

荆煜宸,徐智威,顾泽茂.稻-鸭-虾种养模式中浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J].华中农业大学学报,2025,44(3):53-64.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.03.007

稻-鸭-虾种养模式中浮游植物群落结构特征 及其与环境因子的关系

荆煜宸¹,徐智威^{1,2}

1. 华中农业大学水产学院/双水双绿研究院/长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心,
武汉 430070; 2. 湖北洪山实验室, 武汉 430070

摘要 为了精准把握稻-鸭-虾种养模式的投喂及水质调控,2023年3月—2024年1月连续监测了稻-鸭-虾种养模式(rice-duck-crayfish integrated model, RDCI)和稻-虾连作模式(rice-crayfish continuous culture model, RCCC)水体浮游植物及水体理化因子,以探究稻-鸭-虾种养模式中浮游植物的群落结构特征及其与环境因子的关系。结果显示:RDCI中共检出浮游植物8门214种,高于RCCC中的8门196种,2种模式群落组成均以绿藻门、硅藻门和裸藻门为主。RDCI中优势种($Y \geq 0.02$)共有18种,多于RCCC中的14种。RDCI中浮游植物密度的变化范围为 $0.52 \times 10^8 \sim 2.19 \times 10^8$ ind/L,最大和最小值分别出现在4月和6月;生物量的变化范围为3.10~29.41 mg/L,最大和最小值分别出现在5月和7月;浮游植物Margalef丰富度指数、Pielou均匀度指数和Shannon-Wiener多样性指数的全年均值分别为2.45、0.67和1.15。与RCCC相比,RDCI中浮游植物密度在养虾期和越冬期较低,浮游植物生物量和多样性指数在养虾期、越冬期和水稻成熟期较高。冗余分析结果显示RDCI中浮游植物优势种受到水温、溶氧、总氮和总磷的影响。综上所述,相较于RCCC,RDCI中浮游植物多样性更高,均匀度更好,表明其群落结构较为复杂和稳定。浮游植物的物种组成及相关指数反映出RDCI在养虾期和越冬期降低了水体富营养化程度,同时在种稻期增加了水体养分,这有利于减少农业面源污染,促进农业的绿色发展。

关键词 稻-鸭-虾种养模式; 浮游植物; 群落结构; 生物多样性; 冗余分析; 环境因子

中图分类号 S917 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)03-0053-12

克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)俗称小龙虾,是我国重要的淡水养殖虾类,养殖面积接近200万 hm^2 ,产量超过300万t^[1]。稻-虾连作模式(rice-crayfish continuous culture model, RCCC)是我国克氏原螯虾的主要养殖模式,该模式充分利用了稻田的时空和水土资源,克氏原螯虾和水稻是互利共生的关系,稻秆为虾苗提供栖息场所,腐烂稻秆促进水体浮游生物生长,为虾苗提供天然饵料,而养殖克氏原螯虾的排泄物为稻田提供有机肥料,减少了对传统农药化肥的依赖,解决了秸秆还田和水稻虫害等问题,具有较好的经济、生态和社会效益,我们称之为“双水双绿”模式^[2]。同时,RCCC是一种“自繁自养、繁

养一体”的种养模式,该模式有效解决了养殖快速扩张过程中的苗种需求。但多年的自繁自养后,该模式存在稻田残余虾多、养殖密度不可控、稻田杂草难除等问题,导致养虾期饲料投喂不够精准、能量盈余,水稻生长期营养缺乏,营养和能量循环未能完全打通^[3]。另外,种稻期间需要使用除草剂,影响了农业的绿色发展。因此,为了充分利用稻田时空资源,解决RCCC中的相关问题,我们在虾稻田中引入鸭群,构建稻-鸭-虾的绿色循环种养模式(rice-duck-crayfish integrated model, RDCI)。前期研究表明,除水稻成熟后期外,鸭群昼夜放养在稻田中,通过摄食、踩踏等方式抑制杂草生长;鸭捕食稻田残余克氏

收稿日期: 2025-04-14

基金项目: 湖北洪山实验室重大项目(2021HSZD002); 国家重点研发计划项目(2022YFD2400700); 国家自然科学基金项目(32270481);
湖北省第四批现代农业产业技术体系水产产业技术体系项目(2023HBSTX4-05); 湖北省农业科技创新中心项目(2025-621-000-001-029)

荆煜宸, E-mail: 2725670233@qq.com

通信作者: 顾泽茂, E-mail: guzemao@mail.hzau.edu.cn

原鳌虾,动态调节种群密度;同时,鸭粪作为优质生物肥料还田,显著增强了养分的时空耦合^[4-5]。但是,稻田养鸭存在鸭粪冗余问题,与RCCC中饲料投喂不精准一样,影响着种养水体的健康。

稻田种养尾水是否达标备受关注,其中氮磷含量是评价水体健康的重要指标。RDCI中氮磷产生主要来源于虾鸭粪便、残饵、稻秆及肥料^[6],氮磷消耗主要依靠浮游植物的吸收利用^[7]。作为RDCI系统的核心生物组分,浮游植物既是克氏原鳌虾的重要饵料生物^[8],更是调控水质的关键生物类群,其种类组成、数量分布和动态变化能直接反映水质状况^[9]。大量研究表明,在稻田中养鱼、养虾、养蟹等能够显著提升水体氮磷含量^[10-14]。这些增加的营养元素为浮游植物生长提供了丰富的物质基础,提高群落多样性,从而改善水质^[11]。然而,也有研究指出,过度投喂或高密度养殖可能导致氮磷超标,导致浮游植物优势种由绿藻向蓝藻转变,增加蓝藻水华风险^[12]。此外,在稻-鱼/鸭共作系统中,鱼鸭也能通过扰动作用增加水体浊度,导致依赖光照的绿藻和硅藻减少,而裸藻比例增加^[13,15]。水温、溶氧等水体物理因子同样是重要影响因素。宋庆祥等^[14]研究发现,虾稻种养模式冬季的浮游植物密度和生物量显著低于夏秋季,水温是其主要驱动因子。综合而言,稻田种养中浮游植物群落结构对种养生物类型、管理措施、投入品使用及自然环境变化均表现复杂的响应。RDCI结合了RCCC和稻-鸭共作,其水体受到多因素的综合影响,浮游植物数量和群落结构的变化可能更为复杂。然而,目前尚不清楚RDCI中浮游植物的群落结构特征。因此,本研究在湖北省监利市新沟镇华中农业大学双水双绿科研基地,对RDCI和RCCC水体浮游植物和环境理化因子连续采样,分析RDCI中浮游植物的物种组成、优势种、密度、生物量和多样性的变化情况,揭示RDCI中的浮游动物群落结构特征、变化规律及与水体理化因子的相关性,旨在为RDCI的精准投喂、水质调控及模式优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点选在华中农业大学与监利市人民政府共建的双水双绿科研基地。该基地建于2018年,位于湖北省监利市新沟镇(30°07' N, 112°92' E),占地面积333 350 m²。基地所在地气候条件优越,年平均气

温约15~22℃,年降雨量在1 100~1 300 mm,无霜期260 d左右,是“双水双绿”的核心区域。

1.2 试验设计

选取6块RCCC稻田作为试验田地,每块稻田面积接近,约为4 000 m²。其中,相邻的3块稻田采用RCCC作为对照组,另外相邻的3块作为RDCI试验组。相比对照组,试验组在田块外梗建立鸭舍,鸭舍通过机耕道与田面相连,便于鸭群进入稻田活动;以鸭舍为中心,沿稻田四周搭建100 cm高的尼龙网围栏,防止鸭串塘或逃逸。所有稻田四周均设有宽2 m、深1 m的环沟。

1.3 种养管理

根据稻、鸭、虾的生育期及其对生产季节的需求,将生产种养管理分为克氏原鳌虾养殖时期、水稻返青期、2025-04-14共作期、水稻成熟期及越冬期5个时期:

1)克氏原鳌虾养殖期(3—6月),本期的生产管理主要是4月1日捕捞虾苗,4月15日根据虾苗存塘情况投放虾苗,使塘内虾苗密度达到90 000尾/hm²,5—6月上旬捕捞成虾上市。虾苗投放后每3 d打样1次记录生长情况,并根据规格进行精准投喂,投饲率为3%~7%,投饲方式为投料机全塘均匀投喂。养虾期台田水深0.4~0.6 m,环沟水深1.9~2.3 m,水深随气温升高逐渐增加。

2)虾稻接茬期(6月),本期的生产管理主要是克氏原鳌虾养殖结束后退水晒田,6月20日开始机插秧种植水稻,品种为华墨香3号,株行距14 cm×30 cm,每穴5~6株,插秧前施用复合肥(22-6-12) 450 kg/hm²。

3)稻-鸭共作期(7—8月),本期的生产管理主要是在插秧后15 d放入20日龄的实验鸭12只/666.7 m²,品种为武禽10(武汉市农科院选育品种)。每天06:00将鸭从鸭棚中赶入稻田,活动至下午,18:00收鸭,补食1次(放鸭后先投喂鸭配合饲料,15 d后混合投喂稻谷和饲料,25 d后仅投喂稻谷),投喂量为鸭体重的10%。9月初,水稻抽穗前将鸭回捕。

4)水稻成熟期(9—10月),本期的生产管理主要是10月下旬收割水稻。整个水稻生育期内不打农药,分别在分蘖末期和成熟期晒田,每次5~7 d,其余时间田面水位保持0.1 m。

5)越冬期(11月至次年1月),本期的生产管理主要是11月上旬上水淹田,1月在田面种植水草。越冬期台田水深约0.2 m,环沟水深约1.7 m。

RCCC的田间管理与RDCI基本一致,但由于RCCC不放鸭,因此施肥量略高,具体为插秧前施用复合肥(22-6-12)450 kg/hm²,7月中旬追施尿素75 kg/hm²(含N 46%)。

试验期间RDCI氮磷输入(肥料和饲料)分别为183.84、31.73 kg/hm², RCCC氮磷输入分别为231.87、34.32 kg/hm²。

1.4 样品采集与分析

根据稻、鸭、虾的种养周期,设定2023年3月至2024年1月为1个生产周期,本试验采样在该周期内完成。分别在克氏原鳌虾养殖期(3月、4月和5月)、水稻返青期(6月)、稻-鸭共作期(7月和8月)、水稻成熟期(9月)和越冬期(11月和1月)采集浮游植物和水样。上午08:00—10:00进行采样,采样前测量水深,确定采水深度。水样采集装置为2.5 L有机玻璃采水器,采样前先用采样点水样进行润洗。采用9点法(环沟4点,田面5点),在各个点位采集表层(水面下0.1~0.2 m)、中层(水深1/2处)和底层(田面/沟底上方0.1~0.2 m)水样共20 L(若采样点位水深不足0.3 m,则只取中层水样)(图1)。每个采样点水样混合均匀后取500 mL,立即用5 mL鲁哥试剂固定,带回实验室静置24~48 h后用虹吸法浓缩至30 mL,作为浮游植物定量样品。采用0.1 mL浮游生物计数框在显微镜(Olympus CX23, Japan)下计数浮游植物,并鉴定到种或属水平^[16-17]。

同期测定采样水体的理化因子。采用便携式水质分析仪(HQ 4300)现场测定水温(water temperature, WT)、溶氧(dissolved oxygen, DO)和pH值;采集混合后水样500 mL测定总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD_{Mn})、氨氮(ammonia nitrogen, NH₄⁺-N)、亚硝态氮(nitrite nitrogen, NO₂⁻-N)、硝态氮(nitrate nitrogen, NO₃⁻-N)和可溶性活性磷(soluble reactive phosphorus, SRP)。所有测定方法均按照《水与废水监测分析方法(第4版)》的规定进行。

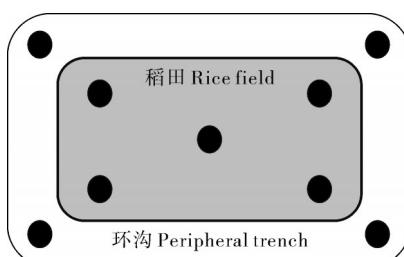


图1 RDCI和RCCC的采样点设置

Fig.1 Sample stations in the RDCI and RCCC

1.5 浮游植物群落特征指标计算

为了全面评估2种模式中浮游植物群落的特征,本研究采用Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef丰富度指数(D)、Pielou均匀度指数(J')和优势度指数(Y)作为评价指标。计算公式参见文献[18]。

1.6 数据处理

采用Microsoft Office Excel 2019、Origin 2021、GraphPad Prism 9软件进行数据处理、统计分析和作图。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA),LSD分析法检验2种模式不同时期数据的差异性,采用独立样本t检验分析2种模式同一时期数据的差异性,取 $P<0.05$ 作为差异显著性判定标准。利用Canoco 5.0软件对浮游植物优势种和环境因子数据进行去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)。若第一轴特征值小于3,使用冗余分析(redundancy analysis, RDA);若第一轴特征值大于4,使用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA);若第一轴特征值处于3~4,则用RDA或CCA。在统计分析期间,根据变量的VIF是否大于10判断共线性,若VIF>10,说明因子之间共线性强,需要删除。同时,结合前向选择法简化模型,最后得到独立影响物种群落结构的变量。

2 结果与分析

2.1 浮游植物种类组成

如图2所示,RDCI中共发现浮游植物8门78属214种,RCCC共发现8门70属196种。2种模式浮游植物门水平上的组成均以绿藻、硅藻、裸藻和蓝藻门为主。RDCI中发现绿藻门69种(占比32.24%)、硅藻门50种(23.36%)、裸藻门40种(18.69%)和蓝藻门24种(11.21%),其余门种类较少,种类占比均低于10%。RCCC中发现绿藻门68种(占比34.69%)、硅藻门45种(22.96%)、裸藻门39种(19.90%)和蓝藻门26种(13.27%)。

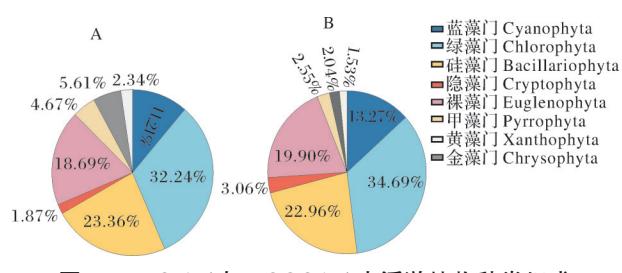


图2 RDCI(A)与RCCC(B)中浮游植物种类组成

Fig.2 Phytoplankton species composition in RDCI (A) and RCCC (B)

如图3所示, RDCI中浮游植物种类数在克氏原螯虾养殖期和水稻返青期升高, 并于水稻返青期升至全年最高, 为92种, 物种组成从硅藻占优(占比23.19%)转变为绿藻占优(39.13%); 稻-鸭共作期后期(8月)种类数降至全年最低, 为32种, 物种组成为硅藻(37.50%)和裸藻(25.00%)占优; 水稻成熟期种类数恢复至79种, 物种组成为绿藻(34.18%)占优; 越冬期种类数降低至42种, 物种组成仍以绿藻

(31.32%)占优, 裸藻(25.30%)次之。RCCC中浮游植物种类数为30~98种, 种类数先升后降, 3月为全年最低, 7月全年最高; 浮游植物的物种组成在3月和1月以硅藻占优, 其余时期以绿藻占优。总体来看, RDCI中浮游植物种类数在克氏原螯虾养殖期、水稻返青期、水稻成熟期和越冬期高于RCCC, 在稻-鸭共作期低于RCCC。

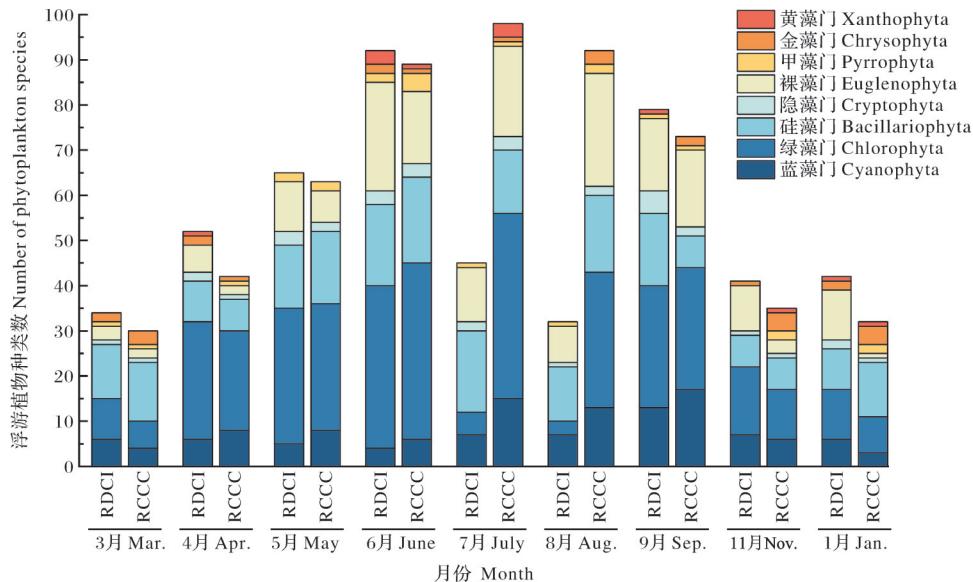


图3 不同时期RDCI与RCCC浮游植物种类数

Fig.3 Phytoplankton species number in RDCI and RCCC at different stages

2.2 浮游植物优势种

如表1所示, RDCI中共有优势种($Y \geq 0.02$)18种, 多于RCCC中的14种。2种模式中均出现的优势种有: 水华微囊藻、巨颤藻、依沙束丝藻、微小色球藻、小球藻、光滑鼓藻、顶锥十字藻、谷皮菱形藻、尖针杆藻、罐形陀螺藻、尖尾扁裸藻和绿色裸藻, RDCI中的特有优势种包括简单舟形藻、线形双菱藻、梅尼小环藻、肘状针杆藻、梭形裸藻和带形裸藻, RCCC中的特有优势种包括固氮鱼腥藻和分歧锥囊藻。

2种模式中, 水华微囊藻均为绝对优势种, 且在全年各个时期均占据主导地位($Y > 0.5$)。其在RDCI中的全年平均优势度为0.75, 低于RCCC中的0.79。除水华微囊藻外, RDCI的优势种在时空分布上呈现出显著的演替特征。其中, 在克氏原螯虾养殖期共有优势种9种, 主要为绿藻和硅藻; 水稻返青期出现优势种5种, 主要为蓝藻和绿藻; 稻-鸭共作期出现优势种5种, 主要为裸藻和蓝藻; 水稻成熟期和越冬期的优势种较为相似, 共出现8种, 主要为绿藻和硅藻。相比之下, RCCC中各时期的优势种数量均少于RDCI, 其优势种在时期的演替变化并不明显,

以蓝藻和绿藻为主要优势种, 少量硅藻和裸藻优势种出现在养虾期中。

2.3 浮游植物密度

如图4所示, RDCI全年浮游植物密度变化范围为 $0.52 \times 10^8 \sim 2.19 \times 10^8$ ind/L, 呈“W”型变化趋势。浮游植物密度在养虾期和水稻返青期(6月)上升至全年最高, 稻-鸭共作期显著降低, 水稻成熟期再次上升, 越冬期显著降低至全年低谷。RCCC全年浮游植物密度变化范围为 $0.53 \times 10^8 \sim 1.56 \times 10^8$ ind/L, 最高值和最低值分别出现在9月和11月。

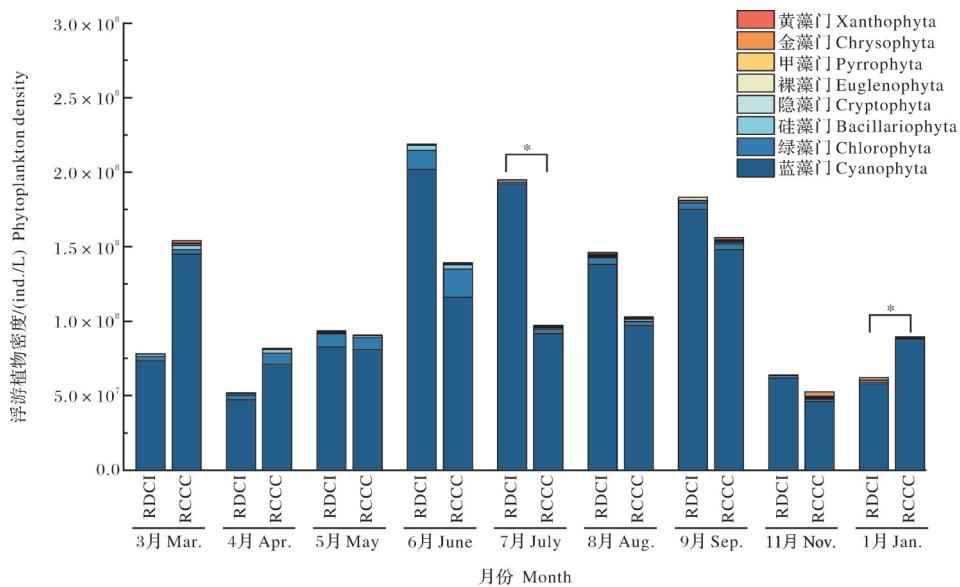
浮游植物构成上, 蓝藻在2种模式全年各个时期均占据主导地位, 其密度占比在RDCI和RCCC中分别为94.28%和91.67%。绿藻和硅藻则属于次要类群, 其中绿藻占比分别为3.71%和5.07%, 硅藻占比分别为1.05%和1.47%。除此之外, 其余浮游植物的占比均低于1%。RDCI中蓝藻密度占比在养虾期和越冬后期(1月)低于RCCC, 在其余时期高于RCCC; 绿藻和硅藻的密度占比呈现出相反的趋势。

表1 RDCI和RCCC中浮游植物优势种和优势度指数

Table 1 Dominant species and dominance indexes of phytoplankton in RDCI and RCCC

优势种 Dominant species	RDCI												RCCC											
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	11月	1月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	11月	1月						
	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Nov.	Jan.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Nov.	Jan.						
水华微囊藻 <i>Microcystis flos-aquae</i>	0.58	0.68	0.78	0.77	0.86	0.84	0.72	0.82	0.74	0.82	0.82	0.84	0.83	0.86	0.63	0.79	0.81	0.74						
巨颤藻 <i>Oscillatoria princeps</i>	0.03	—	—	0.05	0.04	0.03	0.03	—	—	0.04	0.02	—	0.05	—	0.04	0.02	—	—						
依沙束丝藻 <i>Aphanizomenon issatschenkoi</i>	—	—	—	—	—	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.20	—	0.08						
固氮鱼腥藻 <i>Anabaena azotica</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02	—	0.06	0.04	—	—	—						
微小色球藻 <i>Chroococcus minutus</i>	0.15	—	—	0.02	—	—	—	—	—	0.02	0.03	—	—	—	—	—	—	—						
小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	0.17	0.09	0.08	0.08	—	—	0.12	0.02	0.14	0.12	0.07	0.04	0.06	—	—	0.08	—	—						
光滑鼓藻 <i>Cosmarium laeve</i>	—	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02	0.02	—	—	—	—	—	—						
顶锥十字藻 <i>Crucigenia apiculata</i>	—	—	—	0.03	—	—	—	—	—	0.05	0.05	0.04	0.02	—	0.02	—	—	—						
简单舟形藻 <i>Navicula simplex</i>	—	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—						
线形双菱藻 <i>Surirella linearis</i>	0.03	—	0.60	—	—	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—						
梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	—	—	—	—	—	—	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—						
谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i>	—	—	0.04	—	—	—	0.03	0.11	—	—	—	—	—	—	0.05	—	0.06	—						
肘形针杆藻 <i>Synedra ulna</i>	—	—	—	—	—	—	—	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—						
尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.04	—	0.10	—	—	—	—	—						
罐型陀螺藻 <i>Strombomonas urceolata</i>	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—						
尖尾扁裸藻 <i>Phacus acuminatus</i>	—	0.07	—	—	—	—	—	—	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—						
梭形裸藻 <i>Euglena acus</i>	—	—	—	—	—	0.02	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—						
带形裸藻 <i>Euglena ehrenbergii</i>	—	—	—	—	0.02	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—						
绿色裸藻 <i>Euglena viridis</i>	—	—	—	0.03	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	—	0.04	—	—	—	—						
分歧链状藻 <i>Dinobryon divergens</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.09	0.18	—	—						

注:“—”表示该种在此时段不是优势种。Notes: “—” indicates that this species is not the dominant species during this stage.



图中数据的比较: *表示 $P < 0.05$, 下图同。Comparison of data in the figure: * indicates $P < 0.05$. The same as below.

图4 不同时期RDCI与RCCC中浮游植物密度变化

Fig.4 Changes in phytoplankton density in RDCI and RCCC at different stages

2.4 浮游植物生物量

如图5所示, RDCI和RCCC中浮游植物的年平均生物量分别为12.61、12.54 mg/L。从时期变化来看, RDCI中浮游植物生物量同样呈现“W”形变化趋

势, 在养虾期上升, 在稻-鸭共作期显著降低, 水稻成熟期再次显著上升, 越冬期显著降低; 生物量的最高值和最低值分别出现在5月和7月, 分别为29.41、3.10 mg/L。RCCC中全年生物量先升高后降低, 全年最

高值和最低值分别出现在6月和1月,分别为25.57、2.30 mg/L。在不同时期的对比中,RDCI的浮游植物

生物量在养虾期、水稻成熟期和越冬期高于RCCC,在水稻返青期和稻-鸭共作期显著低于RCCC。

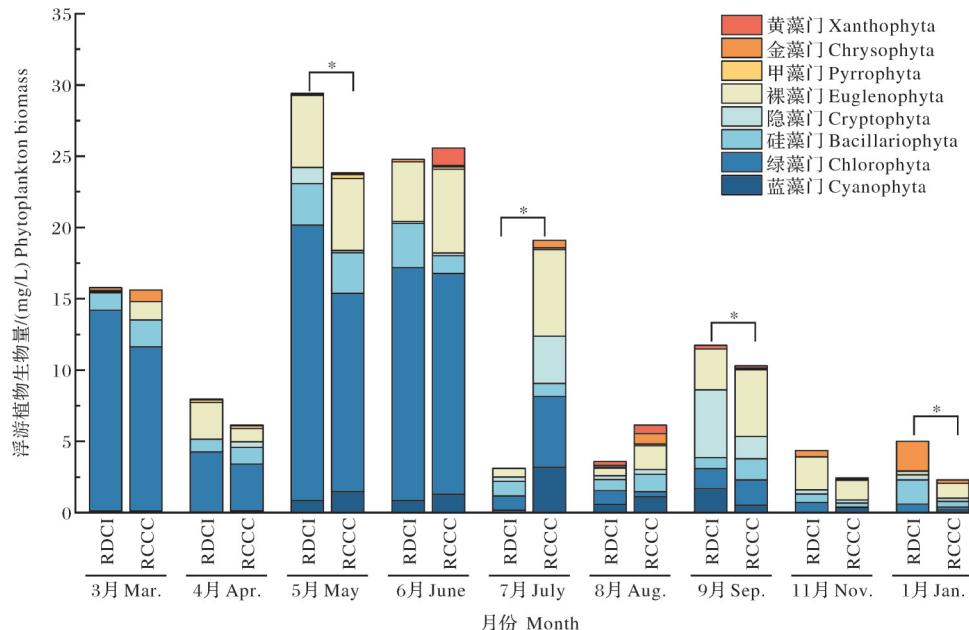


图5 不同时期RDCI与RCCC中浮游植物生物量变化

Fig.5 Changes in phytoplankton biomass in RDCI and RCCC at different stages

在浮游植物生物量的构成上,RDCI中养虾期和水稻返青期以绿藻为主体,占比超过50%,稻-鸭共作期主要为绿藻和硅藻,水稻成熟期为隐藻,越冬早期为裸藻、后期为甲藻和硅藻。而RCCC中养虾期和水稻返青期也是以绿藻占主体,其余时期均为裸藻占主体。不同物种的生物量来看,RDCI中绿藻、硅藻和隐藻的年平均生物量均高于RCCC,分别为6.51、1.44、0.82 mg/L,裸藻、蓝藻和黄藻的年平均生物量低于RCCC,分别为2.04、0.48和0.07 mg/L。具体来看,RDCI中绿藻生物量在稻-鸭共作期低于RCCC,在其余时期高于RCCC;蓝藻生物量仅在水稻成熟期高于RCCC,在其余时期均都低于RCCC;裸藻生物量在越冬早期高于RCCC,在其余时期均都低于RCCC;硅藻生物量在越冬期高于RCCC。

2.5 浮游植物多样性指数

浮游植物多样性指数的周年变化如图6所示。RDCI中Margalef丰富度指数、Pielou均匀度指数的全年均值分别为2.45和0.67,均高于RCCC中的2.34和0.63;Shannon-Wiener指数的全年均值为1.15与RCCC中的1.16接近。RDCI中3种指数的周年变化均表现为在克氏原鳌虾养殖期和水稻返青期上升,稻-鸭共作期下降,水稻成熟期上升,越冬期下降的趋势。其中,Shannon-Wiener指数、Margalef丰富度

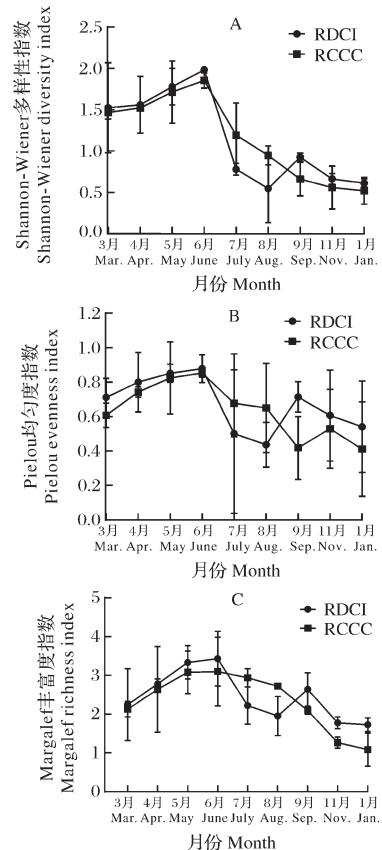


图6 不同时期RDCI与RCCC中浮游植物多样性指数变化

Fig.6 Changes in phytoplankton diversity index in RDCI and RCCC at different stages

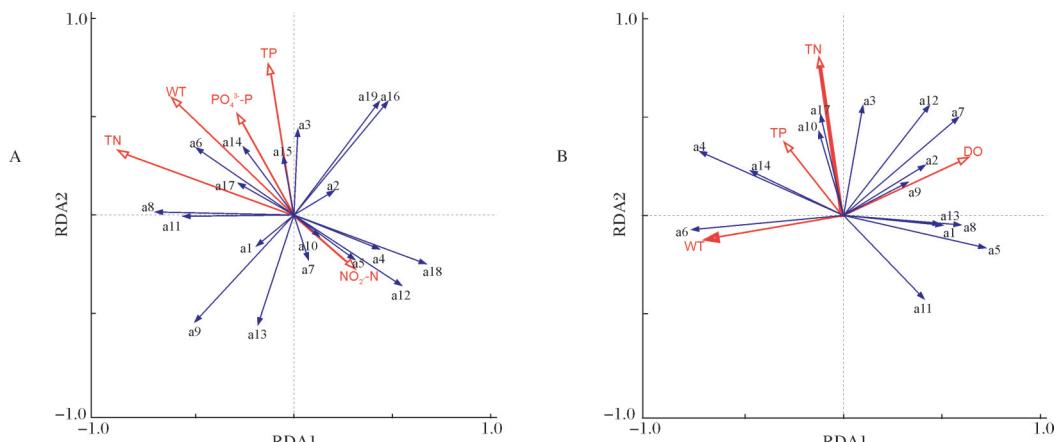
指数和 Pielou 均匀度的最高值出现在 6 月, 分别为 1.98、3.43 和 0.88; Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度最低值在 8 月, 分别为 0.55 和 0.44; Margalef 丰富度指数最低值在 1 月, 为 1.72。RCCC 中 Shannon-Wiener 指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数先上升后下降, 在 6 月升至全年最高, 分别为 1.86、3.10 和 0.85, 在 1 月降至全年最低, 分别为 0.52、1.08 和 0.41。相较于 RCCC, RDCI 的 Shannon-Wiener 指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数在克氏原鳌虾养殖期、水稻返青期、水稻成熟期和越冬期较高, 在稻-鸭共作期较低。

2.6 水体理化因子与浮游植物优势种的冗余分析

本研究应用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 分析 2 种模式浮游植物优势种与水环境因子的关系。RDCI 中浮游植物优势种的主要影响因子为 TN、WT、DO 和 TP ($P < 0.05$), 解释率分别为 25.60%、18.70%、9.60%、5.60%。总解释率为 59.50%。RCCC 中浮游植物优势种的主要影响因子

为 TN、TP、 PO_4^{3-} -P、WT 和 NO_2^- -N ($P < 0.05$), 解释率分别为 21.10%、17.10%、16.00%、13.90% 和 2.50%。总解释率为 70.60%。

RDCI 和 RCCC 水体中浮游植物优势种与环境因子的 RDA 排序见图 7。RDCI 和 RCCC 水体理化因子数据见表 2。RDCI 中 TN、TP 同分布在第二象限, 与蓝藻门的水华微囊藻、依沙束丝藻、巨颤藻、微小色球藻, 绿藻门的小球藻, 硅藻门的谷皮菱形藻呈正相关; TN 与绿色裸藻呈正相关; TP 与硅藻门的线性双菱藻、梅尼小环藻。WT 处于第三象限, 与小球藻、谷皮菱形藻、线性双菱藻、梅尼小环藻呈正相关。DO 处于第一象限与顶锥十字藻、光滑鼓藻与呈正相关。RCCC 中, TP、 PO_4^{3-} -P、水温、TN 同存在于第二象限, 与巨颤藻、梅尼小环藻、线形双菱藻、谷皮菱形藻、光滑鼓藻和分歧锥囊藻呈正相关。 NO_2^- -N 处于第四象限, 与大部分优势种呈负相关, 仅与水华微囊藻、固氮鱼腥藻、微小色球藻、依沙束丝藻和小球藻呈正相关。



a1. 水华微囊藻 *Microcystis flos-aquae*; a2. 依沙束丝藻 *Aphanizomenon issatschenkoi*; a3. 巨颤藻 *Oscillatoria princeps*; a4. 小球藻 *Chlorella vulgaris*; a5. 固氮鱼腥藻 *Anabaena azotica*; a6. 梅尼小环藻 *Cyclotella meneghiniana*; a7. 绿色裸藻 *Euglena viridis*; a8. 线形双菱藻 *Surirella linearis*; a9. 带形裸藻 *Euglena ehrenbergii*; a10. 梭形裸藻 *Euglena acus*; a11. 光滑鼓藻 *Cosmarium laeve*; a12. 分歧锥囊藻 *Dinobryon divergens*; a13. 微小色球藻 *Chroococcus minutus*; a14. 谷皮菱形藻 *Nitzschia palea*; a15. 尖针杆藻 *Synedra acus*; a16. 简单舟形藻 *Navicula simplex*; a17. 顶锥十字藻 *Crucigenia apiculata*; a18. 尖尾扁裸藻 *Phacus acuminatus*; a19. 罐型陀螺藻 *Strombomonas urceolata*。

图 7 RDCI(A)与 RCCC(B)与水体理化因子的冗余分析

Fig.7 Redundancy analysis of RDCI (A) and RCCC (B) and environmental factors

3 讨 论

3.1 浮游植物群落种类组成

本研究中, RDCI 和 RCCC 分别检出浮游植物 214 种和 196 种, 均多于宋庆洋等^[14] (4—12 月) 及程慧俊^[19] (5—10 月) 在稻-虾共作水体中所检出的 124 种和 86 种, 也多于汪金平等^[15] (5—7 月) 在稻-鸭共作水体中检出的 6 门 108 种, 与郑敏^[20] 在稻-鸭共

水体连续 2 a 的采样 (5—7 月) 中检出的 6 门 230 种较为接近。本研究采样时间跨度 (3 月至翌年 1 月) 接近宋庆洋等^[14], 但长于其他的研究, 这表明研究的时间跨度可能并非导致浮游植物种类数差异的主要因素, 而更可能与养殖模式及其水体不同有关。本研究中, RDCI 与 RCCC 的种类数在养虾期、水稻返青期、水稻成熟期和越冬期变化趋势一致, 但在稻-鸭共作期出现显著分化: RCCC 在该时期种类数达到全

表2 RDCI与RCCC水体环境因子

Table 2 RDCI and RCCC water environmental factor

月份 Months	模式 Models	WT/ ℃	DO/ (mg/L)	pH	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg/L)	NO ₂ ⁻ -N/ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ -P/ (mg/L)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg/L)	COD _{Mn} / (mg/L)
3月 Mar.	RDCI RCCC	15.35 15.32	6.15 6.33	8.32 8.15	0.54 0.62	0.21 0.22	0.23 0.32	0.005 4 0.005 7	0.027 1 0.011 5	0.14 0.17	6.77 6.97
4月 Apr.	RDCI RCCC	18.03 17.38	7.43 7.68	8.27 8.17	0.81 0.49	0.14 0.15	0.17 0.21	0.002 4 0.000 0	0.017 3 0.015 8	0.06 0.07	8.96 7.87
5月 May	RDCI RCCC	25.28 24.90	2.42 2.51	7.55 7.59	1.29 1.46	0.22 0.19	0.32 0.37	0.001 2 0.000 8	0.017 3 0.011 5	0.17 0.20	13.87 10.98
6月 June	RDCI RCCC	33.50 31.90	6.53 6.13	8.01 7.89	0.95 1.03	0.23 0.23	0.27 0.32	0.008 2 0.006 0	0.018 7 0.014 8	0.40 0.37	8.16 7.10
7月 July	RDCI RCCC	31.08 31.96	2.67 3.30	7.18 7.20	1.63 0.90	0.30 0.21	0.56 0.07	0.001 5 0.001 4	0.012 2 0.018 7	0.38 0.14	18.35 10.30
8月 Aug.	RDCI RCCC	27.60 27.32	4.30 4.45	7.64 7.84	2.12 0.90	0.50 0.23	0.42 0.27	0.006 9 0.003 8	0.034 3 0.036 2	0.25 0.10	16.87 8.02
9月 Sep.	RDCI RCCC	23.97 23.78	5.48 7.06	8.16 8.09	0.87 0.87	0.21 0.15	0.23 0.32	0.005 4 0.005 7	0.027 1 0.011 5	0.14 0.17	5.58 5.18
11月 Nov.	RDCI RCCC	16.03 15.70	8.60 8.99	8.09 8.17	1.20 1.31	0.16 0.13	0.16 0.14	0.006 0 0.006 4	0.025 8 0.021 3	0.19 0.20	10.88 10.35
1月 Jan.	RDCI RCCC	3.23 2.50	11.75 12.43	7.85 7.81	0.59 0.68	0.13 0.15	0.18 0.20	0.005 9 0.002 0	0.012 2 0.021 9	0.26 0.22	7.91 8.67

年峰值,该时期水温较高($>30^{\circ}\text{C}$),而水体氮磷的波动大,表明水温是导致其种类数较高主要原因;相反,RDCI的种类数则显著降低,这主要是由于鸭群活动导致水体透光率降低,进而抑制了绿藻门物种生长^[21]。鸭群离开后的水稻成熟期,RDCI中的绿藻物种数量恢复,重新成为优势门类。

优势种的种类组成、数量、优势度和分布特征能够反映水体生态系统的健康状况^[22]。本研究中,RDCI优势种(18种)数量多于RCCC(14种),并且在全年各个时期均超过RCCC,表明RDCI的物种分布较为均匀,生态系统功能可能更丰富。2种模式中浮游植物优势种包括蓝藻、绿藻、硅藻、裸藻和金藻门。在自然水体中,硅藻通常在低温条件下形成优势种,而蓝藻则随着水温升高迅速生长并成为优势种^[22]。本研究中硅藻优势种主要出现在春季、秋季和冬季,这与程慧俊^[19]的研究结果一致。蓝藻和绿藻出现在全年的各个时期,这与自然水体中优势种的季节性变化有所不同,但与宋庆洋等^[14]的研究结果一致。值得注意的是,相较于RCCC,RDCI中有害的水华微囊藻的优势度较低,而有益的小球藻和硅藻优势度较高,表明RDCI的浮游植物组成更健康^[23-24]。此外,裸藻在2种模式中的优势度均较低,但作为优势种主要出现在RDCI的稻-鸭共作期的富营养浑浊水体中,这与王晓莹等^[21]和盛锋^[25]的观测一致。主要

原因是裸藻对低光照条件适应性强,并能直接吸收水中的有机物质^[26]。

3.2 浮游植物密度与生物量的动态变化

RDCI和RCCC水体中,浮游植物群落结构呈现蓝藻密度高,绿藻生物量大的特征,这与多项稻-虾种养的研究结果相似^[14,19]。从时期变化看,RDCI中浮游植物生物量与密度呈“W”形变化。氮、磷元素是影响浮游植物生长的关键因子^[7]。养虾期水体氮磷输入的主要来源均为饲料和克氏原螯虾的粪便^[6]。因此,随着养殖进行,RDCI浮游植物密度和生物量均升高。稻-鸭共作期,RDCI中浮游植物生物量和密度降低,且生物量下降幅度大于密度。这主要归因于鸭的耘田作用提升水体氮磷含量并降低水体透明度^[14,27],致使这使得在生物量中占比较大的绿藻(生物量主要贡献者)锐减。稻-鸭共作期结束后,RDCI中浮游植物生物量增加,其中裸藻和隐藻的生物量显著提高。这一方面是由于裸藻和隐藻能够适应水稻成熟期较低的光照强度;另一方面是鸭排泄的粪便未被完全利用,在微生物的作用下会持续释放养分,而隐藻和裸藻喜好在有机质含量高的水体中生长^[28]。越冬期水温逐渐降低,温度成为限制浮游植物生长的因素^[29],2种模式中浮游植物密度和生物量均处于全年低谷。对比发现,2种模式不同种养时期的浮游植物生物量和密度有明显差异。养虾

期, RDCI 中水华微囊藻等有害蓝藻密度较低, 而小球藻等有益绿藻密度和生物量较高。这得益于 RDCI 通过鸭群控制克氏原螯虾“自繁自养”显著降低了次年虾苗密度, 使得精准投苗后能精确控制饲料用量, 减少营养物质的输入, 降低水体富营养化程度^[6]; 同时, 较低的虾苗密度减弱了对底泥的扰动, 有利于维持较高水体透明度, 促进绿藻生长^[30]。稻-鸭共作期, RDCI 中浮游植物生物量低于 RCCC。这有利于养分更多地流向水稻, 促进水稻生长。同期水稻测产数据显示, RDCI 在减少化肥输入的情况下, 产量保持稳定^[6]。越冬期, RDCI 浮游植物密度与 RCCC 接近, 但生物量是其 1.78~2.18 倍, 增加部分主要来源于绿藻和硅藻。越冬期是克氏原螯虾的幼苗孵化期, 虾苗以浮游生物等为开口饵料, 因此 RDCI 中更丰富的绿藻和硅藻更有利于虾苗的生长。

3.3 浮游植物多样性指数

浮游植物多样性指数反映了群落组成和密度特征, 是评价浮游植物群落物种组成稳定程度的重要指标^[31]。一般而言, 较高的浮游植物多样性能够增强水体生态系统的稳定程度, 提高水体中营养盐的转化效率, 有助于改善水质和减少富营养化风险^[32]。本研究中, RDCI 的 Shannon-Wiener 指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数在养虾期、水稻返青期、水稻成熟期和越冬期均高于 RCCC, 表明其浮游植物群落更为稳定, 水质更优。2 种模式的多样性指数呈现时期性波动, 养虾期升高, 种稻期和越冬期降低, 这与宋庆洋等^[14]的研究结果相近。蓝藻适宜在 25~35 °C 的水温环境中生长, 并且在高温季节具有较强的竞争能力和快速繁殖能力^[33]。因此, 在 2 种模式中, 蓝藻在夏季成为密度占比大、优势度高的主要物种, 这是导致夏季浮游植物多样性降低的主要原因。RDCI 在 7 月至 8 月(稻-鸭共作期)的浮游植物多样性下降幅度大于 RCCC。这主要是因为 RDCI 中鸭的活动导致水体浑浊, 严重抑制了绿藻生长, 同时促使蓝藻(密度占比高达 98.53%)成为绝对优势类群^[14], 形成全年多样性最低谷。浮游植物多样性指数也是评估种养尾水质量的重要指标^[34]。在 RDCI 和 RCCC 中, 主要尾水排放期, 即养虾期结束和水稻返青期的尾水排放量占全年总排水量的 80% 以上^[6], 恰逢全年多样性指数峰值。与同一区域自然水体(长江中游宜昌至武穴江段)的浮游植物多样性($H'=2.63$, $J'=0.55$, $D=4.16$)相比^[35], RDCI 和 RCCC 中 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 丰富度指数略低, 但 Pielou 均匀度指数更高。结合水体理化数

据, 表明 RDCI 的种养尾水对外界水体的污染程度更低。

3.4 浮游植物优势种与水质指标的关系

浮游植物生长繁殖除受到自身生物学特性的影响外, 还受到周围环境因子如温度、营养盐等因素的影响^[36]。本研究中, 影响 RDCI 与 RCCC 中浮游植物优势种的环境因子主要包括 WT、TN、TP、DO、 PO_4^{3-} -P 和 NO_2^- -N, 与覃丽蓉等^[37]研究结果相似。氮磷作为浮游植物生长必需的营养物质显著影响了浮游植物群落结构。蓝藻是 RDCI 水体中最重要的浮游植物之一, 其各月密度均占总密度的 80% 以上。蓝藻细胞中具有气囊和藻胆蛋白, 在与其他藻类竞争营养盐和光照时具有明显优势, 容易在养分较丰富的水体中快速繁殖^[38]。因此, 本研究中水华微囊藻、巨颤藻等蓝藻门物种与 TN、TP 呈正相关。小球藻和谷皮菱形藻是淡水中的普生型藻类, 常在营养化程度较高的水体中出现^[39]。因此, 在本研究中也与 TN、TP 呈正相关, 这与陈瑜等^[40]的研究结果一致。水温是影响浮游植物生长、群落组成和数量变化等最重要的环境因子之一^[41]。本研究中水温与梅尼小环藻、线性双菱藻等硅藻门物种呈正相关, 这与天然湖泊中硅藻门优势种主要出现在秋季和冬季不同^[39], 但与吴利等^[42]在稻-虾共作中的研究一致。这可能是与养殖水体中氮磷养分较高有关, 促进了硅藻门物种生长。

综上, 本研究以 RCCC 为对照, 分析了 RDCI 对浮游植物群落结构和多样性的影响。结果显示, 相比于 RCCC, RDCI 丰富了水体浮游植物种类, 提高了浮游植物群落多样性和均匀度, 优化了浮游植物的群落结构, 表明 RDCI 水体浮游植物群落具有更高的稳定性和复杂程度。浮游植物的优势种组成及相关指数反映出 RDCI 降低了养虾期和越冬期水体的富营养化程度, 并增加了种稻期水体养分, 这有利于减少农业面源污染, 促进农业的绿色发展。

参考文献 References

- [1] 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国小龙虾产业发展报告(2024)[J]. 中国水产, 2024(7):14-20.National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China crayfish industry development report (2024) [J]. China fisheries, 2024(7):14-20 (in Chinese).
- [2] 张启发.“双水双绿”产业发展的理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2021:8-9.ZHANG Q F.Theory and practice of “Shuangshui shuangli” industry development [M]. Beijing: Science Press, 2021:8-9 (in Chinese).

- [3] 陈松文,江洋,汪金平,等.湖北省稻虾模式发展现状与对策分析[J].华中农业大学学报,2020,39(2):1-7.CHEN S W, JIANG Y, WANG J P, et al. Situation and countermeasures of integrated rice-crayfish farming in Hubei Province [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39 (2) : 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [4] 魏守辉,强胜,马波,等.长期稻鸭共作对稻田杂草群落组成及物种多样性的影响[J].植物生态学报,2006,30(1):9-16. WEI S H, QIANG S, MA B, et al. Influence of long-term rice-duck farming systems on the composition and diversity of weed communities in paddy fields [J]. Chinese journal of plant ecology, 2006, 30(1):9-16 (in Chinese with English abstract).
- [5] 黄兴国.稻鸭生态种养对稻、鸭生长与营养品质及生态环境的影响研究[D].长沙:湖南农业大学,2008.HUANG X G. Effects of integrated rice-duck farming on growth performance and nutritional quality of rice and ducks, and ecological environment of paddy fields [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [6] 胡鉴轩.稻-鸭-虾模式中鸭品种筛选和氮磷平衡与循环的研究[D].武汉:华中农业大学,2024.HU J X. Studies on screening duck varieties and nitrogen and phosphorus balance and cycle of rice-duck-crayfish integrated system [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024 (in Chinese with English abstract).
- [7] CAI Y Y, CAO Y J, TANG C Y. Evidence for the primary role of phytoplankton on nitrogen cycle in a subtropical reservoir: reflected by the stable isotope ratios of particulate nitrogen and total dissolved nitrogen[J/OL].Frontiers in microbiology, 2019, 10: 2202 [2025-04-14]. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02202>.
- [8] 金晖.稻、鸭、鱼共育稻田浮游植物群落的研究[D].武汉:华中农业大学,2009.JIN H. The study on the phytoplankton community in the rice fields cultivating ducks and fishes [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [9] SER-GIACOMI E, ZINGER L, MALVIYA S, et al. Ubiquitous abundance distribution of non-dominant plankton across the global ocean[J].Nature ecology & evolution, 2018, 2(8): 1243-1249.
- [10] 李成芳,曹湊贵,汪金平,等.稻鸭、稻鱼共作生态系统中稻田面水的N素动态变化及淋溶损失[J].环境科学学报,2008,28(10):2125-2132.LI C F, CAO C G, WANG J P, et al. Dynamic variations and losses of N in floodwater of paddy fields in integrated rice-duck ecosystems[J].Acta scientiae circumstantiae, 2008, 28 (10) : 2125-2132 (in Chinese with English abstract).
- [11] CHEN L, XU J, WAN W T, et al. The microbiome structure of a rice-crayfish integrated breeding model and its association with crayfish growth and water quality [J/OL]. Microbiology spectrum, 2022, 10(2) : e0220421 [2025-04-14]. <https://doi.org/10.1128/spectrum.02204-21>.
- [12] 孙文通,张庆阳,马旭洲,等.不同河蟹放养密度对养蟹稻田水环境及水稻产量影响的研究[J].上海海洋大学学报,2014,23(3):366-373.SUN W T, ZHANG Q Y, MA X Z, et al. A study on effects of different crab stocking density on water environment and rice yield [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(3):366-373 (in Chinese with English abstract).
- [13] 袁伟玲,曹湊贵,汪金平,等.稻鱼共作生态系统浮游植物群落结构和生物多样性[J].生态学报,2010,30(1):253-257. YUAN W L, CAO C G, WANG J P, et al. The community structure and diversity of phytoplankton in rice-fish ecological system [J]. Acta ecologica sinica, 2010, 30 (1) : 253-257 (in Chinese with English abstract).
- [14] 宋庆洋,米武娟,王斌梁,等.稻虾共作水体浮游植物群落结构特征分析[J].水生生物学报,2019,43(2):415-422.SONG Q Y, MI W J, WANG B L, et al. Characteristics of community structure of phytoplankton in the integrated rice-crayfish symbiosis farming system [J]. Acta hydrobiologica sinica, 2019, 43 (2):415-422 (in Chinese with English abstract).
- [15] 汪金平,曹湊贵,金晖,等.稻鸭共生对稻田水生生物群落的影响[J].中国农业科学,2006,39(10):2001-2008.WANG J P, CAO C G, JIN H, et al. Effects of rice-duck farming on aquatic community in rice fields[J]. Scientia agricultura sinica, 2006, 39(10):2001-2008 (in Chinese with English abstract).
- [16] 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: 340-344. ZHANG Z S, HUANG X F. Methods for study on freshwater plankton [M]. Beijing: Science Press, 1991:340-344 (in Chinese).
- [17] 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,2006:29-900. HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006:29-900(in Chinese).
- [18] 刘晓红,李校,彭志杰.生物多样性计算方法的探讨[J].河北林果研究,2008,23(2):166-168.LIU X H, LI X, PENG Z J. The discussion on calculation methods of biodiversity [J]. Hebei journal of forestry and orchard research, 2008, 23(2):166-168 (in Chinese with English abstract).
- [19] 程慧俊.克氏原螯虾稻田养殖生态学的初步研究[D].武汉:湖北大学,2014.CHENG H J. A preliminary study on the ecological aspects of culture the crayfish (*Procambarus clarkia*) in rice fields [D]. Wuhan: Hubei University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [20] 郑敏.稻鸭共育稻田水体藻类多样性及其与氮磷相关性研究[D].武汉:华中农业大学,2012.ZHENG M. Study on algae diversity and its relationship with nitrogen and phosphorus in rice and duck co-breeding paddy fields [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王晓莹,冯金侠,韦生宝,等.不同年限稻鸭共作对水体藻类群落结构的影响[J].农业环境科学学报,2021,40(9):1860-1868.WANG X Y, FENG J X, WEI S B, et al. Effects of dif-

- ferent durations of rice-duck farming on the structure of algal communities in water[J].Journal of agro-environment science, 2021,40(9):1860-1868 (in Chinese with English abstract).
- [22] CHEN Y C, YU X, ZHU D J, et al. Possible influencing factors on phytoplankton growth and decay in rivers: review and perspective [J]. Journal of hydraulics engineering, 2014, 33: 186-195.
- [23] ZHANG Y, LI Z Y, KHOLODKEVICH S, et al. Microcystin-LR-induced changes of hepatopancreatic transcriptome, intestinal microbiota, and histopathology of freshwater crayfish (*Procambarus clarkii*) [J/OL]. Science of the total environment, 2020, 711: 134549 [2025-04-14]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134549>.
- [24] 姚冬梅,张达娟,张树林,等.小球藻对凡纳滨对虾池塘微藻群落的影响及与环境因子的关系[J].水产科学,2022,41(4):581-588.YAO D M, ZHANG D J, ZHANG S L, et al. Effects of green alga chlorella vulgaris on microalga community and its relationship with environmental factors in pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* culture ponds [J]. Fisheries science, 2022,41(4):581-588 (in Chinese with English abstract).
- [25] 盛锋.稻-鸭共育对稻田环境的影响及效益评估[D].武汉:华中农业大学,2019.SHENG F. Effects of rice-duck farming on rice field environment and its benefit evaluation [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [26] 张凯凯,万民熙,章真,等.纤细裸藻培养及其产物功能的研究与展望[J].生物工程学报,2024,40(3):705-721.ZHANG K K, WAN M X, ZHANG Z, et al. Advances of studies on culture and product functions of *Euglena gracilis*[J]. Chinese journal of biotechnology, 2024, 40 (3) : 705-721 (in Chinese with English abstract).
- [27] 黄巍,余经纬,李玉成,等.“稻-鸭-虾”生态种养模式水体中的氮磷浓度及藻类生物量变化[J].水土保持通报,2019,39(4):229-235.HUANG W, YU J W, LI Y C, et al. Changes of nitrogen, phosphorus and algae in water under rice-duck-shrimp ecological planting and breeding model [J]. Bulletin of soil and water conservation, 2019, 39(4):229-235 (in Chinese with English abstract).
- [28] 冯竞楠,曾昭琪,杨永华.不同培养基、温度、光照及pH值对卵形隐藻生长的影响[J].河南大学学报(自然科学版),2005,35(2):63-66. FENG J N, ZENG Z Q, YANG Y H. Effects of different culture media, temperature, illumination and pH on the growth of *Cryptomonas ovata*[J]. Journal of Henan University (natural science), 2005, 35(2): 63-66 (in Chinese with English abstract).
- [29] 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.
- [30] 张露,李滔,章叶飞,等.水深对克氏原鳌虾稻田养殖水体浮游植物群落结构的影响[J].生态学杂志,2023,42(8):1920-1927.ZHANG L, LI T, ZHANG Y F, et al. Effects of water depth on phytoplankton community structure in rice-*Procambarus clarkii* cultivation model [J]. Chinese journal of ecology, 42(8):1920-1927 (in Chinese with English abstract).
- [31] BORICS G, ABONYI A, SALMASO N, et al. Freshwater phytoplankton diversity: models, drivers and implications for ecosystem properties[J]. Hydrobiologia, 2021, 848:53-75.
- [32] VALLINA S M, CERMENO P, DUTKIEWICZ S, et al. Phytoplankton functional diversity increases ecosystem productivity and stability[J]. Ecological modelling, 2017, 361: 184-196.
- [33] 赵孟绪,韩博平.汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析[J].生态学报,2005,25(7):1554-1561. ZHAO M X, HAN B P. Analysis of factors affecting cyanobacteria bloom in a tropical reservoir (Tangxi Reservoir, China)[J]. Acta ecologica sinica, 2005, 25(7):1554-1561 (in Chinese with English abstract).
- [34] 陈碧鹃,陈聚法,崔毅,等.莱州湾东部养殖区浮游植物的生态特征[J].海洋水产研究,2001,22(3):64-70. CHEN B J, CHEN J F, CUI Y, et al. The ecological characteristics of phytoplankton in the Eastern marine culture area of Laizhou Bay [J]. Marine fisheries research, 2001, 22(3): 64-70 (in Chinese with English abstract).
- [35] 房冬梅.长江中游宜昌至武穴江段浮游生物群落结构研究[D].南京:南京农业大学,2015.FANG D M. Annual characteristics of plankton communities at yichang to wuxue section in the middle reach of the Yangtze River[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [36] 刘绍俊,吉正元,普发贵,等.星云湖浮游植物群落结构及水体营养状态生物评价[J].安全与环境学报,2019,19(4):1439-1447.LIU S J, JI Z Y, PU F G, et al. On phytoplankton community composition structure and biological assessment of water trophic state in Xingyun Lake [J]. Journal of safety and environment, 2019, 19 (4) : 1439-1447 (in Chinese with English abstract).
- [37] 覃丽蓉,李为,黄丰,等.莲虾共作池塘夏季浮游植物群落及其与环境因子关系[J].生物资源,2019,41(6):499-508.QIN L R, LI W, HUANG F, et al. Phytoplankton community and its relationship with environmental factors in lotus-crayfish culture pond in summer [J]. Biotic resources, 2019, 41 (6) : 499-508 (in Chinese with English abstract).
- [38] 孔繁翔,高光.大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J].生态学报,2005,25(3):589-595. KONG F X, GAO G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes[J]. Acta ecologica sinica, 2005, 25(3):589-595 (in Chinese with English abstract).
- [39] 吴国平.不同氮磷和光照水平对小球藻(*Chlorella vulgaris*)和谷皮菱形藻(*Nitzchia palea*)生长的影响[D].重庆:西南大学,2006.WU G P. Effects of nitrogen, phosphorus and light on the growth of *Chlorella vulgaris* and *Nitzchia palea* [D]. Chongqing: Southwest University, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [40] 陈瑜,李继影,高昕,等.太湖东部水域浮游硅藻群落特征及其与

- 环境因子关系[J].环境监控与预警,2021,13(2):44-50.
CHEN Y, LI J Y, GAO X, et al. The relationship between planktonic diatom community and the environmental factors of the eastern eastern Taihu Lake [J]. Environmental monitoring and forewarning, 2021, 13(2): 44-50 (in Chinese with English abstract).
- [41] 方丽娟,刘德富,杨正健,等.水温对浮游植物群落结构的影响实验研究[J].环境科学与技术,2014,37(S2):45-50.
FANG L J, LIU D F, YANG Z J, et al. Effects of water tem-perature on the phytoplankton community structure [J]. Environmental science & technology, 2014, 37(S2): 45-50 (in Chinese with English abstract).
- [42] 吴利,贾鑫,李为,等.稻虾共作稻田浮游植物群落格局及环境影响因子[J].合肥师范学院学报,2024,42(3):7-14.
WU L, JIA X, LI W, et al. Phytoplankton community patterns and environmental influencing factors in integrated rice-crayfish symbiosis framing system [J]. Journal of Hefei Normal University, 2024, 42(3): 7-14 (in Chinese with English abstract).

Community structure of phytoplankton and its relationship with environmental factors in rice-duck-crayfish integrated model

JING Yuchen¹, XU Zhiwei¹, GU Zemao^{1,2}

1. College of Fisheries/Shuangshui Shuanglü Institute, Huazhong Agricultural University/Engineering Research Center of Green development for Conventional Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt, Ministry of Education, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Hongshan Laboratory, Wuhan 430070, China

Abstract To accurately manage precise feeding and water quality regulation in the rice-duck-crayfish integrated model (RDCI), continuous monitoring of phytoplankton and physicochemical parameters in the water was conducted from March 2023 to January 2024 in both the RDCI and the rice-crayfish continuous culture model (RCCC). This study aimed to investigate the community structure characteristics of phytoplankton and their relationships with environmental factors in the RDCI system. The results showed that a total of 214 species from 8 phyla of phytoplankton were found in the RDCI, which is higher than the 196 species from 8 phyla in the RCCC. Both systems were predominantly composed of Chlorophyta, Bacillariophyta, and Euglenophyta. The RDCI had 18 dominant species ($Y \geq 0.02$), more than the 14 in the RCCC. The density of phytoplankton in RDCI ranged from 0.52×10^8 to 2.19×10^8 ind/L, with the maximum observed in June and the minimum in April. The biomass ranged from 3.10 to 29.41 mg/L, with the maximum in May and the minimum in July. The annual mean values for the phytoplankton Margalef richness index, Pielou evenness index, and Shannon-Wiener diversity index were 2.45, 0.67, and 1.15, respectively. Compared with RCCC, the density of phytoplankton in RDCI was lower during the crayfish farming and overwintering stages, while the biomass and diversity indices of phytoplankton were higher during the crayfish farming, overwintering, and rice maturity stages. The redundancy analysis results showed that the dominant species of phytoplankton in RDCI were influenced by water temperature, dissolved oxygen, total nitrogen, and total phosphorus. In summary, compared with RCCC, RDCI exhibits higher phytoplankton diversity and better evenness, suggesting a more complex and stable community structure. The species composition of phytoplankton and related indices indicate that RDCI mitigates the degree of eutrophication in water during both the shrimp farming and the overwintering stages, while increasing nutrients levels during the rice planting stage. This approach is beneficial for reducing non-point source pollution in agriculture and promoting green agricultural development.

Keywords rice-duck-crayfish integrated model; phytoplankton; community structure; diversity; redundancy analysis; environmental factor

(责任编辑:边书京)