

大型海洋生物抗附着机制及展望

A review on the anti-fouling strategies of macrobenthos and nekton in the marine environment

欧阳雄¹, 曹文浩^{2,3}, 张 慧², 陈 池¹, 严 涛²

(1. 中海石油(中国)有限公司番禺作业公司, 广东 深圳 518067; 2. 中国科学院 南海海洋研究所, 广东 广州 510301; 3. 中国科学院 海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室, 山东 青岛 266071)

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)10-0134-07
doi: 10.11759/hyxx20141112001

海洋生物污损产生的危害主要表现为缩短维护周期, 提高作业成本, 增大 CO₂ 排放, 影响设施安全, 减少服役时间, 妨碍海洋经济活动^[1-5]。另外, 污损生物还会堵塞养殖器具网孔, 妨碍养殖对象的生长发育, 降低水产品质量^[6-7]。为有效地减少污损生物危害, 人们针对设施类型和用途的差异, 采取了机械清除、倒笼曝晒、电解防污、添加杀生剂和使用防污涂料等方法^[8-10]。基于传统的防污涂料是在其表面形成毒料浓度层毒杀海洋生物幼虫和孢子^[11], 故存在着危害海洋生态环境、甚至通过食物链影响人类健康的潜在风险^[12-13]。

海洋环境中栖息资源有限, 空间竞争激烈。对于生物个体而言, 其表面被附着污损通常会影响到生长发育, 妨碍正常运动及干扰代谢活动, 甚至造成生物组织的破损, 引发生存危机。然而, 在长期的进化过程中, 许多大型海洋生物为避免生物污损可能产生的危害, 演化出独特的自我保护和防御机制来应对生物污损, 如借助耐受、规避等机制降低生物附着对其影响或通过物理、化学、生物学行为和机械清除等方式来保持其体表的洁净, 开展相关研究可为开发新型防污技术提供借鉴^[14-15]。

1 大型海洋生物防污途径

大型海洋生物包括大型底栖动、植物和游泳动物。其中, 前者是指不能通过网筛孔径为 0.5 mm 的底栖生物^[16-17], 即其最小尺寸大于或等于 0.5 mm^[18]。游泳动物则是指在水层中能自由选择其行动途径的水生动物的总称, 主要是鱼类、海洋哺乳类、甲壳类、少数的头足类和以海龟为代表的爬行类^[19], 其在海

洋生态系统中占有重要的地位^[20-21], 并可为那些营固着或附着生活的海洋生物提供附着基, 尤其在生物种类繁多, 生长迅速, 竞争激烈、资源有限的热带、亚热带海区。为避免其他生物污损产生危害, 各种大型海洋生物体在长期进化过程中逐渐形成了独特的防污作用机制。

1.1 海藻

绿藻藻体呈草绿色, 形态多样, 主要生长在潮间带的礁石、珊瑚礁及泥沙滩的石砾、沙粒和贝壳上^[22]。其中, 蕨藻含有的萜类化合物可对海洋细菌和微藻表现出一定的防污效果^[23], 而网球藻(*Dictyosphaeria ocellata*)可通过自身产生的活性代谢产物调整其表面的微生物群落^[24]。另外, 栖息在网石莼(*Ulva reticulata*)表面的某些弧菌, 也可产生抑制华美盘管虫(*Hydroides elegans*)幼虫附着的化合物^[25]; 而从石莼(*Ulva lactuca*)表面分离的假交替单胞菌属(*Pseudoalteromonas*)的多个菌株, 则能显著抑制藤壶幼虫附着及石莼等藻类孢子的萌发^[26]。再有, 与礁膜和石莼等藻类共栖的菌株能有效抑制多种养殖网笼上的污损细菌^[27]。

红藻绝大多数种类为多细胞藻体, 呈紫红、玫瑰

收稿日期: 2015-05-08; 修回日期: 2015-07-13

基金项目: 广州市科技计划项目(2013J4300046); 国家自然科学基金项目(31100260, 41176102); 广东省海洋与渔业科技专项重点项目(A201101F03); 中国科学院海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室开放基金项目(MCKF201401)

作者简介: 欧阳雄(1984-), 男, 工程师, 主要从事海洋工程科技研发, E-mail: ouyxxz@cnooc.com.cn; 严涛, 通信作者, E-mail: yantao@scsio.ac.cn

红或暗红等颜色^[22]。其中, 仙藻能抑制周边的刚毛藻、羽藻和石莼生长, 且其提取物对海洋细菌、浮游植物以及石莼孢子均有明显的抑制作用^[28]; 具钩柏桉藻(*Bonnemaisonia hamifera*)提取物可抑制海洋细菌的生长^[29], 而海洋红藻 *Delisea pulchra* 的次级代谢产物则有效抑制纹藤壶、紫贻贝、石莼等生物的附着^[30-31]。从栖息在潮间带的角叉菜 (*Chondrus ocellatus*)、蜈蚣藻(*Grateloupia filicina*)、紫菜(*Porphyra* sp.)和海膜(*Halymenia sinensis*)表面分离的菌株, 具有广谱的抗污损细菌能力^[27]。至于珊瑚藻这类大型钙化藻类^[32-33], 可通过摒弃边叶状体细胞这一表面不稳定的内生机制来避免污损生物的过度附着^[34]。

褐藻均为多细胞藻体, 通常体积较大, 构造复杂, 生活史存在世代交替现象, 主要生长在潮间带和低潮线附近^[22]。从圈扇藻(*Zonaria diesingiana*)获得的间苯三酚化合物具有明显的抗菌效果, 并可抑制硅藻和幼虫的附着^[35]; 而囊链藻(*Bifurcaria bifurcata*)和墨角藻(*Fucus vesiculosus*)粗提物的抗污损活性与季节密切相关^[36-37]。从伸长海条藻 (*Himantalia elongata*)表面分离的菌株 GB3, 其培养 5 d 的上清液能有效抑制多个海洋污损性菌株; 而分离于齿缘墨角藻 (*Fucus serratus*)表面的菌株 AR55 只能有效抑制来自潮间带岩石和死亡海藻表面的个别菌株^[38]。马尾藻(*Sargassum* sp.)表面附生细菌则对养殖网笼上的多种污损性细菌具有良好的抑制作用^[27]。

1.2 海草

海草隶属于单子叶草本植物, 主要生活在热带和温带海岸附近的浅海中。其中某些种类可通过体表共栖细菌产生的次级代谢产物, 抵御污损生物的附着, 如泰来藻(*Thalassia hemprichii*)和海菖蒲(*Enhalus acoroides*)就是凭借其表面共栖的芽孢杆菌(*Bacillus aquamaris* 和 *Bacillus* sp.)和枝芽孢菌(*Virgibacillus olivae* 和 *V. marismortui*), 抑制海洋微生物黏膜细菌的生长^[39]。另外, 有些种类本身即含有抗污损生物附着的活性成分, 如针叶藻(*Syringodium isoetifolium*)和锯齿叶水丝草(*Cymodocea serrulata*)的粗提物不仅能抑制海洋细菌的附着增殖, 而且对贻贝(*Perna indica*)的附着也表现出明显的抑制作用^[40]; 来源于大叶藻(*Zostera marina*)的 P-肉桂酸硫酸酯则能有效抑制海洋细菌和纹藤壶附着^[41]。

1.3 大型底栖无脊椎动物

大型底栖无脊椎动物通常是海洋环境中固着(或

附着)生物的理想栖息对象。尽管某些附着和被附着的生物之间可以形成对彼此有利的共栖关系(如寄居蟹与海葵), 但大量的生物附着肯定会对被附着对象产生不利影响, 因此, 为了避免因生物污损而影响个体的生存和种群的发展, 许多大型底栖无脊椎动物还进化出独特的抗附着作用机制。

牡蛎、盘管虫和藤壶等喜欢群居的种类之所以可在同类的外壳上附着生长, 且往往形成很大的群体, 就是因为双壳类、管栖多毛类及甲壳类等生物为适应其生活方式, 借助耐受和规避机制来应对生物污损所产生的不利影响, 也就是在确保进出水孔(口)等关键部位洁净、防止附着污损的前提下, 可容忍外壳或管外壁被其他生物个体栖息附着^[14, 42]。

另外, 附着基表面特殊的微观形貌可影响污损生物的附着和生长^[43], 如外壳被严重污损的覆瓦珠母贝(*Pinctada imbricate*), 其壳表面的微观形貌呈多样性, 没有结构重复出现的格局^[44]; 而通常很少被污损的紫贻贝, 其壳表面的微观形貌呈均匀波纹状结构^[44], 与光滑表面相比, 该微观形貌能减轻盘管虫、螺旋虫、多室草苔虫和复海鞘等种类引发的生物污损^[45], 另外, 双壳类软体动物外壳表面覆盖的蛋白质层(角质层), 也应是一种抗生物污损的物理防御屏障^[46-48]。至于不易被大型污损生物附着污损的黄道蟹(*Cancer pagurus*), 甲壳表面的微观形貌为均匀分布的圆形立面, 其间可观察到细小的针状结构^[49]。

化学防御也是海洋无脊椎动物常用的方法。从海鞘分离的生物碱 eudistomins 对多室草苔虫幼虫具有一定毒性^[50]; 珊瑚的抗污损组分多具备呋喃环和内酯环结构特征^[51], 源自八放珊瑚的二萜类和开环甾族化合物能抑制纹藤壶幼虫附着^[52-54]。网状软柳珊瑚乙酸乙酯提取物可对多种无脊椎动物幼虫及大型藻类孢子的附着萌发产生抑制作用^[53]。从苔藓虫提取的芦竹碱类化合物能明显抑制纹藤壶幼虫附着^[55], 而紫贻贝外壳角质膜分离的组分也对藤壶幼虫、细菌以及硅藻表现出一定的抑制作用^[56]; 念珠海葵与壮丽双幅海葵的提取物则能抑制多种海洋细菌的附着增殖^[57]。

海绵天然产物的提取物主要包括硫酸化甾醇、萜类、溴化产物、脂肪酸等多种次级代谢产物, 其中吡喃类次级代谢产物对纹藤壶金星幼虫的附着具有抑制作用^[58], 某些甾体硫酸盐则可干扰管栖多毛类的生长^[59], 而生物碱 hymenialdisine 和 debromohymenialdisine

能够有效抑制翡翠贻贝丝足附着及多室草苔虫(*Bugula neritina*)幼虫和浒苔(*Ulva prolifera*)孢子的附着萌发^[60]。另外,嘌呤碱、酰胺及咪喃萜类次级代谢物也具有一定的防污活性^[61-64]。

此外,某些与大型底栖无脊椎动物共栖的微生物也可为抵御生物污损提供帮助^[65]。如黏附山海绵(*Mycale adherens*)表面的细菌可抑制华美盘管虫的附着^[66],以芽孢杆菌属为代表的海绵(*Aplysina gerardogreeni*)共生菌提取物可对10余种海洋细菌和微藻表现出良好的抑制作用^[67]。从海鞘分离的革兰氏阴性色素菌D2菌株可释放出抑制藤壶幼虫和许多海洋细菌的成分^[68];海鸡头(*Dendronephthya* sp.)表面栖息的弧菌(*Vibrio* sp.)和变形菌(*α-Proteobacterium*)所产生的多糖类化合物能抑制华美盘管虫和多室草苔虫的附着^[69]。

1.4 游泳动物

类似于大型底栖生物,游泳动物也是凭借物理和化学机制来达到抗附着污损的目的,但具体的方式和途径各有不同。如海豚通过分泌特殊黏液形成亲水性低表面能的表面避免被其他海洋生物附着污损^[70],而隶属热带近海底层鱼类的头纹宽吻鲀(*Amblyrhynchotes hypselogencion*)皮肤黏液粗提物则表现出良好的抗污损作用^[71];鲨鱼通过表皮覆盖的一层微米级鳞片,形成一种非光滑不稳定的表面形态,抑制硅藻等微型污损生物的附着^[72]。至于巨头鲸为保持体表洁净不仅借助酶的作用^[73],还与生物体表特殊的纳米结构有关^[74]。

2 讨论与结语

目前,环境污染问题日益严峻,新型节能环保防污技术的研发迫在眉睫。而栖息在海洋环境中的许多藻类、海草以及底栖无脊椎动物和游泳动物体表常常保持洁净,不被附着污损,就为污损生物防除领域的技术创新研究提供了很好的借鉴对象。开展仿生研究,进行多学科交叉综合探讨,揭示污损生物附着机理,分析和模拟海洋生物抗附着的物理、化学和机械等防御机制,将有助于激发海洋防污技术革新、促进相关产业升级、优化调整涉海经济结构,在节能环保政策指导下,从根本上解决污损生物防除的难题,促进我国海洋经济可持续发展。

生物耐受机制是一种有效抵御或降低外界不良环境对生物体产生危害作用的能力,也是克服污损

生物附着危害的有效途径,可在一定程度上减少污损生物附着所带来的不利影响。然而,这应是一种消极被动的做法,因为在海洋经济活动中,如果参照海洋生物耐受机制来避免(或减轻)海洋污损生物对人工设施产生的危害,就需提高设计标准、扩大结构尺寸、增加施工难度、增大作业费用,从而导致生产和制造成本的显著增加。因此,从经济角度和工程造价等方面来看,该方案的应用范围具有明显的局限性。

规避方法则是一种主动应对海洋污损生物危害的防治和控制措施,且在日常生产活动中已被人们广泛应用。如通过对特定海域污损生物优势种生长、发育和繁殖的了解,建立合理的规章制度和采取适当的管理措施,在生产作业期间有意识地避开污损生物的繁殖盛期和幼虫附着高峰;另外,有效地利用幼虫的趋光性及其对附着基底材料颜色的偏好,适当调整仪器设备所处水层及外观色彩,也可减少幼虫和孢子的附着概率,降低污损生物的危害^[8]。然而,该方法多用于小型器材设备,且常见于水产养殖产业。

伴随着海洋经济产业的快速发展,各国对海洋生态环境的保护也日益重视,利用物体表面特殊的微观形貌抵御生物污损的物理防污途径已成为一种新的趋势。基于物体表面自由能越低附着力就越小,附着的生物体越易被除去,因此,参照大型海洋哺乳类动物皮肤的特点,人们开发出低表面能防污涂料,并在船舶和水产养殖网箱上进行试用。该技术利用涂料表面具有低表面能的物理性能,使海洋污损生物难以附着或附着不牢,借助水流的剪切力作用或者专门的清理设备即可将附着的海洋污损生物予以清除^[75-76]。

尽管低表面能防污涂料具有很多优点,但该技术尚存一些有待解决的问题。首先,低表面能防污涂料只有通过水流剪切力才能发挥作用,对于停泊靠岸的船舶或布设在水流平缓海域的设施效果不明显,仍需额外的清理维护;其次,某些低表面能防污涂料与基材的黏结牢固程度较低、强度较差,防污效果与有效期难以令人满意^[77];再有,一旦局部涂层破损,就会因污损生物幼虫和孢子附着萌发,而导致整个涂层失效。因此,对于低表面能防污涂料技术的研发应着重于新型材料的探索,降低生产、施工和维护成本,进一步拓展其应用范围。

海洋生物的化学防护机理十分复杂,是研究开

发新型防污技术的核心问题之一,但目前海洋天然防污化合物的研究多局限在分离纯化、结构鉴定、功能基团分析及防污活性测定等方面。另外,基于生物污损强度会随季节发生变化,海洋生物的化学防御体系也会产生相应改变^[36-37],因此,在揭示污损生物附着机理及弄清多种环境因子(温度、时间等)协同效应对污损生物附着影响的基础上,开展多学科协同创新研究,将有助于人们进一步认识天然活性化合物的防污作用机制,为研究开发高效无毒防污技术奠定基础。

参考文献:

- [1] Callow M E, Callow J A. Marine biofouling: a sticky problem [J]. *Biologist*, 2002, 49(1): 10-14.
- [2] 杨天笑, 严涛, 陈池, 等. 大型海洋污损生物对金属材料腐蚀影响及研究展望[J]. *工业安全与环保*, 2013, 39(11): 69-71.
- [3] Schultz M P, Bendick J A, Holm E R, et al. Economic impact of biofouling on a naval surface ship [J]. *Biofouling*, 2011, 27(1): 87-98.
- [4] Usachev I N, Yakubenko A R, Rubin O D. Fouling control at electric stations [J]. *Power Technology and Engineering*, 2002, 36(4): 229-234.
- [5] Sell D. Marine fouling[J]. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 1992, 100B: 169-184.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 胥震, 欧阳清, 易定和. 海洋污损生物防除方法概述及发展趋势[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2012, 24(3): 192-198.
- [9] 刘姗姗, 严涛. 海洋污损生物防除的现状 & 展望[J]. *海洋学研究*, 2006, 24(4): 53-60.
- [10] Rajagopal S, Jenner H A, Venugopalan V P. Operational and Environmental Consequences of Large Industrial Cooling Water Systems [M]. New York: Springer, 2012: 1-12.
- [11] Yebra D M, Kiil S, Dam-Johansen K. Antifouling technology - past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2004, 50(2): 75-104.
- [12] Champ M A. Economic and environmental impacts on ports and harbors from the convention to ban harmful marine anti-fouling systems [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 46(8): 935-940.
- [13] 张祝利, 王贤瑞. 我国渔船用防污漆的应用与监管现状及对策建议[J]. *渔业现代化*, 2014, 41(3): 60-64.
- [14] 曹文浩, 严涛, 刘永宏, 等. 海洋生物防污作用机制及应用前景[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(1): 146-151.
- [15] 钱培元. 抗污损海洋天然产物的开发及其作用机理研究进展[J]. *生命科学*, 2012, 24(9): 1026-1034.
- [16] 蔡立哲. 海洋底栖生物生态学和生物多样性研究进展[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2006, 45(Sup 2): 83-89.
- [17] 李新正. 我国海洋大型底栖生物多样性研究及展望: 以黄海为例[J]. *生物多样性*, 2011, 19 (6): 676-684.
- [18] Levinton J S. *Marine Biology Function, Biodiversity, Ecology (Second edition)* [M]. Oxford University Press: New York and Oxford, 2001: 495-503.
- [19] 徐恭昭. 游泳动物[J]. *海洋科学*, 1984, 8(1): 49-49.
- [20] 宋普庆, 张静, 林龙山, 等. 台湾海峡游泳动物种类组成及其多样性[J]. *生物多样性*, 2012, 20(1): 32-40.
- [21] 张静, 陈永俊, 宋普庆, 等. 福建东山湾游泳动物群落物种组成及其多样性[J]. *海洋渔业*, 2013(1): 15-23.
- [22] 李伟新, 朱仲嘉, 刘凤贤. *海藻学概论* [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 1-249.
- [23] Smyrniotopoulos V, Abatis D, Tziveleka L A, et al. Acetylene sesquiterpenoid esters from the green alga *Caulerpa prolifera* [J]. *Journal of Natural Products*, 2003, 66(1): 21-24.
- [24] Sneed J M, Pohnert G. The green alga *Dicytosphaeria ocellata* and its organic extracts alter natural bacterial biofilm communities [J]. *Biofouling*, 2011, 27(4): 347-356.
- [25] Dobretsov S V, Qian P Y. Effect of bacteria associated with the green alga *Ulva reticulata* on marine micro- and macrofouling [J]. *Biofouling*, 2002, 18(3): 217-228.
- [26] Egan S, Thomas T, Holmström C, et al. Phylogenetic relationship and antifouling activity of bacterial

- epiphytes from the marine alga *Ulva lactuca* [J]. Environmental Microbiology, 2000, 2(3): 343-347.
- [27] Ma Y X, Liu P L, Yu S B, et al. Inhibition of common fouling organisms in mariculture by epiphytic bacteria from the surfaces of seaweeds and invertebrates [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 222-226.
- [28] Bazes A, Silkina A, Defer D, et al. Active substances from *Ceramium Botryocarpum* used as antifouling products in aquaculture [J]. Aquaculture, 2006, 258(1): 664-674.
- [29] Nylund G M, Cervin G, Hermansson M, et al. Chemical inhibition of bacterial colonization by the red alga *Bonnemaisonia Hamifera* [J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 302: 27-36.
- [30] Denys R, Steinberg P D, Willemsen P, et al. Broad spectrum effects of secondary metabolites from the red alga *Delisea pulchra* in antifouling assays [J]. Biofouling, 1995, 8(4): 259-271.
- [31] Manilal A, Sujith S, Sabarathnam B, et al. Antifouling potentials of seaweeds collected from the southwest coast of India [J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2010, 6(3): 243-248.
- [32] Blackwell W H, Marak J H, Powell M J. The identity and reproductive structures of a misplaced *Solenopora* (Rhodophycophyta) from the Ordovician of southwestern Ohio and eastern Indiana [J]. Journal of Phycology, 1982, 18: 477-482.
- [33] 雷新明, 黄晖, 黄良民. 珊瑚礁生态系统中珊瑚藻的生态作用研究进展 [J]. 生态科学, 2012, 31(5): 585-590.
- [34] Keats D W, Knight M A, Pueschel C M. Antifouling effects of epithallial shedding in three crustose coralline algae (Rhodophyta, Corallinales) on a coral reef [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1997, 213(2): 281-293.
- [35] Puntip W, Masayuki K. Bioactive phloroglucinols from the brown alga *Zonaria diesingiana* [J]. Journal of Applied Phycology, 2003, 15(2-3): 225-228.
- [36] Marechal J P, Culioli G, Hellio C, et al. Seasonal variation in antifouling activity of crude extracts of the brown alga *Bifurcaria bifurcata* (Cystoseiraceae) against cyprids of *Balanus amphitrite* and the marine bacteria *Cobetia marina* and *Pseudoalteromonas haloplanktis* [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2004, 313(1): 47-62.
- [37] Mahasweta S, Wahl M. Seasonal variation in the antifouling defence of the temperate brown alga *Fucus vesiculosus* [J]. Biofouling, 2013, 29(6): 661-668.
- [38] Boyd K G, Adams D R, Burgess J G. Antibacterial and repellent activity of marine bacteria associated with algal surfaces [J]. Biofouling, 1999, 14(3): 227-236.
- [39] Marhaeni B, Radjasa O K, Khoeri M M, et al. Antifouling activity of bacterial symbionts of seagrasses against marine biofilm-forming bacteria [J]. Journal of Environmental Protection, 2011, 2(9): 1245-1249.
- [40] Palanisamy I, Peranandam R, Ramasamy R, et al. Antifouling and toxic properties of the bioactive metabolites from the seagrasses *Syringodium isoetifolium* and *Cymodocea serrulata* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 103: 54-64.
- [41] Todd J T, Zimmerman R C, Crews P, et al. The antifouling activity of natural and synthetic Pherrolic acidsulphate eaters [J]. Phytochemistry, 1993, 34(2): 401-404.
- [42] Wahl M. Marine epibiosis I. Fouling and antifouling: some basic aspects [J]. Marine Ecology Progress Series, 1989, 58: 175-189.
- [43] Petronis S, Berntsson K, Gold J, et al. Design and microstructuring of PDMS surfaces for improved marine biofouling resistance [J]. Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition, 2000, 11(10): 1051-1072.
- [44] Scardino A, de Nys R, Ison O, et al. Microtopography and antifouling properties of the shell surface of the bivalve molluscs *Mytilus galloprovincialis* and *Pinctada imbricate* [J]. Biofouling, 2003, 19(S1): 221-230.
- [45] Scardino A, de Nys R. Fouling deterrence on the bivalve shell *Mytilus galloprovincialis*: a physical phenomenon? [J]. Biofouling, 2004, 20(4-5): 249-257.
- [46] Harper E M, Skelton P W. A defensive value of the thickened periostracum in the Mytiloidea [J]. Veliger,

- 1993, 36(1): 36-42.
- [47] Mao-che L, Payri C, Le Campion T, et al. Biodegradation of shells of the black pearl oyster *Pinctada margaritifera* var. *cumingii*, by microborers and sponges of French Polynesia [J]. Marine Biology, 1996, 126(3): 509-519.
- [48] Wahl M, Kroger K, Lenz M. Non-toxic protection against epibiosis [J]. Biofouling, 1998, 12(1-3): 205-226.
- [49] Bers A V, Wahl M. The influence of natural surface microtopographies on fouling [J]. Biofouling, 2004, 20(1): 43-51.
- [50] Davis A R, Wright A E. Inhibition of larval settlement by natural products from the ascidian *Eudistoma olivaceum* [J]. Journal of Chemical Ecology, 1990, 16(4): 1349-1358.
- [51] Clare A S. Marine natural product antifoulants: status and potential [J]. Biofouling, 1996, 9(3): 211-229.
- [52] Standing J, Hooper I R, Costlow J D. Inhibition and induction of barnacle settlement by natural product present in octocorals [J]. Journal of Chemical Ecology, 1984, 10(6): 823-834.
- [53] Tomono Y, Hirota H, Fusetani N. Isogosterones A-D, antifouling 13, 17-secosteroids from an octocoral *Dendronephthya* sp. [J]. Journal of Organic Chemistry, 1999, 64(7): 2272-2275.
- [54] Yan T, Cao W H, Liu S S, et al. Ethylacetate extracts from the gorgonian coral *Subergorgia reticulata* reduce larval settlement of *Balanus* (= *Amphibalanus*) *reticulatus* and *Pinctada martensii* and spore germination of *Ulva linza*, *U. lactuca* and *Gracilaria tenuistipitata* [J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2011, 92(06): 1349-1355.
- [55] Konya K, Shinidzu N, Miki W, et al. Indole derivatives as potent inhibitors of larval settlement by the barnacle, *Balanus amphitrite* [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 1994, 58(12): 2178-2181.
- [56] Bers A V, D'Souza F, Klijnsstra J W, et al. Chemical defence in mussels: antifouling effect of crude extracts of the periostracum of the blue mussel *Mytilus edulis* [J]. Biofouling, 2006, 22(4): 251-259.
- [57] Bragadeeswaran S, Thangaraj S, Prabhu K, et al. Antifouling activity by sea anemone (*Heteractis magnifica* and *H. aurora*) extracts against marine biofilm bacteria [J]. Latin American Journal of Aquatic Research, 2011, 39(2): 385-389.
- [58] Okino T, Yoshimura E, Hirota H, et al. New antifouling kalihipyranes from the marine sponge *Acanthella cavernosa* [J]. Journal of Natural Products, 1996, 59(11): 1081-1083.
- [59] Nakatsu T, Walker R P, Thompson J E, et al. Biologically active sterol surfates from the marine sponge *Toxadocia zumi* [J]. Experientia, 1983, 39: 759-761.
- [60] Feng D Q, Qiu Y, Wang W, et al. Antifouling activities of hymenialdisine and debromohymenialdisine from the sponge *Axinella* sp. [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, 85: 359-364.
- [61] Hattori T, Adachi K, Shizuri Y. New ceramide from marine sponge *Haliclona korebella* and related compounds as antifouling substances against macroalgae [J]. Journal of Natural Products, 1998, 61(6): 823-826.
- [62] 曹文浩, 严涛, 刘永宏, 等. 美丽海绵提取物防污损作用[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4285-4290.
- [63] Sera Y, Adachi K, Nishida F, et al. A new sesquiterpene as an antifouling substance from a palauan marine sponge, *Dysidea herbacea* [J]. Journal of Natural Products, 1999, 62(2): 395-396.
- [64] Yang L H, Lee O O, Jin T, et al. Antifouling properties of 10 beta-formamidokalihinol-A and kalihinol A isolated from the marine sponge *Acanthella cavernosa* [J]. Biofouling, 2006, 22(1): 23-32.
- [65] Guenther J, Walker-Smith G, Warén A, et al. Fouling-resistant surfaces of tropical sea stars [J]. Biofouling, 2007, 23(6): 413-418.
- [66] Lee O O, Qian P Y. Chemical control of bacterial epibiosis and larval settlement of *Hydroides elegans* in the red sponge *Mycale adherens* [J]. Biofouling, 2003, 19(Suppl.): 171-180.
- [67] Aguila-Ramírez R N, Hernández-Guerrero C J,

- González-Acosta B, et al. Antifouling activity of symbiotic bacteria from sponge *Aplysina gerardogreeni* [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 90: 64-70.
- [68] Holmström C, Kjelleberg S. The effect of external biological factors on settlement of marine invertebrate and new antifouling technology [J]. Biofouling, 1994, 8(2): 147-160.
- [69] Dobretsov S, Qian P Y. The role of epibiotic bacteria from the surface of the soft coral *Dendronephthya* sp. in the inhibition of larval settlement [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2004, 299(1): 35-50.
- [70] Chambers L D, Stokes K R, Walsh F C, et al. Modern approaches to marine antifouling coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 3642-3652.
- [71] Soliman Y A, Mohamed A S, NaserGomaa M. Antifouling activity of crude extracts isolated from two Red Sea puffer fishes [J]. Egyptian Journal of Aquatic Research, 2014, 40(1): 1-7.
- [72] 罗爱梅, 蔺存国, 王利, 等. 鲨鱼表皮的微观形貌观察及其防污能力评价[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(6): 715-718.
- [73] Baum C, Meyer W, Roessner D, et al. A zymogel enhances the self-cleaning abilities of the skin of the pilot whale (*Globicephala melas*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology (Part A), 2001, 130(4): 835-847.
- [74] Baum C, Meyer W, Stelzer R, et al. Average nanorough skin surface of the pilot whale (*Globicephala melas*, Delphinidae): considerations on the self-cleaning abilities based on nanoroughness [J]. Marine Biology, 2002, 140(3): 653-657.
- [75] Brady R F. A fracture mechanical analysis of fouling release from nontoxic antifouling coatings [J]. Progress in Organic Coatings, 2001, 43(1-3): 188-192.
- [76] Kirschner C M, Brennan A B. Bio-inspired antifouling strategies [J]. Annual Review of Materials Research, 2012, 42: 211-229.
- [77] 于世长. 低表面能有机硅及其改性防污涂料的研究进展[J]. 涂料工业, 2014, 44(4): 74-78.

(本文编辑: 梁德海)