



凡纳滨对虾养殖池塘及外河道的浮游植物群落结构变化

潘 璠¹, 江 敏^{1,2*}, 吴 昊³, 唐 燕¹, 习文双¹,
叶军强⁴, 于忠利⁴

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 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;

4. 上海市奉贤区水产技术推广站, 上海 201419)

摘要: 为了解凡纳滨对虾养殖池塘浮游植物群落结构的动态变化及其与周边水体的差异、浮游植物群落结构与环境因子之间的关联, 实验对上海市奉贤区某凡纳滨对虾养殖场的养殖池塘和外河道进行了采样检测, 采用多元分析方法对养殖池塘及外河道的浮游植物和环境因子之间的相关性进行了研究。结果显示, 池塘在整个养殖周期内共检测出了 7 门 67 属 (绿藻门属数占 51%), 其中优势属有 5 门 28 属, 硅藻门中的小环藻属为最常见优势属 ($F=1.0$); 总平均密度为 1.09×10^7 个/L, 其中绿藻门、蓝藻门和硅藻门的平均密度占 47%、30% 和 11%; 相关性分析表明, 养殖池塘浮游植物群落结构与总氮 (TN)、总磷 (TP)、高锰酸盐指数 (COD) 呈极显著正相关。外河道在整个采样周期内共检出 7 门 56 属 (绿藻门属占 46%), 其中优势属有 6 门 26 属, 隐藻属和小环藻属为主要优势属; 总平均密度为 1.18×10^5 个/L, 其中隐藻门、硅藻门和绿藻门的平均密度占 46%、27% 和 13%; 外河道的浮游植物结构主要受菌落总数和轮虫的影响。相较于外河道, 池塘的浮游植物密度大且属类多, 并在 9—10 月大量暴发微囊藻属, 对对虾养殖造成了威胁, 因此应密切关注总氮、总磷和有机物含量的变化。研究表明, 人工干预下的对虾养殖系统与自然生态系统浮游植物群落存在结构差异。本研究结果可为对虾的绿色生态养殖提供参考。

关键词: 凡纳滨对虾; 养殖池塘; 环境因子; 浮游植物; 多元分析方法

中图分类号: Q 948.15; S 917.3

文献标志码: A

凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 是我国虾类养殖的主要品种。2019 年, 我国凡纳滨对虾养殖产量达到了 1.8155×10^6 t, 约占我国对虾总产量的 86%, 总产量居世界首位^[1]。虾的粪便、残饵等有机物会在池塘中积累, 引起养殖水体的内源污染^[2]。且随着其产量的增加, 尾水排放对周边环境的影响也日益引起人们的关注。有研究表

明, 在凡纳滨对虾的集约化养殖中, 投放的饵料中只有 20%~30% 的氮和 10%~20% 的磷被虾吸收利用, 而超过 50% 的氮和磷则输出到周边水域^[3]。

浮游植物是水生态系统的主要初级生产者, 是水生食物链的重要组成部分^[4], 在能量流动和养分循环中发挥着不可替代的作用^[5]。水中的残饵和虾的粪便能被细菌分解为营养物质^[6], 这些

收稿日期: 2022-03-27 修回日期: 2022-04-15

资助项目: 上海市产业技术体系建设项目 [沪农科产字 (2022) 第 5 号]; 上海市科技兴农项目 [沪农科创字 (2019) 第 3-5 号]; 广东省重点领域研发计划项目 (2020B0202010009)

第一作者: 潘璠 (照片), 从事浮游生物生态学与水域环境监测研究, E-mail: 1308796840@qq.com

通信作者: 江敏, 从事渔业水域环境监测与调控研究, E-mail: mjjiang@shou.edu.cn



营养物质可以被浮游植物吸收利用, 增加其自身丰度, 从而保持水质的稳定^[7]。已有研究表明, 绿藻和硅藻可以有效抑制虾类致病弧菌的增殖, 而蓝藻却可在自然环境中促进弧菌的增殖^[8]。因此, 浮游植物具有调控养殖环境的能力。石磊等^[9]研究了凡纳滨对虾大棚高效养殖池塘理化因子与浮游藻类的动态变化。Masithah 等^[10]研究了凡纳滨对虾精养系统 N/P 比值与硅藻丰度的动态相关性。但由于地理条件、气候、养殖方式等的不同, 养殖池塘水生态环境各具特点, 所获得的结论亦不尽相同。此类研究大多集中在养殖池塘内部, 若能将受到人类生产活动干预的养殖池塘与未受人工干预的自然河道进行对比分析, 研究则更有意义。基于此, 本研究于 2021 年对上海市奉贤区某凡纳滨对虾养殖场及其周边河道的浮游植物和环境因子进行调查, 以期了解养殖生产对池塘生态系统和水质的影响, 为对虾的绿色生态养殖提供参考。

1 材料与方法

1.1 养殖场基本情况

本研究于 2021 年在上海市奉贤区某虾类养殖场进行。该养殖场共有 18 个池塘, 每个池塘面积约为 0.33 hm², 水深约为 1.5 m, 配备 4 台叶轮式增氧机, 确保池水溶解氧维持在 5 mg/L 以上。取该养殖场的 2 号、3 号和 5 号池塘进行研究, 每个池塘约投放 4.5 万尾虾, 期间每天上午、下午各投喂 1 次饲料。4 月中旬放入第 1 茬虾, 7 月中旬起捕后再放入第 2 茬虾, 10 月底起捕。分别于 5 月 10 日、5 月 19 日、5 月 31 日、6 月 9 日、6 月 21 日、6 月 29 日、7 月 12 日、7 月 20 日、8 月 3 日、8 月 11 日、8 月 20 日、8 月 31 日、9 月 10 日、9 月 19 日、9 月 30 日和 10 月 11 日对 3 个池塘以及外河道(引水河)上游的 3 个点进行采样(图 1), 每次采样均在上午 9:00—10:00 进行。

1.2 水质检测

样品采集与保存 使用采水器在距离岸边约 1 m、水面下约 0.5 m 处采集 1 L 水样, 用塑料瓶收集保存并带回实验室测定。

样品测定 pH、水温(T), 溶解氧(DO)、总氮(TN)、总磷(TP)、活性磷(AP)、高锰酸盐指数(COD)、悬浮物(SS)、氨氮(TAN)、硝氮(NO₃⁻-N)、亚硝氮(NO₂⁻-N)以及菌落总数(CFU)按照

<https://www.china-fishery.cn>

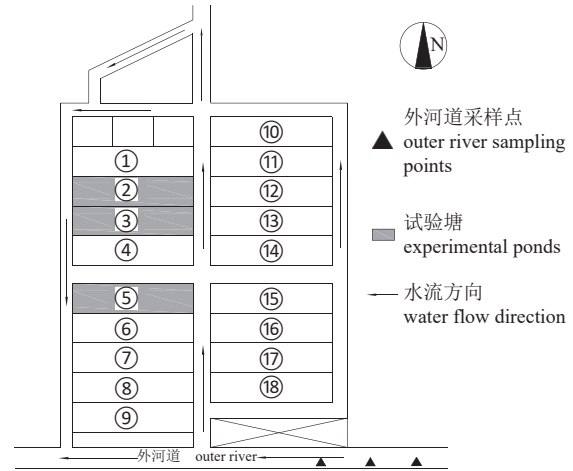


图 1 凡纳滨对虾养殖场及外河道布局

Fig. 1 Layout of *L. vannamei* farm and outer river

《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002)中规定的方法进行^[11]。

1.3 浮游生物的定性定量

使用采水器在距离岸边约 1 m, 水面 0.5 m 处取 1 L 水样并加入 10 mL 鲁哥氏固定液, 固定后的浮游生物样品在 1 L 的分液漏斗中静置沉淀 24 h 后, 取 50 mL 的浓缩液镜检^[12]。在 4 倍和 40 倍的显微镜下分别对浮游动物(仅限轮虫、桡足类和枝角类)和浮游植物进行定性和定量。

1.4 生物学评价

采用种类相似性指数(Jaccard 指数, X)判断不同区域样品的浮游植物结构的相似性:

$$X = \frac{c}{a+b-c} \quad (1)$$

式中, a 为浮游植物样本 A 的种类数; b 为浮游植物样本 B 的种类数; c 为浮游植物样本 A 和 B 的共同种类数。当 $0 < X < 0.25$ 时, 极不相似; 当 $0.25 \leq X < 0.50$ 时, 中等不相似; 当 $0.5 \leq X < 0.75$ 时, 中等相似; $0.75 \leq X < 1.0$ 时, 极相似^[13]。

选择 Shannon 多样性指数(H')、优势度指数(Y)^[14]来表征浮游植物结构特征:

$$H' = - \sum_{i=1}^s (P_i \times \log_2 P_i) \quad (2)$$

$$Y = \frac{n_i \times f_i}{N} \quad (3)$$

式中, $P = \frac{n_i}{N}$ 表示第 i 个属的多度比; S 表示藻类的物种数; N 表示所有藻类的生物密度, n_i 表示

第 i 种藻类的密度; f_i 表示该属在各样点中出现的频率; Y 为优势度, $Y \geq 0.02$ 即为优势属。

根据 $F = \frac{t_i}{T}$ 计算优势属的频率; T 表示总采样次数; t_i 表示第 i 个属成为优势属的次数。本研究把 $F \geq 0.5$ 的优势属定为常见优势属。

1.5 浮游植物与环境因子的相关性分析

采用 SPSS 16.0 软件进行养殖池塘和外河道环境因子的独立样本 t 检验。利用 R 语言的 `corplot` 函数对浮游植物密度和环境因子做 Pearson 相关性分析, 然后利用 R 语言 `vegan` 函数的子集评估模型选出与浮游植物矩阵最相关的环境因子组合, 为后续的冗余分析提供依据^[15], 利用 Canoco 5 对浮游植物进行除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 若结果显示轴 1 梯度长度 < 3 , 选择冗余分析 (redundancy analysis, RDA)^[16]。将 Pearson 相关性分析结果与 RDA 相互验证, 最终得到影响浮游植物结构变化的主要环境因子。

2 结果

2.1 浮游植物的组成及密度

实验期间, 池塘内共观察到 7 门 67 属, 其中绿藻门 (Chlorophyta)、硅藻门 (Bacillariophyta)、蓝藻门 (Cyanophyta)、裸藻门 (Euglenophyta)、金藻门 (Chrysophyta)、甲藻门 (Dinophyta) 和隐藻门 (Cryptophyta) 分别有 32、20、7、3、3、1 和 1 个属, 占总数的 47%、30%、11%、5%、5%、1% 和 1%。外河道共观察到 7 门 56 属, 亦为绿藻门、硅藻门、蓝藻门占主体, 分别有 26、15 和 7 个属, 占 46%、27% 和 13%, 而裸藻门、金藻门、甲藻门和隐藻门仅分别有 3、1、3 和 1 个属, 仅占 5%、2%、5% 和 2% (表 1)。

结果显示, 养殖池塘内浮游植物密度 $[(1.16 \pm 1.19) \times 10^7$ 个/L] 显著高于外河道 $[(1.15 \pm 1.54) \times 10^5$ 个/L], 且随时间的延长二者之间呈现不同的发展趋势 (图 2)。养殖池塘浮游植物密度总体呈波动上升趋势, 绿藻门、硅藻门、蓝藻门和隐藻门为优势类群, 平均密度分别占总平均密度的 17.6%、30.6% 和 38.5%。在 5—8 月, 池塘中浮游植物以绿藻门和硅藻门为主, 9—10 月以蓝藻门为主。而外河道的浮游植物总密度变化较为稳定, 实验期间一直以隐藻门、硅藻门和绿藻门为主, 分别占总平均密度的 37.0%、27.3% 和 13.3%。

2.2 优势属和多样性指数

研究期间养殖池塘内的浮游植物优势属随着时间变化呈现交替现象。池塘中共检出 5 门 28 个优势属, 其中小环藻属、栅藻属、隐藻属、微囊藻属、菱形藻属为常见优势属 ($F \geq 0.5$), 其变化如图 3-a 所示, 在 5—6 月主要是硅藻门中的小环藻属和菱形藻属占据优势, 6—9 月主要是硅藻门中的小环藻属占据优势, 9—10 月主要是蓝藻门中的微囊藻属占主要优势。养殖场外河道共检出 6 门 26 种优势属, 由图 3-b 可以看出, 隐藻门的隐藻属和硅藻门的小环藻属为全程优势属且占绝对优势。

实验期间, 池塘的 H' 为 1.67~4.00, 参照 Shannon 指数评价标准, 约 43.75% 的时间段池塘水质处于清洁水平 ($H' > 3$), 约 56.25% 的时段处于轻污染水平 ($1 < H' < 3$)。外河道的 H' 变化范围为 1.16~3.80, 约 31.25% 的时段处于轻清洁水平, 约 68.75% 的时段处于轻污染水平 (图 4)。

2.3 浮游植物与环境因子的相关性

将养殖池塘与外河道的水质因子和浮游动物密度进行独立样本 t 检验, 结果发现, 无论是养殖池塘还是外河道中, 浮游动物的密度变化都较大, 除了桡足类、SS、T 和 NO_2^- -N 以外, 池塘和外河道的其他环境因子均存在显著差异 (表 2, 数据以平均值 \pm 标准差表示)。其中轮虫、枝角类、pH、TP、COD、DO、TAN、 NO_3^- -N 和 AP 有极显著差异 ($P < 0.01$), TN 和 CFU 则呈显著差异 ($P < 0.05$)。

将养殖池塘中占优势的绿藻门、蓝藻门、硅藻门和隐藻门密度与水质指标、浮游动物 (轮虫、枝角类和桡足类) 密度进行 Pearson 相关性分析, 结果表明 TN、TP、COD 和 NO_2^- -N 与浮游植物极显著正相关 (图 5)。其中, 绿藻门密度与 TN、TP、COD 呈极显著正相关性 ($P < 0.01$), 蓝藻门与 TN、TP、COD 极显著正相关 ($P < 0.01$), 硅藻门与 TN、TP、 NO_2^- -N 极显著正相关性 ($P < 0.01$), 隐藻门与 TN、TP、COD、 NO_2^- -N 有显著正相关 ($P < 0.01$)。

R 语言的子集评估显示, 池塘环境因子的最佳模型有 4 个参数, 分别是轮虫、TN、TP、COD, 这 4 个因子构成的环境因子矩阵与浮游植物矩阵的相关性最高 ($V^2 = 0.372$)。提取因子进行 RDA, 结果显示, 第 1、2 排序轴特征值分别为 0.576 和 0.055, 变异累计方差解释率达到 99.32%, 可全面

表 1 凡纳滨对虾养殖池塘和外河道中检测到的藻类

Tab. 1 Algae observed in aquaculture ponds and outer river

属类 genus	养殖池塘 ponds	外河道 river	属类 genus	养殖池塘 ponds	外河道 river
绿藻门 Chlorophyta			直链藻属 <i>Melosira</i>	+	+
栅藻属 <i>Scenedesmus</i>	+	+	小环藻属 <i>Cyclotella</i>	+	+
小球藻属 <i>Chlorella</i>	+	+	角毛藻属 <i>Chaetoceros</i>	+	
胶网藻属 <i>Dictyostelium</i>	+	+	布纹藻属 <i>Gyrosigma</i>	+	+
十字藻属 <i>Crucigenia</i>	+	+	针杆藻属 <i>Synedra</i>	+	+
四角藻属 <i>Tetraedron</i>	+		双菱藻属 <i>Surirella</i>	+	+
鼓藻属 <i>Cosmarium</i>	+	+	桥弯藻属 <i>Cymbella</i>	+	+
四角藻属 <i>Tetraedron</i>	+	+	双肋藻属 <i>Amphipleura</i>	+	+
弓形藻属 <i>Schroederia</i>	+	+	短缝藻属 <i>Eunotia</i>	+	+
盘藻属 <i>Gonium</i>	+	+	等片藻属 <i>Ditoma</i>	+	
集星藻属 <i>Actinastrum</i>	+	+	辐节藻属 <i>Stauroneis</i>	+	+
新月藻属 <i>Closterium</i>	+	+	虫形藻属 <i>Amphiprora</i>	+	
空球藻属 <i>Eudorina</i>	+	+	卵形藻属 <i>Cocconeis</i>	+	+
丝藻属 <i>Ulothrix</i>	+		骨条藻属 <i>Skeletonema</i>	+	+
蹄形藻属 <i>Kirchneriella</i>	+		羽纹藻属 <i>Pinnularia</i>	+	+
微芒藻属 <i>Micractinium</i>	+		异极藻属 <i>Gomphonema</i>	+	+
单针藻属 <i>Monoraphidium</i>	+		蓝藻门 Cyanophyta		
绿梭藻属 <i>Chlorogoni</i>		+	颤藻属 <i>Oscillatoria</i>	+	+
纤维藻属 <i>Ankistrodesmus</i>	+	+	平裂藻属 <i>Merismopedia</i>	+	+
角星鼓藻属 <i>Staurastrum</i>	+	+	色球藻属 <i>Chroococcus</i>	+	+
空星藻属 <i>Coelastrum</i>	+	+	罗氏藻属 <i>Roperia</i>	+	+
韦氏藻属 <i>Westella</i>	+	+	鱼腥藻属 <i>Anabaena</i>	+	+
卵囊藻属 <i>Oocystis</i>	+	+	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	+	+
实球藻属 <i>Pandorina</i>	+	+	螺旋藻属 <i>Arthrospira</i>	+	+
多芒藻属 <i>Golenkinia</i>	+	+	裸藻门 Euglenophyta		
红球藻属 <i>Haematococcus</i>	+	+	裸藻属 <i>Euglena</i>	+	+
顶棘藻属 <i>Chlorella</i>	+	+	囊裸属 <i>Trachelomonas</i>	+	+
衣藻属 <i>Chlamydomonas</i>	+	+	扁裸藻属 <i>Phacus</i>	+	+
四刺藻属 <i>Tetrasticum</i>	+	+	金藻门 Chrysophyta		
盘星藻属 <i>Pediastrum</i>	+	+	黄群藻属 <i>Synura</i>	+	+
浮球藻属 <i>Planktosphaeria</i>	+		锥囊藻属 <i>Dinobryon</i>	+	
肾形藻属 <i>Nephrectium</i>	+		鱼鳞藻属 <i>Mallomonas</i>	+	
水绵属 <i>Sporogrya</i>	+		甲藻门 Dinophyta		
团藻属 <i>Volvox</i>		+	多甲藻属 <i>Peridinium</i>	+	+
硅藻门 Bacillariophyta			角甲藻属 <i>Ceratium</i>		+
菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	+	+	多环旋沟属 <i>Cochlodinium polykrikoides</i>		+
圆筛藻属 <i>Coscinodiscus</i>	+		隐藻门 Cryptophyta		
舟形藻属 <i>Navicula</i>	+	+	隐藻属 <i>Cryptomonas</i>	+	+

解释凡纳滨对虾养殖池塘浮游植物结构与环境因子的关系。Pseudo-canonical 相关性分析显示, 浮

游植物结构前两轴与环境因子的相关性系数分别为 0.849 和 0.614, 表明浮游植物门类结构与环境

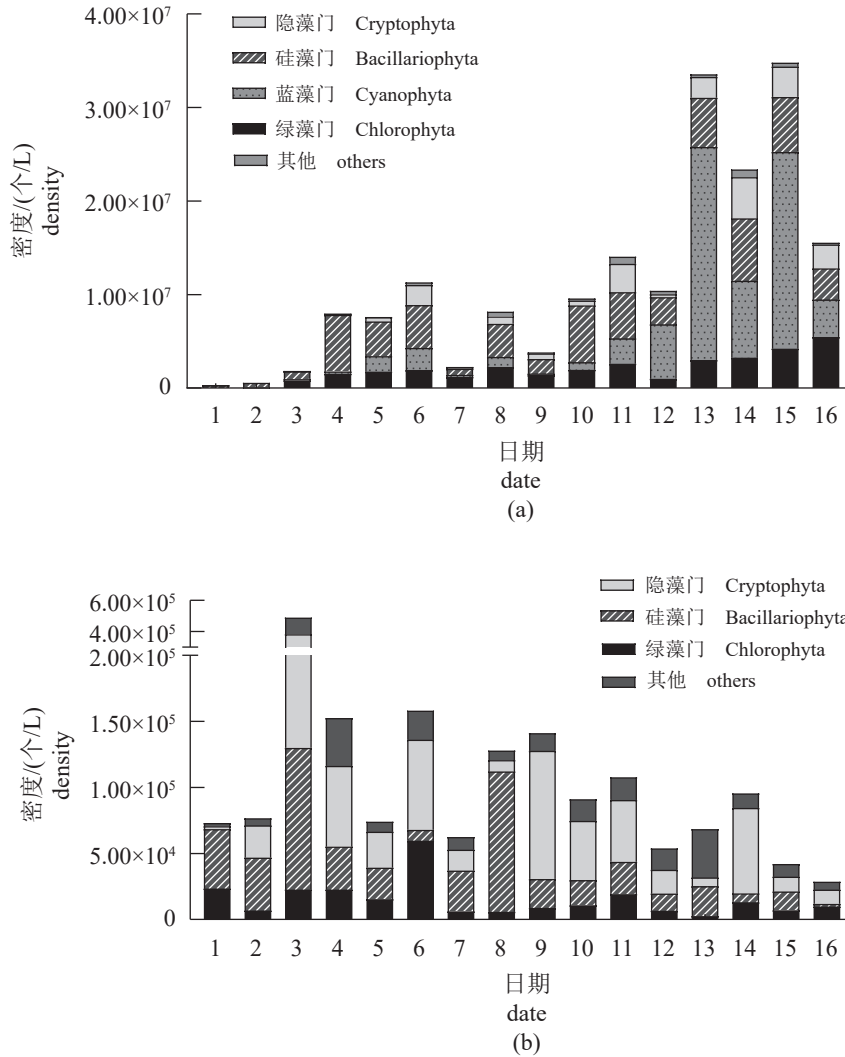


图 2 凡纳滨对虾养殖池塘和外河道浮游植物密度变化

(a) 养殖池塘, (b) 外河道, 图 3 同。1. 05-10, 2. 05-19, 3. 05-31, 4. 06-09, 5. 06-21, 6. 06-29, 7. 07-12, 8. 07-20, 9. 08-03, 10. 08-11, 11. 08-20, 12. 08-31, 13. 09-10, 14. 09-19, 15. 09-30, 16. 10-11, 图 3 和图 4 同。

Fig. 2 Changes of phytoplankton density in culture ponds and outer river

(a) open ponds, (b) outer river, the same as Fig.3. 1. 05-10, 2. 05-19, 3. 05-31, 4. 06-09, 5. 06-21, 6. 06-29, 7. 07-12, 8. 07-20, 9. 08-03, 10. 08-11, 11. 08-20, 12. 08-31, 13. 09-10, 14. 09-19, 15. 09-30, 16. 10-11, the same as Fig.3 and Fig.4.

因子之间有较强的相关性 (表 3)。第一排序轴主要解释了绿藻门、硅藻门、蓝藻门和隐藻门的演变信息, 且与 TN、TP、COD 呈显著正相关, 轮虫线段较短且与各藻类相关性不明显 (图 6)。

通过 RDA 进一步提取出各因子对浮游植物密度演变的简单效应, 从而判断影响浮游植物结构演变的主要环境因子。TN、TP、COD 和 Rot 对浮游植物密度的影响达到了极显著水平 ($P < 0.01$), 这些因子的影响重要性为 $TN > TP > COD > 轮虫$, 分别解释了浮游植物演变信息的 40.3%、38.8%、37.6% 和 14.4%, 轮虫的影响力相较 TN、TP 和 COD 低 (表 4)。

Pearson 相关性结果与 RDA 结果相互验证了凡纳滨对虾养殖池塘浮游植物主要受水质指标 TN、TP、COD 的影响, 多个环境因子共同影响对虾养殖池塘浮游植物结构的变化。绿藻门、蓝藻门、硅藻门和隐藻门都与 TN、TP、COD 呈极显著正相关关系。

外河道的环境因子与浮游植物密度之间的 Pearson 相关性没有养殖池塘那样显著。只有轮虫与隐藻门呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 枝角类、 NO_2-N 、CFU 与浮游植物之间仅呈显著正相关关系 ($P < 0.05$) (图 7)。

将养殖场外河道的浮游植物与环境因子进行

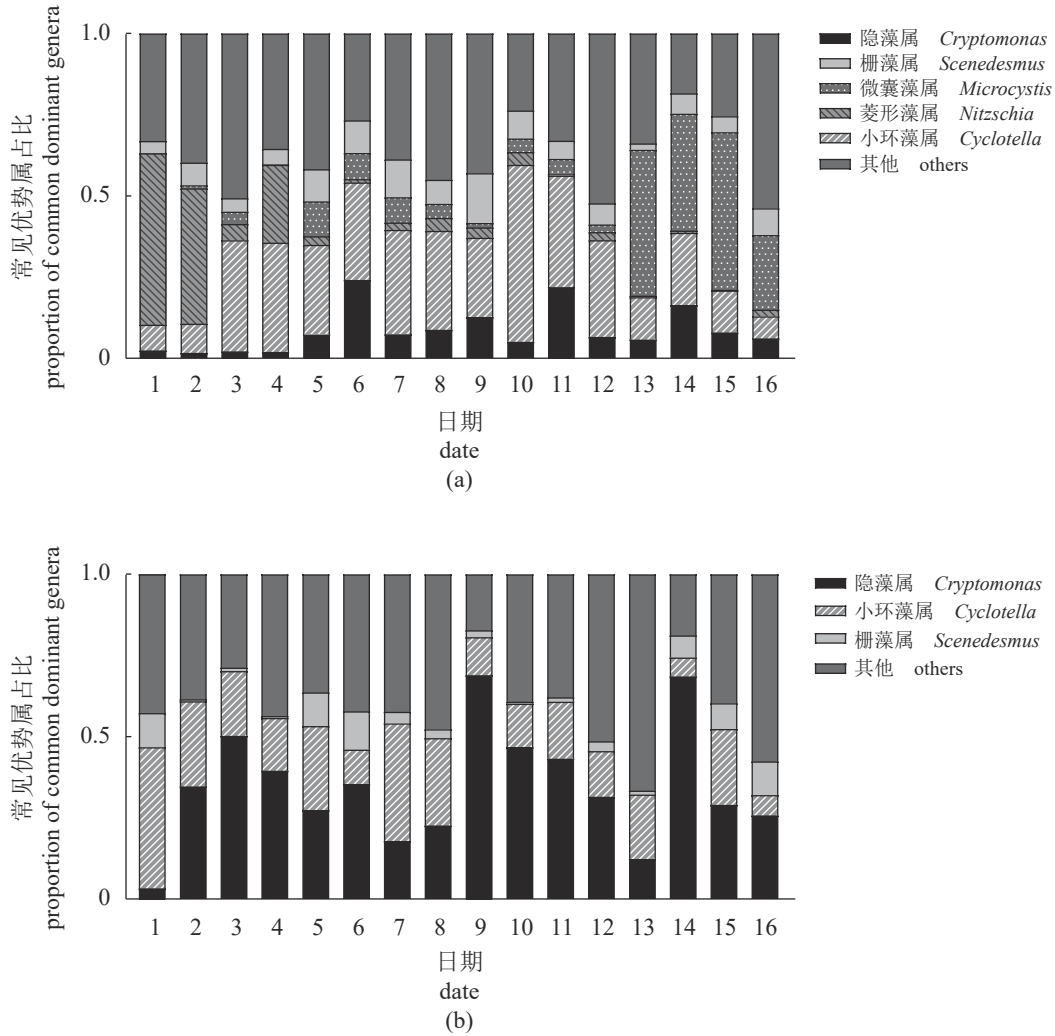


图3 凡纳滨对虾养殖池塘及其外河道常见优势属的变化

Fig. 3 Changes of the first dominant genus in aquaculture ponds and outer river

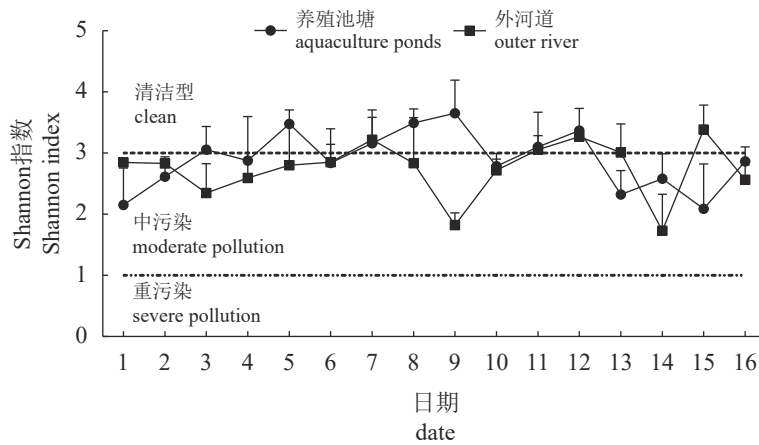


图4 凡纳滨对虾养殖池塘及其外河道浮游植物多样性指数变化

Fig. 4 Changes in phytoplankton diversity index

子集评估, 结果显示, 最佳模型有 5 个参数, 分别为轮虫、枝角类、pH、TN 和 CFU, 这 5 个因

子构成的环境因子矩阵与浮游植物矩阵的相关性最高 (V2=0.319)。将筛选出的环境矩阵进一步与

表 2 水质因子与浮游动物密度

Tab. 2 Water quality factors and zooplankton density		养殖池塘 ponds	外河道 outer river
轮虫/(个/L) Rotifer		8 145±7 161	895±689**
枝角类/(个/L) Cladocera		2 468±4 103	208±305**
桡足类/(个/L) Copepods		854±1 422	1 041±628
悬浮物/(mg/L) SS		61.63±77.39	50.27±79.69
pH		8.00±0.29	7.73±0.30**
总氮/(mg/L) TN		3.16±1.64	2.58±0.93*
总磷/(mg/L) TP		0.28±0.15	0.18±0.09**
高锰酸盐指数/(mg/L) COD		7.16±1.39	5.16±0.77**
温度/°C T		27.56±3.26	27.23±3.16
溶解氧/(mg/L) DO		9.59±1.93	4.02±0.84**
氨氮/(mg/L) TAN		0.48±0.53	0.27±0.35**
亚硝氮/(mg/L) NO ₂ -N		0.13±0.27	0.15±0.09
硝氮/(mg/L) NO ₃ -N		0.17±0.21	1.06±0.54**
活性磷/(mg/L) AP		0.04±0.06	0.12±0.08**
菌落总数/(mg/L) CFU		2 496±1 259	2 018±1 118*

注：“***”表示有极显著差异(P<0.01), “**”表示显著差异(P<0.05)。
Notes: “***” indicates extremely significant differences (P<0.01), “**” indicates significant difference (P<0.05).

浮游植物进行 RDA 分析, 结果显示轴 1 和轴 2 累计解释方差为 95.6%, 可以较好地解释浮游植物密度与环境因子之间的关系, Pseudo-canonical 相关性结果表示浮游植物排序轴与环境因子相关性较弱(表 5)。其中绿藻门与 Rot 和 CFU 呈较强负相关, 与 TN 呈较强正相关; 硅藻门与 CFU 呈负相关, 与 TN 呈较强正相关; 隐藻门与 CFU 呈较强负相关, 与 Rot 呈较强正相关, 蓝藻门与 Rot 和 CFU 有较强正相关(图 8)。

环境因子与 RDA 分析轴之间的相关性结果表明, 菌落总数和轮虫对浮游植物结构变化有极显著影响(P<0.01)(表 6), 其他环境因子对浮游植物结构变化的影响不显著(P>0.05)。

结合 Pearson 相关性和 RDA 的分析结果, 外河道浮游植物主要受环境因子中的轮虫和菌落总数的影响。其中, 隐藻门与轮虫呈极显著正相关, 硅藻门、绿藻门与菌落总数呈显著负相关, 蓝藻门与轮虫和菌落总数呈正相关。

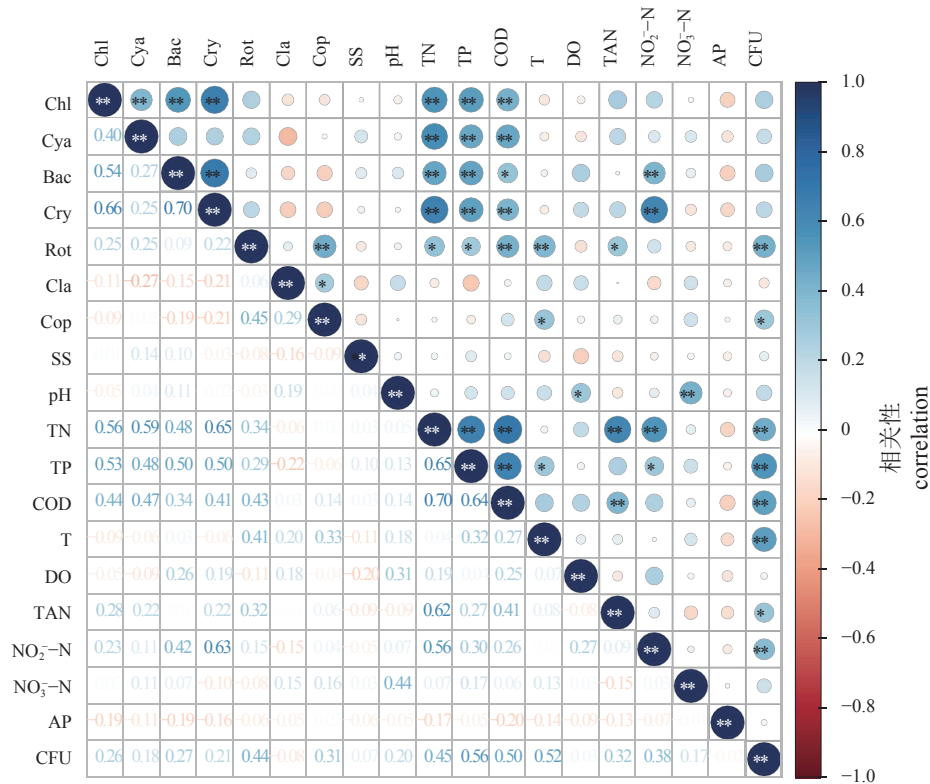


图 5 养殖池塘浮游植物门类结构与环境因子的 Pearson 相关性

Chl. 绿藻门, Cya. 蓝藻门, Bac. 硅藻门, Cry. 隐藻门, Rot. 轮虫, Cla. 枝角类, Cop. 桡足类; “***”表示极显著相关(P<0.01), “**”表示显著相关(P<0.05), 下同。

Fig. 5 Pearson correlation of phytoplankton structure and environmental factors in aquaculture ponds

Chl. Chlorophyta, Cya. Cyanophyta, Bac. Bacillariophyta, Cry. Cryptophyta, Rot. Rotifer, Cla. Cladophora, Cop. Copepods; “***” indicates extremely significant correlation (P<0.01), “**” indicates significant correlation (P<0.05), the same below.

表 3 养殖池塘浮游植物密度与环境因子间冗余分析的统计参数

Tab. 3 Statistical parameters of redundancy analysis between phytoplankton density and environmental factors in aquaculture ponds

统计数值 statistic	轴1 axis 1	轴2 axis 2	轴3 axis 3	轴4 axis 4
特征值 eigenvalues	0.5761	0.0554	0.0024	0.0019
解释变异(累计) explained variation (cumulative)	57.61	63.15	63.39	63.58
Pseudo-canonical相关性 Pseudo-canonical correlation	0.8492	0.6142	0.2748	0.2924
解释拟合变异(累计) explained fitted variation (cumulative)	90.61	99.32	99.69	100

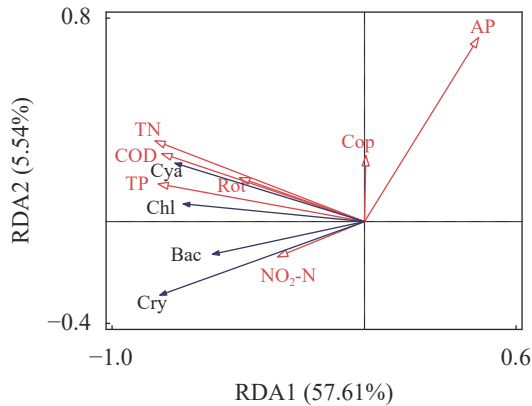


图 6 养殖池塘浮游植物结构与环境因子的冗余分析 (RDA)

Fig. 6 RDA ordering biplot of phytoplankton and environmental factors in aquaculture ponds

表 4 养殖池塘环境因子解释量及显著性检验

Tab. 4 The explanatory quantity and significance test of environmental factors in aquaculture ponds

环境因子 environmental factors	解释量/% explains	Pseudo-F	P
TN	40.3	31.1	0.002
TP	38.8	29.2	0.002
COD	37.6	27.7	0.002
Rot	14.4	7.7	0.002

3 讨论

3.1 养殖水体与河道浮游植物群落特征与差异

沈明明^[17]在工厂化养殖虾池的研究中表明,

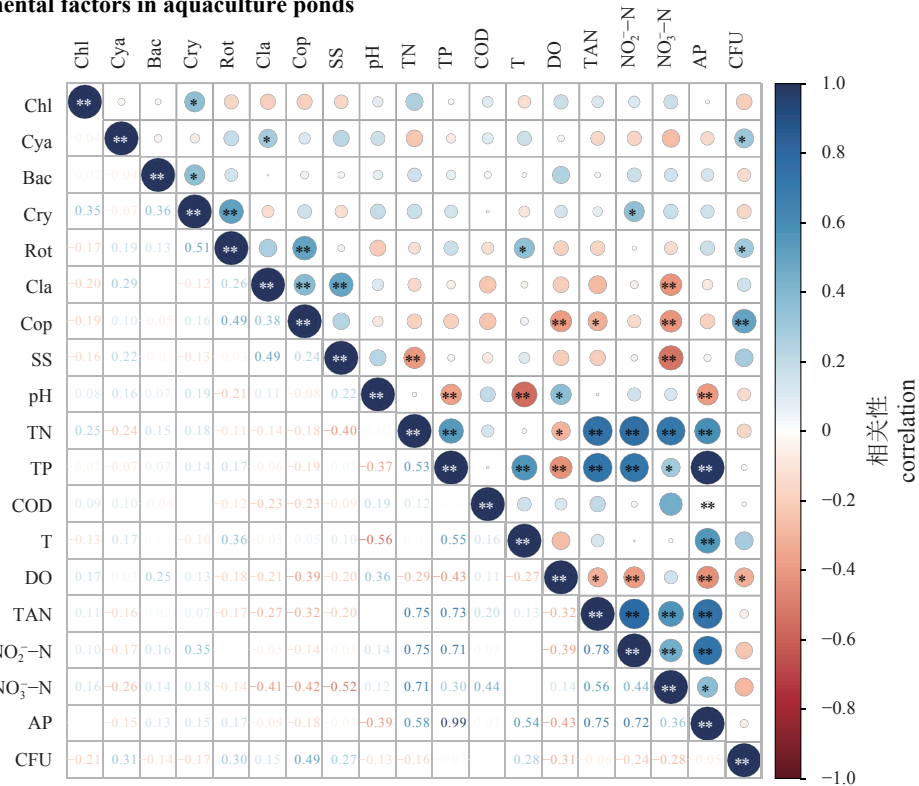


图 7 外河道浮游植物门类结构与环境因子的 Pearson 相关性

Fig. 7 Pearson correlation between phytoplankton phyla structure and environmental factors in outer river

表 5 养殖池塘浮游植物密度与环境因子间冗余分析的统计参数

Tab. 5 Statistical parameters of redundancy analysis between phytoplankton density and environmental factors in aquaculture ponds

统计数值 statistic	轴1 axis 1	轴2 axis 2	轴3 axis 3	轴4 axis 4
特征值 eigenvalues	0.1621	0.0613	0.0095	0.0009
解释变异(累计) explained variation (cumulative)	16.21	22.34	23.29	23.38
Pseudo-canonical相关性 Pseudo-canonical correlation	0.5249	0.5773	0.3729	0.074
解释拟合变异(累计) explained fitted variation (cumulative)	69.32	95.55	99.63	100

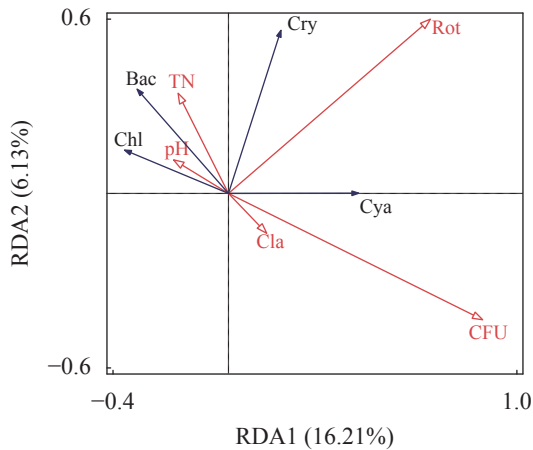


图 8 养殖场外河道浮游植物各门类和环境因子的冗余分析 (RDA)

Fig. 8 Redundancy analysis of phytoplankton taxa and environmental factors in outer river

表 6 养殖场外河道环境因子解释量及显著性检验

Tab. 6 The explanatory quantity and significance test of environmental factors in outer river

环境因子 environmental factors	解释量/% explains	Pseudo-F	P
CFU	13.8	7.3	0.002
Rot	10.2	5.2	0.006
Cla	1.3	0.6	0.538
TN	1.3	0.6	0.594
pH	0.8	0.4	0.746

养殖前期 (6—7 月) 虾池以绿藻、硅藻为优势种, 而养殖中后期 (8—9 月) 则是蓝藻门占优势。Ni 等^[18]认为, 绿藻、硅藻和蓝藻是杭州湾附近凡纳滨对虾传统养殖池塘中的优势门, 浮游植物的丰度高值大多与某些蓝藻有关, 表明养殖池塘变得富营养化。王旭娜等^[19]研究发现, 凡纳滨对虾养殖初期的池塘以绿藻和硅藻为主, 后期蓝藻门数量显著升高。本研究中养殖池塘的优势类群是硅藻门、绿藻门和蓝藻门, 5—8 月池塘占优势的浮游植物

主要为硅藻门和绿藻门, 9—10 月蓝藻数量骤升导致总密度大幅度上升, 与以往报道具有较高的一致性。养殖后期蓝藻暴发的现象, 可能是由于养殖水体中有机物等的不断积累, 使水体出现中度富营养化, 一些喜肥耐污的微藻, 如蓝藻, 会在养殖中后期大量繁殖成为优势种^[20]。

相较于养殖池塘, 外河道浮游植物的组成和密度较为稳定, 以硅藻门的小环藻属和隐藻门的隐藻属为主要优势属。池塘和外河道的浮游植物 Jaccard 相似性指数为 0.754, 表明了养殖池塘和外河道的浮游植物在属结构上极相似。尽管如此, 养殖池塘的藻类密度还是远高于外河道, 且在时间变化上也有较大差异: 养殖池塘在调查前中期以绿藻门和硅藻门为主, 后期以蓝藻门为主, 外河道则在整个调查期间一直以硅藻门和隐藻门为主。

3.2 养殖池塘和外河道的浮游植物与环境因子之间的关系

氮、磷是浮游植物生长的必需元素, 而有机物则可能被微生物分解为无机物, 为浮游植物生长提供充足的无机营养盐^[21]。实验期间, 凡纳滨对虾养殖池塘 TN、TP 和 COD 含量平均值高于养殖场外河道, 浮游植物密度亦显著大于外河道。RDA 结果显示, 养殖池塘中的浮游植物优势类群 (硅藻门、蓝藻门、绿藻门) 都与 TN、TP、COD 呈极显著正相关, 与以往的研究结果一致^[22-24]。

不同水体, 影响浮游植物生长的主要环境因子不尽相同。实验期间, 外河道浮游植物主要由隐藻门、硅藻门和绿藻门组成, 且主要受到轮虫和菌落总数的影响。浮游植物是浮游动物的重要食物来源, 水体中浮游植物的数量与浮游动物的生长繁殖密切相关^[25]。外河道的轮虫与绿藻门有一定的负相关, 与隐藻门呈显著正相关, 这可能

是因为轮虫在多数情况下偏向以绿藻和硅藻为食, 降低了隐藻的竞争压力^[26]。菌落总数与隐藻门、绿藻门和硅藻门都呈负相关, 这可能是因为细菌与浮游植物之间存在腐生关联, 并且浮游植物的死亡能促进细菌的生长^[27]。

总的来说, 受人类活动干扰的养殖池塘浮游植物群落变化主要是受到水质因子 (TN、TP 和 COD) 的影响, 而未受养殖行为干扰的外河道浮游植物结构主要是受到生物因素的影响 (轮虫和菌落总数)。

3.3 浮游植物对凡纳滨对虾养殖的影响

实践证明浮游植物的变动会影响水环境的稳定, 进而影响虾的健康生长^[20]。曹煜成等^[28]认为绿藻门中的很多微藻为耐污、耐盐的宽生态位, 易在养殖中形成相对稳定的藻相, 保持池水的活性; 以硅藻为主的养殖水体没有绿藻稳定, 但虾病也较少。即以绿藻和硅藻为优势类群的养殖水体水质稳定, 对虾不易发病^[29]。有研究表明, 养殖后期往往会出现蓝藻快速繁殖的现象, 且有蓝藻暴发, 是造成凡纳滨对虾大量减产的主要原因^[30]。本研究的对虾养殖塘在 9—10 月亦出现了蓝藻门的微囊藻属大量暴发的现象。李凡^[31]研究发现, 微囊藻属不论是死藻还是活藻, 都会致对虾快速死亡。这可能是因为微囊藻属会释放微囊藻毒素, 毒素沿食物链进入水生生物体内, 当毒素积累到一定量时, 就会对其产生毒害作用, 影响水产品的质量^[32-33]。因此, 在凡纳滨对虾养殖过程中要培养良好的藻相, 密切关注 TP、TN 和有机物含量的变化, 避免有害藻类的过度繁殖。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 简意绪, 车斌. 环境经济学视角下我国南美白对虾不同养殖模式成本收益比较研究[J]. *中国渔业经济*, 2021, 39(3): 83-90.
- Jian Y X, Che B. Comparison of costs and benefits of different culture models of *Litopenaeus vannamei* in China from the perspective of environmental economics[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2021, 39(3): 83-90 (in Chinese).
- [2] Kumar V S, Pandey P K, Anand T, et al. Effect of periphyton (aquamat) on water quality, nitrogen budget, microbial ecology, and growth parameters of *Litopenaeus vannamei* in a semi-intensive culture system[J]. *Aquaculture*, 2017, 479: 240-249.
- [3] Chen Z, Ge H X, Chang Z Q, et al. Nitrogen budget in recirculating aquaculture and water exchange systems for culturing *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2018, 17(4): 905-912.
- [4] 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.
- [5] Behrenfeld M J, Boss E S. Resurrecting the ecological underpinnings of ocean plankton blooms[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2014, 6: 167-194.
- [6] Kumar V, Roy S, Meena D K, et al. Application of probiotics in shrimp aquaculture: importance, mechanisms of action, and methods of administration[J]. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2016, 24(4): 342-368.
- [7] Yang W, Zhu J Y, Zheng C, et al. Succession of phytoplankton community during intensive shrimp (*Litopenaeus vannamei*) cultivation and its effects on cultivation systems[J]. *Aquaculture*, 2020, 520: 734733.
- [8] Qiao L, Chang Z Q, Li J, et al. Phytoplankton community succession in relation to water quality changes in the indoor industrial aquaculture system for *Litopenaeus vannamei*[J]. *Aquaculture*, 2020, 527: 735441.
- [9] 石磊, 袁家俊, 邵国洱, 等. 南美白对虾大棚高效养殖池塘理化因子与浮游藻类动态变化研究[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2017, 36(2): 151-158.
- Shi L, Yuan J J, Shao G E, et al. Study on the dynamic changes of physical and chemical factors and planktonic algae in high efficiency cultivation ponds of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition)*, 2017, 36(2): 151-158 (in Chinese).
- [10] Masithah E D, Nindarwi D D, Rahma T, et al. Dynamic ratio correlation of N : P in relation to the diatom abundance in the intensive system of the vannamei (*Litopenaeus vannamei*) shrimp pond[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 236: 012017.
- [11] 齐文启, 连军, 孙宗光. 《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002)的相关技术说明[J]. *中国环境监测*, 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- 2006, 22(1): 54-57.
- Qi W Q, Lian J, Sun Z G. Technical explanations for Technical Specifications Requirements for Monitoring of Surface Water and Waste Water (HJ/T 91-2002)[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2006, 22(1): 54-57 (in Chinese).
- [12] 李景, 陈昌福. 温棚高产养虾池中浮游植物群落与水化学因子特征[J]. *中国水产*, 2015(7): 72-76.
- Li J, Chen C F. Characteristics of phytoplankton community and hydrochemical factors in high producing greenhouse ponds of shrimp[J]. *China Fisheries*, 2015(7): 72-76 (in Chinese).
- [13] Yuan M L, Zhang C X, Jiang Z J, *et al.* Seasonal variations in phytoplankton community structure in the Sanggou, Ailian, and Lidao Bays[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2014, 13(6): 1012-1024.
- [14] Wang X Y, Sun M J, Wang J M, *et al.* *Microcystis* genotype succession and related environmental factors in Lake Taihu during cyanobacterial blooms[J]. *Microbial Ecology*, 2012, 64(4): 986-999.
- [15] Clarke K R, Ainsworth M. A method of linking multivariate community structure to environmental variables[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1993, 92(3): 205-219.
- [16] Morris C. Multivariate analysis of ecological data using Canoco 5, 2nd edition[J]. *African Journal of Range & Forage Science*, 2015, 32(4): 289-290.
- [17] 沈明明. 影响对虾工厂化养殖水体微藻群落演替的主要因子及其与疾病发生的关系 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- Shen M M. Studies on the affecting factors to microalgae community succession and its' relevance to shrimp diseases in industrial aquaculture of *Litopenaeus vannamei*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016 (in Chinese).
- [18] Ni M, Yuan J L, Liu M, *et al.* Assessment of water quality and phytoplankton community of *Limpenaeus vannamei* pond in intertidal zone of Hangzhou Bay, China[J]. *Aquaculture Reports*, 2018, 11: 53-58.
- [19] 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 (in Chinese).
- [20] 彭聪聪, 李卓佳, 曹煜成, 等. 虾池浮游微藻与养殖水环境调控的研究概况[J]. *南方水产*, 2010, 6(5): 74-80.
- Peng C C, Li Z J, Cao Y C, *et al.* A review of water environment regulation by planktonic microalgae in shrimp ponds[J]. *South China Fisheries Science*, 2010, 6(5): 74-80 (in Chinese).
- [21] 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 (in Chinese).
- [22] 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*, 2021, 35(4): 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*, 2021, 35(4): 74-83 (in Chinese).
- [23] 陆羚子, 李云梦, 王岩. 浙江省舟山市温室养殖池塘中凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)的生长与环境变化[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2020, 46(4): 489-499.
- Lu L Z, Li Y M, Wang Y. Growth of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and environmental variation in greenhouse ponds located in Zhoushan City of Zhejiang province[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2020, 46(4): 489-499 (in Chinese).
- [24] Teeling H, Fuchs B M, Becher D, *et al.* Substrate-controlled succession of marine bacterioplankton populations induced by a phytoplankton bloom[J]. *Science*, 2012, 336(6081): 608-611.
- [25] 杨宇峰, 王庆, 陈菊芳, 等. 河口浮游动物生态学研究进展[J]. *生态学报*, 2006, 26(2): 576-585.
- Yang Y F, Wang Q, Chen J F, *et al.* Research advance in estuarine zooplankton ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 576-585 (in Chinese).
- [26] 郭坤, 彭婷, 罗静波, 等. 长湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(1): 40-49.
- Guo K, Peng T, Luo J B, *et al.* Community structure of zooplankton and the driving physicochemical factors in

- Changhu Lake[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(1): 40-49 (in Chinese).
- [27] 闫苗苗. 水源水库藻类种群时空演替的伴生菌群驱动机制研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- Yan M M. Disentangling the drivers of spatiotemporal succession of phytoplankton from drinking water reservoirs: Insights into compositions and co-occurrence of bacterial communities[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020 (in Chinese).
- [28] 曹煜成, 李卓佳, 杨莺莺, 等. 浮游微藻生态调控技术在对虾养殖应用中的研究进展[J]. *南方水产*, 2007, 3(4): 70-73.
- Cao Y C, Li Z J, Yang Y Y, *et al.* Research progress on technology of microalgae ecological management in shrimp culture[J]. *South China Fisheries Science*, 2007, 3(4): 70-73 (in Chinese).
- [29] 李婷. 高位精养模式日本囊对虾生长及浮游生物演替规律 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2011.
- Li T. Growth pattern of *Marsupenaeus japonicus* and succession of plankton community in intensive model[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2011 (in Chinese).
- [30] 王鑫. 虾池微囊藻毒素变化规律及对南美白对虾毒性作用机制研究 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.
- Wang X. The dynamic variation of microcystins in shrimp ponds and toxic mechanism to *Litopenaeus vannamei*[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2018 (in Chinese).
- [31] 李凡. 两种蓝藻对 WSSV 潜伏感染对虾的影响 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2014.
- Li F. The impact of two cyanobacteria specie to WSSV carried *Litopenaeus vannamei*[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2014 (in Chinese).
- [32] Jiang G J. Can white spot syndrome virus be transmitted through the phytoplankton→rotifer→artemia→shrimp pathway?[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(5): 1277-1282.
- [33] Romo S, Fernández F, Ouahid Y, *et al.* Assessment of microcystins in lake water and fish (Mugilidae, *Liza* sp.) in the largest Spanish coastal lake[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(2): 939-949.

Changes of phytoplankton community structure in *Litopenaeus vannamei* culture ponds and outer river

PAN Fan¹, JIANG Min^{1,2*}, WU Hao³, TANG Yan¹, XI Wenshuang¹,
YE Junqiang⁴, YU Zhongli⁴

(1. College of Marine Ecology and Environment, 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, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. Shanghai Fengxian District Aquatic Technology Promotion Station, Shanghai 201419, China)

Abstract: This study aimed to elucidate the dynamics of phytoplankton community structure in *Litopenaeus vannamei* culture ponds, compare them with those in surrounding waters, and explore the correlation between phytoplankton and environmental factors. Samples were collected from the aquaculture ponds and the adjacent river of a *L. vannamei* farm in Fengxian District, Shanghai. Multivariate analysis was employed to examine the relationships between phytoplankton and environmental parameters. The study identified 67 genera across 7 phyla in the ponds, with Chlorophyta predominating at 51%. The dominant genera included 28 genera from 5 phyla, with *Chlorella* being the most prevalent in Bacillariophyta ($F=1.0$). The overall average phytoplankton density was 1.09×10^7 ind/L, with Chlorophyta, Cyanophyta and Bacillariophyta contributing 47%, 30% and 11%, respectively. Positive correlation were observed between the phytoplankton community structure and levels of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and chemical oxygen demand (COD). In the adjacent river, 7 phyla and 56 genera were detected with Chlorophyta account for 46%, among which 6 phyla and 26 genera were dominant with *Cryptococcus* and *Cryptomonas* being the dominant genera. The average phytoplankton density was 1.18×10^5 ind/L, with Cryptophyta, Bacillariophyta and Chlorophyta comprising 46%, 27% and 13%, respectively. The river's phytoplankton structure was primarily influenced by the abundance of colonies and rotifers. The pond's phytoplankton density was significantly higher and more complex than that of the river, with *Microcystis* blooms posing a risk to the healthy of *L. vannamei* during September and October. This necessitates close monitoring of TN, TP, and organic matter levels. The study thus highlights the differences in phytoplankton community structure between shrimp culture system under artificial intervention and natural ecosystem.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; culture pond; environmental factors; phytoplankton; multidistance analysis method

Corresponding author: JIANG Min. E-mail: mjiang@shou.edu.cn

Funding projects: Shanghai Industrial Technology System Construction Project [Agricultural Reserch System of Shanghai, China (2022) No.5]; Shanghai Agriculture Applied Technology Development Program [Agricultural Reserch System of Shanghai, China (2019) No.3-5]; Guangdong Province key Areas of Research and Development Program (2020B0202010009)