

王丹, 许荟, 徐宇, 等. 不同种养模式稻田水体中浮游生物群落变化[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(4): 733-743.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.04.012

## 不同种养模式稻田水体中浮游生物群落变化

王丹<sup>1,2,3</sup>, 许荟<sup>2,3</sup>, 徐宇<sup>2,3</sup>, 张婷<sup>1,2,3</sup>, 高迎莉<sup>1,3</sup>, 李旭光<sup>2,3</sup>, 许志强<sup>2,3</sup>

(1. 江苏海洋大学海洋科学与水产学院, 江苏连云港 222005; 2. 江苏省淡水水产研究所, 江苏南京 210017; 3. 农业农村部淡水虾蟹遗传育种与养殖重点实验室, 江苏南京 210017)

**摘要:** 为了解稻麦轮作(RW)、稻虾轮作(RC1)和稻虾共作(RC2)等模式稻田水体中浮游生物群落结构的差异, 本研究针对不同种养模式稻田水体中浮游生物群落组成、密度及多样性指数的变化情况, 探讨了不同种养模式与稻田水体理化因子及水体中浮游生物群落变化之间的关系。结果表明, 稻麦轮作模式在灌浆期总氮(TN)含量显著高于稻虾轮作模式和稻虾共作模式( $P < 0.05$ )。3种模式水体中浮游生物群落组成相似, 浮游动物优势种以轮虫为主, 浮游植物优势种以绿藻门浮游植物和硅藻门浮游植物为主。灌浆期稻麦轮作模式水体中的枝角类、桡足类浮游动物密度显著低于稻虾轮作模式和稻虾共作模式; 水体中绿藻门、蓝藻门、裸藻门和硅藻门浮游植物平均密度也显著低于稻虾轮作模式和稻虾共作模式。分蘖期稻虾共作模式水体中浮游植物多样性指数和均匀度指数均显著高于稻麦轮作模式( $P < 0.05$ ); 灌浆期稻虾轮作模式和稻虾共作模式水体中浮游植物多样性指数和丰富度指数显著高于稻麦轮作模式( $P < 0.05$ )。冗余分析(RDA)结果表明, 水体亚硝酸盐氮( $\text{NO}_2^-$ -N)、氨氮( $\text{NH}_3$ -N)、硝酸盐氮( $\text{NO}_3^-$ -N)、总氮(TN)、总磷(TP)是对浮游生物影响大的环境因子。总体而言, 稻虾种养模式水体质量更好, 水体中浮游生物多样性和丰富度更高。

**关键词:** 克氏原螯虾; 稻虾种养; 浮游生物

**中图分类号:** S966.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)04-0733-11

## Changes of plankton communities in paddy water under different rice-crayfish farming systems

WANG Dan<sup>1,2,3</sup>, XU Hui<sup>2,3</sup>, XU Yu<sup>2,3</sup>, ZHANG Ting<sup>1,2,3</sup>, GAO Yingli<sup>1,3</sup>, LI Xuguang<sup>2,3</sup>, XU Zhiqiang<sup>2,3</sup>

(1. School of Marine Science and Fisheries, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China; 2. Freshwater Fisheries Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210017, China; 3. Key Laboratory of Genetic Breeding and Cultivation for Freshwater Crustacean, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210017, China)

**Abstract:** To reveal the differences in the plankton community structure in paddy field water under three cultivation modes, including rice-wheat rotation (RW), rice-crayfish rotation (RC1), and rice-crayfish co-cultivation (RC2), we investigated the changes in the composition, density, and diversity index of plankton communities in paddy water. Additionally, we explored the relationships between different cultivation modes and the changes of physicochemical factors of paddy

收稿日期: 2024-08-27

基金项目: 不同稻虾综合种养模式下的稻田生态系统健康评价项目 [CX(23)3007]; 江苏现代农业(克氏原螯虾)产业技术体系种质创新与苗种繁育创新团队项目 [JATS(2023)372]; 江苏省种业振兴“揭榜挂帅”项目 [JBGS(2021)119]

作者简介: 王丹(1999-), 女, 江苏大丰人, 硕士研究生, 主要从事水产养殖生态学研究。(E-mail) w629810@163.com

通讯作者: 许志强, (E-mail) sfdjlska@163.com

water and the plankton communities. The results showed that the total nitrogen (TN) content in RW mode was significantly higher than that in RC1 mode and RC2 mode ( $P < 0.05$ ). The composition of phytoplankton community in paddy water under the three modes was similar. The dominant species of zooplankton were mainly rotifers, and the dominant species of phytoplankton were mainly Chlorophyta phytoplankton and Bacillariophyta phytoplankton.

During the grain-filling stage, the density of cladocerans and copepods in paddy water under RW mode was significantly lower than that under RC1 mode and RC2 mode. The average density of phytoplankton in Chlorophyta, Cyanophyta, Euglenophyta and Bacillariophyta in water was also significantly lower than that under RC1 mode and RC2 mode. During the tillering stage, the phytoplankton diversity index and evenness index in paddy water under RC2 mode were significantly higher than those under RC1 mode ( $P < 0.05$ ). During the grain-filling stage, the phytoplankton diversity index and richness index in paddy water under both the RC1 mode and RC2 mode were significantly higher than those under the RW mode ( $P < 0.05$ ). The results of redundancy analysis (RDA) demonstrated that nitrite nitrogen ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ), ammonia nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) were key environmental factors significantly affecting plankton communities in water. In general, the rice-crayfish co-cultivation mode exhibits superior water quality and higher plankton diversity and richness.

**Key words:** *Procambarus clarkii*; rice-crayfish co-cultivation; plankton

稻田综合种养是在水稻田中引入水生经济动物,充分利用生物间的互作关系,构建更为复杂的生态网络,从而提高稻田环境稳定性和经济收益的一种农业生产模式。稻田综合种养种类多样,将克氏原螯虾养殖与水稻种植有机结合(稻虾种养模式)是近年来发展比较迅猛且广受关注的一种复合农业模式,可实现水稻与克氏原螯虾的双丰收<sup>[1-2]</sup>。据统计,2023 年中国稻田克氏原螯虾养殖面积达到  $1.6867 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占全国种养面积的 56.37%<sup>[3]</sup>。

研究发现,将克氏原螯虾引入稻田生态系统,对稻田生物赖以生存的水环境产生了很大的影响。稻田水体生态系统主要受生物和非生物两类因素影响,非生物因素是指水体的环境因子,主要用一系列的理化指标衡量,如温度、pH、溶解氧(DO)、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、亚硝酸盐氮( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、硝酸盐氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、总氮(TN)、总磷(TP)等;生物因素主要包括水环境中的动植物及微生物等,它们之间相互影响构成了复杂的生物网络。浮游生物作为水生生态系统中最基础的营养和能量来源,对水产动物的生长具有重要作用<sup>[4]</sup>。浮游生物一般分为浮游动物和浮游植物,它们通过复杂的食物网关系,维持生态系统稳定<sup>[5]</sup>。浮游植物作为初级生产者,在稻田生态系统的结构和功能中发挥着重要作用<sup>[6]</sup>。浮游植物的生物量和多样性对水质状况具有指示作用<sup>[7]</sup>。浮游动物在稻田生态系统中也具有不可或缺的地位,它们可以通过摄食浮游植物,参与水质调控和营养物质的循环<sup>[8]</sup>。已有研究表明,稻虾种养模式水体中浮游生物密度大、生物量多、多样性高,可以为克氏原螯虾提供丰富的天然饵料<sup>[9]</sup>。Liu 等<sup>[10]</sup>研究发现,稻虾共作可显著降低稻田水体中的氨挥发,增加水稻对氮素的吸收。隋焱等<sup>[11]</sup>的研究结果显示,克氏原螯虾摄食及活动

产生的残饵和代谢产物会导致稻田水体氮、磷含量增加,有利于浮游植物生长。

近年来稻虾种养面积不断扩大,养殖模式不断创新,发展出了各种不同的模式,如稻虾轮作模式和稻虾共作模式。针对在稻田中引入克氏原螯虾对稻田生态系统的影响已有了较多的研究,但对于不同稻虾种养模式对水体理化因子及浮游生物的影响尚缺乏充分认识。为了研究不同稻虾种养模式对稻田水体理化因子及浮游生物群落的影响,本研究选择水稻整个生长周期关键环节,采集江苏地区稻麦轮作(RW)、稻虾轮作(RC1)和稻虾共作(RC2)3类模式下的稻田水体样品,测定了氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、亚硝酸盐氮( $\text{NO}_2\text{-N}$ )等水体理化指标,并对稻田水体中的浮游生物进行种类鉴定、密度计算、多样性分析,以期了解不同种养模式下稻田水体理化因子及浮游生物的群落结构,为优化稻虾综合种养模式提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验地点位于江苏省宝应县( $33^\circ 17' \text{N}$ ,  $119^\circ 36' \text{E}$ ),选择处于同一地区且分别采用稻麦轮作(RW)、稻虾轮作(RC1)、稻虾共作(RC2)3种模式地块作为研究对象。每种模式包含3个重复田块(每个田块面积为  $1.33 \text{ hm}^2$ ,共计9个田块),每个田块均已采用相关模式种养3年以上。3种种养模式都在每年6-11月种植水稻,水稻种植品种(南粳9108),栽培方法相同(施肥、用药频次等)。不同模式下的种养周期安排及样品采集时间见图1,由图1可知,RW模式于前一年11月至次年6月种植小麦,6月以后栽插水稻,采用常规水稻栽培方法控制稻田水位;RC1模式于前一年11月至第2年6月保持田块水深50~80 cm 用于

养殖克氏原螯虾,6月以后按常规方法栽插水稻;RC2模式于前一年水稻收割后上水草,第2年4-5月养殖第1批克氏原螯虾,6月以后栽插水稻,水稻返青

后养殖第2批克氏原螯虾,稻田全年均淹水。由于水稻常规种植过程中对水位有严格要求,部分稻田生长周期内无法采集水体样品。

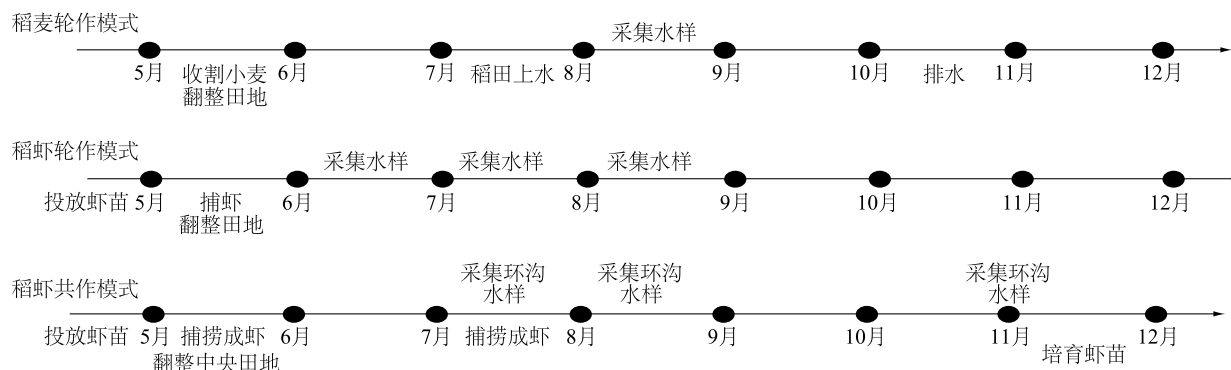


图1 3种稻田种养模式下样品采集方案

Fig.1 Sampling plan for paddy fields under three cultivation modes

## 1.2 研究方法

在水稻栽种期(6月)、分蘖期(7月)、灌浆期(8月)、收获期(11月),分别在每个田块中随机选择3个点采集水体样品。对于浮游植物,取表层水混合后定量至1L后用鲁哥试剂固定,静置沉淀48h后,取上清液定容至30mL。对于浮游动物,取表层水混合后将10L水样经25号浮游生物网进行过滤,过滤富集后的浮游动物样品现场用4%甲醛试剂进行固定,带回实验室4℃条件下保存以备统计。另用玻璃采水器采集水样带回实验室进行水质检测,参照《地表水环境质量标准》<sup>[12]</sup>检测稻田水体中氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)、硝酸盐氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、总磷(TP)、总氮(TN)等水质指标。

在显微镜下进行浮游动物和浮游植物种类鉴定及细胞计数,细胞密度以1L水体中的细胞数表示,参照胡鸿钧等<sup>[13]</sup>的《中国淡水藻类:系统、分类及生态》对水体中浮游植物进行鉴定,参考章宗涉等<sup>[14]</sup>的《淡水浮游生物研究方法》对浮游动物进行物种鉴定。

## 1.3 统计分析

为比较不同模式下浮游生物群落结构的差异,选取Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )、Margalef丰富度指数( $D$ )和Pielou均匀度指数( $J$ )等描述浮游动物和浮游植物的组成多样性,应用Dominance物种优势度( $Y$ )计算优势物种。计算公式如下:

Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ ):

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \cdot \log_2 P_i \left( P_i = \frac{N_i}{N} \right)$$

$$\text{Margalef 丰富度指数}(D): D = \frac{(S-1)}{\ln N}$$

$$\text{Pielou 均匀度指数}(J): J = \frac{H'}{\ln S}$$

$$\text{Dominance 优势度}(Y): Y = \frac{N_i}{N} \cdot f_i$$

式中, $N$ 表示群落中物种总数; $N_i$ 表示物种 $i$ 的个体数量; $S$ 表示群落物种的总种类数; $f_i$ 表示物种 $i$ 出现的频率。

将优势度 $Y \geq 0.02$ 的定为优势种(属、目)。首先选择 $Y \geq 0.02$ 的物种进行矩阵构建,通过去除趋势对应分析方法(DCA),确定使用冗余分析(RDA)的物种,通过Canono 5完成对浮游生物和水环境因子的冗余分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻田水体理化指标

3种稻田种养模式下水体理化指标测定结果如表1所示。从表1可知,在水稻分蘖期,RC1模式水体中硝酸盐氮含量和总氮含量显著高于RC2模式( $P < 0.05$ );水稻灌浆期,RW模式水体中总氮含量显著高于RC1、RC2模式( $P < 0.05$ )。水体理化指标测定结果表明,2种稻虾种养模式的水质指标整体上优于稻麦轮作模式。

表 1 3 种模式稻田水体理化指标

Table 1 Physicochemical indicators of paddy water under three cultivation modes

生育期	模式	氨氮含量 (mg/L)	亚硝酸盐氮含量 (mg/L)	硝酸盐氮含量 (g/L)	总磷含量 (mg/L)	总氮含量 (mg/L)
栽种期	RW	/	/	/	/	/
	RC1	0.72±0.06	0	0.06±0.01	0.06±0.06	2.70±0.32
	RC2	/	/	/	/	/
分蘖期	RW	/	/	/	/	/
	RC1	2.17±1.33a	0a	0.96±0.57a	/	3.23±1.40a
	RC2	1.67±1.26a	0.01±0a	0.30±0.08b	/	0.64±0.33b
灌浆期	RW	0.62±0.35a	0.01±0b	1.00±0.18a	0.08±0.03a	9.76±1.12a
	RC1	0.48±0.23a	0.05±0.04a	0.83±0.20a	0.05±0.04a	5.80±1.93b
	RC2	0.29±0.16a	0.07±0.02a	0.88±0.23a	0.04±0.02a	6.12±2.05b
收获期	RW	/	/	/	/	/
	RC1	/	/	/	/	/
	RC2	0.54±0.20	0.01±0.01	0.94±0.33	0.16±0.04	1.96±0.61

RW: 稻麦轮作模式; RC1: 稻虾轮作模式; RC2: 稻虾共作模式。表中数据为平均值±标准差; 同一生育期同一列数据后不同小写字母表示不同模式间差异显著 ( $P < 0.05$ )。"/" 表示没有数据。

## 2.2 稻田水体中浮游生物的群落组成及优势种

不同水稻生长时期, 3 种模式下稻田水体中的浮游生物群落结构差别较大。研究期间 RW 模式水体中共鉴定出 3 门 11 种浮游动物, RC1 模式共鉴定出 3 门 17 种浮游动物, RC2 模式水体中共鉴定出 3 门 16 种浮游动物, 3 种模式均以轮虫种类数最多。从表 2 可知, RW 模式水体中浮游动物优势属(目)有 3 种, 分别是: 晶囊轮虫属 (*Asplanchna*)、腔轮虫属 (*Lecane*)、哲水蚤目 (*Calanoida*)。RC1 模式水体中浮游动物的优势种(属、目)有 7 种, 分别为: 萼花臂尾轮虫 (*Brachionus calyciflorus*)、晶囊轮虫属、叶轮虫属 (*Notholon labis*)、秀体蚤属 (*Diaphanosoma*)、低额蚤属 (*Simocephalus*)、桡足幼体 (*Copepodid*)、剑水蚤目 (*Cyclopoida*)。RC2 模式水体中浮游动物优势种(属、目)有 12 种, 分别是萼花臂尾轮虫、缘板龟甲轮虫 (*Keratella tacinensis*)、螺形龟甲轮虫 (*Keratella cochlearis*)、晶囊轮虫属、异尾轮虫属 (*Trichocerca rousseleti*)、叶轮虫属、溞属 (*Daphnia pulex*)、僧帽蚤属 (*Daphnia cucullata*)、网纹蚤属 (*Ceriodaphnia*)、低额蚤属、桡足幼体、剑水蚤目。

研究期间, RW 模式水体中共检出 31 种浮游植物, RC1 模式水体中共检出 40 种, RC2 模式水

体中共检出 45 种, 3 种模式水体中均以硅藻门和绿藻门种类数最多。从表 3 可知, RW 模式水体中浮游植物优势属有 6 个, 分别是: 十字藻属 (*Crucigenia*)、栅藻属 (*Scenedesmus*)、席藻属 (*Phormidium*)、舟形藻属 (*Navicula*)、羽纹藻属 (*Pinnularia*)、蓝隐藻属 (*Chroomonas*)。RC1 模式水体中浮游植物优势属(目)有 16 个, 分别是鼓藻属 (*Cosmarium*)、栅藻属 (*Scenedesmus*)、纤维藻属 (*Ankistrodesmus*)、小球藻属 (*Chlorella*)、月牙藻属 (*Selenastrum*)、集星藻属 (*Acetinastrum*)、长孢藻属 (*Dolichospermum*)、席藻属 (*Phormidium*)、念珠藻目 (*Nostocales*)、隐球藻属 (*Aphanocapsa*)、裸藻属 (*Euglena*)、脆杆藻属 (*Fragilaria*)、小环藻属 (*Cyclotella*)、舟形藻属 (*Navicula*)、针杆藻属 (*Synedra*)、角甲藻属 (*Ceratium*)。RC2 模式水体中浮游植物优势属有 16 个, 分别是鼓藻属 (*Cosmarium*)、栅藻属 (*Scenedesmus*)、纤维藻属 (*Ankistrodesmus*)、弓形藻属 (*Schroederia*)、小球藻属 (*Chlorella*)、集星藻属 (*Acetinastrum*)、项圈藻属 (*Anabaenopsis*)、席藻属 (*Phormidium*)、颤藻属 (*Oscillatoria*)、裸藻属 (*Euglena*)、脆杆藻属 (*Fragilaria*)、小环藻属 (*Cyclotella*)、舟形藻属 (*Navicula*)、肘杆藻属 (*Ulnaria*)、卵形藻属 (*Cocconeis*)、布纹藻属 (*Gyrosigma*)。

表 2 3 种稻田种养模式水体中浮游动物优势种和优势度

Table 2 Dominant species and degree of zooplankton in paddy water under three cultivation modes

优势种(属、目)	类	优势度											
		栽种期			分蘖期			灌浆期			收获期		
		RW	RC1	RC2	RW	RC1	RC2	RW	RC1	RC2	RW	RC1	RC2
萼花臂尾轮虫( <i>Brachionus calyciflorus</i> )	轮虫类(Rotaria)						0.10		0.13	0.04			0.25
缘板龟甲轮虫( <i>Keratella ticinensis</i> )							0.03						
螺形龟甲轮虫( <i>Keratella cochlearis</i> )							0.06						0.03
晶囊轮虫属( <i>Asplanchna</i> )			0.08				0.14	0.07		0.04			0.17
腔轮虫属( <i>Lecane</i> )							0.02						
异尾轮虫属( <i>Trichocerca rousseleti</i> )							0.04			0.02			
叶轮虫属( <i>Notholon labis</i> )			0.05				0.03						0.13
蚤属( <i>Daphnia pulex</i> )	枝角类(Cladocera)	/		/	/						/	/	0.20
僧帽蚤属( <i>Daphnia cucullata</i> )													0.09
网纹蚤属( <i>Ceriodaphnia</i> )													0.08
秀体蚤属( <i>Diaphanosoma</i> )			0.04			0.47			0.06				
低额蚤属( <i>Simocephalus</i> )			0.04			0.19	0.03		0.16				0.24
桡足幼体( <i>Copepodid</i> )	桡足类(Copepods)		0.13				0.07		0.06	0.11			0.08
剑水蚤目(Cyclopoida)			0.02			0.03	0.11		0.40	0.03			0.25
哲水蚤目(Calanoida)								0.06					

RW、RC1、RC2 见表 1 注。“/”表示无数据。

表 3 3 种稻田种养模式水体中浮游植物优势种和优势度

Table 3 Dominant species and dominant degree of phytoplankton in paddy water under three cultivation modes

优势种(目)	门	优势度											
		栽种期			分蘖期			灌浆期			收获期		
		RW	RC1	RC2	RW	RC1	RC2	RW	RC1	RC2	RW	RC1	RC2
十字藻属( <i>Crucigenia</i> )									0.03				
鼓藻属( <i>Cosmarium</i> )			0.04							0.06			
栅藻属( <i>Scenedesmus</i> )			0.03					0.03					0.02
纤维藻属( <i>Ankistrodesmus</i> )	绿藻门(Chlorophyta)						0.05		0.03				0.02
弓形藻属( <i>Schroederia</i> )							0.02						
小球藻属( <i>Chlorella</i> )			0.03				0.03			0.02			0.03
月牙藻属( <i>Selenastrum</i> )			0.06										
集星藻属( <i>Actinastrum</i> )			0.09				0.06						
长孢藻属( <i>Dolichospermum</i> )			0.10										
项圈藻属( <i>Anabaenopsis</i> )										0.04			
席藻属( <i>Phormidium</i> )	蓝藻门(Cyanophyta)					0.11	0.06	0.07	0.05				0.32
颤藻属( <i>Oscillatoria</i> )							0.30			0.06			
念珠藻目(Nostocales)		/	0.03	/	/						/	/	
隐球藻属( <i>Aphanocapsa</i> )			0.02										
裸藻属( <i>Euglena</i> )	裸藻门(Euglenophyta)		0.05							0.08			0.06

续表3 Continued3

优势种(目)	门	优势度											
		栽种期			分蘖期			灌浆期			收获期		
		RW	RC1	RC2	RW	RC1	RC2	RW	RC1	RC2	RW	RC1	RC2
脆杆藻属( <i>Fragilaria</i> )								0.22					0.03
小环藻属( <i>Cyclotella</i> )								0.04	0.05				0.06
舟形藻属( <i>Navicula</i> )							0.08	0.04					0.14
肘杆藻属( <i>Ulnaria</i> )	硅藻门(Bacillariophyta)												0.03
卵形藻属( <i>Cocconeis</i> )													0.05
针杆藻属( <i>Synedra</i> )			0.04										
羽纹藻属( <i>Pinnularia</i> )							0.02						
布纹藻属( <i>Gyrosigma</i> )													0.03
角甲藻属( <i>Ceratium</i> )	甲藻门(Pyrrophyta)		0.04										
蓝隐藻属( <i>Chroomonas</i> )	隐藻门(Cryptophyta)						0.06						

RW、RC1、RC2 见表 1 注。“/”表示无数据。

### 2.3 稻田水体浮游生物密度变化

从表 4 可知,RC1 模式水体中,萼花臂尾轮虫、晶囊轮虫属、异尾轮虫属、叶轮虫属等轮虫平均密度为 1 L 1.12 只至 602.00 只,总体呈现先下降后回升的趋势,分蘖期达到最低值。RC2 模式水体中,轮虫平均密度呈现先上升后下降的趋势,与 RC1 模式相反。分蘖期 RC1 模式水体中轮虫密度显著低于 RC2 模式( $P<0.05$ )。

表 4 3 种稻田种养模式水体中浮游动物平均密度变化

Table 4 Change of average zooplankton density in paddy water under three cultivation modes

生育期	模式	轮虫类 (Rotaria) (只, 1 L)	枝角类 (Cladocera) (只, 1 L)	桡足类 (Copepods) (只, 1 L)
栽种期	RW	/	/	/
	RC1	602.00±498.00	369.00±616.00	82.00±61.00
	RC2	/	/	/
分蘖期	RW	/	/	/
	RC1	1.12±1.39b	23.10±39.57a	7.22±6.89a
	RC2	11.14±8.71a	6.29±4.42a	16.05±14.93a
灌浆期	RW	6.12±5.04a	0.94±1.00b	11.68±13.78b
	RC1	17.61±21.17a	18.49±17.58a	109.00±199.00a
	RC2	16.89±14.32a	7.08±8.48a	48.29±45.23a
收获期	RW	/	/	/
	RC1	/	/	/
	RC2	5.97±7.31	2.17±4.03	6.04±7.75

RW、RC1、RC2 见表 1 注。表中数据为平均值±标准差;同一生育期同一列不同小写字母表示不同模式间差异显著( $P<0.05$ )。“/”表示没有数据。

RC1 模式水体中,秀体蚤属、低额蚤属等枝角类

浮游动物平均密度为 1 L 18.49 只至 369.00 只,总体呈现持续下降趋势,灌浆期达到最低值。RC2 模式水体中,枝角类浮游动物平均密度呈现先上升后下降的趋势。灌浆期 RW 模式水体中枝角类浮游动物平均密度显著低于 RC1 模式和 RC2 模式( $P<0.05$ )。

RC1 模式水体中,桡足幼体、剑水蚤目等桡足类浮游动物平均密度为 1 L 7.22 只至 82.00 只,总体呈现先下降后上升趋势,分蘖期达到最低值。RC2 模式水体中,桡足类浮游动物平均密度呈现先上升后下降的趋势。灌浆期 RW 模式水体中桡足类浮游动物平均密度显著低于 RC1 模式和 RC2 模式( $P<0.05$ )。

从表 5 可知,RC1 模式水体中绿藻门浮游植物平均密度为 1 mL 3 411 个至 13 401 个,总体呈现先下降后上升的趋势,分蘖期达到最低值。RC2 模式水体中绿藻门浮游植物平均密度的变化趋势与 RC1 模式相似。分蘖期 RC2 模式水体中绿藻门浮游植物密度显著高于 RC1 模式( $P<0.05$ )。灌浆期 RW 模式水体中绿藻门浮游植物密度显著低于 RC1 模式和 RC2 模式( $P<0.05$ )。

RC1 模式水体中硅藻门浮游植物平均密度为 1 mL 1 711 个至 4 381 个,变化趋势为先下降后上升,与 RC1 模式水体中绿藻门浮游植物平均密度变化一致。RC2 模式水体中硅藻门浮游植物平均密度变化趋势也是先下降后上升。分蘖期 RC1 模式水体中硅藻门浮游植物平均密度显著低于 RC2 模式( $P<0.05$ )。灌浆期 RW 模式水体中硅藻门浮游植物平均密度显著低于 RC1 模式和 RC2 模式( $P<0.05$ )。隐藻门浮游植物平均密度变化趋势与硅藻门相似。

表5 3种稻田种养模式水体中浮游植物平均密度变化

Table 5 Variation of average phytoplankton density in paddy water under three cultivation modes

生育期	模式	绿藻门 (Chlorophyta) (个, 1 mL)	蓝藻门 (Cyanophyta) (个, 1 mL)	裸藻门 (Euglenophyta) (个, 1 mL)	硅藻门 (Bacillariophyta) (个, 1 mL)	金藻门 (Chrysophyta) (个, 1 mL)	隐藻门 (Cryptophyta) (个, 1 mL)
栽种期	RW	/	/	/	/	/	/
	RC1	13 401±5 558	3 444±2 114	2 290±1 440	3 024±1 424	111±167	518±705
	RC2	/	/	/	/	/	/
分蘖期	RW	/	/	/	/	/	/
	RC1	3 411±1 844b	20 767±17 136a	656±772b	1 711±803b	/	33±30a
	RC2	10 333±3 049a	28 600±10 910a	4 033±1 617a	4 022±370a	/	189±191a
灌浆期	RW	1 203±3 447b	963±2 393b	475±412b	747±1 228b	0b	130±186a
	RC1	3 921±3 272a	3 024±2 353a	2 444±1 334a	4 381±4 381a	8±21a	127±214a
	RC2	4 111±2 026a	2 895±1 739a	5 382±4 436a	2 062±1 296a	0b	74±150a
收获期	RW	/	/	/	/	/	/
	RC1	/	/	/	/	/	/
	RC2	22 716±24 642	125 469±191 988	7 068±6 674	11 685±12 682	56±167	117±233

RW、RC1、RC2 见表1注。表中数据为平均值±标准差;同一生育期同一列不同小写字母表示模式间差异显著( $P<0.05$ )。“/”表示没有数据。

RC1 模式水体中蓝藻门浮游植物平均密度为 1 mL 3 024 个至 20 767 个, 总体趋势是先上升后下降, RC2 模式水体中蓝藻门浮游植物平均密度变化趋势与之相反。灌浆期 RW 模式水体中蓝藻门浮游植物平均密度显著低于 RC1 模式和 RC2 模式( $P<0.05$ )。灌浆期 RW 模式水体中裸藻门浮游植物平均密度也显著低于 RC1 模式和 RC2 模式( $P<0.05$ )。

#### 2.4 稻田水体中浮游生物多样性指数变化

在水稻生长的不同时期, 3 种稻田种养模式水体中浮游动物的多样性指数如表 6 所示。RC1 模式水体中浮游动物多样性指数( $H'$ )为 1.08~1.25, 变化较为明显, 呈持续上升趋势; RC1 模式水体中浮游动物丰富度指数( $D$ )平均波动范围为 1.08~1.56, 前期变化不明显, 灌浆期出现较大幅度下降; RC1 模式水体中浮游动物均匀度指数( $J$ )平均波动范围为 0.42~0.85, 整体呈现先上升后下降的趋势。

RC2 模式水体中浮游动物多样性指数范围为 0.77~1.38; 丰富度指数范围为 0.89~1.55, 变化较为明显, 呈持续下降趋势, 在水稻灌浆期, RC2 模式水体中丰富度指数显著高于 RC1 模式( $P<0.05$ ); RC2 模式水体中均匀度指数平均波动范围为 0.66~0.77, 也呈持续下降趋势。

表6 3种稻田种养模式水体中浮游动物多样性指数变化

Table 6 Changes of zooplankton diversity index in paddy water under three cultivation modes

生育期	模式	多样性指数 ( $H'$ )	丰富度指数 ( $D$ )	均匀度指数 ( $J$ )
栽种期	RW	/	/	/
	RC1	1.08±0.65	1.56±0.54	0.42±0.25
	RC2	/	/	/
分蘖期	RW	/	/	/
	RC1	1.13±0.35a	1.56±1.48a	0.85±0.13a
	RC2	1.27±0.33a	1.55±0.49a	0.77±0.08a
灌浆期	RW	1.36±0.22a	1.53±0.23a	0.84±0.09a
	RC1	1.25±0.27a	1.08±0.39b	0.74±0.16a
	RC2	1.38±0.25a	1.21±0.18a	0.73±0.10a
收获期	RW	/	/	/
	RC1	/	/	/
	RC2	0.77±0.40	0.89±0.48	0.66±0.30

RW、RC1、RC2 见表1注。表中数据为平均值±标准差;同一生育期同一列不同小写字母表示不同模式间差异显著( $P<0.05$ )。“/”表示没有数据。

如表 7 所示, RC1 模式水体中浮游植物多样性指数( $H'$ )平均波动范围为 1.67~2.61, 前期呈下降趋势, 分蘖期达到最低值, 灌浆期小幅上升; 丰富度

指数(*D*)平均波动范围为 1.96~2.79,呈持续下降趋势;均匀度指数(*J*)平均波动范围为 0.54~0.79,呈先下降后上升的趋势。RC2 模式水体中浮游植物多样性指数平均波动范围为 1.74~2.16;丰富度指数平均波动范围为 1.62~2.42,多样性指数和丰富度指数均呈持续下降趋势;均匀度指数(*J*)平均波动范围为 0.61~0.70,呈先上升后下降的趋势。在水稻分蘖期,RC2 模式水体中多样性指数和均匀度指数均显著高于 RC1 模式( $P<0.05$ )。灌浆期,RC1 模式和 RC2 模式水体中的多样性指数和丰富度指数均显著高于 RW 模式( $P<0.05$ )。

**2.5 稻田水体中浮游生物优势种(属、目)与水环境因子的冗余分析**

选择优势度( $Y \geq 0.02$ )的浮游生物,采用去除趋势对应分析方法(DCA)进行分析,确定使用冗余分析(RDA)方法的物种,结合相关环境因子的数据分析二者之间的关系,浮游动物及浮游植物代码见表 8。

表 8 进行冗余分析(RDA)排序的浮游生物种类编号

Table 8 Plankton species number for redundancy analysis (RDA) ranking

编号	种类	编号	种类
S1	晶囊轮虫属( <i>Asplanchna</i> )	P1	十字藻属( <i>Crucigenia</i> )
S2	腔轮虫属( <i>Lecane</i> )	P2	栅藻属( <i>Scenedesmus</i> )
S3	哲水蚤目( <i>Calanoida</i> )	P3	席藻属( <i>Phormidium</i> )
S4	萼花臂尾轮虫( <i>Brachionus calyciflorus</i> )	P4	舟形藻属( <i>Navicula</i> )
S5	秀体蚤属( <i>Diaphanosoma</i> )	P5	羽纹藻属( <i>Pinnularia</i> )
S6	低额蚤属( <i>Simocephalus</i> )	P6	蓝隐藻属( <i>Chroomonas</i> )
S7	桡足幼体( <i>Copepodid</i> )	P7	纤维藻属( <i>Ankistrodesmus</i> )
S8	剑水蚤目( <i>Cyclopoida</i> )	P8	席藻属( <i>Phormidium</i> )
S9	萼花臂尾轮虫( <i>Brachionus calyciflorus</i> )	P9	脆杆藻属( <i>Fragilaria</i> )
S10	晶囊轮虫属( <i>Asplanchna</i> )	P10	小环藻属( <i>Cyclotella</i> )
S11	异尾轮虫属( <i>Trichocerca rousseleti</i> )	P11	舟形藻属( <i>Navicula</i> )
S12	桡足幼体( <i>Copepodid</i> )	P12	鼓藻属( <i>Cosmarium</i> )
S13	剑水蚤目( <i>Cyclopoida</i> )	P13	小球藻属( <i>Chlorella</i> )
		P14	项圈藻属( <i>Anabaenopsis</i> )
		P15	颤藻属( <i>Oscillatoria</i> )
		P16	裸藻属( <i>Euglena</i> )
		P17	小环藻属( <i>Cyclotella</i> )

S 表示浮游动物,P 表示浮游植物。S1~S3 和 P1~P6 为 RW 模式水体中浮游生物;S4~S8 和 P7~P11 为 RC1 模式水体中浮游生物;S9~S13 和 P12~P17 为 RC2 模式水体中浮游生物。

表 7 3 种稻田种养模式水体中浮游植物多样性指数变化

Table 7 Changes of phytoplankton diversity index in paddy water under three cultivation modes

生育期	模式	多样性指数( <i>H'</i> )	丰富度指数( <i>D</i> )	均匀度指数( <i>J</i> )
栽种期	RW	/	/	/
	RC1	2.61±0.13	2.79±0.42	0.78±0.03
	RC2	/	/	/
分蘖期	RW	/	/	/
	RC1	1.67±0.59b	2.13±0.38a	0.54±0.18b
	RC2	2.16±0.62a	2.42±0.39a	0.66±0.17a
灌浆期	RW	1.73±0.39b	0.83±0.35b	0.83±0.09a
	RC1	2.31±0.25a	1.96±0.48a	0.79±0.12a
	RC2	2.14±0.20a	1.80±0.45a	0.70±0.07a
收获期	RW	/	/	/
	RC1	/	/	/
	RC2	1.74±0.60	1.62±0.34	0.61±0.22

RW、RC1、RC2 见表 1 注。表中数据为平均值±标准差;同一生育期同一列不同小写字母表示不同模式间差异显著( $P<0.05$ );“/”表示没有数据。

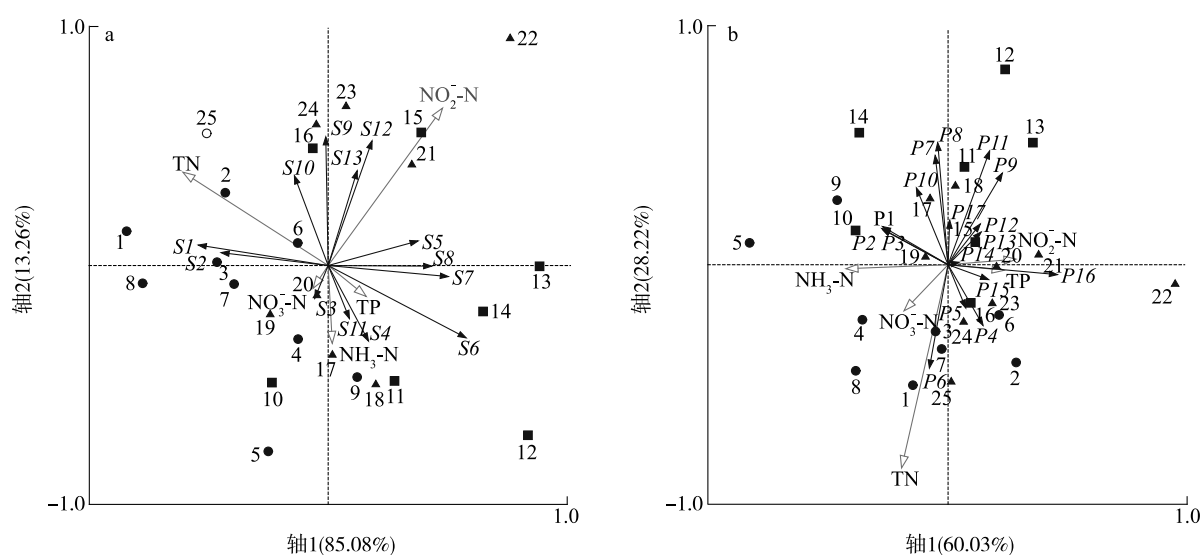
从冗余分析(RDA)排序图上可直观地看出优

势种(属、目)分布与环境因子之间的关系。根据图

2a 可见,RC1 模式水体中浮游动物优势种萼花臂尾轮虫属、秀体蚤属、低额蚤属、桡足幼体、剑水蚤目和 RC2 模式水体中浮游动物优势种异尾轮虫属、桡足幼体、剑水蚤目都集中在轴 1 正方向,与  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、TP 呈正相关,而 RW 模式水体中浮游动物优势种晶囊轮虫属、腔轮虫属和 RC2 模式水体中浮游动物优势种萼花臂尾轮虫属、晶囊轮虫属集中在轴 1 负方向,与  $\text{NO}_3\text{-N}$  和 TN 呈正相关。

从图 2b 可见,RW 模式水体中浮游植物优势种舟形藻属、羽纹藻属,RC1 模式水体中浮游植物优势种脆杆藻属、舟形藻属和 RC2 模式水体中浮游植物

优势种鼓藻属、小球藻属、项圈藻属、颤藻属、裸藻属、小环藻属都集中在轴 1 正方向,与  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  和 TP 呈正相关,而 RW 模式水体中浮游植物优势种十字藻属、栅藻属、席藻属、蓝隐藻属和 RC1 模式水体中浮游植物优势种纤维藻属、席藻属、小环藻属都集中在轴 1 负方向,与  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN 呈正相关。总体来看, $\text{NO}_2\text{-N}$ 、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TP 是影响浮游动物优势种变化的主要水质指标,影响浮游植物优势种变化的主要水质指标是 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NO}_2\text{-N}$ 。



a: 浮游动物冗余分析排序图; b: 浮游植物冗余分析排序图; 1~9 为 RW 模式水体中相关因子(●), 10~16 为 RC1 模式水体中相关因子(■), 17~25 为 RC2 模式水体中相关因子(▲)。

图 2 稻田各采样点水体中浮游生物群落优势种与水环境因子的冗余分析排序图

Fig. 2 Redundancy analysis ordination diagram of dominant species of plankton communities and water environmental factors at each sampling site in paddy field water

## 3 讨论

### 3.1 不同种养模式对稻田水体理化指标的影响

稻虾综合种养模式作为一种绿色高效生态的混合养殖模式,可以形成生态系统内部循环。一方面,克氏原螯虾生长过程中产生的残饵及粪便等可以作为水稻的营养来源,减少化肥投入,降低生产成本<sup>[15]</sup>;另一方面,水稻可以吸收水体中的氮、磷、硫等营养元素,并为克氏原螯虾提供隐蔽场所,降低水体温度,提高水体溶氧量,从而提高水体质量;多余的营养元素可以被水体中的浮游动物和浮游植物吸收,进一步提高水体浮游生物的丰度<sup>[16]</sup>。

稻田生态系统中,水体作为重要组成部分,其质量好坏直接影响田间水稻、虾、浮游生物和其他水生生物的生长发育,进而对稻田生态产生影响。氨氮、硝酸盐氮、总磷、总氮作为衡量水体质量和污染程度的重要指标,可以在一定程度上体现水体的环境质量。本研究中,在水稻分蘖期,RC1 模式水体中硝酸盐氮和总氮含量显著高于 RC2 模式 ( $P < 0.05$ )。水稻灌浆期,RW 模式水体中总氮含量显著高于 RC1 模式和 RC2 模式 ( $P < 0.05$ ),说明在稻田中增加克氏原螯虾的养殖可以显著降低稻田水体中氮含量。郭印等<sup>[17]</sup>研究发现,克氏原螯虾的活动还可以提高土壤通气性能,促进氨氮

通过硝化作用转化为硝酸盐氮。因此,RC1模式和RC2模式明显优于RW模式,能够十分有效地提高水体质量。

### 3.2 不同稻田种养模式水体中浮游生物群落结构的稳定性

浮游生物是稻田生态系统中的初级生产者和消费者,浮游生物群落多样性和群落结构的稳定性是维护稻田生态系统稳态的重要因素。多样性指数可以用来衡量浮游植物群落结构的复杂性<sup>[18]</sup>。水体中浮游生物多样性和丰富度的提高有助于稳定稻田生态系统,为水产动物提供更多的饵料,促进水产动物生长<sup>[19]</sup>。

本研究结果显示,在水稻灌浆期,稻麦轮作模式水体中枝角类、桡足类、绿藻门、蓝藻门、裸藻门、硅藻门浮游生物平均密度均显著低于稻虾模式( $P<0.05$ ),说明在稻田中养殖克氏原螯虾可以有效提高水体中浮游动物和浮游植物的群落密度和多样性,这与唐金玉等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。同时,在水稻分蘖期,稻虾共作模式水体中浮游植物的多样性指数和均匀度指数均显著高于稻麦轮作模式( $P<0.05$ ),这可能是因为稻虾共作模式水体中有长期淹水的地块以养殖克氏原螯虾,同时也为浮游生物提供了重要的生长及庇护环境,从而使其保持了较高的生物多样性和均匀度。然而,在水稻灌浆期,稻麦轮作和稻麦共作模式水体中浮游植物多样性指标没有显著差异( $P>0.05$ ),说明此期稻麦轮作模式水体中浮游植物繁殖速度比稻麦共作模式更快。

相较于稻麦轮作模式,稻麦模式水体中的浮游动物和浮游植物多样性和丰富度更高,因此稻麦模式可以塑造结构更稳定,功能更强大的水体微生物群落,更有利于优化水体环境。本研究结果显示,水稻分蘖期稻麦共作模式水体中浮游植物密度和多样性最高,但随着水稻生长,稻麦轮作模式水体中浮游植物多样性也大幅度提高,说明稻麦轮作模式的环境也非常适宜浮游生物的生长繁殖。

### 3.3 不同稻田种养模式水体中环境因子与浮游生物群落之间的关系

丰富多样的浮游生物可以支持稻田生态系统健康运转。曹慧中<sup>[21]</sup>研究发现,藻类等会通过同化作用吸收利用水体中的无机氮,降低水体中的氮含量,所以丰富的浮游植物可以吸收利用水体中多余的氮

和磷,优化水体质量。浮游动物以浮游植物为食,间接影响浮游植物的种群密度,浮游动物也为克氏原螯虾提供鲜活的开口饵料,随着幼虾摄食能力的增强,对浮游动物的摄食会明显增加<sup>[22]</sup>。因此,丰富多样的浮游生物既有利于维持稻田水体质量,也有利于稻田养殖动物的生长。

浮游生物对环境变化敏感,群落组成易受到周围环境影响。一般来说,内部影响因素主要包括物种更替和种间竞争。外在因素主要包括各种环境因子的变化,如氮、磷等元素的循环<sup>[23]</sup>。浮游植物对水质变化高度敏感,水体中浮游植物的种类、密度等与环境因子休戚与共<sup>[24]</sup>。马得草等<sup>[25]</sup>的研究结果表明,总磷与绿藻门、硅藻门、蓝藻门水生植物呈显著正相关。李佳俊等<sup>[26]</sup>研究发现,氮、磷可共同促进浮游植物的生长。浮游动物以藻类为食,所以浮游植物的丰度可以间接影响浮游动物的种群密度。

本研究通过对3种模式水体中浮游生物优势种(属、目)和环境因子进行冗余分析(RDA),结果发现,亚硝酸盐氮、总氮、氨氮和总磷是影响水体浮游动物优势种(属、目)变化的重要指标,这与张勇<sup>[27]</sup>的研究结果相似;此外,本研究发现影响浮游植物优势属(目)变化的主要是总氮、氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮,这与郝俊等的研究结果类似<sup>[28]</sup>。本研究结果显示,水体中氮、磷含量影响浮游生物生长,并调控着群落结构的变化。

## 4 结论

相较于传统的稻麦轮作模式,稻麦模式可以有效降低水体中氮的含量,改善水体质量,提高浮游植物硅藻门、裸藻门、绿藻门、蓝藻门的丰度。稻麦生态养殖有利于优化稻田水体环境,塑造更稳定的微生物群落,从而进一步提高稻田水体的稳定性。本研究结果有助于了解江苏不同种养模式水体理化因子及浮游生物的群落结构,为优化稻麦综合种养技术提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] 陈松文,曹湊贵,郝向举,等. 中国稻麦种养:产业现状与绿色高质量发展对策[J]. 农业现代化研究,2023,44(4):575-587.
- [2] JIANG Y, CAO C G. Crayfish-rice integrated system of production: an agriculture success story in China. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2021, 41(5):68.
- [3] 全国水产技术推广总站,中国水产学会. 中国稻渔综合种养产

- 业发展报告(2024)[N]. 中国渔业报,2024-07-29(4).
- [4] 王录生,梁阳阳,张国庆,等. 长江河上游浮游生物群落结构与水质评价[J]. 安徽农业科学,2024,52(12):71-74,79.
- [5] LOICK-WILDE N, WEBER S C, CONROY B J, et al. Nitrogen sources and net growth efficiency of zooplankton in three Amazon River plume food webs[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61(2):460-481.
- [6] 李天丽,高广斌,白东,等. 洪湖周边三种典型养殖类型池塘浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 淡水渔业,2024,54(4):3-14.
- [7] 彭辉辉,张凯,陈成勋,等. 鲤(*Cyprinus carpio*)对稻田水体浮游植物及环境因子的影响研究[J]. 天津农学院学报,2020,27(1):37-43.
- [8] 龚进玲,杜红春,朱挺兵,等. 杞麓湖中浮游动物群落的结构及其与水环境因素的关系[J]. 湿地科学,2023,21(3):358-366.
- [9] 宋光同,王芬,蒋业林,等. 稻虾综合种养田浮游生物群落组成及其动态变化分析[J]. 湖北农业科学,2023,62(7):101-106,112.
- [10] LIU T Q, LI C F, TAN W F, et al. Rice-crayfish co-culture reduces ammonia volatilization and increases rice nitrogen uptake in Central China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 330:107869.
- [11] 隋 焱,夏德军,石小平,等. 稻虾连作模式下稻田水体浮游生物调查研究[J]. 安徽农学通报,2018,24(18):43-47.
- [12] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准:GB 3838-2002[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 陈玲,吕广动,王忍,等. 稻-小龙虾生态种养模式探析[J]. 现代农业科技,2023(19):165-167,172.
- [16] 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.
- [17] 郭印,魏华,邵乃麟,等. 不同黄鳝放养密度的稻田水质及生产效果[J]. 上海农业学报,2017,33(5):58-63.
- [18] 李岩. 稻蟹共生对稻田水体浮游生物和底栖动物影响的研究[D]. 上海:上海海洋大学,2013.
- [19] 袁伟玲,曹凑贵,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.
- [20] 唐金玉,黄福勇,戴杨鑫,等. 稻-红螯螯虾共作模式下浮游生物的群落变化特征及其与虾生长之间的关系[J]. 浙江农业学报,2024,36(7):1537-1547.
- [21] 曹慧中. 稻虾共作模式下稻田生态环境研究[D]. 南昌:南昌工程学院,2023.
- [22] 徐增洪,周鑫,水燕. 克氏原螯虾的食物选择性及其摄食节律[J]. 大连海洋大学学报,2012,27(2):166-170.
- [23] ZHANG X Y, ZHAO J, DING L, et al. Eutrophication evolution trajectory influenced by human activities and climate in the shallow Lake Gehu, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138:108821.
- [24] 戴丹超. 宜兴溇湖地区河蟹生态养殖池塘水体理化及浮游生物指标的水质评价应用[D]. 上海:上海海洋大学,2020.
- [25] 马得草,胡文革,张映东,等. 大泉沟水库浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志,2018,39(5):47-54.
- [26] 李佳俊,沈萍萍,谭焯辉,等. 南海东北部浮游植物对氮、磷加富的响应及与不同水团的关系[J]. 海洋学报,2015,37(10):88-99.
- [27] 张勇. 施肥对中华绒螯蟹幼蟹池塘水质及浮游生物的影响[D]. 上海:上海海洋大学,2019.
- [28] 郝俊,马旭洲,王武,等. 河蟹生态养殖池浮游植物功能类群的结构特征[J]. 湖泊科学,2016,28(5):1047-1056.

(责任编辑:黄克玲)