

DOI: 10.12264/JFSC2024-0234

池塘循环水养殖系统净化单元对水体浮游植物的影响

郑颖强^{1,2}, 代梨梨², 张辉², 彭亮², 陶玲², 李谷², 柴毅¹, 廖咏玲¹

1. 长江大学园艺园林学院, 农学院, 湖北 荆州 434025;
2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 湖北 武汉 430223

摘要: 为研究养殖水体净化对浮游植物群落结构和多样性的影响, 本研究利用 3 组池塘循环水养殖系统, 即复合池塘循环水养殖系统(A)、稻田-鱼塘循环水养殖系统(B)、组合湿地-池塘循环水养殖系统(C), 定量分析了水体浮游植物经净化单元处理的变化规律。3 组系统对不同污染物质的祛除效果存在差异, 其中高锰酸钾指数、总氮、悬浮物祛除效果均表现为 A>B>C。相比池塘进水, A、B、C 系统出水 Chl a 浓度分别降低 52.08%、67.61%、27.06%。研究期间共鉴定出浮游植物 7 门 138 种, 均以绿藻门、蓝藻门、硅藻门为主。不同系统浮游植物物种数存在差异, 但优势类群及其优势度变化差异不大。相比进水, A 系统和 B 系统净化单元不同浮游植物类群密度和生物量均大幅降低, 并且藻类祛除率沿净化单元断面呈增加趋势, C 系统净化单元各样点浮游植物密度波动较大。总体而言, 不同系统净化单元对浮游植物各类群的影响并无明显差异。3 种系统净化单元浮游植物多样性相比进水均出现增加, 其中 A 系统和 B 系统净化区 *H'* 指数和 *J'* 指数值相比进水出现显著升高($P<0.05$)。Pearson 相关性分析和冗余分析表明各系统浮游植物密度与水体总磷、总氮、高锰酸钾指数等因子呈显著正相关关系($P<0.05$), 但不同系统浮游植物影响因子存在差异。本研究揭示出养殖水体净化会对浮游植物群落造成重要影响, 通过优化净化单元环境, 可能有助于提高污染物质以及浮游植物净化效果。

关键词: 池塘; 循环水养殖系统; 净化单元; 浮游植物; 水产养殖

中图分类号: S959

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)12-1497-14

池塘养殖作为我国最主要的淡水养殖方式^[1], 对保证我国乃至全世界水产品供给都发挥着重要作用^[2]。然而, 传统池塘养殖由于采用开放式养殖方式^[3], 过量投饵容易造成水质污染、环境退化, 进而引起病害暴发, 导致水产品品质下降和食品安全问题^[4]。池塘循环水养殖通过增加净化单元对养殖尾水进行处理, 经处理后的水再流入池塘用于养殖, 实现了尾水的循环利用, 不仅节约水资源, 还可以减少水产养殖污染, 提高水产品品质, 被认为是一种极具发展前景的绿色水产养殖方式^[5-6]。然而, 池塘循环水养殖技术还处于起步阶段, 主要借助工厂化养殖和污水处理手段, 依靠基质过滤和微生物分解转化来实现养殖尾水中

污染物质的祛除, 目前关于池塘循环水养殖技术的研究多关注不同水质净化模式对污染物质的祛除效果^[7], 还很少有研究关注池塘循环水系统对养殖水体中浮游植物的影响。

浮游植物是养殖池塘中一种极其重要的生物类群, 可以有效祛除水体小分子有机物、氮磷等营养物以及重金属等污染物, 并作为重要初级生产者在保持养殖水体生态系统平衡中发挥重要作用^[8]。在池塘循环水养殖系统中, 浮游植物会随水流一起循环, 并在净化单元中接受处理。虽然已有研究发现经净化处理后的养殖池塘尾水叶绿素 a 浓度和藻类密度下降^[9], 但还很少有研究报导养殖水体浮游植物经净化单元处理后的变化特征

收稿日期: 2024-08-12; 修订日期: 2024-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20A2010 和 31902378); 国家大宗淡水鱼产业技术体系项目(CARS-45-22).

作者简介: 郑颖强(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为池塘循环水养殖. E-mail: zyq1790934955@outlook.com

通信作者: 柴毅, 教授, 研究方向为水域生态环境保护与修复. E-mail: chaiyi123456@126.com

及影响规律。本研究利用 3 套不同的池塘循环水养殖系统, 分析了净化单元不同位点浮游植物的变化规律, 研究了池塘循环水养殖系统净化单元对水体浮游植物的影响规律及可能的机制, 研究结果能够为改良该系统的水质调控效果提供依据, 并促进进一步研发基于浮游植物的池塘循环水水质调控技术。

1 材料与方法

1.1 池塘循环水养殖系统

实验系统包括 3 组池塘循环水养殖系统, 分别为复合池塘循环水养殖系统^[10](系统 A)、稻田-鱼塘循环水养殖系统^[11](系统 B)、组合湿地-池塘循环水养殖系统^[12](系统 C), 均位于中国水产科学研究院长江水产研究所荆州窑湾基地, 已连续

运行多年。3 组系统均主要由养殖单元、净化单元和连接单元组成(图 1)。养殖单元为大小相近的养殖池塘, 主养草鱼, 套养适量鲢鳙。连接单元为涵管和沟渠, 用于将池塘尾水输送到净化单元, 以及将净化单元出水输送回池塘。不同池塘循环水养殖系统独立运行, 养殖单元和净化单元设置基本相同, 但净化单元存在差异, 其中系统 A 净化单元为一组组合人工湿地, 系统 B 为稻田-生态沟渠, 系统 C 为一组上行流湿地, 3 组净化单元具体信息见先前报导^[13-15]。实验期间, 养殖池塘投喂和管理方式基本相同。实验之前, 各系统净化单元连续稳定运行一个月, 运行水力负荷分别为 0.41、0.23、1.38 m³/(m²·d), 水力停留时间约为 9.86、5.17、2.73 h。待系统出水稳定后, 开始定期采样分析。

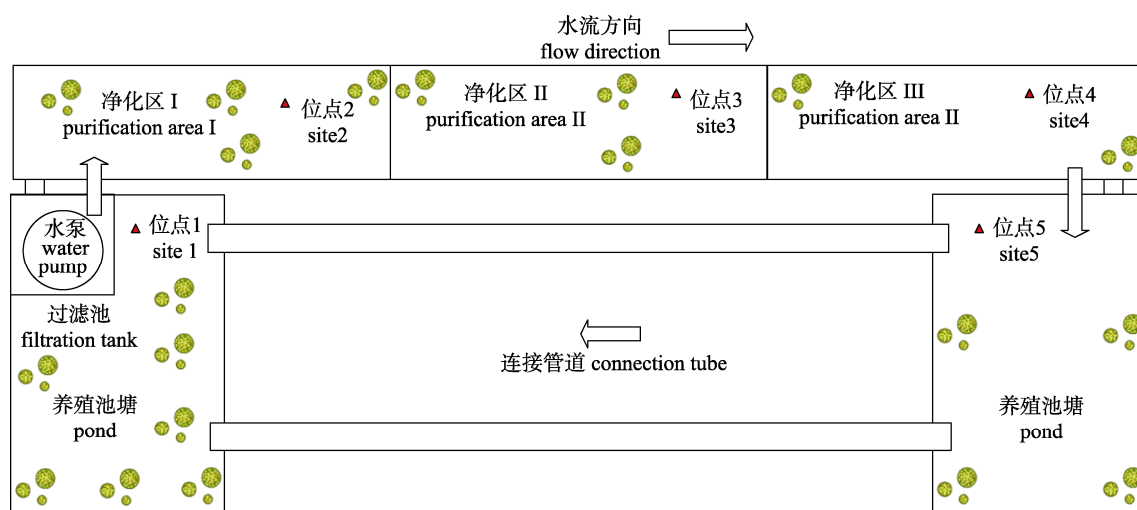


图 1 池塘循环水养殖系统运行示意图

Fig. 1 Schematic diagram illustrating the operation of recirculating pond aquaculture systems

1.2 采样点设置与样品采集

在各系统进水和出水口处各设置一个采样点(分别标记为 1 和 5), 另外在各系统净化单元沿水流方向各设置 3 个采样点(分别标记为 2、3、4), 分别于 2023 年 8—10 月每半月左右采集浮游植物和水体样品。每次采样时取同一单元内 3 个样品混合成一个样用于分析。其中, 水质指标样品于水面下 0.3 m 处采集且干扰采样点沉积物-水界面, 用于定性分析的浮游植物样品使用 25#浮游生物网在离表层水 0.5 m 处呈“∞”字形缓慢拖曳采集,

并用 4%中性甲醛进行固定。浮游植物定量样品通过采水器于水面下 0.5 m 处采集, 并加入 15 mL 鲁哥试剂固定, 所得样品静置 48 h 后, 采用虹吸法将样品浓缩至 50 mL^[16]。

1.3 水环境指标测定

水温(WT)和溶解氧(DO)浓度利用(YSI ProPlus)手持式溶解氧仪现场测定。总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)和叶绿素(Chl a)等指标按照《水和废水监测分析方法》测定^[17]。

pH 用梅特勒台式 pH 计(FiveEasy Plus™)测定, 利用便携式浊度计(聚创环保, JC-WGZ-1B 型)测定水体浊度(TUR)和悬浮物(TSS)浓度。

1.4 浮游植物鉴定与分析

取浓缩后的 0.1 mL 样品在 40×10 倍标准光学显微镜(萨伽 SG50)下进行浮游植物种类鉴定和计数, 浮游植物尽量鉴定到种, 每个样品计数 2~3 次, 每次计数 100 个视野, 并取平均值作为浮游植物数量。根据细胞体积测定计算浮游植物生物量^[18]。

1.4.1 浮游植物密度的计算 水样中浮游植物的密度(M)计算公式如下^[19]:

$$M=C/(F_s \times F_n) \times V/U \times P_n \quad (1)$$

式中, C 为计算框的面积, mm^2 ; F_s 为每个视野的面积, mm^2 ; F_n 为视野个数; V 为采集的每升样品浓缩之后的体积, mL; U 为计数框的体积, mL; P_n 为单计数框中的细胞数量, 个/mL。

1.4.2 生物多样性指数计算 基于香农威纳(Shannon-Wiener)指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)、Margalef 丰富度指数(D)、Mcnaughton 优势度指数(Y)^[20]对浮游植物多样性进行分析^[21]。计算公式为:

$$H'=-\sum(N_i/N)\ln(N_i/N) \quad (2)$$

$$J=H'/\ln S \quad (3)$$

$$D=(S-1)/\ln(N) \quad (4)$$

$$Y=N_i/N \times f_i \quad (5)$$

式中, N_i 为物种个体数, S 为物种数, N 为所有物种总数量, f_i 为第 i 种浮游植物在各采样断面的出现频率。为了方便计算和分析, 本研究将 $Y \geq 0.02$ 的物种定义为优势种^[22]。

1.5 数据处理与分析

通过 Excel 2021 和 Origin 2022 软件完成基础数据处理、多样性指数计算及图表制作、SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和统计分析。分析前对浮游植物密度值和各环境因子(pH 无需转换)进行 $\log_{10}(x+1)$ 转换使之呈正态分布^[23], 使用 CANOCO 5 软件进行冗余分析(RDA)以探究影响浮游植物群落结构与环境因子之间的关系, 并进行显著性检验和作图。采用 Origin 2022 对浮游植物物种和环境因子进行皮尔逊(Pearson)相关性分析。

2 结果与分析

2.1 净化单元水质净化效果

实验期间, 池塘循环水养殖系统进出水及净化单元水质变化情况见表 1。单因素方差分析表明 3 个系统水温、pH 基本保持一致, 组间差异不显著, 但 A 系统进出水 TP、 NH_4^+-N 、Chl a 浓度均值高于 B、C 系统, 并且 B 系统 TP、TN、 NH_4^+-N 、COD、 NO_3^--N 浓度低于 C 系统。各净化单元对 COD、TP、TN、TSS 均有较好的祛除效果, 其中在 A 系统中其平均祛除率分别为 62.79%、27.61%、76.98%、82.59%, B 系统中分别为 54.13%、67.31%、61.63%、68.64%, C 系统中分别为 14.30%、11.37%、10.80%、15.49%。各系统对 Chl a 也有较好的祛除率, 相比池塘进水, A、B、C 系统出水 Chl a 浓度分别降低 52.08%、67.61%、27.06%。

2.2 净化单元对浮游植物群落结构和多样性的影响

2.2.1 净化单元对浮游植物组成的影响 研究期间在 3 个系统中共鉴定出浮游植物 7 门 138 种(表 2), 其中绿藻门(Chlorophyta)种类数最高, 为 52 种, 占总物种数 37.68%, 硅藻门(Bacillariophyta)和蓝藻门(Cyanophyta)种类数次之, 分别为 29 种和 18 种, 占总物种数 21.01%和 13.04%。A 系统、B 系统和 C 系统各鉴定出浮游植物 104 种、107 种和 112 种。在 A 系统, 净化单元浮游植物总物种数相比进水明显降低, 其中绿藻门和裸藻门物种数均出现降低, 出水浮游植物总物种数相比进水减少 9.86%。C 系统净化单元浮游植物总物种数相比进水出现增加, 其中蓝藻门和硅藻门种类数均增加, 出水浮游植物总物种数相比进水增加 11.94%。B 系统浮游植物总物种数变化不大, 但相比进水, 净化单元蓝藻门种类数出现增加, 而硅藻门种类数减少。

2.2.2 净化单元对浮游植物优势种的影响 研究期间, A、B、C 系统中 $Y \geq 0.02$ 的浮游植物分别为 6 种、7 种、11 种(表 3), 其中 A 系统绿藻门 9 种、蓝藻门 3 种, B 系统绿藻门 3 种、蓝藻门 4 种, C 系统绿藻门 4 种、蓝藻门 5 种、硅藻门 1 种。

表 1 池塘循环水养殖系统水质变化情况
Tab. 1 Variations of water quality in different recirculating pond aquaculture systems

位点 site	溶解氧/ (mg/L) dissolved oxygen (DO)	pH	水温/℃ temperature (WT)	总氮/ (mg/L) total nitrogen (TN)	总磷/(mg/L) total phosphorus (TP)	氨氮/ (mg/L) NH ₄ -N	硝态氮/ (mg/L) NO ₃ -N	亚硝态氮/ (mg/L) NO ₂ -N	高锰酸盐指数/ (mg/L) permanganate index (COD)	叶绿素 a/ (μg/L) Chl a	悬浮物/ (mg/L) suspended solids (TSS)	浊度 turbidity (TUR)
A1	7.93±0.93 ^a	8.16±0.16 ^a	24.98±3.99 ^a	4.95±1.43 ^a	1.03±0.23 ^a	0.60±0.32 ^b	0.03±0.01 ^{ab}	0.04±0.02 ^a	19.12±1.76 ^a	271.09±98.38 ^a	49.97±12.24 ^a	49.70±12.5 ^a
A2	1.31±0.58 ^c	7.64±0.41 ^{ab}	25.20±4.15 ^a	2.18±0.64 ^b	0.72±0.08 ^b	1.43±0.53 ^a	0.03±0.01 ^a	0.02±0.02 ^{ab}	11.89±2.43 ^b	46.81±49.33 ^{bc}	25.23±23.92 ^b	27.20±23.99 ^b
A3	1.35±0.44 ^c	7.62±0.42 ^{ab}	25.12±4.17 ^a	1.83±0.62 ^b	0.64±0.12 ^b	1.18±0.64 ^{ab}	0.02±0.01 ^{abc}	0.01±0.01 ^b	9.65±2.87 ^{bc}	7.37±14.02 ^c	21.79±20.79 ^b	22.27±20.33 ^b
A4	1.78±0.65 ^c	7.60±0.44 ^b	25.10±4.17 ^a	1.41±0.46 ^b	0.63±0.13 ^b	0.98±0.71 ^{ab}	0.02±0.01 ^{bc}	0.01±0.01 ^b	7.53±2.73 ^c	1.08±0.91 ^c	9.51±16.14 ^b	12.44±11.39 ^b
A5	3.54±1.35 ^b	7.67±0.4 ^{ab}	24.78±3.92 ^a	1.14±0.41 ^b	0.75±0.31 ^b	0.66±0.37 ^b	0.01±0.00 ^c	0.00±0.00 ^b	7.11±1.47 ^c	129.89±137.25 ^b	8.70±8.81 ^b	4.49±4.93 ^b
B1	7.80±1.16 ^{ab}	8.08±0.31 ^a	25.00±4.01 ^a	4.03±0.47 ^a	0.52±0.11 ^a	0.53±0.28 ^a	0.03±0.04 ^a	0.01±0.01 ^a	19.93±5.37 ^a	294.18±68.87 ^a	81.41±30.18 ^a	80.07±29.02 ^a
B2	6.31±1.21 ^a	8.03±0.27 ^a	24.64±4.11 ^a	3.31±0.56 ^b	0.42±0.05 ^b	0.53±0.26 ^a	0.01±0.00 ^a	0.02±0.02 ^a	13.93±2.65 ^b	230.4±159.51 ^a	38.65±12.65 ^b	35.79±10.42 ^b
B3	6.61±0.98 ^{bc}	7.92±0.33 ^a	24.64±4.13 ^a	2.67±0.50 ^b	0.35±0.11 ^b	0.46±0.28 ^a	0.01±0.00 ^a	0.01±0.02 ^a	12.96±2.64 ^b	185.59±46.2 ^{ab}	25.11±13.02 ^b	25.61±10.76 ^b
B4	7.58±0.43 ^{abc}	8.02±0.29 ^a	24.66±4.04 ^a	1.65±0.45 ^c	0.20±0.05 ^c	0.43±0.29 ^a	0.01±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	8.92±2.29 ^b	96.84±42.83 ^b	25.19±7.51 ^b	23.03±4.98 ^b
B5	8.50±0.99 ^a	8.12±0.31 ^a	24.66±4.06 ^a	1.55±0.50 ^c	0.17±0.04 ^c	0.41±0.30 ^a	0.01±0.01 ^a	0.00±0.00 ^a	9.14±4.43 ^b	95.30±102.06 ^b	25.53±10.8 ^b	25.36±10.29 ^b
C1	6.21±0.77 ^a	8.07±0.20 ^a	24.28±4.15 ^a	5.01±0.91 ^a	0.59±0.10 ^a	0.59±0.35 ^a	0.07±0.04 ^a	0.02±0.02 ^a	16.38±1.19 ^a	213.60±46.45 ^a	45.58±24.22 ^{ab}	62.67±22.08 ^a
C2	7.25±1.26 ^a	8.21±0.09 ^a	24.2±4.07 ^a	5.01±0.71 ^a	0.6±0.07 ^a	0.58±0.34 ^a	0.07±0.04 ^a	0.02±0.02 ^a	16.25±0.93 ^a	178.90±97.74 ^a	63.06±17.01 ^a	65.27±15.39 ^a
C3	6.54±1.08 ^a	8.13±0.18 ^a	24.24±4.07 ^a	4.28±2.27 ^a	0.57±0.09 ^a	0.54±0.33 ^a	0.07±0.04 ^a	0.02±0.02 ^a	14.57±1.45 ^{ab}	144.05±51.62 ^a	48.23±13.32 ^{ab}	47.54±13.34 ^{ab}
C4	5.75±1.65 ^a	8.08±0.22 ^a	24.24±3.96 ^a	4.87±0.56 ^a	0.52±0.08 ^a	0.57±0.34 ^a	0.07±0.03 ^a	0.02±0.02 ^a	14.16±1.71 ^b	152.60±52.52 ^a	37.13±11.77 ^b	39.73±12.68 ^b
C5	6.70±1.16 ^a	8.13±0.21 ^a	24.34±4.06 ^a	4.46±0.72 ^a	0.52±0.08 ^a	0.56±0.38 ^a	0.08±0.04 ^a	0.03±0.03 ^a	14.03±1.8 ^b	155.81±101.85 ^a	38.52±13.83 ^b	39.77±13.71 ^b

注: 同列不同小写字母表示位点间差异显著 ($P<0.05$).
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among sites ($P<0.05$).

表 2 池塘循环水养殖系统浮游植物种类组成

Tab. 2 Species composition of phytoplankton in different recirculating pond aquaculture systems

位点 site	硅藻门 Bacillariophyta	甲藻门 Dinophyta	蓝藻门 Cyanophyta	裸藻门 Euglenophyta	绿藻门 Chlorophyta	隐藻门 Cryptophyta	黄藻门 Xanthophyta	合计 total
A1	15	0	10	5	38	2	1	71
A2	13	0	12	4	29	2	0	60
A3	19	0	11	3	27	1	0	61
A4	15	0	11	2	19	2	0	49
A5	15	0	12	2	33	2	0	64
B1	23	0	9	5	32	1	0	70
B2	21	0	15	8	42	2	0	88
B3	18	0	11	5	32	1	0	67
B4	19	0	12	3	34	1	0	69
B5	16	0	10	5	35	1	0	67
C1	14	0	11	5	35	2	0	67
C2	19	1	14	3	39	1	2	79
C3	19	0	10	3	32	1	0	65
C4	19	0	17	5	35	3	2	81
C5	17	1	15	4	36	1	1	75

表 3 池塘循环水养殖系统浮游植物主要优势种及优势度指数

Tab. 3 Dominant species and their dominance indexes of phytoplankton in recirculating pond aquaculture systems

[illegible]

主要类群包括绿藻门的普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)等, 蓝藻门的微小色球藻(*Chroococcus minutus*)、细小平裂藻(*Merismopedia minima*)、点形平裂藻等。不同系统优势类群和优势度变化差异不大, 表明池塘循环水养殖系统对浮游植物优势物种影响较小。

2.2.3 净化单元对浮游植物细胞密度的影响 研究期间 A、B、C 系统浮游植物密度分别在 $1.16\times 10^6\sim 264.54\times 10^6$ 、 $56.47\times 10^6\sim 448.11\times 10^6$ 、 $77.60\times 10^6\sim 289.25\times 10^6$ cells/L 之间, 主要来自绿

藻、蓝藻、硅藻门, 其在 3 个系统中分别占浮游植物总密度的 64.09%、33.23%、2.41%; 62.95%、34.22%、2.63%; 以及 44.84%、44.56%、6.76% (图 2a)。在 A 系统, 净化单元对浮游植物不同类群均有很好的祛除效果, 除甲藻门外, 各类群祛除率均在 90%以上, 并且藻类祛除率沿净化单元断面(采样点 2~4)呈逐渐增加趋势。在 B 系统, 净化单元中浮游植物各类群祛除率总体也呈增加趋势, 除甲藻门和黄藻门外, 藻类祛除率在 12.2%~70.4%之间。在 C 系统, 净化单元各样点浮游植物

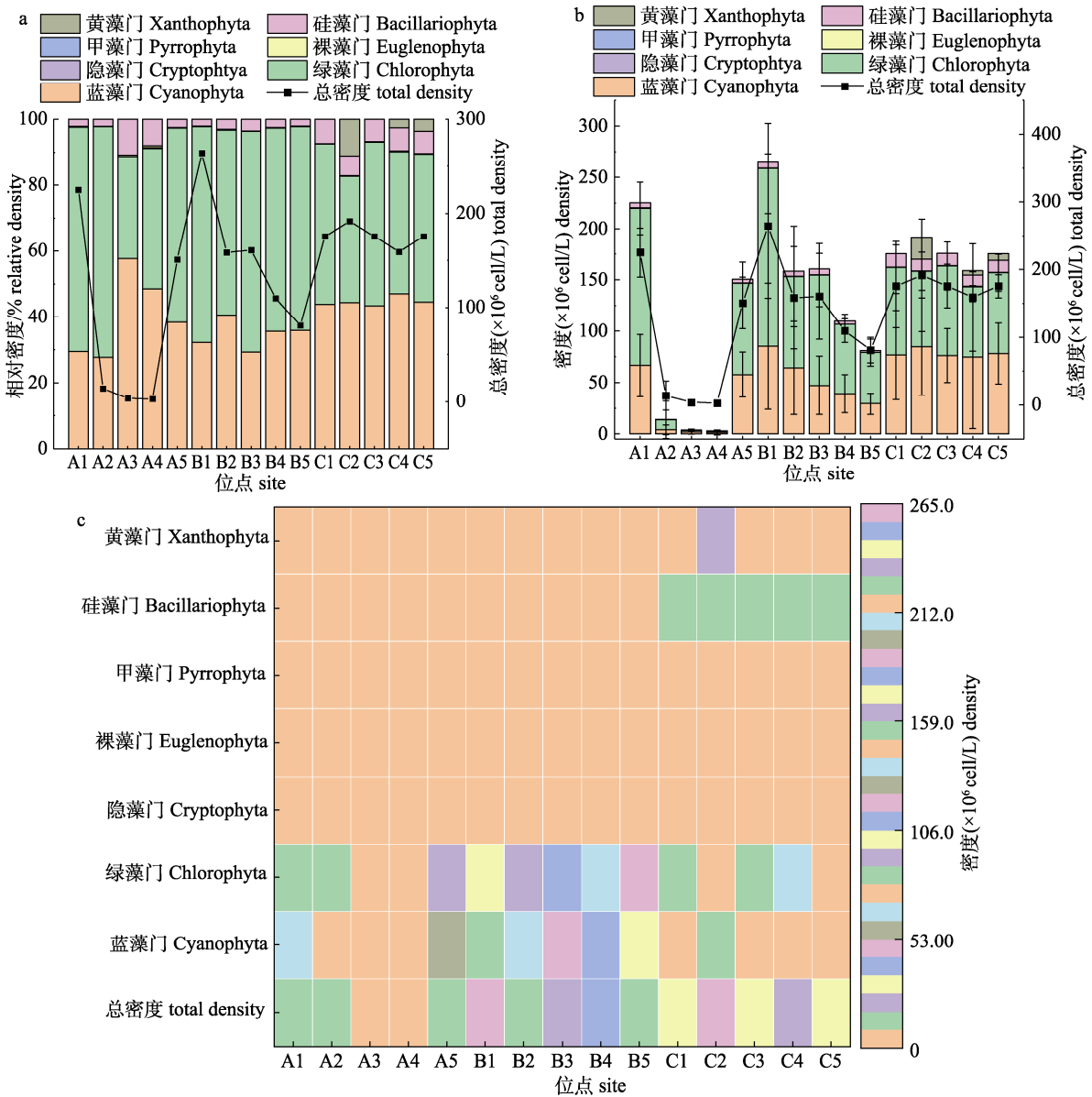


图 2 池塘循环水养殖系统水体浮游植物类群相对密度(a)、密度变化(b)及密度热图(c)
Fig. 2 Relative abundances (a), density changes (b) and density heatmap (c) of phytoplankton in water of recirculating pond aquaculture systems

密度波动较大, 部分样点浮游植物密度相比进水出现一定程度增加, 其中隐藻门最高祛除率达到 38.5% (图 2b)。总体而言, 不同系统净化单元对浮游植物各类群密度的影响并无明显差异(图 2c)。

2.2.4 净化单元对浮游植物生物量的影响 研究期间 A、B、C 系统浮游植物生物量分别在 0.23~46.66、8.90~102.02、14.99~138.46 mg/L 之间, 主要来自绿藻、蓝藻、硅藻门, 其在 3 个系统中分别占浮游植物总生物量的 18.67%、22.15%、49.99%; 14.80%、30.69%、57.15%; 以及 9.84%、6.88%、70.83% (图 3a)。在 A 系统中, 净化单元对浮游植物生物量均有很好的降低效果, 除甲藻

门外, 各类群生物量降低率均在 90%以上, 并且生物量下降沿净化单元断面(采样点 2~4)呈逐渐增加趋势。在 B 系统, 净化单元中浮游植物各类群生物量下降率总体也呈增加趋势, 除甲藻门、硅藻门和黄藻门外, 生物量下降率在 22.32%~54.22%之间。在 C 系统, 净化单元各样点浮游植物生物量波动较大, 部分样点浮游植物生物量相比进水出现一定程度增加(图 3b)。与浮游植物密度变化较为一致, 总体而言, 不同系统净化单元对浮游植物各类群生物量的影响并无明显差异(图 3c)。

2.2.5 净化单元对浮游植物生物多样性指数的影响 相较于进水, 各系统净化单元浮游植物多样

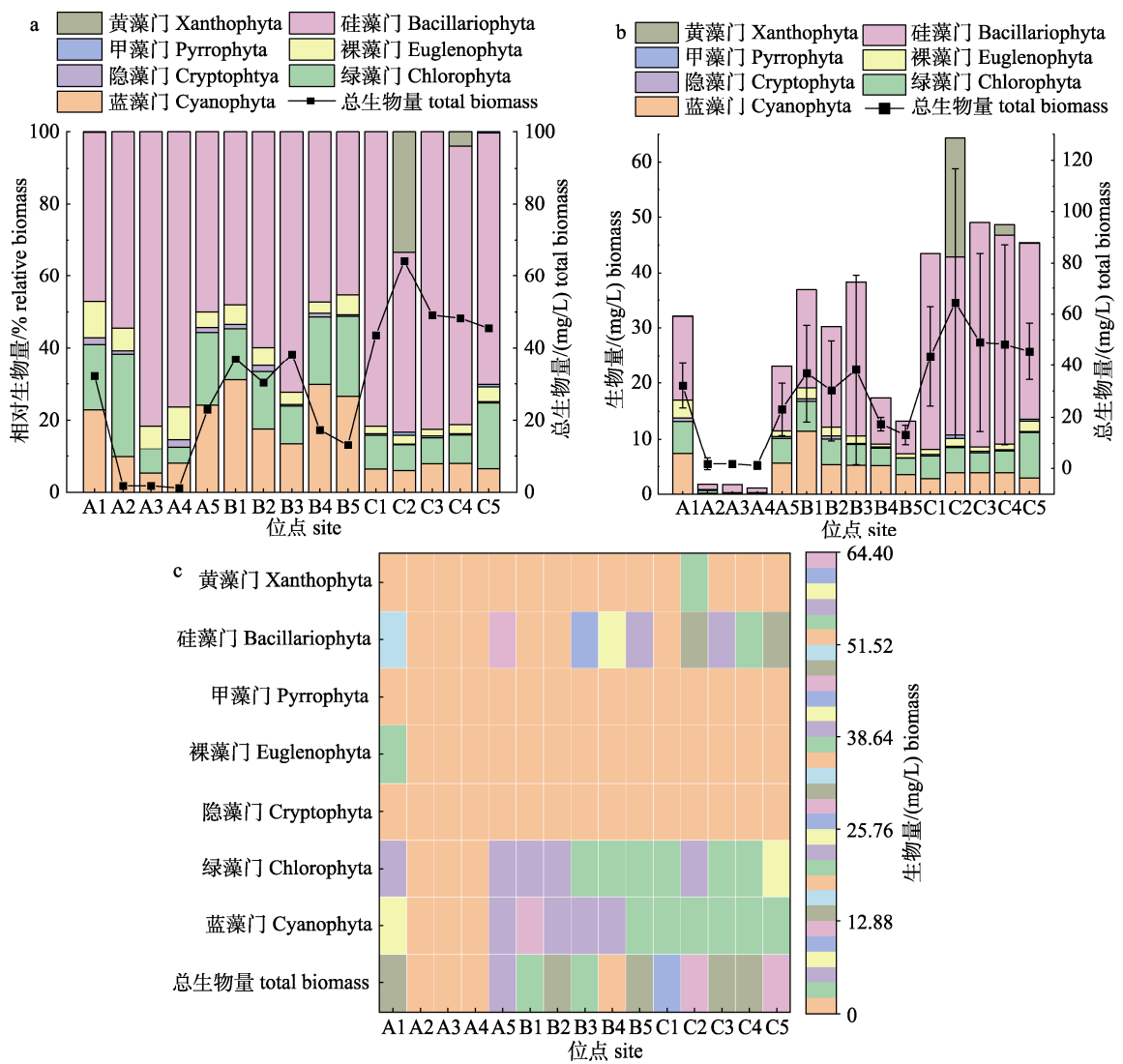


图 3 池塘循环水养殖系统水体浮游植物相对生物量(a)、生物量变化(b)及生物量热图(c)
Fig. 3 Relative biomass (a), biomass changes (b) and biomass heatmap (c) of phytoplankton in water of recirculating pond aquaculture systems

性指数均出现一定程度的升高(图 4a)。在 A 系统,多样性指数峰值出现在 A3 点,其 H' 和 J 指数值相比进水出现显著升高(分别为 $P<0.05$ 和 $P<0.01$)。在 B 系统,浮游植物多样性指数峰值出现在 B2 点,其 H' 、 J 和 D 指数值相比对照均出现显著升高(分别为 $P<0.05$ 、 $P<0.05$ 和 $P<0.01$)。在 C 系统,浮游植物多样性指数值波动较大,不同样点间差异不显著,但 C2 点 H' 、 J 和 D 均值均明显高于 C1 点(图 4b)。

2.3 池塘循环水系统浮游植物影响因素

2.3.1 浮游植物与水环境因子相关性关系 分别对 3 个系统浮游植物各类群密度、 H' 、 J 、 D 、Chl a

与环境因子进行 Pearson 相关性分析,发现在 A、B 系统中,浮游植物不同类群密度与水环境因子关系较为一致,并且与浮游植物总密度相关因素相同,主要与 TP、TN、COD 呈显著正相关(图 5a, 5b)。另外, A 系统浮游植物各类群密度及 Chl a 浓度与 DO 呈显著正相关,而 B 系统浮游植物各类群密度及 Chl a 浓度与 TSS 和 TUR 呈显著正相关。在 C 系统中,浮游植物各类群受水质因子影响较小,其中硅藻门密度及 Chl a 浓度与 DO、COD、TSS 呈显著正相关,而与 WT、pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著负相关(图 5c)。

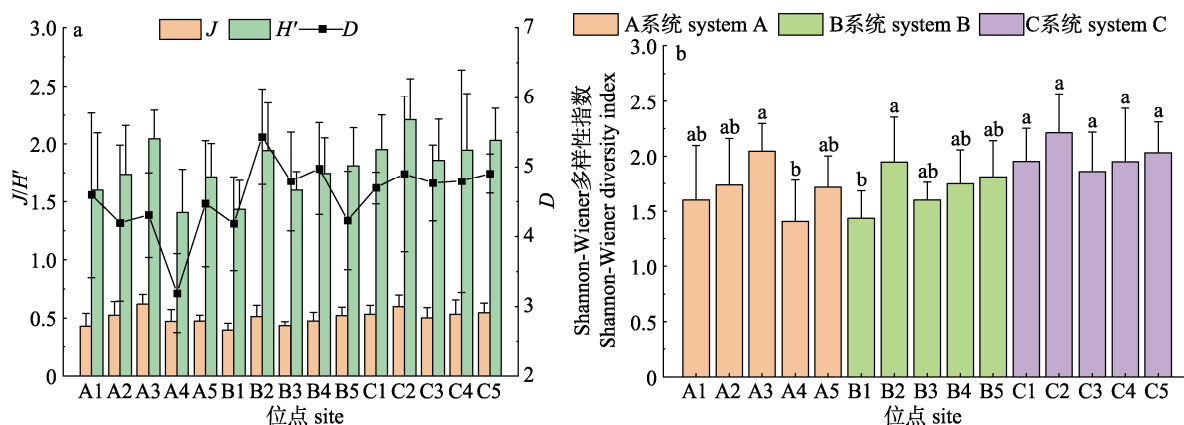


图 4 池塘循环水养殖系统水体浮游植物多样性指数变化(a)及差异(b)

不同小写字母表示差异显著($P<0.05$).

Fig. 4 Variations (a) and differences (b) of phytoplankton diversity index in recirculating pond aquaculture systems
Different lowercase letters indicate significant differences at ($P<0.05$).

2.3.2 浮游植物与水环境因子冗余分析 应用冗余分析(RDA)探究不同系统浮游植物群落结构与水环境因子的关系。系统 A、B、C 两轴总解释率分别为 81.48%、78.80%、52.65%,其中第一轴环境因子与浮游植物密度相关性分别为 0.9095、0.9343、0.7758,第二轴环境因子与浮游植物密度相关性分别为 0.9159、0.8834、0.7369。在 A、B 系统中,浮游植物各类群与水环境因子主要呈正相关,主要影响因子包括 DO、Chl a、TP、WT、COD(图 6a, 6b)。在 C 系统中,除 DO、COD、TSS、TUR 外,浮游植物各类群与主要水环境因子均呈负相关关系,包括 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 等(图 6c)。

3 讨论

本研究分析了组合人工湿地(系统 A)、稻田-

生态沟渠(系统 B)、上行流湿地(系统 C)等 3 套净化单元对养殖水体浮游植物的影响,3 套净化单元表现出不同的污染物质祛除效果,通过对 3 组系统的对比分析,有助于揭示养殖水体净化对浮游植物的影响规律及潜在机制。

3.1 净化单元对浮游植物组成的影响规律

本研究的 3 组复合池塘循环水养殖系统中分别检出浮游植物 104 种、107 种和 112 种,高于相近地区其他池塘循环水系统^[24]和传统养殖池塘^[25]浮游植物种类数,表明长期循环水养殖可能有利于增加池塘浮游植物物种数。对净化单元不同样点浮游植物的分析发现,净化区浮游植物种类数相比进水出现明显变化,并造成出水浮游植物种类数发生变化。先前的研究已经发现循环水会对养殖系统浮游植物种类数造成影响^[24],在本研究

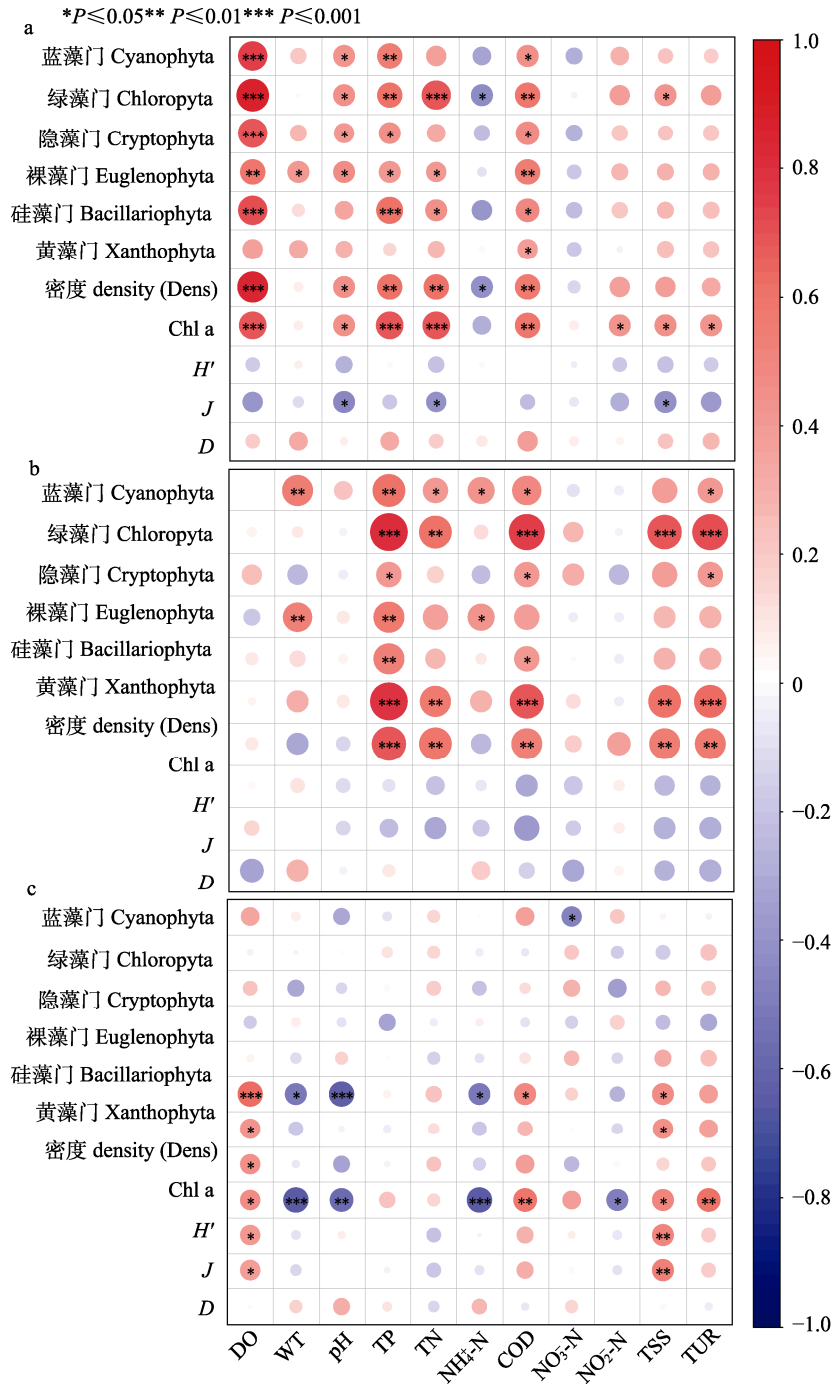


图 5 三种系统浮游植物与水环境因子相关性分析

a: A 系统, b: B 系统, c: C 系统.

Fig. 5 Correlation analyses between phytoplankton and water environmental factors in different recirculating pond aquaculture systems
a: System A; b: System B; c: System C.

中,不同系统净化单元的浮游植物种类数变化存在差异,A系统绿藻门和裸藻门物种数均出现降低,C系统蓝藻门和硅藻门种类数均增加,而B系统蓝藻门种类数出现增加,硅藻门种类数减少,

这可能与不同系统净化单元水体环境有关.A系统采用一组人工湿地进行水质净化,湿地植物生长茂盛,可能对藻类产生明显抑制作用^[10].B系统和C系统则为相对开放系统,植物间存在的较

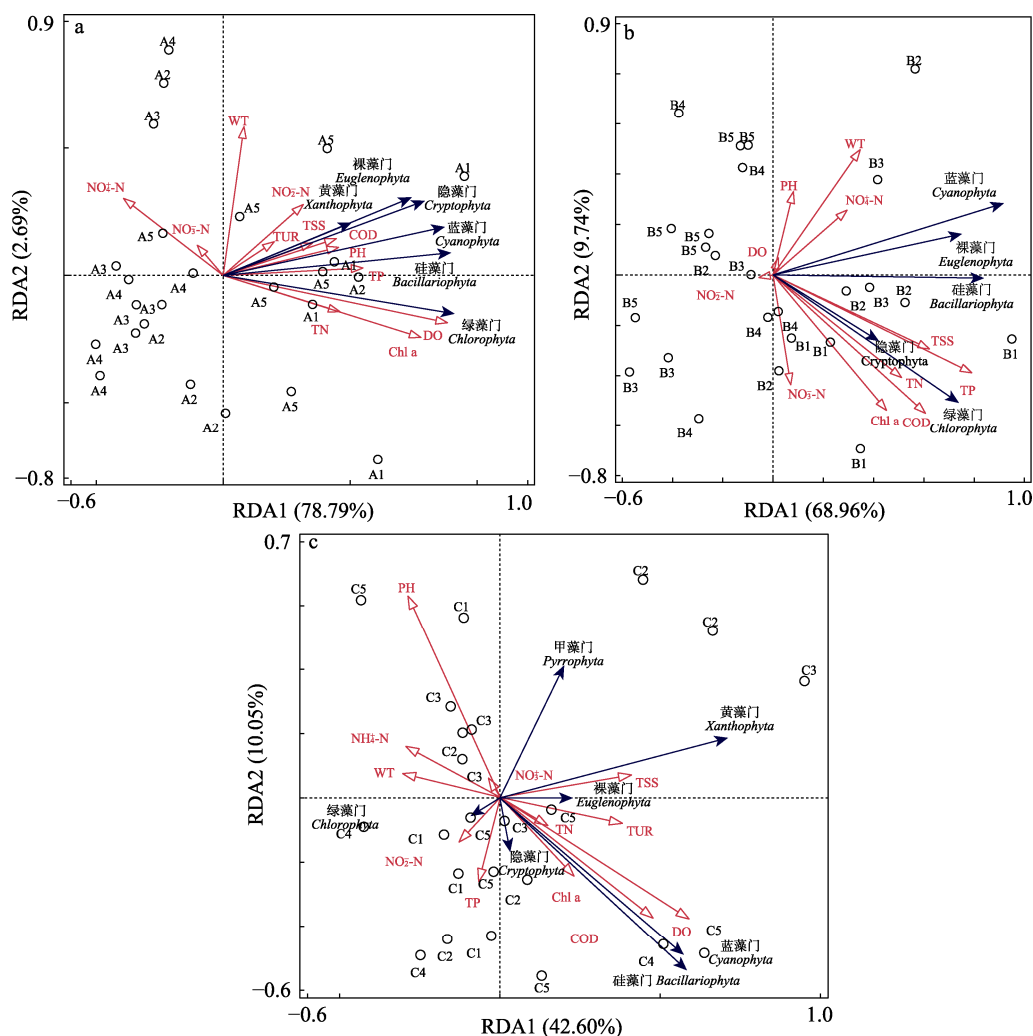


图 6 三种系统浮游植物与水环境因子 RDA 排序

a: A 系统, b: B 系统, c: C 系统.

Fig. 6 RDA ordination of phytoplankton and water environmental factors in different recirculating pond aquaculture systems
a: System A; b: System B; c: System C.

大间隙可能有利于浮游植物生长^[26]。绿藻、蓝藻、硅藻作为池塘养殖水体浮游植物重要类群,其变化可能对养殖水体具有重要影响。

本研究循环水系统中浮游植物优势类群主要为绿藻,而蓝藻门中容易在养殖池塘引起水华的微囊藻^[27]得到有效控制,说明长期循环水养殖有利于控制浮游植物种群结构,防止有害藻类爆发。Ramli 等^[28]的研究也发现循环水系统有利于控制藻类水华。通过对 3 种系统优势种比较分析发现,不同系统浮游植物优势类群差异较小,并且其优势度随时间变化不明显,说明池塘循环水养殖系统浮游植物优势类群维持稳定。相反,在传统养殖池塘中,浮游植物优势种变化较为明

显。张家卫等^[29]以传统模式养殖池作对照,研究分区集群式池塘发现优势种组间差别较明显。另一方面,考虑到 3 种系统净化单元对水体污染物质祛除效果存在较大差异,但不同净化单元对浮游植物优势度的影响差异不大,说明净化单元可能并未对浮游植物种群结构造成明显影响。

3.2 净化单元对浮游植物现存量及多样性的影响规律

本研究 3 种系统对 Chl a 均有较好的祛除率,相比池塘进水, A、B、C 系统出水 Chl a 浓度分别降低 52.08%、67.61%、27.06%,说明循环水系统能够有效滤除浮游植物,减少水体 Chl a 浓度。先前的研究也发现循环水系统能够有效降低 Chl a

浓度^[30]。不同系统净化单元对浮游植物密度和生物量祛除效果存在差异, 其中 A 系统和 B 系统藻类祛除率沿净化单元断面(采样点 2~4)呈增加趋势, 说明净化单元可实现对浮游植物的有效祛除, 但 C 系统净化单元各样点浮游植物密度和生物量波动较大, 提示净化单元水体环境对于池塘循环水养殖系统浮游植物密度和生物量可能具有作用。

对浮游植物不同类群的分析发现, 3 种系统不同浮游植物类群表现出相似的变化趋势, 其中在 A 系统和 B 系统, 浮游植物各类群密度和生物量均大幅降低, 在 C 系统, 浮游植物不同类群密度和生物量表现出相似的波动趋势, 说明不同系统净化单元对浮游植物各类群的影响并无明显差异, 进一步提示浮游植物种群结构受净化单元影响较小。目前大多数研究只关注水体处理对浮游植物总体密度和生物量的影响^[31]还较少有研究分析对浮游植物不同类群的影响。本研究发现循环水系统对池塘浮游植物不同类群的同步影响规律, 由于藻群结构稳定在维持养殖水体生态系统平衡中具有重要作用^[32], 这一发现对于指导池塘循环水养殖系统设计可能具有重要意义。

Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)、Margalef 指数(D)等常被用于评价水体质量, 是反映群落结构稳定性的主要指标^[33-34]。一般来说, 多样性指数值越高, 则浮游植物群落结构越稳定, 研究水体质量越高^[35]。许晓毅等^[36]发现河口复合生态系统净化单元有效控制了浮游植物的生长并改善了水质, 提高了浮游植物群落多样性^[37]。在本研究中, 3 种系统净化单元水体浮游植物丰富度指数、多样性指数与均匀度指数均高于进水, 说明净化单元提高了浮游植物多样性, 并进而提高了浮游植物群落结构稳定性, 这与上述研究结论相似, 进一步说明净化单元水体浮游植物群落结构稳定, 水质趋于健康。

3.3 净化单元浮游植物群落响应环境变化的可能机制

浮游植物细胞较小, 难以通过基质过滤等方式进行祛除^[38]。在本研究 C 系统中, 虽然净化单元中布置了基质颗粒, 但净化单元浮游植物密度和生物量并无明显降低, 说明基质颗粒对浮游植

物数量影响不大。相反, 在 B 系统中, 净化单元为一块稻田, 水体从稻田表面流过, 净化单元对藻类过滤作用较弱, 但浮游植物密度和生物量出现明显降低, 这说明水体环境可能是影响浮游植物密度和生物量的主要原因。确实, 在 A 系统中, 由于净化系统微生物活性较高, 对 DO 消耗较大^[10], 净化单元及出水 DO 浓度都比较低, 并可能对藻类生长造成不利影响。

本研究发现, 浮游植物不同类群与水环境因子关系较为一致, 主要与水体 TP、TN、COD 呈显著正相关, 说明净化单元水体 TP、TN、COD 等浓度降低与浮游植物密度和生物量降低间存在重要联系。已有研究发现养殖系统浮游植物对水环境因子表现出高度的敏感性^[39]。另一方面, 藻类能够高效吸收养殖水体氮、磷、有机物质^[40], 可作为水体 TP、TN、COD 等物质重要载体, 净化单元植物环境、光照条件、停留时间等变化可能影响浮游植物数量, 进而也会反过来影响 TP、TN、COD 等物质祛除效果。因此, 浮游植物对于净化单元水质净化效果可能具有重要影响。

RDA 分析发现, 3 种系统不同类群浮游植物密度随水质因子变化表现出相似的变化趋势, 进一步说明浮游植物密度受到水质因子的同步影响。但在不同系统, 浮游植物类群影响因子存在差异, 在 A、B 系统中, 浮游植物各类群与 DO、Chl a、TP、WT、COD 等主要环境影响因子均呈正相关, 这可能解释了 A、B 系统 DO 与浮游植物密度的同步下降, 而在 C 系统中, 浮游植物主要类群与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 等主要环境因子呈负相关关系, 说明不同净化单元浮游植物群落结构可能受到水质因子的不同影响^[41]。由于相比 A、B 系统, C 系统 Chl a 和各污染物质浓度祛除效率较低, 推测 C 系统水质环境可能对浮游植物群落造成了不利影响, 通过优化净化单元环境, 可能有助于提高污染物质以及浮游植物净化效果。

4 结论

本研究分析了池塘循环水养殖系统净化单元对浮游植物群落结构和多样性的影响, 发现不同净化单元对浮游植物物种数的影响存在差异, 但

对优势种及其优势度的影响不大。净化单元能够有效降低浮游植物密度和生物量,同时增加浮游植物多样性,然而对浮游植物不同类群的影响并无明显差异。此外,浮游植物群落主要受到水质环境因子的影响,通过优化净化单元环境条件,可能有助于提高污染物质以及浮游植物净化效果。本研究揭示了池塘循环水养殖系统净化单元对浮游植物群落的影响规律及可能的机制,研究结果能够为改良该系统的水质调控效果提供依据,并促进进一步研发基于浮游植物的池塘循环水水质调控技术。

参考文献:

- [1] Liu T Y, Wang X F, An S W, et al. Purification effect and water quality evaluation of tail water after standardized transformation of different ponds[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(26): 154-164. [刘婷燕, 王晓飞, 安树伟, 等. 不同池塘经标准化改造后尾水净化效果及水质评价[J]. 中国农学通报, 2023, 39(26): 154-164.]
- [2] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2022[J/OL]. 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- [3] Liu M Q, Xi Y G, Chen Q H, et al. Policy recommendations on pollution reduction and environmental management of aquaculture in China[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(1): 90-94. [刘明庆, 席运官, 陈秋会, 等. 水产养殖环境管理与污染减排的政策建议[J]. 中国环境管理, 2019, 11(1): 90-94.]
- [4] Xiao G F. Study on factors influencing the system stability of ecological ponds in recirculating aquaculture system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021. [肖耿锋. 循环水养殖系统尾水池塘生态系统稳定的影响因素探究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.]
- [5] Deng Y H, Zhang H X, Ouyang M, et al. Comparison of freshwater pond recirculating aquaculture system design and selection test - "pond captive bucket" model aquaculture test (1) [J]. Jiangxi Fishery Science and Technology, 2023(3): 29-32. [邓勇辉, 章海鑫, 欧阳敏, 等. 淡水池塘循环水养殖系统设计比选试验——“池塘圈养桶”模式养殖试验(一)[J]. 江西水产科技, 2023(3): 29-32.]
- [6] Chen S Y, Tao L, Peng L, et al. Performance of paddy field-ditch collaborative purification of tail water from pond culture[J]. Freshwater Fisheries, 2024, 54(3): 85-96. [陈思媛, 陶玲, 彭亮, 等. 稻田-沟渠协同净化池塘养殖尾水效果[J]. 淡水渔业, 2024, 54(3): 85-96.]
- [7] Peng M, Huang C C, Li L J, et al. Niche characteristics and interspecific association of dominant phytoplankton species in Lake Changhu[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1549-1563. [彭梦, 黄城晨, 李立杰, 等. 长湖浮游植物优势种生态位特征及种间联结性分析[J]. 生态学报, 2024, 44(4): 1549-1563.]
- [8] He X H. Discussion on the construction of pond circulating aquaculture system and its ecological purification effect [J]. South China Agriculture, 2021, 15(15): 109-110. [何学海. 池塘循环水养殖系统构建及生态净化效果浅谈[J]. 南方农业, 2021, 15(15): 109-110.]
- [9] Wang L Y, Min W W, Wang J L, et al. Phytoplankton community structure characteristics and its influencing factors in container recirculating aquaculture system[J]. Fishery Modernization, 2022, 49(4): 26-36. [王龙燕, 闵文武, 王金乐, 等. 集装箱循环水养殖系统中浮游植物群落结构特征及影响因素[J]. 渔业现代化, 2022, 49(4): 26-36.]
- [10] Song J H, Li G, Zhang S Y, et al. Metabolic characteristics and functional diversity of carbon source in microflora of ponds with recirculating aquaculture system[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(9): 305-309. [宋景华, 李谷, 张世羊, 等. 循环水养殖池塘微生物群落的碳源代谢特性和功能多样性[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(9): 305-309.]
- [11] Tao L, Peng G G, Chen S Y, et al. Effect of recycling fishpond wastewater in paddy wetland[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2022, 46(10): 1466-1474. [陶玲, 彭格格, 陈思媛, 等. 稻田湿地循环利用池塘养殖尾水效果[J]. 水生生物学报, 2022, 46(10): 1466-1474.]
- [12] Liu L, Tao L, Dai L L, et al. Performance of the pond recirculating aquaculture system constructed based on combined constructed wetland[J]. Freshwater Fisheries, 2023, 53(1): 92-101. [柳磊, 陶玲, 代梨梨, 等. 基于组合湿地构建的池塘循环水养殖系统运行效果[J]. 淡水渔业, 2023, 53(1): 92-101.]
- [13] YAO Y D, LI G, TAO L, et al. Analysis of microbial community structure in an integrated pond re-circulating aquaculture system[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(2): 407-415. [姚延丹, 李谷, 陶玲, 等. 复合池塘循环水养殖系统微生物群落结构分析[J]. 中国水产科学, 2011, 18(2): 407-415.]
- [14] CHEN S Y. Construction and function of the integrated ecosystem of reservoir, Aquaculture pond and paddy field(IERAP)[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023. [陈思媛. 水源地—鱼池—稻田复合生态系统构建与功能解析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.]
- [15] LIU L. Nitrogen and Phosphorus Budget of Combined Constructed Wetland-Pond Recirculating Aquaculture System[D]. Beijing Chinese Academy of Agricultural Sciences Thesis. 2022. [柳磊. 组合湿地-池塘循环水养殖系统氮磷收支研究[D]. 北京: 中国农业科学院. 2022.]
- [16] Zhang Z S, Huang X F. Methods of Freshwater Plankton Research[M]. Beijing: Science Press, 1991. [章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [17] Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Method, State Environmental Protection Administration. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Method[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社 2002.]
- [18] Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of China[M]. Beijing: Science Press, 2006. [胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系

- 统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [19] Zhao W. Hydrobiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. [赵文. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.]
- [20] Qin H J, Shi Q Y, Zhi G Q, et al. Phytoplankton community characteristics and environmental impact factors in Tanglang River-Pudu River basin[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(3): 867-878. [秦海娇, 史秋月, 支国强, 等. 螳螂川—普渡河流域浮游植物群落特征及环境影响因子[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(3): 867-878.]
- [21] Wang M M, Wang W, Gu Y, et al. Impact of wetland restoration on phytoplankton community structure in Yangcheng Lake, China[J]. Journal of Aquaculture, 2024, 45(6): 37-43, 56. [王明明, 王卫, 顾越, 等. 阳澄湖湿地修复对浮游植物群落结构的影响研究[J]. 水产养殖, 2024, 45(6): 37-43, 56.]
- [22] Tang Y, Zheng Y H, Liu J H, et al. Analysis on community structure and diversity of phytoplankton in the middle and lower reaches of the Hengjiang River in spring[J]. Freshwater Fisheries, 2016, 46(1): 51-58. [唐毅, 郑永华, 刘建虎, 等. 横江中下游春季浮游植物群落结构及多样性分析[J]. 淡水渔业, 2016, 46(1): 51-58.]
- [23] Shang S Q, Guo W, Zhu Z Z, et al. Relationship between phytoplankton community structure and environmental factors in Jinan River Region in summer[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2017, 30(1): 46-51, 56. [商书芹, 郭伟, 朱中竹, 等. 济南地区夏季浮游植物群落结构与环境因子的关系[J]. 水产学杂志, 2017, 30(1): 46-51, 56.]
- [24] Zhang X L, Wang Q, Zhang G Q, et al. Spatial variation of phytoplankton community structure of in-pond raceway system[J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(3): 36-45. [张晓蕾, 王强, 张国奇, 等. 池塘循环流水养殖模式中浮游植物群落结构的时空变化研究[J]. 南方水产科学, 2021, 17(3): 36-45.]
- [25] Fu J J, An R, Zhu W B, et al. Plankton community structure characteristics in traditional polyculture ponds during main culture period[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2024, 37(1): 104-112. [傅建军, 安睿, 朱文彬, 等. 套养池塘主要养殖阶段浮游生物的群落结构特征[J]. 水产学杂志, 2024, 37(1): 104-112.]
- [26] Zhang W P, Pan S, Jia X, et al. Effects of positive plant interactions on population dynamics and community structures: A review based on individual-based simulation models[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(6): 571-582. [张伟平, 潘莎, 贾昕, 等. 植物间正相互作用对种群动态和群落结构的影响: 基于个体模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2013, 37(6): 571-582.]
- [27] Pimentel J S M, Giani A. Microcystin production and regulation under nutrient stress conditions in toxic *Microcystis* strains[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, 80(18): 5836-5843.
- [28] Ramli N M, Verreth J A J, Yusoff F M, et al. Integration of algae to improve nitrogenous waste management in recirculating aquaculture systems: A review[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2020, 8: 1004.
- [29] Zhang J W, Zhao W, Ding J H, et al. The plankton community structure and water environment features in ponds under partition cluster clean aquaculture[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): 3577-3585. [张家卫, 赵文, 丁建华, 等. 分区集群式清洁养殖池塘浮游生物群落结构及水环境特征[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3577-3585.]
- [30] Lei X. Analysis of microbial communities vertical-flow constructed wetland-recirculating aquaculture system[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. [雷旭. 复合垂直流人工湿地—循环水养殖系统微生物群落的结构分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.]
- [31] Zhao X X, Fang T, Chen J L, et al. Characteristics of the phytoplankton community in a land-based container aquaculture system with recycling water[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(4): 869-878. [赵秀侠, 方婷, 陈金良, 等. 陆基推水集装箱循环水养殖系统中浮游植物群落结构特征[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 869-878.]
- [32] Zhou M H, Li T, Ye S H, et al. Phytoplankton community structure characteristics and influencing factors in major tributaries of Shaoguan section of the Beijiang River[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(8): 1846-1858. [周铭浩, 李彤, 叶四化, 等. 北江韶关段主要支流浮游植物群落结构特征及影响因子[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(8): 1846-1858.]
- [33] Fontana S, Thomas M K, Moldoveanu M, et al. Individual-level trait diversity predicts phytoplankton community properties better than species richness or evenness[J]. The ISME Journal, 2018, 12(2): 356-366.
- [34] Ramayla S P, Picardal M T, Sanchez J M P, et al. Phytoplankton diversity and macroinvertebrate assemblage as pollution indicators in sapangdaku river, toledo city, cebu, philippines[J]. International Journal of Biosciences, 2021, 18(4): 38-46.
- [35] Wu N C, Schmalz B, Fohrer N. Development and testing of a phytoplankton index of biotic integrity (P-IBI) for a German lowland river[J]. Ecological Indicators, 2012, 13(1): 158-167.
- [36] Xu X Y, Sun Y D, Jiang Y B, et al. Analysis of phytoplankton community characteristics and water quality health status in an estuarine composite ecological purification system[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(5): 1808-1819. [许晓毅, 孙亦栋, 姜永波, 等. 某河口复合生态净化系统浮游植物群落特征与水质健康状况分析[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1808-1819.]

- [37] Yang J J, Chen D, Huang L C, et al. Patterns and the determinants of zooplankton community stability in different regions of Lake Dianchi, Yunnan Province, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(5): 1752-1766. [杨姣姣, 陈冬, 黄立成, 等. 滇池不同湖区浮游动物群落稳定性及其驱动因子分析[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(5): 1752-1766.]
- [38] Czyżewska W, Piontek M. The efficiency of microstrainers filtration in the process of removing phytoplankton with special consideration of cyanobacteria[J]. *Toxins*, 2019, 11(5): 285.
- [39] Dunne J P. Fall and rise of the phytoplankton[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12: 708-709.
- [40] Cui J Y, Guo R, Song X W, et al. Spatio-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus in lake and inflow/outflow rivers of Lake Hongze, 2010-2019[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(6): 1727-1741. [崔嘉宇, 郭蓉, 宋兴伟, 等. 洪泽湖出入河流及湖体氮、磷浓度时空变化(2010—2019年)[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(6): 1727-1741.]
- [41] Hu R, Lan Y Q, Xiao L J, et al. The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(1): 11-23. [胡韧, 蓝于倩, 肖利娟, 等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(1): 11-23.]

Effects of purification units on phytoplankton in water column in recirculating pond aquaculture systems

ZHENG Yingqiang^{1,2}, DAI Lili², ZHANG Hui², PENG Liang², TAO Ling², LI Gu², CHAI Yi¹, LIAO Yongling¹

1. College of Agriculture, College of Horticulture and Landscape Architecture, Yangtze University, Jinzhou 434025, China;

2. Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China

Abstract: We quantitatively analyzed the changing patterns of phytoplankton after being treated by purification units in this study with three groups of recirculating pond aquaculture systems—a composite pond recirculating aquaculture system (A), a paddy field-fish pond recirculating aquaculture system (B), and a combined wetland-pond recirculating aquaculture system (C)—to explore the influence law of aquaculture water purification on phytoplankton community structure and diversity. The removal efficiency of different pollutants varied among the three systems, with system A having the highest removal efficiency for potassium permanganate index, total nitrogen, and suspended solids, whereas system C had the lowest efficiency for these contaminants. Compared to the inflow water, the Chl *a* concentrations in the effluent water were decreased by 52.08%, 67.61%, and 27.06% in systems A, B, and C, respectively. During the study period, 138 species from seven phyla of phytoplankton were identified, which were dominated by species from Chlorophyta, Cyanophyta, and Bacillariophyta. The number of phytoplankton species varied between the different systems; however, the dominant species and their dominance were not significantly different. Compared to the inflow water, the density and biomass of different phytoplankton species in the purification units were substantially decreased in systems A and B, and the algal removal rates exhibited an increasing trend along the cross-sections of the purification unit. Phytoplankton density fluctuated greatly in the purification unit of system C. Overall, phytoplankton species from different phyla were similarly affected by the purification units. The diversity of phytoplankton in the purification units was increased compared to the inflow water in the three systems, with the *H'* and *J* index values increasing significantly in systems A and B ($P < 0.05$). Pearson correlation and redundancy analyses indicated that the densities of phytoplankton were significantly positively correlated with factors such as total phosphorus, total nitrogen, and potassium permanganate index in the water ($P < 0.05$), but there were differences in the factors influencing phytoplankton among different systems. This study revealed that aquacultural water purification significantly affects the phytoplankton community. Optimizing the purification unit environment may be useful for improving the purification efficiency of pollutants and phytoplankton.

Key words: pond; recirculating aquaculture system; purification unit; phytoplankton; aquaculture

Corresponding author: CHAI Yi. E-mail: chaiyi123456@126.com