

DOI: 10.20103/j.stxb.202402010285

曹文浩, 龚雪艳, 严涛, 吴正江, 周峰. 几种有机化合物和附着基对网纹纹藤壶附着的影响. 生态学报, 2024, 44(23): 10631-10638.

Cao W H, Gong X Y, Yan T, Wu Z J, Zhou F. Effects of organic compounds and substrata on the settlement of the acorn barnacle *Amphibalanus reticulatus*. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10631-10638.

几种有机化合物和附着基对网纹纹藤壶附着的影响

曹文浩^{1,2}, 龚雪艳², 严涛^{1,2}, 吴正江^{3,*}, 周峰²

1 中国科学院南海海洋研究所, 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室, 广州 510301

2 中国科学院兰州化学物理研究所, 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000

3 武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430064

摘要:在热带、亚热带海域,网纹纹藤壶 *Amphibalanus reticulatus* 通常是污损生物群落中的关键性种类,在海洋生态系统中占有重要地位,是人们防除污损重点关注的对象。探讨了敌草隆、代森锌、三氯生、甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐 (SPMA) 和甲基丙烯酰乙基磺基甜菜碱 (SBMA) 等 5 种有机化合物对网纹纹藤壶金星幼虫的影响,观察了金星幼虫在玻璃、石蜡、琼脂凝胶、聚苯乙烯塑料和 304 不锈钢等材质的附着基上的附着状况,测算了实海挂板 3 个月的不锈钢试板上网纹纹藤壶的切向附着应力,评估了藤壶在不锈钢材质的附着强度。为期 120 h 的实验结果表明,在 $10\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 剂量作用下,敌草隆、代森锌和三氯生对藤壶幼虫的附着有显著的抑制作用,但不会对幼虫的存活产生影响;单体的甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐 (SPMA) 和甲基丙烯酰乙基磺基甜菜碱 (SBMA) 则对藤壶幼虫的存活和附着均不产生作用。网纹纹藤壶幼虫在玻璃、聚苯乙烯塑料、石蜡和不锈钢等附着基上的附着状况无显著差异,但琼脂凝胶附着基在最初的 48 h 内幼虫附着率较低,其后时间则与其它 4 种附着基不再存在差别。浸海 3 个月的不锈钢试板上黏附的网纹纹藤壶平均切向附着应力为 0.31 MPa 。研究为海洋污损生物防除研究和海洋生态环境保护工作提供了科学依据,丰富和发展海洋生物学知识。

关键词:网纹纹藤壶;金星幼虫;有机化合物;附着基;切向附着应力

Effects of organic compounds and substrata on the settlement of the acorn barnacle *Amphibalanus reticulatus*

CAO Wenhao^{1,2}, GONG Xueyan², YAN Tao^{1,2}, WU Zhengjiang^{3,*}, ZHOU Feng²

1 Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2 State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3 Wuhan Second Ship Design & Research Institute, Wuhan 430064, China

Abstract: Acorn barnacles are common marine invertebrates with pelagic and benthic stages in their lives. The barnacle *Amphibalanus reticulatus* is usually a key species in the fouling communities of tropical and subtropical waters and plays an important role in marine ecosystems. Further exploration of the relationship between its larval settlement and different physicochemical factors is of importantly theoretical and practical significance. In this study, egg lamellae obtained by dissecting field-collected adults of *A. reticulatus* were placed in filtered seawater. The hatched nauplii were reared at $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ in darkness with the alga, *Platymonas subcordiformis*, at a concentration of $(2.5\text{--}3.0)\times 10^5\text{ cells/mL}$. Plenty of cyprids were present after 5 days. They were collected and stored at $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ for the following tests. The effects of five organic compounds (dose of $10\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$), including diuron, zineb, triclosan, 3-sulfopropyl methacrylate potassium salt (SPMA)

基金项目:固体润滑国家重点实验室开放课题 (LSL-1813); 广东省海洋与渔业科技攻关与研发项目 (A201701C06)

收稿日期:2024-02-01; **网络出版日期:**2024-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzj1226@163.com

and sulfobetaine methacrylate (SBMA), on the cyprids were studied. Then cyprid settlement on 5 different substrata—glass, paraffin wax, agar gel, polystyrene plastic and stainless steel was observed. All experiments lasted for 120 hours and both surviving and settled individuals were counted at intervals every 24 hours during the study period. And the shear attachment strength of barnacles on the stainless steel panels immersed in the sea for 3 months was measured and analysed. The results indicated that after 120 hours the larval settlement rates in the diuron, zineb and triclosan treatment groups were 27.8%, 32.6% and 49.8%, respectively, and significantly less than the control group (74.8%) ($P < 0.05$). However, in the monomeric SPMA and SBMA groups, the settlement rates were 70.9% and 72.2%, respectively, and there were no significant differences compared with the control ($P > 0.05$). As for the larval survival rates, there were no significant differences among the 5 organic compounds and control groups ($P > 0.05$). Concerning the impact of substrata, there were no significant differences in the settlement rates on glass, paraffin wax, polystyrene plastic, and stainless steel. However, the settlement on agar gel was 11.0% and 32.1% at the 24 hours and 48 hours, significantly less than the other 4 groups ($P < 0.05$). After 72 hours, more larvae settled on the agar gel and no difference, compared with the other groups, occurred during the subsequent period. Regarding the adhesion of barnacles on the stainless steel panels, data on the shear stress were within the range of 0.18 MPa to 0.38 MPa, with the average value being 0.31 MPa. Although the shear force required to peel off barnacles became greater with growth (i.e. the baseplate area expanding), the increase in shear attachment stress was not significant. In conclusion, at the dosage of $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, diuron, zineb and triclosan could inhibit the larval settlement of *A. reticulatus*, but not affect cyprid survival. Less larvae settled on the agar gel within the initial 48 hours, and then the difference in larval settlement rates no longer existed among the 5 substrata mentioned above through time. The adhesion shear stress of the barnacle *A. reticulatus* colonizing stainless steel panels did not change significantly with growth presenting a relatively stable state. The study can provide a scientific basis for the development of research on marine antifouling strategies and ecological environmental protection.

Key Words: *Amphibalanus reticulatus*; cyprids; organic compounds; substrata; adhesion shear stress

藤壶隶属甲壳动物亚门蔓足下纲,其幼虫时期营浮游生活,但成体则定居固着。作为在海洋底栖生态环境极为常见的类群,它常常也是海洋污损生物群落组成中的优势成员^[1-2],甚至某些时候还能影响特定海域浮游生物的群落结构^[3-4]。基于藤壶在金星幼虫阶段依靠内源性营养不需摄食和具备附着能力,可为海洋生态研究和污损防除探讨提供便利,是一种非常理想的实验观察测试对象^[5-6]。

在热带亚热带海域沿岸港口、海湾及周边水域,网纹纹藤壶 *Amphibalanus reticulatus* 通常是危害各类人工设施的关键性种类^[7],甚至布设在距岸约 15 km 以远的南海北部珠江口以东近海水域浮标站的污损生物群落中,该种类仍可处在绝对优势地位^[8]。因此,在基础研究和生产实践中,网纹纹藤壶必然是人们重点关注和防范对象,且已对其从幼虫培养、发育和附着及藤壶胶作用机制等方面展开了系统探讨^[9-12]。

敌草隆、代森锌和三氯生均为有机增效杀生剂,常被添加在目前市场上主流防污涂料中,以更好地提高相关产品的有效性^[13]。甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐 (SPMA) 和甲基丙烯酸乙基磺基甜菜碱 (SBMA) 的共聚物,则分别会对微藻和藤壶幼虫表现出良好的抑制效果,已在防污涂料中得以初步应用^[14-18]。然而,对于网纹纹藤壶这种在热带和亚热带海域极为常见的污损生物优势种,前 3 种化合物和后 2 种的单体对其金星幼虫附着行为的影响迄今未见报道,开展相关研究在基础探索和应用开发方面均具有重要的意义。

另外,对底栖固着生物而言,附着基是影响其个体生存和种群动态变化的一个关键要素,如果缺乏适宜的附着基,将推迟其附着和变态过程,甚至导致死亡^[5,19]。基于开展藤壶附着机理和防除测试研究时,附着基多为玻璃、石蜡、琼脂凝胶、聚苯乙烯塑料和不锈钢等材质,因此,弄清网纹纹藤壶金星幼虫在这些材质上的附着行为是否存在差异十分必要。此外,人们还通过测量使藤壶从附着基质上脱离所需的法向力或剪切力,进一步分析探讨了藤壶在石板、钢板、橡胶和钛合金板等基质上的黏附状况^[20-23]。

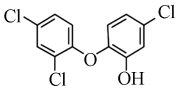
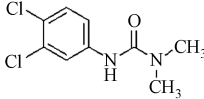
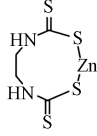
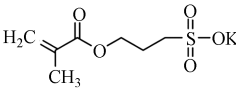
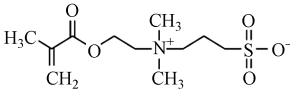
本研究以网纹纹藤壶的金星幼虫为测试对象,探讨上述 5 种有机化合物对其附着和存活的影响,观察其在常规防除测试研究中 5 种常见附着基质上的附着状况,并通过测算切向附着应力分析网纹纹藤壶成体在不锈钢材质试板上的附着强度,以期系统地揭示相关因素与藤壶附着行为的关系,丰富和发展海洋生物学知识,为海洋污损生物防除研究和海洋生态环境保护工作积累数据资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料

表 1 为本研究测试的 5 种有机化合物的分子式和结构式,其中三氯生购自 TCI,CAS 号:3380-34-5,纯度:AR;敌草隆购自阿拉丁,CAS 号:330-54-1,纯度:99%;代森锌购自百灵威,CAS 号:12122-67-7,纯度,90%;甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐(SPMA)购自百灵威,CAS 号:31098-21-2,纯度:98%;甲基丙烯酰乙基磺基甜菜碱(SBMA)购自百灵威,CAS 号:3637-26-1,纯度:99%。此外,技术琼脂粉,规格 028990,购自广东环凯微生物科技有限公司;切片石蜡,晶晶牌,上海懿洋仪器有限公司生产。

表 1 五种有机化合物的分子式和结构式
Table 1 Molecular and structural formulas of five organic compounds

名称 Items	分子式 Molecular formula	结构式 Structural formula
三氯生 Triclosan	$C_{12}H_7Cl_3O_2$	
敌草隆 Diuron	$C_9H_{10}Cl_2N_2O$	
代森锌 Zineb	$C_4H_6N_2S_4Zn$	
甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐 3-Sulfopropyl methacrylate	$C_7H_{11}KO_5S$	
甲基丙烯酰乙基磺基甜菜碱 Sulfobetaine methacrylate	$C_{11}H_{21}NO_5S$	

1.2 网纹纹藤壶金星幼虫培养

在中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站进行网纹纹藤壶幼虫培养。从近岸的水产养殖设施上采集网纹纹藤壶成熟个体。在实验室解剖成体藤壶,取出成熟受精卵块,放入装有 300 mL 过滤消毒海水的 500 mL 烧杯中,无节幼虫随即孵化出来。

在 1000 mL 烧杯中加入适量过滤消毒海水,将无节幼虫转移到其中,以亚心形扁藻 *Platymonas subcordiformis* 为饵料,投放量约 $(2.5-3.0) \times 10^5$ 个细胞/mL,将烧杯放入生化培养箱在温度为 30℃ 左右的黑暗环境中培养。幼虫培养密度约为 1—2 个/mL。每天随机抽取幼虫镜检观察,了解和掌握其发育时期;并视具体情况添加少许饵料。5 d 右,金星幼虫即可大量出现,捕捉、筛选活泼健康的金星幼虫,储存于冰箱中 4℃ 的保鲜层内保存。

1.3 5种有机化合物对网纹纹藤壶金星幼虫附着的影响

以网纹纹藤壶金星幼虫为测试对象,评估三氯生、敌草隆、代森锌、甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐 (SPMA) 和甲基丙烯酰乙基磺基甜菜碱 (SBMA) 等 5 种化合物对金星幼虫存活和附着行为的影响。采用 6 cm 直径的培养皿作为实验容器,设置空白组、对照组和 5 种化合物实验组。其中,空白组只在培养皿中加入 13 mL 过滤消毒海水;而对照组的培养皿中,则首先加入 1 mL 溶剂(氯仿-甲醇混合溶剂,体积比 3:1),使其均匀分布于培养皿底部,待挥发完全之后,再加入 13 mL 过滤消毒海水;化合物实验组则是分别将定量的化合物用溶剂溶解,使其均匀覆盖在 6 cm 直径培养皿的底部,待溶剂完全挥发后,涂覆于培养皿底部的化合物的剂量为 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,最后再加入 13 mL 过滤消毒海水。实验组、空白组和对照组均设 4 个平行样。

在各实验组的培养皿中分别加入约 30 只网纹纹藤壶金星幼虫。将所有培养皿都置于温度为 30°C 的生化培养箱内于黑暗环境中培养,每 24 h 观察记录一次各实验组的幼虫存活和附着情况,连续观察 120 h。实验数据采用 SPSS17.0 软件进行统计分析。

1.4 5种附着基对网纹纹藤壶金星幼虫附着的影响

探讨玻璃、聚苯乙烯塑料和 304 不锈钢等 3 种材质对网纹纹藤壶金星幼虫附着的影响,直接采用直径为 6 cm 的相应材质培养皿开展测试工作。至于分析石蜡和琼脂这两种材质对金星幼虫附着的影响,则通过将石蜡(或 8g 琼脂加入 100mL 蒸馏水)加热溶解,然后使之薄薄一层均匀涂覆在直径 6cm 的玻璃培养皿表面,冷却凝固后再添加过滤消毒海水。5 种不同材质的附着基均设 4 个平行样,每个平行样分别加入约 30 只网纹纹藤壶金星幼虫,置于温度为 30°C 的生化培养箱内在黑暗环境中培养 120 h。每隔 24 h 观察记录幼虫存活和附着状况,用 SPSS17.0 软件统计分析各组幼虫的存活率和附着率。

1.5 网纹纹藤壶黏附强度分析

选用 304 不锈钢材质,制备规格为 $26 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,厚度 0.1 cm 的试板 10 块,于 2023 年 8 月 4 日至 11 月 4 日吊挂在大亚湾大鹏澳澳口的网箱养殖区水下 1 m 处。在回收的 10 块不锈钢试板上随机选取 60 只网纹纹藤壶个体,用游标卡尺测量每只藤壶的峰吻径和侧径并做好记录和标识,然后将试板固定在螺旋侧摇机台上,用推拉力计(韦度牌)测量使藤壶脱离附着基所需的切向力的峰值,按照如下公式计算网纹纹藤壶的切向附着应力:

$$S = \frac{1}{4} \pi d_1 d_2 \quad (1)$$

$$P = \frac{F}{S} \quad (2)$$

其中, S 为藤壶基底的附着面积(mm^2), d_1 为峰吻径(mm), d_2 为侧径(mm); F 为切向力峰值(N), P 为藤壶的切向附着应力(MPa)。

2 结果

2.1 5种有机化合物对网纹纹藤壶金星幼虫附着的影响

在时间长达 120 h 的培养观察过程中,空白组、对照组和 5 种化合物实验处理组的金星幼虫存活率始终是 100%,均没有出现幼虫死亡的现象。其中,在空白组、对照组和甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐与甲基丙烯酰乙基磺基甜菜碱等 2 个实验处理组中,尚未附着的幼虫游走行为均正常;然而,在三氯生、敌草隆和戴森锌等 3 个实验处理组中,未附着的金星幼虫则大部分时间都侧躺在培养皿底部,仅偶尔出现游动。这表明在剂量为 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时,三氯生、敌草隆和戴森锌等 3 种化合物虽未杀死网纹纹藤壶金星幼虫,但已对其正常活动能力表现出抑制作用。

经 120h 在黑暗环境中的恒温培育,空白组和对照组的金星幼虫附着率分别达到 73.7% 和 74.8%,且两者之间无显著差异($P>0.05$),这表明实验中用于溶解上述 5 种化合物的氯仿-甲醇混合溶剂经过挥发完全后,不会对幼虫附着产生任何影响。另外,在作用剂量为 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时,甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐和甲基丙烯酰

乙基磺基甜菜碱等 2 个实验处理组的网纹纹藤壶金星幼虫附着率分别为 70.9% 和 72.2%, 与对照组无显著性差异 ($P>0.05$); 至于三氯生、代森锌和敌草隆等 3 个实验处理组, 在相同剂量的作用下, 网纹纹藤壶金星幼虫的附着率则分别降至 49.8%、32.6% 和 27.8%, 均显著低于对照组的 74.8% ($P<0.05$)。

因此, 在剂量为 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的情况下, 甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐和甲基丙烯酰乙基磺基甜菜碱这 2 种化合物均不会对网纹纹藤壶金星幼虫的附着行为产生影响; 然而, 三氯生、戴森锌和敌草隆等 3 种化合物则能有效抑制网纹纹藤壶金星幼虫的附着, 尤以敌草隆的表现最佳, 其次为代森锌。图 1 反映了在 120 h 的附着实验过程中于 5 个特定观察时间点各组网纹纹藤壶金星幼虫的附着状况。

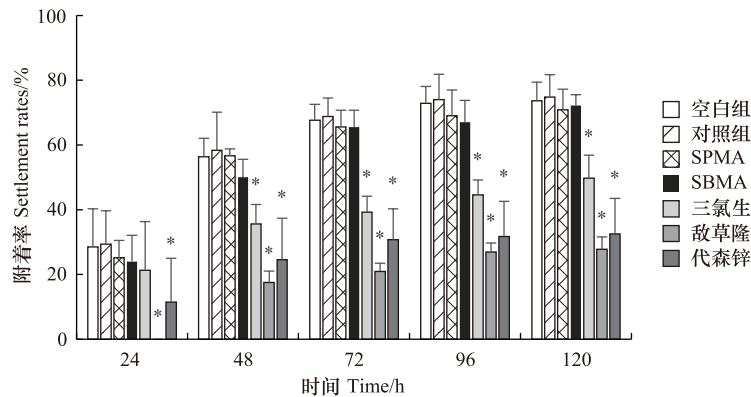


图 1 5 种有机化合物作用下网纹纹藤壶金星幼虫附着率

Fig.1 The effect of 5 organic compounds on the cyprid settlement rates of *A. reticulatus*

* 表示该实验组与对照组之间差异显著 ($P<0.05$)

2.2 5 种附着基对网纹纹藤壶金星幼虫附着的影响

在时间长达 120 h 的培养观察过程中, 玻璃、琼脂凝胶、聚苯乙烯塑料、石蜡和不锈钢等附着基实验组的金星幼虫存活率始终是 100%, 均没有出现幼虫死亡的现象, 表明这几种材质的培养基不会对幼虫存活产生不利影响。但琼脂凝胶附着基在最初的 24h 和 48h 内幼虫附着率较低, 分别为 11.0% 和 32.1%, 与其它材质附着基实验组均差异明显 ($P<0.05$), 而 72 h 之后, 琼脂凝胶附着基实验组金星幼虫附着率则与其它 4 种附着基再无显著性差异 ($P>0.05$)。至 120 h, 玻璃、琼脂凝胶、聚苯乙烯塑料、石蜡和不锈钢等附着基实验组的金星幼虫附着率分别达到 74.9%、73.1%、73.0%、76.1% 和 72.4%, 且两两之间均无显著差异 ($P>0.05$), 图 2 反映了各附着基实验组幼虫附着率随时间的变化情况。

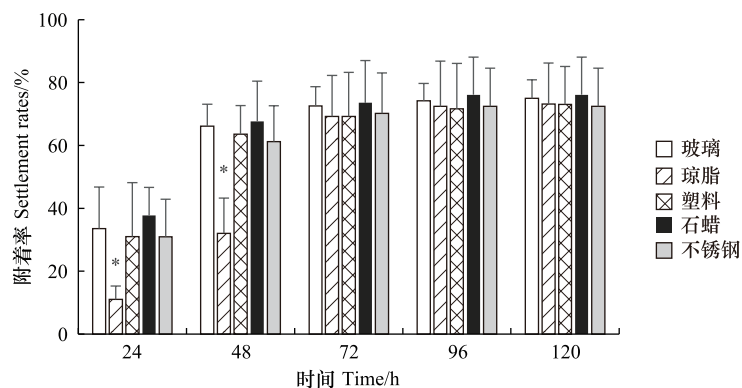


图 2 不同附着基条件下网纹纹藤壶金星幼虫附着率

Fig.2 The cyprid settlement rates of *A. reticulatus* on different substrata

* 表示该实验组与其它组之间差异显著 ($P<0.05$)

2.3 网纹纹藤壶在 304 不锈钢材质上的黏附强度

通过分析随机选取的 60 个网纹纹藤壶成体,发现其个体底盘的附着面积处在 41.8 mm^2 和 225.5 mm^2 之间,平均为 131.6 mm^2 ,相应的切向附着应力则在 0.18 MPa 到 0.38 MPa 范围内,平均附着应力为 0.31 MPa 。图 3 展示了将网纹纹藤壶剥离不锈钢基质所需的切向力大小与藤壶附着面积的关系,可见随着藤壶个体附着面积的增加,切向力也随之增大;至于剥离藤壶所需的切向附着应力,变化趋势则表现得较为平缓(图 4)。

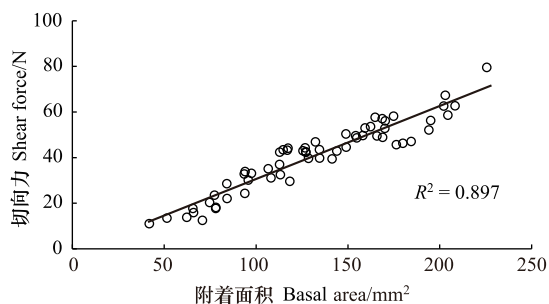


图 3 网纹纹藤壶剥离不锈钢基质所需切向力与藤壶附着面积的关系

Fig.3 Relationship between the basal area and the shear force required to remove *A. reticulatus* from the stainless steel substrate

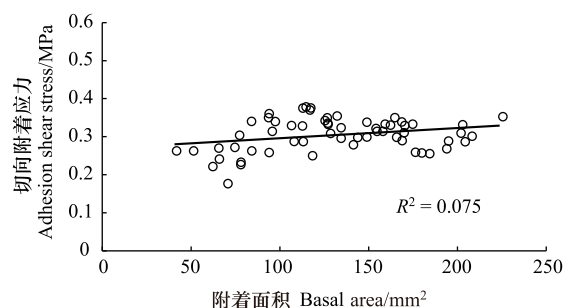


图 4 网纹纹藤壶剥离不锈钢基质所需切向附着应力与藤壶附着面积的关系

Fig.4 Relationship between the basal area and the adhesion shear stress required to remove *A. reticulatus* from the stainless steel substrate

3 结论

在 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 剂量作用下,敌草隆、代森锌和三氯生等 3 种化合物对网纹纹藤壶金星幼虫的附着表现出明显的抑制作用,其中敌草隆的效果最好,其次为代森锌。然而,在相同的作用剂量下,单体的甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐(SPMA)和甲基丙烯酰乙基磺基甜菜碱(SBMA)不会对藤壶幼虫产生影响。

网纹纹藤壶金星幼虫在玻璃、聚苯乙烯塑料、石蜡和 304 不锈钢等 4 种附着基质上的附着状况始终无明显的差别,虽然其在琼脂凝胶附着基最初 48 h 内的附着率较低,但随后的附着状况与其它 4 种附着基不再存在差异。

至于浸海 3 个月的 304 不锈钢试板上黏附的网纹纹藤壶,其平均切向附着应力可达 0.31 MPa 。随着藤壶附着面积的增加,剥离藤壶个体所需的切向力随之增大,但相应的切向附着应力变化则较为平缓,反映出网纹纹藤壶成体在不锈钢板上的附着强度具有相对较为稳定的特点。

4 讨论

通过时长为 120 h 的培养观察可以看出,在作用剂量为 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的条件下,甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐和甲基丙烯酰乙基磺基甜菜碱这 2 种化合物,不会对网纹纹藤壶金星幼虫的活动和附着行为产生显著影响。至于三氯生、敌草隆和代森锌等 3 种化合物,不仅能有效抑制藤壶金星幼虫的活动能力,还能显著降低它们的附着率,其中以敌草隆的效果表现最佳,随后依次为戴森锌和三氯生。

敌草隆是一种苯脲类除草剂,在防污涂料领域也有较为广泛的应用,以往的研究表明,其能干扰藻类的光合作用^[24–25],抑制硅藻和绿藻的生长^[26–27],对海洋无脊椎动物具有毒性^[28–30],并能通过消化和呼吸系统被动物体吸收^[31]。基于藤壶金星幼虫处在摄食阶段,直接接触或通过呼吸系统可能是敌草隆对其产生生物效应的关键,故相关作用机制还需进一步探讨。二硫代氨基甲酸盐为细胞毒性化合物,对鱼类、水蚤和绿藻等水生生物均表现出毒性^[32],其中代森锌这一典型的有机硫类杀菌剂作为有机增效杀菌剂添加到涂料后,可有效提高防污性能^[15],目前已成为市场上能被广泛接受的防污剂产品。作为生物体代谢过程中多个位点的抑制剂^[33],代森锌应是通过其分解的毒性产物与细胞中巯基($-\text{SH}$)的非特异性结合,从而导致细胞代谢的全面

中断^[34]。

三氯生是人工合成的可电离的氯化联苯醚,是一种高效广谱抗菌剂,与结构相近的三氯卡班等广泛应用于日用化学品产业。三氯生具有低水溶性和高亲脂性特点^[35],可干扰脂肪酸合成^[36],对水生生物具有明显的细胞毒性、神经毒性、遗传毒性等作用^[37]。虽然三氯生在藻类、水生无脊椎动物、鱼类和两栖类等方面的影响已做了许多工作,但其对生物体变态发育影响的报道仍基于昆虫(摇蚊)和鱼类等研究对象^[38],至于那些生活史中历经浮游和固着两种完全不同生活状态的海洋常见底栖无脊椎动物,除了本研究所提及的网纹纹藤壶未见其他报道,故从学术研究和技术开发角度出发,均值得进一步探讨。

以往研究表明,聚甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯对微藻及大型藻类孢子的黏附均有一定的抑制作用^[14-15,17],而聚甲基丙烯酸乙基磺基甜菜碱则不仅对微藻的黏附有防除效果^[16],同时还能抑制纹藤壶和致密藤壶幼虫的附着^[18]。因为聚合态的甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐和甲基丙烯酸乙基磺基甜菜碱能够形成稳定的亲水界面,其与水的低结合能特点可以形成能量屏障,有效地屏蔽污损生物与附着基底的直接接触,从而达到抗污损效果。而单体的甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐和甲基丙烯酸乙基磺基甜菜碱,其空间构型无法形成稳定的水化层,故不具备防除活性^[39-40]。

附着基的材质类型和朝向及倾斜状况均是影响海洋污损生物栖息附着的重要因素^[41-42],从本研究附着测试结果可以看出,不锈钢、玻璃、聚苯乙烯塑料和石蜡等附着基之间网纹纹藤壶幼虫的附着状况无差异,但琼脂凝胶附着基却在最初的 48 h 内幼虫附着率较低,其后的时间则与其他 4 种附着基不再存在差别,这一现象很可能因琼脂凝胶附着基含水量高,不被藤壶金星幼虫偏好^[43],从而推迟幼虫附着定居的过程^[44]。随着幼虫虫龄增加,附着基的影响效果不再明显^[45]。

至于藤壶在不同附着基上的黏附强度,Yule 和 Walker^[20]的研究结果表明,藤壶 *Balanus balanoides* 在石板上的法向附着应力与其所处的生长阶段有关,成体可达 0.93 MPa,幼体则不到成体的 20%。李友炽等^[23]则通过对附着在钛合金板上的藤壶的剪切力的研究,也观察到类似的现象,藤壶剪切强度随藤壶个体直径的增加而增大,增速呈现出由快到慢的特点。在本研究中,网纹纹藤壶的平均切向附着应力为 0.31 MPa,不同于以往研究报道,这一方面可能与藤壶种类和附着基材质的差异有关,另一方面应与测算方法相关。网纹纹藤壶的附着基底呈椭圆形,有长半轴和短半轴之分,如果按照圆形面积计算则会产生较大误差。另外,法向附着应力和切向附着应力之间也应存在一定差异。

参考文献(References):

- [1] Holm E R. Barnacles and biofouling. Integrative and Comparative Biology, 2012, 52(3): 348-355.
- [2] 严涛,黎祖福,胡煜峰,李鑫渲,曹文浩,罗文佳,程志强. 中国沿海无柄蔓足类研究进展. 生态学报, 2012, 32(16): 5230-5241.
- [3] Muxagata E, Williams J A, Shearer M. Composition and temporal distribution of cirripede larvae in Southampton Water, England, with particular reference to the secondary production of *Elminius modestus*. ICES Journal of Marine Science, 2004, 61(4): 585-595.
- [4] Ziadi B, Dhib A, Turki S, Aleya L. Factors driving the seasonal distribution of zooplankton in a eutrophicated Mediterranean Lagoon. Marine Pollution Bulletin, 2015, 97(1-2): 224-233.
- [5] Pechenik J A, Rittschof D, Schmidt A R. Influence of delayed metamorphosis on survival and growth of juvenile barnacles *Balanus amphitrite*. Marine Biology, 1993, 115(2): 287-294.
- [6] 林岗,饶小珍. 饵料、盐度和温度对刺巨藤壶幼虫生长发育的影响. 生态学报, 2022, 42(21): 8628-8639.
- [7] Cao W H, Yan T, Li Z F, Li J, Cheng Z Q. Fouling acorn barnacles in China—a review. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013, 31(4): 699-711.
- [8] 严涛,严文侠,王华接,严岩,梁冠和,董钰. 珠江口以东近海水域污损生物的组成与分布. 台湾海峡, 1999, 18(3): 325-331.
- [9] 张慧,曹文浩,黄立,王建军,程志强,严涛. 藤壶胶的特性及其作用机理. 材料导报, 2014, 28(5): 108-111.
- [10] 曹文浩,王春忠,胡煜峰,张慧,严涛. 饵料对网纹藤壶幼虫发育和附着的影响. 热带海洋学报, 2014, 33(4): 47-50.
- [11] 曹文浩,严瑾,丰美萍,韩帅帅,林明晴. 盐度对中国东南沿海两种常见藤壶幼虫发育的影响. 热带海洋学报, 2018, 37(6): 85-91.
- [12] 严瑾,林明晴,曹文浩,林岳光,邹立. 温度对网纹纹藤壶幼虫发育和附着的生物学效应. 热带海洋学报, 2020, 39(5): 55-61.
- [13] Parks R, Donnier-Marechal M, Frickers P E, Turner A, Readman J W. Antifouling biocides in discarded marine paint particles. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60(8): 1226-1230.
- [14] 万菲,周峰. 甲基丙烯酸 3-磺酸丙酯钾盐聚合物防污性能研究. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2014, 50(1): 63-67.
- [15] Zhang Y, Hu H Y, Pei X W, Liu Y P, Ye Q, Zhou F. Polymer brushes on structural surfaces: a novel synergistic strategy for perfectly resisting

- algae settlement. *Biomaterials Science*, 2017, 5(12): 2493-2500.
- [16] Liu H, Ma Z F, Yang W F, Pei X W, Zhou F. Facile preparation of structured zwitterionic polymer substrate via sub-surface initiated atom transfer radical polymerization and its synergistic marine antifouling investigation. *European Polymer Journal*, 2019, 112: 146-152.
- [17] Mushtaq S, Ahmad N M, Nasir H, Mahmood A, Janjua H A. Transpicuous-cum-fouling resistant copolymers of 3-sulfopropyl methacrylate and methyl methacrylate for optronics applications in aquatic medium and healthcare. *Advances in Polymer Technology*, 2020; 5392074.
- [18] Ruiz-Sanchez A J, Guerin A J, El-Zubir O, Dura G, Ventura C, Dixon L I, Houlton A, Horrocks B R, Jakubovics N S, Guarda P A, Simeone G, Clare A S, Fulton D A. Preparation and evaluation of fouling-release properties of amphiphilic perfluoropolyether-zwitterion cross-linked polymer films. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 140; 105524.
- [19] Thiagarajan V, Pechenik J A, Gosselin L A, Qian P Y. Juvenile growth in barnacles; combined effect of delayed metamorphosis and sub-lethal exposure of cyprids to low-salinity stress. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 344; 173-184.
- [20] Yule A B, Walker G. The adhesion of the barnacle, *Balanus balanoides*, to slate surfaces. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1984, 64(1): 147-156.
- [21] Hui C Y, Long R, Wahl K J, Everett R K. Barnacles resist removal by crack trapping. *Journal of the Royal Society Interface*, 2011, 8(59): 868-879.
- [22] Huang G Y, Zhou Y N. A mechanical model for the detachment of barnacles under tangential forces. *Procedia Materials Science*, 2014, 3: 799-804.
- [23] 李友炽, 王贵, 吴敬权, 邓培昌, 张福泉, 黄俊毅. 海洋污损生物藤壶生长过程及附着强度研究. *海洋科学*, 2023, 47(8): 60-67.
- [24] Macinnis-Ng C M O, Ralph P J. Short-term response and recovery of *Zostera capricorni* photosynthesis after herbicide exposure. *Aquatic Botany*, 2003, 76(1): 1-15.
- [25] Perschbacher P W, Ludwig G M. Effects of diuron and other aerially applied cotton herbicides and defoliant on the plankton communities of aquaculture ponds. *Aquaculture*, 2004, 233(1-4): 197-203.
- [26] Jung S M, Bae J S, Kang S G, Son J S, Jeon J H, Lee H J, Jeon J Y, Sidharthan M, Ryu S H, Shin H W. Acute toxicity of organic antifouling biocides to phytoplankton *Nitzschia pungens* and zooplankton *Artemia* larvae. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 124(2): 811-818.
- [27] Amara I, Miled W, Slama R B, Ladhari N. Antifouling processes and toxicity effects of antifouling paints on marine environment. A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2018, 57: 115-130.
- [28] Fernández-Alba A R, Hernando M D, Piedra L, Chisti Y. Toxicity evaluation of single and mixed antifouling biocides measured with acute toxicity bioassays. *Analytica Chimica Acta*, 2002, 456(2): 303-312.
- [29] Mai H, Morin B, Pardon P, Gonzalez P, Budzinski H, Cachot J. Environmental concentrations of irgarol, diuron and S-metolachlor induce deleterious effects on gametes and embryos of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*. *Marine Environmental Research*, 2013, 89: 1-8.
- [30] Cima F, Varello R. Effects of exposure to trade antifouling paints and biocides on larval settlement and metamorphosis of the compound ascidian *Botryllus schlosseri*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(2): 123.
- [31] Giacomazzi S, Cochet N. Environmental impact of diuron transformation; a review. *Chemosphere*, 2004, 56(11): 1021-1032.
- [32] Van Leeuwen C J, Maas-Diepeveen J L, Niebeek G, Vergouw W H A, Griffioen P S, Luijken M W. Aquatic toxicological aspects of dithiocarbamates and related compounds. I. Short-term toxicity tests. *Aquatic Toxicology*, 1985, 7(3): 145-164.
- [33] Dafforn K A, Lewis J A, Johnston E L. Antifouling strategies; history and regulation, ecological impacts and mitigation. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(3): 453-465.
- [34] Hunter J E, Evans L V. The toxicity of the biocides zineb, nabam and their derivatives to the ship-fouling diatom *Amphora coffeaeformis*. *Biofouling*, 1990, 2(4): 267-287.
- [35] Matozzo V, Costa Devoti A, Marin M G. Immunotoxic effects of triclosan in the clam *Ruditapes philippinarum*. *Ecotoxicology*, 2012, 21(1): 66-74.
- [36] Bushek D, Heidenreich M, Porter D. The effects of several common anthropogenic contaminants on proliferation of the parasitic oyster pathogen *Perkinsus marinus*. *Marine Environmental Research*, 2007, 64(4): 535-540.
- [37] 张立娜, 宫晓双, 安婧, 魏树和. 三氯生的环境残留、降解代谢及其潜在生态风险. *应用生态学报*, 2018, 29(9): 3139-3146.
- [38] Stenzel A, Wirt H, Patten A, Theodore B, King-Heiden T. Larval exposure to environmentally relevant concentrations of triclosan impairs metamorphosis and reproductive fitness in zebrafish. *Reproductive Toxicology*, 2019, 87: 79-86.
- [39] Zhang H, Zheng J Y, Lin C G, Yuan S L. Molecular dynamics study on properties of hydration layers above polymer antifouling membranes. *Molecules*, 2022, 27(10): 3074.
- [40] Chen Z. Surface hydration and antifouling activity of zwitterionic polymers. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2022, 38(15): 4483-4489.
- [41] 林明晴, 严文侠, 曹文浩, 严涛. 大型附着生物对近海圆盘浮标污损的特点. *海洋学报*, 2020, 42(6): 83-89.
- [42] Siddik A A, Al-Sofyani A A, Ba-Akdah M A, Satheesh S. Invertebrate recruitment on artificial substrates in the Red Sea; role of substrate type and orientation. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2019, 99(4): 741-750.
- [43] Dahlström M, Jonsson H, Jonsson P R, Elwing H. Surface wettability as a determinant in the settlement of the barnacle *Balanus improvisus* (DARWIN). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2004, 305(2): 223-232.
- [44] Botero L, Atema J. Behavior and substrate selection during larval settling in the lobster *Homarus americanus*. *Journal of Crustacean Biology*, 1982, 2(1): 59-69.
- [45] Dineen J F Jr, Hines A H. Interactive effects of salinity and adult extract upon settlement of the estuarine barnacle *Balanus improvisus* (Darwin, 1854). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1992, 156(2): 239-252.