

漳浦三倍体牡蛎养殖区浮游植物

群落特征及其影响因子分析

许翠娅^{1,2}, 杨芳^{1,2}, 陈小红^{1,2}, 郑盛华^{1,2}, 魏姗姗^{1,2}, 林永青^{1,2}, 席英玉^{1,2}

(1. 福建省水产研究所, 福建 厦门 361013; 2. 福建省海洋生物增殖与高值化利用重点实验室, 福建 厦门 361013)

[摘要] 为研究三倍体牡蛎养殖区浮游植物群落特征及其影响因子, 于2021年12月至2022年9月, 对漳浦龙美湾和翡翠湾三倍体牡蛎养殖区开展逐月调查, 分析了浮游植物种类组成、丰度变化及其与海洋环境因子的相关性。结果表明: 浮游植物共有7门140种, 其中硅藻门104种, 甲藻门30种, 金藻门2种, 蓝藻门、裸藻门、绿藻门、原生动物门各1种, 优势种为海洋原甲藻 (*Prorocentrum micans*)、柔弱拟菱形藻 (*Pseudo-nitzschia delicatissima*)、中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*)、窄隙角毛藻 (*Chaetoceros affinis*)。浮游植物丰度月均值的波动范围为 $2.16 \times 10^4 \sim 1.89 \times 10^6$ cells/L, 平均为 3.96×10^5 cells/L。甲藻丰度占比较高, 平均占总丰度的37.7%, 推测主要为外海水系和沿岸流带来的外源性甲藻。冗余分析表明, 与浮游植物优势种丰度密切相关的主要影响因子是 pH、水温、无机氮和活性磷酸盐。

[关键词] 浮游植物; 三倍体牡蛎; 龙美湾; 翡翠湾; 群落特征; 环境因子

[中图分类号] S 968.3; Q 178.1

Characteristics of Phytoplankton Communities in Zhangpu Triploid Oyster Farming Area and Their Relationship with Influencing Factors

XU Cuiya^{1,2}, YANG Fang^{1,2}, CHEN Xiaohong^{1,2}, ZHENG Shenghua^{1,2},WEI Shanshan^{1,2}, LIN Yongqing^{1,2}, XI Yingyu^{1,2}

(1. Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361013, China;

2. Key Laboratory of Cultivation and High-Value Utilization of Marine Organisms in Fujian Province, Xiamen 361013, China)

Abstract: From December 2021 to September 2022, monthly surveys were conducted in the triploid oyster farming areas of Longmei Bay and Feicui Bay in Zhangpu to investigate the characteristics of the phytoplankton communities and their influencing factors. The analysis focused on the composition of phytoplankton species, changes in abundance, and their correlation with marine environmental factors. The results revealed a total of 140 species across seven phyla, including 104 in the Bacillariophyta, 30 in the Dinophyta, and 2 in the Chrysophyta, with one species each in Cyanophyta, Cryptophyta, Chlorophyta and Protozoa. Dominant species included

[收稿日期] 2024-02-28

[基金项目] 福建省海洋服务与渔业高质量发展专项“三倍体牡蛎深远海养殖示范推广与产业化研究”(FJHY-YJBH-2022-3); 福建省海洋服务与渔业高质量发展专项“三都澳滤食性贝类生态贡献与养殖容量评估”(FJHY-YYKJ-2024-1-18-5); 福建省海洋服务与渔业高质量发展专项“典型海湾水产养殖退养对生态环境影响评价”(FJHY-YYKJ-2024-1-18-9); 福建省省属公益类科研院所基本科研专项“生态浮床对循环水养殖鱼类的影响研究”(2021R10130013)

[作者简介] 许翠娅(1973—), 副研究员, 从事渔业生态环境与水产品质量安全方向研究。E-mail: 1050150353@qq.com

Prorocentrum micans, *Pseudo-nitzschia delicatissima*, *Skeletonema costatum* and *Chaetoceros affinis*. The monthly average fluctuation range of phytoplankton abundance was 2.16×10^4 to 1.89×10^6 cells/L, with an overall average of 3.96×10^5 cells/L. Dinoflagellates exhibited a high abundance, averaging 37.7% of the total, suggesting the influence of exogenous dinoflagellates from offshore water systems and coastal currents. Redundancy analysis indicated that pH, water temperature, inorganic nitrogen and active phosphate were the primary factors closely associated with the abundance of dominant phytoplankton species.

Keywords: phytoplankton; triploid oyster; Longmei Bay; Feicui Bay; community characteristics; environmental factor

0 引言

浮游植物作为海洋中的主要生产者，对生态系统的能量流动和物质循环具有重要意义。浮游植物的种类组成、丰度和生物量变化对海洋生产力有着重要制约作用，甚至影响整个生态系统的稳定^[1-3]。浮游植物也是评价海洋环境健康状况的重要指示性生物，其种类组成、丰度、多样性水平可以灵敏地反映海洋环境质量现状及变化趋势^[4-5]。

福建牡蛎（*Crassostrea angulata*）又称葡萄牙牡蛎，国内主要分布在长江口以南海域，也是闽台海域的主要养殖品种^[6]。与传统二倍体牡蛎相比，三倍体牡蛎具有许多优势性状，如生长快、个体大、肉质好、繁殖季节死亡率低等^[7-8]，近年来广受养殖业者青睐。福建省作为我国牡蛎养殖大省，近年来三倍体牡蛎养殖发展迅猛，部分海湾由于超负荷养殖，已开始向湾外深水海域发展。位于漳州市漳浦县岵山以南至鸟嘴山之间的海域（包括龙美湾、翡翠湾等），分布有福建省规模最大的三倍体牡蛎养殖区，养殖模式为笼养。

目前已有一些学者^[3,9-11]对牡蛎、扇贝、贻贝等贝类养殖区内的浮游植物开展研究，但是对三倍体牡蛎养殖区浮游植物群落特征的相关报道较少^[12]。了解三倍体牡蛎养殖区浮游植物群落特征，研究海洋环境因子与浮游植物的相关性，对三倍体牡蛎健康养殖、保护海洋生态环境具有重要意义。本研究对漳浦龙美湾和翡翠湾三倍体福建牡蛎养殖区开展调查，以期探究影响浮游植物生长的限制因子，为三倍体牡蛎养殖的可持续发展提供科学依据。

1 研究区域和方法

1.1 研究区域和站位布设

在漳浦龙美湾和翡翠湾的三倍体牡蛎养殖区分别布设 3 个调查站位，站位号分别为 Z1 ~ Z3 站和 Z4 ~ Z6 站（见图 1）。

1.2 样品采集与分析

2021 年 12 月—2022 年 9 月，每月下旬对漳浦三倍体牡蛎养殖区开展 1 次调查。采用 WTW Multi 3630 多参数分析仪现场测定水温、盐度、pH 和溶解氧（DO）；而悬浮物、化学需氧量（COD）、营养盐、浮游植物等样品则运回实验室，按 GB 17378—2007《海洋监测规范》、HJ 442—2020《近岸海域环境监测规范》中的方法进行检测分析。

1.3 浮游植物群落特征评价方法

评价方法及指标采用 GB 17378.7—2007《海洋监测规范第 7 部分》和孙军等^[13]的污染生态评述方

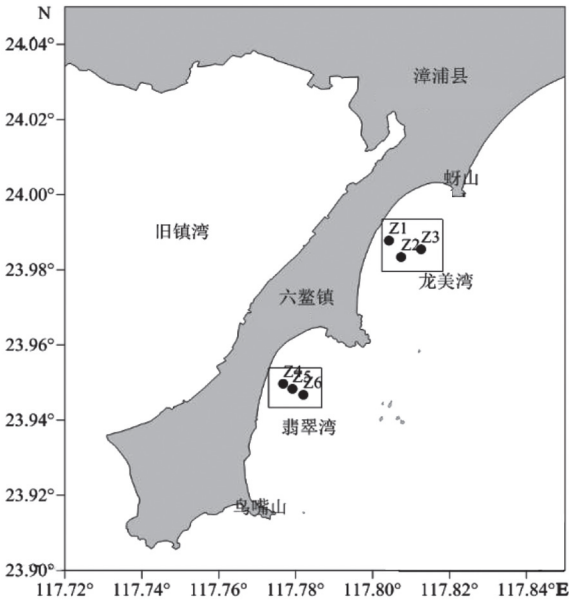


图 1 三倍体牡蛎养殖区环境调查站位图
Fig.1 Environmental survey station maps of triploid oyster farming areas

法。评价指标有丰度 d 、多样性指数 H' 、均匀度 J 、物种优势度 Y 。当物种优势度 $Y \geq 0.02$ 时, 该物种即为优势种。

1.4 数据处理

用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析 (ANOVA), 数据的组间差异采用独立样本 t 检验 ($\alpha = 0.05$) 进行分析。采用 Canoco for Windows 4.5 软件对浮游植物优势种与环境因子进行冗余分析 (redundancy analysis, RDA)。在进行 RDA 和相关性分析时对浮游植物丰度进行 $\lg(X + 1)$ 转换, RDA 分析结果用 Canodraw 软件制作双序图。

2 结果与分析

2.1 海洋环境因子的变化

2021 年 12 月—2022 年 9 月漳浦三倍体牡蛎养殖区海洋环境因子测定结果见表 1。

表 1 2021 年 12 月—2022 年 9 月三倍体牡蛎养殖区海洋环境因子的变化
Tab. 1 Changes in marine environmental factors in triploid oyster farming areas from December 2021 to September 2022

环境因子	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月
水温/℃	17.5 ± 0.1	16.1 ± 0.2	13.8 ± 0.1	18.0 ± 0.1	20.8 ± 0.4
盐度	32.1 ± 0.1	31.4 ± 0.1	30.2 ± 0.1	31.4 ± 0.1	32.3 ± 0.1
pH	8.14 ± 0.01	8.13 ± 0.01	8.16 ± 0.01	8.22 ± 0.01	8.17 ± 0.01
DO/(mg · L ⁻¹)	7.89 ± 0.02	8.38 ± 0.07	8.84 ± 0.05	7.97 ± 0.02	7.54 ± 0.02
COD/(mg · L ⁻¹)	0.22 ± 0.05	0.35 ± 0.05	0.68 ± 0.07	0.59 ± 0.07	0.53 ± 0.04
悬浮物/(mg · L ⁻¹)	14.6 ± 5.5	10.8 ± 2.1	8.8 ± 1.2	7.9 ± 3.0	5.8 ± 1.2
NO ₃ ⁻ - N/(mg · L ⁻¹)	0.281 ± 0.008	0.329 ± 0.011	0.342 ± 0.014	0.101 ± 0.010	0.080 ± 0.002
NO ₂ ⁻ - N/(mg · L ⁻¹)	0.013 ± 0.003	0.015 ± 0.003	0.015 ± 0.002	0.005 ± 0.002	0.006 ± 0.001
氨氮/(mg · L ⁻¹)	0.015 ± 0.005	0.013 ± 0.006	0.042 ± 0.005	0.046 ± 0.013	0.056 ± 0.008
活性磷酸盐/(mg · L ⁻¹)	0.036 ± 0.005	0.035 ± 0.002	0.033 ± 0.003	0.015 ± 0.001	0.010 ± 0.002
活性硅酸盐/(mg · L ⁻¹)	0.701 ± 0.008	0.750 ± 0.024	0.440 ± 0.018	0.121 ± 0.018	0.212 ± 0.040
总氮/(mg · L ⁻¹)	0.480 ± 0.039	0.424 ± 0.038	0.516 ± 0.040	0.296 ± 0.041	0.408 ± 0.105
总磷/(mg · L ⁻¹)	0.063 ± 0.008	0.055 ± 0.004	0.061 ± 0.005	0.025 ± 0.001	0.025 ± 0.001

环境因子	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
水温/℃	22.2 ± 0.1	26.5 ± 0.1	26.8 ± 0.4	27.7 ± 0.8	28.6 ± 0.2
盐度	32.4 ± 0.2	32.9 ± 0.0	33.8 ± 0.0	33.3 ± 0.1	33.7 ± 0.1
pH	8.04 ± 0.01	8.09 ± 0.01	7.94 ± 0.01	7.91 ± 0.04	8.15 ± 0.10
DO/(mg · L ⁻¹)	7.13 ± 0.04	7.86 ± 0.06	5.97 ± 0.11	6.71 ± 0.48	8.07 ± 1.49
COD/(mg · L ⁻¹)	0.29 ± 0.07	0.57 ± 0.10	1.14 ± 0.34	0.66 ± 0.11	1.90 ± 1.49
悬浮物/(mg · L ⁻¹)	9.8 ± 1.1	5.2 ± 0.4	10.3 ± 2.0	6.3 ± 1.1	25.2 ± 20.9
NO ₃ ⁻ - N/(mg · L ⁻¹)	0.132 ± 0.015	0.080 ± 0.007	0.099 ± 0.012	0.033 ± 0.004	0.030 ± 0.005
NO ₂ ⁻ - N/(mg · L ⁻¹)	0.048 ± 0.001	0.037 ± 0.002	0.019 ± 0.001	0.002 ± 0.001	0.007 ± 0.005
氨氮/(mg · L ⁻¹)	0.061 ± 0.006	0.022 ± 0.003	0.041 ± 0.005	0.026 ± 0.001	0.009 ± 0.003
活性磷酸盐/(mg · L ⁻¹)	0.031 ± 0.005	0.013 ± 0.001	0.022 ± 0.002	0.005 ± 0.001	0.010 ± 0.002
活性硅酸盐/(mg · L ⁻¹)	0.558 ± 0.011	0.438 ± 0.027	0.586 ± 0.056	0.369 ± 0.039	0.664 ± 0.047
总氮/(mg · L ⁻¹)	0.496 ± 0.050	0.401 ± 0.015	0.268 ± 0.013	0.341 ± 0.043	0.610 ± 0.313
总磷/(mg · L ⁻¹)	0.039 ± 0.004	0.034 ± 0.001	0.031 ± 0.002	0.033 ± 0.005	0.079 ± 0.061

由表 1 可见, 调查期间养殖区水温月均值波动范围为 13.8 ~ 28.6 ℃, 平均水温为 21.8 ℃, 2021 年 12 月—2022 年 2 月 (以下简称 12—2 月) 水温呈逐渐下降之势, 之后水温逐渐上升, 至 9 月水温最高。盐度月均值波动范围为 30.2 ~ 33.8, 平均为 32.3。硝酸氮质量浓度月均值波动范围为 0.030 ~ 0.342 mg/L, 平均为 0.151 mg/L; 亚硝酸氮质量浓度月均值波动范围为 0.002 ~ 0.048 mg/L, 平均为

0.016 mg/L；氨氮质量浓度月均值波动范围为 0.009 ~ 0.061 mg/L，平均为 0.033 mg/L；无机氮质量浓度月均值波动范围为 0.037 ~ 0.398 mg/L，平均为 0.199 mg/L；活性磷酸盐质量浓度月均值波动范围为 0.005 ~ 0.036 mg/L，平均为 0.021 mg/L；活性硅酸盐质量浓度月均值波动范围为 0.121 ~ 0.750 mg/L，平均为 0.484 mg/L。12—2 月（冬季）海水中营养盐含量较高，3 月开始显著下降，5 月（雨季）海区营养盐得到陆源径流补充而显著上升，8、9 月又显著下降。总体而言，养殖区水质较好，营养盐较丰富，龙美湾与翡翠湾养殖区各项水质指标组间差异不显著（ $P>0.05$ ）。

2.2 浮游植物的分布特征

2.2.1 浮游植物种类组成与月份变化

如表 2 所示，调查期间漳浦三倍体牡蛎养殖区浮游植物种类较丰富，共鉴定有 7 门 65 属 140 种（包括变种和变型等）。其中：硅藻门占绝对优势，共有 46 属 104 种，占总种数的 74.3%；甲藻门共有 14 属 30 种，占总种数的 21.4%；金藻门有 1 属 2 种，占总种数的 1.4%；蓝藻门、裸藻门、绿藻门、原生动物门各有 1 属 1 种，分别占总种数的 0.7%。

表 2 2021 年 12 月—2022 年 9 月三倍体牡蛎养殖区浮游植物优势种及其优势度
Tab. 2 Changes in marine environmental factors in triploid oyster farming areas from
December 2021 to September 2022

优势种	优势度									
	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
血红哈卡藻 <i>Akashiwo sanguinea</i>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.077
裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> sp.	/	/	/	0.071	/	/	0.044	0.021	/	/
米氏凯伦藻 <i>Karenia mikimotoi</i>	/	/	/	/	/	0.066	/	/	/	/
夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>	/	/	0.040	/	/	/	/	/	/	/
东海原甲藻 <i>Prorocentrum donghaiense</i>	/	/	/	/	0.020	/	/	/	/	/
海洋原甲藻 <i>P. micans</i>	/	/	/	/	/	0.028	/	/	/	0.821
锥状斯氏藻 <i>Scrippsiella trochoidea</i>	0.062	0.080	0.023	0.098	0.093	0.253	0.067	/	/	/
钟状中鼓藻 <i>Bellerochea horologicalis</i>	/	/	/	/	/	0.073	/	/	/	/
窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	/	/	/	/	/	/	/	0.185	0.110	/
旋链角毛藻 <i>C. curvisetus</i>	/	/	/	/	/	0.088	0.326	/	/	/
新月细柱藻 <i>Cylindrotheca closterium</i>	/	/	/	/	/	/	/	0.022	/	/
北方娄氏藻 <i>Lauderia borealis</i>	/	/	/	0.590	0.539	/	/	/	/	/
丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>	/	/	/	/	/	/	0.035	/	0.044	/
具槽直链藻 <i>Melosira sulcata</i>	0.390	0.449	0.180	/	/	0.087	/	/	/	/
柔弱拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	/	/	/	0.024	0.043	/	0.047	0.209	0.513	/
脆根管藻 <i>Rhizosolenia fragilissima</i>	/	/	/	/	/	/	/	0.048	0.020	/
优美旭氏藻矮小变型 <i>Schröderella delicatula</i> f. <i>schröderi</i>	/	/	/	/	0.143	/	/	/	/	/
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	0.247	0.189	0.244	0.052	/	0.137	0.145	0.353	0.106	/
热带骨条藻 <i>S. tropicum</i>	/	/	/	/	/	/	0.077	/	/	/
菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	0.029	0.024	0.033	/	/	/	/	/	/	/
菱形海线藻小型变种 <i>T. nitzschioides</i> var. <i>parva</i>	/	/	/	/	/	/	/	0.030	/	/
圆海链藻 <i>Thalassiosira rotula</i>	0.025	0.046	0.042	/	/	0.023	/	/	/	/
细弱海链藻 <i>T. subtilis</i>	/	/	/	/	/	0.050	/	/	/	/
红色中缢虫 <i>Mesodinium rubrum</i>	0.020	0.022	0.212	/	/	/	/	/	/	/

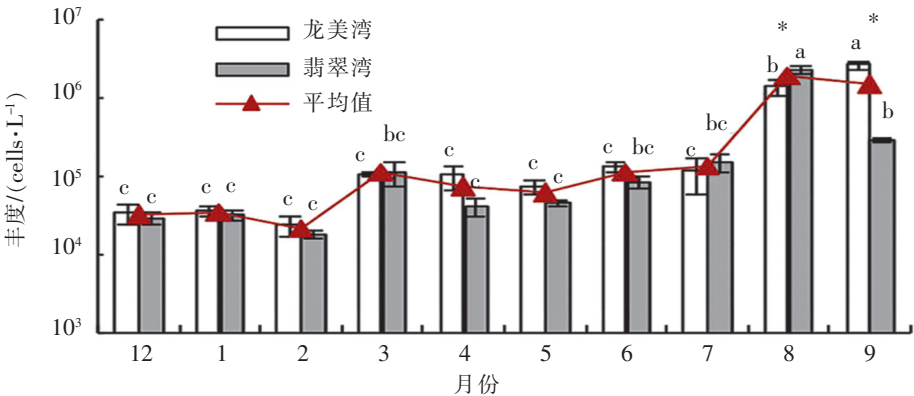
注：“/” 表示该物种在该月份未形成优势种。

根据物种优势度公式计算，整个调查期间漳浦养殖区浮游植物优势种为海洋原甲藻（*Prorocentrum micans*）、柔弱拟菱形藻（*Pseudo-nitzschia delicatissima*）、中肋骨条藻（*Skeletonema costatum*）和窄隙角毛藻（*Chaetoceros affinis*），Y 值分别为 0.254、0.207、0.076 和 0.022。从表 2 可见，浮游植

物优势种随着调查月份不同有所变化, 海洋原甲藻虽然为第一优势种, 但仅在 5、9 月成为优势种, 其 9 月 Y 值达 0.821; 柔弱拟菱形藻在水温较高的 7、8 月优势度较高, 3、4、6 月亦为优势种; 中肋骨条藻在除了 4、9 月外的其余 8 个月份均为优势种; 窄隙角毛藻则在夏季 7、8 月成为优势种。龙美湾和翡翠湾养殖区浮游植物种类组成有所差异。龙美湾养殖区浮游植物优势种为海洋原甲藻 ($Y = 0.371$)、柔弱拟菱形藻 ($Y = 0.129$)、中肋骨条藻 ($Y = 0.075$)、血红哈卡藻 (*Akashiwo sanguinea*) ($Y = 0.028$); 翡翠湾养殖区浮游植物优势种为柔弱拟菱形藻 ($Y = 0.331$)、中肋骨条藻 ($Y = 0.078$)、窄隙角毛藻 ($Y = 0.072$)、海洋原甲藻 ($Y = 0.046$)、北方娄氏藻 (*Lauderia borealis*) ($Y = 0.021$)。调查期间各月浮游植物种类在 50~93 种之间波动, 4 月浮游植物种类最少, 6 月浮游植物种类最丰富。

2.2.2 浮游植物丰度的时空分布

调查期间浮游植物丰度月均值的波动范围在 $2.16 \times 10^4 \sim 1.89 \times 10^6$ cells/L 之间, 平均为 3.96×10^5 cells/L。从月份变化来看: 12—2 月 (冬季) 浮游植物丰度较低, 最低值出现在 2 月; 3—7 月浮游植物丰度较冬季显著上升; 8、9 月浮游植物丰度出现高峰, 其中 8 月最高 (见图 2)。8 月, 龙美湾养殖区发生柔弱拟菱形藻赤潮, 浮游植物平均丰度达 1.42×10^6 cells/L; 翡翠湾养殖区发生柔弱拟菱形藻和窄隙角毛藻双相赤潮, 浮游植物平均丰度达 2.36×10^6 cells/L; 翡翠湾浮游植物丰度显著高于龙美湾 ($P < 0.05$)。9 月, 龙美湾养殖区发生海洋原甲藻赤潮, 翡翠湾养殖区海洋原甲藻丰度也接近赤潮基准密度, 两湾平均丰度分别为 2.68×10^6 和 2.94×10^5 cells/L, 龙美湾显著高于翡翠湾 ($P < 0.05$)。2021 年 12 月—2022 年 9 月 (以下简称 12—9 月), 养殖区浮游植物群落中甲藻丰度占总丰度比例为 37.7%, 各月丰度差异大, 变化范围为 1.6%~92.0%。其中: 7、8 月甲藻占比较低, 分别为 3.5% 和 1.6%; 其余月份甲藻占比均大于 10%, 其中 9 月占比最高 (92.0%), 5 月次之 (41.7%)。12—9 月龙美湾和翡翠湾养殖区浮游植物丰度的平均值分别为 4.74×10^5 和 3.18×10^4 cells/L, 龙美湾显著高于翡翠湾 ($P < 0.05$)。



同一组数据上标字母不同表示不同月份间存在显著差异($P < 0.05$), * 表示同一月份龙美湾与翡翠湾养殖区间存在显著差异($P < 0.05$)。

图 2 2021 年 12 月—2022 年 9 月三倍体牡蛎养殖区浮游植物丰度的变化
Fig.2 Changes in the abundance of phytoplankton in triploid oyster farming areas from December 2021 to September 2022

2.2.3 浮游植物的生态类群

根据浮游植物的适温特点, 将漳浦三倍体牡蛎养殖区浮游植物大致分为广温、暖水、暖温三大类群。

1) 广温类群 根据它们对盐度的不同适应能力再分为 3 个类群: ①广温广盐种, 如海洋原甲藻、柔弱拟菱形藻、中肋骨条藻、血红哈卡藻等; ②广温低盐种, 如旋链角毛藻、具槽直链藻等; ③广温高盐种, 如细弱海链藻等。其中以广温广盐种最为常见且丰度占绝对优势。

2) 暖水类群 根据它们对盐度的不同适应能力可再分为 3 个类群: ①暖水广盐类群, 如钟状中鼓藻、洛氏角毛藻 (*Chaetoceros lorenzianus*) 等; ②暖水近岸种, 为适宜高温低盐的种类, 如窄隙角

毛藻、琼氏圆筛藻（*Coscinodiscus jonesianus*）等；③暖水高盐种，如热带骨条藻、汉氏束毛藻（*Trichodesmium hildebrandtii*）等。暖水类群在调查海域出现种类较少，在夏季丰度相对较高。

3) 暖温类群 根据它们对盐度的不同适应能力可再分为 2 个类群：①暖温近岸类群，如圆海链藻、柔弱根管藻等，该类群在冬季丰度较高；②暖温高盐类群，如笔尖形根管藻（*Rhizosolenia styliformis*）、丹麦角毛藻（*Chaetoceros danicus*）等，该类群在调查海域出现种类较少，丰度也较低。

2.2.4 浮游植物多样性

调查期间养殖区浮游植物丰富度 d 月均值范围为 1.66 ~ 3.20，平均值为 2.25；多样性指数 H' 月均值范围为 1.86 ~ 3.72，平均值为 2.87；均匀度 J 月均值范围为 0.35 ~ 0.68，平均值为 0.55。8、9 月受赤潮影响，浮游植物多样性指数较低，而 12、2、5 和 6 月的 $H' > 3$ （见表 3）。总体而言，2021 年 12 月—2022 年 7 月养殖区浮游植物多样性水平较好，群落结构较稳定；8、9 月浮游植物的物种优势度较高，群落结构较简单。龙美湾养殖区浮游植物的 d 、 H' 和 J 平均值分别为 2.22、2.83 和 0.54，翡翠湾的分别为 2.28、2.91 和 0.56， t 检验结果显示，龙美湾和翡翠湾养殖区浮游植物各项指数无显著差异（ $P > 0.05$ ）。

表 3 2021 年 12 月—2022 年 9 月三倍体牡蛎养殖区浮游植物多样性

Tab. 3 The diversity of phytoplankton in triploid oyster farming areas from December 2021 to September 2022

指数	养殖区	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月
丰富度 d	龙美湾	2.48 ± 0.12 ^b	2.44 ± 0.22 ^b	2.53 ± 0.13 ^b	1.77 ± 0.15 ^{cd}	1.61 ± 0.11 ^d
	翡翠湾	2.33 ± 0.30 ^b	2.31 ± 0.09 ^b	2.33 ± 0.14 ^b	1.56 ± 0.03 ^c	1.79 ± 0.07 ^c
多样性指数 H'	龙美湾	2.96 ± 0.21 ^{abc}	2.89 ± 0.25 ^{bc}	3.45 ± 0.49 ^{ab}	2.65 ± 0.40 ^c	2.52 ± 0.58 ^c
	翡翠湾	3.23 ± 0.10 ^{ab}	2.88 ± 0.07 ^{bc}	3.44 ± 0.07 ^a	2.05 ± 0.40 ^d	2.74 ± 0.30 ^c
均匀度 J	龙美湾	0.56 ± 0.05 ^{abc}	0.55 ± 0.05 ^{abc}	0.66 ± 0.09 ^{ab}	0.54 ± 0.07 ^{abc}	0.53 ± 0.12 ^{bc}
	翡翠湾	0.63 ± 0.03 ^{ab}	0.56 ± 0.01 ^{bc}	0.68 ± 0.02 ^a	0.43 ± 0.09 ^{de}	0.57 ± 0.06 ^{bc}
指数	养殖区	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
丰富度 d	龙美湾	2.64 ± 0.37 ^{ab}	3.04 ± 0.39 ^a	1.74 ± 0.27 ^{cd}	2.22 ± 0.07 ^{bc*}	1.73 ± 0.15 ^{cd*}
	翡翠湾	2.55 ± 0.25 ^b	3.36 ± 0.35 ^a	1.86 ± 0.19 ^c	2.43 ± 0.06 ^b	2.26 ± 0.09 ^b
多样性指数 H'	龙美湾	3.71 ± 0.27 ^a	3.71 ± 0.39 ^a	3.08 ± 0.15 ^{abc}	2.33 ± 0.33 ^c	1.01 ± 0.09 ^{d*}
	翡翠湾	3.65 ± 0.07 ^a	3.73 ± 0.21 ^a	2.64 ± 0.24 ^c	2.06 ± 0.11 ^d	2.71 ± 0.32 ^c
均匀度 J	龙美湾	0.68 ± 0.07 ^a	0.65 ± 0.05 ^{ab}	0.63 ± 0.05 ^{ab}	0.42 ± 0.06 ^c	0.19 ± 0.01 ^{d*}
	翡翠湾	0.69 ± 0.03 ^a	0.64 ± 0.05 ^{ab}	0.52 ± 0.03 ^{cd}	0.36 ± 0.02 ^c	0.50 ± 0.06 ^{cd}

2.3 浮游植物优势种与海洋环境因子相关性

首先对调查期间浮游植物优势种（海洋原甲藻、柔弱拟菱形藻、中肋骨条藻、窄隙角毛藻）进行去趋势对应分析（detrended correspondence analysis, DCA），DCA 结果显示梯度轴长度（lengths of gradient）均小于 3，因此选择再进行冗余分析（RDA）。RDA 结果显示，第 1 排序轴和第 2 排序轴中，浮游植物丰度和环境因子的相关性分别为 0.954 和 0.915，变化累计分别为 52.7% 和 89.8%。Monte Carlo 随机置换检验表明，所有典范特征轴与浮游植物丰度都极显著相关（ $P < 0.01$ ），表明排序结果是可信的，能够较好地反映养殖区浮游植物丰度与环境因子之间的关系。

从图 3 可以看出，pH、水温（T）、盐度（S）和溶解氧（DO）是第一轴的主要影响因子，相关系数分别为

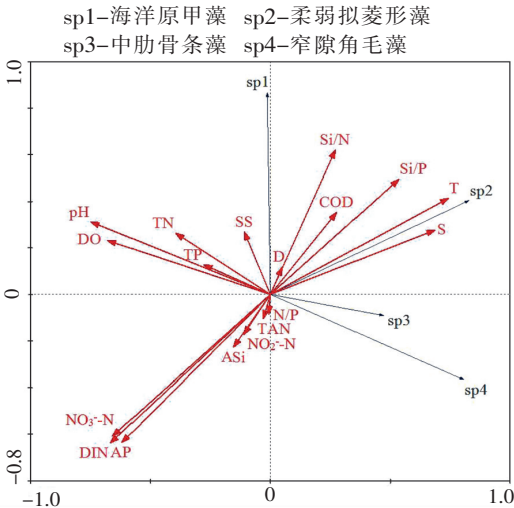


图 3 浮游植物与环境因子的 RDA 排序图
Fig. 3 Two-dimensional RDA ordination map of phytoplankton and environmental factors

-0.7132、0.7085、0.6548 和 -0.6470, 第二轴的主要影响因子为无机氮 (DIN)、活性磷酸盐 (AP)、硅氮比 (Si/N) 和硝酸氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$), 相关系数分别为 -0.5829、-0.5808、0.5670 和 -0.5559。分析结果显示, 与浮游植物优势种丰度密切相关的主要因子是 pH、T、DIN 和 AP。

优势种 sp1 (海洋原甲藻) 位于第 2 象限, 与悬浮物 (SS)、水深 (D)、硅氮比等呈正相关关系, 与氮磷比 (N/P)、氨氮 (TAN)、活性硅酸盐 (ASi) 等呈负相关关系。sp1 与氮磷比延长线夹角最小, 说明其与氮磷比 (N/P) 关系最密切。sp2 (柔弱拟菱形藻) 位于第 1 象限, 与水温、盐度、硅磷比 (Si/P) 等呈正相关关系, 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、DIN、AP 等呈负相关关系。sp2 与水温夹角最小, 说明其受水温影响最大。sp3 (中肋骨条藻) 和 sp4 (窄隙角毛藻) 位于第 4 象限, 与水温、盐度、氮磷比等呈正相关关系, 与 pH、DO、总氮 (TN)、总磷 (TP) 等呈负相关关系。

3 讨论

3.1 浮游植物类群组成、丰度变化与海洋环境因子的关系

漳浦三倍体牡蛎养殖区浮游植物中广温类群的种类最丰富且丰度占绝对优势, 暖水类群和暖温类群出现的种类较少且丰度也较低。与文献 [14-16] 中福建沿海浮游植物生态类群的组成特点一致。已有研究^[17]表明, 水温是影响浮游植物生长繁殖的重要环境因子, 对浮游植物种类组成以及优势种的演替有着重要作用。

本调查海域位于亚热带, 水温月均值波动范围为 13.8~28.6℃, 平均为 21.8℃。调查期间养殖区浮游植物优势种随着季节更替有所变化, 但始终以广温类群占绝对优势。冬季暖温类群种类 (如圆海链藻) 丰度有所增加, 而夏季暖水类群种类 (如窄隙角毛藻、热带骨条藻) 丰度也有所增加。浮游植物丰度的季节变化同样受水温影响显著。冬季浮游植物丰度较低; 春、夏季随着水温升高, 浮游植物丰度明显上升, 峰值出现在夏末秋初。相关性分析表明, 养殖区浮游植物丰度与水温呈现显著正相关关系 ($P<0.05$)。RDA 分析结果也表明, 水温是影响浮游植物优势种丰度的重要环境因子, 海洋原甲藻、柔弱拟菱形藻、中肋骨条藻、窄隙角毛藻等优势种丰度与水温均呈正相关关系。

硅藻和甲藻丰度比例是衡量浮游植物种类结构的重要指数, 在一定程度上反映水体环境质量。一般而言, 甲藻占比高预示着海域形成甲藻赤潮的几率较大。本调查表明, 漳浦三倍体牡蛎养殖区浮游植物群落中甲藻丰度占比较大, 平均占总丰度的 37.7%。出现的甲藻种类共 30 种, 占浮游植物总种类数的 21.4%, 形成优势种的有海洋原甲藻、血红哈卡藻、锥状斯氏藻、裸甲藻、米氏凯伦藻、东海原甲藻、夜光藻等。本调查海域浮游植物群落中甲藻丰度占比较高, 应该与其地理位置有关。龙美湾、翡翠湾位于台湾海峡西侧, 为开放型海域, 受外海水系和沿岸流影响较大, 海水盐度较高 (月均值波动范围为 30.2~33.8, 平均为 32.3)。与其相邻的旧镇湾, 湾内亦分布有大面积的贝类养殖区, 2022 年 5、8 月两次调查表明, 浮游植物群落中甲藻丰度占比分别为 2.4% 和 3.2%, 5 月浮游植物优势种为具槽直链藻、中肋骨条藻、菱形藻 (*Nitzschia* sp.)、旋链角毛藻, 8 月优势种为中肋骨条藻、具槽直链藻 (未发表数据)。本研究与旧镇湾同期调查相比, 龙美湾、翡翠湾浮游植物群落组成差异显著, 因此推测, 龙美湾、翡翠湾甲藻来源主要为外海水系和沿岸流带来的外源性甲藻。而龙美湾与翡翠湾养殖区之间浮游植物群落结构存在一定差异, 尤其是 8、9 月赤潮期间优势种丰度差异显著, 其原因应该与赤潮藻的聚集机制有关, 使得赤潮区常呈条带状、片状、斑块状分布^[18]。由于该养殖区甲藻丰度占比较高, 有毒赤潮暴发的风险较大, 因此建议在牡蛎采收季节和赤潮暴发期间, 对贝类毒素含量应加强跟踪监测。

三倍体牡蛎养殖尚不确定会对漳浦养殖区浮游植物丰度和群落结构产生影响。8、9 月本项目组在龙美湾和翡翠湾之间的非养殖区海域分别采集了 1 个浮游植物样品。分析结果表明: 8、9 月非养殖区浮游植物丰度分别为 1.35×10^6 和 2.88×10^5 cells/L, 均低于养殖区; 8 月非养殖区浮游植物第一优势种为柔弱拟菱形藻, 丰度占比 (49.5%) 与养殖区无明显差别 (龙美湾 55.2%, 翡翠湾 49.0%);

9 月非养殖区第一优势种为海洋原甲藻, 丰度占比 (36.4%) 低于两个养殖区 (龙美湾 85.1%, 翡翠湾 54.8%)。从 8、9 月调查数据分析, 牡蛎摄食对浮游植物丰度未产生显著影响, 养殖区和非养殖区浮游植物丰度及优势种占比的差别, 可能与赤海藻聚集导致的斑块状分布有关。由于非养殖区调查数据仅有 2 次, 牡蛎摄食对养殖区浮游植物群落结构的影响还有待进一步研究。鉴于调查海域赤潮暴发风险较高, 适当的贝类养殖有助于降低浮游植物丰度, 但也应合理控制牡蛎养殖规模与养殖密度。

3.2 浮游植物优势种演替与海洋环境因子的关系

本调查期间浮游植物优势种为海洋原甲藻、柔弱拟菱形藻、中肋骨条藻、窄隙角毛藻。海洋原甲藻在 5、9 月作为优势种出现, 9 月在龙美湾形成赤潮; 柔弱拟菱形藻在春、夏季成为优势种, 其中 8 月形成赤潮; 中肋骨条藻在除了 4、9 月外的其余 8 个月均为优势种; 而窄隙角毛藻在夏季 (7、8 月) 成为优势种。本调查期间浮游植物优势种的演替首先与水温变化密切相关, 因此暖水性种类窄隙角毛藻仅在高温季节成为优势种, 而适温能力较强的中肋骨条藻成为优势种的频率最高。

本研究 RDA 分析结果表明, pH 也是影响浮游植物优势种丰度的主要环境因子之一。浮游植物在进行光合作用时吸收海水中 CO_2 , 使海水中 CO_2 浓度降低, 海水中原有的 H^+ 、 CO_2 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 的平衡被打破, 表现为海水 pH 值升高, 并且浮游植物在生长过程中分泌的一些碱性胶质物质也会影响海水 pH 值^[19]。因此, 浮游植物丰度变化与海水 pH 关系密切。

除水温、pH 外, 影响浮游植物优势种丰度的主要环境因子还包括无机氮、活性磷酸盐。许多研究^[20-22]也表明, 浮游植物群落结构和演替与氮、磷等营养盐含量及其比例密切相关。根据 Justic 等^[23]提出的营养盐限制标准, 漳浦养殖区营养盐含量较丰富, 对浮游植物生长不存在绝对限制。本调查期间, 养殖区氮磷比、硅氮比、硅磷比波动范围分别为 7.9~31.1、0.4~9.0、9.2~87.3, 3 月出现硅相对限制, 1、4、6、8 月出现磷相对限制, 9 月出现氮相对限制。

本调查海域在 8、9 月先后出现了硅藻 (主要为柔弱拟菱形藻)、甲藻 (海洋原甲藻) 赤潮。先硅藻后甲藻的群落演替规律, 在多次赤潮发展过程中曾出现过^[24-26]。根据本研究 RDA 分析结果, 柔弱拟菱形藻丰度与水温、盐度、硅磷比等呈正相关关系, 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、无机氮、活性磷酸盐等营养盐呈负相关关系, 且受水温影响最大; 说明柔弱拟菱形藻适温性较高, 本调查海域 7、8 月 27℃ 左右的水温适宜其生长^[27-28]。柔弱拟菱形藻属于硅藻, 硅藻偏爱较高的硅磷比^[29], 因此其丰度与硅磷比呈正相关关系。本养殖区适宜的水温及盐度、丰富的营养盐、合适的氮磷比 (8 月海水中氮磷比为 15.6, 与最适宜氮磷比 16^[30] 几乎一致), 使柔弱拟菱形藻从 7 月开始大量生长繁殖, 在 8 月形成赤潮, 藻类的生长繁殖消耗了大量的营养盐, 因此柔弱拟菱形藻的丰度与氮、磷、硅等营养盐含量呈负相关关系。本养殖区 8 月硅藻赤潮期间, 海水中活性磷酸盐质量浓度降低至 0.005 mg/L, 氮磷比为 28.8, 硅磷比为 87.3, 出现磷相对限制。已有研究表明, 在磷相对限制条件下, 硅藻竞争力下降, 往往甲藻类占优势^[31-32]。甲藻在低氮、低磷条件下依然能够继续生长, 甚至达到赤潮标准^[33-34]。在海水磷相对限制情况下, 加上适宜的水文气象条件和藻种存在, 本调查海域 9 月暴发了海洋原甲藻赤潮。海洋原甲藻是世界性赤潮种, 广泛分布于沿海、河口和大洋海域^[35], 在水温 18~28℃、盐度 25~34、pH 7.5~8.3 的范围内适宜生长^[36]。本养殖区 9 月平均水温 28.6℃、盐度 33.7、pH 8.15, 较适宜海洋原甲藻生长, 且赤潮期间海水中氮磷比和硅氮比分别为 7.9 和 9.0, 处于氮相对限制状态。本研究 RDA 分析结果表明, 海洋原甲藻丰度与氮磷比关系密切, 说明在硅藻赤潮后的磷相对限制条件下, 海洋原甲藻仍大量生长繁殖并形成赤潮, 并且消耗了大量的氮营养盐, 导致海水氮磷比显著下降, 因此二者呈负相关关系。本研究表明, 海水中氮、磷等营养盐含量及其比例变化, 在赤潮形成以及优势种演替过程中起着重要作用。

4 结论

1) 本调查海域, 三倍体牡蛎养殖期间共鉴定出浮游植物 7 门 140 种。其中: 硅藻门 104 种, 甲

藻门30种,金藻门2种,蓝藻门、裸藻门、绿藻门、原生动物门各1种。浮游植物优势种为海洋原甲藻、柔弱拟菱形藻、中肋骨条藻、窄隙角毛藻。浮游植物丰度月均值波动范围为 $2.16 \times 10^4 \sim 1.89 \times 10^6$ cells/L,平均为 3.96×10^5 cells/L,12—2月丰度较低,3—7月丰度较冬季显著上升,8、9月出现高峰。浮游植物群落中甲藻丰度占比较高,平均占比达37.7%,推测主要为外海水系和沿岸流带来的外源性甲藻。浮游植物多样性水平较高,水温是影响浮游植物种类组成和丰度变化的重要环境因子。

2)与浮游植物优势种丰度密切相关的主要海洋环境因子是pH、水温、无机氮和活性磷酸盐。海洋原甲藻与悬浮物、水深、硅氮比等呈正相关关系,与氮磷比、氨氮等呈负相关关系,其中与氮磷比关系最密切。柔弱拟菱形藻与水温、盐度、硅磷比等呈正相关关系,与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、无机氮、活性磷酸盐等呈负相关关系,受水温影响最大。8、9月养殖区先后暴发柔弱拟菱形藻、海洋原甲藻赤潮,海水中氮、磷等营养盐含量及其比例变化,在赤潮形成以及优势种演替过程中起着重要作用。丰富的营养盐,合适的氮磷比(约16)有利于柔弱拟菱形藻生长。硅藻受赤潮后磷含量降低的生长限制,甲藻则竞争力上升,加上适宜的水文气象条件和藻种存在,随即暴发了海洋原甲藻赤潮。

[参考文献]

- [1] DAVIS D A, ARNOLD C R. The design, management and production of a recirculating raceway system for the production of marine shrimp [J]. *Aquacultural Engineering*, 1998, 17(3): 193-211.
- [2] 胡韧, 林秋奇, 段舜山, 等. 热带亚热带水库浮游植物叶绿素 *a* 与磷分布的特征[J]. *生态科学*, 2002, 21(4): 310-315.
- [3] 张玲, 李政菊, 陈飞羽, 等. 大鹏澳牡蛎养殖对浮游植物种群结构的影响研究[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(3): 549-555.
- [4] ROTT E, CANTONATI M, FUREDER L, et al. Benthic algae in high altitude streams of the Alps—a neglected component of the aquatic biota [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 562(1): 195-216.
- [5] SIDIK M J, RASHED-UN-NABI M, HOQUE M A. Distribution of phytoplankton community in relation to environmental parameters in cage culture area of Sepangar Bay, Sabah, Malaysia [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 80(2): 251-260.
- [6] 张国范, 李莉, 阙华勇. 中国牡蛎产业的嬗变: 新认知、新品种和新产品[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 740-749.
- [7] 武祥伟, 张跃环, 肖述, 等. 熊本牡蛎中国群体与美国群体杂交效应及杂交三倍体优势分析[J]. *中国水产科学*, 2019, 26(3): 465-472.
- [8] 曾志南, 林琪, 吴建绍, 等. 僧帽牡蛎三倍体和二倍体的生长比较[J]. *中国水产科学*, 1999, 6(4): 59-61.
- [9] 卢钰博, 于潇, 李希磊, 等. 养马岛扇贝养殖区浮游藻类的生态特征及其与环境因子的关系[J]. *渔业研究*, 2019, 41(3): 207-216.
- [10] KONG N, LIU Z Q, YU Z C, et al. Dynamics of phytoplankton community in scallop farming waters of the Bohai Sea and North Yellow Sea in China [J]. *BMC Ecology and Evolution*, 2022, 22(1): 48-59.
- [11] 关莹莹, 林军, 焦俊鹏, 等. 高滤食压力下贻贝筏式养殖场及周边海域浮游植物群落特征[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(4): 543-553.
- [12] 许翠娅, 杨芳, 郑盛华, 等. 黄岐湾三倍体牡蛎养殖区浮游植物群落特征及其影响因子分析[J]. *大连海洋大学学报*, 2024, 39(3): 480-489.
- [13] 孙军, 刘东艳, 徐俊, 等. 1999年春季渤海中部及其邻近海域的网采浮游植物群落[J]. *生态学报*, 2004, 24(9): 2003-2016.
- [14] 林更铭, 杨清良. 台湾海峡小型浮游植物的物种多样性和分布特征[J]. *生物多样性*, 2007, 15(1): 31-45.
- [15] 谢文玲, 陈长平, 高亚辉. 台湾海峡中北部至南麂列岛海域 2005 冬季硅藻群落结构特征[J]. *台湾海峡*, 2007, 26(3): 370-379.
- [16] 叶又茵, 项鹏, 王雨, 等. 福建 6 个港湾浮游植物多样性及其与水系的关系[J]. *生物多样性*, 2017, 25(3): 285-293.
- [17] DUPUIS A P, HANN B J. Warm spring and summer water temperatures in small eutrophic lakes of the Canadian prairies: potential implications for phytoplankton and zooplankton [J]. *Journal of Plankton Research*, 2009, 31(5): 489-502.
- [18] 张水浸, 杨清良, 邱辉煌. 赤潮及其防治对策[M]. 北京: 海洋出版社, 1994: 132-133.

- [19] 杜伟,郑重莺,马文君,等. 浙江省重点水产养殖区水体 pH 值和浮游植物季相变化[J]. 浙江农业科学,2017,58(6): 1048-1050.
- [20] BALOD M, PURINA I, BECHEMIN C, et al. Effects of nutrient enrichment on the growth rates and community structure of summer phytoplankton from the Gulf of Riga, Baltic Sea [J]. Journal of Plankton Research, 1998, 20(12): 2251-2271.
- [21] 黄海燕,王秋璐,许艳,等. 2004—2016 年夏季长江口网采浮游植物及其影响因素[J]. 海洋与湖沼,2018,49(2): 319-330.
- [22] 李子琳,张海彦,赵亮,等. 渤海浮游植物群落结构时空分布及其影响因素[J]. 海洋科学,2021,45(8): 10-20.
- [23] JUSTIC D, RABALAIS N N, TURNER R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, 40(3): 339-356.
- [24] 曾宇兰,陆斗定,王鹏斌,等. 2018 年春季福建近海浮游植物群落结构变化[J]. 广东海洋大学学报,2020,40(2): 53-63.
- [25] 张璇,石晓勇,张传松,等. 长江口及邻近海域赤潮藻种演替过程中营养盐特征[J]. 海洋环境科学,2012,31(6): 817-820.
- [26] DAVIS C O. The importance of understanding phytoplankton life strategies in the design of enclosure experiments [M]. New York: Springer Verlag, 1982: 323-332.
- [27] 陈菊芳,徐宁,王朝晖,等. 大亚湾拟菱形藻 (*Pseudonitzschia* spp.) 种群的季节变化与环境因子的关系[J]. 环境科学学报,2002,22(6): 743-748.
- [28] 陈丹丹,庞巧珠,涂志刚,等. 后水湾深水网箱养殖区浮游植物群落季节变化及其与环境因子的关系[J]. 海洋环境科学,2021,40(1): 73-80.
- [29] LI J, GLIBERT P M, ZHOU M, et al. Relationships between nitrogen and phosphorus forms and ratios and the development of dinoflagellate blooms in the East China Sea [J]. Marine Ecology Progress Series, 2009, 383: 11-26.
- [30] 李晓娇. 氮磷营养盐对胶州湾浮游植物群落结构的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- [31] EGGE J K. Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations? [J]. Journal of Marine Systems, 1998, 16: 191-198.
- [32] SHEN Z L. Historical changes in nutrient structure and its influences on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2001, 52(2): 211-224.
- [33] 黄晓航,史冬梅,张京浦,等. 赤潮发生机理研究: 海洋原甲藻的氮营养生理特征[J]. 海洋与湖沼,1997,28(1): 33-38.
- [34] 康燕玉,梁君荣,高亚辉,等. 氮、磷比对两种赤潮藻生长特性的影响及藻间竞争作用[J]. 海洋学报,2006,28(5): 117-122.
- [35] 林永水,周近明,何建宗. 赤潮生物[M]. 北京: 科学出版社,2001: 7.
- [36] 王正方,张庆,吕海燕. 温度、盐度、光照强度和 pH 对海洋原甲藻增长的效应[J]. 海洋与湖沼,2001,32(1): 15-18.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄力行)