

# 超高分子量聚乙烯和铜合金网衣的污损生物附着特征研究

范晓旭<sup>1</sup>, 林 燊<sup>2</sup>, 刘 旦<sup>3</sup>, 田 伟<sup>4</sup>, 蒋 玫<sup>4</sup>, 李 磊<sup>4</sup>

1. 龙源电力集团股份有限公司, 北京 100032
2. 福建龙源海上风力发电有限公司, 福建 莆田 351174
3. 江苏海上龙源风力发电有限公司, 江苏 南通 226400
4. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090

**摘要:** 为研究不同材质网衣的污损生物附着效果, 于 2022 年 3—5 月 (春季) 和 6—8 月 (夏季) 在福建莆田南日岛海域开展超高分子量聚乙烯网衣和铜合金网衣的现场挂网实验。结果表明: 两种网衣污损生物的附着呈现出一定的季节性差异, 两种网衣污损生物的密实度、种类数量、优势种种类数、湿质量和密度均表现为春季低于夏季。其中, 超高分子量聚乙烯网衣春、夏季的密实度平均值分别为 47.19%、86.98%, 污损生物的湿质量平均值分别为 (144.83±15.69)、(1 054.59±34.81) g·网<sup>-1</sup>, 密度平均值分别为 (2 699±49)、(4 630±53) 个·网<sup>-1</sup>, 种类数分别为 12、35 种, 优势种种类数分别为 4、6 种; 铜合金网衣春、夏季的密实度平均值分别为 41.04%、74.95%, 污损生物的湿质量平均值分别为 (118.32±20.13)、(876.25±23.16) g·网<sup>-1</sup>, 密度平均值分别为 (2 678±42)、(3 870±64) 个·网<sup>-1</sup>, 种类数分别为 12、19 种, 优势种种类数分别为 3、4 种。春、夏季超高分子量聚乙烯网衣污损生物的密实度、种类数 (春季相同)、优势种种类数 (春季相同)、湿质量和密度平均值均高于铜合金网衣。海水温度的变化是污损生物季节性差异的主要原因, 铜合金网衣的防污损生物附着效果优于超高分子量聚乙烯网衣。

**关键词:** 污损生物; 超高分子量聚乙烯网衣; 铜合金网衣; 附着特征

中图分类号: S 968.1

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



## Study on adhesion characteristics of fouling organisms of ultra-high molecular weight polyethylene and copper alloys mesh

FAN Xiaoxu<sup>1</sup>, LIN Shen<sup>2</sup>, LIU Dan<sup>3</sup>, TIAN Wei<sup>4</sup>, JIANG Mei<sup>4</sup>, LI Lei<sup>4</sup>

1. China Longyuan Power Group Co. Ltd., Beijing 100032, China
2. Fujian Longyuan Offshore Wind Power Co. Ltd., Putian 351174, China
3. Longyuan Jiangsu Offshore Wind Power Co. Ltd., Nantong 226400, China
4. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

**Abstract:** In order to study the adhesion characteristics of fouled organisms on different materials of mesh, we had carried out on-site hanging experiments of ultra-high molecular weight polyethylene mesh and copper alloy mesh in the waters of Nanri Island, Putian City, Fujian Province during March–May 2022 (Spring) and June–August 2022 (Summer). The results reveal that the attachment of the two kinds of fouled organisms showed certain seasonal differences. The compactness, quantity of species, quantity of dominant species, wet mass and density of the two net-coated stained organisms were lower in spring than in sum-

收稿日期: 2023-07-12; 修回日期: 2023-08-01

基金项目: 国家能源集团 2020 年度十大重点科技创新项目“漂浮式海上风电关键技术研发与工程示范”(GJNY-20-17); 2022 年度福建省科技重大专项专题项目计划 (2022HZ028001)

作者简介: 范晓旭 (1982—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为海上风电融合深水网箱技术。E-mail: xiaoxu.fan@chnenergy.com.cn

通信作者: 李 磊 (1985—), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为渔业生态环境保护。E-mail: zheyilee@126.com

mer. In spring and summer, for ultra-high molecular weight polyethylene mesh, the average compactnesses were 47.19% and 86.98%, respectively; the average wet masses of fouling organisms were  $(144.83 \pm 15.69)$  and  $(1\ 054.59 \pm 34.81)$  g-net<sup>-1</sup>, respectively; the average densities were  $(2\ 699 \pm 49)$  and  $(4\ 630 \pm 53)$  ind-net<sup>-1</sup>, respectively; the quantities of species were 12 and 35, respectively; the quantities of dominant species were 4 and 6, respectively. In spring and summer, for copper alloy mesh, the average compactnesses were 41.04% and 74.95%, respectively; the average wet masses of fouling organisms were  $(118.32 \pm 20.13)$  and  $(876.25 \pm 23.16)$  g-net<sup>-1</sup>, respectively; the average densities were  $(2\ 678 \pm 42)$  and  $(3\ 870 \pm 64)$  ind-net<sup>-1</sup>, respectively; the quantities of species were 12 and 19, respectively; the quantities of dominant species were 3 and 4, respectively. The compactness, quantity of species (The same in spring), quantity of dominant species (The same in spring), wet mass and density of ultra-high molecular weight polyethylene mesh were higher than those of copper alloy mesh in spring and summer. The change of seawater temperature is the main reason for the seasonal difference of fouling organisms, and the anti-fouling biological adhesion effect of copper alloy mesh is better than that of ultra-high molecular weight polyethylene mesh.

**Keywords:** Fouled organism; Ultra-high molecular weight polyethylene mesh; Copper alloy mesh; Adhesion characteristics

水产养殖是世界上增长最快的食品生产领域之一,对全球粮食安全和优质蛋白质供给贡献重大,海水网箱养殖是其中的重要组成部分<sup>[1]</sup>。作为海水网箱养殖系统的核心构件之一,材质合适的网衣对于海水养殖生产至关重要。常规的聚乙烯和尼龙材料的养殖网衣很容易受到污损生物的影响<sup>[2]</sup>。污损生物在海水网箱养殖网衣上的附着已经成为一个日益影响海水养殖产业的全球性问题<sup>[3]</sup>。其会降低养殖网箱的容积,缩紧网眼,增加锚链的拖曳强度<sup>[3]</sup>,养殖网箱的质量也会严重增加,并进一步导致网箱浮力的降低和网衣形变的增加<sup>[2-3]</sup>。另外,污损生物的附着还会对网衣造成直接的物理损伤,加速其老化;网目尺寸的降低会减少水流、营养物质的交换和养殖生物自身排泄物的扩散稀释<sup>[4]</sup>。同时,溶解氧含量也会受其干扰,特别是在污损生物附着量较大的夏季,污损生物附着叠加较高的水温,加上污损生物自身的呼吸活动,会进一步加剧溶解氧含量的下降,严重时可能会出现缺氧现象,不仅影响养殖生产,还可能影响周边海洋环境,造成局部富营养化等负面影响<sup>[5]</sup>。此外,污损生物群落的形成可能会为寄生虫和病原微生物提供栖息场所,从而对养殖生物的健康产生潜在危害<sup>[6]</sup>。换网、人工或机器清理、防污涂层、化学产品的投入等物理、化学方法是海水网箱养殖业中常用的清除污损生物的途径,但上述方式可能会对周边海洋环境造成不利影响,有效性不强<sup>[7]</sup>,也会额外增加养殖成本,降低养殖收入<sup>[8]</sup>。因此,需要寻找更有效的替代策略。

使用新型材料是替代并弥补传统网衣材料缺点的一种可行性策略<sup>[9]</sup>。目前海水养殖领域已经涌现出超高分子量聚乙烯、龟甲网和金属网等材料,替

代传统的聚乙烯和尼龙材质的网衣,减少污损生物附着带来的危害<sup>[10]</sup>。其中,铜合金和超高分子量聚乙烯材料因其独特的性能而受到关注。铜合金是由铜和其他金属元素组成的合金材料,具有很好的抗腐蚀性、抗污损生物附着和抗凝水性能,以及较高的强度和耐磨性,已应用于海水养殖生产中,相比较传统网衣材料,其优越性也有相关报道<sup>[11]</sup>。超高分子量聚乙烯一般指相对分子质量在  $150 \times 10^4$  以上的无支链线性聚乙烯,分子链上基本不含极性基团,结晶度一般在 65%~85%,密度为  $0.920 \sim 0.964$  g·cm<sup>-3</sup>。相对其他常用的工程塑料,超高分子量聚乙烯的密度降低,而其断裂伸长率和抗冲击强度均大幅提升,使其在水产养殖领域得到了不少应用<sup>[12]</sup>。新材料的应用在防止污损生物附着和养殖生物逃逸,保持养殖生物健康,减少传统网衣材料对环境的潜在负面影响等方面均表现出了良好的应用前景。但目前关于不同材质新材料之间防止污损生物附着效果的比较研究仍较缺乏,国内极少见相关文献,需要进一步开展相关筛选研究。

本研究通过超高分子量聚乙烯材质网衣和铜合金材质网衣的现场海上挂网实验,比较分析 2 种材质网衣附着的污损生物的种类组成、数量、季节变化及演替规律等,为海水网箱养殖网衣新材料的应用筛选、网衣的维护和清洗策略提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

超高分子量聚乙烯纤维材料购自荷兰帝斯曼迪尼玛纤维公司(DSM Dyneema)并喷涂了防污涂层,铜合金材料购自日本三菱伸铜株式会社,由专

业网衣厂商编织成网,具体规格为30 cm×30 cm。其中,铜合金网衣网目尺寸(方形网目边长)为5 cm,网线直径4 mm;超高分子量聚乙烯网衣网

目拉直内径尺寸为5.2 cm,网线直径3 mm(图1)。另外配套的材料还包括钢筋、聚乙烯缆绳、尼龙扎带、铁锚、浮球等。

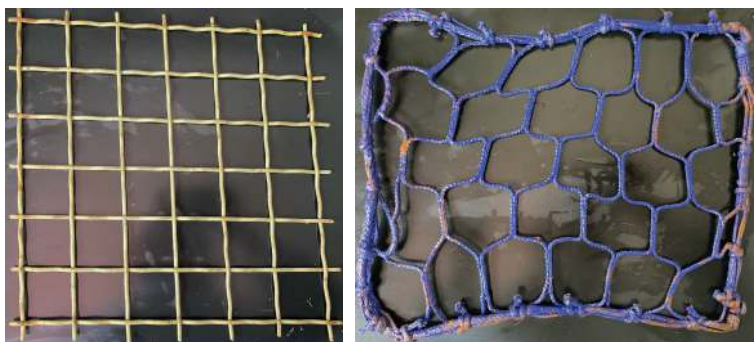


图1 铜合金网衣(左)和超高分子量聚乙烯网衣(右)

Fig. 1 Copper alloy mesh (Left) and ultra-high molecular weight polyethylene mesh (Right)

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 挂网制作

超高分子量聚乙烯和铜合金网衣首先使用与其大小匹配的钢筋框固定并连接在一起,用尼龙扎带将网衣固定在钢筋框上,每组网衣均为铜合金和超高分子量聚乙烯网衣各1片,在外侧4个角使用聚乙烯缆绳将网衣材料串联。

### 1.2.2 实验海域

经现场踏勘调研,现场挂网实验在福建莆田南日岛福建龙源风力发电有限公司风电场海域开展,具体位置为风电场的测风塔(119.54°E, 25.24°N)(图2-a)。实验海域水深约15 m,最低潮时水深约12 m,测风塔的桩基作为实验的挂点(图2-b)。

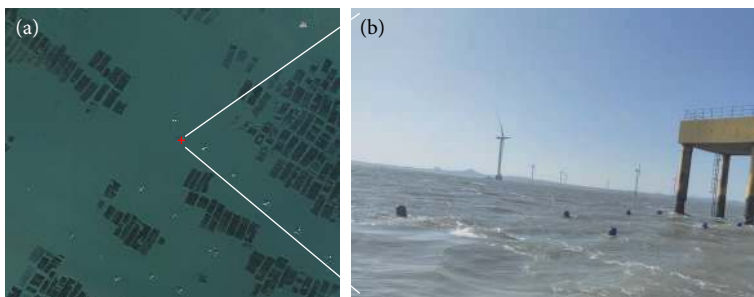


图2 实验点位

Fig. 2 Station of test

### 1.2.3 实验设计

由图2可知,实验场所养殖设施密布,受周边船只通航的影响,实验方案需要减少缆绳在水平方向上的伸展。实验示意图如图3所示,首先将约100 m长的缆绳两头分别固定在测风塔两侧的桩基上,向外拉伸,形成“U”形,在“U”形的中间位置,垂直方向上沉积物中布设1根铁锚用缆绳连接,使“U”形稳定,然后水平方向上在“U”形的一侧布设挂网材料,与海面垂直,离海面约0.5 m,挂网材料垂直方向上使用长度约16 m的缆绳与浮筒连接固定,保持挂网材料能够随潮水涨落。同时,在浮筒上使用黄色油漆标记不同挂网组,便于后续识别取样。取样或者更换新的网衣组

时,使用船舶起锚机将缆绳拉出海面取样或者更换新的网衣组,同时将网衣组拆解,分成单个网衣材料,然后平铺包装在聚乙烯密封袋中,分类编号带

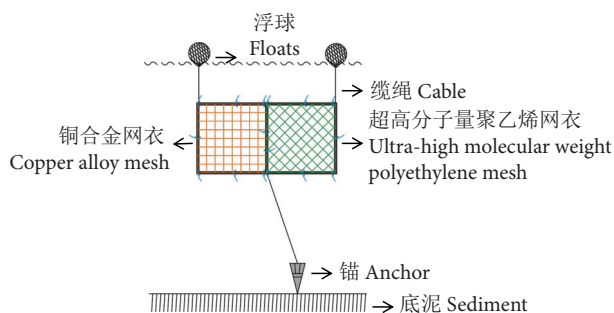


图3 实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experiment

回实验室待分析。

在污损生物生长旺盛的春季(2022年3—5月)和夏季(2022年6—8月)开展逐月现场实验。

#### 1.2.4 污损生物的鉴定分析

对每一个网衣对应的的污损生物用精密电子天平测定(精度为0.01 g)湿质量,采用体式显微镜进行种类鉴定。

#### 1.2.5 密实度计算

网衣密实度指污损生物和网线面积之和与网衣面积的比值,可以反映污损生物的覆盖情况,基于计算机识别技术的计算方法为:输入网衣图像,调整图像大小,选取网衣总面积,计算网衣区域面积

( $D_1$ ),利用大津算法(Otsu's method)将图像中的物体与背景进行自动分割,计算附着物及网线面积( $D_2$ )。示意图见图4。公式为:

$$\text{密实度} = (D_2/D_1) \times 100\% \quad (1)$$

#### 1.2.6 污损生物的群落优势种

采用相对重要性指数(IRI)进行污损生物的群落优势种分析<sup>[13]</sup>,公式为:

$$\text{IRI} = (W + N) \times F \times 10^4 \quad (2)$$

式中: $W$ 为某一类种的湿质量占总湿质量的百分比; $N$ 为某一类种的丰度占总丰度的百分比; $F$ 为该种类的出现频率。 $\text{IRI} \geq 1000$ 作为重要优势种的判别标准。

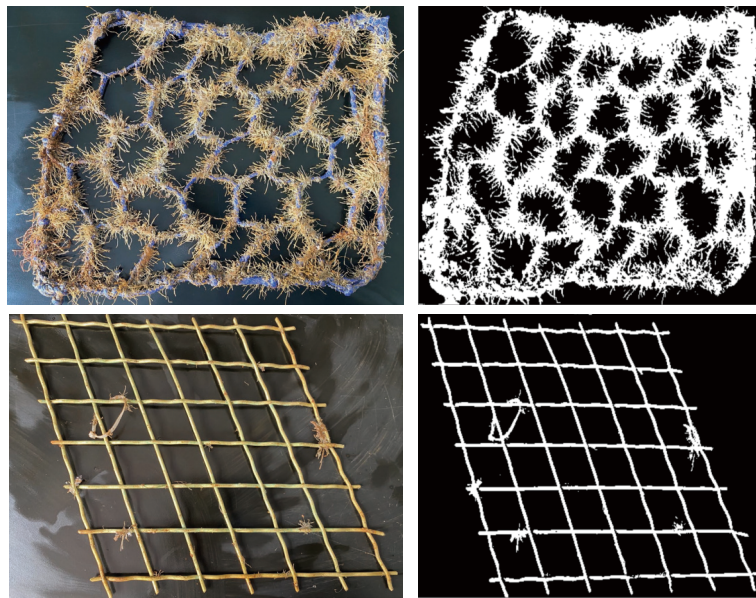


图4 密实度计算示意图

Fig. 4 Schematic diagram of water permeability

## 2 结果

### 2.1 春、夏季2种网衣的密实度变化

春、夏季高分子量聚乙烯网衣和铜合金网衣的密实度变化趋势(图5)表明,2种网衣的密实度变化趋势基本一致,整体上表现为春季至夏季逐渐增加。其中,高分子量聚乙烯网衣的密实度均高于铜合金网衣。

由高分子量聚乙烯网衣和铜合金网衣污损生物的附着情况(图6)可以直观地看出,春季3月2种网衣污损生物开始有少量附着,4月污损生物有比较明显的增加,5月污损生物的种类发生转变;夏季6月污损生物的种类又发生转变,且6—7月污损生物的附着量增加,8月污损生物的种类又发生转变。

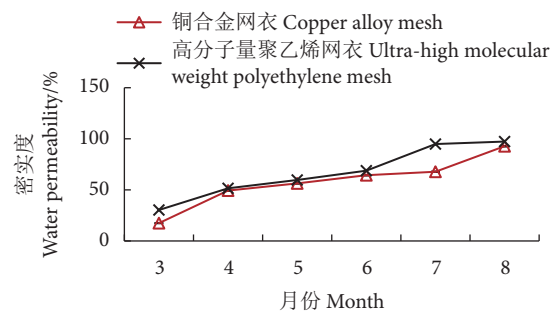


图5 不同季节高分子量聚乙烯网衣和铜合金网衣的密实度

Fig. 5 Water permeability of ultra-high molecular weight polyethylene mesh and copper alloy mesh in different seasons

### 2.2 春、夏季2种网衣污损生物的湿质量和附着密度

春季,高分子量聚乙烯网衣和铜合金网衣污损生物的平均湿质量分别为 $(144.83 \pm 15.69)$ 和 $(118.32 \pm 20.13)$  g·网<sup>-1</sup>;夏季,平均湿质量分别为 $(1054.59 \pm$

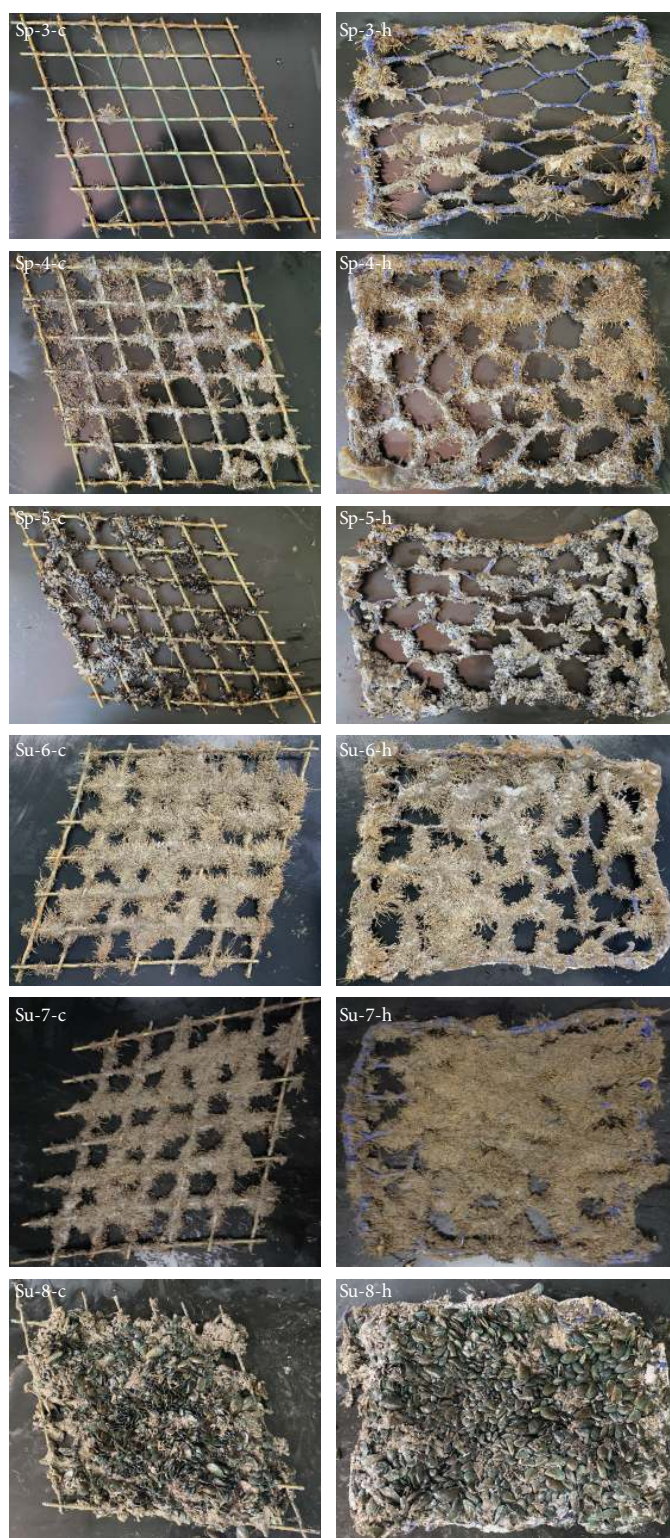


图6 春、夏季 2 种网衣污损生物的附着情况

注：图中 sp 代表春季，su 代表夏季；3—8 代表月份；c 代表铜合金网衣，h 代表高分子量聚乙烯网衣。

Fig. 6 Adhesion of fouled organisms of ultra high molecular polyethylene mesh and copper alloy mesh in different seasons

Note: In the figure, sp represents spring, and su represents autumn; 3—8 represent months, c represents copper alloy mesh, and h represents ultra high molecular polyethylene mesh.

34.81) 和  $(876.25 \pm 23.16)$   $\text{g} \cdot \text{网}^{-1}$ 。春季，高分子量聚乙烯网衣和铜合金网衣污损生物的平均密度分别为

$(2\ 699 \pm 49)$  和  $(2\ 678 \pm 42)$   $\text{个} \cdot \text{网}^{-1}$ ；夏季，平均密度分别为  $(4\ 630 \pm 53)$  和  $(3\ 870 \pm 64)$   $\text{个} \cdot \text{网}^{-1}$ 。整体上，

春、夏季高分子量聚乙烯网衣的平均湿质量和平均密度均高于铜合金网衣。

### 2.3 春、夏季 2 种网衣污损生物的种类构成

春季高分子量聚乙烯网衣共鉴定出 5 大类 12 种污损生物, 其中甲壳动物种类数最多 (5 种), 占总种类数的 41.67%; 藻类 4 种, 占总种类数的 33.33%; 软体动物、环节动物、刺胞动物各 1 种, 均占总种类数的 8.33%。春季铜合金网衣也共鉴定出 5 大类 12 种污损生物, 其中甲壳动物种类数最多 (5 种), 占总种类数的 41.67%; 藻类 3 种, 占总种类数的 25.00%; 环节动物 2 种, 占总种类数的 16.67%; 软体动物、刺胞动物各 1 种, 均占总种类数的 8.33%。

夏季高分子量聚乙烯网衣共鉴定出 7 大类 35 种污损生物, 其中以软体动物和甲壳动物种类数最多, 各 11 种, 均占总种类数的 31.43%; 藻类 6 种, 占总种类数的 17.14%; 环节动物 3 种, 占总种类数的 8.57%; 苔藓动物 2 种, 占总种类数的 5.71%; 刺胞动物、棘皮动物各 1 种, 均占总种类数的 2.86%。夏季铜合金网衣共鉴定出 6 大类 19 种污损生物, 其中以软体动物和甲壳动物种类数最多, 各 6 种, 均占总种类数的 31.58%; 藻类 3 种, 占总种类数的 15.79%; 环节动物 2 种, 占总种类数的 10.53%; 刺胞动物和苔藓动物各 1 种, 均占总种类数的 5.26%。

春季高分子量聚乙烯网衣和铜合金网衣污损生物种类数相同, 而夏季高分子量聚乙烯网衣污损生物种类数明显多于铜合金网衣。

### 2.4 春、夏季 2 种网衣污损生物的优势种类

春、夏季 2 种网衣污损生物的优势种类如表 1 所示。春季, 高分子量聚乙烯网衣出现的优势种有 4 种, 分别为长颈麦杆虫 (*Caprella equilibra*)、中胚花筒螭 (*Tubularia mesembryanthemum*)、理石叶钩虾 (*Jassa marmorata*) 和厚壳贻贝 (*Mytilus coruscus*); 铜合金网衣出现的优势种有 3 种, 分别为长颈麦杆虫、理石叶钩虾和厚壳贻贝。其中, 长颈麦杆虫、理石叶钩虾和厚壳贻贝是 2 种网衣的共同优势种, 第一优势种均为长颈麦杆虫, 高分子量聚乙烯网衣和铜合金网衣长颈麦杆虫的 IRI 分别为 4 740 和 3 676。

夏季, 高分子量聚乙烯网衣出现的优势种有 6 种, 分别为理石叶钩虾、长颈麦杆虫、翡翠股

贻贝 (*Perna viridis*)、中胚花筒螭、背棘麦杆虫 (*Caprella caura*) 和网纹藤壶 (*Amphibalanus reticulatu*); 铜合金网衣出现的优势种有 4 种, 分别为翡翠股贻贝、长颈麦杆虫、理石叶钩虾和中胚花筒螭。其中, 翡翠股贻贝、长颈麦杆虫、理石叶钩虾和中胚花筒螭是 2 种网衣的共同优势种。高分子量聚乙烯网衣第一优势种是理石叶钩虾, IRI 为 3 285, 而铜合金网衣第一优势种是翡翠股贻贝, IRI 为 4 138。

## 3 讨论

### 3.1 2 种材质网衣污损生物的生态特性

海水养殖网箱的网衣为各类污损生物的附着提供了附着基, 同时, 海水养殖网箱水体中丰富的营养盐为污损生物的生长提供了养料, 在环境合适时, 污损生物在网衣上大量繁殖生长, 其附着种类和附着量与养殖海域、养殖种类、养殖设施、养殖季节等因素密切相关<sup>[14]</sup>。目前已知的中国沿海主要污损生物可以分为藻类、腔肠动物、苔藓动物、多毛类动物、软体动物、甲壳动物、被囊动物及海绵动物等 8 大类群, 其群落组成有明显的地域性, 并呈季节性变化<sup>[15]</sup>。本研究实验点位于福建南日岛海域, 出现的污损生物共有 7 个类群, 基本覆盖了上述各类群。由于受当地海区的水温、盐度、光照、溶解氧、pH、水流和营养物质等环境因素的影响, 本研究出现的主要群落以近岸暖水种和沿岸温带广温种为主, 春、夏季 2 种网衣污损生物的主要优势种类与严涛等<sup>[16]</sup>报道的东海区主要污损生物优势种相吻合。本研究表明甲壳动物和软体动物是春、夏季的主要优势类群, 原因是软体动物中腹足类生物较多, 其生态习性使其容易附着在网衣上, 如藤壶幼虫可以释放一种黏合剂, 在适宜的附着表面进行永久附着<sup>[17]</sup>, 而贻贝则使用胶原蛋白形成的足丝与底质牢固结合, 进行选择性的附着<sup>[18]</sup>。随着网衣密实度的增加, 附着面积也随之增大, 给甲壳动物等污损生物的生存提供了良好的场所, 导致甲壳动物种类数随之增加。已有研究<sup>[19]</sup>表明, 东海海域污损生物出现的低谷期为水温较低的冬、春季, 其附着种数少, 附着密度低, 6—9 月则是东海海域污损生物附着量高的季节。本研究结果与该研究一致, 2 种网衣污损生物的种类和数量均表现出夏季高于春季, 特别是夏季总湿质量约为春季

表1 春、夏季 2 种网衣污损生物的优势种类统计  
Table 1 Statistics of dominant species of fouled organisms for two kinds of net in spring and summer

网衣类型 Type of mesh	春季 Spring				夏季 Summer			
	种名 Species name	数量 Quantity/ (个·网 <sup>-1</sup> )	湿质量 Wet mass/ (g·网 <sup>-1</sup> )	相对 重要性 指数 IRI	种名 Species name	数量 Quantity/ (个·网 <sup>-1</sup> )	湿质量 Wet mass/ (g·网 <sup>-1</sup> )	相对 重要性 指数 IRI
高分子量聚乙烯网衣 Ultra-high molecular weight polyethylene mesh	长颈麦杆虫 <i>Caprella equilibra</i>	19 647	25.02	4 740	理石叶钩虾 <i>Jassa marmorata</i>	13 326	13.65	3 285
	中胚花筒媳 <i>Tubularia mesembryanthemum</i>	131	202.42	3 970	长颈麦杆虫 <i>Caprella equilibra</i>	10 325	10.17	2 544
	理石叶钩虾 <i>Jassa marmorata</i>	15 582	7.18	3 451	翡翠股贻贝 <i>Perna viridis</i>	4 024	766.58	1 718
	厚壳贻贝 <i>Mytilus coruscus</i>	2 389	89.44	1 073	中胚花筒媳 <i>Tubularia mesembryanthemum</i>	139	349.86	1 549
	—	—	—	—	背棘麦杆虫 <i>Caprella caura</i>	5 407	13.35	1 367
	—	—	—	—	网纹藤壶 <i>Amphibalanus reticulatu</i>	393	639.55	1 146
铜合金网衣 Copper alloy mesh	长颈麦杆虫 <i>Caprella equilibra</i>	11 300	14.28	3 676	翡翠股贻贝 <i>Perna viridis</i>	3 435	675.28	4 138
	理石叶钩虾 <i>Jassa marmorata</i>	8 929	4.06	2 641	长颈麦杆虫 <i>Caprella equilibra</i>	5 392	5.91	2 813
	厚壳贻贝 <i>Mytilus coruscus</i>	2 520	129.50	1 356	理石叶钩虾 <i>Jassa marmorata</i>	4 845	5.60	2 529
	—	—	—	—	中胚花筒媳 <i>Tubularia mesembryanthemum</i>	103	208.87	1 641

注：—，未鉴定出。

Note: —, Not identified.

的 6~9 倍，总密度也比春季高约 1 000 个·网<sup>-1</sup>。这种季节性差异，是因为随着水温的升高，污损生物进入生长和繁殖旺盛期，个体增多，导致夏季 2 种网衣的密实度远高于春季<sup>[20]</sup>。春季的 3—4 月和夏季的 6—7 月 2 种网衣对湿质量贡献最大的附着生物均为中胚花筒媳，而 5 和 7 月对湿质量贡献最大的附着生物分别为厚壳贻贝和翡翠股贻贝，说明相同季节的不同月份之间污损生物的主要优势种也存在差异。由表 1 可以看出，春、夏季的优势种也存在差异，这与不同污损生物的最适生长温度有关<sup>[21]</sup>。

### 3.2 2 种材质网衣对污损生物附着的影响

目前世界范围内海水养殖网箱的网衣一般采用传统合成纤维网衣材料加工制作，在养殖生产中由于污损生物附着严重，严重影响了网箱养殖的正常生产。本研究结果表明，不同材质的网衣对污损生物的附着有较大影响，春、夏季高分子量聚乙烯网衣污损生物的湿质量和密度均高于铜合金网衣。

2 种不同材质的网衣悬挂于相同海域，季节、水温、盐度、水文等环境条件相同，出现的污损生物种类、群落和生物量的差异与网衣材质有关。细菌在不同材料的表面形成的微生物膜是污损生物附着的基础，铜合金作为一种金属网衣，具有抑制微生物菌类和水生生物的作用，其主要原理是铜/海水界面的化学作用可以释放出具有杀菌作用的铜离子和其他合金元素，使铜合金表面无法形成微生物膜，从而使污损生物无法附着<sup>[22]</sup>。这种抑制效果受铜/海水界面的化学作用及污损生物的附着强度控制，同时也受铜合金网衣周边物理、化学和生物因素的影响。尽管高分子量聚乙烯网衣拉伸力等综合性能也较优秀，且本实验用高分子量聚乙烯网衣也喷涂了防污涂层，但其防污损生物附着能力仍弱于铜合金网衣，可能是由于随着时间的延长，高分子量聚乙烯网衣的防污涂层由于环境条件的影响出现磨损、剥落；同时，由于高分子量聚乙烯网衣更

粗糙,更易于污损生物的附着。

值得指出的是,尽管铜合金网衣比超高分子量聚乙烯网衣的防污效果好,具有很好的抗腐蚀性、抗凝水性能,较高的强度、耐磨性、可回收利用性及较好的环保性能<sup>[11]</sup>,且已在日本、美国、北欧、澳大利亚等国家或地区的海水养殖领域开展了实际应用<sup>[9,23-24]</sup>。但是,铜合金网衣的成本及网箱规格和装配技术要求均较高,需要进一步研究和改进。建议根据养殖实际需求,将多种材质的网衣联合使用,既可降低成本,又能满足渔业发展的需要。

#### 4 结论

超高分子量聚乙烯和铜合金网衣的污损生物附着呈现出一定的季节性差异,2种网衣污损生物的密实度、种类数、优势种类数、湿质量和密度均表现为春季低于夏季。铜合金网衣的防污损生物附着效果优于高分子量聚乙烯网衣。

#### 参考文献:

- [1] EDWARDS P, ZHANG W, BELTON B, et al. Misunderstandings, myths and mantras in aquaculture: its contribution to world food supplies has been systematically over reported[J]. *Mar Policy*, 2019, 106: 103547.
- [2] BRAITHWAITE R A, CARRASCOSA M C C, MCEVOY L A. Biofouling of salmon cage netting and the efficacy of a typical copper-based antifoulant[J]. *Aquaculture*, 2007, 262(2/3/4): 219-226.
- [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] ECKMAN J E, THISTLE D, BURNETT W C, et al. Performance of cages as large animal-exclusion devices in the deep sea[J]. *J Mar Res*, 2001, 59(1): 79-95.
- [5] CRONIN E R, CHESHIRE A C, CLARKE S M, et al. An investigation into the composition, biomass and oxygen budget of the fouling community on a tuna aquaculture farm[J]. *Biofouling*, 1999, 13(4): 279-299.
- [6] TAN C K F, NOWAK B F, HODSON S L. Biofouling as a reservoir of *Neoparamoeba pemaquidensis* (Page, 1970), the causative agent of amoebic gill disease in Atlantic salmon[J]. *Aquaculture*, 2002, 210(1/2/3/4): 49-58.
- [7] WADDY S L, BURRIDGE L E, HAMILTON M N, et al. Emamectin benzoate induces molting in American lobster, *Homarus americanus*[J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 2002, 59(7): 1096-1099.
- [8] HODSON S L, BURKE C M, BISSETT A P. Biofouling of fish-cage netting: the efficacy of a silicone coating and the effect of netting colour[J]. *Aquaculture*, 2000, 184(3/4): 277-290.
- [9] KALANTZI I, ZERI C, CATSIKI V, et al. Assessment of the use of copper alloy aquaculture nets: potential impacts on the marine environment and on the farmed fish[J]. *Aquaculture*, 2016, 465: 209-222.
- [10] 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.
- [11] GONZÁLEZ E P, HURTADO C F, GACE L, et al. Economic impacts of using copper alloy mesh in trout aquaculture: Chilean example[J]. *Aquac Econ Manag*, 2013, 17(1): 71-86.
- [12] 周文博, 余雯雯, 石建高, 等. 超高分子量聚乙烯纤维在渔业领域的应用与研究进展[J]. *渔业信息与战略*, 2018, 33(3): 186-194.
- [13] 吴加文, 李众, 林和山, 等. 兴化湾污损生物群落结构及其时空格局[J]. *应用海洋学学报*, 2019, 38(4): 578-584.
- [14] BI C W, ZHAO Y P, DONG G H, et al. Drag on and flow through the hydroid-fouled nets in currents[J]. *Ocean Eng*, 2018, 161: 195-204.
- [15] 张明明, 赵文, 于世超. 我国海洋污损生物的研究概况[J]. *水产科学*, 2008, 27(10): 545-549.
- [16] 严涛, 刘姗姗, 曹文浩. 中国沿海水产设施污损生物特点及防除途径[J]. *海洋通报*, 2008, 27(1): 102-110.
- [17] CLARE A S, HØEG J T. *Balanus amphitrite* or *Amphibalanus amphitrite*? A note on barnacle nomenclature[J]. *Biofouling*, 2008, 24(1): 55-57.
- [18] CALLOW M E, CALLOW J E. Marine biofouling: a sticky problem[J]. *Biologist*, 2002, 49(1): 10-14.
- [19] 周家丽, 刘丽, 王学锋, 等. 中国沿海污损生物研究进展综述[J]. *南方论坛*, 2021, 52(10): 27-32.
- [20] 林和山, 王建军, 郑成兴, 等. 东山湾污损生物生态研究[J]. *海洋学报*, 2012, 34(6): 160-169.
- [21] 林更铭, 项鹏, 李炳乾, 等. 厦门港污损生物物种多样性和分布特征[J]. *海洋湖沼通报*, 2010, 12(3): 65-72.
- [22] CARVALHO M L, DOMA J, SZTYLER M, et al. The study of marine corrosion of copper alloys in chlorinated condenser cooling circuits: the role of microbiological components[J]. *Bioelectrochemistry*, 2014, 97: 2-6.
- [23] CHAMBERS M. Comparative growth and survival of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) cultured in copper and nylon net pens[J]. *J Aquac Res Dev*, 2012, 3(5): 137-142.
- [24] BUYUKATES Y. Environmental monitoring around an offshore fish farm with copper alloy mesh pens in the Northern Aegean Sea[J]. *J Environ Prot*, 2017, 6(2): 50-61.