to a clean net ($S_n=0.146$). The influence of hydroid-fouled nets on their hydrodynamic coefficients under varying angles of attack exhibits notable differences, the drag coefficient could increase by as much as 2.1 times, and correspondingly, the lift coefficient underwent a 2.0-fold enhancement, in comparison to clean nets. At an angle of attack of 90° , the relationship between the drag coefficient (C_d) and solidity ratio (S_n) of the hydroid-fouled nets was well-fitted by the equation $C_d = 0.42 + 8.98S_n - 7.78S_n^2$ ($R^2=0.803$, $S_n=0.145-0.442$). Our research showed fouling organisms, like hydroids, significantly affected the hydrodynamic loads on fish cage nets, worsening stress distribution, and increasing the risk of damage to the net. Therefore, in the design and safety assessment of cages, it was essential to comprehensively consider the impact of changes in net drag force and lift force on the structural integrity of the fish cage. Moreover, fouling organisms should be removed from the nets promptly to ensure structural integrity and safety during the production process of cage aquaculture. This study provides valuable insights for the design and optimization of fish cages, as well as for the scheduling of net cleaning practices. By addressing these aspects, we can enhance the durability of cage net systems, ultimately contributing to more sustainable and efficient aquaculture.

Key words: fouling organisms; hydroid-fouled net; hydrodynamic characteristics; field test; flume test

Corresponding author: BI Chunwei. E-mail: bichunwei@ouc.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (32473215); Special Fund of Taishan Scholars Program of Shandong Province (tsqn202312091); Qingdao Marine Science and Technology Innovation Demonstration Project (23-1-3-hysf-2-hy)