

DOI: 10.12264/JFSC2021-0237

三疣梭子蟹池塘综合养殖系统浮游植物群落结构及其与环境因子的关系

蒲炜佳¹, 董世鹏¹, 张东旭², 于力业¹, 谢宜成¹, 徐羨¹, 王芳^{1,3}, 李由明⁴

1. 中国海洋大学, 教育部海水养殖重点实验室, 山东 青岛 266003;
2. 浙江省海洋水产研究所, 浙江省海水增殖重点实验室, 浙江 舟山 316021;
3. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266235;
4. 海南热带海洋学院, 海南省热带海洋渔业资源保护与利用重点实验室, 海南 三亚 572022

摘要: 在三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)-日本对虾(*Penaeus japonicus*)混养系统(SC)中, 分别搭养低(SCC₁)、中(SCC₂)、高(SCC₃)密度的缢蛏(*Sinonovacula constricta*), 构建 3 种三疣梭子蟹-日本对虾-缢蛏综合养殖系统, 于 2020 年 7 月至 12 月逐月采集养殖系统样品, 分析了养殖期间浮游植物的群落结构特征, 并利用典范对应分析(CCA)和冗余分析(RDA)探讨了浮游植物群落结构变化与环境因子的关系。结果显示: (1)养殖期间共鉴定出浮游植物 6 门 54 属 81 种; 从种的数量上看, 硅藻门(Bacillariophyta)>甲藻门(Pyrrophyta)>蓝藻门(Cyanophyta)>绿藻门(Chlorophyta)>裸藻门(Euglenophyta)>隐藻门(Cryptophyta); 共包含 30 种优势种, 主要包括小环藻属未定种(*Cyclotella* sp.)、尖针杆藻(*Synedra acus*)、双头辐节藻(*Stauroneis anceps*)、小席藻(*Phormidium tenue*)、小颤藻(*Oscillatoria tenuis*)及裸藻属未定种(*Euglena* sp.); (2)养殖期间浮游植物密度介于 $2.23 \times 10^5 \sim 28.06 \times 10^5$ cell/L, 生物量为 0.06~21.37 mg/L, Shannon-Wiener 多样性指数范围为 0.90~2.42, Pielou 均匀度指数范围为 0.31~0.78, Margalef 丰富度指数范围为 1.00~2.08, 整体多样性水平高, 群落较为稳定; (3) CCA 与 RDA 结果显示, 水温、透明度和盐度是影响三疣梭子蟹综合养殖系统浮游植物群落结构的主要环境因子。在三疣梭子蟹-日本对虾混养系统中搭配中密度(75.0 kg/hm²)和高密度(112.5 kg/hm²)缢蛏时, 系统浮游植物群落多样性较好, 可实现浮游植物的均衡发展, 增强养殖系统的抗干扰能力, 有利于三疣梭子蟹池塘综合养殖系统的稳定。

关键词: 三疣梭子蟹; 池塘综合养殖; 浮游植物; 环境因子; 典范对应分析; 冗余分析

中图分类号: S961

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)04-0549-13

三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)是我国重要的海水池塘养殖种类, 2018 年浙江省三疣梭子蟹的池塘养殖产量达 2.36×10^4 t, 占全国产量的 20.26%^[1]。目前, 三疣梭子蟹和日本对虾(*Penaeus japonicus*)混养是浙江省梭子蟹的主要养殖模式^[2], 但大量投饵和高密度的养殖会加重水体营养负荷, 降低营养物质利用率^[3], 导致生态平衡失调、水质恶化和病害频发^[4]。滤食性贝类作为综合养殖系

统中的关键角色, 不仅能够调节营养物质循环, 提高资源利用率^[5], 还能提高生物群落多样性和环境的稳定性^[6], 故提出在三疣梭子蟹-日本对虾养殖系统中混养缢蛏(*Sinonovacula constricta*)以实现养殖效益最大化和水体养殖容量的提升。

浮游植物是池塘养殖生态系统重要的初级生产者^[7], 具有生长周期短和对养殖水体的变化敏感而迅速的特点^[8], 是衡量养殖系统健康与否的

收稿日期: 2021-03-09; 修订日期: 2021-04-16.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019FYD0900402).

作者简介: 蒲炜佳(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为甲壳动物健康养殖. E-mail: puweijia1103@163.com

通信作者: 王芳, 教授, 研究方向为甲壳动物行为生态学与健康养殖. E-mail: wangfang249@ouc.edu.cn

重要指示生物^[9]。缢蛏主要滤食浮游植物和有机碎屑,其滤食作用必然会改变浮游植物的群落结构特征^[6]。目前,有关三疣梭子蟹池塘综合养殖系统的研究主要集中在营养物质收支^[10]、二氧化碳通量^[11]和系统能量流动^[12]等方面,对浮游植物群落结构特征及其与环境因子相关性的研究较少。

本研究在三疣梭子蟹-日本对虾混养系统(SC)中,分别搭养低(SCC₁)、中(SCC₂)、高(SCC₃)密度的缢蛏,构建 4 种三疣梭子蟹池塘综合养殖系统,逐月采集养殖系统的样品,分析浮游植物群落结构特征的变化,并利用典范对应分析(CCA)和冗余分析(RDA)探究影响浮游植物群落变化的主要环境因子,研究结果为揭示三疣梭子蟹池塘综合养

殖系统浮游植物群落结构及其变动原因提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验地点与养殖生物放养情况

实验在浙江省舟山市冈谷水产养殖基地开展,选择 4 口面积约为 1.33 hm²、水深约为 1.5 m 的养殖池塘,养殖生物放养情况见表 1。养殖时间为 2020 年 7—12 月。

1.2 样品采集与测定

2020 年 7—12 月,每月采集养殖池塘水环境因子和浮游植物样品。受台风天气影响,9 月未采集样品。每个池塘沿对角线设置 3 个采样点,用 5 L 有机玻璃采水器采集各点水样及浮游植物样品。

表 1 三疣梭子蟹池塘综合养殖系统的放养情况
Tab. 1 Stocking information in integrated pond aquaculture system of *Portunus trituberculatus*

养殖种类 aquaculture species	项目 item	组别 treatment			
		SCC ₁	SCC ₂	SCC ₃	SC
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	甲长/cm carapace length	0.41±0.02	0.41±0.02	0.41±0.02	0.41±0.02
	甲宽/cm carapace width	0.74±0.05	0.74±0.05	0.74±0.05	0.74±0.05
	体重/g body weight	0.024	0.024	0.024	0.024
	密度/(kg/hm ²) density	7.5	7.5	7.5	7.5
日本对虾 <i>Penaeus japonicas</i>	体长/cm body length	1.02±0.07	1.02±0.07	1.02±0.07	1.02±0.07
	体重/g body weight	0.0087	0.0087	0.0087	0.0087
	密度/(×10 ⁴ ind/hm ²) density	22.5	22.5	22.5	22.5
缢蛏 <i>Sinonovacula constricta</i>	壳长/cm shell length	1.85±0.14	1.85±0.14	1.85±0.14	1.85±0.14
	壳高/cm shell width	0.57±0.10	0.57±0.10	0.57±0.10	0.57±0.10
	体重/g body weight	0.32±0.02	0.32±0.02	0.32±0.02	0.32±0.02
	密度/(kg/hm ²) density	37.5	75.0	112.5	0

注: SCC₁—三疣梭子蟹+日本对虾+低密度缢蛏; SCC₂—三疣梭子蟹+日本对虾+中密度缢蛏; SCC₃—三疣梭子蟹+日本对虾+高密度缢蛏; SC—三疣梭子蟹+日本对虾。

Note: SCC₁—*Portunus trituberculatus*+*Penaeus japonicas*+low density *Sinonovacula constricta*; SCC₂—*Portunus trituberculatus*+ *Penaeus japonica*+medium density *Sinonovacula constricta*; SCC₃—*Portunus trituberculatus*+*Penaeus japonicas*+high density *Sinonovacula constricta*; SC—*Portunus trituberculatus*+*Penaeus japonicas*.

现场取 1 L 水样加入 15 mL 鲁哥氏液和 10 mL 40% 的甲醛溶液固定,在实验室将水样倒入 1000 mL 沉淀器中,静置 48 h 后浓缩至 50 mL,将 3 个采样点样品混合,吸取 0.1 mL 注入 0.1 mL 计数框内,在 10×40 倍显微镜下进行种类鉴定与计数。每瓶混合样品计数 3 次,每次计数 2 片取平均值,2 片计数结果差异不超过 15%,若相差较大,则再取 1 次计数,然后取数值相差较小的 2 片的平均值^[13-14]。浮游植物种类鉴定参考《水生生物

学》^[15]。

水样用于测定水温(WT)、盐度(S)、溶解氧(DO)、透明度(SD)、酸碱度(pH)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸氮(NO₃⁻-N)、亚硝酸氮(NO₂⁻-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)和叶绿素 a (Chl-a)。水温使用海水温度计测定, pH 使用便携式 pH 计测定,盐度使用便携式盐度计测定,透明度使用塞式透明度盘测定,氨氮、硝酸氮、亚硝酸氮、总氮、总磷、磷酸盐、叶绿素 a 测定均参考《海洋

监测规范》(GB/T 17378.4-2007)^[13]和《海洋调查规范》(GB/T 12763.6-2007)^[16]。

1.3 数据处理

1.3.1 浮游植物密度及生物量分析 浮游植物密度参照《海洋调查规范》^[13]的浓缩计数法, 计算公式如下:

$$N = \frac{n \times V_s}{V \times V_a}$$

式中, N 为 1 L 水样中浮游植物的个体数(cell/L); n 为计数所获得的个体数; V_s 为水样浓缩后的体积(mL); V 为原采水量体积(L); V_a 为取样计数体积(mL)。浮游植物生物量参照《水生生物学》^[17]中提供的浮游植物细胞平均湿重, 结合 1 L 水样中浮游植物的个体数, 即可得到 1 L 水样中各种浮游植物的生物量(mg/L)。

1.3.2 浮游植物群落相似性指数 利用 Jaccard 群落相似性指数(J_c)^[18]比较不同养殖系统浮游植物群落结构的相似性, 计算公式为:

$$J_c = \frac{c}{a + b - c} \times 100\%$$

式中, a 为某一养殖系统浮游植物种类数, b 为另一养殖系统浮游植物种类数, c 为两个养殖系统共有种类数。

1.3.3 浮游植物优势种及多样性指数 本研究通过 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)、Margalef 丰富度指数(d_{ma})和 Mcnaughton 优势度指数(Y)对浮游植物的生态学特征进行分析^[19-21]。各指数的计算公式为:

Mcnaughton 优势度指数(Y):

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

Shannon-Wiener 多样性指数(H'):

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

Pielou 均匀度指数(J):

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}$$

Margalef 丰富度指数(d_{ma}):

$$d_{ma} = \frac{S-1}{\ln N}$$

式中, n_i 为第 i 个种的数量, N 为浮游植物总数量, P_i 为第 i 种个体数与样品中总个体数的比值(n_i/N), S 为浮游植物总种数, f_i 为第 i 个种出现的频率。将 $Y \geq 0.02$ 的浮游植物定义为优势种^[15]。

1.3.4 数据处理 采用 Excel 2013 和 SPSS 26.0 进行数据统计与分析, 采用 GraphPad Prism 8 进行图形绘制。利用 Canoco 5.0 软件对浮游植物优势种密度与环境因子进行相关分析, 对物种数据进行 $\lg(x+1)$ 转化, 使其呈现正态分布^[22]。对物种数据进行去趋势对应分析(DCA), 根据排序轴最长梯度(SD)选择排序模型^[23-25]。

2 结果与分析

2.1 浮游植物种类组成与优势种

养殖期间, 共鉴定浮游植物 6 门 54 属 81 种(表 2), 其中, SCC₁ 共鉴定 6 门 35 属 54 种, SCC₂ 共鉴定 6 门 42 属 57 种, SCC₃ 共鉴定 6 门 36 属 52 种, SC 共鉴定 6 门 36 属 52 种, 各养殖系统的浮游植物种类均以硅藻门(Bacillariophyta)、蓝藻门(Cyanophyta)和甲藻门(Pyrrophyta)为主。

养殖期间, $Y \geq 0.02$ 的浮游植物有 30 种(表 3),

表 2 三疣梭子蟹池塘综合养殖系统浮游植物主要种类组成

Tab. 2 Species composition of phytoplankton in integrated pond aquaculture system of *Portunus trituberculatus*

组别 treatment	蓝藻门 Cyanophyta		硅藻门 Bacillariophyta		甲藻门 Pyrrophyta		裸藻门 Euglenophyta		隐藻门 Cryptophyta		绿藻门 Chlorophyta		合计 total	
	属 genus	种 species	属 genus	种 species	属 genus	种 species	属 genus	种 species	属 genus	种 species	属 genus	种 species	属 genus	种 species
SCC ₁	3	4	23	38	6	7	1	2	1	2	1	1	35	54
SCC ₂	6	7	26	40	7	7	1	1	1	1	1	1	42	57
SCC ₃	4	5	22	33	5	6	1	3	1	2	3	3	36	52
SC	4	4	23	36	5	5	1	3	1	2	2	2	36	52

表 3 三疣梭子蟹池塘综合养殖系统浮游植物优势种的组成

Tab. 3 Composition of phytoplankton dominant species in integrated pond aquaculture system of *Portunus trituberculatus*

编号 number	优势种 dominant species	7 月 July			8 月 August			10 月 October			11 月 November			12 月 December				
		SCC ₁	SCC ₂	SCC ₃	SC	SCC ₁	SCC ₂	SCC ₃	SC	SCC ₁	SCC ₂	SCC ₃	SC	SCC ₁	SCC ₂	SCC ₃	SC	
蓝藻门 Cyanophyta																		
CY1	小席藻 <i>Phormidium tenue</i>	0.31	-	0.19	0.19	-	-	-	0.06	0.11	0.15	0.17	-	-	-	-	-	-
CY2	小颤藻 <i>Oscillatoria tenuis</i>	0.09	0.04	-	-	0.09	0.31	0.43	0.34	0.11	0.19	-	0.33	-	0.07	0.14	0.10	- 0.15 - 0.03
CY3	美丽颤藻 <i>Oscillatoria formosa</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-
CY4	微囊藻属未定种 <i>Microcystis</i> sp.	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CY5	微小色球藻 <i>Chroococcus minutus</i>	-	-	-	-	-	-	0.09	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CY6	钝顶螺旋藻 <i>Spirulina platensis</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.04	-	-	-	-	-	0.06	- 0.03
CY7	湖泊鞘丝藻 <i>Lyngbya limnetica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-	0.09
硅藻门 Bacillariophyta																		
BA1	小环藻属未定种 <i>Cyclotella</i> sp.	0.18	0.29	0.05	0.45	0.73	0.10	0.13	0.14	0.09	0.04	0.02	0.04	-	0.27	0.06	0.22	0.05 0.12 0.09
BA2	菱形藻属未定种 <i>Nitzschia</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.20	-	-	-	-
BA3	线形菱形藻 <i>Nitzschia linearis</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.04	0.05	-	0.03	0.07	0.02	-	-
BA4	双头菱形藻 <i>Nitzschia amphibia</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-	0.02	-
BA5	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	-	0.11	-	0.02	-	0.03	-	-	0.07	-	-	-	0.19	0.10	0.07	-	0.12
BA6	中型脆杆藻 <i>Fragilaria intermedia</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	0.02	-	-	-	-	0.03	- 0.03
BA7	双头针杆藻 <i>Synedra amphicephala</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-	0.10	0.02	0.07	-
BA8	双头辐节藻 <i>Stauroneis anceps</i>	-	0.16	-	-	-	0.05	-	-	0.04	-	0.05	-	0.11	0.07	0.07	-	0.12 0.09
BA9	近缘桥弯藻 <i>Cymbella affinis</i>	-	-	-	-	-	0.05	-	0.02	0.04	-	-	0.04	-	0.02	-	-	-
BA10	隐头舟形藻 <i>Navicula cryptocephala</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.09	-	-	0.06	-	-	-	-	-
BA11	变异直链藻 <i>Melosira varians</i>	-	-	-	-	-	-	0.07	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-
BA12	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	0.02	-	-
BA13	颗粒直链藻最窄变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05	-	-	-	-

(待续 to be continued)

(续表 3 Tab. 3 continued)

编号 number	优势种 dominant species	7 月 July			8 月 August			10 月 October			11 月 November			12 月 December			
		SCC ₁	SCC ₂	SCC ₃	SC	SCC ₁	SCC ₂	SCC ₃	SC	SCC ₁	SCC ₂	SCC ₃	SC	SCC ₁	SCC ₂	SCC ₃	SC
甲藻门 Pyrrophyta																	
PY1	光薄甲藻 <i>Gymnodinium pulvisculus</i>	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-	-	0.02	-	-	-
PY2	二角多甲藻 <i>Peridinium bipes</i>	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-
裸藻门 Euglenophyta																	
EU1	裸藻属未定种 <i>Euglena</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.73	-	0.04	0.72
EU2	尾裸藻 <i>Euglena caudata</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-	0.06	0.02	-
EU3	尖尾裸藻 <i>Euglena oxyuris</i>	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-
隐藻门 Cryptophyta																	
CR1	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>	-	-	0.20	-	-	0.04	-	-	0.04	-	-	-	-	-	-	-
CR2	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	-	-	-	-	0.05	-	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
绿藻门 Chlorophyta																	
CH1	环丝藻 <i>Ulothrix zonata</i>	-	-	0.06	0.02	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05	-
CH2	圆鼓藻 <i>Cosmarium circulare</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05	0.02	-	-	-	-	-
CH3	简单衣藻 <i>Chlamydomonas simplex</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-	-

注: 数字表示物种优势度,“-”表示物种未出现。
Note: Figures are dominances of the species, and “-” represents non-observed.

主要为蓝藻门的小席藻(*Phormidium tenus*)和小颤藻(*Oscillatoria tenuis*), 硅藻门的小环藻属未定种(*Cyclotella* sp.)、菱形藻属未定种(*Nitzschia* sp.)、尖针杆藻(*Synedra acus*)、双头针杆藻(*Synedra amphicephala*)和双头辐节藻(*Stauroneis anceps*), 裸藻门(Euglenophyta)的裸藻属未定种(*Euglena* sp.) 以及隐藻门(Cryptophyta)的卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*)。其中, SCC₁和SC在7—11月以硅藻门和蓝藻门为主要优势类群, 12月以裸藻门为主要优势类群; SCC₂在7—12月均以蓝藻门和硅藻门为主要优势类群; SCC₃在7月以隐藻门和蓝藻门为主要优势类群, 8—12月以蓝藻门和硅藻门为主要优势类群。

2.2 浮游植物群落相似性

养殖期间(表 4), 4 种三疣梭子蟹池塘综合养殖系统间的浮游植物相似性指数在 0.50~0.63, 其中 SCC₃与SC的浮游植物相似度最高(0.63), SCC₁与 SCC₂的浮游植物相似度最低(0.50)。

2.3 浮游植物密度和生物量

养殖期间, 浮游植物密度均值介于 $6.60\times10^5\sim$

14.93×10^5 cell/L (图 1)。SC 的浮游植物密度在 7 月(19.52×10^5 cell/L)和 8 月(10.49×10^5 cell/L)显著高于其他养殖系统($P<0.01$), 主要由硅藻门和蓝藻门构成; SCC₂在 10 月(17.99×10^5 cell/L)和 11 月(8.59×10^5 cell/L)显著高于其他养殖系统($P<0.01$), 主要由蓝藻门、硅藻门和裸藻门构成; SCC₁在 12 月(28.06×10^5 cell/L)显著高于其他养殖系统($P<0.01$), 主要由裸藻门和硅藻门构成。

养殖期间, 浮游植物生物量均值介于 0.45~8.92 mg/L (图 2), 不同养殖系统间浮游植物生物量差异不显著($P>0.05$)。SC 的浮游植物生物量在

表 4 三疣梭子蟹池塘综合养殖系统浮游植物的群落相似性指数

Tab. 4 Community similarity index of phytoplankton in integrated pond aquaculture system of <i>Portunus trituberculatus</i>					
组别	treatment	SCC ₁	SCC ₂	SCC ₃	SC
SCC ₁		1			
SCC ₂		0.50	1		
SCC ₃		0.58	0.56	1	
SC		0.56	0.56	0.63	1

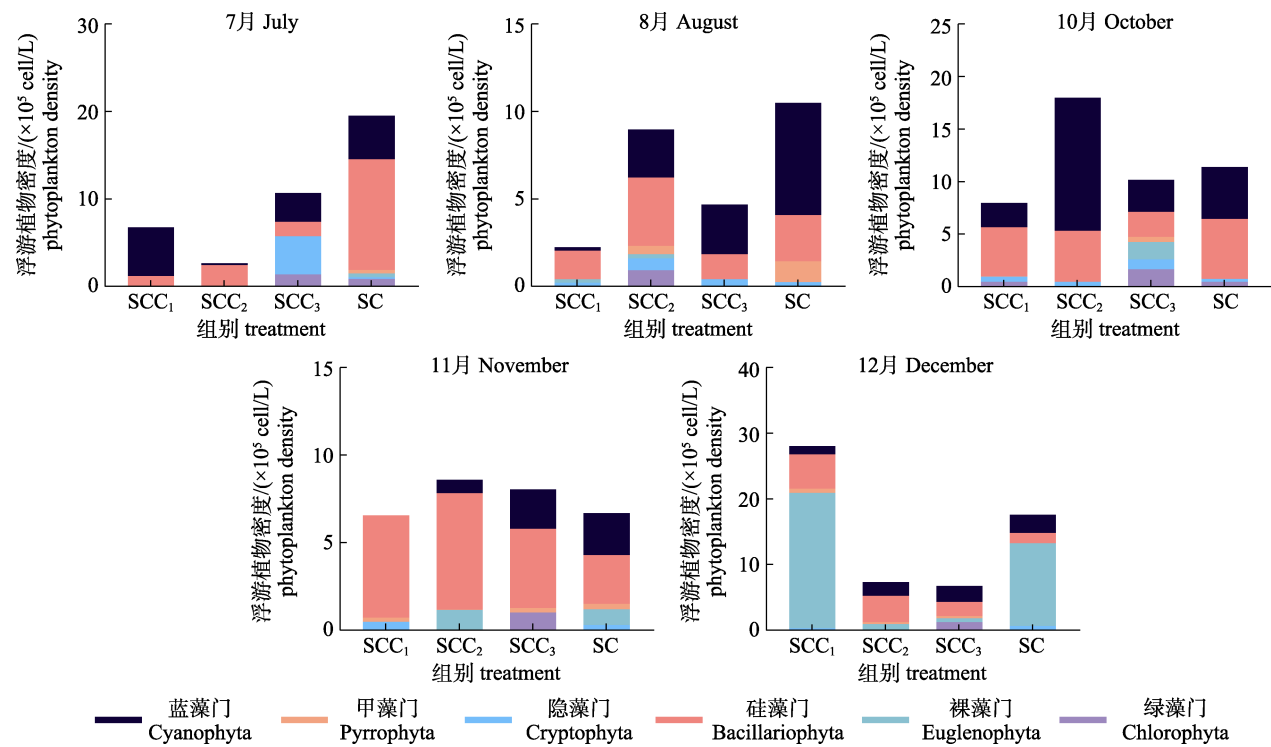


图 1 三疣梭子蟹池塘综合养殖系统浮游植物密度变化

Fig. 1 Phytoplankton density changes in integrated pond aquaculture system of *Portunus trituberculatus*

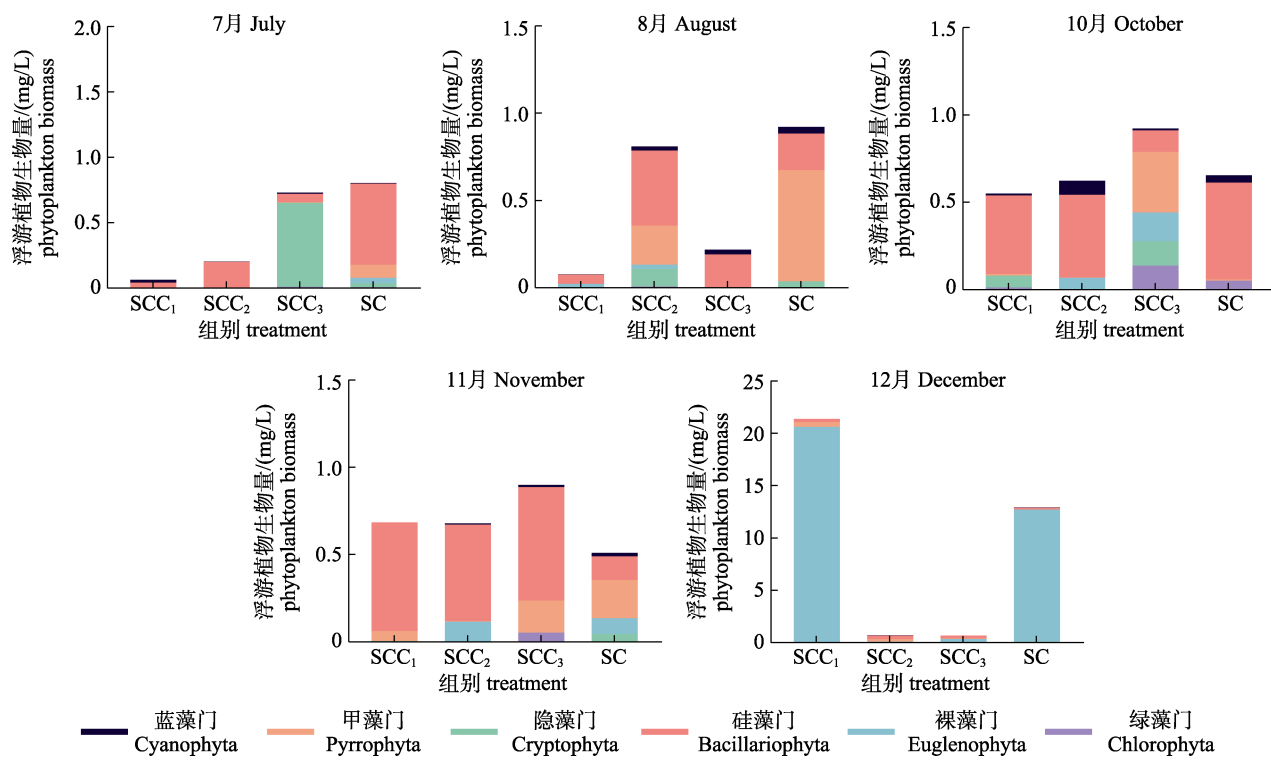


图 2 三疣梭子蟹池塘综合养殖系统浮游植物生物量变化
Fig. 2 Phytoplankton biomass changes in integrated pond aquaculture system of *Portunus trituberculatus*

7月(0.80 mg/L)和8月(0.92 mg/L)均为最高值, 主要由硅藻门和甲藻门构成; SCC₃在10月(0.92 mg/L)和11月(0.90 mg/L)均为最高值, 主要由硅藻门和甲藻门构成; SCC₁在12月(21.37 mg/L)为最高值, 主要由裸藻门组成。

2.4 浮游植物多样性指数

多样性指数的差异分析结果显示, 不同养殖系统对浮游植物的 H' 、 J 和 d_{ma} 差异不显著($P>0.05$, 图 3)。养殖期间, H' 的范围为 0.90~2.42, J 的范围为 0.31~0.78, d_{ma} 的范围为 1.00~2.08。其中, H' 和

J 的最大值出现于 11 月的 SCC₃ (2.42, 0.78), d_{ma} 最大值出现于 10 月的 SCC₂ (2.08), SCC₂ 和 SCC₃ 的 H' 、 J 和 d_{ma} 的均值均高于 SC, SCC₁ 则低于 SC。

2.5 浮游植物优势种密度与环境因子的相关性分析

DCA 结果显示, SCC₁、SCC₂、SCC₃ 和 SC 的排序轴最大梯度(SD)为 5.6 (>3)、2.3 (<3)、4.6 (>3) 和 3.8 (>3)。因此, SCC₁、SCC₃ 和 SC 选择典范对应分析(CCA), SCC₂ 选择冗余分析(RDA)。

SCC₁ 的 CCA 结果显示, 前四轴与环境因子

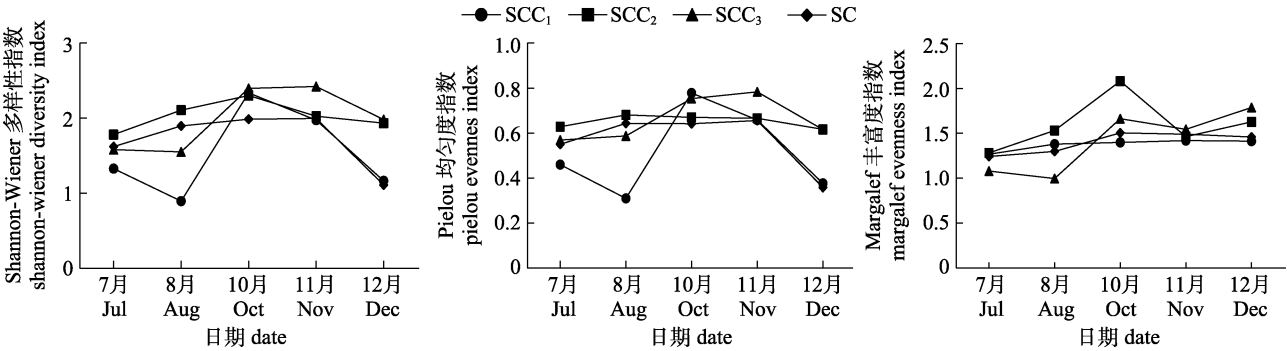


图 3 三疣梭子蟹池塘综合养殖系统浮游植物多样性指数变化
Fig. 3 Changes of phytoplankton diversity index in integrated pond aquaculture system of *Portunus trituberculatus*

之间的相关性显著($F=103, P<0.01$), 第一、二排序轴 36.31%和 67.05% (表 5)。图 4a 显示, 影响 SCC₁ 浮游植物优势种密度的主要环境因子依次为水

表 5 三疣梭子蟹池塘综合养殖系统典范对应分析(CCA)和冗余分析(RDA)的统计信息
Tab. 5 Statistical information of canonical correspondence analysis (CCA) and redundancy analysis (RDA) in integrated pond aquaculture system of *Portunus trituberculatus*

参数 parameter	组别 treatment	第一排序轴 axis1	第二排序轴 axis2	第三排序轴 axis3	第四排序轴 axis4
特征值 eigenvalues	SCC ₁	0.8017	0.6787	0.3759	0.2994
累积解释变异/% explained variation cumulative		36.31	67.05	84.08	97.64
特征值 eigenvalues	SCC ₂	0.5561	0.1736	0.1183	0.0825
累积解释变异/% explained variation cumulative		55.61	72.97	84.8	93.05
特征值 eigenvalues	SCC ₃	0.7561	0.4675	0.3604	0.299
累积解释变异/% explained variation cumulative		39.15	63.36	82.02	97.51
特征值 eigenvalues	SC	0.7517	0.4217	0.3204	0.278
累积解释变异/% explained variation cumulative		39.83	62.17	79.15	93.88

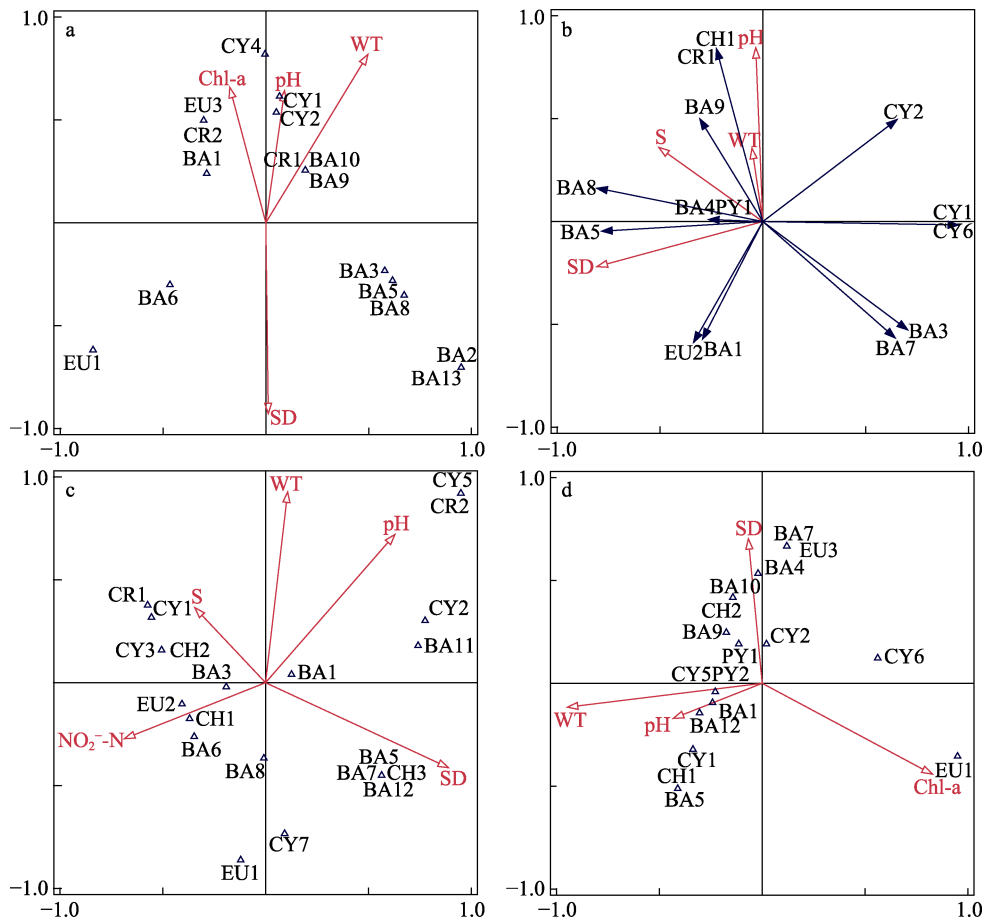


图 4 三疣梭子蟹池塘综合养殖系统浮游植物优势种与环境因子的 CCA、RDA 排序
a、b、c、d 分别代表 SCC₁、SCC₂、SCC₃ 和 SC, 浮游植物优势种编号与表 3 一致。
Fig. 4 CCA and RDA ordination of phytoplankton dominant species and environmental factors in integrated pond aquaculture system of *Portunus trituberculatus*
a, b, c, and d represent SCC₁, SCC₂, SCC₃ and SC, respectively. The numbers of the dominant species of phytoplankton are consistent with those in table 3.

温、透明度、pH 和叶绿素 a。

SCC₂ 的 RDA 结果显示, 前四轴与环境因子之间的相关性显著($F=33.5$, $P<0.01$), 第一、二排序轴的特征值为 0.5561 和 0.1736, 累积解释变异为 55.61%和 72.97% (表 5)。图 4b 显示, 影响 SCC₂ 浮游植物优势种密度的主要环境因子依次为透明度、盐度、pH 和水温。

SCC₃ 的 CCA 结果显示, 前四轴与环境因子之间的相关性显著($F=70.5$, $P<0.01$), 第一、二排序轴的特征值为 0.7561 和 0.4675, 累积解释变异为 39.15%和 63.36% (表 5)。图 4c 显示, 影响 SCC₃ 浮游植物优势种密度的主要环境因子依次为透明度、水温、盐度、pH 和亚硝酸氮。

SC 的 CCA 结果显示, 前四轴与环境因子之间的相关性显著($F=38.3$, $P<0.01$), 第一、二排序轴的特征值为 0.7517 和 0.4217, 累积解释变异为 39.83%和 62.17% (表 5)。图 4d 显示, 影响 SC 浮游植物优势种密度的主要环境因子依次为水温、叶绿素 a、pH 和透明度。

3 讨论

本研究发现, 4 种三疣梭子蟹池塘综合养殖系统共鉴定出浮游植物 6 门 54 属 81 种, 从种类数量看, 硅藻门(55 种)、甲藻门(9 种)和蓝藻门(8 种)占优势。群落相似性指数(J_c)的分级标准为: 0 代表完全不相似, 0.01~0.25 代表极不相似, 0.26~0.50 代表轻度相似, 0.51~0.75 代表中度相似, 0.76~0.99 代表极相似, 1 代表完全相似^[18]。本研究的 SCC₁、SCC₂ 和 SCC₃ 与 SC 的浮游植物相似性指数分别为 0.56、0.56 和 0.63, 即 SCC₁、SCC₂ 和 SCC₃ 与 SC 的浮游植物种类中度相似, 说明混养缢蛭一定程度上影响了三疣梭子蟹-日本对虾养殖系统的浮游植物群落结构。一般认为 H' > 1 时群落多样性正常, 若 H' < 1 则可能受到了其它环境因素的扰动; J 的数值范围在 0~1, J > 0.3 时表示浮游植物多样性较好^[26]。本研究 H' 的范围为 0.90~2.42, J 的范围为 0.31~0.78, d_{ma} 的范围为 1.00~2.08, 除 SCC₁ 的 H' 在 8 月为 0.90 外均大于 1, J 均大于 0.3, 且 SCC₂ 和 SCC₃ 的浮游植物多样性指数均值均高于 SC, 表明养殖期间各综合养殖

系统均处于稳定状态, 搭配中、高密度缢蛭会提高浮游植物群落结构的多样性。

本研究共鉴定浮游植物优势种 30 种, 发现隐藻作为优势种仅在 SCC₁、SCC₂ 和 SCC₃ 中出现, 这可能与缢蛭只能在其周围小面积的滤食无趋光运动而易于下沉的藻类, 对于具有趋光性, 多集中于水体中上层的鞭毛藻(隐藻等)不能直接摄食^[27-28]有关。因此, 在三疣梭子蟹-日本对虾养殖系统中搭配缢蛭会增加养殖水体中鞭毛藻的丰度, 影响浮游植物优势种的组成。池塘作为一个相对封闭的生态系统, 环境因子的变化必然对浮游植物群落结构产生影响^[29]。一般认为, 水体有机质含量和营养物质水平是影响浮游植物群落变化的主要因素^[30]。本研究中, 缢蛭以浮游植物和有机碎屑等为食, 有效提高了营养物质利用率^[31], 使养殖系统不因投饵而造成水体有机质和营养盐浓度增加, 导致营养物质水平未对浮游植物优势种密度产生显著影响, 而水温、透明度和盐度成为影响三疣梭子蟹综合养殖池塘浮游植物优势种密度的重要因素, 这可能与舟山属亚热带海洋性季风气候, 夏秋季节台风和降雨频繁, 暴雨、台风、持续高温等恶劣天气对养殖水体产生了影响有关^[32-33]。

研究认为, 贝类对浮游植物有摄食和促生长作用, 浮游植物的数量变动也会直接影响贝类的生长^[34]。本研究中, 7—8 月生物沉积及养殖过程的代谢产物增加了水体氨氮浓度(由 0.20 mg/L 增加至 0.39 mg/L), 水质变肥, 使 SSC₁、SCC₂ 和 SC 的浮游植物生物量增加, 但因缢蛭对浮游植物造成滤食压力, 使 SCC₃ 的浮游植物生物量降低。8—10 月, SCC₂ 和 SC 的浮游植物生物量降低, 而 SCC₁ 和 SCC₃ 的浮游植物生物量则呈上升趋势, 可能与此阶段频繁降雨与高温天气有关。10—11 月, 水温介于 20.70~24.30 °C, 为喜低温的硅藻提供了生长环境^[35], 使硅藻成为主要优势种, SCC₁、SCC₂ 和 SCC₃ 中硅藻生物量由 0.12~0.47 mg/L 增加至 0.55~0.65 mg/L, 同时 SCC₁ 和 SCC₂ 的浮游植物生物量不断上升。因缢蛭生长和放养密度高等原因, 缢蛭对浮游植物的摄食压力增大, 造成 SCC₃ 的浮游植物生物量降低。研究发现, 虾蟹摄食会引起水体氮元素含量的降低^[19], 这可能是 8 月

之后 SC 系统中浮游植物生物量降低的原因。11—12 月, 大规模的缢蛏优先摄食小粒径且活动能力较差的浮游植物^[36], 对易在水面聚集的裸藻等难以滤食, 使在 SCC₁、SCC₂ 和 SC 浮游植物生物量增加, SCC₃ 的浮游植物生物量降低的原因可能与缢蛏放养密度高有关。因此, 养殖过程中既要关注浮游植物与缢蛏间的相互作用, 还要及时关注气候变化, 有利于藻相稳定与养殖生物的生长。

综上所述, 在三疣梭子蟹-日本对虾养殖系统中混养缢蛏可改变养殖系统浮游植物种类组成和生物量。水温、透明度和盐度是影响综合养殖系统中浮游植物优势种密度的主要环境因子。在三疣梭子蟹-日本对虾混养系统中搭配中密度(75.0 kg/hm²)和高密度(112.5 kg/hm²)缢蛏时, 系统浮游植物群落多样性较好, 有利于三疣梭子蟹池塘综合养殖生态系统的稳定。

参考文献:

- [1] Bureau of Fishery Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China Fishery Statistical Yearbook 2019[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019. [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2019 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.]
- [2] Hu Z H, Xu J Z, Shi J G. Farming modes of swimming crab (*Portunus trituberculatus*) along the coast of Zhejiang Province[J]. Modern Fisheries Information, 2011, 26(3): 3-5. [胡则辉, 徐君卓, 石建高. 浙江沿海三疣梭子蟹的养殖模式[J]. 现代渔业信息, 2011, 26(3): 3-5.]
- [3] Li L, Liu N, Li D M, et al. Effect of stocking density on water quality in *Sinonovacula constricta* culture system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(10): 2893-2899. [李黎, 刘楠, 李东明, 等. 养殖密度对缢蛏养殖系统水质的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(10): 2893-2899.]
- [4] Wang K X. Aquaculture of Shrimp and Crab[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997: 122-130. [王克行. 虾蟹类增养殖学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 122-130.]
- [5] Dong S L. History, principles, and classification of integrated aquaculture in China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(5): 1202-1209. [董双林. 中国综合水产养殖的发展历史、原理和分类[J]. 中国水产科学, 2011, 18(5): 1202-1209.]
- [6] Wu G H, Chen P J, Jiang R S. Role of filter-feeding mollusk in ecosystem of composite cultivation of *Penaeus*[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2001, 20(4): 447-452. [吴桂汉, 陈品健, 江瑞胜. 滤食性贝类在对虾综合养殖生态系统中的作用[J]. 台湾海峡, 2001, 20(4): 447-452.]
- [7] Luo Y H, Li L G, Zhao C P, et al. Relationship between phytoplankton structure and water quality factors in culture ponds of *Litopenaeus vannamei* and *Sinonovacula constricta*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(2): 378-387. [骆云慧, 李来国, 赵淳朴, 等. 凡纳滨对虾-缢蛏生态循环养殖池塘中浮游植物群落结构与水质因子相关性研究[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(2): 378-387.]
- [8] Hao J, Ma X Z, Wang W, et al. Structure of phytoplankton functional groups in the ecological farming crab ponds[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(5): 1047-1056. [郝俊, 马旭洲, 王武, 等. 河蟹生态养殖池浮游植物功能类群的结构特征[J]. 湖泊科学, 2016, 28(5): 1047-1056.]
- [9] Wang L, Li B, Sun S M, et al. Phytoplankton community structure and its relationship to water quality parameters in a compound aquaculture system[J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(5): 81-88. [王璐, 李冰, 孙盛明, 等. 复合养殖系统中浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(5): 81-88.]
- [10] Zhang K, Tian X L, Dong S L, et al. Nitrogen and phosphorus budgets of polyculture system of *Portunus trituberculatus*, *Litopenaeus vannamei* and *Ruditapes philippinarum*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(2): 44-53. [张凯, 田相利, 董双林, 等. 三疣梭子蟹、凡纳滨对虾和菲律宾蛤仔混养系统氮磷收支的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(2): 44-53.]
- [11] Zhang D X, Tian X L, Dong S L, et al. Carbon budgets of two typical polyculture pond systems in coastal China and their potential roles in the global carbon cycle[J]. Aquaculture Environment Interactions, 2020, 12: 105-115.
- [12] Feng J, Tian X L, Dong S L, et al. Comparative analysis of the energy fluxes and trophic structure of polyculture ecosystems of *Portunus trituberculatus* based on Ecopath model[J]. Aquaculture, 2018, 496: 185-196.
- [13] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: Specifications for oceanographic survey—Part 6: Marine biological survey, GB/T 12763.6-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 6-10. [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. 中华人民共和国推荐性国家标准: 海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查 GB/T 12763.6-2007[S]. 北京: 中

- 国标准出版社, 2008: 6-10.]
- [14] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Aquatic Product Standard of the People's Republic of China: Specifications for freshwater plankton surveys, SC/T 9402-2010[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 2-10. [中华人民共和国农业部. 中华人民共和国水产行业标准: 淡水浮游生物调查技术规范 SC/T 9402-2010[S]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 2-10.]
- [15] Lu Y B, Yu X, Li X L, et al. Ecological characteristics of planktonic algae and their relationship with environmental factors in scallop culture area of Yangma Island[J]. Journal of Fisheries Research, 2019, 41(3): 207-216. [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.]
- [16] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard of the People's Republic of China: The specification for marine monitoring—Part 4: Seawater analysis, GB 17378.4-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007: 99-121. [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. 中华人民共和国国家标准: 海洋监测规范第4部分: 海水分析 GB 17378.4-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 99-121.]
- [17] Zhao W. Hydrobiology[M]. 2nd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2016: 493-498. [赵文. 水生生物学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2016: 493-498.]
- [18] Qi Y K, Li D D, Chen X, et al. The correlation between phytoplankton community and water environment in autumn in Shihoudian Lake[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(21): 75-81. [齐延凯, 李丹丹, 陈曦, 等. 鲢鳙淀秋季浮游植物群落与水环境相关性分析[J]. 中国农学通报, 2020, 36(21): 75-81.]
- [19] Chen S, Li Y T, Cai W G, et al. Variation characteristics of phytoplankton community in polyculture ponds of *Scylla serrata* and *Penaeus monodon*[J]. South China Fisheries Science, 2020, 16(3): 79-85. [陈思, 李艺彤, 蔡文贵, 等. 虾蟹混养池塘浮游植物群落结构的变化特征[J]. 南方水产科学, 2020, 16(3): 79-85.]
- [20] Song X K, Cheng L, Fu P, et al. Changes of net-collected phytoplankton community in Jincheng area of Laizhou Bay and its relationship with environmental factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): 2784-2793. [宋秀凯, 程玲, 付萍, 等. 莱州湾金城海域网采浮游植物年际变化及与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2784-2793.]
- [21] Mao X X, Jiang X M, Wang R Y, et al. Comparison on phytoplankton and output in two polyculture modes with *Portunus trituberculatus*[J]. Journal of Biology, 2013, 30(6): 36-40. [毛欣欣, 蒋霞敏, 王瑞颖, 等. 三疣梭子蟹两种养殖模式浮游植物与产量的比较[J]. 生物学杂志, 2013, 30(6): 36-40.]
- [22] Ma Y, Lu X X, Fan Y W. Correlation between phytoplankton community patterns and environmental factors in Harbin section of the Songhua River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 224-234. [马煜, 陆欣鑫, 范亚文. 松花江哈尔滨段浮游植物群落格局及其与环境因子的相关性[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 224-234.]
- [23] Lai J S. Canoco 5: A new version of an ecological multivariate data ordination program[J]. Biodiversity Science, 2013, 21(6): 765-768. [赖江山. 生态学多元数据排序分析软件 Canoco5 介绍[J]. 生物多样性, 2013, 21(6): 765-768.]
- [24] Liu Z Y, Chen Y H, Yang B C, et al. Community structure of phytoplankton in Zhao'an Bay and its adjacent waters and environmental factors[J]. Journal of Applied Oceanography, 2020, 39(3): 359-367. [刘志勇, 陈杨航, 杨毕斌, 等. 诏安湾及其邻近海域浮游植物群落结构与环境因子的关系[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(3): 359-367.]
- [25] Xu Y J, Yu C G, Zhang P, et al. Spring nekton community structure and its relationship with environmental variables in Hangzhou Bay-Zhoushan inshore waters[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(3): 605-617. [许永久, 俞存根, 张平, 等. 杭州湾—舟山近海春季游泳动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2019, 43(3): 605-617.]
- [26] Ma J X, Zheng Z H, Li Y P, et al. The distribution characteristics of phytoplankton in Laizhou Bay[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2002(4): 63-67. [马建新, 郑振虎, 李云平, 等. 莱州湾浮游植物分布特征[J]. 海洋湖沼通报, 2002(4): 63-67.]
- [27] Lu J, Li D S, Dong S L. The impact of the polycultured filter feeding animals with penaeid shrimp on plankton community[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1999, 29(2): 243-248. [卢静, 李德尚, 董双林. 对虾池混养滤食性动物对浮游生物的影响[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 1999, 29(2): 243-248.]
- [28] Zhang H Y, Li D S, Wang Y. The impact of constricted *Ta-gelus* polycultured in shrimp ponds on the structure of plankton communities[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1998(2): 210-216. [张鸿雁, 李德尚, 王岩. 缢蛏对对虾池浮游生物群落结构的影响[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 1998(2): 210-216.]
- [29] Wang X N, Jiang M, Zhong R, et al. The relationship between phytoplankton community structure and water quality factors in the pond of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(11): 1787-1803. [王旭娜, 江敏,

- 钟锐, 等. 凡纳滨对虾养殖池塘中浮游植物群落结构与水质因子的关系[J]. 水产学报, 2018, 42(11): 1787-1803.]
- [30] Liu Q F, Lai Z N, Gao Y, et al. Characteristics of phytoplankton functional groups of intensive-culturing fishponds in the Pearl River Delta[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(1): 124-136. [刘乾甫, 赖子尼, 高原, 等. 珠江三角洲地区精养淡水鱼塘浮游植物功能群特征[J]. 中国水产科学, 2018, 25(1): 124-136.]
- [31] Wang J Q, Li D S, Dong S L, et al. Experimental studies on polyculture of Chinese shrimp with constricted *Tagelus*[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 1999, 14(1): 9-14. [王吉桥, 李德尚, 董双林, 等. 中国对虾与缢蛏投饵混养的实验研究[J]. 大连水产学院学报, 1999, 14(1): 9-14.]
- [32] Zha G C, Zhou C Q. Influence of atrocious weather on water environment of *Litopenaeus vannamei* low salinity stocking[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2006, 19(4): 414-418. [查广才, 周昌清. 恶劣天气对凡纳滨对虾低盐度养殖水体的影响[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2006, 19(4): 414-418.]
- [33] Hu X J, Li Z J, Cao Y C, et al. Influence of heavy rain on microbial community in *Litopenaeus vannamei* culture ponds in western Guangdong Province[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(5): 987-995. [胡晓娟, 李卓佳, 曹煜成, 等. 强降雨对粤西凡纳滨对虾养殖池塘微生物群落的影响[J]. 中国水产科学, 2010, 17(5): 987-995.]
- [34] 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. [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.]
- [35] Chen Q, Wu Q, Luo H. Phytoplankton community structure characteristics before and after the impoundment in Taihu Reservoir[J]. Ecological Science, 2020, 39(6): 75-82. [陈倩, 吴琼, 罗欢. 太湖水库蓄水前后浮游植物群落结构特征[J]. 生态科学, 2020, 39(6): 75-82.]
- [36] Fan D P, Pan L Q, Ma S, et al. Experimental studies on selective feeding and the filtration rate of (*Sinonovacula constricta*)[J]. Marine Sciences, 2002, 26(6): 1-4. [范德朋, 潘鲁青, 马牲, 等. 缢蛏滤除率与颗粒选择性的实验研究[J]. 海洋科学, 2002, 26(6): 1-4.]

Community structure of phytoplankton and their relationships with environmental factors within an integrated pond aquaculture system of *Portunus trituberculatus*

PU Weijia¹, DONG Shipeng¹, ZHANG Dongxu², YU Liye¹, XIE Yicheng¹, XU Xian¹, WANG Fang^{1,3}, LI Youming⁴

1. Key Laboratory of Mariculture of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;
2. Zhejiang Province Key Laboratory of Mariculture and Enhancement, Zhejiang Marine Fisheries Research Institute of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, China;
3. Function Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266235, China;
4. Key Laboratory of Tropic Sea Fishery Resources Protection and Utilization of Hainan Province, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, China

Abstract: Within a polyculture system of *Portunus trituberculatus* and *Penaeus japonicus* (SC), *Sinonovacula constricta* with low density (SCC₁), medium density (SCC₂) and high density (SCC₃) were raised to construct an integrated aquaculture system of *Portunus trituberculatus*, *Penaeus japonicus*, and *Sinonovacula constricta*, respectively. Monthly samples from the aquaculture system were collected from July to December 2020 to analyze the phytoplankton community structure during aquaculture. Canonical correspondence analysis (CCA) and redundancy analysis (RDA) were used to analyze the relationship between the phytoplankton community structure and environmental factors. The results showed that there were six phyla, 54 genera, and 81 species during aquaculture; species abundance relating to class in descending order was: Bacillariophyta>Pyrrophyta>Cyanophyta>Chlorophyta>Euglenophyta>Cryptophyta. Among them, there were 30 dominant species, mainly including *Cyclotella* sp., *Synechococcus*, *Stauroneis anceps*, *Phormidium tenue*, *Oscillatoria tenuis*, and *Euglena* sp.. Phytoplankton density ranged from 2.23×10^5 – 28.06×10^5 cells/L, the biomass was 0.06–21.37 mg/L, the Shannon-Wiener diversity index was 0.90–2.42, the Pielou evenness index was 0.31–0.78, and the Margalef richness index was 1.00–2.08. The diversity of phytoplankton was high and this community was stable. The CCA and RDA results showed that water temperature, transparency, and salinity were the main environmental factors affecting the integrated aquaculture systems of *Portunus trituberculatus*. When the medium (75.0 kg/hm²) and high densities (112.5 kg/hm²) of *Sinonovacula constricta* were mixed in the polyculture system of *Portunus trituberculatus* and *Penaeus japonicus*, there was good diversity in the phytoplankton community. Such diversity may achieve the balanced development of phytoplankton and enhance the anti-interference ability of the culture system. This diversity is beneficial to the stability of the comprehensive polyculture system of the *Portunus trituberculatus* pond.

Key words: *Portunus trituberculatus*; integrated pond aquaculture; phytoplankton; environmental factors; canonical correspondence analysis; redundancy analysis

Corresponding author: WANG Fang. E-mail: wangfang249@ouc.edu.cn