

核电站冷源拦网海洋污损生物附着演替研究

田新华¹ 何光初¹ 杨佳宇² 万雨飞²

1. 中广核核电运营有限公司, 广东 深圳 518124;

2. 东华大学 纺织学院, 上海 201620

摘要:为提升核电站冷源系统取水安全性,针对我国 6 个典型滨海核电站所处海域,选取 2~50 mm 网目边长的超高分子量聚乙烯(UHMWPE)网片、5 mm 网目边长的尼龙(PA)网片和 5 mm 网目边长的聚乙烯(PE)网片为对象,通过试验系统分析夏季各核电站冷源拦网附着生物群落的结构特征,及其在不同网片上的附着演替规律,揭示了核电站冷源拦网海洋污损生物的时空分布差异与优势种演替机制。结果表明,南方海域(如 5 号核电站)夏季附着生物量显著高于北方海域,且存在生物爆发期,其中 2 号核电站 8 月挂板表面附着生物量峰值高达 1 563.81 g/m²。UHMWPE 网片展现出优异的初期抗污和拦污性能,明显优于 PA 网片和 PE 网片。网目边长对拦网防污与拦截效果影响显著,4 mm 和 5 mm 网目边长可实现防污与拦截效率的最优平衡。研究系统阐明了不同拦网结构和材质对海洋污损生物附着演替规律,可为核电冷源系统防污拦网的优化设计与工程应用提供理论依据和实践参考。

关键词: 核电;冷源系统;海洋污损生物;拦网;超高分子量聚乙烯(UHMWPE)

中图分类号:TS 101.4

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2026)02-0035-10

Research on the attachment succession of marine fouling organisms on cooling source interception net for nuclear power plants

Tian Xinhua¹, He Guangchu¹, Yang Jiayu², Wan Yufei²

1. China Nuclear Power Operations Co., Ltd., Shenzhen 518124, Guangdong, China;

2. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: To enhance the water intake safety of cooling source systems in nuclear power plants, this study targeted the sea areas where six representative coastal nuclear power plants in China. Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) nets with mesh sizes ranging from 2 to 50 mm, as well as 5 mm mesh nylon (PA) and polyethylene (PE) nets, were selected as research subjects. Through experiments, the structural characteristics of the attached biological communities and their attachment succession patterns on various cooling source interception nets of nuclear power plants during summer were systematically analyzed, and the temporal and spatial distribution differences of marine fouling organisms on cooling source interception nets nuclear power plants and the succession mechanism of dominant species were revealed. Results showed that attached organisms in southern

收稿日期:2025-07-25

作者简介:田新华,男,1972年生,正高级工程师,主要研究方向核电厂冷源安全管理,tianxinhua@cgnpc.com.cn

通信作者:何光初,高工,主要研究方向为核电厂冷源安全防护技术,heguangchu@cgnpc.com.cn

marine (such as nuclear power plant No. 5) exhibited significantly higher than northern regions during summer, with distinct biological outbreak periods observed. At nuclear power plant No. 2, peak biomass in August reached $1\ 563.81\ \text{g}/\text{m}^2$. UHMWPE nets demonstrated outstanding initial anti-fouling and screening performance, which substantially outperforming PA nets and PE nets. The mesh size had a significant impact on the anti-fouling and interception effects of the nets. 4 mm and 5 mm mesh sizes could achieve the optimal balance between anti-fouling and interception efficiency. This study systematically elucidated the successional dynamics of marine fouling organism attachment of various structures and materials. It provides theoretical foundation and practical reference for the optimized design and engineering application of anti-fouling nets in nuclear power plant cooling source systems.

Keywords: nuclear power; cooling source system; marine fouling organism; interception net; ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE)

作为一种高效且清洁的能源,核电在全球范围内得到了广泛应用。随着沿海核电站的大规模建设,保障其安全、稳定、高效运行已成为核能领域关注的重点问题^[1-3]。冷源系统是核电站运行的重要环节,其主要功能在于为反应堆和辅助设备提供可靠的冷却能力^[4]。其中,拦网作为取水口的第一道屏障,作用尤为关键,可有效拦截藻类、鱼类及漂浮垃圾等异物进入冷源系统^[5-6],确保设备的正常运行。

然而,拦网在长期服役过程中面临海洋污损生物附着问题^[7-8]。海洋污损生物主要包括藤壶、贻贝、牡蛎、海鞘、海藻及多种微生物^[1,9]。这些生物在拦网表面的附着和生长会导致拦网通流面积减少、水力阻力增大,严重时可能引发冷却水流量下降,甚至造成取水口堵塞,直接影响冷源系统的运行效率,甚至危害设备安全^[10]。此外,生物附着层还会加剧拦网腐蚀,缩短设备寿命,增加运维和检修成本^[11]。

近年来,针对核电冷源拦网的污损与堵塞问题,国内外研究主要聚焦海域生态监测预警和拦网污损防除两方面。海域生态监测预警系统能够实时监测海洋生物变化,并对潜在的海洋生物灾害进行提前预警。王涛等^[12]采用6束530~1 100 kHz频率的动态声呐系统,在辽东湾冷源取水口实现了对水母的实时监测,最大有效监测水深可达61 m,可有效识别伞径大于5 cm的生物个体。Koo等^[13]采用无人飞行器结合卷积神经网络算法对海域内水母进行识别与监测,识别率超过90%。拦网污损防除则是

通过物理或化学手段减少拦网上海洋污损生物附着。曹维杰^[14]设计了一种应用于核电冷源口的水下机器人,并建立了相应的水下运动模型与控制系统,可进行水下清理作业。物理防除手段能够切实有效地清除拦网污损,进而达成拦网多次复用的目标。然而,就当下实际状况而言,人工机械清除仍为主流模式,但该方式不仅清除时间较长,而且成本颇高。Ashraf等^[15]通过原位合成掺杂纳米氧化铜的聚乙二醇水凝胶,对尼龙网进行防污改性。挂板试验结果表明,改性后的尼龙网结垢密度显著降低。王建华等^[16]针对某滨海核电站防污涂料对海洋环境的影响展开了研究。研究表明,在2台核电机组运行条件下,周边海域铜离子质量浓度上升了 $2.4\ \mu\text{g}/\text{L}$,峰值达 $9.3\ \mu\text{g}/\text{L}$ 。化学涂层防污可有效延缓拦网污损,是目前最常用的网体防污方法,但防污涂料含有重金属离子,长期使用会引发污染问题,不利于海洋生态保护。

目前,关于核电冷源拦网网体结构设计的研究鲜有报道,网体材质和结构对海洋污损生物附着的影响尚不明晰。因此,本研究选取超高分子量聚乙烯(UHMWPE)、尼龙(PA)和聚乙烯(PE)3种网体材质以及不同网目边长的拦网,针对6个不同海域的核电站,通过实海挂板试验,系统探究了夏季各核电站海域海洋污损生物群落的生态特征,以及拦网网体结构和材质对网体表面附着演替的影响规律,揭示拦网海洋污损生物的附着演替规律,以期今后核电站冷源的防污拦网设计提供理论依据和指导。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

超高分子量聚乙烯网片网目边长分别为 2、4、5 和 50 mm, 分别命名为 UHMWPE-2、UHMWPE-4、UHMWPE-5 和 UHMWPE-50, 对应线径分别为 0.3、0.4、0.4 和 3.0 mm; 尼龙网片网目边长 5 mm, 线径 0.6 mm, 命名为 PA-5; 聚乙烯网片网目边长 5 mm, 线径 0.6 mm, 命名为 PE-5。其中, UHMWPE-2 和 PE-5 为无结网, UHMWPE-4、UHMWPE-5、UHMWPE-50 和 PA-5 为有结网。

1.2 试验地点

我国海域经纬度跨度较大, 且环境条件复杂多变, 本研究选取了 6 个典型滨海核电站所在海域作为研究对象。表 1 为 6 个核电站的具体地理位置, 其中, 3、4、5 和 6 号核电站依次往南分布于

南海。

表 1 6 个核电站的地理位置

Tab. 1 Geographical locations of six nuclear power plants

核电站	海域
1 号	渤海东北部
2 号	东海
3 号	南海
4 号	南海
5 号	南海
6 号	南海

1.3 试验方法

试验所用挂板由金属框架与 2 片网片组成, 如图 1 所示。金属框架采用 8 号钢筋, 尺寸为 800 mm×400 mm。标记为网片 A 和网片 B 的 2 片网片尺寸均为 400 mm×500 mm, 通过捆扎固定于金属框架上。挂板网片组合如表 2 所示。

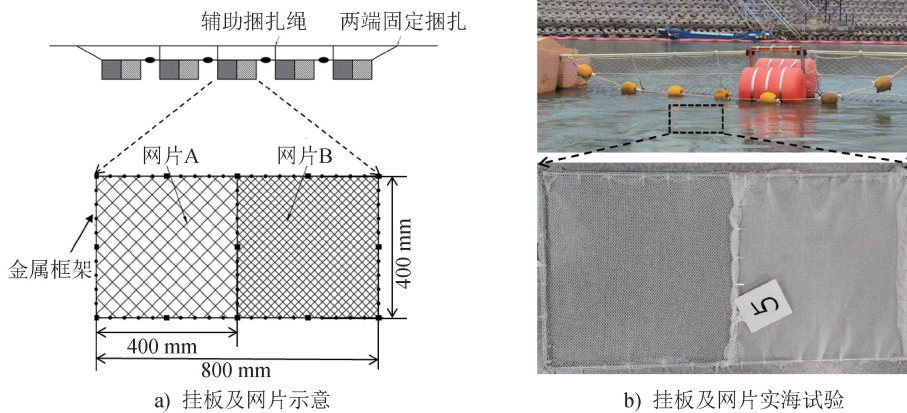


图 1 试验挂板及网片

Fig. 1 Test hanging plates and nets

表 2 挂板编号及其网片组合

Tab. 2 Plates number and its nets combination

挂板编号	网片 A	网片 B
挂板 A	UHMWPE-4	UHMWPE-4
挂板 B	UHMWPE-2	UHMWPE-4
挂板 C	UHMWPE-5	UHMWPE-50
挂板 D	PE-5	PA-5

为研究夏季不同海域挂板表面海洋污损生物的附着演替过程, 研究团队在 6 个滨海核电站海域开展挂板试验, 并定期回收试验挂板进行后续生物采样分析。首先, 6 个海域均选用挂板 A, 以在相同网片条件下分析各海域夏季海洋污损生物附着演替的

差异。其次, 为探究网体结构与材质设计对网体表面附着情况的影响, 本研究在 3 号核电站同时选用了挂板 B、挂板 C 和挂板 D 作为研究对象进行对比分析。挂板下水时间为当年的 6 月份前后, 挂板周期拟为 4 个月, 实际周期视挂板海洋污损生物附着情况适当调整。其中, 受 2 号核电站海域环境因素影响, 挂板试验在 8 月份才得以进行。挂板 A 在 6 个海域均各设置 10 个, 设计 5 个时间段进行挂板回收, 每次回收 2 个; 挂板 B、C 和 D 在 3 号海域均分别设置 20 个, 设计 5 个时间段进行挂板回收, 每次分别回收 4 个。表 3 为挂板试验具体实施及回收方案。

表 3 挂板试验回收方案设计

Tab. 3 Design of recovery plan for hanging plates test

挂板回收时间	挂板回收数量					
	1号核电站	2号核电站	3号核电站	4号核电站	5号核电站	6号核电站
第1次	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个) 挂板 B(4个) 挂板 C(4个) 挂板 D(4个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)
第2次	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个) 挂板 B(4个) 挂板 C(4个) 挂板 D(4个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)
第3次	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个) 挂板 B(4个) 挂板 C(4个) 挂板 D(4个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)
第4次	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个) 挂板 B(4个) 挂板 C(4个) 挂板 D(4个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)
第5次	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个) 挂板 B(4个) 挂板 C(4个) 挂板 D(4个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)	挂板 A(2个)

注:挂板总数为120个。

1.4 附着生物群落分析方法

挂板试验结束后,对网片进行回收和处理,并对挂板上的生物采样分析。挂板试验的生物样品处理方式参照《海洋调查规范》^[17]有关规定进行。首先分别称量网片上的湿态附着泥沙量和生物量,然后剥离网片上的附着生物,并置于孔径为0.5 mm的筛网中进行淘洗,最后进行分类和鉴定。

采用 McNaughton 物种优势度指数(Y)评价附着生物种类的优势度,某物种优势度(Y_i)根据式(1)进行计算。

$$Y_i = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (1)$$

式中: n_i 为站位中第*i*个物种的个数; N 为站位中附着生物总个数,涉及藻类时使用生物量(g/m^2); f_i 为第*i*个物种在各站位中出现的频率(站位指同一海域不同位置)。当 $Y > 0.020$ 时,将该物种认定为优势种;当 $Y > 0.100$ 时,则将该物种确定为主要优势种。

采用 Margalef 丰富度指数(D)评价附着生物群

落中生物种类的多寡,根据式(2)进行计算。

$$D = \frac{M - 1}{\ln N} \quad (2)$$

式中: M 为附着生物群落中的总物种数。

采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')评价附着生物群落的生态学特征,根据式(3)进行计算。

$$H' = - \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N} \quad (3)$$

式中: S 为站位中附着生物总种数。

采用 Pielou 均匀度指数(J)评价附着生物群落中的物种均匀程度,根据式(4)进行计算。

$$J = \frac{H'}{\ln S} \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 各海域拦网夏季附着演替

图2为6个滨海核电站海域挂板A定期回收记录,展示了不同海域挂板A表面附着生物的演替。如图2所示,1号海域挂板下水第10天藻类附着明

显,第 20 天形成群落,第 32 天增长停滞,后期附着量明显低于其他海域。2 号海域挂板下水第 7 天泥沙、藻类及小型虾类附着多,第 15 天藻类生长快,第 23 天附着严重并致网体失效。3 号海域挂板表面前期有少量淤泥,下水第 31 天生物生长迹象明显,后期大型固着生物较少。4 号海域挂板表面前期见淤

泥和小型虾类,下水第 37 天无明显生物个体,但后期大型固着生物生长旺盛。5 号海域挂板下水第 10 天泥沙多,第 31 天有明显黑荞麦蛤生长迹象,第 54 天大型固着生物大幅增加。6 号海域挂板表面初期见淤泥,无明显生物附着迹象,第 33 天有明显黑荞麦蛤等生长迹象,后期数量略增。

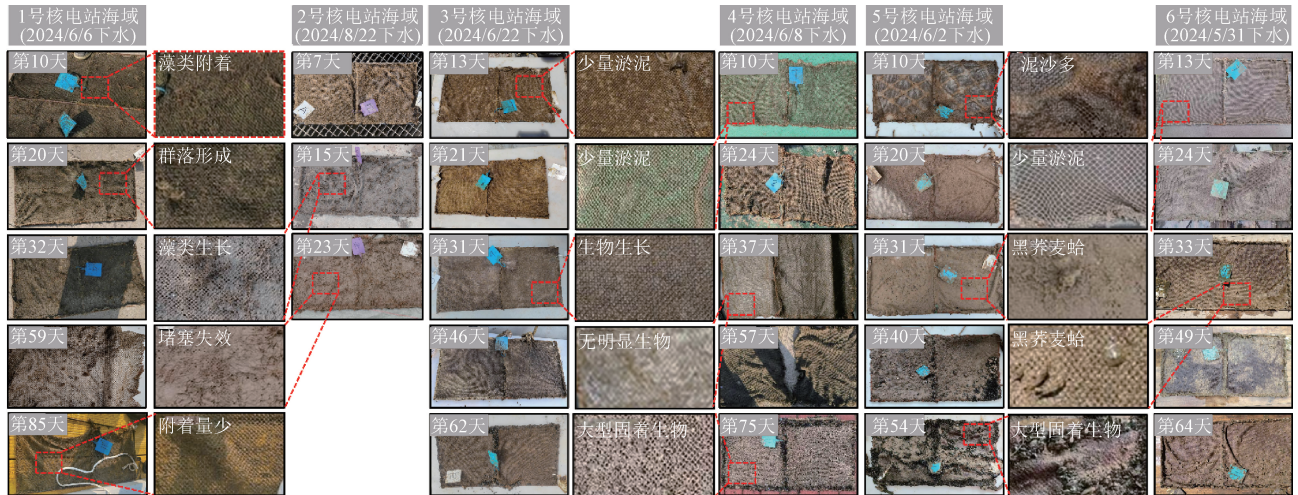


图 2 夏季各海域挂板 A 表面附着演替过程

Fig. 2 Surface attachment succession process of handing plate A in various sea areas during summer

图 3 为夏季各海域挂板 A 表面附着物的组成变化,包括泥沙和海洋污损生物,可以看出:1 号海域泥沙量随时间显著增加,生物量显著减少,其中,8 月附着泥沙量最高 (98.23%),生物量最低 (9.48 g/m²),泥沙堵塞风险上升。2 号海域 9 月附着泥沙量和生物量均低于 8 月,其中,8 月生物量较高 (1 563.81 g/m²),这归因于 2 号海域地处三都澳内湾,8 月表层水温 25~30 ℃,适宜浮游植物、附着

生物快速生长,且水体交换差易富营养化,导致贻贝或藤壶等固着生物大规模爆发,形成污损和堵塞高风险期。3 号和 5 号海域挂板表面泥沙量随时间显著下降,生物量显著增加,表明附着生物夏季渐活跃。4 号海域泥沙量在 6、7、9 月均极高 (6 月最高 99.97%),8 月显著下降;结合生物量变化,8 月为附着海洋污损生物集中爆发期。6 号海域挂板表面泥沙量随时间略降,生物量略增,月际变化不显著。

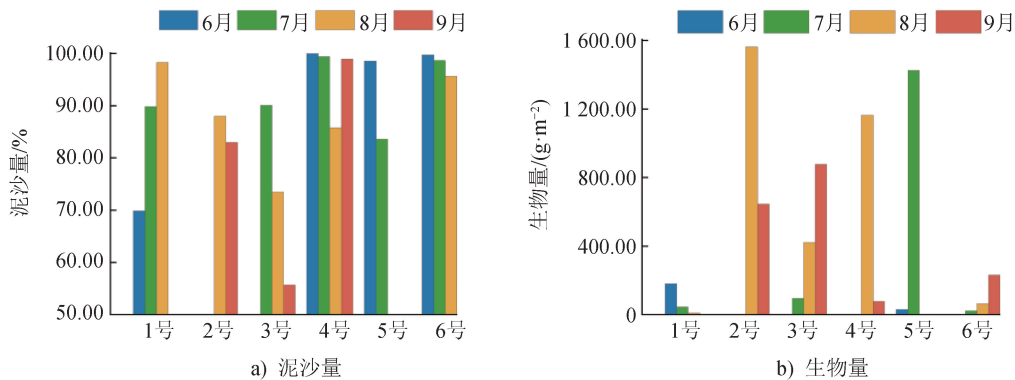


图 3 夏季各海域挂板 A 附着物组成变化

Fig. 3 Changes in the composition of attachments of handing plant A in various sea areas during summer

总体而言,夏季各核电站海域拦网附着物组成

和月际变化差异显著:1 号和 6 号海域挂板表面附

着生物量少,以泥沙淤堵为主;2、3和5号海域挂板表面泥沙相对较少,附着生物量多且集中在特定时间段,堵塞主要由海洋污损生物附着引发;4号海域挂板表面附着泥沙量极高,8月泥沙与海洋污损生物同时大量附着,构成堵塞高风险期。

2.2 各海域拦网附着生物群落特征

对6个海域挂板表面的附着生物群落进行筛选统计,共鉴定出54种附着生物,隶属于9个门类。如图4a)所示,节肢动物门和软体动物门的物种占比最高,分别为35%和31%;环节动物门(13%)、红藻门(7%)和绿藻门(6%)次之;星虫动物门、刺胞动物门、脊索动物门和蠕虫动物门占比最少,均为2%。

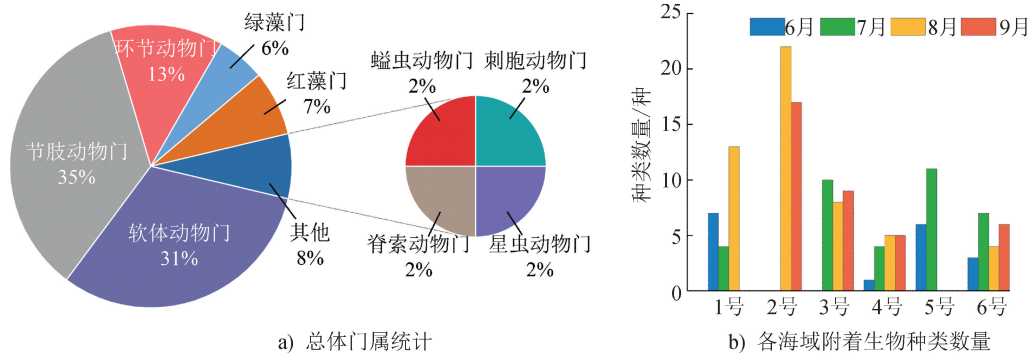


图4 夏季各海域挂板A附着生物种类

Fig. 4 Types of attached organisms of handing plant A in various sea areas during summer

为反映各海域挂板表面附着生物群落生态特征,计算了夏季各海域挂板表面生物群落的丰富度指数、均匀度指数和多样性指数(图5)。各海域挂板表面生物群落在丰富度、均匀度和多样性方面均呈现显著时空差异。1号核电站海域,3项指数月际差异显著,尤其6月与7、8月差异大,这归因于7月—8月为辽东湾全年水温最高期,适宜硅藻、贝类等附着生长。2号核电站海域,附着生物种类显著高于其他海域[图4b)],且图5显示其8、9月的3项指数与其他海域接近,表明该海域存在优势种且优势度高。3号核电站海域,3项指数随月际变化不断升高,9月分别达1.12、0.55和1.07,表明该海域附着生物种类多且活跃于夏季。4号核电站海域,3项指数7月最高(1.44、0.95、1.04),8、9月显著降低,表明7月出现明显优势种。5号核电站海域,6月3项指数(0.77、0.60、0.91)均高于7月(0.71、0.37、0.61),表明6月优势种优势效应较

夏季各海域挂板表面附着生物种类数量变化如图4b)所示。1号核电站海域,附着生物种类数量7月最少(4种),8月最多(13种);2号核电站海域,8月(22种)高于9月(17种);3号核电站海域,附着生物种类数量随时间无明显变化(7月10种、8月8种、9月9种);4号核电站海域,8月和9月最高(均为5种),6月仅毛头梨体星虫1种;5号核电站海域,7月(11种)高于6月(6种);6号核电站海域,6月最少,仅螺赢蜚、钩虾和黑芥麦蛤3种。总体上,2号核电站海域挂板表面生物种类数量显著多于其他海域,4号核电站海域相对最少。此外,1、2和5号核电站海域附着生物种类数量月际差异显著,而3、4和6号核电站海域变化相对稳定。

高。6号核电站海域,3项指数虽有显著月际变化,但整体呈波动趋势,说明其生物群落结构相对稳定。总体而言,6号核电站海域因位于北部湾热带边缘海,生态系统多样,夏季群落结构相对稳定,不易发生附着生物集中爆发;其余5个海域生物群落月际变化显著,生物群落结构不稳定,夏季易发生附着生物集中爆发,存在拦网堵塞风险。

夏季各海域挂板表面附着生物种类繁多且月际变化显著,采用McNaughton物种优势度计算式计算优势度指数(图6), $Y > 0.020$ 定为优势种, $Y > 0.100$ 定为主要优势种。1号核电站海域,共5种优势种,其中,节江藻为夏季各月共有主要优势种。6月主要优势种为钩虾、螺赢蜚和节江藻,优势度接近呈竞争态势;7月麦秆虫优势度急剧上升成为主要优势种,表明其呈现阶段性爆发;8月出现织纹螺幼体主要优势种。2号核电站海域,仅有钩虾和节江藻2种优势种,且均为主要优势种,优势度高。结合生

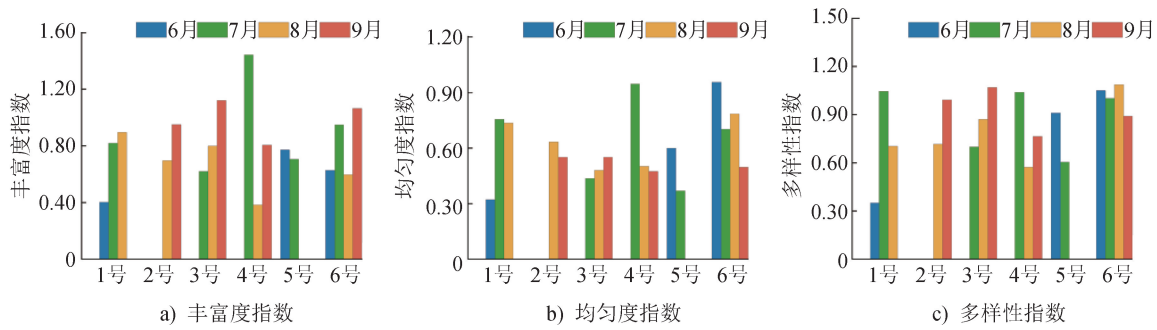


图 5 夏季各海域挂板 A 表面附着生物群落特征

Fig. 5 Characteristics of the biological communities attached of handing plates A in various sea areas during summer

物量变化,可判断两者是 2 号海域挂板表面海洋污损生物爆发和附着的主要物种。3 号核电站海域,主要优势种包括钩虾、黑荞麦蛤、翡翠贻贝和刻缘短齿蛤 4 种。夏季贻贝类生物爆发附着明显,需采取针对性防控措施。4 号核电站海域,主要优势种优势效应突出;6 月仅毛头梨体星虫,优势度达 1.000;8、9 月网纹藤壶优势度分别达 0.931 和 0.762。各物种优势度差异明显,单一物种具有绝对优势。5 号核电站海域,主要优势种有黑荞麦蛤、网纹藤壶

和螺赢蜚 3 种,其中,黑荞麦蛤在 6 月(优势度为 0.763)和 7 月(优势度为 0.664)均占绝对优势。6 号核电站海域,共 8 种优势种,种类相对丰富,其中:光背节鞭水虱和紫贻贝为特有优势种;黑荞麦蛤优势度显著突出,6 月至 9 月逐步上升,9 月达 0.736。各海域挂板表面附着生物优势种随季节变化显著,各月份均存在绝对优势种,存在海洋污损生物爆发和附着风险。总体而言,网纹藤壶、钩虾和黑荞麦蛤是多个海域共有优势种,需作为重点防控对象。

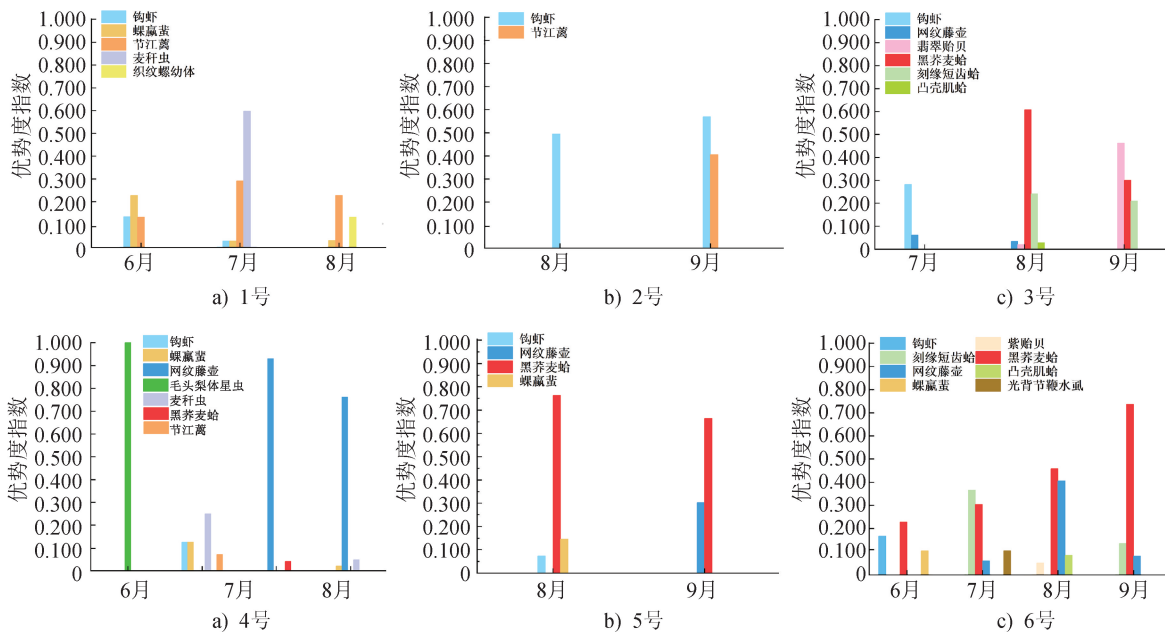


图 6 夏季各海域附着优势种及优势度指数

Fig. 6 Dominant species and dominance index in various sea areas during summer

2.3 网体结构与材质对附着演替的影响

对 3 号海域的挂板 B、C 和 D 进行回收分析,6 种不同网体结构与材质的网片的表面附着演替情况如图 7 所示。对比 UHMWPE-5、PE-5 和 PA-5 这

3 种网片,发现下水第 14 天三者附着情况差异明显,UHMWPE-5 网片表面附着主要为泥沙,仅有少量藻类附着,而 PA-5 网片和 PE-5 网片表面附着物覆盖面积更大,除泥沙和藻类外,可见藤壶等海洋污

损生物的附着生长迹象。这种现象主要归因于 UHMWPE 网片表面摩擦因数低^[18]、化学惰性强且表面能低^[19],可显著抑制海洋污损生物(如藤壶、藻类)的初期附着。微生物和藻类在其表面定殖时,会因缺乏丰富的亲水基团和适当的表面粗糙度而附着力较弱,易受水流和物理扰动影响而脱落^[20]。而 PA 的极性分子结构使 PA 网片易吸附有机质并吸水膨胀,网片表面生物膜形成速度快,附着量大。PE 网片的表面粗糙度则介于两者之间,抗附着性中等。下水第 31 天,随着附着生物逐渐积累,生物膜

初步形成后,UHMWPE 网片表面微环境发生变化,后续附着生物(如藤壶、贻贝)能够借助生物膜稳定附着,UHMWPE-5 网片表面出现明显的海洋污损生物群落附着,部分网孔堵塞,而 PE-5 网片和 PA-5 网片表面海洋污损生物附着严重,网孔完全堵塞,网片失去拦截效果。下水第 62 天,UHMWPE-5、PE-5 和 PA-5 这 3 种网片表面附着差异更为显著。UHMWPE 网片展现出更好的抗污性能,但其抗污作用主要体现在初期生物膜形成阶段,生物膜形成后抗污效果减弱,海洋污损生物逐步附着。

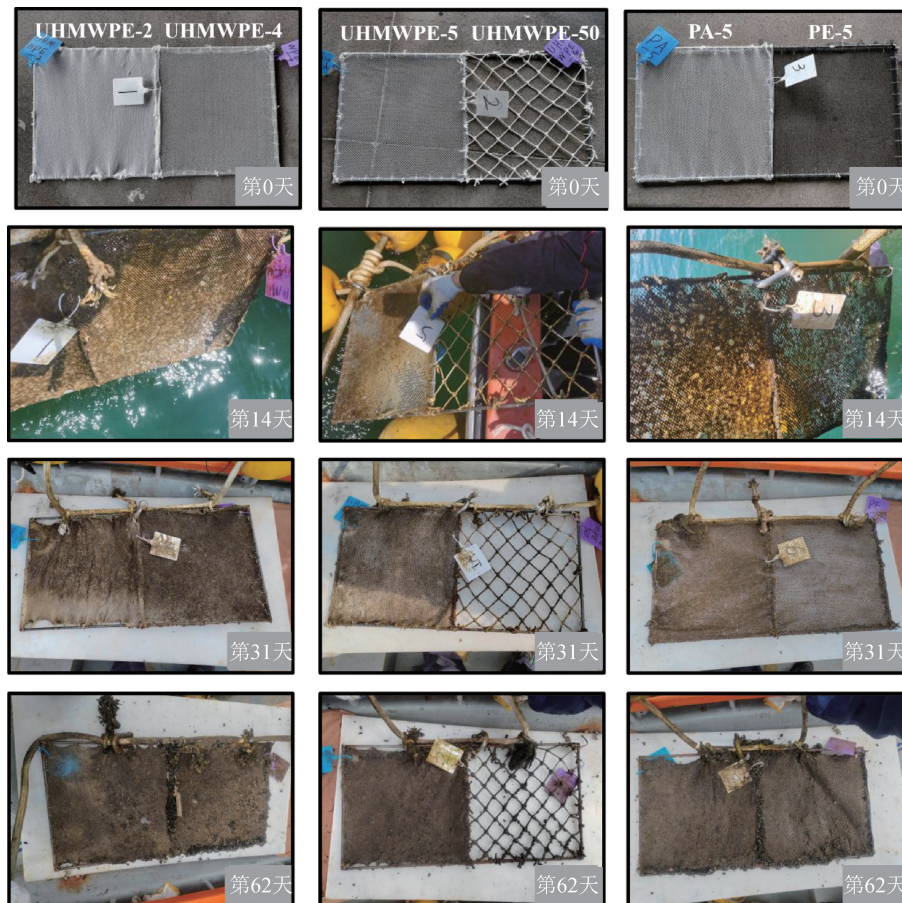


图 7 夏季 3 号海域不同网片附着演替情况

Fig. 7 Succession attachments on different net in the No. 3 sea area during summer

比较 4 种不同网目边长的网片(UHMWPE-2、UHMWPE-4、UHMWPE-5 和 UHMWPE-50),发现网目边长对 UHMWPE 网片附着情况影响显著。下水第 14 天,UHMWPE-2 网片表面出现大量海洋污损生物附着,UHMWPE-4 网片表面出现明显海洋污损生物群落生长迹象,而 UHMWPE-5 网片表面以泥沙堆积和少量藻类附着为主,UHMWPE-50 网片表面

仅有极少量泥沙和藻类附着。这是由于小网目网片拦截率更高,水流阻力大,易滞留悬浮颗粒、微生物及藻类,成为藻类等小型生物(如硅藻、钩虾)附着的“热点区域”,而大网目网片因水流冲刷力度大、沉积物积累少,生物膜基底的形成过程被显著延缓。下水第 31 天,UHMWPE-2、UHMWPE-4 和 UHMWPE-5 网片表面均有明显海洋污损生物群落

附着,部分网孔堵塞,UHMWPE-2 网片表面附着程度明显高于 UHMWPE-4 网片和 UHMWPE-5 网片,而 UHMWPE-50 网片表面仅有少量泥沙和藻类附着。下水第 62 天,UHMWPE-2、UHMWPE-4 和 UHMWPE-5 网片表面均有大量海洋污损生物附着,网孔完全堵塞并失效,UHMWPE-50 网片表面出现少量贝类(如藤壶、贻贝)等生物附着。大网目的 UHMWPE-50 网片表现出最佳的抗污性能,小网目的 UHMWPE-4 网片和 UHMWPE-5 网片抗污性能相近,UHMWPE-2 网片的抗污性能最差。尽管大网目网片具有较好的抗污性能,但过大的网目难以有效拦截小体型海洋污损生物及细小泥沙颗粒,导致拦截效率降低。实际应用中,应根据海域泥沙和生物特性合理选择网目边长,高生物多样性海域网目边长可采用 4~5 mm,以平衡拦截与防堵需求;而在低生物量、高泥沙的海域网目边长可采用 2 mm,以强化泥沙截留。

2.4 海洋污损生物附着机制及群落演替规律

如图 8 所示,海洋污损生物附着的基本机制和过程主要分为 3 个阶段^[21]。第一阶段:接触海水的网片表面吸附有机物,并在几十秒到几分钟内形成层厚约为 20 nm 的条件膜。该条件膜提供了其他生物生存所需的营养条件^[22]。第二阶段:条件膜形成后的 1~24 h,硅藻和细菌等微小生物通过静电力、化学键合、扩散、吸附和机械连锁等作用黏附在条件膜上,并分泌产生胞外代谢产物,微生物膜就此形成。第三阶段:24 h 后,原核生物、藻类孢子、真菌以及各种大型污损动物的幼虫和有抵抗力的休眠体开始在生物膜上生长,附着面积逐渐增大,并最终形成复杂的大型附着群落^[23]。不论在附着发生的哪一阶段,都需要通过强大的黏附力与被黏附物相连,这样才能永久或半永久地附着在岩石或人工构件等硬物上抵抗海洋运动。海洋生物的附着机制其实就是生物个体黏结的机制。

本次实海挂板试验,核电冷源拦网的海洋污损生物附着过程及群落演替过程可以概括为 3 个环节。初期,由有机碎屑、无机颗粒、藻类孢子及多种海洋生物幼体等构成的淤泥,在拦网表面附着沉积,为海洋污损生物提供了附着基底。无机颗粒充当藻类生长的物理基质,并提供必需的无机盐等营养元素,促进藻类繁殖。中期,淤泥中丰富的有机碎屑和

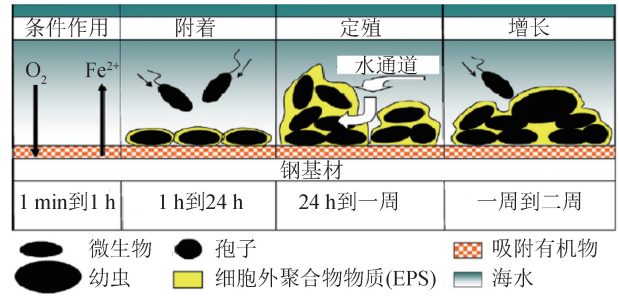


图 8 海洋污损生物附着过程

Fig. 8 Attachment process of marine fouling organisms

藻类为钩虾等小型海洋污损生物幼体提供生长条件,诱导其在网体表面定殖,这会进一步加速淤泥在网体表面的沉积,形成“淤泥沉积-生物附着”的正反馈循环。后期,淤泥中含有的藤壶、贻贝及蛤类等大型海洋污损生物幼体借助淤泥层在网体附着并逐渐发育为大型个体或生物群落。藻类与海洋污损生物在网体空间上存在种间竞争关系,表现为种群数量的负相关关系。值得注意的是,附着于拦网的海洋污损生物不仅来源于淤泥,也可能来自周围海水。网孔堵塞扩大了可附着面积,促进了水体中各类浮游幼体在网片表面的附着,加剧了拦网的生物污损程度。

为制定适用于我国不同海域的经济合理、技术可行的拦网附着防控技术方案,本研究综合考虑了海洋污损生物附着过程及 6 个核电站所在海域的挂板试验情况。基于前期拦网海洋污损生物附着机制研究的试验结果发现,6 个核电站海域挂板表面海洋污损生物群落组成差异较大,优势种不同,泥沙量也不同,网片在水下一段时间内海洋污损生物附着情况也呈现不同的趋势。前期网片主要附着泥沙、藻类、螺赢蜃、钩虾,后期主要附着藤壶、贻贝、蛤类等大型海洋污损生物。3、4、5 和 6 号核电站海域的优势种主要是藤壶、蛤类,而 1 号和 2 号核电站海域的优势种主要为钩虾。海洋污损生物防控技术可针对 6 个核电站的优势种设计方案。根据挂板表面海洋污损生物附着量的分析,可以发现 6 个核电站中,2、4 和 5 号核电站海域海洋污损生物污损情况严重。对比 6 个核电站所在海域的泥沙量表明,2、4 和 5 号核电站海域泥沙较多,网体堵塞严重,故这几个核电站的防控技术还需额外针对泥沙设计新的防污方案。

3 总结

本研究针对 6 个典型的滨海核电站,系统探究了各核电冷源海域海洋污损生物群落的生态特征和附着演替规律与拦网网体结构和材质之间的关系。结果表明,受纬度和洋流等环境因素影响,各海域拦网附着演替差异显著。1 号和 6 号核电站海域挂板表面以泥沙淤堵为主,附着生物量较少;2、3 和 5 号核电站海域挂板表面泥沙附着较少,但附着生物量多且集中,2 号海域挂板表面 8 月生物量最高,达到 $1\ 563.81\ \text{g}/\text{m}^2$,夏季以海洋污损生物附着堵塞为主;4 号核电站海域挂板表面附着泥沙量极高,6 月泥沙量最高为 99.97%,8 月挂板表面同时出现泥沙和海洋污损生物大量附着。各海域生物群落特征具有显著时空差异,2 号等南方核电站海域挂板表面生物量及生物多样性高于 1 号北方核电站,且南方核电站海域生物群落月际差异显著,海洋污损生物易集中爆发。网纹藤壶、钩虾和黑荞麦蛤是多个海域的共有优势种,需作为重点防控对象。UHMWPE 由于低摩擦因数、低表面能和强化学惰性,使 UHMWPE 网片相较于 PA 网片和 PE 网片表现出更优异的初期防污性能。网片抗污性能随网目边长增大而提高,大网目的 UHMWPE-50 网片表现出更佳的抗污性能,但拦截效率低下。因此在实际应用中,高生物多样性海域宜采用中网目网片,以平衡拦截与防堵需求;而在低生物量、高泥沙的海域,则可选用小网目网片以加强对泥沙的截留。本研究系统分析了夏季海洋污损生物在拦网网体表面的附着演替过程,以及网体结构和材质对防污性能的影响规律,为核电冷源的防污拦网设计提供了理论依据和实践指导。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 张朝文,关春江,徐鹏,等. 辽东湾东部海域核电冷源取水区的风险生物分析[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(1): 41-45.
- [2] 刘永骏,黄然,高雷. 核电站堆内构件水下维修专用测量工具开发及应用[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2016, 42(4): 548-553.
- [3] 高伟,刘昊炎,黄小俊. 一种自防污拦网在核电站冷源改造中的应用[J]. 科技创新导报, 2017, 14(3): 56.
- [4] 吕涛. 鉴于海生物爆发问题的核电站冷源拦污网布置优化[J]. 自动化应用, 2017, 58(12): 91.
- [5] 贺立燕,宋秀贤,於凡,等. 潜在影响防城港核电冷源系统的藻类暴发特点及其监测防控技术[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(3): 700-706.
- [6] 徐川,胡正春. 滨海核电站冷源拦截体系建设与研究[J]. 电力安全技术, 2019, 21(9): 45-48.
- [7] 孟亚辉,刘磊,郭显久,等. 核电站冷源海生物探测预警及决策支撑系统研究[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(1): 108-112.
- [8] 乐伟章,马海有,郭亦萍. 渔用合纤材料的发展[J]. 产业用纺织品, 1999, 17(6): 1-8.
- [9] 沈萍萍,于先波,孟不凡,等. 滨海核电冷源取水区风险生物的分类及特征分析[J]. 海洋科学, 2023, 47(9): 131-140.
- [10] 吴彦农,王娅琦,候秦脉,等. 海洋异物堵塞核电站取水系统事件的经验反馈[J]. 核安全, 2017, 16(1): 26-32.
- [11] 熊碧露,许波涛,郑早华,等. 基于冷源安全的滨海核电站取水拦污网设计[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(9): 45-48.
- [12] 王涛,关春江,代贤军,等. 动态声呐在辽东湾近岸海域水母监测中的应用[J]. 海洋环境科学, 2025, 44(1): 75-79.
- [13] KOO J, JUNG S, MYUNG H. A jellyfish distribution management system using an unmanned aerial vehicle and unmanned surface vehicles [C]//IEEE Underwater Technology (UT). 2017: 1-5.
- [14] 曹维杰. 核电站冷源口水下机器人载体设计及运动控制研究[D]. 衡阳:南华大学, 2023.
- [15] ASHRAF P M, EDWIN L. Nano copper oxide incorporated polyethylene glycol hydrogel: an efficient antifouling coating for cage fishing net[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 115: 39-48.
- [16] 王建华,范寅娣,李勇,等. 某滨海核电站防污涂料对海洋环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(1): 66-69.

(下转第 52 页)