

# 港湾微型污损生物生态研究

## ——浮游硅藻与附着硅藻初探

马士德<sup>1</sup>, 李宇航<sup>2,3</sup>, 郭定<sup>1,4</sup>, 郇余<sup>5</sup>, 韩文<sup>5</sup>, 刘佳<sup>1</sup>, 段继周<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院海洋研究所, 海洋先进材料重点实验室, 海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室, 山东 青岛

<sup>2</sup>中国科学院海洋研究所, 海洋生物分类与系统演化实验室, 山东 青岛

<sup>3</sup>青岛市海洋生物多样性与保护重点实验室, 山东 青岛

<sup>4</sup>中国科学院大学海洋学院, 北京

<sup>5</sup>青岛东启机械设备有限公司, 山东 青岛

收稿日期: 2024年8月6日; 录用日期: 2024年9月6日; 发布日期: 2024年9月19日

### 摘要

港湾微型污损生物生态研究, 是海洋生态研究中的新亮点。本文采用自行设计的港湾微型污损生物调查办法, 于2016年3~8月和2017年12月至2018年3月, 在青岛中港进行挂板浸没实验。用常规海洋硅藻检测方法。结果表明: 3~8月的月板附着硅藻种群数量和优势种逐月变化较大; 冬季百天附着硅藻优势种随浸水时间的长短变化: 浸水30天的为小平片藻, 浸水百天的为楔形藻、卵形藻和舟形藻; 表层水中优势种为抱角毛藻, 底层水中为中骨条藻。用PRIMER6软件计算硅藻种群多样性结果附着硅藻 > 浮游硅藻。初步得出影响硅藻种群变化的主要因素为环境温度, 试板表面状态和大型污损生物种群相关。本研究为港湾环境的硅藻生态以及污损研究提供参考。

### 关键词

港湾生态, 微型污损生物, 硅藻

# Ecological Study on Microfouling Organisms in Harbor

## ——Preliminary Study on Planktonic and Attached Diatom

Shide Ma<sup>1</sup>, Yuhang Li<sup>2,3</sup>, Ding Guo<sup>1,4</sup>, Yu Tai<sup>5</sup>, Wen Han<sup>5</sup>, Jia Liu<sup>1</sup>, Jizhou Duan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Marine Advanced Materials, Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Biofouling, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>Laboratory of Marine Organism Taxonomy and Phylogeny, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao Shandong

\*通讯作者。

文章引用: 马士德, 李宇航, 郭定, 郇余, 韩文, 刘佳, 段继周. 港湾微型污损生物生态研究[J]. 海洋科学前沿, 2024, 11(3): 141-152. DOI: 10.12677/ams.2024.113015

<sup>3</sup>Qingdao Key Laboratory of Marine Biodiversity and Conservation, Qingdao Shandong<sup>4</sup>College of Marine Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing<sup>5</sup>Qingdao Tony Machinery and Equipment Co., Ltd., Qingdao ShandongReceived: Aug. 6<sup>th</sup>, 2024; accepted: Sep. 6<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 19<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Harbor microfouling ecology is a burgeoning focus in marine ecological research. This study utilized a specially designed method to investigate microfouling organisms in harbor environments, conducting immersion experiments with glass slides from March to August 2016 and from December 2017 to March 2018 in Zhong-gang Harbor, Qingdao. Conventional marine diatom detection techniques were employed. The results indicated that the species composition and dominance of diatom populations attached to the slides varied significantly from March to August. In winter, dominant diatom species varied with immersion duration: after 30 days, *Tabularia* was dominant, while after 100 days, *Licmophora*, *Cocconeis* and *Navicula* became predominant. The surface water layer was dominated by *Chaetoceros*, whereas the bottom layer was dominated by *Skeletonema*. Analysis using PRIMER6 software revealed that the diversity of attached diatoms was higher than that of planktonic diatoms. The primary factors influencing diatom population dynamics were environmental temperature, substrate surface conditions, and the presence of large biofouling organisms. This study provides valuable insights into diatom ecology and biofouling in harbor environments.

## Keywords

Harbor Ecology, Microfouling Organisms, Diatom

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

## 1. 引言

海洋微型污损生物系指在海工设施表面上附着繁衍的底栖微型生物，通常包括细菌类、单胞藻和原生动物，其中硅藻是其最主要的类群，并和细菌形成生物膜，与海洋腐蚀在同一个界面发生，互相作用，直接影响了海工设施的性能发挥，造成重大经济损失——仅全球防污费用每年可达 200 亿美元[1]-[3]。

硅藻系单细胞真核藻类，约有 10 万余种，占全球浮游生物总量的 60% 以上，贡献了全球约 1/5 的海洋初级生产力[4]。根据生长方式分类，硅藻可以分为浮游硅藻(*Planktonic diatom*)和底栖硅藻(*Benthic diatom*)两大类，附着在海工设施表面上的硅藻主要为底栖附着硅藻。在微型污损单胞藻群落中，硅藻具有种类多、丰度高、繁殖快等特点，可为原生动物和后生动物的幼仔提供饵料，是微型污损生物群落中 70% 初级生产力的主要贡献者。硅藻细胞具有硅质化的细胞壁，由 96% 的 SiO<sub>2</sub> 构成，大部分会沉积海底形成硅质沉积物，是海洋生物地球化学中海洋硅循环的主要构成。硅藻广泛分布于地球各海域，由于能够快速反映水体物质的变化，可以作为水质环境生物指标，被欧洲明确列入《水框架指南》[5][6]。硅藻通过分泌多糖，蛋白等有机质，在细胞壁上形成胞外聚合物 EPS (Extracellular polymers substance)，极易吸引原生动物及后生动物幼仔的附着[7][8]。硅藻在进行光合作用时，需和海水中的 Fe<sup>2+</sup> 作用。在缺氧的环境中，厌氧细菌利用 Fe<sup>2+</sup> 催化进行氧化还原作用，均能影响钢铁的腐蚀作用，因而成为海洋腐蚀污损研究

的热点[9]-[11]。

港湾生态是海洋生态中受人类活动影响最为严重的区域。胶州湾属北温带季风气候，典型的半日潮为我国海洋科学研究的源地，已有近百年的研究历史，现保存有 50 余年长期考察资料和生物样品。2003 年，设置了 14 个基本涵盖胶州湾主要生态系统的观察站，每月检测记录湾内的水文气象参数[12]。青岛中港位于胶州湾的东岸，是海洋腐蚀学和污损生物学研究基地，已记录了 50 年可视污损生物种群及其变化[1][2][13][14]。然而对于微型污损生物调研仅有 20 余年的调研资料[15]-[19]。微型污损生物群落，是在有限小空间竞争繁衍的，具有复杂的空间结构的微生态系统，是多学科关注的结合体，需要众多的、长期的、连续的调查和观察资料。青岛中港作为国际邮轮母港，受外港物种影响较大，更需关注。本文以青岛中港为例，利用 PRIMER6 软件[20]实施调查资料的计算，为寻求附着硅藻与浮游硅藻的相关性，同时为脆弱的港湾生态系统提供基础数据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试板与实验架的制备

取载玻片试板(2.5×7.5 cm)，将其擦干后用丙酮和无水乙醇除油，清洗干净。用两条带槽塑料按照图 1 所示，将载玻片试板紧密排列，并用捆扎带对载玻片试板进行装架后固定、备用。



Figure 1. Optical photograph of the test plate after mounting  
图 1. 实验架实物光学照片



Figure 2. Satellite map of Jiaozhou Bay and Zhong-gang Harbor in Qingdao  
图 2. 胶州湾和青岛中港卫星图

**Table 1.** Basic physical and chemical environmental parameters of seawater in Zhong-gang harbor, Qingdao [8]  
**表 1.** 青岛中港海水物理化学环境参数[8]

指标	数据
平均气温/°C	12.3
平均空气湿度/%	71.0
平均年降雨量/mm*a <sup>-1</sup>	643.0
平均海水温度/°C	13.7
平均海水盐度/‰	31.5
平均海水溶解氧/mg*L <sup>-1</sup>	8.4
平均海水 pH 值	8.3

## 2.2. 试板的投放与回收

于 2016 年 3~8 月在青岛中港海鸥浮码头投放月板试样架进行挂片实验(地标详见图 2, 环境理化因子见表 1)。将两个实验架试板分别固定在有金属重锤的尼龙绳上, 然后将实验试架试板浸入海水中 1 m 左右。每月取出并投放新试架试板。用无菌手套将浸入海水的试板取出, 放入装有 40 mL 灭菌海水的离心管中。为研究深度对材料表面附着硅藻的影响, 同时降低大型污损生物对附着硅藻的影响, 选择青岛冬季无大型污损生物繁殖的季节, 即 2017 年 12 月至 2018 年 3 月进行 100 天的挂片实验。表层实验试架试板浸入海水 1 m 左右, 底层实验试架试板距离海底 1 m 左右。第 100 天取出试板备用, 并用采水器, 采集表层和底层水样各 1 L。

## 2.3. 浮游硅藻样品的鉴定计数

水体浮游植物样品沉降 48 h, 浓缩至 20 mL, 使用浮游生物计数板, 在带有微分干涉的 Nikon Eclipse 80i 显微镜下进行观察计数。每个样品计数大于 200 个细胞, 获得物种数及相对细胞丰度数据, 然后根据浓缩体积计算水体中物种的细胞丰度。对于细胞个体不足 200 的样品计数所有细胞, 统计物种及相对丰度后, 计算水体中各物种的细胞丰度。

## 2.4. 附着硅藻的鉴定计数

将试板表面的附着硅藻刮下, 使用次氯酸钠法对附着在其表层的硅藻进行酸化, 以去除其内部有机质。酸化后的硅藻壳使用 Mountmedia (Wako Pure Chemical Industries, Ltd., Osaka, Japan)进行封片。制成的永久封片, 使用带有微分干涉的 Nikon Eclipse 80i 显微镜进行观察计数。在显微镜下对底栖硅藻进行鉴定和计数, 每个样品需计数 200 个硅藻壳以上, 装片内的硅藻若不足 200 个则全部计数。

## 2.5. 数据处理

使用 PRIMER 6 [20]对试板表面以及水体的硅藻种群的 Shannon 多样性指数[21], Pielou's 均匀度指数[22]等进行计算。附着和浮游硅藻种群的优势度(Y)计算公式如下:

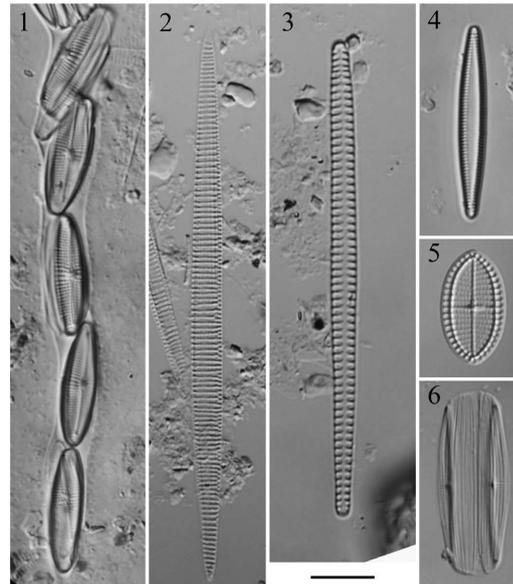
$$Y = \frac{n_i}{f_i} N$$

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。

### 3. 结果

#### 3.1. 月板表面附着硅藻的种类与组成

月板表面鉴定出硅藻 57 种，优势种见表 2，其形貌详见图 3。在所有试板表面附着的硅藻物种中，优势种为覆盖平片藻(*Tabularia investiens*)、十字卵形藻(*Cocconeis stauroneiformis*)、普氏藻一种(*Proschkinia cf. hyalosirella*)、伪菱形藻一种(*Pseudo-nitzschia cf. cuspidata*)、多枝舟形藻(*Navicula ramossissima*)和鸟喙舟形藻(*Navicula avium*) (优势度 > 5%，表 2)。



1. 伯克利书形藻; 2. 伪菱形藻; 3. 覆盖平片藻;  
4. 小型平片藻; 5. 十字卵形藻; 6. 普氏藻。

Figure 3. Dominant species attached to test plate (bar = 10 μm)

图 3. 附着在试板上的优势种(标尺 = 10 μm)

Table 2. Dominant diatom species attached to the surface of the test plate

表 2. 试板表面附着硅藻优势物种

硅藻类别	拉丁名	Y
覆盖平片藻	<i>Tabularia investiens</i>	15.09%
十字卵形藻	<i>Cocconeis stauroneiformis</i>	13.43%
普氏藻一种	<i>Proschkinia cf. hyalosirella</i>	7.17%
伪菱形藻一种	<i>Pseudo-nitzschia cf. cuspidata</i>	7.17%
多枝舟形藻	<i>Navicula ramossissima</i>	6.19%
鸟喙舟形藻	<i>Navicula avium</i>	5.06%
伯克利书形藻	<i>Parlibellus berkeleyi</i>	4.91%
中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>	4.91%
小型平片藻	<i>Tabularia parva</i>	2.57%
橙红伯克力藻	<i>Berkeleya rutilans</i>	2.49%
透明菱形藻	<i>Nitzschia pellucida</i>	2.11%

### 3.2. 3~8 月试板表面附着硅藻群落结构的月变化

3~8 月附着硅藻优势物种变化较大, 详见图 4。3 月份试板表面硅藻主要为平片藻属(*Tabularia*), 其中覆盖平片藻占绝对优势(73.46%); 4~5 月份, 书形藻(*Parlibellus*)、舟形藻(*Navicula*)、海氏藻(*Haslea*)、普氏藻(*Proschkinia*)和菱形藻(*Nitzschia*)等属的硅藻相对丰度占优势, 其中一种普氏藻占绝对优势(40.64%); 6~7 月份, 卵形藻(*Cocconeis*)和双眉藻(*Amphora*)等属硅藻的相对丰度占优势, 其中十字卵形藻在 6~7 月份的试板表面最为优势(53.50%, 43.45%)。然而, 到 8 月份时, 细弱伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia cf. cuspidata*)和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)两种浮游硅藻在样品中大量出现, 相对丰度分别为 33.93%和 23.21%。

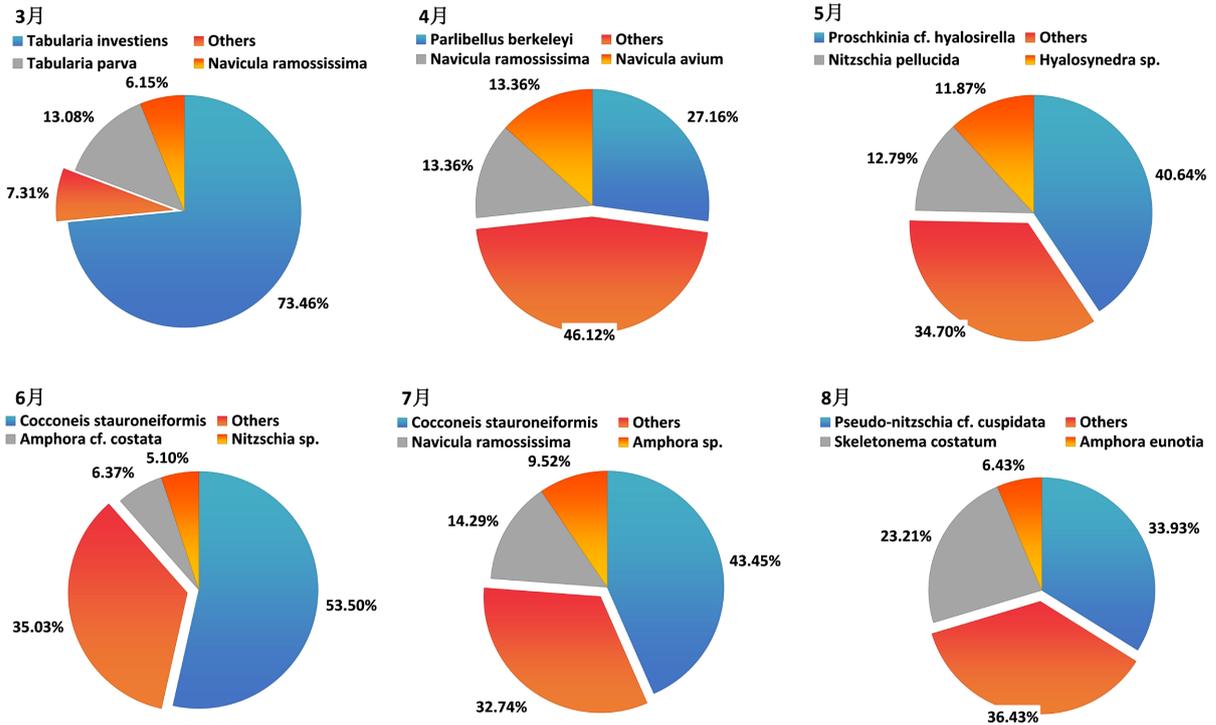


Figure 4. Monthly variation in the relative abundance (%) of dominant attached diatom species  
图 4. 附着硅藻优势种的相对丰度月变化(%)

### 3.3. 3~8 月试板表面附着硅藻的多样性变化

附着硅藻的物种数在 3 月份最低为 12 种, 随后物种数逐渐升高, 至 8 月份最高为 24 种。7 月份物种数略低, 为 19 种。Shannon 多样性指数(H')在 3 月份时最低(1.05), 4 月份达到最高值(2.0), 随后基本稳定(表 3)。均匀度(J')与多样性基本呈现相同的趋势, 即 3 月份时最低(0.5596), 4 月份至 8 月份无明显的变化(0.6473~0.8174)。优势度的趋势与多样性和均匀度相反。

Table 3. Changes in the biodiversity of diatoms attached to test plates

表 3. 试板附着硅藻的生物多样性变化

生物多样性指数/时间	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月
物种数(S)	12	17	18	21	19	24
多样性指数(H')	1.051458	2.312677	2.085725	2.025302	2.150295	2.269714
均匀度(J')	0.4231379	0.8162736	0.7216112	0.6652282	0.7302901	0.7141837

### 3.4. 冬季 100 天实验的附着和浮游硅藻种类与组成

在表层和底层的试板表面鉴定得到 23 种硅藻, 在表层和底层的水体当中鉴定得到 18 种硅藻。其中, 表层和底层试板以扇形楔形藻(*Licmorphora flabellate*)、奇异楔形藻(*Licmorphora paradoxa*), 十字卵形藻(*Cocconeis stauroneiformis*)和极细舟形藻(*Navicula perminuta*)最为优势(相对丰度均大于 10%)。表层水体以绕孢角毛藻(*Chaetoceros cinctus*)占比最高, 达 81.28%, 其次为中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*, 12.83%)。底层水体以中肋骨条藻占比最高, 达 52.00%, 同时还包含许多底栖物种, 如透明菱形藻(*Nitzschia hyalina*), 极细舟形藻(*Navicula perminuta*), 新月细柱藻(*Cylindrotheca closterium*)等(表 4, 表 5, 图 5)。

**Table 4.** Community structure of diatom species in test plates during the 100-day experiment on the Seagull from 2017 to 2018  
**表 4.** 2017~2018 年海鸥号 100 天实验表底层试板硅藻群落结构

试样类型	硅藻种类	拉丁名	Y
试板表层	扇形楔形藻	<i>Licmorphora flabellate</i>	30.57%
	奇异楔形藻	<i>Licmorphora paradoxa</i>	29.02%
	十字卵形藻	<i>Cocconeis stauroneiformis</i>	15.03%
	极细舟形藻	<i>Navicula perminuta</i>	14.51%
	小型平片藻	<i>Tabularia parva</i>	3.11%
	舟形藻	<i>Navicula sp.</i>	2.07%
	飞鸟舟形藻	<i>Navicula avium</i>	2.07%
	其他	Others	3.62%
试板底层	十字卵形藻	<i>Cocconeis stauroneiformis</i>	24.44%
	极小舟形藻	<i>Navicula perminuta</i>	17.78%
	格氏双眉藻	<i>Amphora graeffeana</i>	14.07%
	扇形楔形藻	<i>Licmorphora flabellate</i>	11.85%
	奇异楔形藻	<i>Licmorphora paradoxa</i>	11.85%
	双眉藻一种	<i>Amphora sp.</i>	4.44%
	舟形藻一种	<i>Navicula sp.</i>	2.96%
	海滨双壁藻	<i>Diploneis littoralis</i>	2.22%
	橙红伯克力藻	<i>Berkeleya rutilans</i>	2.22%
	透明菱形藻	<i>Nitzschia hyalina</i>	2.22%
其他	Others	5.95%	

**Table 5.** The community structure of predominant diatom species in surface and bottom water columns during the 100-day experiment on the Seagull from 2017 to 2018

**表 5.** 2017~2018 年海鸥号 100 天实验表、底层水样主要硅藻物种的群落结构

试样类型	硅藻种类	拉丁名	Y
表层水体	绕孢角毛藻	<i>Chaetoceros cinctus</i>	81.28%
	中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>	12.83%
	霍氏半管藻	<i>Hemiaulus hauckii</i>	3.21%
	新月细柱藻	<i>Cylindrotheca closterium</i>	2.14%
	其他	Others	0.54%

续表

底层水体	中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>	52.00%
	透明菱形藻	<i>Nitzschia hyalina</i>	8.00%
	极小舟形藻	<i>Navicula perminuta</i>	8.00%
	舟形藻一种	<i>Navicula sp.</i>	5.00%
	新月细柱藻	<i>Cylindrotheca closterium</i>	4.00%
	菱形藻	<i>Nitzschia sp.</i>	4.00%
	格氏双眉藻	<i>Amphora graeffeana</i>	4.00%
	柔弱海链藻	<i>Thalassiosira tenera</i>	3.00%
	菱形藻一种	<i>Nitzschia sp.</i>	3.00%
	圆筛藻一种	<i>Coscinodiscus</i>	2.00%
	奇异楔形藻	<i>Licmophora paradoxa</i>	2.00%
	尖端盘状藻	<i>Tryblionella apiculata</i>	2.00%
	橙红伯克力藻	<i>Berkeleya rutilans</i>	2.00%
	其他	Others	1.00%

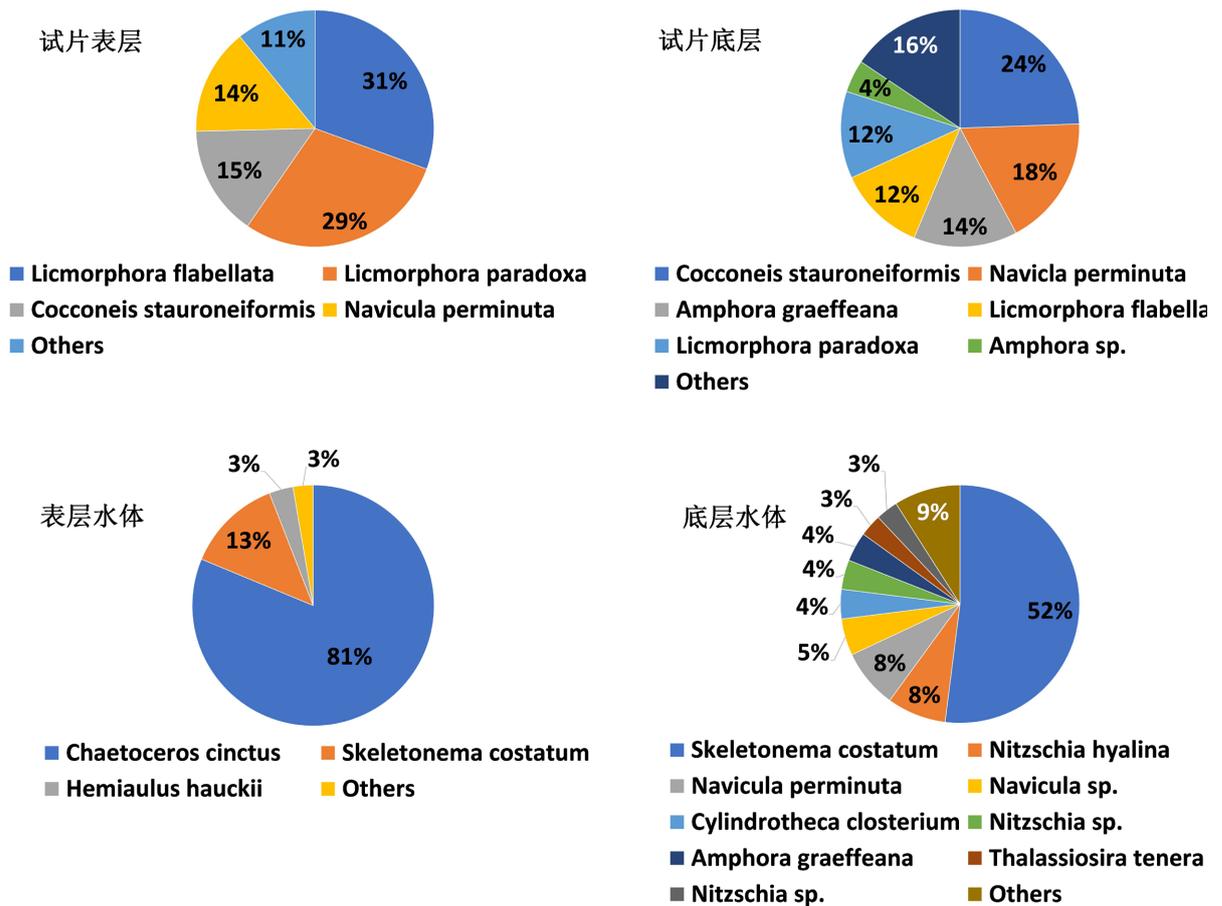


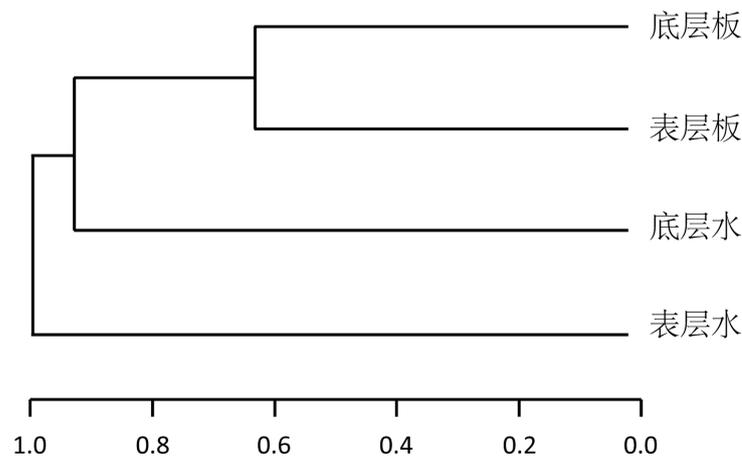
Figure 5. The community structure of predominant diatom species during the 100-day experiment conducted from 2017 to 2018  
 图 5. 2017~2018 年 100 天实验中主要硅藻物种的群落结构

**Table 6.** Differences in diatom diversity indices between test plates and water columns (S: Number of species; J': Evenness index; H': Diversity index)**表 6.** 试板与水样中的硅藻多样性指数的差异(S: 物种数; J': 均匀度指数; H': 多样性指数)

Sample/多样性指数	S	J'	H' (loge)
试板	23	0.6737	2.112
水样	18	0.587	1.697
底层试板	17	2.210	0.780
表层试板	10	1.655	0.719
底层水	13	1.768	0.689
表层水	6	0.723	0.404

### 3.5. 冬季 100 天硅藻群落结构聚类分析

试板和水体的硅藻类别具有明显差异,而表层和底层试板也存在着物种组成上的差异。总体上来看,底层试板和海水的硅藻物种数多于表层海水和试板(表 4, 表 5)。试板表面附着的硅藻物种数 S (23 种 vs. 18 种)、多样性指数 J' (2.112 vs. 1.697)、物种均匀度 H' (0.6737 vs. 0.587)均高于水体(表 6)。图 6 的聚类分析显示,表层和底层试板表面附着硅藻的群落结构最为相近,其次为底层水体中的硅藻,而与表层水体的差异较大。

**Figure 6.** Clustering analysis of diatom grades on the test plates and in the water columns**图 6.** 试板与水体中硅藻等级聚类分析

## 4. 讨论

### 4.1. 附着硅藻种群结构的月变化

由实验结果(表 2, 图 3)可知,3~8 月份的月板表面附着硅藻的种群结构发生了较为明显的变化。3 月份的试板表面检出 12 种硅藻,其中主要物种为固着的无壳缝硅藻平片藻。4、5 月份则以舟形藻、书形藻、普氏藻等双壳缝运动类群为主要类群。6、7 月份小型单壳缝附着硅藻十字卵形藻的丰度最为优势。而在 8 月份共检出 24 种硅藻,优势类群也转变为浮游型的伪菱形藻、骨条藻。附着硅藻种群结构变化可能由试板表面状态和水体环境变化引起。从生物解剖镜对月板镜检的结果可以看出(图 7),试板表面在 3 月时仅出现少量附着丝状藻类,而 8 月份的试板表面布满大型污损生物,由此增大了试板与海水界面的

比表面积, 改变了试板表面粗糙度, 促进了试板表面生物群落结构的变化, 即由微型生物膜转变为可视污损生物群落, 增大了附着面积[23]。海水温度随月份的变化而升高, 水温是生物最敏感的参数。水温升高, 浮游生物的种类和数量增高。硅藻是海洋生物链上重要的初级生产者, 维持着生态系统平衡。一般地, 较高温度下物种具有较高的生长速率, 菱形藻、骨条藻在八月份成为海水硅藻种群的优势种, 进而成为试板上的优势种。研究指出, 温度的升高会改变硅藻的生物地理学分布、物候学和营养级别[24]。

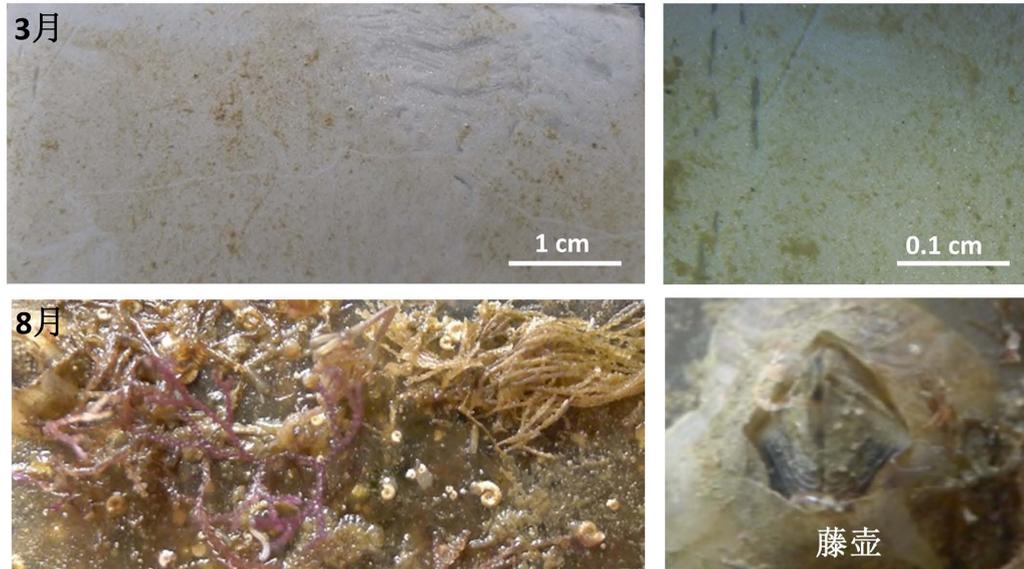


Figure 7. Optical photos of the test plates in different months  
图 7. 试板在不同月份的光学照片

#### 4.2. 冬季百天附着硅藻与浮游硅藻种群结构变化

由检测结果(表 4, 表 5, 图 5)表明, 表层和底层试板共检测出 14 种硅藻, 而从水体中检出 15 种, 两者的物种数相差很小而种群结构有较大差异。试板表面附着硅藻中, 优势度大于 10% 的为楔形藻、卵形藻和舟形藻, 而表层水体中绕孢角毛藻为绝对优势种( $Y = 81.28\%$ )。其次为中肋骨条藻, 占比 12.8%。底层水体中的中肋骨条藻占比 52%, 其余十余种中出现较多的底栖物种, 如透明菱形藻, 舟形藻等。表层和底层附着硅藻种群结构相似, 主要为底栖附着类群, 明显区别于水体中的浮游硅藻类群(图 6)。这可能是由于底栖附着硅藻可释放更多的 EPS, 相对于浮游类群具有较强的附着污损能力[25], 更容易附着在基质试板的表面。

#### 4.3. 试板浸水时间对硅藻种群结构的影响

胶州湾冬季海水低于  $4^{\circ}\text{C}$  的时间长达 100 多天, 这段时间海水中大多数生物处于休眠期, 适应冬季繁衍的硅藻种群得以充分繁衍, 不必争夺生存空间。本实验百天海水中检出的浮游硅藻和附着硅藻均为该海域常见硅藻种群, 但成为优势种群的通常是那些生命周期长或繁殖能力强的物种, 如水体中的包角藻, 中肋骨条藻; 对于试板上的附着硅藻浸水百天和浸水 30 天的(月板)检出硅藻种群均为十多种, 但物种结构存在较大差异: 30 天的月板上附着的平片藻占比为 73.46%, 为绝对优势种, 而在冬季百天的试板上平片藻仅占比 3.11%, 占比 10% 以上的物种为扇形楔形藻(30.57%)、奇异楔形藻(29.02%), 详见表 4。这是在无大型生物干扰下, 硅藻种群间竞争的结果。马士德等在我国热带海域的三亚海水试验站研究表明, 玻板浸海 2 天、5 天、15 天、30 天, 附着硅藻种群分别为 2 种、4 种、7 种和 29 种; 前 3 周期硅藻

增长速度为 1 倍, 后 15 天猛增为中 3 周期(15 天)的 4 倍之多[26]。热带海域在大型生物干扰下, 为试板下水时间的增加硅藻物种增幅较大。

此外, 浸水时间也是影响附着硅藻种类的原因之一。冬季百天(12 月~次年 3 月)的试板和 3 月份试板表面的物种数差异不大(10 种 vs. 12 种), 但物种组成存在较大差异。3 月份试板上附着的平片藻占比 73.46%, 而冬季百天的试板上平片藻仅占 3.11%, 占比 10% 以上的物种为扇形楔形藻(30.57%), 奇异楔形藻(29.02%), 十字卵形藻(15.03%)和极细舟形藻(14.51%)。这可能是由于前期已附着的其他硅藻对平片藻的附着产生一定的竞争作用。

#### 4.4. 冬季百天表、底层试板与水体硅藻种群物种多样性差异

由实验结果表 6 所示, 试板表面附着硅藻的物种数, Shannon 多样性指数、均匀度等方面均高于水体中的硅藻, 底层试板与底层水中的硅藻在上述指标上高于表层试板和表层水中的硅藻。这是由于表层水体中绕孢角毛藻为绝对优势种( $Y = 81.28\%$ ), 其它种类物种数和细胞丰度均较低, 群落组成较为单一所致。另一方面, 由于底层水体扰动, 底层浮游硅藻样品中混入了许多底栖附着类群, 导致物种数、多样性指数较高, 而表层试板因底栖硅藻扩散的局限性, 使其多样性低于底层试板。

### 5. 结论

用自行设计的微型污损生物生态调查方法对青岛中港海域硅藻调查初步得出:

1) 3~8 月的月板检测结果, 硅藻的种群和群落结构逐月变化显著, 是由于水温逐月升高、生物繁衍旺盛、试板表面逐月变化较大所致。

2) 百余天的冬季大型污损生物处于休眠期, 百天试片和海水中硅藻检测结果物种数相近, 十余种硅藻均为该海域常见种, 而优势种不同: 表层水中为孢角毛藻, 而底层水中则为中肋骨条藻, 附着硅藻为楔形藻、卵形藻和舟形藻, 而浸水三十天的冬季月板则为小平片藻, 这是硅藻种群之间生存竞争的结果。

3) 冬季百天硅藻种群多样性底层大于表层; 附着硅藻大于浮游硅藻。

### 基金项目

国家自然科学基金(42076044, 59471054 和 59071040)。

### 参考文献

- [1] 马士德, 刘会莲, 刘杰, 等. 港湾污损生物生态研究——海鸥浮码头污损生物现场检测及其污损量化[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(6): 913-920.
- [2] 黄宗国. 海洋污损生物及其防除[M]. 北京: 海洋出版社, 1984: 197-210.
- [3] 尹衍升, 董丽华, 刘涛, 等. 海洋材料的微生物附着腐蚀[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-12.
- [4] Mann, D.G. and Vanormelingen, P. (2013) An Inordinate Fondness? The Number, Distributions, and Origins of Diatom Species. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, **60**, 414-420. <https://doi.org/10.1111/jeu.12047>
- [5] 赵茜. 三亚湾近岸海域浮游植物群落结构分析及水环境质量评价[D]: [硕士学位论文]. 三亚: 海南热带海洋学院, 2023.
- [6] 于兆伟. 底栖硅藻 *Amphora. sp* 的胞外多聚物研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [7] 曹杉. 海洋底栖硅藻附着机理及其防污技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2015.
- [8] 陈琪, 郑纪勇, 杨靖亚, 等. 海洋底栖硅藻胞外多聚物化学成分的定量研究[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(5): 641-646.
- [9] 曲胜路, 杨茹君, 苏函, 等. 海洋中 Fe(II)的行为及微生物参与下的过程研究概述[J]. 海洋科学, 2017, 41(10): 139-148.
- [10] 胡秀华. 海洋环境中微藻与钙质层对 Q235 碳钢腐蚀行为的影响[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.

- [11] 张晗. 海洋硅藻附着诱导碳钢 Q235 腐蚀特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- [12] 孙松. 海湾生态系统的理论与实践: 以胶州湾为例[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [13] 马士德. 藤壶对低合金钢腐蚀的影响研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, 4(3): 250-250.
- [14] 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(3): 214-218.
- [15] 马士德, 董续成, 康宁, 等. 青岛港湾微型污损生物群落研究——不同涂层的碳钢/海水界面生物膜初探[J]. 科技导报, 2021, 39(18): 101-110.
- [16] 马士德, 刘欣, 康宁, 等. 港湾海水界面微型生物膜表征研究[J]. 海洋科学前沿, 2023, 10(3): 194-204.
- [17] 马士德, 陈旭淼, 刘传安, 等. 防污涂料/海水界面的原生动物初探[J]. 广西科学院学报, 2017, 33(2): 114-118.
- [18] 马士德, 陈新, 邵余, 等. 三亚海洋环境试验站污损生物生态研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(1): 38-46.
- [19] Clarke, K.R. and Gorley, R.N. (2005) *Primer: Getting Started with V6*. Primer-E Ltd., 931-932.
- [20] Shannon, C.E. and Weaver, W. (1971) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press.
- [21] Pielou, E.C. (1966) The Measurement of Diversity in Different Types of Biological Collections. *Journal of Theoretical Biology*, **13**, 131-144. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(66\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0022-5193(66)90013-0)
- [22] Totti, C., Poulin, M., Romagnoli, T., Perrone, C., Pennesi, C. and De Stefano, M. (2009) Epiphytic Diatom Communities on Intertidal Seaweeds from Iceland. *Polar Biology*, **32**, 1681-1691. <https://doi.org/10.1007/s00300-009-0668-4>
- [23] Liang, Y., Koester, J.A., Liefer, J.D., Irwin, A.J. and Finkel, Z.V. (2019) Molecular Mechanisms of Temperature Acclimation and Adaptation in Marine Diatoms. *The ISME Journal*, **13**, 2415-2425. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0441-9>
- [24] Poulsen, N., Davutoglu, M.G. and Zackova Suchanova, J. (2022) Diatom Adhesion and Motility. In: Falciatore, A. and Mock, T., Eds., *The Molecular Life of Diatoms*, Springer, 367-393. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92499-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92499-7_14)
- [25] Ma, S., Li, Y., Guan, F., Zhang, L., Li, J., Tai, Y., *et al.* (2022) Variations in Microbial Community on Different Materials in Sanya Marine Environment Experimental Station, China. *Canadian Journal of Microbiology*, **68**, 447-455. <https://doi.org/10.1139/cjm-2022-0009>
- [26] 马士德, 李宇航, 段继周, 等. 三亚海洋环境试验站硅藻污损群落初探[J]. 广西科学院学报, 2017, 33(3): 178-184.