

上海市奉贤区凡纳滨对虾淡水养殖池塘浮游植物固碳量

李桂娟¹, 江敏^{1,2}, 吴昊³, 周英娴¹, 王智华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 水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306)

摘要: 为了解凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)淡水养殖池塘浮游植物的固碳量, 探明水质、浮游植物与固碳量之间的关系, 采用黑白瓶法对上海市奉贤区某水产养殖场的凡纳滨对虾养殖池塘水体初级生产力进行了检测, 并对浮游植物固碳量进行估算。结果显示, 3口池塘共观察到浮游植物7门45属, 其中绿藻门、蓝藻门、硅藻门、裸藻门、金藻门、甲藻门和隐藻门分别有19、8、11、3、2、1和1个属。I、II和III号塘内浮游植物密度分别为 $(7.99 \pm 7.84) \times 10^5$ 、 $(1.86 \pm 1.55) \times 10^6$ 和 $(2.57 \pm 1.66) \times 10^6$ ind./L, 随着养殖时间的延长, 各池塘浮游植物密度基本呈现先增大后减小的趋势。3口池塘的共同优势属有4种, 分别为栅藻、颤藻、舟形藻和小环藻。养殖期间浮游植物当日单位面积固碳量(D_{CS})变化范围为0.27~4.92 g C/(m²·d), 均值为 (1.62 ± 1.12) g C/(m²·d), 浮游植物的累积固碳量随养殖时间的延长而缓慢增长, 养殖结束时, 3口试验塘的累积固碳量分别为0.80、1.11和1.31 t C。多元逐步回归分析结果显示, 叶绿素a(Chl.a)、总氮(TN)、温度(T)、pH、裸藻门和蓝藻门是影响 D_{CS} 的主要环境因子; Pearson相关性分析与冗余分析表明: Chl.a、TN、T、裸藻门和蓝藻门是影响浮游植物固碳量的关键因子。这些结果有助于深入理解凡纳滨对虾养殖池塘中水质和浮游植物群落对浮游植物固碳量的影响。

关键词: 凡纳滨对虾; 淡水养殖; 浮游植物; 固碳

中图分类号: S 968.22 **文献标志码:** A

随着全球温室效应的加剧, 围绕“碳汇”与“碳源”问题的讨论不断升温, 促进了《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》《哥本哈根协议》及《巴黎协定》等一系列国际气候协议的签署与实施, 这些协议不仅加强了各国在应对气候变化领域的合作, 也使更多的人开始重视和关注“碳汇”理念^[1]。海洋与淡水生态系统作为地球上两大关键的碳汇区域, 在调节全球气候、缓解温室气体排放压力方面发挥着不可或缺的作用^[2-3]。其中, 水产养殖生态系统作为水生生态系统的重要组成部分, 其碳循环过程及潜在的固碳能力正逐渐走进研究者的视野^[4]。浮游植物作为水产养殖生态系统的主要初级生产者^[5-7]能够通过光合作用吸收大气中的二氧化碳(CO₂), 从而降低大气中CO₂浓度^[8], 对碳吸收有着重要贡献。

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)是中国

主要的对虾养殖品种^[9]。《2024中国渔业统计年鉴》显示, 2023年中国凡纳滨对虾养殖产量近224万t, 约占对虾总产量的87%, 其中海水养殖产量为143万t, 淡水养殖产量为81万t^[10]。盐度会影响水体中浮游植物群落结构和初级生产力^[11], 进而影响水中浮游植物的固碳量。目前, 关于凡纳滨对虾养殖池塘浮游植物初级生产力及固碳量的研究主要针对海水养殖。WIDIGDO等^[12]研究表明, 微咸水粗养、半精养和精养凡纳滨对虾过程中浮游植物固碳量平均值分别为1.91、7.10和8.25 g C/(m²·d); YANG等^[13]研究发现, 5—10月养殖期间, 海水凡纳滨对虾养殖池塘浮游植物初级生产力变化范围为269.10~280.80 g C/m²; 洪妍等^[14]研究发现, 亚热带河口区对虾养殖池塘浮游植物初级生产力变化范围为3.79~5.17 g O₂/(m²·d)。针对淡水凡纳滨对虾养殖池塘浮游植物初

收稿日期: 2025-02-01 修回日期: 2025-04-04

基金项目: 上海市虾类产业技术体系建设项目(沪农科产字[2022]第5号)

作者简介: 李桂娟(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业碳汇。E-mail: 193948728@qq.com

通信作者: 江敏, E-mail: mjiang@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>

级生产力和固碳量研究较少的不足,本研究通过测定凡纳滨对虾养殖期间水质、浮游植物群落和初级生产力的变化特征,量化浮游植物的固碳量及影响因子,可为淡水水产养殖生态系统碳汇评估提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 养殖场基本情况

实验于2024年5—10月在上海奉贤区某虾类养殖合作社进行,该养殖场共有15个池塘,每个池塘面积0.47 hm²,有效水深1.5 m左右,养殖用水源自当地淡水河道,养殖密度60万尾/hm²,配备4台涡轮增压氧机,养殖期间每天10:30~15:00、18:00~次日7:30开启,每天上午、下午各投喂1次饲料,根据对虾生长状况调整投喂量。选取Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ号塘进行水质、浮游植物和初级生产力的研究(表1)。

表1 凡纳滨对虾养殖池塘基本信息
Tab. 1 Basic information in *Litopenaeus vannamei* aquaculture ponds

指标 Index	Ⅰ号塘 Pond I	Ⅱ号塘 Pond II	Ⅲ号塘 Pond III
养殖天数 Aquaculture days/d	138	134	135
饲料总投喂量 Feed amount/kg	3 720	3 890	3 960
成活率 Survival rate/%	74	79	80
对虾产量 Shrimp production/kg	3 380	3 540	3 600

1.2 水质检测

每隔15天于上午9:00~10:00用有机玻璃采水器采集3个养殖池塘的水样。现场测定T、DO、pH,其他水质指标回实验室后当日测完,测定方法见表2。

1.3 浮游植物的定性定量及优势度计算

每15天使用采水器现场取1 L水样并加入10 mL鲁哥试剂固定,带回实验室在1 L的分液漏斗中静置沉淀24~48 h,取50 mL的浓缩液在光学显微镜(尼康Ci-L)下对浮游植物进行定性和定量分析。按公式(1)计算优势度指数(Y)^[15]。

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

式中: N 为各采样点所有藻类总密度; n_i 为第 i 种藻类的总密度; f_i 为该属在各采样点出现的频率。当优势度 $Y \geq 0.02$ 时,即确定为浮游植物优势属^[16]。

表2 水质指标测定方法

Tab. 2 Water quality index determination methods

水质指标 Water quality index	测定方法 Measure method	依据标准 Standard
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	GB 11894—1989
TP	钼酸铵分光光度法	GB 11893—1989
I _{Mn}	酸性高锰酸钾法	GB 11892—1989
SS	重量法	GB/T 11901
AP	钼酸铵分光光度法	GB 11893—1989
TAN	纳氏试剂分光光度法	GB 7479—1987
NO ₃ ⁻ -N	紫外分光光度法	HJ/T—2007
NO ₂ ⁻ -N	分子吸收分光光度法	GB 7493—1987
Chl.a	分光光度法	HJ 897—2017

1.4 初级生产力的测定及计算

每15天采用黑白瓶法(SL 354—2006)测定养殖水体的初级生产力。黑白瓶采用250 mL透明玻璃瓶,黑瓶外罩以黑布口袋扎紧,用采水器采集每个池塘表层和底层水样,每次每层灌满1个白瓶和1个黑瓶,分别悬挂于对应水深,24 h后取出现场测定溶氧。按公式(2)计算各水层初级生产力^[17]:

$$P = \frac{DO_w - DO_b}{t} \quad (2)$$

式中: P 为对应水层初级生产力,mg O₂/(L·d); DO_w 为白瓶溶解氧量,mg/L; DO_b 为黑瓶溶解氧量,mg/L; $t=1$ d。

水柱总初级生产力(Gross primary productivity, G_{pp})是指在1 m²水面下,从水表面直到水底整个水柱的初级生产力,按公式(3)计算:

$$G_{pp} = \frac{P_{底} + P_{表}}{2} \times (D_{底} - D_{表}) \quad (3)$$

式中: G_{pp} 为水柱总初级生产力,g O₂/(m²·d); $P_{底}$ 和 $P_{表}$ 分别为水体底层和表层的初级生产力,mg O₂/(L·d); $D_{底}$ 和 $D_{表}$ 分别为底层和表层的水层深度,m。

1.5 固碳估算

按公式(4)计算浮游植物当日单位面积固碳量(Daily carbon sequestration per unit area, D_{cs}):

$$D_{cs} = G_{pp} \times 0.375 \quad (4)$$

式中: D_{cs} 为单位面积固碳量,g C/(m²·d);取浮游植物群落光合商为1,按照1 mg O₂ = 0.375 mg C,将氧量换算为以C计的生物量^[18]。

以养殖天数(d)为横坐标, D_{CS} 为纵坐标,绘制曲线图,对曲线下面积进行积分求得试验期间各养殖塘的单位面积固碳量(Carbon sequestration per unit area, C_s , $g\ C/m^2$),再乘以池塘面积(S , m^2)可得该池塘养殖期间浮游植物总固碳量(Total carbon sequestration, T_{CS} , $g\ C$),其计算公式:

$$T_{CS} = C_s \times S$$

(5)

1.6 统计分析

利用 Excel 进行数据处理, OriginPro 2022 进行绘图。采用 SPSS 27.0 对水质数据进行双因素 ANOVA 检验, 差异性以 $P<0.05$ 表示。利用 OriginPro 2022 的 Correlation Plot 进行 Pearson 相关性分析, 然后利用 SPSS 27.0 中的逐步回归法

进行共线性检验, 提取回归方程中的最优环境因子后利用 Canoco 5 进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA)^[19], $P<0.05$ 为显著相关, $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 为极显著相关。

2 结果

2.1 水质因子变化

养殖期间 3 个池塘的水质监测结果如表 3 所示, 仅 I 号塘的 T、TP、TN 与 II 号塘存在显著差异 ($P<0.05$), 其他各池塘间水质指标均无显著差异。养殖期间, pH、TAN、 NO_2^- -N 总体波动不大; DO 呈现出先降低后升高的趋势, 在养殖中期(7—8 月)达到最低值; T、 I_{Mn} 、SS、AP、TP、 NO_3^- -N、TN 和 *Chl.a* 则先升高后降低。

表 3 凡纳滨对虾养殖池塘水质因子
Tab. 3 Water quality factors in *Litopenaeus vannamei* aquaculture ponds

水质指标 Water quality index	I 号塘 Pond I		II 号塘 Pond II		III 号塘 Pond III	
	平均值±标准差 Mean±SD	范围 Range	平均值±标准差 Mean±SD	范围 Range	平均值±标准差 Mean±SD	范围 Range
T/°C	28.74±2.50 ^b	24.80~32.00	29.12±2.43 ^a	25.10~31.80	28.97±2.53 ^{ab}	24.70~31.60
DO/(mg/L)	10.30±2.15	6.63~14.12	9.57±4.36	3.33~17.41	9.73±2.28	6.93~15.19
pH	8.55±0.54	7.89~9.27	8.60±0.79	7.80~9.62	8.66±0.62	8.10~9.37
I_{Mn} /(mg/L)	7.92±4.67	2.20~14.40	9.93±4.19	2.80~15.50	10.63±3.38	4.10~15.40
SS/(mg/L)	45.50±21.10	22.00~96.00	60.70±36.65	19.00~138.00	48.50±27.19	3.00~113.00
AP/(mg/L)	0.08±0.07	0.02~0.23	0.14±0.15	0.03~0.37	0.15±0.18	0.02~0.59
TP/(mg/L)	0.51±0.24 ^b	0.33~1.08	0.71±0.30 ^a	0.50~1.35	0.67±0.30 ^{ab}	0.27~1.18
TAN/(mg/L)	0.26±0.13	0.14~0.57	0.58±0.65	0.18~1.81	0.28±0.07	0.19~0.40
NO_2^- -N/(mg/L)	0.02±0.02	0~0.06	0.04±0.10	0.00~0.32	0.01±0	0~0.01
NO_3^- -N/(mg/L)	0.71±1.11	0.20~3.84	0.57±0.78	0.20~2.78	0.39±0.29	0.15~1.18
TN/(mg/L)	2.66±0.99 ^b	1.36~4.34	3.87±1.56 ^a	0.73~6.10	3.47±1.71 ^{ab}	0.82~5.77
<i>Chl.a</i> /(μg/L)	65.28±57.22	7.45~144.26	94.39±86.70	7.71~259.58	127.19±108.16	28.72~283.12

注:同行不同小写字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。
Notes: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference($P<0.05$).

2.2 浮游植物

养殖期间,池塘内共观察到浮游植物 7 门 45 属,其中绿藻门、蓝藻门、硅藻门、裸藻门、金藻门、甲藻门和隐藻门分别有 19、8、11、3、2、1 和 1 个属,占总数的 42%、18%、25%、7%、4%、2% 和 2%。I、II 和 III 号塘内浮游植物密度分别为 $(7.99\pm7.84)\times10^5$ 、 $(1.86\pm1.55)\times10^6$ 和 $(2.57\pm1.66)\times10^6$ ind./L,随着养殖时间的延长,各池塘浮游植

物密度基本呈现先增大后减小的趋势,绿藻门、蓝藻门、硅藻门和裸藻门为优势门。养殖初期浮游植物以绿藻门和硅藻门为主,中期以蓝藻门和硅藻门为主,后期以蓝藻门为主(图 1)。如表 4 所示, I、II 和 III 号塘分别鉴定出优势属 5、8 和 9 种, 3 口池塘的共同优势属有 4 种,分别为栅藻、颤藻、舟形藻和小环藻。

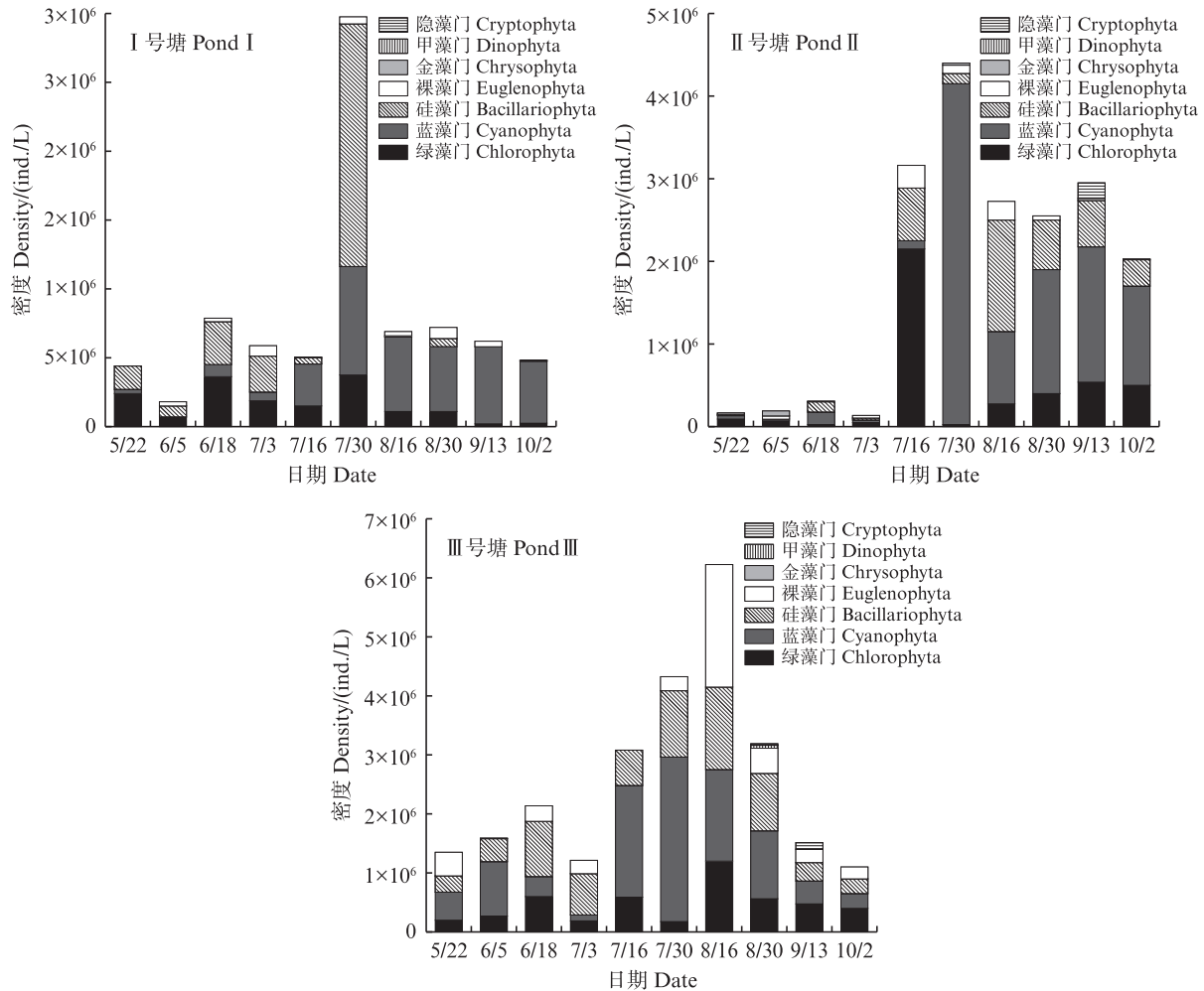


图1 浮游植物密度随时间的变化

Fig. 1 Changes in phytoplankton density over time

2.3 凡纳滨对虾养殖池塘浮游植物固碳量的变化

养殖期间3个池塘的 D_{CS} 变化范围分别为0.27~2.92、0.39~3.83和0.81~4.92 g C/(m²·d),均值分别为(1.21±0.93)、(1.67±1.08)和(1.98±1.35) g C/(m²·d),时间变化趋势基本一致,呈先增大后减小的趋势(图2a),积分得到的单位面积固碳量分别为171.70、238.13和280.45 g C/m²。3个养殖塘中浮游植物的累积固碳量均呈现先缓慢增长,约60 d后快速增长的趋势,总体上呈Ⅲ号塘>Ⅱ号塘>Ⅰ号塘的特征(图2b)。养殖结束时,Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ号塘的养殖期间总固碳量分别为0.80、1.11和1.31 t C。

2.4 水质、浮游植物与固碳量的关系

2.4.1 水质、浮游植物与当日单位面积固碳量的Pearson相关性分析

将 D_{CS} 与水质因子及浮游植物(绿藻门、蓝藻门、硅藻门、裸藻门、金藻门、甲藻门、隐藻门)进行Pearson

相关性分析(图3)。结果显示: D_{CS} 与T、SS、TN、*Chl.a*、蓝藻门、硅藻门、裸藻门具有极显著正相关性($P<0.01$),与绿藻门具有显著正相关性($P<0.05$)。

为检验水质因子和浮游植物对 D_{CS} 的贡献大小,利用多元逐步回归法建立了 D_{CS} 与水质因子及浮游植物之间的最优回归方程(表5)。结果显示,*Chl.a*、TN、T、pH、裸藻门和蓝藻门对 D_{CS} 的影响达到了极显著水平($P<0.001$)。

2.4.2 水质、浮游植物与当日单位面积固碳量的冗余分析

分别提取影响最显著的水质指标(*Chl.a*、TN、T、pH)、浮游植物(裸藻门、蓝藻门)与 D_{CS} 进行冗余分析。由表6可知,第1排序轴(RDA1)解释了85.40%的数据变异,第2排序轴(RDA2)解释了2.58%的数据变异,两轴合计对凡纳滨对虾养殖池塘中水质因子、浮游植物与 D_{CS} 之间关系的解释度达到了87.98%。Pseudo-canonical相关

性分析结果表明,水质因子、浮游植物与 D_{CS} 前两轴的相关性系数分别为 0.963 4 和 0.568 3,表明水质因子、浮游植物与 D_{CS} 之间有较强的相关关

系。第一排序轴主要解释了 D_{CS} 的演变信息,且与 $Chl.a$ 、TN、T、蓝藻门和裸藻门呈正相关关系,与 pH 呈负相关关系(图 4)。

表 4 养殖池塘浮游植物种类及优势度
Tab. 4 Phytoplankton species and dominance degree in aquaculture ponds

属水平 Genus	优势度 Dominance degree			属水平 Genus	优势度 Dominance degree		
	I 号塘 Pond I	II 号塘 Pond II	III 号塘 Pond III		I 号塘 Pond I	II 号塘 Pond II	III 号塘 Pond III
绿藻门 Chlorophyta				细鞘丝藻属 <i>Leptolyngbya</i>	+	+	+
小球藻属 <i>Chlorella</i>	+	0.03	+	颤藻属 <i>Oscillatoria</i>	0.26	0.13	0.03
栅藻属 <i>Scenedesmus</i>	0.09	0.03	0.09	棒胶藻属 <i>Rhabdogloea</i>	+	+	+
四球藻属 <i>Tetrachlorella</i>	+	+	+	硅藻门 Bacillariophyta			
盘星藻属 <i>Pediastrum</i>	+	+	+	菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	+	-	+
卵囊藻属 <i>Oocystis</i>	+	-	+	针杆藻属 <i>Synedra</i>	0.02	+	0.04
肾形藻属 <i>Nephrocytium</i>	+	+	+	舟形藻属 <i>Navicula</i>	0.02	0.04	0.08
新月藻属 <i>Closterium</i>	+	0.03	+	小环藻属 <i>Cyclotella</i>	0.21	0.10	0.10
扁藻属 <i>Platymonas</i>	-	+	-	卵形藻属 <i>Cocconeis</i>	+	+	+
空星藻属 <i>Coelastrum</i>	+	+	+	直链藻属 <i>Melosira</i>	+	-	-
网球藻属 <i>Dictyosphaerium</i>	+	+	+	根管藻属 <i>Rhizosolenia</i>	-	-	+
集星藻属 <i>Actinastrum</i>	-	-	+	肋缝藻属 <i>Frustulia</i>	-	+	+
角星鼓藻属 <i>Staurastrum</i>	-	-	+	羽纹藻属 <i>Pinnularia</i>	-	-	+
月牙藻属 <i>Selenastrum</i>	+	-	+	布纹藻属 <i>Gyrosigma</i>	-	-	+
衣藻属 <i>Chlamydomonas</i>	+	-	-	双壁藻属 <i>Diploneis</i>	-	+	+
弓形藻属 <i>Schroederia</i>	+	-	-	裸藻门 Euglenophyta			
鼓藻属 <i>Cosmarium</i>	+	+	+	囊裸藻属 <i>Trachelomonas</i>	+	+	+
四星藻属 <i>Tetrastrum</i>	+	+	+	扁裸藻属 <i>Phacus</i>	+	+	0.02
并联藻属 <i>Quadrigula</i>	-	+	-	裸藻属 <i>Euglena</i>	+	0.02	0.07
四角藻属 <i>Tetraedron</i>	-	-	+	金藻门 Chrysophyta			
蓝藻门 Cyanophyta				黄群藻属 <i>Synura</i>	-	+	+
鱼腥藻属 <i>Anabaena</i>	+	0.23	0.07	锥囊藻属 <i>Dinobryon</i>	-	+	-
平裂藻属 <i>Merismopedia</i>	+	+	0.12	甲藻门 Dinophyta			
棒条藻属 <i>Rhabdoderma</i>	-	+	+	多甲藻属 <i>Peridinium</i>	-	-	+
色球藻属 <i>Chroococcus</i>	+	+	+	隐藻门 Cryptophyta			
微囊藻属 <i>Microcystis</i>	+	+	+	隐藻属 <i>Cryptomonas</i>	-	+	+

注:有数字的表示为优势属,即优势度 ≥ 0.02 ;“+”表示有检测到,但优势度 < 0.02 ;“-”表示未检测到。
Notes: Those with numbers are represented as dominant genus, $Y \geq 0.02$; “+” indicates that distribution is detected, but $Y < 0.02$; “-” indicates that no distribution is detected.

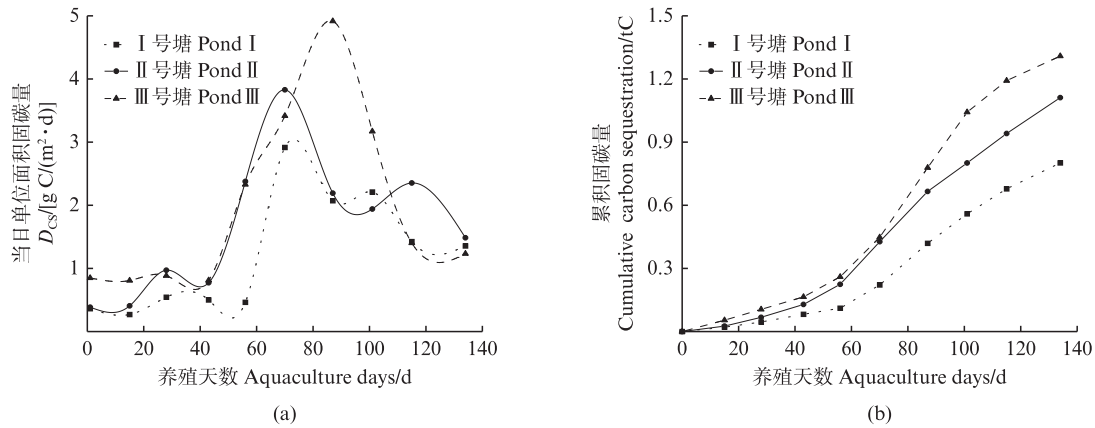
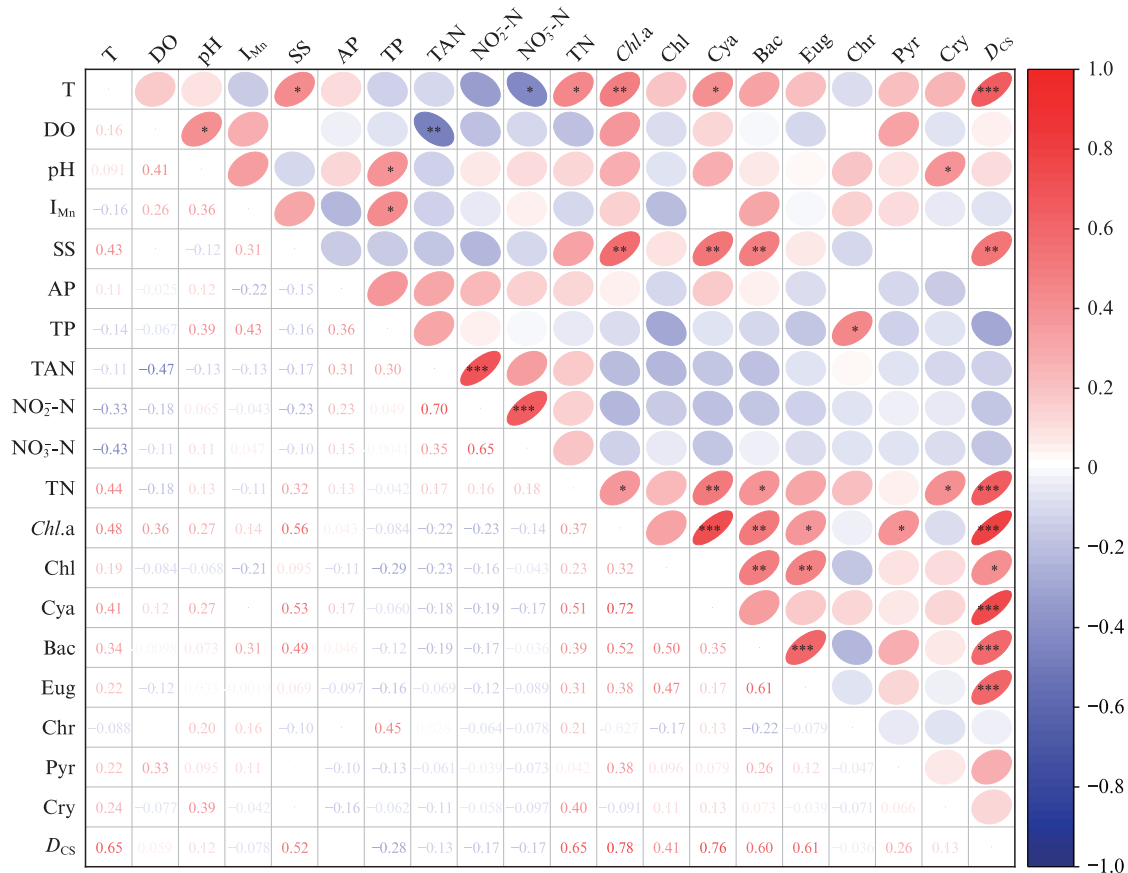


图2 凡纳滨对虾养殖池塘浮游植物固碳量的变化

Fig. 2 Changes in the amount of carbon sequestration by phytoplankton in *Litopenaeus vannamei* aquaculture ponds

Chl. 绿藻门; Cya. 蓝藻门; Bac. 硅藻门; Eug. 裸藻门; Chr. 金藻门; Pyr. 甲藻门; Cry. 隐藻门; D_{cs}. 当日单位面积固碳量; “***”和“**”表示极显著相关($P<0.01$), “*”表示显著相关($P<0.05$)。

Chl. Chlorophyta; Cya. Cyanophyta; Bac. Bacillariophyta; Eug. Euglenophyta; Chr. Chrysophyta; Pyr. Pyrrophyta; Cry. Cryptophyta; D_{cs}. Daily carbon sequestration per unit area; “***” and “**” indicates extremely significant correlation ($P<0.01$); “*” indicates significant correlation ($P<0.05$).

图3 水质、浮游植物与D_{cs}的Pearson相关性分析Fig. 3 Pearson correlation analysis of water quality, phytoplankton and D_{cs}

表5 凡纳滨对虾养殖池塘 D_{CS} 与水质因子及浮游植物的多元逐步回归方程
Tab. 5 Multiple regression equations between D_{CS} and water quality factors and phytoplankton in *Litopenaeus vannamei* aquaculture ponds

多元逐步回归方程 Multiple regression equations	R^2	F	P
$D_{CS} = 0.626 + 0.010(Chl.a)$	0.591	42.928	<0.001
$D_{CS} = -0.277 + 0.008(Chl.a) + 0.332(TN)$	0.741	42.475	<0.001
$D_{CS} = -0.181 + 0.007(Chl.a) + 0.291(TN) + 8.473 \times 10^{-7}(Eug)$	0.801	39.963	<0.001
$D_{CS} = -3.832 + 0.006(Chl.a) + 0.188(TN) + 8.925 \times 10^{-7}(Eug) + 0.142(T)$	0.851	42.309	<0.001
$D_{CS} = -3.653 + 0.003(Chl.a) + 0.117(TN) + 1.048 \times 10^{-6}(Eug) + 0.142(T) + 3.795 \times 10^{-7}(Cya)$	0.888	46.782	<0.001
$D_{CS} = -1.652 + 0.003(Chl.a) + 0.136(TN) + 1.065 \times 10^{-6}(Eug) + 0.143(T) + 3.832 \times 10^{-7}(Cya) - 0.243(pH)$	0.904	46.401	<0.001

表6 水质因子、浮游植物与 D_{CS} 的冗余分析统计参数
Tab. 6 Statistical parameters of redundancy analysis of water quality factors, phytoplankton and D_{CS}

统计数值 Statistic	轴1 Axis 1	轴2 Axis 2
特征值 Eigenvalues	0.854 0	0.025 8
解释变异(累计) Explained variation (cumulative)	85.40	87.98
Pseudo-canonical 相关性 Pseudo-canonical correlation	0.963 4	0.568 3
解释拟合变异(累计) Explained fitted variation (cumulative)	97.07	100.00

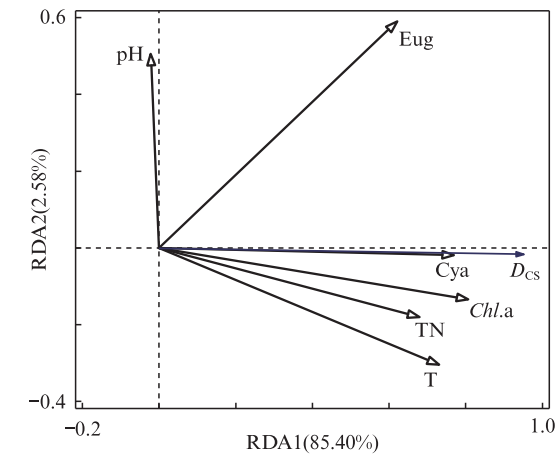


图4 凡纳滨对虾养殖池塘水质因子、浮游植物与 D_{CS} 的冗余分析(RDA)

Fig. 4 Redundancy analysis (RDA) of water quality factors, phytoplankton and D_{CS} in *Litopenaeus vannamei* aquaculture ponds

通过 RDA 进一步分析影响浮游植物当日单位面积固碳量的主要环境因子的解释量。 $Chl.a$ 、TN、裸藻门、T、蓝藻门和 pH 对 D_{CS} 的影响达到了显著水平($P<0.05$),这些因子的影响重要性依次为: $Chl.a>TN>裸藻门>T>蓝藻门>pH$,分别解释了浮游植物当日单位面积固碳量的 55.7%、14.1%、7.8%、4.5%、3.9%、2.0%(表 7)。

综合以上, D_{CS} 主要受 $Chl.a$ 、TN、T、裸藻门和蓝藻门的影响,且与这些环境因子呈显著正相关,多个环境因子共同影响对虾养殖池塘 D_{CS} 的变化。

表7 环境因子相关系数
Tab. 7 Correlation coefficient of environmental factors

环境因子 Environmental factors	解释量 Explains/%	Pseudo-F	P
$Chl.a$	55.7	35.2	0.002
TN	14.1	12.6	0.002
Eug	7.8	9.1	0.004
T	4.5	6.3	0.006
Cya	3.9	6.6	0.010
pH	2.0	3.9	0.022

3 讨论

3.1 凡纳滨对虾养殖池塘浮游植物群落结构

潘璠等^[20]研究发现,凡纳滨对虾养殖池塘硅藻门、绿藻门及蓝藻门构成了主要的优势藻类群体,5—8月硅藻门和绿藻门占优势,9—10月蓝藻数量急剧增加。王旭娜等^[21]研究发现,凡纳滨对虾养殖初期,池塘中的藻类主要为绿藻与硅藻,后期蓝藻门数量出现了明显增长趋势。石晓理^[22]在凡纳滨对虾露天土池养殖的研究中表明,养殖前期(7月27日前)主要以绿藻门、硅藻门和蓝藻门为主,养殖后期(7月27日后)蓝藻门占优势。本研究结果显示,凡纳滨对虾养殖池塘初期以绿藻门和硅藻门为主,中期以蓝藻门和硅藻门为主,后期蓝藻门数量明显升高,与前人的报道具有较好的一致性。

3.2 水质因子、浮游植物与固碳量之间的关系

水质因子与浮游植物丰度共同驱动养殖池塘的固碳过程。水温作为基础环境因子,直接影响浮游植物的生长与代谢。研究表明,浮游植物丰度会随水温的升高而增加^[23],这是因为水温升高能够促进酶促反应从而增强光合作用^[24]。在此过程中,*Chl.a*浓度同步上升,*Chl.a*是浮游植物进行光合作用的主要色素,可通过其浓度变化反映浮游植物密度的变化,进而评估浮游植物固碳潜力^[25-26]。但是,水温的持续升高可能引发负面反应。水温过高会促进蓝藻的繁殖,蓝藻的适宜生长温度为25~35℃,独特的耐高温代谢机制使其能够适应较高温度环境,对温度的耐受能力强于其他藻类^[27],一般在凡纳滨对虾养殖中后期(8—10月)会出现蓝藻暴发的现象^[20]。本研究于5—10月进行,养殖池塘温度先升高后降低(24.70~32.00℃),在养殖中后期达到最高温度,*Chl.a*、浮游植物总密度与温度有相同的变化趋势,此时,蓝藻的密度高于其他藻的密度,研究发现, D_{CS} 也出现先升高后降低的趋势,且 D_{CS} 与*Chl.a*、T、裸藻门和蓝藻门呈显著正相关。另外,有研究表明,若水体中N/P>16时,浮游植物受磷限制;而当N/P<16时,浮游植物则表现为氮限制^[28]。I、II和III号塘养殖期间水体N/P平均值分别为6.00±3.13、6.35±3.67和5.67±3.28。因此,在整个养殖期间浮游植物的生长整体表现为氮限制,氮营养盐会直接影响浮游植物群落和初级生产力的变化,并决定其固碳能力,这一结论已被诸多学者的研究所证实^[29-31]。综合以上,凡纳滨对虾养殖池塘中浮游植物固碳量受多个环境因子的共同驱动。

关于渔业生产潜力与初级生产力关系的研究已有较多文献报道。早期研究中,梁彦龄等^[32]基于长江流域武汉周边18个池塘和湖泊的调查数据,建立了净初级生产力与渔业产量之间的经验模型;DOWNING等^[33]对北美洲、欧洲和非洲的19个湖泊的渔业产量与总氮、总磷、鱼生物量、初级生产力等16个参数进行了相关性分析,发现初级生产力与渔业产量的正相关性最为显著;此外,洪妍等^[14]的研究进一步证实,较高的初级生产力是支撑养殖池塘较高虾产量的重要条件。本研究中3个池塘的虾产量依次为III号塘(3 600 kg)>II号塘(3 540 kg)>I号塘(3 380 kg),与初级生

产力、 D_{CS} 在池塘间的变化特征一致。因此,未来有必要在不同区域开展相关研究,以精确量化浮游植物生产力与虾产量之间的定量关系,从而为优化养殖模式、提升虾产量及增强浮游植物固碳能力提供科学依据。

3.3 不同养殖系统凡纳滨对虾养殖池塘浮游植物 D_{CS} 差异

本研究通过黑白瓶法计算初级生产力,使用 $1\text{ mg O}_2 = 0.375\text{ mg C}$ 进行换算,统一用 $\text{g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 表示浮游植物当日单位面积固碳量,同时将不同研究的当日单位面积固碳量列于表8。本研究中浮游植物 D_{CS} 变化范围为0.27~4.92 $\text{g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,均值为1.62 $\text{g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,养殖池塘中绿藻门、蓝藻门、硅藻门和裸藻门为优势类群,其中蓝藻门密度占比最大,且Pearson相关性与RDA分析均显示裸藻门和蓝藻门对 D_{CS} 的影响较硅藻门大。

骆云慧等^[34]、高欣等^[35]和PRATIWI等^[36]研究发现,海水凡纳滨对虾养殖池塘的浮游植物群落结构中,硅藻门占优势,而淡水养殖池塘中多数以绿藻门和蓝藻门为主。有研究发现,硅藻每年可固定的 CO_2 量最多可占全球的20%^[37],海洋初级生产力的40%由硅藻贡献^[38]。近年来,针对硅藻的固碳机制有许多学者做了深入研究,也为硅藻为何能对初级生产力有很大的贡献给出了较为合理的解释。一方面是因为硅藻体内存在独特的 CO_2 浓缩机制,这一机制极大地提高了无机碳源的同化效率,这也是硅藻不断适应海洋环境所进化出的特殊机制^[37,39-40];另一方面,硅藻体积较大(2~500 μm),沉降速度快(>0.5 m/d),可将有机碳快速转移至深海,减少再释放到大气中的风险^[41],而绿藻和蓝藻因体积小、沉降慢,其固碳多停留在表层水体中^[41-42]。另外,基于表8对比发现这些海水池塘往往具有较高的养殖密度,这些结论初步解释了淡水养殖池塘浮游植物 D_{CS} 低于多数研究中海水养殖池塘的数值。

本研究在某虾类养殖合作社的池塘内进行,最初的实验设计中包含了对全部池塘(含对照塘)的水质和浮游植物检测与分析,但在研究周期内,大部分池塘在试验过程中出现了虾生长缓慢、病害发生等问题,出于生产效益的考虑,中期就进行了收虾,对照塘亦用于养殖,导致最终只有3个试验塘有完整的数据,因此仅用这3个池

塘的数据进行分析,存在实验样本少且缺少对照组的缺陷。今后的研究需要充分考虑养殖池塘、对照组等的实验条件可控性,并在不同地区开展类似的研究,以增强研究结果的普适性。

表 8 不同凡纳滨对虾养殖池塘的 D_{CS} 比较
Tab. 8 Comparison of D_{CS} of different aquaculture systems in *Litopenaeus vannamei* aquaculture ponds

研究地区 Study area	养殖周期 Aquaculture cycle	养殖密度 Aquaculture density/(万尾/hm ²)	D_{CS} 范围 D_{CS} range/ [g C/(m ² ·d)]	D_{CS} / [g C/(m ² ·d)]	备注 Note	参考文献 References
上海市奉贤区	5—10月	60	0.27~4.92	1.62±1.12	淡水露天养殖	本研究
福建省闽江河口区	5—10月	209	1.42~1.94	1.64±0.68	海水露天养殖	[14]
辽宁省庄河市	5—9月	—	0.58~3.86	2.04±0.89	海水露天养殖	[43]
广东省湛江市东海岛	8—10月	119	0.48~4.27	1.98±1.25	海水高位养虾池	[44]
广东省湛江市东海岛	3—6月	149	1.69~3.01	2.51±1.02	海水高位养虾池	[45]
福建省闽江河口区	5—10月	209	1.58~1.93	1.72±0.18	海水露天养殖	[13]

4 结论

本研究采用黑白瓶法对上海市奉贤区某水产养殖场的凡纳滨对虾养殖池塘水体初级生产力进行了检测,并对浮游植物固碳量进行估算,探明水质、浮游植物与固碳量之间的关系。结果显示,随着养殖时间的推移, D_{CS} 呈现先增大后减小的趋势,浮游植物的累积固碳量随养殖时间的延长而缓慢增长,养殖结束时,3口试验塘的累积固碳量分别为0.80、1.11和1.31 t C, Pearson相关性分析与冗余分析表明 *Chl.a*、TN、T、裸藻门和蓝藻门是影响浮游植物固碳量的关键因子。这些结果有助于深入理解凡纳滨对虾养殖池塘中水质和浮游植物群落对浮游植物固碳量的影响,可为淡水水产养殖生态系统碳汇评估提供基础数据。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

[1] 徐敬俊,覃恬恬,韩立民. 海洋“碳汇渔业”研究述评[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 161-172.
XU J J, QIN T T, HAN L M. A review of research on marine carbon sink fisheries [J]. Resources Science, 2018, 40(1): 161-172.

[2] 潘德炉,张偲,秦大河,等. 我国海岸带蓝碳生态系统结构现状与保护优化策略研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(6): 233-245.
PAN D L, ZHANG S, QIN D H, et al. Current structural status and optimized protection strategies for coastal blue-carbon ecosystems in China[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(6): 233-245.

[3] SCHUSTER L, TAILLARDAT P, MACREADIE P I, et

al. Freshwater wetland restoration and conservation are long-term natural climate solutions [J]. Science of the Total Environment, 2024, 922: 171218.

[4] ANIKUTTAN K K, ADHIKARI S, KAVITHA M, et al. Carbon sequestration capacity of sediments, algae, and zooplankton from fresh water aquaculture ponds [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188 (7): 422.

[5] JIANG Y J, HE W, LIU W X, et al. The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu) [J]. Ecological Indicators, 2014, 40: 58-67.

[6] LEE Z, MARRA J, PERRY M J, et al. Estimating oceanic primary productivity from ocean color remote sensing: A strategic assessment [J]. Journal of Marine Systems, 2015, 149: 50-59.

[7] MERCADO-SANTANA J A, SANTAMARÍA-DEL-ANGEL E, GONZÁLEZ-SILVERA A, et al. Productivity in the Gulf of California large marine ecosystem [J]. Environmental Development, 2017, 22: 18-29.

[8] YANG J, WANG F, LYU J P, et al. The spatiotemporal contribution of the phytoplankton community and environmental variables to the carbon sequestration potential in an urban river[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(5): 4814-4829.

[9] WEI M C, LIN Y T, CHEN K Y, et al. Study on feeding activity of *litopenaeus vannamei* based on passive acoustic detection[J]. IEEE Access, 2020, 8: 156654-156662.

[10] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会制编. 中国渔业统计年鉴-2024[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.

Fishery and Fishery Administration Bureau of the Ministry of Agriculture and Rural Areas, National Aquaculture Technology Promotion Center, China Society of

- Fisheries. Chinese Fishery Statistics Yearbook 2024[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024.
- [11] SUN Y, LI H J, YANG Q, et al. Disentangling effects of river inflow and marine diffusion in shaping the planktonic communities in a heavily polluted estuary[J]. Environmental Pollution, 2020, 267: 115414.
- [12] WIDIGDO B, RIFQI M, MASHAR A, et al. The contribution of phytoplankton in the carbon adsorption and stock during shrimp culture in brackishwater ponds [J]. Biodiversitas Journal of Biological Diversity, 2020, 21(11): 5170-5177.
- [13] YANG P, TANG K W, YANG H, et al. Insights into the farming-season carbon budget of coastal earthen aquaculture ponds in southeastern China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 335: 107995.
- [14] 洪妍, 杨平, 仝川, 等. 亚热带河口区对虾养殖池塘浮游植物初级生产力变化[J]. 湖泊科学, 2022, 34(3): 881-893.
- HONG Y, YANG P, TONG C, et al. Variations in phytoplankton primary productivity in aquaculture ponds with *Litopenaeus vannamei* from subtropical estuary in southeast China[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(3): 881-893.
- [15] 张广帅, 吴婷婷, 闫吉顺, 等. 鸭绿江口近岸海域水质环境对冬季浮游动物群落结构的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 390-399.
- ZHANG G S, WU T T, YAN J S, et al. Effects of the sea water environmental factors on zooplankton community nearshore of the Yalu River estuary in winter [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 390-399.
- [16] 吴晓凡, 汪振华, 章守宇, 等. 大规模筏式贻贝养殖区浮游植物群落结构昼夜变化特征[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(5): 1211-1222.
- WU X F, WANG Z H, ZHANG S Y, et al. Diurnal variation of phytoplankton community structure in a large-scale raft mussel aquaculture area [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2024, 33(5): 1211-1222.
- [17] 熊倩, 黄立成, 叶少文, 等. 三峡水库浮游植物初级生产力的季节变化与空间分布[J]. 水生生物学报, 2015, 39(5): 853-860.
- XIONG Q, HUANG L C, YE S W, et al. The seasonal variations and spatial distribution of the primary productivities of phytoplankton in the three gorges reservoir[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2015, 39(5): 853-860.
- [18] 张凯, 王广军, 龚望宝, 等. 草鱼-鳊-鲫零换水池塘有机碳、氮、磷收支研究[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 188-198.
- ZHANG K, WANG G J, GONG W B, et al. Study on organic carbon, nitrogen, and phosphorus budgets of zero-water exchange ponds of grass carp, bighead carp, and crucian carp[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(6): 188-198.
- [19] MORRIS C. Multivariate Analysis of ecological data using Canoco 5, 2nd edition [J]. African Journal of Range & Forage Science, 2015, 32(4): 289-290.
- [20] 潘璠, 江敏, 吴昊, 等. 凡纳滨对虾养殖池塘及外河道的浮游植物群落结构变化[J]. 水产学报, 2024, 48(9): 099111.
- PAN F, JIANG M, WU H, et al. Changes of phytoplankton community structure in *Litopenaeus vannamei* culture ponds and outer river [J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 48(9): 099111.
- [21] 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.
- 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.
- [22] 石晓理. 凡纳滨对虾养殖池塘水质对浮游植物和表层底泥微生物多样性影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- SHI X L. Effects of water qualities on diversities of phytoplankton and surface sediment microorganisms in ponds with *Litopenaeus vannamei* culture [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.
- [23] LEHMAN P W. The influence of climate on phytoplankton community biomass in San Francisco Bay Estuary [J]. Limnology and Oceanography, 2000, 45(3): 580-590.
- [24] HARRISON P J. Algal cultures and phytoplankton ecology[J]. Phycologia, 1976, 15(3/4): 453.
- [25] 田晓飞, 叶宇峰, 刁丽丽, 等. 枸杞岛厚壳贻贝养殖区浮游植物固碳潜力及去向研究[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2023, 42(3): 261-266.
- TIAN X F, YE Y F, DIAO L L, et al. Study on carbon Sequestration of marine phytoplankton in a mussel farm around Gouqi Island [J]. Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science), 2023, 42(3): 261-266.
- [26] HUANG C X, JIANG T, SHAN H W, et al. Composition, dynamic changes, and carbon sequestration effects of organic carbon in the water of a *Penaeus vannamei* culture pond[J]. Water, 2024, 16(5): 721.
- [27] NALEWAJKO C, MURPHY T P. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: an experimental approach[J]. Limnology, 2001, 2(1): 45-48.
- [28] 赵光辉, 杨平, 唐晨, 等. 闽江河口养虾塘水体可溶性有机碳、营养盐和叶绿素a浓度变化特征[J]. 南方水产

- 科学, 2020, 16(3): 70-78.
- ZHAO G H, YANG P, TANG C, et al. Variation of DOC, nutrients and chlorophyll a contents in shrimp ponds of Minjiang River Estuary [J]. South China Fisheries Science, 2020, 16(3): 70-78.
- [29] 孙广伟, 周玮, 党子乔, 等. 3种水质调控方式下刺参池塘初级生产力的周年变化[J]. 水产学报, 2020, 44(4): 632-641.
- SUN G W, ZHOU W, DANG Z Q, et al. Annual change of primary productivity in *Apostichopus japonicus* ponds by three water quality regulations[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(4): 632-641.
- [30] 徐兴华, 陈椽, 宁爱丽, 等. 阿哈水库浮游植物数量与环境因子的关系[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(10): 6106-6109.
- XU X H, CHEN C, NING A L, et al. Relations between the phytoplankton quantity and environment factors in Aha Reservoir [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(10): 6106-6109.
- [31] JIA J J, GAO Y, SUN K, et al. Phytoplankton community composition, carbon sequestration, and associated regulatory mechanisms in a floodplain lake system [J]. Environmental Pollution, 2022, 306: 119411.
- [32] LIANG Y L, MELACK J M, WANG J. Primary production and fish yields in Chinese ponds and lakes[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1981, 110(3): 346-350.
- [33] DOWNING J A, PLANTE C, LALONDE S. Fish production correlated with primary productivity, not the morphoedaphic index [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1990, 47(10): 1929-1936.
- [34] 骆云慧, 李来国, 赵淳朴, 等. 凡纳滨对虾-缢蛭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.
- 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.
- [35] 高欣, 景泓杰, 赵文, 等. 凡纳滨对虾高位养殖池塘浮游生物群落结构及水质特征[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(1): 44-50.
- GAO X, JING H J, ZHAO W, et al. Community structure of plankton and water quality in marine high-place ponds with Pacific white leg shrimp *Litopenaeus vannamei* culture [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2017, 32(1): 44-50.
- [36] PRATIWI N T M, WIDIGDO B, YASIN A T, et al. Phytoplankton performance in supporting primary productivity in the intensive culture system of vannamei shrimp [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 744(1): 012054.
- [37] MATSUDA Y, HOPKINSON B M, NAKAJIMA K, et al. Mechanisms of carbon dioxide acquisition and CO₂ sensing in marine diatoms: a gateway to carbon metabolism [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2017, 372 (1728): 20160403.
- [38] WU Y P, CAMPBELL D A, IRWIN A J, et al. Ocean acidification enhances the growth rate of larger diatoms [J]. Limnology and Oceanography, 2014, 59(3): 1027-1034.
- [39] 刘乾, 米铁柱, 甄毓, 等. 硅藻C₄固碳途径的研究进展[J]. 海洋科学, 2018, 42(7): 131-140.
- LIU Q, MI T Z, ZHEN Y, et al. Research progress on C₄ carbon fixation pathway of diatoms [J]. Marine Sciences, 2018, 42(7): 131-140.
- [40] TORTELL P D, REINFELDER J R, MOREL F M M. Active uptake of bicarbonate by diatoms [J]. Nature, 1997, 390(6657): 243-244.
- [41] 李清毅, 张国民, 王新烨, 等. 微藻在蓝碳中的作用机制及影响因素[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(3): 71-76.
- LI Q Y, ZHANG G M, WANG X Y, et al. Mechanism of action and influence factor of microalgae in blue carbon [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(3): 71-76.
- [42] TRÉGUER P, BOWLER C, MORICEAU B, et al. Influence of diatom diversity on the ocean biological carbon pump [J]. Nature Geoscience, 2018, 11(1): 27-37.
- [43] 阎喜武, 何志辉. 虾池浮游植物初级生产力的研究[J]. 水产学报, 1997, 21(3): 288-295.
- YAN X W, HE Z H. Studies on primary production of phytoplankton in shrimp ponds [J]. Journal of Fisheries of China, 1997, 21(3): 288-295.
- [44] 齐明, 申玉春, 吴灶和, 等. 凡纳滨对虾高位养殖池氮、磷营养盐与初级生产力研究[J]. 广东农业科学, 2010(9): 170-172, 188.
- QI M, SHEN Y C, WU Z H, et al. Study on feature of nitrogen phosphorous nutrients and primary productivity in higher-altitude *Litopenaeus vannamei* culture ponds [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010(9): 170-172, 188.
- [45] 申玉春, 熊邦喜, 叶富良, 等. 南美白对虾高位池浮游生物和初级生产力的研究[J]. 水利渔业, 2004, 24(3): 7-10.
- SHEN Y C, XIONG B X, YE F L, et al. Studies on the phytoplankton and primary productivity in ponds of *Litopenaeus vannamei* [J]. Reservoir Fisheries, 2004, 24(3): 7-10.

Carbon sequestration by phytoplankton in fresh water aquaculture ponds of *Litopenaeus vannamei* in Fengxian District, Shanghai

LI Guijuan¹, JIANG Min^{1,2}, WU Hao³, ZHOU Yingxian¹, WANG Zhihua¹

(1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai University Engineering Research Center for Water Environment Ecology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to understand the carbon sequestration of phytoplankton in freshwater aquaculture ponds of *Litopenaeus vannamei* and to find out the relationship among water quality, phytoplankton and carbon sequestration, the primary productivity of the water of *Litopenaeus vannamei* aquaculture ponds in Fengxian District, Shanghai was detected by black and white bottle method, and the carbon sequestration of phytoplankton was estimated. The results showed that a total of 45 genera belonging to 7 phylum of phytoplankton were observed in the three ponds, including 19, 8, 11, 3, 2, 1 and 1 genera of Chlorophyta, Cyanophyta, Bacillariophyta, Euglenophyta, Chrysophyta, Dinophyta and Cryptophyta, respectively. The phytoplankton densities in pond I, II and III were $(7.99 \pm 7.84) \times 10^5$, $(1.86 \pm 1.55) \times 10^6$ and $(2.57 \pm 1.66) \times 10^6$ ind/L, respectively. There were four species of common dominance in the three ponds, namely *Scenedesmus*, *Oscillatoria*, *Navicula* and *Cyclotella*. The variation range of daily carbon sequestration per unit area (D_{CS}) of phytoplankton was 0.27–4.92 g C/(m²·d), the average value was (1.62 ± 1.12) g C/(m²·d), the cumulative carbon sequestration of phytoplankton increased slowly with the extension of the cultivation time during the whole cultivation period, and the cumulative carbon sequestration of the 3 experimental ponds was 0.80, 1.11 and 1.31 t C at the end of aquaculture. The results of multiple stepwise regression analysis showed that Chlorophylla (*Chl.a*), Total Nitrogen (TN), Temperature (T), pH, phytoplankton Euglenophyta and Cyanophyta were the main environmental factors affecting the D_{CS} of phytoplankton. Pearson correlation analysis and redundancy analysis showed that *Chl.a*, TN, T, Euglenophyta and Cyanophyta were the key factors affecting the carbon sequestration of phytoplankton, and these results were helpful for us to understand the effects of water quality and phytoplankton community on the carbon sequestration of phytoplankton in *Litopenaeus vannamei* fresh water aquaculture ponds.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; fresh water aquaculture; phytoplankton; carbon sequestration