

文章编号: 1674-5566(2024)05-1211-12

DOI: 10.12024/jsou.20240404476

大规模筏式贻贝养殖区浮游植物群落结构昼夜变化特征

吴晓凡¹, 汪振华^{1,2}, 章守宇^{1,2}, 林军^{1,2}, 钟威¹, 李晶晶¹, 毛嘉烜¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 海洋牧场工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 于2023年9月对枸杞岛筏式贻贝养殖区内外共6个站点的浮游植物进行了昼夜连续采样, 采用丰度和多样性指数及多元统计方法对养殖区内外浮游植物群落的昼夜变化特征进行了分析。结果显示: 养殖区共采集浮游植物7门158种(区内为103种, 区外为98种), 其中硅藻门104种, 占比65.82%, 甲藻门30种, 占比18.99%, 其余门类占15.19%; 区内白昼采集浮游植物94种, 夜晚103种; 对应区外为93种和98种。养殖区浮游植物优势种为9种, 区外12种, 其中中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)和夜光藻(*Noctiluca scintillans*)为区内外全天优势种。养殖区内浮游植物平均丰度为白昼($1.77 \times 10^7 \pm 2.5 \times 10^6$) cells/L, 夜晚($1.64 \times 10^7 \pm 2.31 \times 10^6$) cells/L, 对应区外分别为($1.87 \times 10^7 \pm 3.36 \times 10^6$) cells/L和($1.75 \times 10^7 \pm 2.72 \times 10^6$) cells/L。区内丰度变化呈多峰型, 峰值出现在潮水涨、退至4分和涨平时分; 区外丰度变化呈单峰型, 且与潮汐变化紧密相关, 峰值仅出现在涨平时分。nMDS分析显示养殖区内浮游植物群落昼夜差异不显著($P > 0.05$), 而区外浮游植物群落存在显著昼夜差异($P < 0.05$), 且与潮汐变化极显著相关($P < 0.01$)。温度、溶解氧和盐度与区内外浮游植物种类数和丰度皆显著相关($P < 0.05$), 浮游植物的种类数与磷酸盐和硝酸盐皆呈显著负相关($P < 0.05$), 丰度与氨氮和硅酸盐呈显著正相关($P < 0.05$)。研究表明, 大规模筏式养殖对局部水域浮游植物群落的影响在赤潮生物聚集的阶段可呈现更为积极的结果。

关键词: 枸杞岛; 贻贝养殖; 筏式养殖; 浮游植物; 昼夜变化

中图分类号: S 931 **文献标志码:** A

筏式养殖是海水贝类养殖的主要方法之一, 其使用浮筏和长绳来维持贻贝串悬浮于海面浅层水体^[1], 筏架设施会大幅度减缓表层流速, 降低水体的交换率^[2-3], 影响养殖区内部浮游植物群落的更新^[4]; 同时, 贻贝的滤食及对营养盐的消耗使得养殖海域内浮游植物群落结构同养殖区外差异较大^[5]。浙江舟山枸杞岛有着发达的贻贝养殖产业^[6], 养殖区西部受长江、钱塘江径流影响, 东部受台湾暖流和浙北上升流影响, 大量营养盐通过径流和潮流输送至筏式养殖区, 为浮游植物提供了丰富的养分来源^[7]。对大规模筏式养殖生境及其周边海域浮游植物群落进行潮汐尺度的变化规律研究, 可更精细地呈现养殖活动对局部水域浮游植物群落结构的影响, 从而为更合理地

规划筏式养殖范围及设定养殖密度提供科学依据。

浮游植物的昼夜变化受诸多环境因子影响, 如光照、温度、营养盐以及潮流等^[8]。唐森铭等^[9]在对泉州湾水域浮游植物群落进行昼夜研究时发现, 天然水域浮游植物存在明显的昼夜变化。李喆等^[10]的研究表明, 河口碎波带浮游植物群落结构随着时间的推移呈现明显的昼夜变化。目前针对人工生境浮游植物昼夜变化的研究几近空白。浮游植物是生态系统中物质循环和能量流动的基础, 能对水体其他生物群落与水体的营养状态变化做出迅速响应, 其群落变化可反映该水域的环境特征^[11]。贻贝滤食水体中浮游植物和有机碎屑等的生理过程会改变浮游植物的群

收稿日期: 2024-04-03 修回日期: 2024-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(42376207); 国家重点研发计划(2019YFD0901303); 上海海洋大学科技发展专项(A2-2006-20200212)

作者简介: 吴晓凡(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋生物学。E-mail: fancyfan23@foxmail.com

通信作者: 汪振华, E-mail: zh_wang@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

落结构^[12-13]。另一方面,贻贝生长过程中产生大量排泄物,经过微生物降解实现营养盐再生^[14-15],为浮游植物的生长提供条件^[16]。事实上,长周期的浮游植物群落变化受环境因素的影响波动性非常明显,其机制亦颇为明朗;而当研究区域聚焦于大规模养殖海域时,长时间尺度的变化过程难以解析养殖活动的影响程度,在这样的背景下更精细化的研究显得颇为需要。

为此选取浮游植物种类组成相对丰富的秋季,基于大规模筏式养殖区内外浮游植物昼夜采样数据,从水文环境和生物学角度对浮游植物种类组成、丰度、多样性指数和群落结构的昼夜变化进行分析,以探究枸杞岛贻贝筏式养殖区海域浮游植物种类组成及昼夜变化节律,为养殖海域的生态监测及健康评估提供精细化的理论依据,

也为养殖区的规划和养殖密度调控提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样区域与站点设置

采样区域位于浙江舟山枸杞岛西北部的贻贝筏式养殖海域(图1)。该海域主要养殖品种为厚壳贻贝(*Mytilus coruscus*),潮差为1.0~2.5 m,平均水深20 m。于2023年9月15日16:00至2023年9月16日16:00,在养殖区内外各设置3个站点(内外各安排一艘调查船),同步实施昼夜24 h连续观测采样。每次采样间隔为1 h,共采集24次。场内站点自西向东依次为N1、N2、N3,场外站点自西北向东南依次为W1、W2、W3(图1)。在区内东部观测站点放置声学多普勒速剖面仪(Signature ADCP 500K),观测时间为30 h。

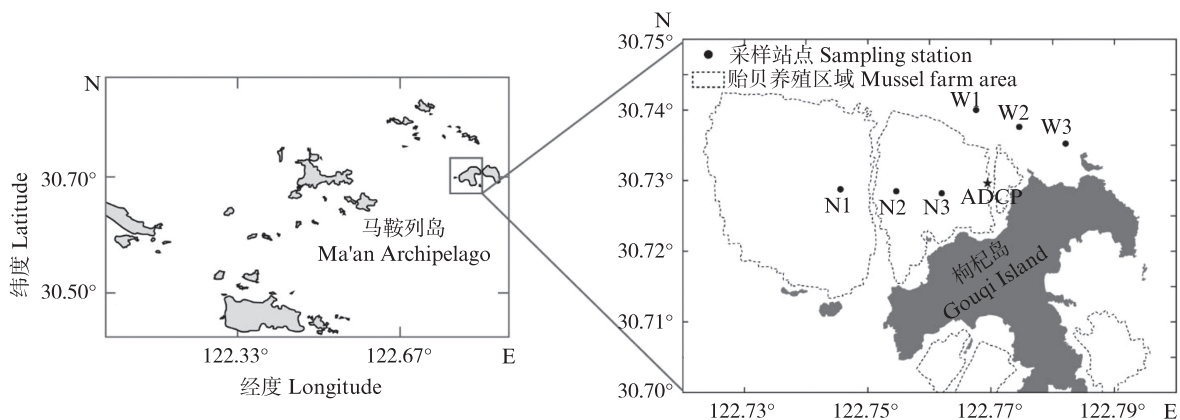


图1 采样站点分布

Fig. 1 Distribution of sampling stations

1.2 样品采集与处理

使用浅水Ⅲ型浮游植物网,采集养殖区内外5 m以浅水层浮游植物样品500 mL 1瓶,现场加入甲醛固定;同步使用有机玻璃采水器采集5 m水层水样500 mL 1瓶,使用0.02 μm孔径滤膜抽滤至100 mL后加入三氯甲烷低温保存,用于水体营养盐的测定。使用CTD(Seabird 19 plus)及便携式多参数水质仪获取区内外站点的水深(Depth)、温度(T)、盐度(S)、溶解氧(DO)和叶绿素a(*Chl.a*)浓度等环境数据。

浮游植物样品带回实验室沉降、浓缩至100 mL,在显微镜(Nikon T1-SM)下进行种类鉴定、计数。浮游植物物种鉴定及生态类群的划分参考《中国海藻志》和《中国海域甲藻》等图鉴^[17-19];浮游植物中文及拉丁文种名参考孙军

等^[20-21]。使用德国DeChem-Tech公司的CleverChem 380全自动间断化学分析仪对水样中的亚硝态氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、活性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、活性硅酸盐($\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$)进行测定。以上采样方法、样品处理方法及采样时间间隔设置均依据《海洋调查规范》(GB/T12763.4—2007)^[22]和《海洋监测规范》(GB17378.4—2007)^[23]。

1.3 数据处理和统计分析

浮游植物优势种采用优势度(Y)公式计算^[24]:

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (1)$$

式中: N 为某个样品中所有物种的总个体数; f_i 为某个样品的出现频率; n_i 为所有样品中第*i*种的总

个体数。本文中当 $Y \geq 0.02$ 为优势种, $Y \geq 0.10$ 为绝对优势种。

浮游植物多样性采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 和 Margalef 丰富度指数 (d) 进行分析^[25]:

$$H' = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (2)$$

$$d = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (3)$$

式中: S 为采集样本种类总数; N 为样本中浮游植物的总个体数; p_i 为第 i 种浮游植物个体数与该站点浮游植物总个体数的比值。

采用等级聚类 (CLUSTER) 和非度量多维测度 (nMDS) 进行浮游植物群落结构分析。在数据分析前, 对浮游植物丰度数据进行二次方根转换, 以削弱极端值的影响^[26]。CLUSTER 分析时将出现率小于 5% 的种类剔除。nMDS 二维分析结果可用胁迫系数 (Stress) 来衡量, $Stress < 0.2$ 时表明浮游植物群落的时空聚类分析具有一定的解释意义。采用单因子相似性分析 (ANOSIM) 检验昼夜变化及潮汐变化下浮游植物群落结构的相似性, 用百分比相似性分析 (SIMPER) 计算各贡献种对样本组内相似性和组间相异性的平均贡献率。使用 PRIMER 6.0 软件进行上述分析。使用 SPSS 22 对不同时间与空间的浮游植物的物种

组成和丰度与各环境因子间的关系进行 Pearson 相关性分析。采样站点图使用 ArcMap10.8.1 软件绘制, 其他图片均使用 Origin 2022 绘制。

2 结果

2.1 筏式养殖区内外浮游植物物种组成的昼夜变化

枸杞岛筏式养殖区内外海域中共鉴定出浮游植物 7 门 158 种。其中, 硅藻门占比最大, 为 104 种, 甲藻门次之, 为 30 种, 两者分别占总种类数的 65.82% 和 18.99%。此外, 金藻门所出现种类均为偶见种, 仅在个别时间点出现。

24 h 内浮游植物种类数随时间推移呈波浪式浮动, 整体变化范围为 60~103 种。养殖区内种类数变化范围为 68~103 种, 其中白昼采集浮游植物 94 种, 夜晚采集 103 种; 养殖区外种类数变化范围为 60~98 种, 白昼采集 93 种, 夜晚采集 98 种。通过单因素相似性分析 (ANOSIM) 发现, 区内种类组成昼夜差异显著 ($P < 0.05$), 区外则无明显昼夜差异 ($P > 0.05$); 区内外种类组成差异极显著 ($P < 0.01$)。所有站点均表现出白昼种类数高于凌晨 (0:00~6:00) 的现象 (图 2)。

筏式养殖区内外浮游植物优势种共 2 门 14 种。其中, 硅藻门占比最多, 为 78.57%, 具体优势种类及其优势度见表 1。

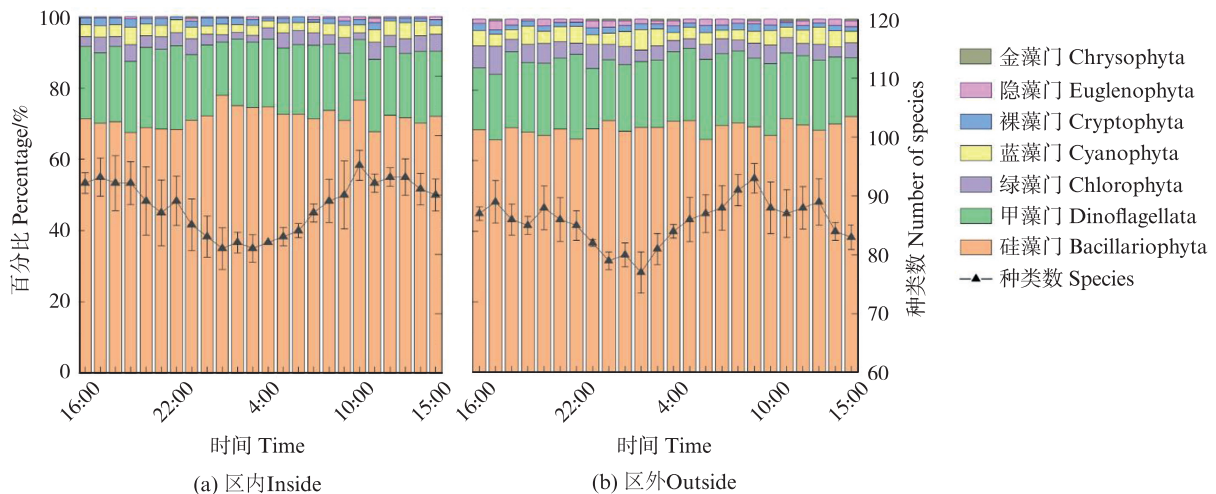


图 2 枸杞岛筏式养殖区内外海域各站点浮游植物种类组成的昼夜变化

Fig. 2 Diurnal variation of phytoplankton species composition at various sites inside and outside the Gouqi Island mussel farm area

表1 枸杞岛贝养殖区内外浮游植物的优势种
Tab. 1 Dominant species of phytoplankton inside and outside Gouqi Island mussel farm area

物种 Species	优势度指数(Y) Dominance index	
	养殖区内	养殖区外
	Inside the mussel farm	Outside the mussel farm
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	0.26	0.29
虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	0.02	-
柔弱拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	0.04	0.02
尖刺拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	-	0.02
颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	-	0.04
硅藻门 Bacillariophy		
旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	0.03	0.03
窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	0.02	-
美丽盒形藻 <i>Biddulphia pulchella</i>	0.03	0.02
丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>	-	0.03
具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	0.02	0.03
洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	-	0.02
甲藻门 Dinoflagellat		
夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>	0.13	0.12
无纹裸甲藻 <i>Gymnodinium instriatum</i>	0.05	0.03
东海原甲藻 <i>Prorocentrum donghaiense</i>	-	0.05

注:表格中数据为该优势种在对应月份的优势度(Y),加粗字体表示该优势种为绝对优势种,“-”表示该物种在对应区域为非优势种。

Notes: The data in the table are the dominance (Y) of the dominant species in the corresponding month, the bold font indicates that the dominant species is an absolute dominant species, and the "-" indicates that the species is a non-dominant species in the corresponding area.

在空间分布上,养殖区外优势种多于区内。区内外共有优势种为中肋骨条藻(*S. costatum*)、柔弱拟菱形藻(*P. delicatissima*)、旋链角毛藻(*C. curvisetus*)、美丽盒形藻(*B. pulchella*)、具槽帕拉藻(*P. sulcata*)、夜光藻(*N. scintillans*)、无纹裸甲藻(*G. instriatum*)。养殖区内外优势种均无明显昼夜差异($P>0.05$),绝对优势种均为中肋骨条藻和夜光藻。

2.2 筏式养殖区内外浮游植物丰度的昼夜变化

养殖区内浮游植物的平均丰度变化范围为 $1.53\times 10^7\sim 1.86\times 10^7$ cells/L,白昼时平均丰度为($1.77\times 10^7\pm 2.5\times 10^6$) cells/L,夜晚时为($1.64\times 10^7\pm 2.31\times 10^6$) cells/L;养殖区外浮游植物的平均丰度变化范围为 $1.64\times 10^7\sim 2.06\times 10^7$ cells/L,白昼和夜晚的平均丰度分别为($1.87\times 10^7\pm 3.36\times 10^6$) cells/L和($1.75\times 10^7\pm 2.72\times 10^6$) cells/L。养殖区内外丰度最高种类均为硅藻,其次为甲藻。结合潮流观测数据,发现养殖区浮游植物的丰度随时间与潮流的昼夜变化规律如下:16:00~22:00海域涨潮,养殖区内浮游植物平均丰度呈先上升后下降的趋势,在22:00前平均丰度降至低值;区外平均丰度随涨潮而上升,在22:00左右达到峰值。22:00~4:30海域退潮,养殖区内外平

均丰度均随退潮持续下降,到4:30左右达到最低值。4:30~10:00潮水开始上涨,区内外浮游植物平均丰度随涨潮小幅上涨,至10:00达到峰值。10:00~16:00海域退潮,养殖区内外平均丰度均呈下降趋势,区内变化幅度较小(图3)。

养殖区内平均丰度始终小于区外,区内外平均丰度差异显著($P<0.05$)。区内平均丰度变化幅度较小,昼夜差异不显著($P>0.05$);区外平均丰度随潮汐涨落呈现相同变化趋势,昼夜差异显著($P<0.05$)。相关性分析显示,区内浮游植物平均丰度与潮流相关性不大($P>0.05$),而区外则极显著相关($P<0.01$)。

2.3 枸杞岛筏式养殖区内外浮游植物多样性指数的昼夜变化

如图4所示,养殖区内外浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数的昼夜变化幅度较小,无明显规律;养殖区内浮游植物的多样性指数较区外更高。养殖区内外浮游植物的 Margalef 丰富度指数在夜晚变化幅度较大,区内浮游植物的丰富度明显高于区外。区内外浮游植物的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数均与潮流无明显相关性($P>0.05$)。

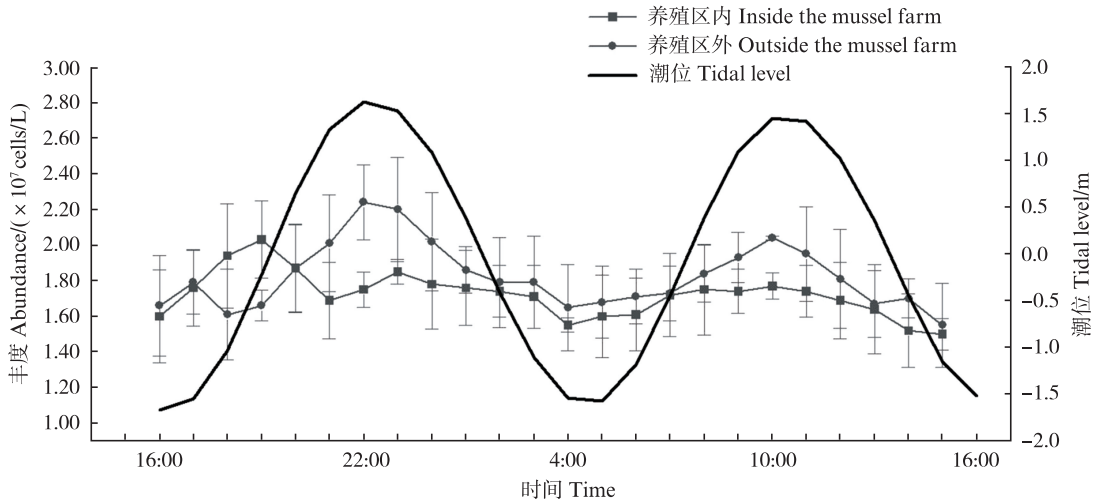


图3 枸杞岛筏式养殖区内外海域各站点浮游植物丰度的昼夜变化

Fig. 3 Diurnal variation of phytoplankton abundance at various stations in the sea area inside and outside the Gouqi Island mussel farm area

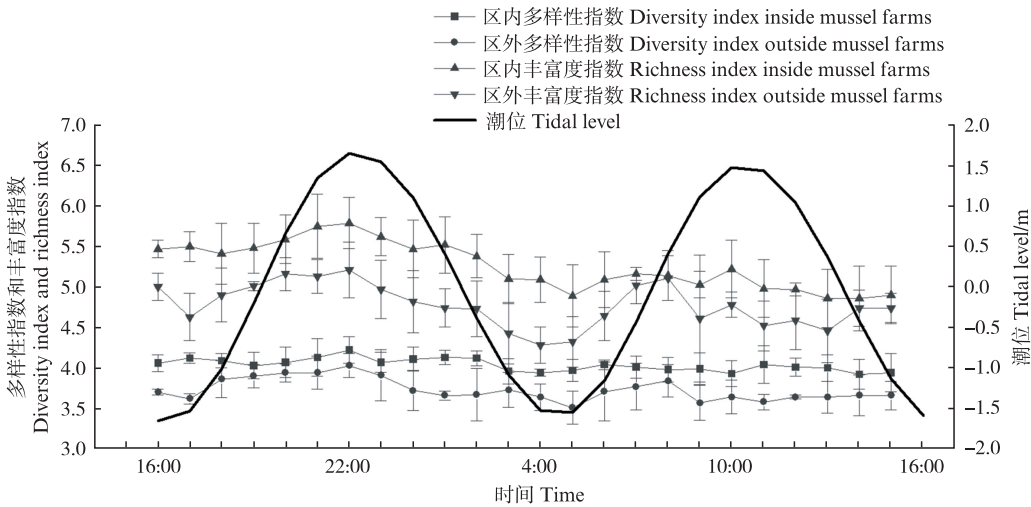


图4 枸杞岛筏式养殖区内外Shannon-Wiener多样性指数和Margalef丰富度指数的昼夜变化

Fig. 4 Diurnal variation of Shannon-Wiener diversity index and Margalef richness index inside and outside the Gouqi Island mussel farm area

2.4 枸杞岛筏式养殖区内外浮游植物群落结构的昼夜变化

ANOSIM 结果显示(表2),筏式养殖区外的浮游植物群落展现出显著的昼夜差异($P < 0.05$),区内则无明显差异($P > 0.05$)。聚焦涨落潮的4个小范围时间段[时段1为:16:00~22:00(涨潮);时段2为:22:00~4:00(落潮);时段3为4:00~10:00(涨潮);时段4为10:00~16:00(落潮)]发现,养殖区内外浮游植物群落均随潮汐变化展现出极显著的群落差异($P < 0.01$)。但在对养殖区内外浮游植物群落结构的逐小时 ANOSIM 分析时发现:短时间变化内,群落结构差异并不显著($P > 0.05$)。

选取 SIMPER 分析结果中贡献率大于 5% 的

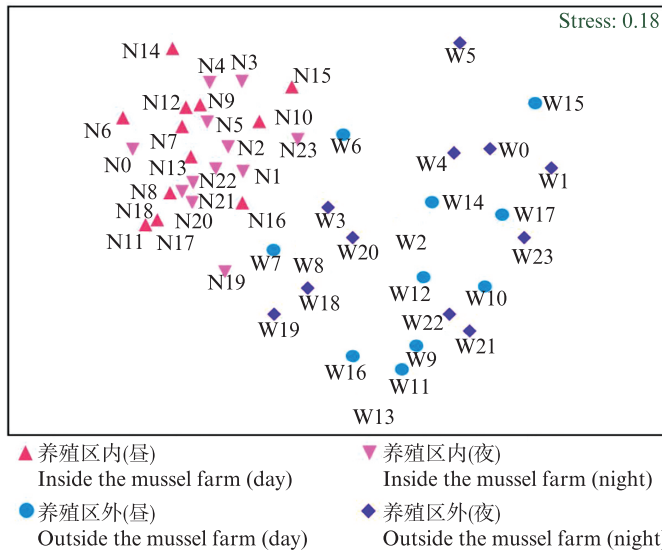
物种作为贡献种,发现:中肋骨条藻、虹彩圆筛藻(*C. oculus-iridis*)、颗粒直链藻(*M. granulata*)、具槽帕拉藻、夜光藻、无纹裸甲藻、东海原甲藻(*P. donghaiense*)等是导致区内外浮游植物群落结构产生差异的主要贡献物种;中肋骨条藻、夜光藻、具槽帕拉藻是导致浮游植物群落结构在昼夜变化上产生差异的主要贡献物种。

对不同时间贻贝筏式养殖区内外浮游植物群落结构进行 nMDS 分析(图5)发现:在空间变化中,筏式养殖区内外浮游植物群落存在明显的聚类分布,其中区内浮游植物群落的各时间分类单元聚集性较好,而区外的分布较零散。而在昼夜变化中,聚类效果并不明显。

表2 枸杞岛筏式养殖区内外浮游植物群落相似性分析及比较
Tab. 2 Similarity analysis and comparison of phytoplankton communities inside and outside the Gouqi Island mussel farm area

项目 Project	指标 Index	总差异 Global R	组间差异 Pairwise R	显著水平 Significance level	
昼夜变化 Diurnal variation	养殖区内 Inside the mussel farm	0.213	0.594	0.002	
	养殖区外 Outside the mussel farm	0.093	0.334	0.051	
潮汐变化 Tidal changes	养殖区内 Inside the mussel farm	时段1与时段2	0.067	0.236	
		时段1与时段3	0.402	0.009	
		时段1与时段4	0.267 (P=0.001)	0.556	0.002
		时段2与时段3		0.057	0.249
		时段2与时段4		0.335	0.009
	时段3与时段4	0.235	0.026		
	养殖区外 Outside the mussel farm	时段1与时段2	0.376 (P=0.001)	0.441	0.002
		时段1与时段3		0.191	0.069
		时段1与时段4		0.596	0.002
		时段2与时段3		0.381	0.004
时段2与时段4		0.365		0.004	
时段3与时段4	0.335	0.006			

注:加粗字体表示差异性显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)。
 Notes: Bold font indicates significant ($P<0.05$) or extremely significant ($P<0.01$).



N代表区内,W代表区外,其后数字为时间缩写。
 N stands for within the area, W stands for outside the area, and the number after it is the abbreviation of time.

图5 不同时间贻贝筏式养殖区内外浮游植物群落结构的nMDS排序图
Fig. 5 nMDS sequencing plots of phytoplankton community structure inside and outside the Gouqi Island mussel farm area at different times

2.5 浮游植物群落结构昼夜变化与环境因子的相关性分析

浮游植物种类数、丰度及环境因子各参数均服从正态分布($P>0.05$),故采用Pearson相关性分析探究浮游植物群落结构同环境因子的相关性。影响养殖区内外浮游植物种类数和丰度的环境因子无明显差异。浮游植物的种类数和丰度均与温

度和溶解氧呈显著正相关,与盐度呈显著负相关。浮游植物的种类数与磷酸盐呈显著负相关,与硝酸盐呈显著正相关;丰度与氨氮和硅酸盐呈显著正相关,与浊度呈负相关。枸杞岛筏式养殖区内外浮游植物群落受多个因子的综合作用,温度、盐度、溶解氧、浊度、磷酸盐、氨氮、硝酸盐和硅酸盐是影响其群落结构的关键因子(表3)。

表3 养殖区内外浮游植物与环境因子的相关性分析
 Tab.3 Correlation analysis between phytoplankton and environmental factors inside and outside the Gouqi Island mussel farm area

环境因子 Environmental factors	养殖区外 Outside the mussel farm		养殖区内 Inside the mussel farm	
	物种数 Number of species	丰度 Abundance	物种数 Number of species	丰度 Abundance
温度 Temperature	0.115**	0.110*	0.088*	0.124*
盐度 Salinity	-0.108**	-0.189*	-0.138*	-0.189*
溶解氧 DO	0.113*	0.221*	0.148*	0.212*
浊度 Turbidity	-0.021	-0.140*	-0.014	-0.140*
活性磷酸盐 $PO_4^{3-}-P$	-0.229*	-0.083	-0.176*	-0.060
亚硝酸盐 $NO_2^- -N$	0.047	-0.099	0.122*	-0.045
氨氮 $NH_4^+ -N$	0.044	0.210*	0.017	0.110*
硝酸盐 $NO_3^- -N$	0.106*	0.054	0.271*	0.090
活性硅酸盐 $SiO_3^{2-} -Si$	-0.104	0.153*	-0.730	0.697*

注:*表示相关性显著($P<0.05$);**表示相关性极显著($P<0.01$)。

Notes: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

3 讨论

3.1 大规模筏式养殖区内外浮游植物种类组成及丰度的昼夜变化特征

研究发现养殖区内浮游植物种类数昼夜差异显著,而区外无明显昼夜差异,区内外均呈现出白昼种类数高于凌晨的特点。甲藻在夜晚的平均丰度有所上升,硅藻则略微下降,形成了赤潮演替现象。沈敏等发现,白天温度较高时,中肋骨条藻对磷酸盐的利用率较东海原甲藻要高,易成为优势种;夜间硅酸盐浓度较低,导致硅藻生长缓慢,东海原甲藻、夜光藻等甲藻的生物量开始慢慢上升^[27]。在夜间,温度、盐度以及磷酸盐浓度均较白昼时降低,一些带有鞭毛的浮游植物(如裸藻、甲藻等)生物量增多,如夜光藻在低温低盐条件下生长较快^[28]。养殖区内外优势种昼夜差异均不明显,区内外绝对优势种均为中肋骨条藻和夜光藻,其余优势种大多为赤潮种类,如尖刺拟菱形藻、旋链角毛藻、东海原甲藻等,这与舟山附近海域富营养化、赤潮频发有关^[29]。

养殖区内浮游植物平均丰度均小于区外,区内外平均丰度差异显著。其中,区外平均丰度昼夜差异显著,且与潮汐涨落变化呈现极显著相关关系。区内外丰度变化差异可能与贻贝及其他动物的摄食、鞭毛类浮游植物夜间迁移以及营养盐的变化等因素有关。研究表明,滤食性贝类的摄食行为存在一定选择性,这间接导致了养殖区内浮游植物群落结构的变化^[30]。滤食性贝类在

摄食过程中倾向于选择甲藻进行滤食,如张莉红等^[31]使用中肋骨条藻、小角毛藻和东海原甲藻混合饲喂滤食性贝类发现,贝类更倾向选择摄食东海原甲藻;刘旭平等^[32]通过室内试验和现场调查发现,贝类对浮游植物种类的选择倾向鞭毛藻类浮游植物;丁任业等^[33]发现贝类会对水体中的丰度较高的优势种(如骨条藻属、角毛藻属等)选择性避食,同时选择性摄食帕拉藻等硅藻以及原多甲藻等甲藻。通过对24 h中各时段的SIMPER分析,发现夜间东海原甲藻、虹彩圆筛藻、具槽帕拉藻等藻类贡献率较大,也之前所述结论相吻合。另外,由于夜间浮游动物垂直洄游,表层水体中的摄食压力较大,也将导致浮游植物的生物量较低^[10,34]。

3.2 大规模筏式养殖区内外浮游植物群落结构的昼夜变化特征

枸杞岛筏式养殖海域群落结构受硅藻与甲藻控制,物种多样性较高,区内外存在明显的群落结构差异。同时海域存在一定富营养化现象,赤潮物种占比近三分之一,在关莹莹等^[35]其他研究者的结果中也有类似结论。筏式养殖区外的浮游植物群落展现出显著的昼夜差异,区内差异则不明显。这是因为养殖区内受筏架设施的影响,海流较缓,水体更新慢^[36-37];加上贻贝高强度滤食对浮游植物所产生的下行控制,使区内群落结构更加稳定。

通过ANOSIM分析发现浮游植物群落结构的昼夜变化受潮流影响更明显。图6为根据声学多

普勒速剖面仪检测出的海流数据绘制的定点流速垂向剖面的时间变化序列。枸杞岛海域潮汐类型为以正规半日潮为主的混合潮,采样当日为大潮汛期间,采样时间中 16:00~22:00 和 4:30~10:00 为涨潮,流向自西南向东北;22:00~4:30 和 10:00~16:00 为落潮,流向自东北向西南。养殖区内外浮游植物群落结构变化均同潮汐涨落呈现极显著相关关系,区内呈多峰型,区外呈单峰

型。在筏式养殖区外,没有贻贝的摄食压力以及浮筏设施、贻贝串的阻隔作用,浮游植物的群落结构完全受潮流影响,故变化趋势均与涨落潮呈现相似规律。养殖区内受外源高生物量海水的补充,即便在贻贝滤食作用下,区内浮游植物也能得到及时的补充,故表现出变化频率高于潮流变化的现象,在 ZHONG 等^[38]的研究中也有类似结论。

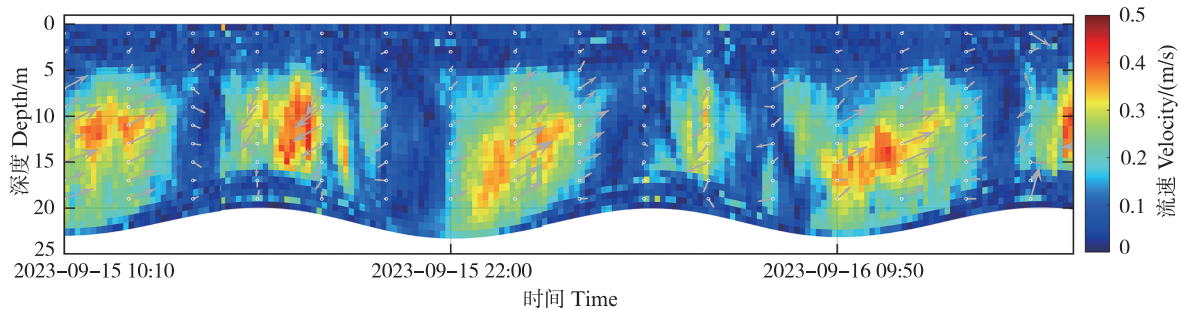


图6 定点流速垂向剖面的时间变化序列

Fig. 6 Temporal variation series of the vertical profile of the fixed-point flow velocity

在大连市金州区小窑湾贝类筏式养殖区中,同样展现出水体富营养化现象,部分赤潮物种丰度较高,浮游植物丰度与群落多样性指数随贝类摄食压力减轻而升高^[39]。季相等^[40]在对海州湾紫菜筏式养殖区附近浮游植物群落的逐年探究中发现,中肋骨条藻为各航次优势种,浮游植物多样性随筏式养殖面积的扩张而降低,养殖物种通过影响水体营养盐结构而间接影响浮游植物多样性。

对比南北方典型筏式养殖区浮游植物群落发现,海域均以硅藻和甲藻为主要种类,筏式养殖设施及养殖生物会对浮游植物群落结构造成一定影响。各养殖区海域普遍呈现出赤潮物种较多的现象。但在北方筏式养殖区及其附近海域中赤潮藻类虽出现,但优势度较小,群落结构并不稳定,引发赤潮的风险较低^[41]。且北方较少见夜光藻出现,南方较多^[42]。

4 结论与展望

枸杞岛大规模筏式养殖区内浮游植物的种类数量有明显的昼夜变化,而区外昼夜变化并不显著,种类组成表现为夜晚甲藻数量较白昼稍高。养殖区外浮游植物丰度与潮汐变化规律趋同,且群落结构昼夜变化显著;区内丰度仅在夜晚呈现与潮汐一致的变化特点,而白昼趋势异化,浮游植物丰度昼夜变化不显著。在浮游植物

的采样策略上,无论人工养殖亦或天然生境,在夜间的高潮时段会出现最高丰富度和多样性;而在白昼的高潮时段出现最高丰度值,因此在浮游植物的采样策略上可充分结合潮汐模式进行设计,以获取更全面的浮游植物种类组成和生物量数据。后续研究可在养殖区从岸侧到开阔区域设置更为密集的站点,进行更为精细化的采样,确定潮流主轴不同梯度上的浮游植物丰度差异,明确不同区域的最佳养殖密度控制策略。

本研究在采样过程中得到了孙梦雨、余锦涛、蔡鹏雨、刘园、黄颖和陈国荣的大力帮助,特此感谢!

参考文献:

- [1] 刘镇昌,张玉莲,刘全良. 我国贻贝养殖技术装备的现状、问题与发展方向[J]. 渔业现代化, 2005(4): 5-7.
LIU Z C, ZHANG Y L, LIU Q L. Present situation, problems and development direction of mussel farming technology and equipment in China [J]. Fishery Modernization, 2005(4): 5-7.
- [2] 王兴章,常忠岳,吕劭伟,等. 马粪海胆筏式养殖技术[J]. 中国水产, 2005(2): 62-63.
WANG X Z, CHANG Z Y, LYU S W, et al. Technique of raft farming *Hemicentrotus pucherriass* [J]. China Fisheries, 2005(2): 62-63.
- [3] 张泽华,黄海军,刘艳霞,等. 浅海筏式养殖对周边海域潮流和悬浮体特征影响研究[J]. 海洋科学进展,

- 2016, 34(1): 37-49.
- ZHANG Z H, HUANG H J, LIU Y X, et al. Effects of suspended culture of the seaweed *Laminaria japonica* aresch on the flow structure and suspended sediment transport[J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(1): 37-49.
- [4] 谭益国, 钟威, 林军, 等. 浮筏式贻贝养殖设施阻流效应的数值模拟[J/OL]. *水产学报*, (2024-02-19). <https://link.cnki.net/urlid/31.1283.S.20240207.1550.002>.
- TAN Y G, ZHONG W, LIN J, et al. Numerical simulation of flow resistance effect around the suspended mussel aquaculture[J/OL]. *Journal of Fisheries of China*, (2024-02-19). <https://link.cnki.net/urlid/31.1283.S.20240207.1550.002>.
- [5] 包炎琳, 段元亮, 杨娜, 等. 嵎泗列岛贻贝养殖区与无人岛潮间带大型海藻群落结构比较[J]. *海洋渔业*, 2020, 42(5): 595-607.
- BAO Y L, DUAN Y L, YANG N, et al. Comparison of community structure of large seaweed in mussel culture area of Shengsi Islands and intertidal zone of Xiasanhengshan Island [J]. *Marine Fisheries*, 2020, 42(5): 595-607.
- [6] 章守宇, 汪振华, 林军, 等. 枸杞岛海藻场夏、秋季的渔业资源变化[J]. *海洋水产研究*, 2007, 28(1): 45-52.
- ZHANG S Y, WANG Z H, LIN J, et al. Variation of fisheries resources in summer and autumn in seaweed beds of Gouqi Island[J]. *Marine Fisheries Research*, 2007, 28(1): 45-52.
- [7] ZHANG S Y, WANG L, WANG W D. Algal communities at Gouqi Island in the Zhoushan archipelago, China [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2008, 20(5): 853-861.
- [8] 蓝鑫, 吕靖, 马靖宇, 等. 北京十渡水库浮游植物群落昼夜垂直分布特征[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(7): 1877-1884.
- LAN X, LYU J, MA J Y, et al. Diel vertical distribution patterns of phytoplankton community in Shidu Reservoir, Beijing [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(7): 1877-1884.
- [9] 唐森铭, 陈兴群. 泉州湾水域浮游植物群落的昼夜变化[J]. *海洋学报*, 2006, 28(4): 129-137.
- TANG S M, CHEN X Q. Phytoplankton diel rhythm in the waters of Quanzhou Bay in Fujian, China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 129-137.
- [10] 李喆, 霍堂斌, 李耕, 等. 春季大辽河口碎波带浮游植物群落结构的昼夜变化[J]. *水产学杂志*, 2013, 26(5): 35-40.
- LI Z, HUO T B, LI G, et al. Diurnal rhythm of phytoplankton community structure in the surf zone of daliaohe river estuary in Spring [J]. *Journal of Fisheries*, 2013, 26(5): 35-40.
- [11] CROSSETTI L O, DE M BICUDO C E. Phytoplankton as a monitoring tool in a tropical urban shallow reservoir (Garças Pond): the assemblage index application [J]. *Hydrobiologia*, 2008, 610(1): 161-173.
- [12] 王俊, 姜祖辉, 董双林. 滤食性贝类对浮游植物群落增殖作用的研究[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(5): 765-768.
- WANG J, JIANG Z H, DONG S L. Role of filter-feeding bivalves in proliferation of phytoplankton community [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(5): 765-768.
- [13] 毕远溥, 董婧, 蒋双, 等. 小窑湾双壳贝类筏式养殖对海域环境的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(3): 270-275.
- BI Y P, DONG J, JIANG S, et al. Effects of bivalve raft cultivation on environment characteristics of the Xiaoyao Bay [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2002, 8(3): 270-275.
- [14] GILES H, BROEKHUIZEN N, BRYAN K R, et al. Modelling the dispersal of biodeposits from mussel farms: The importance of simulating biodeposit erosion and decay [J]. *Aquaculture*, 2009, 291(3/4): 168-178.
- [15] LINDIM C. Modeling the impact of Zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) on phytoplankton and nutrients in a lowland river [J]. *Ecological Modelling*, 2015, 301: 17-26.
- [16] 卜世勋, 张福崇, 方笑, 等. 河北抚宁海湾扇贝养殖区浮游植物与水质因子的相关研究[J]. *海洋科学*, 2022, 46(10): 150-158.
- BU S X, ZHANG F C, FANG X, et al. Relationship between phytoplankton and water quality factors in the *Argopecten irradians* culture area of Funing Bay, Hebei [J]. *Marine Sciences*, 2022, 46(10): 150-158.
- [17] 杨世民, 李瑞香, 董树刚. 中国海域甲藻 I (原甲藻目、鳍藻目)[M]. 北京: 海洋出版社, 2014.
- YANG S M, LI R X, DONG S G. Dinoflagellates in the China's Seas I (Prorocentrales, Dinophysiales) [M]. Beijing: Ocean Press, 2014.
- [18] 杨世民, 李瑞香, 董树刚. 中国海域甲藻 II (膝沟藻目)[M]. 北京: 海洋出版社, 2016.
- YANG S M, LI R X, DONG S G. Dinoflagellates in the China's Seas II (Conyaulacales) [M]. Beijing: Ocean Press, 2016.
- [19] 郭玉洁. 中国海藻志 第五卷 硅藻门 第一册 中心纲 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- GUO Y J. *Flora Algarum Marinarum Sinicarum Tomus V Bacillariophyta No. 1 Centricae* [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [20] 孙军, 刘东艳. 中国海区常见浮游植物种名更改初步意见[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(3): 271-286.
- SUN J, LIU D Y. The preliminary notion on nomenclature

- of common phytoplankton in China seas waters [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(3): 271-286.
- [21] 孙军, 刘东艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用[J]. *海洋学报*, 2004, 26(1): 62-75.
SUN J, LIU D Y. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(1): 62-75.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763. 6-2007 海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 89-97.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. GB/T 12763. 6-2007 Specifications for oceanographic survey—Part 6: Marine biological survey [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 89-97.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378. 3-2007 海洋监测规范第3部分: 样品采集、贮存与运输[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-20.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. GB 17378. 3-2007 The specification for marine monitoring—Part 3: Sample Collection Storage and transportation [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1-20.
- [24] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲐鲷渔场的关系[J]. *生态学杂志*, 1989, 8(4): 13-15, 19.
XU Z L, CHEN Y Q. Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in Autumn in the East China Sea and Yellow Sea [J]. *Journal of Ecology*, 1989, 8(4): 13-15, 19.
- [25] 张金屯. 数量生态学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2011.
ZHANG J T. Numerical Ecology [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011.
- [26] 梁鹏飞, 张树林, 张达娟, 等. 2021年天津近岸海域鱼类群落结构特征与环境因子的关系[J]. *经济动物学报*, 2022, 26(4): 326-334.
LIANG P F, ZHANG S L, ZHANG D J, et al. Relationship between fish community structure characteristics and environmental factors in coastal area of Tianjin in 2021 [J]. *Journal of Economic Animal*, 2022, 26(4): 326-334.
- [27] 沈敏, 林军, 关莹莹. 东海原甲藻和中肋骨条藻适宜生长条件及叶绿素荧光特性的对比[J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(6): 1034-1046.
SHEN M, LIN J, GUAN Y Y. Comparison on the suitable growth conditions and chlorophyll fluorescence characteristics of *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(6): 1034-1046.
- [28] 曹新宇, 李远眉, 王伟, 等. 温度和盐度对夜光藻种群密度增长的影响[J]. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(1): 95-102.
CAO X Y, LI Y M, WANG W, et al. Effects of temperature and salinity on increase in population density of alga *Noctiluca scintillans* [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2021, 36(1): 95-102.
- [29] 干满水, 戴玲, 潘静芬, 等. 舟山近岸海域赤潮生物与赤潮特征研究[J]. *环境生态学*, 2023, 5(8): 95-100.
GAN M S, DAI L, PAN J F, et al. Research on red tide organisms and red tide characteristics in the coastal waters of Zhoushan [J]. *Environmental Ecology*, 2023, 5(8): 95-100.
- [30] EVAN WARD J, SHUMWAY S E. Separating the grain from the chaff: particle selection in suspension- and deposit-feeding bivalves [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2004, 300(1/2): 83-130.
- [31] 张莉红, 张学雷, 朱明远. 栉孔扇贝对硅藻和甲藻细胞的选择性摄食初探[J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(3): 372-376.
ZHANG L H, ZHANG X L, ZHU M Y. Preliminary study on selective feeding of the scallop (*Chlamys farreri*) on diatom and dinoflagellate cells [J]. *Advances in Marine Science*, 2008, 26(3): 372-376.
- [32] 刘旭平, 单忠才, 李媛芳, 等. 滤食性贝类选择性摄食行为研究现状[J]. *特种经济动植物*, 2023, 26(5): 89-92, 107.
LIU X P, SHAN Z C, LI Y F, et al. Research status of the selective feeding behavior of filter-feeding shellfish [J]. *Special Economic Animals and Plants*, 2023, 26(5): 89-92, 107.
- [33] 丁任业, 查道军, 谢艺萱, 等. 秦皇岛贝类养殖区4种贝类对浮游植物的摄食选择性[J]. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 2023, 36(1): 66-72.
DING R Y, ZHA D J, XIE Y X, et al. Feeding selectivity of phytoplankton by four bivalve species in aquaculture area of Qinhuangdao [J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2023, 36(1): 66-72.
- [34] TANG K W, CHEN Q C, WONG C K. Diel vertical migration and gut pigment rhythm of *Paracalanus parvus*, *P. crassirostris*, *Acartia erythraea* and *Eucalanus subcrassus* (Copepoda, Calanoida) in Tolo Harbour, Hong Kong [J]. *Hydrobiologia*, 1994, 292-293(1): 389-396.
- [35] 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.
GUAN Y Y, LIN J, JIAO J P, et al. The characteristics of

- phytoplankton community of mussel raft farms and surrounding waters under high filtration pressure [J]. *Marine Environmental Science*, 2022, 41(4): 543-553.
- [36] 林军, 邓明星, 章守宇, 等. 贻贝养殖海域表层水温季节变化及其对紫贻贝生长的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(6): 918-926.
- LIN J, DENG M X, ZHANG S Y, et al. Seasonal variation of surface water temperature and its ecological impacts in a mussel aquaculture farm [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(6): 918-926.
- [37] 温英, 林军, 杨冠林, 等. 贻贝浮筏养殖设施水动力效应及附生海藻碎屑输运的数值模拟[J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(6): 1549-1561.
- WEN Y, LIN J, YANG G L, et al. Study on hydrodynamic effect of suspended mussel aquaculture facilities and detritus transportation of epiphytic seaweed [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(6): 1549-1561.
- [38] ZHONG W, LIN J, ZOU Q P, et al. Impacts of large-scale suspended mussel farm on seston depletion [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2024, 300: 108710.
- [39] 董婧, 毕远溥, 王文波, 等. 小窑湾高密度贝类筏式养殖对浮游植物群落的影响[J]. *海洋水产研究*, 2003, 24(3): 50-54.
- DONG J, BI Y P, WANG W B, et al. Effect of high density bivalve rafts cultivation on phytoplankton community [J]. *Marine Fisheries Research*, 2003, 24(3): 50-54.
- [40] 季相星, 姜毅, 王普力. 2015—2018年海州湾及邻近海域浮游植物群落结构特征[J]. *环境监测与预警*, 2021, 13(1): 47-51.
- JI X X, JIANG Y, WANG P L. Study on the community structure of phytoplankton in Haizhou Bay and its adjacent waters from 2015 to 2018 [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2021, 13(1): 47-51.
- [41] 李希磊, 杨俊丽, 于潇, 等. 烟台四十里湾扇贝养殖区浮游植物群落调查[J]. *海洋科学*, 2018, 42(8): 30-37.
- LI X L, YANG J L, YU X, et al. Investigation of phytoplankton community in the scallop culture area of Sishili Bay in Yantai [J]. *Marine Science*, 2018, 42(8): 30-37.
- [42] 卢钰博, 刘嘉卓, 于潇, 等. 烟台近海贝类养殖区浮游植物群落研究[J]. *水产学杂志*, 2022, 35(2): 74-83.
- LU Y B, LIU J Z, YU X, et al. Phytoplankton community in shellfish culture areas of Yantai offshore, Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2022, 35(2): 74-83.

Diurnal variation of phytoplankton community structure in a large-scale raft mussel aquaculture area

WU Xiaofan¹, WANG Zhenhua^{1,2}, ZHANG Shouyu^{1,2}, LIN Jun^{1,2}, ZHONG Wei¹, LI Jingjing¹, MAO Jiakuan¹

(1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Engineering technology research center of marine ranching, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Phytoplankton samples were collected both inside and outside a large scale raft mussel culture area of Gouqi island in September 2023. The diurnal variation characteristics of phytoplankton community inside and outside the culture area were analyzed by using abundance and diversity index and multivariate statistical methods. A total of 7 phyla and 158 species of phytoplankton were collected (103 species inside and 98 species outside the area), including 104 species of diatom (accounting for 65.82%), 30 species of Pyrrophyta (accounting for 18.99%), and 15.19% for the rest species. During the daytime, 94 species were collected in the inner area, while 103 species were collected at night. In the outer area, 93 species were collected during the daytime, and 98 species were collected at night. The dominant species of phytoplankton in the aquaculture area were 9 species, while in the outer area, there were 12 dominant species. Among them, *Skeletonema costatum* and *Noctiluca scintillans* were dominant species throughout the day in both areas. The average abundance of phytoplankton in the inner area was $(1.77 \times 10^7 \pm 2.5 \times 10^6)$ cells/L during the daytime and $(1.64 \times 10^7 \pm 2.31 \times 10^6)$ cells/L at night, while in the outer area, it was $(1.87 \times 10^7 \pm 3.36 \times 10^6)$ cells/L during the daytime and $(1.75 \times 10^7 \pm 2.72 \times 10^6)$ cells/L at night. The abundance variation in the inner area showed a multi-peak pattern, with peak values occurring during the rising and falling tides and the high tide. In contrast, the abundance variation in the outer area showed a single-peak pattern, closely related to tidal changes, with the peak value only occurring during the high tide. Non-metric multidimensional scaling (nMDS) analysis showed that there was no significant difference in phytoplankton community between day and night in the aquaculture area ($P > 0.05$), but there was significant difference in phytoplankton community outside the area ($P < 0.05$), which was significantly correlated with tidal changes ($P < 0.01$). Temperature, dissolved oxygen and salinity were significantly correlated with the number and abundance of phytoplankton ($P < 0.05$), the number of phytoplankton species was significantly negatively correlated with phosphate and nitrate ($P < 0.05$), and the abundance was significantly positively correlated with ammonia nitrogen and silicate ($P < 0.05$). The results showed that the impact of large-scale raft culture on phytoplankton community in local waters could present a more positive result at the stage of red tide organism aggregation.

Key words: Gouqi Island; mussel farming; raft culture; phytoplankton; diurnal variation