

三亚海洋环境试验站硅藻污损群落初探*

A Preliminary Study on Diatom Fouling Community in Sanya Marine Environmental Test Station

马士德^{1,2}, 李宇航¹, 段继周¹, 李文军³, 李博亮⁴, 符策鹤³, 王楠¹, 邵余⁵,

王启冉⁴, 任海滔³, 郭为民⁶

MA Shide^{1,2}, LI Yuhang¹, DUAN Jizhou¹, LI Wenjun³, LI Boliang⁴, FU Cehu³,
WANG Nan¹, TAI Yu⁵, WANG Qiran⁴, REN Haitao³, GUO Weimin⁶

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071; 2. 中国老教授协会海洋防腐防污专业委员会, 山东青岛 266071; 3. 三亚海洋环境试验站, 海南三亚 572000; 4. 青岛东启机械设备有限公司, 山东青岛 266071; 5. 南京理工大学, 江苏南京 210094; 6. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所青岛分部, 山东青岛 266101)

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao, Shandong, 266071, China; 2. Marine Anticorrosion & Antifouling Professional Committee of China Senior Professors Association, Qingdao, Shandong, 266071, China; 3. Sanya Marine Environmental Test Station, Sanya, Hainan, 572000, China; 4. Qingdao Tony Machinery & Equipment Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266071, China; 5. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu, 210094, China; 6. Qingdao Branch of Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao, Shandong, 266101, China)

摘要:【目的】探明海洋工程材料在热带海洋环境试验站硅藻污损群落的组成变化, 为研究该海域材料腐蚀、生物污损以及生物多样性提供参考。【方法】取 4 种材料进行全浸腐蚀试验, 定期取出试片冷藏客运到青岛, 用次氯酸钠法制成永久封片, 在带有微分干涉显微镜下计数, 并使用 PRIMER 6 对硅藻 Shannon 多样性指数、Pielou's 均匀度指数和 Simpson 优势度进行计算。【结果】检出污损硅藻 16 目 24 科 30 属 61 种, 其中双眉藻属、菱形藻属和舟形藻属为优势类群; 物种多样性指数随时间而增加; 热浸锌表面硅藻群落结构变化与其他 3 种材料有所不同。【结论】在南海热带近岸, 材料表面性质对其表面附着的污损硅藻群落有一定影响, 其中锌离子的影响较为明显。

关键词: 南海 硅藻 污损

中图分类号: Q178.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7378(2017)03-0178-07

Abstract: 【Objective】The purpose of this research is to investigate the variation of fouling diatom community on materials of ocean engineering in tropical marine environment, aiming to provide reference for material corrosion, biofouling and biodiversity in this sea area. 【Methods】Four types of material slides were subjected to a total immersion test. Material slides were refrigerated and transported to Qingdao on a regular basis. The samples were made into

permanent seal with sodium hypochlorite. Diatoms were counted by light microscopes (LM) equipped with differential interference contrast (DIC). The Shannon biodiversity index,

收稿日期: 2017-01-10

作者简介: 马士德(1938—), 男, 研究员, 主要从事海洋腐蚀与污损及其控制研究, E-mail: qdmashide@163.com.

* 国家自然科学基金项目(59471054, 59071040)资助。

Pielou's evenness index and Simpson's index of dominance were calculated in PRIMER 6. **【Results】**61 fouling diatom species belonging to 16 orders 30 genera and 24 families had been identified, among which *Amphora*, *Nitzschia* and *Navicula* were dominant. The Shannon diversity index of diatom increased on the surface of all materials during the experimental period. The structure change of fouling diatom community on the hot-dip zinc surface was different with the other three materials. **【Conclusion】**In tropical coastal water area of South China Sea, the surface properties of materials have influenced the adherent fouling diatom community. What's more, the influence of the Zinc ion is obvious.

Key words: South China Sea, diatom, fouling

0 引言

【研究意义】海洋硅藻具有极高的物种多样性和广泛的分布,是造成海洋生物污损的主要类群之一,污损硅藻约有 45 属 111 种^[1-4]。污损硅藻不仅是污损生物群落的初级生产者,为污损群落中的原生动物及大型污损生物幼虫提供食物^[5-6],而且可以在金属/海水界面中左右金属的初期腐蚀过程。因此,污损硅藻研究在污损生物学和海洋生物腐蚀方面具有重要的意义^[7-9]。**【前人研究进展】**我国对耐腐蚀材料的海水腐蚀研究开展较多^[10-13],对污损生物也有诸多研究^[14-16],而我国污损硅藻的研究始于 20 世纪六七十年代。王秋等^[17]于 1981 年在青岛、厦门、湛江进行玻璃试板海上挂片试验,鉴定出 23 种硅藻。1984 年黄宗国^[18]在厦门海域挂的玻璃试板鉴定出 21 属 61 种硅藻。笔者^[19]于 1982 年报道了青岛中港 4 种不同材料挂板的硅藻活体形态(碳钢片上的舟形藻,羽形藻),并于 2016 年完成青岛中港硅藻群落月变化的初步观察,共鉴定出污损硅藻 9 目 15 科 2 属 57 种(待发表)。然而,目前我国的污损硅藻研究仍处于调查描述初期阶段,对污损硅藻的基本物种组成、变化规律、地理环境相关性及其差异、不同材料的差异、附着过程及机理等研究仍需逐步深入。**【本研究切入点】**三亚海洋环境试验站系国家科委腐蚀学科组 1980 年确立的首批国家海水腐蚀站南海榆林站的搬迁新站点,地处海南岛三亚湾西端(东经 109°15', 北纬 18°17'),为我国热带海洋材料试验站,海滩以石英砂为主的贝壳屑堆成。1998 年—1999 年三亚湾海域生态与生物资源调查结果表明,硅藻为三亚湾海域浮游植物群落的主要类群^[20]。时隔近二十年,三亚湾的周边经济迅速发展,海洋开发利用发生巨大变化,必然对该区海洋环境产生一定影响。加之生物多样性因时空变化而异,因此有

必要对其再次进行系统的研究调查。**【拟解决的关键问题】**本研究选取三亚海洋环境试验站对 4 种材料进行全浸腐蚀试验,以了解热带污损硅藻的物种多样性以及不同金属材料对其影响,并获取实验站的生物环境资料。

1 材料与方法

1.1 挂片实验

取 4 种材料加工成载玻片大小(1.5 cm×7.5 cm),除油,清洗,测试表面状态,装实验框架(图 1),在海南三亚试验站进行挂片试验,其中钛合金、304 不锈钢、镀锌 Q2358、载玻片分别用字母 T、304、D、B 标记。将 4 种材料的试验架投放海水中约 1 m 深处,分别在 2 d、7 d、15 d、30 d 进行 4 次取样。将每种试片分别放在离心管中,加入适量过滤海水,编号,密封,冷藏空运到青岛。

1.2 样品处理和分析

1.2.1 样品处理

将所得试片放于 50 mL 离心管中,进行分类和编号。向离心管中加入 20~30 mL 蒸馏水,然后加入 10~15 滴含次氯酸的漂白剂,震荡并浸泡 20 min。取出挂板,加入 5 mL 无水乙醇并添加蒸馏水至 50 mL,2 000 r/min 离心 7 min。弃去上清液,再加入蒸馏水离心清洗两次。向洗净的沉淀中加入适量蒸馏水,用吸管吹打混匀。将盖玻片放在加热板上,用吸管将样品滴加到盖玻片上烤干。使用 Mountmedia (Wako Pure Chemical Industries, Ltd. Osaka, Japan)进行封片。

1.2.2 样品分析

使用带有微分干涉的 Nikon Eclipse 80i 显微镜对硅藻进行鉴定和计数。每个样品需计数 300 个壳以上,若装片内的硅藻不足 300 个时则全部计数。



图1 挂板照片

Fig. 1 The picture of hanging plate

1.2.3 数据处理

优势度 (Y) 计算公式如下: $Y = \frac{n_i}{f_i} N$, 式中 n_i 为

全部样品中第 i 个种的总丰度, N 为全部样品中所有物种的总丰度, f_i 为第 i 个种在全部样品中的出现频率。

使用 PRIMER 6^[21] 对试片表面硅藻的 Shannon 多样性指数^[22], Pielou's 均匀度指数^[23], Margalef 物种丰富度^[24] 和 Simpson 优势度^[25] 等进行计算。

2 结果与讨论

2.1 硅藻污损的群落组成

4 种材料实海挂片 1 个月, 取片分别鉴定, 结果共检出硅藻 3 纲、16 目、24 科、30 属、61 种, 其中双眉藻属 (*Amphora*)、菱形藻属 (*Nitzschia*) 和舟形藻属 (*Navicula*) 物种数较多, 分别为 10 种、10 种和 6 种, 试片表面硅藻的主要类群及优势度如表 1 所示。图 2 给出了从该实验站表层海水 11 月份污损硅藻主要物种的形态。

表 1 硅藻污损群落的主要类群(属)

Table 1 The main genera of diatom contaminated communities

试片种类 Type of materials	主要硅藻类群 Dominant diatoms	相对丰度 Percentage (%)	优势度指数 Dominant index
T	双眉藻属 <i>Amphora</i>	15.15	0.131 6
	卵形藻属 <i>Cocconeis</i>	11.77	0.105 3
	双壁藻属 <i>Diploneis</i>	5.55	0.052 6
	曲解藻属 <i>Fallacia</i>	5.55	0.052 6
	菱板藻属 <i>Hantzschia</i>	5.55	0.052 6
	楔形藻属 <i>Licomophora</i>	5.55	0.052 6
	舟形藻属 <i>Navicula</i>	18.75	0.157 9
	菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	15.15	0.131 6
304	双眉藻属 <i>Amphora</i>	21.05	0.173 9
	斑条藻属 <i>Grammatophora</i>	9.53	0.087 0
	舟形藻属 <i>Navicula</i>	14.5	0.130 4
	菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	14.5	0.130 4
B	双眉藻属 <i>Amphora</i>	20.53	0.170 3
	曲解藻属 <i>Fallacia</i>	5.13	0.048 8
	斑条藻属 <i>Grammatophora</i>	7.90	0.073 2
	海氏藻属 <i>Haslea</i>	5.13	0.048 8
	舟形藻属 <i>Navicula</i>	5.13	0.048 8
	菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	28.12	0.219 5
	沙网藻属 <i>Psammodictyon</i>	5.13	0.048 8
	粗纹藻属 <i>Trachyneis</i>	5.13	0.048 8
D	双眉藻属 <i>Amphora</i>	22.22	0.181 8
	菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	22.22	0.181 8

2.2 污损硅藻的多样性变化

通过 4 个周期 (0~2 d 为第 1 周期, 3~7 d 为第 2 周期, 8~15 d 为第 3 周期, 16~30 d 为第 4 周期) 4 种材料表面硅藻物种数的变化可以看出, 在前 3 个周期的样品表面, 硅藻物种数呈现较缓慢地上升。在第 4 周期, 钛合金 (T) 和载玻片 (B) 表面物种数明显升高, 分别达到 27 和 29 种; 304 不锈钢 (304) 表



图 2 硅藻群落主要种类的形态

Fig. 2 Morphology of main species of diatoms

面物种数上升速度低于钛合金和载玻片, 达到 13 种; 热浸锌 (D) 表面的物种出现下降, 仅为 2 种 (图 3)。实验选用的 4 种材料分别为非金属的玻璃片和 3 种金属材料, 其共同的特点是实验期间材料表面基本稳定。3 种金属材料依自身形成的氧化膜, 使其处于热力学稳定状态, 其中工业纯钛的氧化膜极为稳定, 304 不锈钢的表面氧化膜一旦被破坏需充分氧的存在下才能修复, 而热浸锌表面锌离子有一定的毒性, 对微型生物有一定的驱赶和毒杀作用, 可能为第 4 期物种明显下降的原因之一, 天然海水中微型生物变化影响因素很多, 已非一两次实验能下定论。

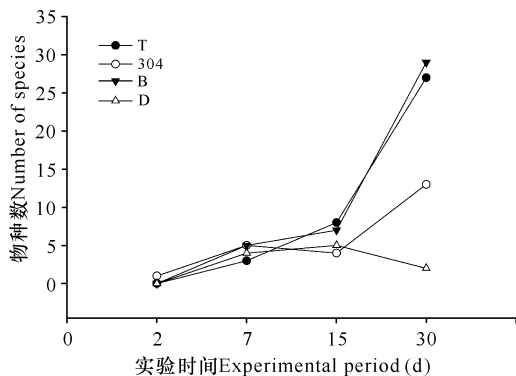


图 3 试片表面附着硅藻的物种数

Fig. 3 The number of diatom species attached to the test piece

对比4个周期不同材料表面附着硅藻 Shannon 多样性指数发现:在第1周期的样品表面均未检出附着硅藻,Shannon 多样性指数均为0。第2周期, T 和 304 材料表面多样性指数较高,分别为 1.56 和 1.55;其次为 D 材料,为 1.33;B 材料最低为 1.04。在第3周期 T 和 B 材料表面附着硅藻的多样性指数继续保持较高上升趋势,分别达到 2.025,1.616; D 材料表面硅藻多样性指数略微上涨,达 1.475; 304 表面附着硅藻多样性指数下降至 1.04。最后一个周期样品分析显示,T、304 和 B 材料表面硅藻多样性指数继续升高,分别达 2.877,2.582 和 2.208, 而 D 材料表面硅藻多样性指数出现明显下降,为 0.693(图 4)。多样性指数变化可由内外两个方面原因左右。内因是材料表面性能、毒性、极性、比表面积,B 材料表面光洁度高,相比之下比表面积小,同样条件下多样性指数较低;D 为热镀 Zn 材料,虽然比表面积大,但锌离子有一定毒性,故而多样性指数明显降低。影响多样性的外因为环境、水温、水流、营养元素多寡等。随着浸海时间增加,多种硅藻

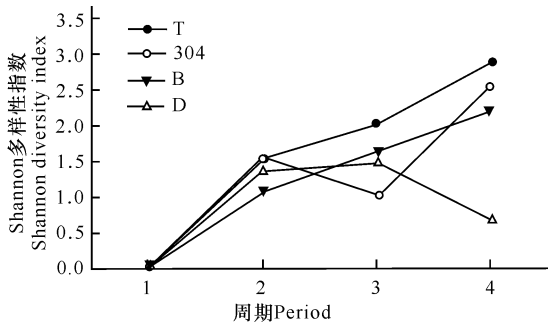


图 4 试片表面附着硅藻 Shannon 多样性指数变化

Fig. 4 The Shannon diversity index of diatoms attached to the test piece

附着的机会增加,多样性指数增加,硅藻群落也会随着时间增长不断增大,直至原生动物的出现抑制其发展而处于生态平衡。

从4个采样周期不同样品表面附着硅藻的均匀度可以看出,304 和 D 材料表面硅藻群落均匀度在第2周期时已达到最高值,且在第3,4周期依然保持较高的均匀度。T 材料和 B 材料的均匀度则相对较低,随后逐渐上升,分别于第3周期和第4周期达到均匀度高峰,表明污损硅藻物种和丰度逐渐达到稳定的状态(图 5)。

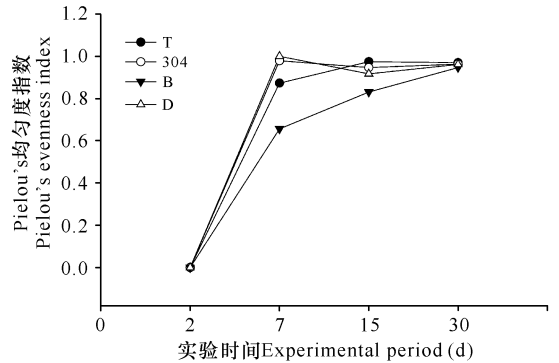
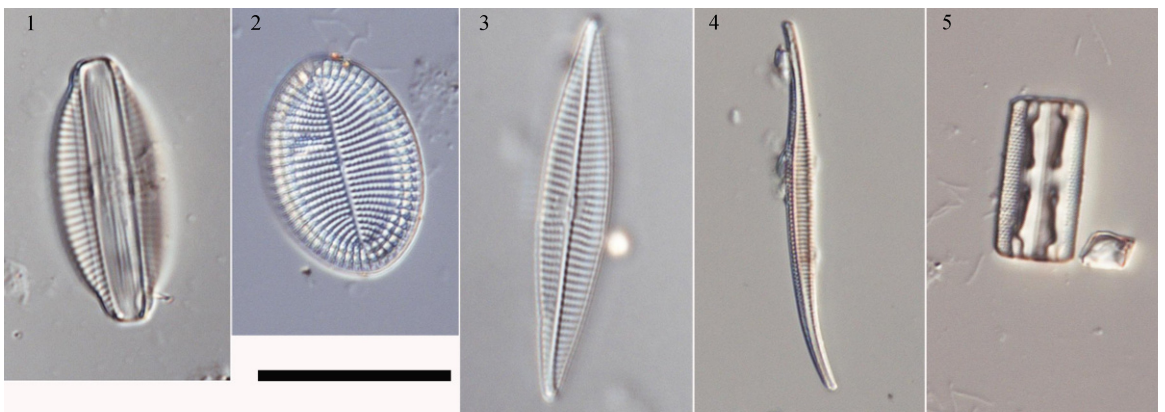


图 5 试片表面附着硅藻的均匀度

Fig. 5 The evenness of diatoms community on the test piece

2.3 硅藻群落的优势种

如图 6 所示,南海三亚海洋环境试验站 2016 年 11 月份在 4 种材料中出现最多的硅藻是线形双眉藻 (*Amphora lineata*)、盾卵形藻 (*Cocconeis cf. scutellum*)、沙生舟形藻 (*Navicula arenaria*)、洛氏菱形藻密纹变种 (*Nitzschia lorenziana*) 和海生斑条藻 (*Grammatophora marina*),为三亚实验站秋季硅藻污损群落的优势种。



1:线性双眉藻 *Amphora lineata*, 2:盾卵形藻 *Cocconeis cf. scutellum*, 3:沙生舟形藻 *Navicula arenaria*, 4:洛氏菱形藻密纹变种 *Nitzschia lorenziana*, 5:海生斑条藻 *Grammatophora marina*

图 6 试片附着硅藻优势种 (bar=10 μm)

Fig. 6 The dominant diatom species attached to the test piece (bar=10 μm)

本研究首次对三亚海域污损硅藻的物种多样性和群落结构进行初步研究, 研究结果表明: 污损硅藻主要为底栖硅藻, 有别于同海域浮游硅藻物种。底栖硅藻是我国海域危害海洋开发和海防设施的主要污损生物, 是研究海洋防腐蚀防微生物污损极为重要的一环。然而, 遗憾的是底栖硅藻在我国海洋生物多样性调查及海洋环境生物监测中均较少涉及, 致使对污损硅藻的多样性和生物量缺乏了解和有效的估计。在1998年—1999年对三亚生态环境与生物资源的调查中仅包含浮游硅藻的调查, 并未将底栖硅藻纳入调查项目。本研究研究表明, 浮游硅藻的优势种——旋转角毛藻在本次污损硅藻的调查中并未检出。因而, 仅对浮游硅藻进行调查无助于污损硅藻的检测。污损硅藻在当今海洋工程与海防工种建造, 以及海洋结构物的防腐防污研究中具有极为重要的意义, 在当前生物多样性的调查研究中, 理应占有一席之地。

3 结论

本研究采用挂片法对我国南海热带近岸表层硅藻污损群落的组成与结构变化进行调研, 鉴定海洋污损硅藻共3纲16目30属61种, 其中双眉藻属、菱形藻属和舟形藻属占优; 污损硅藻群落组成变化受材料表面性质的影响, 锌离子的毒性对污损硅藻群落结构有一定影响。

目前, 有关热带海洋污损硅藻的研究相对较少, 本研究提供了一份相对详实的表层海水污损硅藻群落结构及生物多样性资料。今后, 将针对不同水深, 不同地点开展进一步的研究, 以期全面准确地了解热带污损硅藻群落结构及多样性, 以及不同防腐材料应对硅藻生物污损的效果。

参考文献:

[1] 金德祥, 陈金环, 黄凯歌. 中国海洋浮游硅藻类[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1965.
JIN D X, CHEN J H, HUANG K G. Chinese marine planktonic diatoms [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1965.

[2] 金德祥, 程兆第, 林钧民, 等. 中国海洋底栖硅藻类: 上卷[M]. 北京: 海洋出版社, 1982.
JIN D X, CHENG Z D, LIN J M, et al. Chinese marine planktonic diatoms — Vol. 1 [M]. Beijing: China Ocean Press, 1982.

[3] Woods Hole Oceanographic Institution. Marine fouling and its prevention [M]. Victoria, BC, Canada: United

States Naval Institute, 1952.

[4] 相建海. 海洋生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
XIANG J H. Marine biology [M]. Beijing: Science Press, 2003.

[5] 马士德. 金属/海水界面两个主要过程的关系[J]. 海洋湖沼通报, 1979(2): 85-89.
MA S D. The relationship of two main processes on metal/sal. water [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1979(2): 85-89.

[6] 黄宗国. 海洋污损生物及其防除: 下册[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
HUANG Z G. Marine fouling and its prevention—Vol. 2 [M]. Beijing: China Ocean Press, 2008.

[7] 冯士祚. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
FENG S Z. Introduction of marine science [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.

[8] 黄宗国. 中国海洋生物种类与分布[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
HUANG Z G. Species and distribution of marine organisms in China [M]. Beijing: China Ocean Press, 2008.

[9] 马士德. 当代海洋科学前沿: 海洋生物腐蚀[M]. 北京: 学苑出版社, 2000: 160.
MA S D. Advances in marine sciences: Marine biofouling [M]. Beijing: Xueyuan Press, 2000: 160.

[10] 马士德, 李思忍, 周海华, 等. 南海东部海域不锈钢紧固件的腐蚀失效分析[J]. 广西科学院学报, 2016, 32(4): 288-293.
MA S D, LI S R, ZHOU H H, et al. Analysis of corrosion failure of stainless steel fasteners in eastern of the South China Sea [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2016, 32(4): 288-293.

[11] 马士德, 姚振玲, 廖阳飞, 等. 三种锌防腐层的海水腐蚀与防污性能初探[J]. 广西科学院学报, 2016, 32(3): 185-189.
MA S D, YAO Z L, LIAO Y F, et al. Antifouling properties and corrosion resistances of three kinds of Zinc coating in the sea [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2016, 32(3): 185-189.

[12] 刘欣, 程坤, 陈琴, 等. 镧含量对铝合金牺牲阳极海水综合电化学性能的影响[J]. 广西科学院学报, 2016, 32(3): 168-173.
LIU X, CHENG K, CHEN Q, et al. Effect of Lanthanum content on the comprehensive electrochemical performance of aluminium alloy sacrificial anode in the marine [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2016, 32(3): 168-173.

- [13] 张杰,李晓龙,张鑫,等. 镀层合金与碳钢基底的电偶腐蚀研究[J]. 广西科学院学报, 2015, 31(3): 187-191.
ZHANG J, LI X L, ZHANG X, et al. Galvanic corrosion study of surface coating and steel substrate[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2015, 31(3): 187-191.
- [14] 马士德,郭为民,赵霞,等. 南海海水腐蚀站站位变迁对腐蚀及生物污损的影响初探[J]. 广西科学院学报, 2015, 31(3): 202-208.
MA S D, GUO W M, ZHAO X, et al. Preliminary study on corrosion and biofouling influenced by position change of the South China Sea sea-water corrosion station[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2015, 31(3): 202-208.
- [15] 马士德,王在东,赵杰,等. 海洋污损生物对海工混凝土工程腐蚀性分析[J]. 广西科学院学报, 2015, 31(3): 209-213.
MA S D, WANG Z D, ZHAO J, et al. Effects of fouling organisms on the corrosion of marine concrete [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2015, 31(3): 209-213.
- [16] 马士德,王在东,刘会莲,等. 青岛海鸥浮码头冬季污损生物调查分析[J]. 广西科学院学报, 2015, 31(3): 214-218.
MA S D, WANG Z D, LIU H L, et al. Investigation and analysis of fouling organisms in Qingdao seagulls floating dock[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2015, 31(3): 214-218.
- [17] 王秋,黄美君,芦澄清,等. 海洋微型污损性附着生物的初步研究[J]. 山东海洋学院学报, 1981, 11(1): 46-52.
WANG Q, HUANG M J, LU C Q, et al. Preliminary investigation on marine microfouling organisms[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1981, 11(1): 46-52.
- [18] 黄宗国. 海洋污损生物及其防除:上册[M]. 北京:海洋出版社, 1975.
HUANG Z G. Marine fouling and its prevention - Vol. 1[M]. Beijing: China Ocean Press, 1975.
- [19] 马士德. 腐蚀与防护学术报告会议论文集[M]. 北京:科学出版社, 1982.
MA S D. Academic conference proceedings of corrosion and protection[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [20] 黄良民,张偲,王汉奎,等. 三亚湾生态环境与生物资源[M]. 北京:科学出版社, 2007.
HUANG L M, ZHANG S, WANG H K, et al. Ecological environment and bio-resources for Sanya Bay, Hainan Island, China [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [21] CLARKE K R, GORLEY R N. PRIMER v6: User manual/tutorial (Plymouth routines in multivariate ecological research)[M]. Plymouth: Primer-E Ltd., 2006.
- [22] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication[M]. Illinois: University of Illinois Press, 1971.
- [23] PIELOU E C. The measurement of diversity in different types of biological collection[J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, 13: 137-144.
- [24] MARGALEF R. Perspectives in ecological theory [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1968.
- [25] SIMPSON E H. Measurement of diversity[J]. Nature, 1949, 163(4148): 688.

(责任编辑:米慧芝)