

宁夏稻蟹共生耦合系统浮游植物的群落结构

顾芸, 李奎, 陈立婧, 沈玺钦, 石伟, 管卫兵

Phytoplankton community structure of rice-crab culture of integrated system in Ningxia

GU Yun, LI Kui, CHEN Lijing, SHEN Xiqin, SHI Wei, GUAN Weibing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20210203304>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

网围养蟹对浮游植物群落结构变化的影响

Effect of pen crab farming on phytoplankton community structure

上海海洋大学学报. 2019, 28(2): 237 <https://doi.org/10.12024/jsou.20180302254>

扬中夹江浮游植物种群特征及其对环境因子的响应

Phytoplankton community structure in Jiajiang in Yangzhong Estuary and its relation to environmental factors

上海海洋大学学报. 2019, 28(4): 607 <https://doi.org/10.12024/jsou.20180802372>

杭州湾人工湖夏季浮游植物群落演替与环境因子的关系

Relationship between summer phytoplankton community succession and environment factors in the artificial lagoon of Hangzhou bay

上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 757 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200202922>

三沙湾春季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系

Community structure of phytoplankton and its relationship with environmental factors of Sansha Bay in spring

上海海洋大学学报. 2018, 27(4): 522 <https://doi.org/10.12024/jsou.20170802123>

上海市环城绿带休憩型河道浮游植物群落结构特征

Structural characteristics of phytoplankton community in suburb rivers for leisure located in Green belt around City of Shanghai, China

上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 734 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200302960>

文章编号: 1674-5566(2022)02-0411-10

DOI:10.12024/jsou.20210203304

宁夏稻蟹共生耦合系统浮游植物的群落结构

顾芸¹, 李奎¹, 陈立婧², 沈玺钦¹, 石伟³, 管卫兵^{1,4}

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 3. 银川市科海渔业生物技术有限公司, 宁夏 银川 750000; 4. 宁夏苏沃生态科技有限公司, 宁夏 银川 750000)

摘要:通过对宁夏贺兰县四十里店村稻蟹共生耦合系统浮游植物的研究,分析该模式下稻田与不同水体循环运作中稻田进水口、稻田中间、稻田出水口的浮游植物及环境因子。水稻品种为秋优88号,蟹品种为中华绒螯蟹,实验选择4个(3、6、7、10号田)灌溉鱼塘尾水稻田(试验组)和1个(8号田)灌溉黄河水稻田(对照组)。结果表明:试验组共鉴定出浮游植物8门235种,其中,3号田鉴定出8门153种,6号田鉴定出8门147种,7号田鉴定出7门143种,10号田鉴定出8门159种。对照组共鉴定出浮游植物7门127种。试验组平均密度高于对照组($P < 0.05$)。试验组优势种13种,对照组优势种9种,均以蓝藻为主。灌溉鱼塘尾水稻蟹田多样性指数高于灌溉黄河水稻蟹田,表明灌溉鱼塘尾水稻蟹田浮游植物群落结构更加完善与稳定。试验组总碱度、盐度与对照组无显著差异($P > 0.05$),透明度、水温、磷酸盐、pH、溶氧、亚硝酸盐、氨氮存在显著差异($P < 0.05$)。RDA分析表明,pH、透明度、水温是影响浮游植物群落结构的主要环境因子。

关键词: 稻蟹共生; 耦合模式; 浮游植物; 环境因子; 冗余分析

中图分类号: S 966.1; X 171

文献标志码: A

稻渔综合种养是一种新型立体复合种养模式,该养殖模式实现了水稻栽植与水产养殖的有机结合^[1]。稻蟹共生模式以稻鱼共生模式为基础,使稻-蟹生态系统互利共生,对改善生态环境、增加水稻产量、提高水稻生长效率等起到了极大的作用^[2-3]。

稻田浮游植物对稻田至关重要,其作用主要体现在固氮、提高磷的利用率、增加土壤有机质、改善土壤性状、促进水稻生长等方面^[4]。近年来稻蟹共生模式在全国范围内得到了普遍推广,尤其在北方势头迅猛^[5]。关于稻-鱼、稻-虾种养模式浮游植物的研究较多,而稻蟹共生模式浮游植物的研究相对较少,主要有李岩^[6]发现稻蟹共生模式中浮游植物多样性指数与蟹的放养密度呈正比;王昂^[7]研究结果表明,在水稻不同行株距配比下,浮游植物密度和生物量随水稻采样周期逐渐降低。

宁夏是西北地区重要的养殖中心之一。其

地处大陆性干旱气候区,城市气候干旱,四季分明,日照充沛。黄河入境而过,98%水域为黄河水灌溉,年降水量为150~600 mm,有利于作物的生长。近年来,宁夏稻蟹共生模式发展势头迅猛,取得了极大的生态、经济、社会效益;因此,宁夏稻蟹共生模式研究受到学者的重点关注。对宁夏稻蟹共生模式主要集中在稻蟹种养技术^[8]、水生动物研究^[9]、生态、经济效益^[10]方面,稻蟹共生浮游植物群落结构研究较少,仅有曾宪磊等^[11]对不养蟹稻田与稻蟹共生模式不同区位下浮游植物多样性的研究。本研究立足于稻蟹共生模式,研究灌溉鱼塘尾水稻蟹田和灌溉黄河水稻蟹田对稻蟹共生系统的净化,并探讨了使用较多的牛粪等有机肥以及饵料处理下浮游植物的群落特征,为维持水产养殖水体生态健康提供依据,以为现代生态水产养殖提供技术支持与生产指导。

收稿日期: 2021-02-22

修回日期: 2021-05-28

基金项目: 宁夏回族自治区科技重点研发项目(2020ZDYF0860)

作者简介: 顾芸(1994—),女,硕士研究生,研究方向为浮游植物生态学。E-mail:281772666@qq.com

通信作者: 管卫兵, E-mail:wbguan@shou.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于宁夏银川市贺兰县四十里店村(图1)。水稻种植品种为秋优88号,于2020年6月2日播种,9月25日收割,水稻生长周期共116 d。试验蟹品种为中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*),于2020年6月8日放进稻田,9月28日捕捞,河蟹生长期共112 d。

养殖鱼塘系统面积约20 hm²,稻蟹共生系统面积约52 hm²,总面积约72 hm²,生态沟渠长约720 m,3号田2.5 hm²,6号田3 hm²,7号田3.5 hm²,10号田2.5 hm²,8号田2.5 hm²(数据由Google卫星图测量)。

鱼塘系统和稻蟹共生系统通过两条生态沟渠(分别将其命名为进水沟渠和出水沟渠)链接

为一个整体,鱼塘系统的养殖尾水排入进水沟渠中,经由抽水泵灌入稻蟹共生系统,稻蟹共生系统净化后的“清水”排入出水沟渠中,经由抽水泵灌入鱼塘系统,完成整个系统的水循环。

1.2 实验设计

稻田作为净水区,开挖了宽5 m、深1.5 m的“宽沟深槽”环田沟,稻田养殖单元四周设置了防逃围栏,进出水口设置了防逃网以完成种稻养蟹的综合生产。在试验基地内共设置5个实验田,分别为3、6、7、8、10号田,其中8号田灌溉黄河水,其他3、6、7、10等4个田灌溉鱼塘尾水(图1)。试验基地采用“陆基生态渔场”理念运行,鱼塘尾水中过剩的营养物质排入稻田供水稻吸收利用,稻田清静的水再流回鱼塘不仅改善了水体环境,同时大大提高了资源利用率,维持了鱼塘以及稻田生态系统的稳定性^[12]。

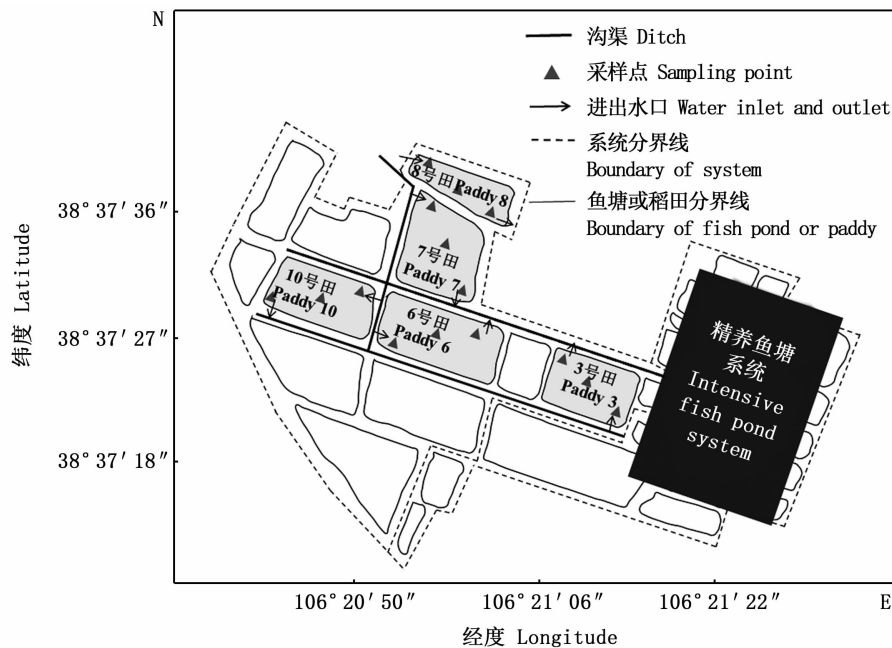


图1 大型稻蟹共生和水产养殖耦合系统实验基地平面图

Fig. 1 Experimental base plan of large-scale rice-crab culture and aquaculture integrated system

采样时间为2020年6月至2020年9月,于水稻分蘖期(6月17日)、拔节期(7月25日)、扬花期(8月16日)、成熟期(9月23日)4个生长期对灌溉黄河水的8号田以及灌溉鱼塘水的3、6、7、10号田进行采样,分别对稻田进水口、稻田中间、稻田出水口进行采样,总计采取水样60次。各实验田基本信息如表1所示。

1.3 样品处理

水温(WT)、溶氧(DO)、pH、盐度用便携式多参数水质分析仪(YSI plus)现场测定,水体透明度(SD)用透明度盘现场测定,氨氮(NH₃-N)、磷酸盐(PO₄³⁻)、亚硝酸盐(HNO₂)在实验室中用国标法测定,总碱度用滴定法检测。采取的水样带回实验室后用鲁哥氏碘液进行固定、沉淀,48 h

后用虹吸法吸取上清液,浓缩的水量依据《水生生物学》^[13]中规定的透明度而定(表2)。使用移液枪取0.1 mL浓缩液至浮游植物计数框进行种类鉴定与计数,主要参照《中国内陆水域常见藻类图谱》^[14]和《中国淡水藻类系统、分类及生态》^[15]。

表1 稻田基本信息

Tab.1 Basic information of Paddy field

稻田 Paddies	河蟹投放质量 Mass of crab /kg	稻田面积 Paddy field area /hm ²
3号田 Paddy 3	150	2.5
6号田 Paddy 6	200	3.0
7号田 Paddy 7	200	3.5
10号田 Paddy 10	200	2.5
8号田 Paddy 8	150	2.5

表2 依透明度确定水样浓缩体积

Tab.2 The concentrated volume of water sample based on transparency

透明度 Transparency/cm	1 000 mL水样浓缩后的水量 Water volume/mL
≥100	30 ~ 50
≥50, <100	100 ~ 50
≥30, <50	500 ~ 100
≥20, <30	1 000(不浓缩)
<20	>1 000(稀释)

1.4 数据分析

用Excel对数据进行预处理,用Origin 2018画图,用SPSS 20.0进行One-Way ANOVA分析。浮游植物密度计算采用《水生生物学》计算法。浮游植物群落结构特性用Shannon物种多样性指数(H)、Pielou均匀度指数(J)、Margalef物种丰富度指数(D)、浮游植物优势度(Y)表示, $Y > 0.02$ 为优势种。生物多样性指数(H)通常用来作为水质评价的依据,一般来说,其数值越大,则表示水质情况越好。当 $H > 3$ 时,水质状况为清洁水体;当 H 为2~3时,水质状况为轻度污染;当 H 为1~3时,水质状况为中度污染;当 H 为0~1时,水质状况为重度污染。浮游植物多样性等级用生物多样性阈值(D_v)表示(表3)。

$$J = H/\ln S \quad (1)$$

$$Y = (N_i/N)f_i \quad (2)$$

$$D_v = \log_2 S \quad (3)$$

$$H = -\sum P_i \ln P_i \quad (4)$$

$$D = (S-1)/\ln N \quad (5)$$

式中: N 表示采集样品中浮游植物种类总个体数;

S 为采集样品中的种类总数; P_i 为第 i 种占总个体的比例; N_i 表示第 i 种的个体数; f_i 表示第 i 种的出现频率。

表3 生物多样性阈值的分级标准

Tab.3 The standard of diversity threshold value

评价等级 Class	D_v	等级描述 Classification
V	<0.6	多样性差 Low diversity
IV	0.6 ~ 1.5	多样性一般 Average diversity
III	1.6 ~ 2.5	多样性较好 Better than average diversity
II	2.6 ~ 3.5	多样性丰富 High diversity
I	>3.5	多样性非常丰富 Highest diversity

2 结果与分析

2.1 稻蟹共生田浮游植物种类结构

本研究中共鉴定出浮游植物8门253种,其中,绿藻门81种(32.0%),裸藻门60种(23.7%),硅藻门54种(21.3%),蓝藻门42种(16.6%),甲藻门7种(2.8%),隐藻门5种(2.0%),黄藻门3种(1.2%),金藻门1种(0.4%)。8号田浮游植物种类最少,为127种;10号田浮游植物种类最多,为159种。8号田分蘖期只出现了绿藻门、蓝藻门、硅藻门、裸藻门、隐藻门5个门类,其他4个稻田分蘖期出现的浮游植物种类数比较多。在水稻的4个生长时期中,扬花期浮游植物种类数最多。在水稻的完整生长周期内,8号田与7号田出现浮游植物门类共7个,未出现金藻门,3、6、10号田中8个门类的浮游植物均有出现。

本研究中浮游植物优势种共有13种,隶属4门9属,其中,蓝藻门9种,绿藻门2种,硅藻门1种,黄藻门1种。5个稻田中,8号田优势种数量最少,原因可能是对照组灌溉黄河水,稻田中富含的有机质较少,阻碍了浮游植物的生长。试验组灌溉鱼塘水,稻田对鱼塘尾水进行净化,同时也促进了浮游植物的生长。

2.2 稻蟹共生田浮游植物密度

进水口密度变化范围为 $3.2 \times 10^7 \sim 1.052 \times 10^9$ cells/L,稻田中间密度变化范围为 $0.4 \times 10^7 \sim 6.4 \times 10^7$ cells/L,出水口密度变化范围为 $2.4 \times 10^7 \sim 7.55 \times 10^8$ cells/L,见图1。稻田中间浮游植物密度较稻田进水口、出水口密度显著降低,可能是稻田中间水体受稻田中间的水稻影响所致。10号田中间的浮游植物数量较多,可能与

10 号田涵管以直接通入田面为主有关,而其他稻田涵管为直接通入环沟和稻田中间两种方式,依靠抬高稻田水位方式进行稻蟹的生产。

8 号田密度最低,10 号田密度最高,是由于 8 号田灌溉的是黄河水,而其他田灌溉的鱼塘尾水带来的营养物质加速了浮游植物的生长。在整个实验过程中,6 号田进水口在水稻扬花期浮游

植物密度最高,浮游植物密度最低出现于水稻分蘖期的 8 号田中间,6 号田灌溉鱼塘尾水,再加上牛粪等有机肥以及投饵加快了浮游植物的生长。在水稻不同生长期内,浮游植物密度变化幅度较大,总体上呈现拔节期最高,扬花期其次,成熟期第三,分蘖期最低的趋势。

表 4 浮游植物优势种组成

Tab. 4 Composition of phytoplankton dominant species

种类 Species	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	扬花期 Flowering stage	成熟期 Maturation stage
蓝藻门 Cyanophyta				
螺旋藻 <i>Spirulina</i> sp.	-	-	-	0.020
伪鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i> sp.	-	0.440	0.245	0.113
湖泊伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena limnetica</i>	-	-	0.038	0.154
束缚色球藻 <i>Chroococcus tenax</i>	0.024	-	-	-
铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>	0.121	-	0.079	0.080
不定微囊藻 <i>Microcystis incerta</i>	0.100	0.030	0.034	-
密集微囊藻 <i>Microcystis densa</i>	0.042	-	-	-
边缘微囊藻 <i>Microcystis marginata</i>	-	-	0.093	-
细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>	-	0.117	0.035	0.075
绿藻门 Chlorophyta				
小球藻 <i>Chlorella</i> sp.	0.039	0.248	0.249	0.251
四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>	-	0.026	-	0.201
硅藻门 Bacillariophyta				
模糊直链藻 <i>Aulacoseira ambigua</i>	-	0.029	0.020	-
黄藻门 Xanthophyta				
扁形膝口藻 <i>Gonyostomum depressum</i>	0.072	-	-	-

注:“-”表示浮游植物不是优势种(优势度 < 0.02)。

Notes:“-” indicates the phytoplankton is not the dominant species (dominance < 0.02).

2.3 稻田出水口处浮游植物多样性特性

如图 3 所示,将 3、6、7、10 号田出水口生物多样性特征指数取平均值记作试验组,8 号田记作对照组。试验组 Shannon Wiener 多样性指数均值为 2.02 ± 0.30 ,对照组 Shannon Wiener 多样性指数均值为 2.14 ± 0.20 ,试验组和对照组多样性指数无显著差异($P > 0.05$)。总体上试验组与对照组水质状况为中度富营养化,可能是由于养殖尾水的排入以及牛粪投入等影响了稻田营养状况。试验组 Pielou 均匀度指数均值为 0.57 ± 0.09 ,对照组 Pielou 均匀度指数均值为 $0.60 \pm$

0.06 ,且试验组和对照组均匀度指数无显著差异($P > 0.05$)。试验组 Margalef 丰富度指数均值为 1.82 ± 0.21 ,对照组 Margalef 丰富度指数均值为 1.72 ± 0.17 ,方差分析表明试验组和对照组丰富度指数无显著差异($P > 0.05$)。试验组多样性阈值均值为 5.17 ± 0.22 ,对照组多样性阈值为 5.01 ± 0.24 ,试验组和对照组多样性阈值无显著差异($P > 0.05$)。综合上述指数,浮游植物多样性呈逐渐丰富的特性。从多样性阈值分级来看,本研究中 5 个稻田浮游植物多样性由较好演变至丰富。

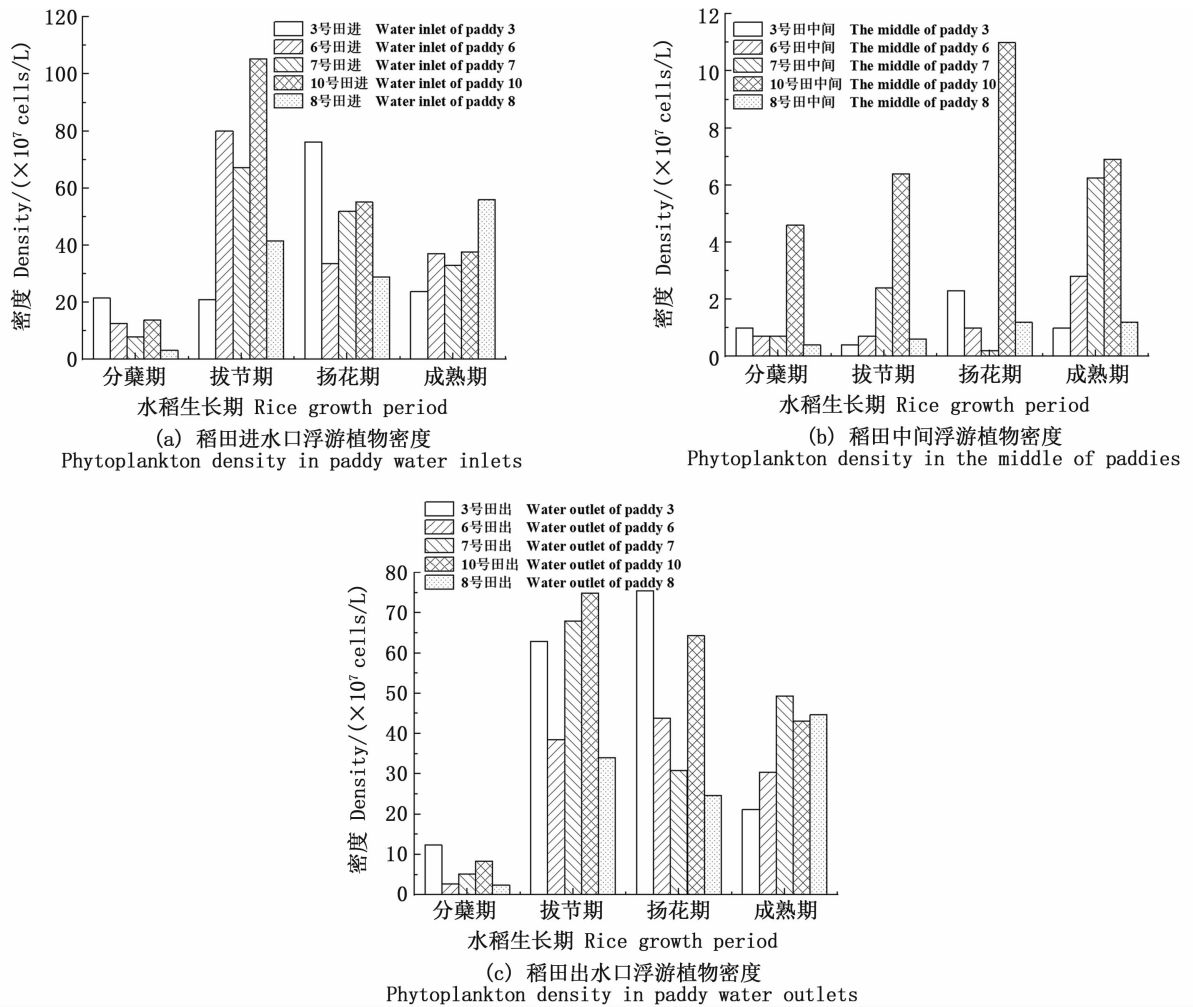


图 2 浮游植物密度

Fig. 2 The density of phytoplankton

2.4 水质理化指标

将 3、6、7、10 号田进出水口与稻田中间水质理化指标均取平均值记作试验组,与对照组 8 号田进行对比(图 4,表 5)。本研究中水温随水稻生长期总体上呈现先升后降的趋势,之后随水稻生长时期而降低,水稻拔节期水温最高,成熟期水温最低。一般来说,水温与溶解氧呈反比,而水温最高的水稻拔节期间溶氧并非最低,可能是因为水稻拔节期浮游植物的大量生长繁殖增加了溶解氧。本研究基地位于盐碱地区,试验组盐度、总碱度的变化幅度稍大。试验组磷酸盐总体上高于对照组,可能与试验组平均河蟹密度高于对照组有关,河蟹的代谢物增加了有机质含量,使磷酸盐得以升高。亚硝酸盐值较小,多次所测得的值为 0,表明稻田净化水质效果明显。研究期间氨氮值随水稻生长期而逐次降低,说明稻田

中灌溉的鱼塘尾水与黄河水经系统循环处理后对水体起到了明显的改善作用。

结合调查中浮游植物种类出现的频率,选取 16 种浮游植物进行 DCA 分析,发现 lengths of gradient 数值为 2.639 (小于 3),因此对其做 RDA 分析(图 5)。蒙特卡洛检验结果显示为:透明度 ($P = 0.002$)、磷酸盐 ($P = 0.004$)、水温 ($P = 0.002$)、pH ($P = 0.004$)、溶解氧 ($P = 0.030$)、亚硝酸盐 ($P = 0.022$)、氨氮 ($P = 0.016$) 是显著性环境因子 ($P < 0.05$)。RDA 分析表明,一轴、二轴解释度分别为 42.5%、25.4%。浮游植物受 pH、透明度、水温影响较大。第一象限主要与水温、亚硝酸盐、盐度、磷酸盐呈正相关关系,主要包括伪鱼腥藻 (*Pseudoanabaena* sp.)、束缚色球藻 (*Chroococcu stenax*)、四足十字藻 (*Crucigenia tetrapedia*);第二象限主要与透明度、氨氮呈正相

关关系, 主要包括扁形膝口藻 (*Gonyostomum depressum*); 第三象限包括卵形隐藻 (*Cryptomonas ovata*); 第四象限主要与 pH 呈正相关关系, 主要包括螺旋藻 (*Spirulina* sp.)、湖泊伪鱼腥藻 (*Pseudanabaena limnetica*)、铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*)、不定微囊藻 (*Microcystis*

incerta) 密集微囊藻 (*Microcystis densa*)、边缘微囊藻 (*Microcystis marginata*)、细小平裂藻 (*Merismopedia minima*)、小球藻 (*Chlorella* sp.)、模糊直链藻 (*Aulacoseira ambigua*) 梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*)、链形小环藻 (*Cyclotella catenata*)。

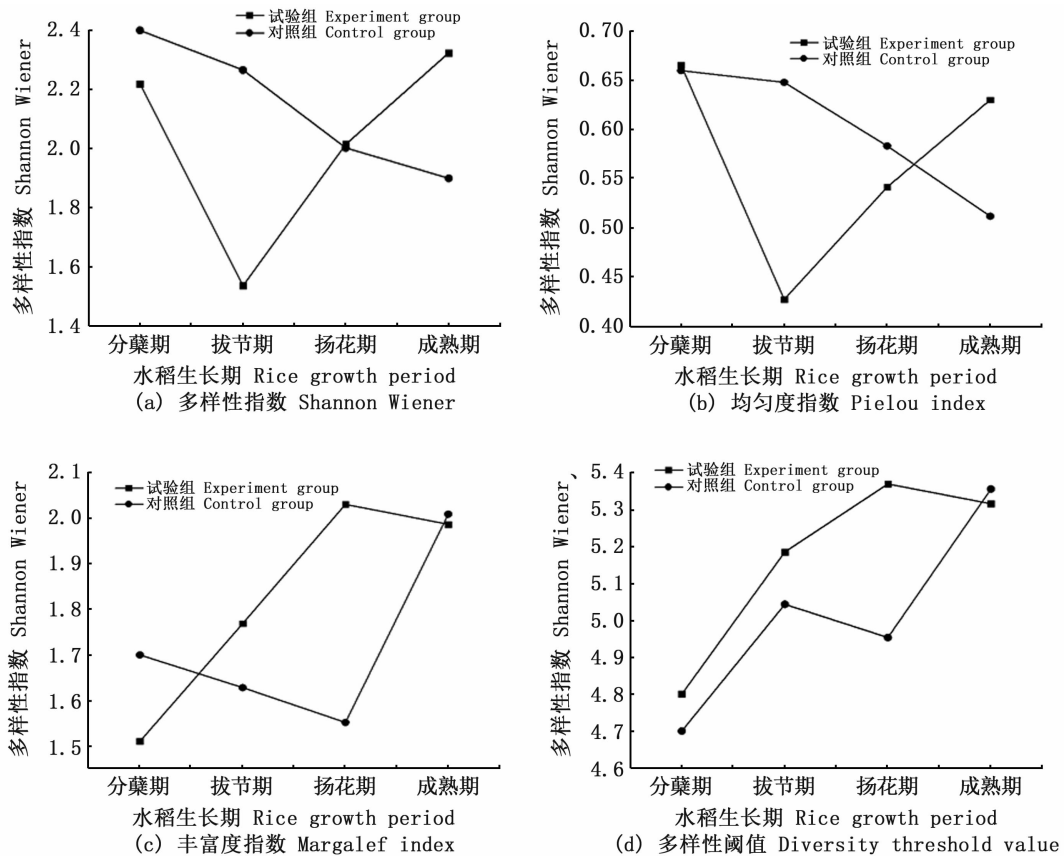


图3 浮游植物多样性特征

Fig. 3 Diversity characteristics of phytoplankton

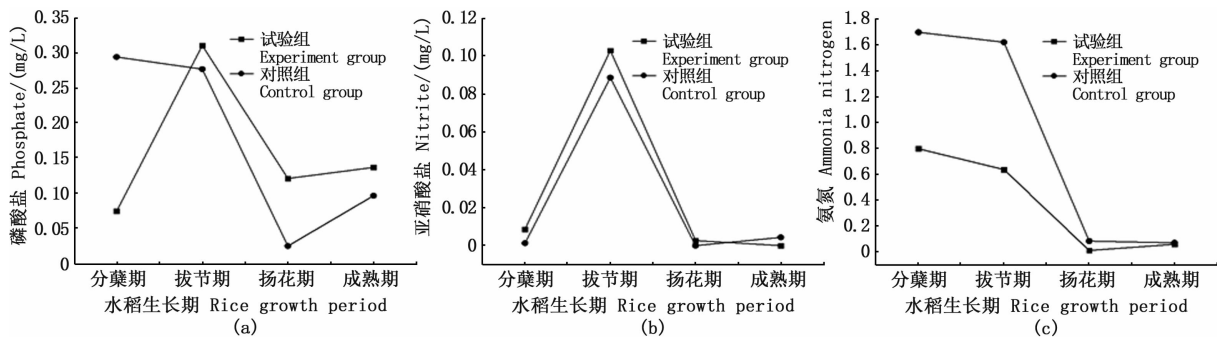
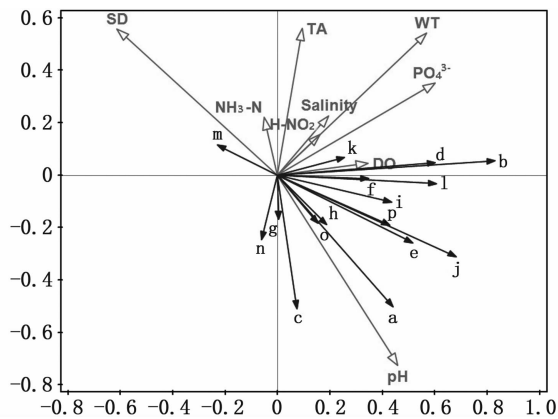


图4 稻田主要营养盐在水稻不同生长阶段变化

Fig. 4 Variation of main nutrients in paddy fields in different growing stages

表 5 稻田水温、DO、pH、盐度和总碱度
Tab.5 Water temperature, DO, pH, Salinity and total alkalinity of paddies

项目 Item	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	扬花期 Flowering stage	成熟期 Maturation stage
水温 Temperature/°C				
试验组 Experiment group	24.80 ± 0.96	29.63 ± 0.67	24.71 ± 0.84	22.04 ± 0.42
对照组 Control group	24.38 ± 0.00	31.92 ± 0.00	23.29 ± 0.00	23.30 ± 0.00
溶解氧 Dissolved oxygen/(mg/L)				
试验组 Experiment group	13.07 ± 0.71	11.75 ± 0.71	8.64 ± 1.44	8.09 ± 0.72
对照组 Control group	12.01 ± 0.00	12.33 ± 0.00	5.96 ± 0.00	8.14 ± 0.00
pH				
试验组 Experiment group	8.54 ± 0.03	8.84 ± 0.15	8.73 ± 0.06	9.04 ± 0.07
对照组 Control group	8.73 ± 0.00	8.75 ± 0.00	8.64 ± 0.00	9.09 ± 0.00
盐度 Salinity				
试验组 Experiment group	0.51 ± 0.07	0.54 ± 0.10	0.59 ± 0.03	0.51 ± 0.06
对照组 Control group	0.56 ± 0.00	0.60 ± 0.00	0.34 ± 0.00	0.40 ± 0.00
总碱度 Total alkalinity/(mg/L)				
试验组 Experiment group	410.58 ± 51.54	395.83 ± 96.67	381.67 ± 39.10	265.50 ± 55.82
对照组 Control group	354.33 ± 0.00	430.67 ± 0.00	217.33 ± 0.00	173.33 ± 0.00



a. 螺旋藻 *Spirulina* sp.; b. 伪鱼腥藻 *Pseudonabaena* sp.; c. 湖泊伪鱼腥藻 *Pseudonabaena limnetica*; d. 束縛色球藻 *Chroococcus tenax*; e. 铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa*; f. 不定微囊藻 *Microcystis incerta*; g. 密集微囊藻 *Microcystis densa*; h. 边缘微囊藻 *Microcystis marginata*; i. 细小平裂藻 *Merismopedia minima*; j. 小球藻 *Chlorella* sp.; k. 四足十字藻 *Crucigenia tetrapedia*; l. 模糊直链藻 *Aulacoseira ambigua*; m. 扁形膝口藻 *Gonyostomum depressum*; n. 卵形隐藻 *Cryptomonas ovata*; o. 梅尼小环藻 *Cyclotella meneghiniana*; p. 链形小环藻 *Cyclotella catenata*

图 5 浮游植物与环境因子冗余分析
Fig.5 Biplot of RDA of phytoplankton and environmental factors

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构的组成及其变化特征

本研究中绿藻门最多,其次为裸藻门、蓝藻

门。曾宪磊等^[11]对宁夏贺兰县稻蟹共生模式不同区位浮游植物的研究发现硅藻门最多,裸藻门第二,与本文研究结果不同的原因可能是鱼塘尾水与稻田的循环运作模式中水质的改善调节了浮游植物群落结构以绿藻门为主。李岩^[6]对稻蟹共生模式研究中主要浮游植物依次为绿藻门、裸藻门、蓝藻门,与本研究结果大致保持一致。王昂^[7]研究稻蟹共生模式中浮游植物的群落结构与本研究结果高度吻合。不同于湖泊^[16]、河道等^[17]浮游植物群落结构,养殖过程中投料以及牛粪等有机肥的使用使水体有机质含量升高,富营养化水平加重,导致一些耐污裸藻如鱼形裸藻、扁裸藻等快速生长,裸藻门种类数量占据较大优势比。

在本研究中,浮游植物群落结构多样性高,浮游植物种类数量多。宁夏地区夏季温度高,日晒辐射强,一方面为水稻的生长提供了良好的气候条件,另一方面也提高了浮游植物的繁殖效率。再加上本研究中稻蟹共生系统水体与鱼塘尾水的良性循环,牛粪等有机肥、饵料的投放,大大提高了水体中的有机质含量,为浮游植物生长提供了养料。对照组浮游植物种类结构多样化特征低于试验组,说明黄河水与稻蟹共生模式的循环效率远不及鱼塘尾水与稻蟹共生模式的循环效率,显示了循环系统的优越性。

3.2 浮游植物多样性特性及优势种演替

水稻分蘖期间,温度相对较低,浮游植物密度普遍较小。水稻生长前期,水流速度相对缓

慢,硅藻门占优势度较大,以模糊直链藻为主。水稻进入拔节期后,夏季水稻光照强度增强,水温逐渐升高,浮游植物生物密度逐渐增大。水稻拔节期为生物密度最高时期,蓝藻门、绿藻门生物密度占比逐渐增大,以伪鱼腥藻、铜绿微囊藻、小球藻等为主。水稻成熟期硅藻生物密度所占比例相对水稻其他生长期有所降低,可能与蓝藻的大量生长繁殖有关。蓝藻的生长繁殖不仅会与硅藻形成竞争,同时蓝藻还会产生某些抑制硅藻生长的有机质,进一步阻碍硅藻的生长^[18]。

研究^[19]表明,有机质会加快浮游植物的生长发育。本实验中鱼塘尾水以及牛粪、饵料等带来的有机质促进了浮游植物的生长,浮游植物群落结构丰富。蓝藻在温暖的环境下生长旺盛^[20],采样期间宁夏地区大多数时间温度较高,日照时间较长,浮游植物优势种以蓝藻为主。铜绿微囊藻、细小平裂藻耐高温能力、耐光照较强,而伪鱼腥藻在低温、低光照条件下生长较好^[21-22]。水稻拔节期温度较高,成熟期温度较低,主要优势种由铜绿微囊藻、细小平裂藻演替为伪鱼腥藻。

3.3 环境因子对浮游植物优势种的影响

环境因子对浮游植物生长具有重要作用,水温、光照、营养盐等都是影响浮游植物群落结构的因素。本研究中水稻拔节期、扬花期密度较高,说明水温影响了浮游植物的生长。浮游植物优势种呈现明显的时期变化,水稻分蘖期水温降低,浮游植物生长缓慢,拔节期、扬花期蓝藻优势度最高。成熟期水温下降,营养盐浓度减少,绿藻优势度最高,栅藻、小球藻等带鞭毛小型绿球藻因其新陈代谢较快,迅速繁殖,优势度较大。亚硝酸盐为氮源的种类之一,在一定浓度下提供的氮可促进浮游植物生长^[23]。本研究中微囊藻与亚硝酸盐呈负相关,与陈为民等^[24]的亚硝酸盐升高会导致微囊藻生长缓慢的研究结果保持一致。微囊藻的快速生长使水体浑浊,溶解氧较低,阻碍了其他浮游植物的生长。当水体中溶解氧低时氨氮转化为硝酸盐的效率降低,亚硝酸盐浓度升高。透明度的大小可以粗略推算浮游植物的量。一般来说,在同一条件下,水体透明度越低,浮游植物密度越高^[25];本研究 RDA 分析中,透明度与浮游植物呈显著负相关关系,对浮游植物密度影响较大($P < 0.05$),与之相符合。

pH 对浮游植物群落结构的组成成分有密切

关系,当 pH 较高(大于 8.0)时适宜蓝藻的生长^[26]。在本次调查中,水体 pH 变化范围为 8.49~9.09,pH 与蓝藻门呈正相关($P < 0.05$),蓝藻优势种为 9 种,占据绝对优势。有研究表明,当 pH 在 8~12 范围内变化时, HPO_4^- 为磷的主要存在形式,浮游植物吸收的主要形式为正磷酸盐^[27]。无机氮是影响浮游植物生长的重要因素,无机氮以各种形态存在,其中氨态氮是浮游植物吸收的优先选择^[28]。本研究中氨氮随水稻生长期而逐渐降低,充分显示了系统对稻田水质的净化效果。稻田灌溉的鱼塘水和黄河水带来的有机质消耗氧气,分解后氨氮升高。此外,浮游植物在水稻生长前期还没有发挥其活性,生长速率低,其产生的部分浮游植物残体可能也是导致前期氨氮较高的原因。随着后期浮游植物大量生长对氨氮的吸收,以及系统对稻田水体的循环净化,氨氮浓度降低,这与倪蒙等^[29]的研究结果保持一致。

参考文献:

- [1] 曹义虎,叶雯昕,华崇新,等. 我国稻渔综合种养研究进展[J]. 江西水产科技, 2020(5):50-52.
CAO Y H, YE W X, HUA C X, et al. Research progress of integrated rice and fishery cultivation in China[J]. Jiangxi Fishery Science and Technology, 2020(5):50-52.
- [2] 管卫兵,刘凯,石伟,等. 稻渔综合养种的科学范式[J]. 生态学报, 2020, 40(16):5451-5464.
GUAN W B, LIU K, SHI W, et al. Scientific paradigm of integrated farming of rice and fish[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16):5451-5464.
- [3] 陈飞星,张增杰. 稻田养蟹模式的生态经济分析[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3):323-326.
CHEN F X, ZHANG Z J. Ecological economic analysis of a rice-crab model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3):323-326.
- [4] 张启明,铁文霞,尹斌,等. 藻类在稻田生态系统中的作用及其对氨挥发损失的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6):814-819.
ZHANG Q M, TIE W X, YIN B, et al. Algae function in paddy field ecosystem and its effect on reducing ammonia volatilization from paddy fields[J]. Soils, 2006, 38(6):814-819.
- [5] 王武. 北方稻田养蟹产业发展思路[J]. 中国水产, 2008(10):11-13.
WANG W. Development ideas of crab farming industry in northern rice fields[J]. China Fisheries, 2008(10):11-13.
- [6] 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.

- LI Y. Study on the effects of plankton and zoobenthos in rice-crab culture system [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2013.
- [7] 王昂. 新型稻蟹共作模式对稻田水质和浮游生物影响的研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2011.
- WANG A. Study on the effect of water quality and plankton in a new rice-crab culture model[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011.
- [8] 李斌, 张小晓, 张朝阳, 等. 宁夏稻蟹综合种养技术效益分析[J]. 宁夏农林科技, 2016, 57(12):35-36, 54.
- LI B, ZHANG X X, ZHANG C Y, et al. Ningxia integrated rice-crab farming technology benefits[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2016, 57(12):35-36, 54.
- [9] 汪宏伟, 白文贤. 养蟹对稻田水生动物种类与生物量的影响[J]. 科学养鱼, 2014(11): 50-52.
- WANG H W, BAI W X. The effects of crab culture on species and biomass of aquatic animals in paddy field[J]. Scientific Fish Farming, 2014(11): 50-52.
- [10] 王坚, 吴轶宏, 杨明江, 等. 稻田养蟹研究[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(12): 193-196.
- WANG J, WU Y H, YANG M J, et al. Study on crab culture in paddy field [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2011, 52(12): 193-196.
- [11] 曾宪磊, 陆诗敏, 刘兴国, 等. 稻蟹复合模式不同区位浮游生物多样性分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(12): 67-70.
- ZENG X L, LU S M, LIU X G, et al. Diversity analysis of plankton of rice-crab complex mode at different locations[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(12):67-70.
- [12] 管卫兵, 王丽. 陆基生态渔场的概念、理论与实践[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(9):197-200.
- GUAN W B, WANG L. Concept, theory and practice of land-based ecological fishery system[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(9):197-200.
- [13] 赵文. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- ZHAO W. Hydrobiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [14] 邓坚. 中国内陆水域常见藻类图谱[M]. 武汉: 长江出版社, 2012.
- DENG J. Atlas of common algae in inland waters of China [M]. Wuhan: Changjiang Press, 2012.
- [15] 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.
- HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [16] 杨娜, 段元亮, 何培民, 等. 杭州湾人工潟湖夏季浮游植物群落演替与环境因子的关系[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(5):757-769.
- YANG N, DUAN Y L, HE P M, et al. Relationship between summer phytoplankton community succession and environment factors in the artificial lagoon of Hangzhou bay[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(5):757-769.
- [17] 马婕, 申利亚, 何培民, 等. 苏州城区河道浮游植物功能群演替特征及其对环境因子的响应[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(1):103-112.
- MA J, SHEN L Y, HE P M, et al. Succession characteristics and responses to environmental factors of phytoplankton functional groups in river courses in the urban area of Suzhou City[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(1):103-112.
- [18] 张家路, 夏昇, 顾静, 等. 上海青草沙水库浮游植物群落结构的研究[J]. 基因组学与应用生物学, 2019, 38(2): 747-756.
- ZHANG J L, XIA S, GU J, et al. Research of community structure of phytoplankton in Shanghai Qingcaosha reservoir [J]. Genomics and Applied Biology, 2019, 38(2): 747-756.
- [19] 亢振军. 东海赤潮区沉积物中有机质来源及其与浮游植物群落关系初探[D]. 北京: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.
- KANG Z J. A primary study on sources of the organic matters in sediment of the red-tide zone in the East China Sea and its relationship with phytoplankton community[D]. Beijing: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [20] 魏志兵, 柴毅, 罗静波, 等. 长湖浮游植物优势种季节演替及生态位分析[J]. 水生生物学报, 2020, 44(3): 612-621.
- WEI Z B, CHAI Y, LUO J B, et al. Seasonal succession and ecological niche analysis of the dominant species of phytoplankton in Changhu Lake [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, 44(3):612-621.
- [21] 刘菲菲, 冯慕华, 尚丽霞, 等. 温度对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和鱼腥藻 (*Anabaena* sp.) 生长及胞外有机物产生的影响[J]. 湖泊科学, 2014, 26(5): 780-788.
- LIU F F, FENG M H, SHANG L X, et al. Effects of temperature on the growth and generation of extracellular organic matter of *Microcystis aeruginosa* and *Anabaena* sp. [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(5): 780-788.
- [22] 钱志萍, 李卓远, 李燕均, 等. 温度、光照及藻细胞密度对3种水华蓝藻生长及竞争的影响[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2020, 49(1):18-23.
- QIAN Z P, LI Z Y, LI Y J, et al. Effects of temperature, illumination and cell density on growth and competition of three species of water-bloom cyanobacteria [J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2020, 49(1):18-23.
- [23] YANG S L, WANG J, CONG W, et al. Utilization of nitrite as a nitrogen source by *Botryococcus braunii* [J]. Biotechnology Letters, 2004, 26(3): 239-243.
- [24] 陈卫民, 戴树桂, 张清敏. 亚硝酸盐对铜绿微囊藻和四尾

- 栅藻生长和竞争的影响[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(9):86-91.
- CHEN W M, DAI S G, ZHANG Q M. Effects of nitrite on the growth and competition of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus quadricauda* [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(9):86-91.
- [25] 杨广利. 洪泽湖富营养化状态调查及防治技术研究初探[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
- YANG G L. Investigation and bioremediation of Hongze Lake eutrophication [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003.
- [26] TEMPONERASM, KRISTIANSEN J, MOUSTAKA-GOUNIM. Seasonal variation in phytoplankton composition and physical-chemical features of the shallow Lake Doirani, Macedonia, Greece[J]. Hydrobiologia, 2000, 424(1/3): 109-122.
- [27] 严力蛟, 金晓辉, 全为民, 等. 千岛湖水体营养主控因子分析[J]. 当代生态农业, 2001(3/4):89-93.
- YAN L J, JIN X H, QUAN W M, et al. Analysis of main controlling factors of water nutrition in Qiandao Lake [J]. Contemporary Eco-Agriculture, 2001(3/4):89-93.
- [28] 张晓萍. 厦门马銮湾水域无机氮的化学特征[J]. 台湾海峡, 2001, 20(3): 319-322.
- ZHANG X P. Chemical characteristics of inorganic nitrogen in Maluan Bay, Xiamen [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2001, 20(3):319-322.
- [29] 倪蒙, 原居林, 刘梅, 等. 建塘江浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系[J]. 水产科学, 2019, 38(3):333-340.
- NI M, YUAN J L, LIU M, et al. Community structure of phytoplankton and its relationship with environmental factors in Jiantangjiang River[J]. Fisheries Science, 2019, 38(3): 333-340.

Phytoplankton community structure of rice-crab culture of integrated system in Ningxia

GU Yun¹, LI Kui¹, CHEN Lijing², SHEN Xiqin¹, SHI Wei³, GUAN Weibing^{1,4}

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Yinchuan Kehai Fishery Biotechnology Co., Ltd, Yinchuan 750000, Ningxia, China; 4. Ningxia Suwo Ecology and Environment Co., Ltd, Yinchuan 750000, Ningxia, China)

Abstract: The study was based on the rice-crab culture of integrated system to analyze phytoplankton and environmental factors at the water inlet, middle and outlet of paddies in the village of Helan, Ningxia. The rice species was Qiuyou 88, and the crab variety was *Eriocheir sinensis*. In the experiment, four paddies (paddy 3, 6, 7 and 10) were irrigated with fish pond tail water (experimental group) and one paddy (paddy 8) was irrigated with water from Yellow River (control group). The results showed that A total of 235 phytoplankton species were identified from 8 phyla throughout four periods in experiment group, among which 153 species from 8 phyla in paddy 3, 147 species from 8 phyla in paddy 6, 143 species from 7 phyla in paddy 7 and 159 species from 8 phyla in paddy 10. A total of 127 species from 7 phyla were identified in the control group. The average density of the experimental group was higher than that of the control group ($P < 0.05$); A total of 13 dominant species were found in the experimental group and 9 dominant species were found in the control group, all of which were dominated by Cyanobacteria. The diversity index of paddy irrigated fish pond tail water was higher than that irrigated Yellow River water, which indicated that the phytoplankton community structure of the paddy irrigated fish pond was more perfect and stable. There was no significant difference in total alkalinity and salinity between the experimental group and the control group ($P > 0.05$), but there was significant difference in transparency, water temperature, phosphate, pH, dissolved oxygen, nitrite and ammonia nitrogen between the experimental group and the control group ($P < 0.05$). The RDA analysis showed that pH, transparency (SD) and water temperature (WT) were identified as the main factors affecting the changes in phytoplankton community.

Key words: Rice-crab culture; integrated system; phytoplankton; environment factors; redundancy analysis