

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20181207.001

马士德, 王在东, 刘会莲, 等. 热浸锌材料的生物污损研究[J]. 广西科学院学报, 2018, 34(4): 251-260.

MA S D, WANG Z D, LIU H L, et al. Study on biofouling of hot-dip galvanizing materials[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2018, 34(4): 251-260.

热浸锌材料的生物污损研究*

Study on Biofouling of Hot-dip Galvanizing Materials

马士德^{1,2}, 王在东³, 刘会莲^{1**}, 李博亮³, 王启冉³, 韩文³, 徐利婷⁴, 马岩¹, 段继周¹

MA Shide^{1,2}, WANG Zaidong³, LIU Huilian¹, LI Boliang³, WANG Qiran³, HAN Wen³, XU Liting⁴, MA Yan¹, DUAN Jizhou¹

(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. 青岛东启机械设备有限公司, 山东青岛 266071; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong, 266071, China; 2. Marine Anticorrosion & Antifouling Professional Committee of China Senior Professors Association, Qingdao, Shandong, 266071, China; 3. Qingdao Tony Machinery & Equipment Co. Ltd., Qingdao, Shandong, 266071, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

摘要:【目的】探讨青岛海域热浸锌材料的生物污损特点。【方法】用富锌材料作对比,于青岛中港进行3年的热浸锌海港试验,对两种材料上污损生物群落的组成和分布情况进行月检和年检,对比不同深度、光照下污损生物群落组成差异,并应用PRIMER 6软件进行污损生物群落多样性分析。【结果】热浸锌试板防污性能优于富锌试板,但随着浸海时间的延长,防污性能会逐渐减弱;试板上污损生物群落和优势种随季节、光照和水深变化而有一定差异;综合考虑各种影响因素,用PRIMER 6软件分析污损生物群落多样性结构,得到的结果与传统分析方法一致。【结论】青岛海域热浸锌材料上污损生物群落组成、优势种类和污损程度受季节、光照、水深等的影响。

关键词:热浸锌 海洋污损生物 防污 多样性指数 青岛

中图分类号:X835 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-7378(2018)04-0251-10

Abstract:【Objective】To investigate the characteristics of bio-fouling of hot-dip galvanizing materials in Qingdao sea area. 【Methods】Using zinc-rich plates as control group, the hot-dip galvanizing plates and zinc-rich plates were put in seawaters for 3 years in Qingdao Middle Harbor. Monthly and annually inspections were carried out to study the composition and distribution of the marine fouling organism community, and the differences of the community under the different depth and illumination were compared, and the community diversity analysis was carried out by using PRIMER 6 software. 【Results】The anti-fouling performance of hot-dip zinc plates was better than that of zinc-rich plates. However, with the extension of

immersion time, the antifouling performance gradually decreased. The composition and dominant species of the community on the test plates changed with season, depth and illumination. Taking into various influencing factors, the results of community diversity analysis by using PRIMER 6 software were consistent with the traditional analytical method. 【Conclusion】In

收稿日期:2018-08-10

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。

* 国家自然科学基金项目(59471054, 59071040)资助。

** 通信作者:刘会莲(1972—),女,副研究员,主要从事海洋污损生物学及苔藓动物分类学研究, E-mail: hlliu@qdio.ac.cn.

Qingdao sea area, the composition and dominant species of marine fouling organism community on hot-dip galvanizing plates changed with season, depth and illumination.

Key words: hot-dip galvanizing, marine fouling organisms, antifouling, index of diversity, Qingdao

0 引言

【研究意义】海洋污损生物与人们开发利用海洋的经济活动密切相关,从经典的木船航运到近代的海洋农牧、海洋油气开发、水下海工设施等,无不遭受污损生物的危害。锌是一种既可以防止钢铁腐蚀又能受自身腐蚀产物保护从而减慢自身腐蚀的金属,而且用镀锌保护钢材成本相对较低,所以镀锌涂层成为广泛使用的金属防腐蚀方法^[1]。在海洋环境中,海洋生物污损和材料表面腐蚀相关。污损生物附着会造成材料表面性质改变,从而影响腐蚀进程。目前有关污损生物和材料腐蚀关系的研究多侧重于金属材料本身的腐蚀和污损,涉及表面包覆涂层材料的腐蚀和污损的研究较少^[2]。青岛海域关于材料腐蚀尤其是涂层材料腐蚀和生物污损关系的研究资料相对缺乏。**【前人研究进展】**海洋钢结构表面的锌防腐保护技术常用的有涂锌(富锌涂料)^[3-4]、镀锌(热浸镀、热喷镀)和热渗锌^[5-7],这些技术主要是基于锌在海洋中的耐蚀性优于钢铁以及 Fe/Zn 电偶中锌的牺牲阳极作用^[8]。热浸锌技术 1742 年由法国化学家 Melouin 首创,1837 年英国人 Grawford 取得了溶剂法热浸锌的专利,1931 年 Sendzimir 创立用保护气体还原法进行带钢连续热浸锌的“森吉米尔法”并获得美国专利,这些技术都为热浸锌钢材的生产奠定了基础^[9]。我国热浸锌钢板的生产始于 20 世纪 50 年代,20 世纪 90 年代全国各钢铁公司均已投产,广泛应用于我国海洋开发中的各种结构设施上。海工设施在海洋环境中会同时遇到海洋腐蚀和海洋生物污损危害,美国伯明翰大学研究指出,仅仅美国的海军设施每年就有十亿美元用于污损生物防除^[10];还有报告指出每年因生物污损给船舰造成了超过 30% 的燃料消耗^[11]。燃料消耗增加,同时也增加了温室气体排放,给环境和人类生存造成威胁^[12]。海洋污损生物群落可破坏海工防腐涂层,影响金属腐蚀^[13-15]。热浸锌初期对防污有一定作用,但浸海数月后仍会同其他材料一样遭受不同程度污损生物的污损。我们曾对热浸锌锚链和裸钢锚链在青岛中港进行过生物污损防除性能比较研究^[16],研究的初步结果显示热浸锌锚链较之裸钢锚链有一定防污性能。为期 1.5 年的海港实验也表明热浸锌对

污损生物的排斥能力大于冷镀锌和富锌材料^[17]。

【本研究切入点】研究青岛海域热浸锌材料(对比富锌材料)的生物污损特点。**【拟解决的关键问题】**通过在青岛中港进行为期 3 年的热浸锌试板(以富锌试板作对照)海港实验,研究对比两种试板上污损生物群落组成、优势种和生物量的季节变化及影响因素,对比两种材料的防污性能及其影响因素。

1 材料与方 法

1.1 试板制备

取普碳钢(M60)加工成 600 mm×60 mm×5 mm(一端打孔 $\phi 18$ mm),表面分别进行富锌涂料(JR-FX)处理(富锌涂料处理过程参见文献[18])和热浸锌处理^[17]。

热浸锌试板的制备过程如下:

a. 抛丸:去除试板上的锈污,依试板上的锈层厚度不同,清除时间不同。除净锈污后,钢铁试板表层呈银灰色;

b. 酸洗:以 18%~20%(W:W)的稀盐酸,加入缓冲剂,配置成酸洗液。把试板吊入酸洗溶液中 8~10 min。酸洗不好,易引起镀层散落;

c. 水洗:试板经过酸洗后,盐酸等会残留在试板上,必须清洗干净,否则会继续与试板发生反应生成铁锈,出现返锈现象;

d. 浸锌:用葫芦岛 60 号出口锌(纯度 99.99%)熔化成锌液(500℃左右),把试板浸入锌液中,使试板均匀附上锌层。浸锌的时间影响 Fe-Zn 化合物和镀层厚度;

e. 漂洗:浸锌后的试板需用 2%(W:W)的 NH₄Cl 溶液进行漂洗。

1.2 试板投放与检测

将试板用螺栓紧固到塑料固定装置上,制成试验用的试板架。2014 年 4 月将试板架投放于青岛中港海鸥浮码头处的海水中。于 2015 年 7 月—2016 年 5 月和 2016 年 6 月—2017 年 6 月期间将试板架提出水面,对其进行月检测,观察污损生物群落变化情况并拍照记录。其中,2015 年 12 月,2016 年 1—2 月和 2016 年 11—12 月因冬季生物附着无明显变化(从常规附着生物试板看,无明显大型底栖生物附着),所以未进行月检测。并分别于 2015 年 7

月、2016年5月、2017年6月进行年检测,对试板上所有生物进行刮取、分类、称重,计算试板上单位面积污损生物的质量,记录实验结果。

在2017年6月年检测时,将两种试板取下,每种试板分阳面和阴面,并分别从水面到水下,每10 cm为一小区,进行编号照相,然后将每个小区的污损生物收集装袋,带回实验室进行分类、称重、群落组成分析等,并记录实验结果。

1.3 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, N 为第*i*个种在全部样品中的出现频率。

使用PRIMER 6^[19]对试板表面的大型污损生物进行Shannon多样性指数^[20]、Pielou均匀度指数^[18]分析计算。

2 结果与分析

2.1 污损生物群落的月变化

月检实验结果(图1~8)表明:

(1)无论浸海时间长短,无论阳面还是阴面,热浸锌试板海洋生物污损强度通常低于对照组的富锌试板,这在2015—2016年的月板实验中尤为明显。这说明热浸锌材料的防污性能要优于富锌材料,这与马士德等^[17]2016年的研究结果相似。

(2)随着浸海时间的延长,热浸锌试板和富锌试板上的生物污损强度都有所提升。如2015—2016年试板中,后面几个月份的附着量通常大于开始的

几个月份;第二年试板开始月份的附着量多于第一年试板开始月份的附着量。这说明:一方面,两种试板材料随着浸海时间的延长,防污性能都在逐渐减弱;另一方面,前期污损生物的附着可能为后续污损生物提供了更为丰富的附着基,促进了后续附着。

(3)同一时期的同一种试板(热浸锌试板或富锌试板),阳面和阴面的污损生物群落组成不尽相同。阳面的生物污损程度通常高于阴面,但阴面的生物种类有时更多样。可能的原因是,试板上的污损生物优势类群具趋光生长性,如藻类通常只在阳面生长,在阴面很少出现。另外,在试板检测时常发现试板阳面有泥状膜覆盖,而阴面很少出现泥状膜,这些泥状膜可能是微藻等形成的生物膜,它可能促进其他生物附着。

(4)不同季节、不同年份两种试板上的污损生物种类组成不尽相同,即存在季节变化和年际变化。2015—2016年,夏季和春季的污损生物附着量和优势种类有一定差异;热浸锌试板阴面在2015—2016年贻贝很少出现,但在2016—2017年贻贝通常占优势。

本次调查中,2015年8月份两种试板上的污损生物出现的种类和生物量都较少,这与历史资料记载6—8月为青岛一年中附着生物种类最丰富的月份^[21]有差异,可能是由于2015年7月试板刚刚下板,锌的防污性能还较高,所以8月份试板附着生物并不丰富。

综上所述,热浸锌试板防污性能优于富锌试板,但随着浸海时间的延长,防污性能会逐渐减弱。试板上的污损生物群落存在季节更替和年际变化现象;不同季节污损生物的优势种类有一定差异。



图1 2015—2016年热浸锌试板阳面月变化

Fig. 1 Monthly variation on the sunny side of the hot-dip galvanizing plate from 2015 to 2016



图2 2015—2016年热浸镀锌试板阴面月变化

Fig. 2 Monthly variation on the shady side of the hot-dip galvanizing plate from 2015 to 2016



图3 2016—2017年热浸镀锌试板阳面月变化

Fig. 3 Monthly variation on the sunny side of the hot-dip galvanizing plate from 2016 to 2017

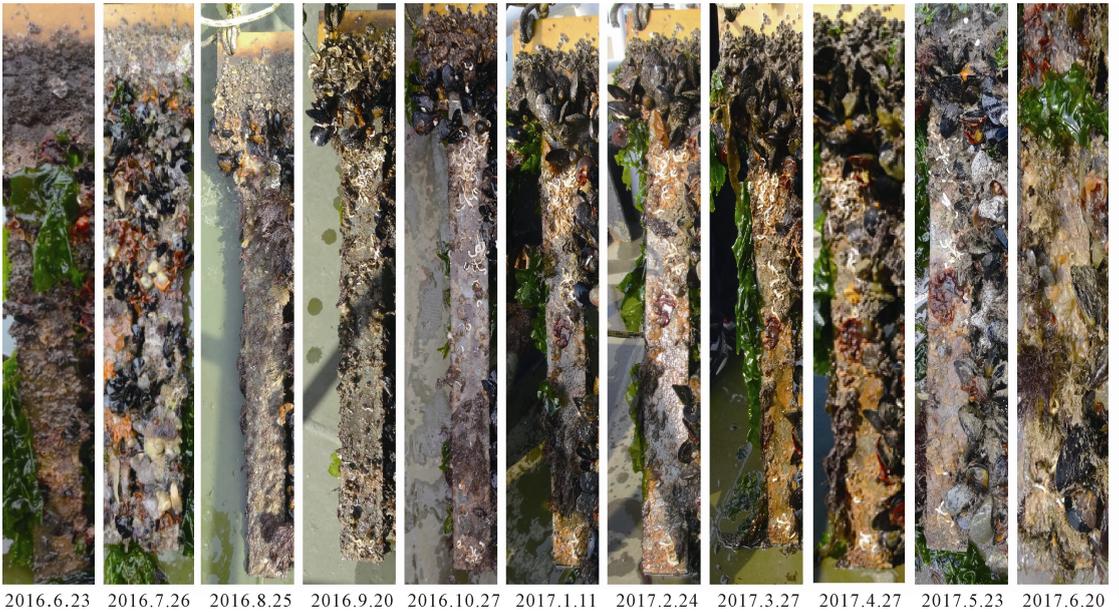


图4 2016—2017年热浸镀锌试板阴面月变化

Fig. 4 Monthly variation on the shady side of the hot-dip galvanizing plate from 2016 to 2017

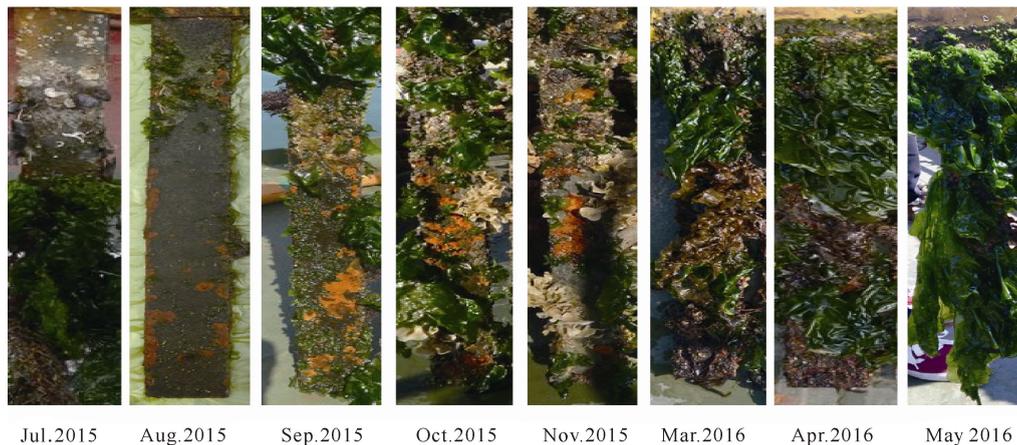


图 5 2015—2016 年富锌涂料试板阳面月变化

Fig. 5 Monthly variation on the sunny side of the zinc-rich coating plate from 2015 to 2016

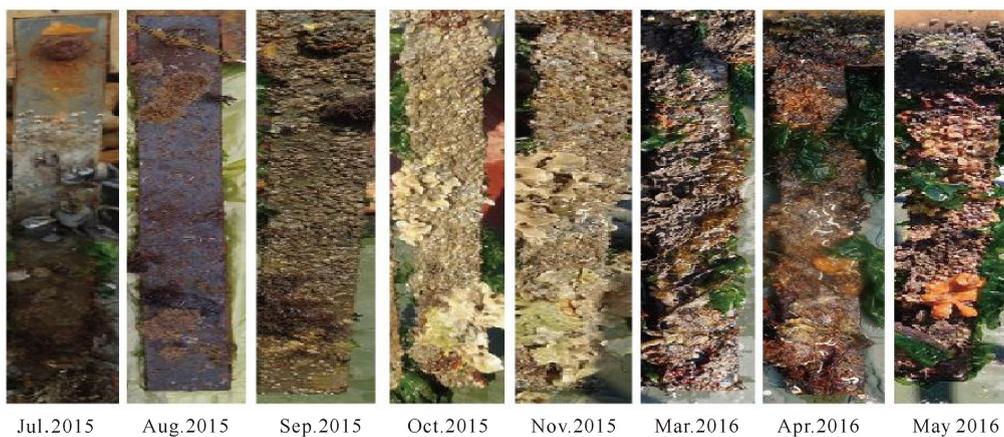


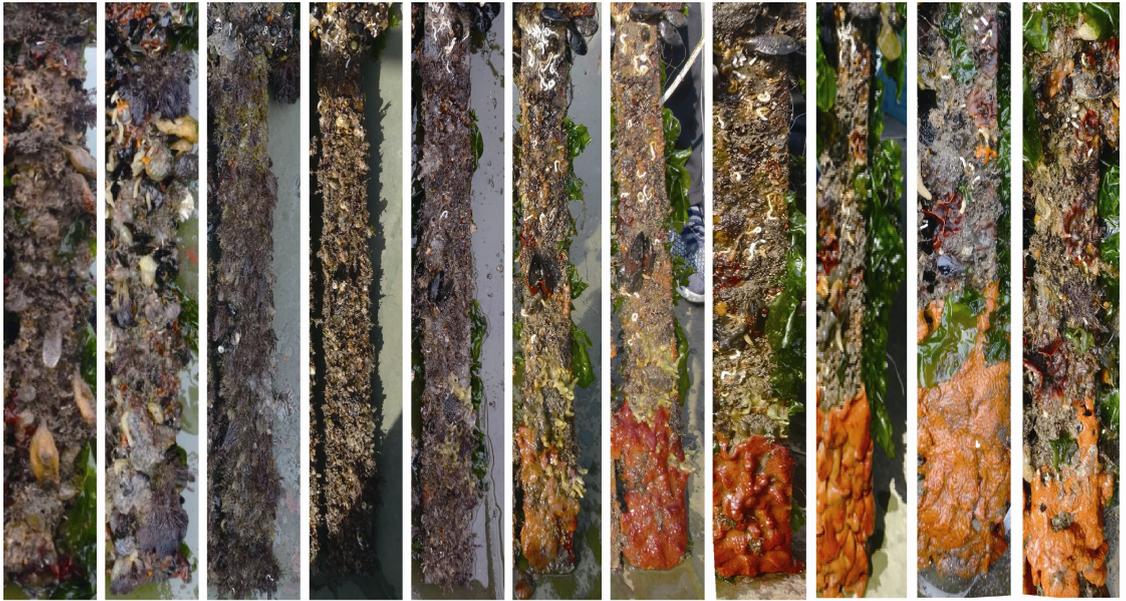
图 6 2015—2016 年富锌涂料试板阴面月变化

Fig. 6 Monthly variation on the shady side of the zinc-rich coating plate from 2015 to 2016



图 7 2016—2017 年富锌涂料试板阳面月变化

Fig. 7 Monthly variation on the sunny side of the zinc-rich coating plate from 2016 to 2017



2016.6.23 2016.7.26 2016.8.25 2016.9.20 2016.10.27 2017.1.11 2017.2.24 2017.3.27 2017.4.27 2017.5.23 2017.6.20

图8 2016—2017年富锌涂料试板阴面月变化

Fig. 8 Monthly variation on the shady side of the zinc-rich coating plate from 2016 to 2017

2.2 光照和水深对生物多样性的影响

2017年6月年检时,两种试板不同水深及不同光照(阴、阳面)污损生物生物量分布见图9~12。

热浸锌试板(图9~10),在30 cm以上水层(包括30 cm),阳面污损生物生物量高于阴面,阳面优势种为贻贝和牡蛎,石莼在阳面0~10 cm层也占相当优势;阴面优势种不明显,贻贝、复海鞘、石灰虫和藤壶生物量稍高。30~50 cm水层,阳面污损生物

的生物量低于阴面,阳面的优势种主要为贻贝、藤壶和苔藓虫,阴面的优势种为牡蛎和复海鞘;50~60 cm水层,阴、阳面污损生物的生物量相差不大,阳面的优势种为草苔虫,阴面的优势种为贻贝和复海鞘。

生物量占优势的种类中,贻贝、牡蛎等个体生物量较大的种类覆盖面积往往较小,阴面的复海鞘生物量和覆盖面积都占优势,贻贝、牡蛎、藤壶和石灰虫等上面常有其他生物附着。

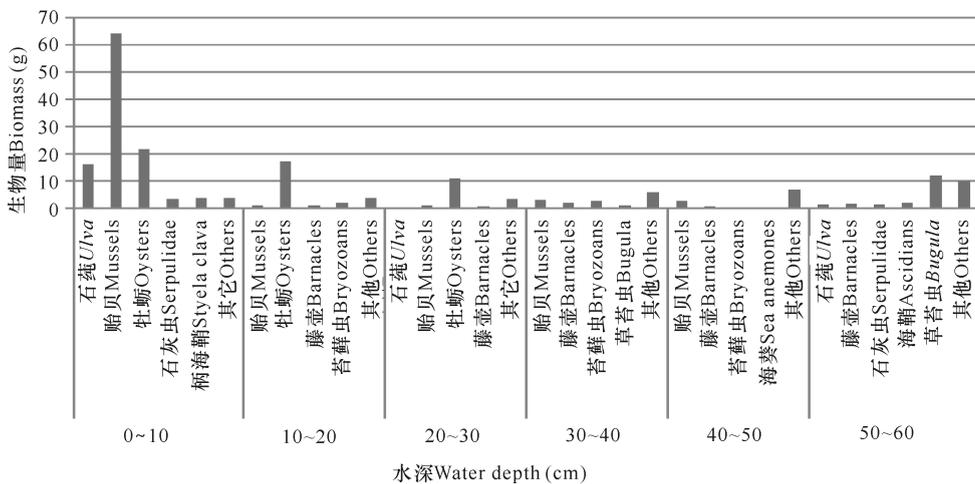


图9 2017年热浸锌年板阳面污损生物生物量分布与水深的关系

Fig. 9 Relationship between distribution of biofouling biomass and depth on the sunny side of hot-dip galvanizing annual plate in 2017

富锌试板(图 11~12),阴、阳面污损生物生物量都有随着深度增加而逐渐降低的趋势。阳面大多数水层污损生物生物量略高于阴面,但在 0~10 cm 水层阳面由于石莼和贻贝大量附着,生物量远高于阴面。10~20 cm 水层,阳面的优势种为牡蛎,阴面为贻贝和石灰虫;20~30 cm 水层,阳面优势种为石莼和藤壶,阴面为石灰虫;30~40 cm 水层,阳面优势种为藤壶和复海鞘,阴面为牡蛎和苔藓虫;40~50 cm 水层,阳面优势种为藤壶和复海鞘,阴面为苔藓虫(包括被覆生长的苔藓虫和直立生长的草苔虫);50~60 cm 水层,阳面优势种为藤壶和复海鞘,阴面为石灰虫和苔藓虫(包括被覆生长的苔藓虫和直立生长的草苔虫)。

富锌试板上生物量占优势的种类一般覆盖面积也较高。富锌试板阳面和阴面的总生物量都高于热浸锌试板相应的面,但热浸锌试板阳面 50~60 cm 水层和阴面 30~60 cm 水层各层的生物量都高于富锌试板相应水层的生物量。热浸锌试板污损生物种类多样性普遍高于富锌试板。

综上所述,青岛中港试板上污损生物群落的种类组成、优势种和生物量大小受光照和水深的影响。同一水层,阴面和阳面的污损生物群落在种类组成、优势种和生物量上不尽相同;同一附着面(阳面或阴面),不同水层的污损生物群落组成、优势种和生物量也有一定差异。另外,不同试板材料,其上的污损生物群落组成、优势种和生物量大小也不完全相同。和富锌试板相比,热浸锌试板的防污性能更易受光照和水深的影响,这一点与同一海区的冷镀锌试板实验结果相似^[18]。

2.3 污损生物多样性变化及其原因

使用 PRIMER 6 软件对污损生物群落的多样性和均匀度进行分析结果(表 1)表明:热浸锌试板阳面的污损生物群落多样性和均匀度指数均低于阴面,说明其阴面的群落多样性程度较高;而富锌试板阳面污损生物群落的多样性和均匀度指数均高于阴面,说明其阳面的群落多样性程度较高。另外还可看出,本次实验中,热浸锌试板阳面污损生物群落的多样性程度与富锌试板阴面的群落相当。

PRIMER 6 软件广泛应用于海洋生物群落结构和多样性的研究^[9,22],但在污损生物群落的多样性分析中应用较少^[19],国内在海洋大型底栖生物群落调查中^[20]和浮游植物的多元分析中^[13]有过应用,本研究将该软件用于大型污损生物群落结构分析,为生物污损量化研究开创了新途径。但在利用软件

进行生物污损分析的过程中仍存在问题:首先,对于成片附着的种类,如海鞘、苔藓虫、海绵等生物,无法进行量化处理;其次,短期内季节性旺盛生长的种类,如石莼、红褐藻类、贻贝等生物,可能造成污损生物量的陡升(表 2),这种季节性的生物量变化会对生物多样性指数和均匀度等量化指标造成影响。本研究中,如考虑 10 cm 以上水层,由于藻类的影响,富锌试板和热浸锌试板都呈阳面生物量大于阴面的结果,但如果剔除表层藻类的影响,只考虑 10~60 cm 水层,富锌试板上阳面生物量大于阴面,而在热浸锌试板上则是阴面生物量大于阳面,这与 PRIMER 软件分析结果相一致。因此,在分析实验结果时,要综合考虑研究方法及各种影响因子,才能做出合理的解释。

表 1 生物多样性指数和均匀度指数

Table 1 The index of biodiversity and uniformity

试板 Experimental plates	多样性指数 Biodiversity index	均匀度 Evenness index
热浸锌试板阳面 Sunny side of the hot-dip galvanizing plate	0.405 725 6	0.369 307 3
热浸锌试板阴面 Shady side of the hot-dip galvanizing plate	0.633 659 2	0.914 177 0
富锌试板阳面 Sunny side of the zinc-rich plate	0.705 975 1	0.642 606 2
富锌试板阴面 Shady side of the zinc-rich plate	0.408 697 7	0.372 012 7

表 2 2017 年 6 月两种试板年板污损生物总生物量对比

Table 2 Total biomass of fouling organisms on the two kinds of annual plates of June 2017

试板 Experimental plates	水层深度 Depth range(cm)	总生物量 Total biomass(g)	
		阳面 Sunny side	阴面 Shady side
富锌试板 Zinc-rich plate	0~60	785.20	202.71
	10~60	136.89	116.31
热浸锌试板 Hot-dip galvanizing plate	0~60	206.11	142.29
	10~60	87.43	115.75

综上,多样性分析结果显示同一试板阴、阳面污损生物群落多样性结构不尽相同,不同试板的不同面上的污损生物群落多样性结构可能相似。利用 PRIMER 6 软件对污损生物群落结构进行分析时,可能受到片状附着生物或短期旺盛生长生物等因素

的影响,因此分析多样性结果时要综合考虑各种影响因素。

3 结论

热浸锌试板防污性能优于富锌试板,但随着浸海时间的延长,防污性能会逐渐减弱。青岛中港试板上的污损生物群落存在季节更替和年际变化现象;不同季节污损生物的优势类群有一定差异。

青岛中港试板上污损生物群落的种类组成、优势种和生物量大小受光照和水深的影响。同一水层,阴面和阳面的污损生物群落在种类组成、优势种和生物量上不尽相同;同一附着面(阳面或阴面),不同水层的污损生物群落组成、优势种和生物量也有一定差异。另外,不同试板材料,其上的污损生物群落组成、优势种和生物量大小也不完全相同。和富锌试板相比,热浸锌试板的防污性能更易受光照和水深的影响。

同一试板阴、阳面污损生物群落多样性结构不尽相同,不同试板的不同面上的污损生物群落多样性结构可能相似。利用 PRIMER 6 软件对污损生物群落结构进行分析时,可能受到片状附着生物或短期旺盛生长生物等因素的影响,因此分析多样性结果时要综合考虑各种影响因素。

参考文献:

- [1] 张召恩,杨瑞枫,刘光明,等. 钢铁镀锌技术及进展[J]. 首钢科技,2007(1):1-5.
ZHANG Z E, YANG R F, LIU G M, et al. The development of galvanizing technology for steel [J]. Shougang Technology, 2007(1):1-5.
- [2] 郑纪勇. 海洋生物污损与材料腐蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(2):171-176.
ZHENG J Y. Influence of marine biofouling on corrosion behavior[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(2):171-176.
- [3] 洪定海. 钢筋腐蚀引起混凝土结构破坏的修补对策[J]. 腐蚀与防护, 1996, 17(3):51-56.
HONG D H. Repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion[J]. Corrosion & Protection, 1996, 17(3):51-56.
- [4] WETZEL D. Batch hot dip galvanized coatings[Z]. REIDENBACH F. ASM handbook volume 5: Surface engineering. Materials Park, OH: ASM International, 1994:360-371.
- [5] FOUNTOULAKI S G. Continuous electrodeposited coatings for steel strip[Z]. REIDENBACH F. ASM handbook volume 5: Surface engineering. Materials Park, OH: ASM International, 1994:349-359.
- [6] MUNER C G. Inorganic zinc coatings past, present and future[J]. Mater Perform, 1975, 14(5):25-29.
- [7] 章小鸽. 锌的腐蚀与电化学[M]. 仲海峰,程东妹,译. 北京:冶金工业出版社,2008.
ZHANG X G. Corrosion and electrochemistry of Zinc [M]. ZHONG H F, CHENG D M, trans. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [8] 张关宝. 氧-乙炔焰热喷涂技术[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1986.
ZHANG G B. Oxygen acetylene flame thermal spray technology [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press, 1986.
- [9] SCHIELE K S, DARR A, ZETTLER M L. Verifying a biotope classification using benthic communities-an analysis towards the implementation of the European Marine Strategy Framework Directive[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 78(1/2):181-189.
- [10] CALLOW M E, CALLOW J E. Marine biofouling: A sticky problem[J]. Biologist (London), 2002, 49(1):10-14.
- [11] 中华人民共和国建设部建筑涂料工程研究中心. 涂料行业研究报告之防污涂料[R]. 2003.
The Engineering Research Center of Architectural Coatings, Ministry of Construction, P R China. The anti-fouling paint coating of the paint industry report [R]. 2003.
- [12] SCHULTZ M P. Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering[J]. Biofouling, 2007, 23(5):331-341.
- [13] JONES D A, AMY P S. A thermodynamic interpretation of microbiologically influenced corrosion[J]. Corrosion, 2002, 58(8):638-645.
- [14] LITTLE B, RAY R. A perspective on corrosion inhibition by biofilms[J]. Corrosion, 2002, 58(5):424-428.
- [15] ÖRNEK D, HSU C H, MANSFELD F, et al. Pitting corrosion control of aluminum 2024 using protective biofilms that secrete corrosion inhibitors[J]. Corrosion, 2002, 58(9):761-767.
- [16] 马士德,王在东,刘会莲,等. 国产热浸锌锚链的耐蚀性研究(I):热浸锌锚链的海港实验[J]. 海洋科学集刊, 2017, 52(1):104-113.
MA S D, WANG Z D, LIU H L, et al. Research on the corrosion resistance of domestic hot-dip galvanizing chain (I): Test for hot-dip galvanizing chain at sea port[J]. Studia Marina Sinica, 2017, 52(1):104-113.

- [17] 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.
- [18] 马士德,王在东,刘会莲,等. 冷镀锌涂层的生物污损研究[J]. 中国涂料, 2017, 32(9):32-39.
MA S D, WANG Z D, LIU H L, et al. A research on biofouling of cold galvanizing coatings [J]. China Coatings, 2017, 32(9):32-39.
- [19] 吴荣军,李瑞香,朱明远,等. 应用 PRIMER 软件进行浮游植物群落结构的多元统计分析[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(4):316-321.
WU R J, LI R X, ZHU M Y, et al. Multivariate analysis with PRIMER on marine phytoplankton community structure in mesocosm system[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2006, 37(4):316-321.
- [20] 周红,张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(1):58-64.
ZHOU H, ZHANG Z N. Rationale of the multivariate statistical software PRIMER and its application in benthic community ecology[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 33(1):58-64.
- [21] 李洁民,黄修明,黎国珍,等. 中国几个主要海港附着生物生态的研究[J]. 海洋与湖沼, 1964, 6(4):371-408.
LI J M, HUANG X M, LI G Z, et al. Ecological studies on the marine fouling organisms at some important ports of China [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1964, 6(4):371-408.
- [22] TOMASSETTI P, GENNARO P, LATTANZI L, et al. Benthic community response to sediment organic enrichment by mediterranean fish farms: Case studies [J]. Aquaculture, 2016, 450:262-272.

(责任编辑:陆雁)