农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

不同年限稻鸭共作对水体藻类群落结构的影响

王晓莹， 冯金侠， 韦生宝， 陈长青

引用本文:
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.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0220

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

稻鸭共作中CH_4和N_2O排放规律及影响因素

温婷, 赵本良, 章家恩
农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1442-1450 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1389

作物-鱼共作对淡水养殖系统N_2O排放的影响

鲍婷, 王梦杰, 吴俊男, 刘耀斌, 李凤博, 冯金飞, 方福平
农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1344-1353 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1367

秸秆还田条件下灌溉方式对双季稻产量及农田温室气体排放的影响

成臣, 杨秀霞, 汪建军, 程慧煌, 罗亢, 曾勇军, 石庆华, 商庆银
农业环境科学学报. 2018, 37(1): 186-195 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0893

稻草还田和冬种绿肥对华南双季稻产量及稻田CH4排放的影响

田卡, 张丽, 钟旭华, 黄农荣, 张卫建, 潘俊峰
农业环境科学学报. 2015(3): 592-598 https://doi.org/10.11654/jaes.2015.03.024

秸秆还田模式对土壤有机碳及腐植酸含量的影响

郭瑞华, 靳红梅, 常志州, 王海候, 孙小祥, 沈明星, 陆长婴
农业环境科学学报. 2017, 36(4): 727-733 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1364

关注微信公众号，获得更多资讯信息

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 different durations of rice-duck farming on the structure of algal communities in water [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9): 1860-1868.

开放科学 OSID

不同年限稻鸭共作对水体藻类群落结构的影响

王晓莹, 冯金侠, 韦生宝, 陈长青*

(江苏省现代作物生产协同创新中心 南京农业大学应用生态研究所, 南京 210095)

摘　要: 为探究不同规模、不同年限稻鸭共作系统水体藻类群落组成及多样性的差异,通过设置不同年限(4、20 a)和不同规模(0.067、0.200、0.333 hm^2)稻鸭共作田,利用高通量测序等手段,分析稻鸭共作田水体藻类多样性及群落结构的变化规律。结果表明:稻鸭共作田水体藻类的丰富度指数较非稻鸭共作田高,长期稻鸭共作田水体藻类 Ace 丰富度指数较短期共作田高,物种数增多;稻鸭共作田与非稻鸭共作田水体藻类优势种均为裸藻、绿藻、蓝藻,但稻鸭共作田绿藻、蓝藻的相对丰度高于非稻鸭共作田,另外稻鸭共作田规模大小影响蓝藻的相对丰度,规模越大蓝藻相对丰度越低;稻鸭共作田藻类多样性指数比非稻鸭共作田高,水体藻类群落结构差异较大,稻鸭共作系统的水体藻类群落结构表现出一定的相似性。冗余分析表明,对于稻鸭共作后期而言,影响非稻鸭共作田水体藻类群落结构的主要环境因子是溶解氧,而影响稻鸭共作水体藻类群落结构的环境因子是可溶性钾和 pH。研究表明,长期稻鸭共作系统提高水体藻类多样性,改变藻类群落组成,从而影响农田水体生态环境。

关键词: 稻鸭共作;藻类;高通量测序;多样性;群落组成

中图分类号: Q948.8　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2021)09-1860-09　　doi:10.11654/jaes.2021-0220

Effects of different durations of rice-duck farming on the structure of algal communities in water

WANG Xiaoying, FENG Jinxia, WEI Shengbao, CHEN Changqing*

(Jiangsu Modern Crop Production Collaborative Innovation Center, Institute of Applied Ecology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: This study aimed at exploring how different scales (0.067, 0.200 hm^2, and 0.333 hm^2) and duration (4 a and 20 a) of rice-duck farming could affect the differences in the composition and diversity of algal communities using high-throughput sequencing and other methods to analyze algal diversity and community structure in the water. The results showed that the algal abundance index of water in rice-duck farming fields was higher than that in non-rice-duck farming fields. Moreover, the Ace abundance index of water bodies in long-term rice-duck farming fields was higher than that in short-term farming fields, and the number of species also increased. In non-rice-duck farming fields and rice-duck farming fields of different scales and duration, the dominant algal species were Euglenophyta, Chlorophyta, and Cyanophyta. The abundances of Chlorophyta and Cyanophyta in rice-duck farming fields were higher than those of traditional farming. The scale of rice-duck farming affected the abundance of cyanobacteria; the larger the scale, the lower the abundance of Cyanophyta. The algal diversity index of the rice-duck farming field was higher than that of the non-rice-duck farming field, and the algal community structure of the water was considerably different. The water algal community structure of the rice-duck farming system showed certain similarities. Redundancy analysis showed that for the late stage of rice-duck farming, dissolved oxygen was an important environmental factor that affects the structure of the algal community in traditional farming; the environmental factors that significantly affected the algal community structure in rice-duck farming were soluble potassium and pH. Research shows that the long-term rice-duck farming system increases algal diversity in water and changes the composition of the algal community, thereby affecting the ecological environment of the farmland water.

Keywords: rice-duck farming; algae; high-throughput sequencing; diversity; composition of communities

收稿日期: 2021-02-24　　**录用日期:** 2021-04-29

作者简介: 王晓莹(1996—),女,河南人,硕士研究生,主要研究方向为应用生态农业。E-mail:2018101027@njau.edu.cn
***通信作者:** 陈长青　E-mail:1996001@njau.edu.cn

基金项目: 国家科技重大专项(2016YFD0300905)
Project supported: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2016YFD0300905)

稻鸭共作是一种将生态与农业相结合的复合种养模式,因具有显著降低农药化肥的施用量、实现对资源的充分利用、产品绿色安全优质等优点,而备受人们的关注。鸭群的活动可以在一定程度上搅动稻田水体和土壤,大幅提高水体的溶解氧含量[1-2]。鸭群能够明显改善稻田水体理化性质,降低表层水体的温度与pH[3-4],提高混浊度和总氮、总磷、总钾三大营养元素的含量[5-6],促进水稻生长发育[7-9]。另外,鸭子的觅食等活动会不断搅动水体,影响水体养分含量[10-11],调整水中生物群落结构,有效地抑制水中浮游生物的生长,水生生物以及底栖动物的种类数也明显减少[12-14]。

水稻生长必需的条件是田面水富含氮、磷等营养元素[15-17],这也是藻类生长的重要因子。藻类的生长在一定程度上可促进稻田养分的转化与循环,能吸收固定氮、磷,提高土壤有机质含量,促进水稻生长[18]。而稻田水一旦回流到河流中,就会影响周边水体,增加水体富营养化风险[19-20]。稻鸭共作减少了稻田水生生物的数量和生物量,对藻类群落数量的影响显著,稻田水体生物多样性指数得以提高[21-22]。同时稻鸭共作系统能够调整藻类优势种群落结构,显著降低绿藻、硅藻和原生动物的优势度,裸藻、枝角类的优势度显著增加,有利于稻田生态系统的稳定[11,14]。但目前针对稻鸭共作田面水体藻类多样性的研究主要聚焦在短期稻鸭共作,不同年限长期稻鸭共作系统藻类变化的研究尚为少数,不同规模(共作强度)稻鸭共作的研究亦缺乏。由于鸭子是群居动物,不同规模的鸭群活动表现出对农田系统影响强度的差异,同时对水体产生的影响也有差异。结合前人的研究进展,本文从稻鸭共作年限和共作规模两个角度进行分析,探究不同规模、不同年限稻鸭共作系统水体藻类群落组成及多样性的变化,从而优化稻鸭共作规模,改善稻田生态系统,为发展生态农业提供理论依据,促进稻田农业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验设置

试验于2020年在江苏省丹阳市延陵镇(31°89′N,119°27′E)多年稻鸭共作的田块上进行,该地为亚热带季风气候,具有气候湿润、光照充足、雨量丰沛、四季分明的气候特征。该地年平均气温和降雨量分别为16.4 ℃和1 243.3 mm。试验在共作20 a的长期稻鸭共作田(OR),共作4 a的短期稻鸭共作田(GR),以及传统无鸭稻田(CK)上开展研究。长期和短期稻鸭共作田均按不同规模设置3种处理:0.067 hm^2(1亩)、0.200 hm^2(3亩)、0.333 hm^2(5亩)。因此,共设计7个处理:0.067 hm^2长期稻鸭共作(OR1)、0.200 hm^2长期稻鸭共作(OR3)、0.333 hm^2长期稻鸭共作(OR5)、0.067 hm^2短期稻鸭共作(GR1)、0.200 hm^2短期稻鸭共作(GR3)、0.333 hm^2短期稻鸭共作(GR5)、0.133 hm^2传统稻作(CK),每个处理3次重复。

稻鸭共作田在每个小区周围的田埂边围尼龙网进行防护,尼龙网高1 m,网眼2 cm^2,以控制鸭群的活动范围。在晴朗的日间,对雏鸭进行驯水训练,直到鸭子在水中能自由活动且毛发干燥为止。在水稻人工移栽5 d,机插秧7 d后,及时放养经过驯水训练3 d的役用雏鸭。按每公顷270只鸭子进行配置(每667 m^2为18只)。稻鸭共作田不施任何化肥和农药,从放鸭至收鸭前一直保持水层8~10 cm。CK组每公顷施纯氮138 kg,P_2O_5、K_2O各120 kg。在水稻抽穗后7~10 d,及时将鸭从稻田中收回。同时共作稻田在冬季种植紫云英,每667 m^2撒种4~5 kg,并开沟降渍,第二年旋耕入土做基肥,水稻秸秆全部旋耕还田。当地土壤类型为黄泥土,pH 5.9,有机质20.2 $g\cdot kg^{-1}$,全氮1.29 $g\cdot kg^{-1}$,速效磷11.2 $mg\cdot kg^{-1}$,速效钾166.3 $mg\cdot kg^{-1}$。

1.2 水样采集及预处理

2020年6月底至8月底,在稻鸭共作期间每隔7 d对稻田水体进行采集,用于水体藻类测序及水样理化性质的测定。每个小区进行5点随机混合取样,样本置于350 mL塑料瓶中,带回实验室测定。在水样中加入5 mL的鲁哥氏液(至样本呈茶水色)固定藻类。用于测序的水样经过1 000 mL微孔滤膜过滤装置抽滤,将藻类提取到0.22 μm滤膜上,用蒸馏水少量多次地冲洗塑料瓶,使其中的藻类尽可能转移,然后将滤膜装至离心管中在-80 ℃下保存待测。用于测定理化性质的水样在-20 ℃下保存以待后续测定。

1.3 水样检测

水体pH用便携式pH计LH-P300测定,溶氧量用溶氧仪AZ 8403测定,总氮利用紫外分光光度法测定,总磷用分光光度计测定,可溶性钾采取火焰光度计测定[23]。

提取基因组DNA,以两个正向引物(A23SrVF1:GGACARAAAGACCCTATG 和 A23SrVF2:CARA-AAGACCCTATGMAGCT)和两个反向引物(A23SrVR1:AGATCAGCCTGTTATCC 和 A23SrVR2:

TCAGCCTGTTATCCCTAG）为扩增引物[24]，用PCR仪（ABI GeACBeAmp® 9700型）进行PCR扩增。配制2%琼脂糖胶对PCR产物进行电泳，实现胶回收纯化，同时通过荧光定量进行产物定量和均一化检测，之后构建测序文库，进行Miseq测序，校正后将OTU序列对照NT数据库进行物种注释[25]。

1.4 数据分析

将高通量测序原始数据通过FLASH（Version v.1.2.11）、Usearch（Version v.7.0）进行优化与统计，将物种拉丁文名称对照《中国淡水藻类大全》，将其中除藻类之外的物种剔除，然后按最小样本序列数进行抽平，通过Mothur软件（Version v.1.30.2）进行多样性指数分析。采用Excel 2010进行数据处理和表格绘制，使用SPSS 26.0进行方差分析和显著性检验分析，利用Origin 2020及Canoco 5软件作图。

2 结果与分析

2.1 OTU数的变化

测序获得的整个序列共有11 557 586条有效序列，平均序列长度约为366 bp。同时稀释曲线也是趋于平坦，表明测序数据量足以反映样本中的大多数微生物多样性信息。

由表1可知，随着稻鸭共作时间的延长，各时期测序结果中共有OTU数呈先升后降的趋势，各时期共有OTU数占总OTU数的比例范围为18.40%~42.82%。在稻鸭共作21、35、56 d时，稻鸭共作处理下特有OTU数绝大部分高于CK；共作14、28、42 d这3个时期，不同规模稻鸭共作下特有OTU数无显著差异（$P>0.05$）。

2.2 群落结构组成变化——门水平

根据测定结果，将不同年限、不同规模稻鸭系统水体中被鉴定出的所有藻类门，按相对丰度的高低进行排序，并对丰度较高的物种作堆积柱状图分析（图1），发现相对丰度较高的物种主要为裸藻（Euglenophyta）、绿藻（Chlorophyta）、蓝藻（Cyanophyta）、硅藻（Bacillariophyta）、褐藻（Phaeophyta）、黄藻（Xanthophyta），其中优势藻门有裸藻（相对丰度为24.21%~36.87%）、绿藻（相对丰度为23.07%~34.08%）、蓝藻（相对丰度为8.33%~29.47%）、硅藻（相对丰度为0.13%~2.59%），共占藻类总数量的80%左右。进一步分析优势藻门发现，不同处理下水体藻类门水平物种组成有所不同，OR5、GR5处理下裸藻的相对丰度大于CK处理，OR和GR处理下水体绿藻、蓝藻、硅藻的相对丰度均高于CK处理。从同一共作年限、不同共作规模间的变化情况来看，共作规模对蓝藻有一定的影响，规模越大蓝藻的相对丰度越小。

2.3 群落多样性指数的变化

随着稻鸭共作时间的延长，不同规模长期稻鸭共作系统水体藻类多样性指数均呈先升后降的变化趋势（图2），且在第35 d时达到最高点，研究期间水体藻类Shannon多样性指数范围为2.59~4.50。从开始共作到共作35 d期间，OR3处理的水体藻类Shannon多样性指数最大，藻类物种多样性最大；从共作35 d到共作结束期间，OR5处理的水体藻类Shannon多样性指数最大，群落多样性最高。对于表征物种数的Ace丰富度指数，随着稻鸭共作时间的延长，不同规模长期稻鸭共作系统水体藻类多样性指数整体呈先升后降的变化趋势，期间水体藻类Ace丰富度指数范

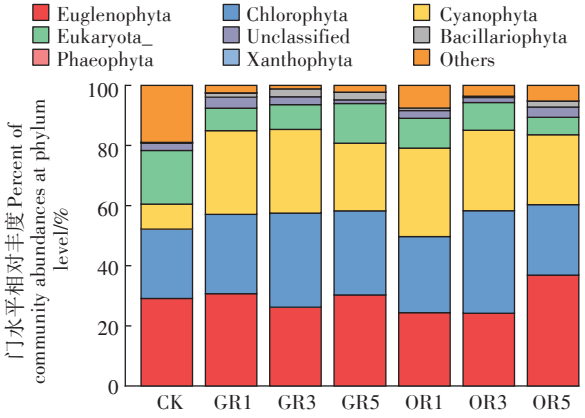
表1 不同共作时间下不同年限的稻鸭共作系统对水体藻类OTU数量的影响

Table 1 Effects of rice-duck system with different farming years on OTU number of algae in water

共作时间 Time/d	共有OTU数 Number of common OTUs	特有的OTU数 Number of unique OTUs						
		CK	GR1	GR3	GR5	OR1	OR3	OR5
7	63	163abc	121bc	109c	145abc	206a	193a	178ab
14	74	160a	185a	211a	210a	168a	235a	183a
21	112	182b	245ab	250ab	241ab	233ab	296a	242ab
28	171	254a	251a	275a	259a	238a	230a	228a
35	163	234b	269ab	240b	296ab	353a	299ab	327a
42	107	204a	204a	228a	227a	202a	265a	300a
49	85	199ab	185b	175b	246ab	272ab	202ab	311a
56	63	179b	175b	221ab	157b	194ab	178b	279a
63	85	215b	210bc	248a	223b	165d	120e	190cd

注：同行不同小写字母表示各处理差异显著（$P<0.05$）。

Note: Different lowercase letters in the same industry indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).



相对丰度<1%的归为“其他”组；下同
Percent of community abundances <1% are classified as “others”. The same below

图 1　不同共作年限、不同规模稻鸭系统对水体藻类门水平群落结构组成的影响

Figure 1　Effects of rice-duck system with different farming years and different scales on community structure of algae at phylum level

围为 270.3~561.9。在稻鸭共作 35 d 后，OR5 稻鸭共作的水体藻类 Ace 丰富度指数最大，群落多样性最高。

随着稻鸭共作时间的延长，不同规模短期稻鸭共作系统水体藻类多样性指数均呈先升后降的变化趋势（图 3），不同规模短期稻鸭共作系统间水体藻类 Shannon 多样性指数无明显差异，期间水体藻类 Shannon 多样性指数范围为 2.06~4.30。对于 Ace 丰富度指数，随着稻鸭共作时间的延长，不同规模短期稻鸭共作系统水体藻类多样性指数整体呈先升后降的变化趋势，在稻鸭共作 35 d 时达到最高点，期间水体藻类 Ace 丰富度指数范围为 174.1~462.5。

由上述分析发现同一年限不同规模间藻类多样性指数无显著差异，因此将同一年限不同规模的藻类多样性指数汇总分析，发现随着稻鸭共作时间的延长，稻鸭共作与传统稻作系统水体藻类多样性指数均呈先升后降的变化趋势（图 4），水体藻类 Shannon 多样性指数范围为 2.43~4.29，在共作 35 d 时达最高点。

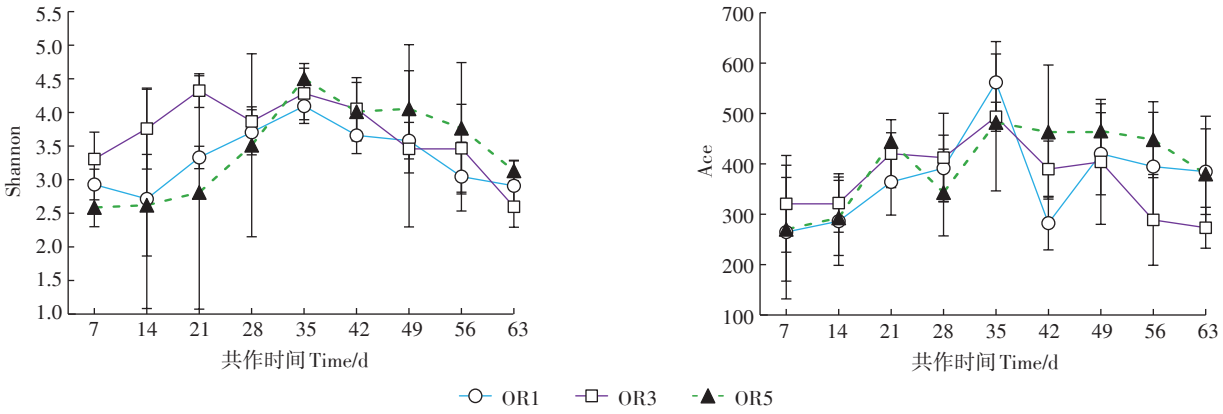


图 2　不同规模下长期稻鸭系统对水体藻类多样性指数的影响

Figure 2　Effects of long-term rice-duck system at different scales on algae diversity index

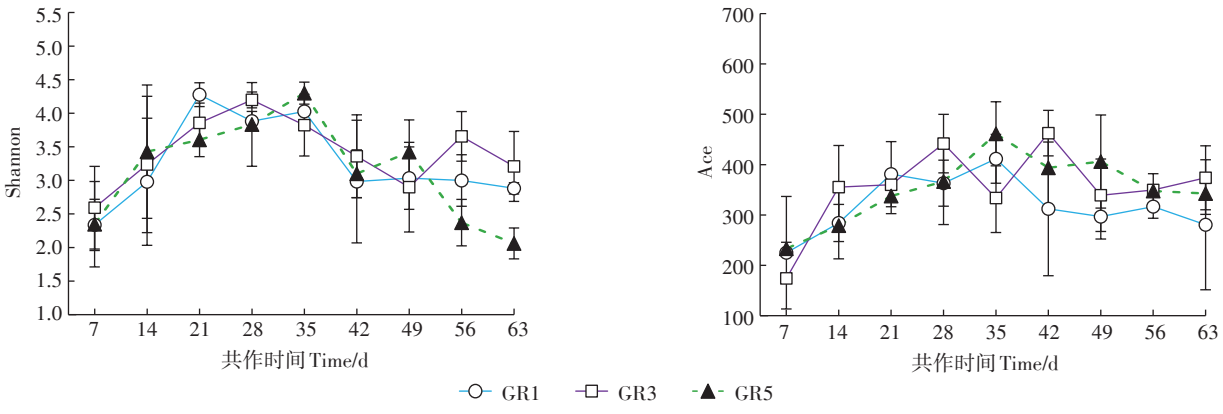


图 3　不同规模下短期稻鸭系统对水体藻类多样性指数的影响

Figure 3　Effects of short-term rice-duck system at different scales on algae diversity index

从开始到共作35 d期间，GR处理下的水体藻类Shannon多样性指数整体处于较高状态，藻类物种多样性最大；从共作35 d到共作结束期间，OR处理下的水体藻类Shannon多样性指数最大，群落多样性最高。对于Ace丰富度指数，随着稻鸭共作时间的延长，稻鸭共作与传统稻作系统水体藻类多样性指数整体呈先升后降的变化趋势，且OR处理下水体藻类Ace丰富度指数最大，物种数最多，GR处理下水体藻类Ace丰富度指数次之，CK处理下最小，其水体藻类Ace丰富度指数范围分别为300.5~512.6、210.8~402.2、236.2~422.6。且在共作21 d和35 d时，不同年限稻鸭共作藻类Ace丰富度指数差异显著。

2.4 群落组成相似性分析

由于随稻鸭共作时间的延长，水体藻类多样性指数呈先升后降的变化趋势，因此把试验分为0~21、22~42、43~63 d 3个时期，分别分析不同阶段水体藻类群落结构的差异。由图5可知，不同年限的稻鸭共作系统水体藻类群落明显分为3簇，CK处理水体藻类群落独自成组，GR与OR处理的藻类群落较为相近，即GR与OR处理下藻类群落结构具有一定的相似性。与传统稻作相比，稻鸭共作系统群落结构发生明显的迁移，与传统稻作的水体藻类群落结构差异很大，说明稻鸭共作的年限与水体中藻类群落结构的变化紧密相关。

不同规模的长期稻鸭共作系统水体藻类群落结构有差异，OR1、OR3、OR5处理的藻类群落结构具有一定差异性；而不同规模的短期稻鸭共作系统水体藻类群落差异较小，即GR1、GR3、GR5处理的藻类群落结构具有一定的相似性，说明长期稻鸭共作下不同规模的藻类群落结构有所不同。

2.5 环境因子与藻类多样性的相关分析

藻类群落结构的变化与水体养分密不可分，通过去趋势对应分析（DCA），得到分析结果中Lengths of gradient第一轴的数值小于3.5，因此用RDA冗余分析研究水体环境因子与不同共作年限稻鸭系统水体藻类多样性指数之间的关系。由图6可知，Ace、Chao、Shannon指数相关性极高，因此以Ace指数为例分析，稻鸭共作后0~21 d，OR处理下藻类Ace指数与总氮（TN）、溶解氧（DO）呈正相关，GR处理下与TP呈正相关，CK处理下与pH、TP呈正相关。共作后22~42 d，OR处理下Ace指数与AK呈正相关，GR处理下与DO、TP呈正相关，CK处理下与pH、TN呈正相关。共作后43~63 d，OR处理下Ace指数与pH呈正相关，GR处理下与DO呈正相关，CK处理下与DO、TP呈正相关。由显著检验可知，前期藻类群落结构与环境因子间关系不显著，到后期生态系统稳定后，溶解氧对CK水体藻类群落结构影响显著，AK和pH显著影响GR水体藻类群落结构，AK显著影响OR水体藻类群落结构。

3 讨论

藻类是影响水质的一个重要因素，对维持水体生态系统至关重要[26]。因此本文通过对不同规模、不同年限稻鸭共作系统藻类群落组成及多样性的研究，探究了稻鸭共作系统对水体藻类的影响。研究发现，稻鸭共作田与非稻鸭共作田水体藻类优势种都是裸藻、绿藻、蓝藻，稻鸭共作田藻类群落组成不同于非稻鸭共作田，长期与短期稻鸭共作系统水体绿藻、蓝藻、硅藻的相对丰度均高于非稻鸭共作田。因为在稻鸭共作田中，鸭子逐渐长大，其活动对水体扰动更大，增加水体的浑浊度，降低透光率[4,27]。另外水稻植株分蘖

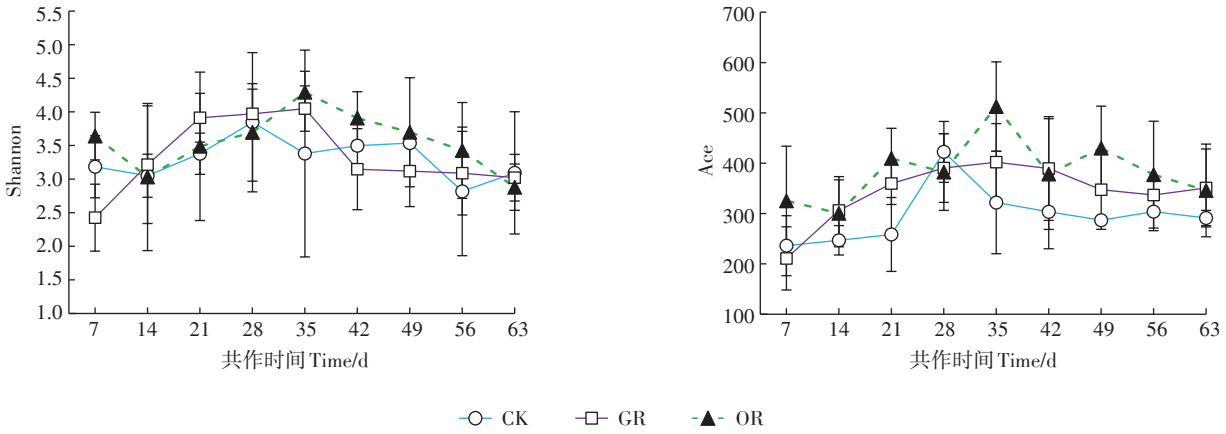


图4 不同共作年限稻鸭系统对水体藻类多样性指数的影响

Figure 4 Effects of rice-duck system with different farming years on algae diversity index

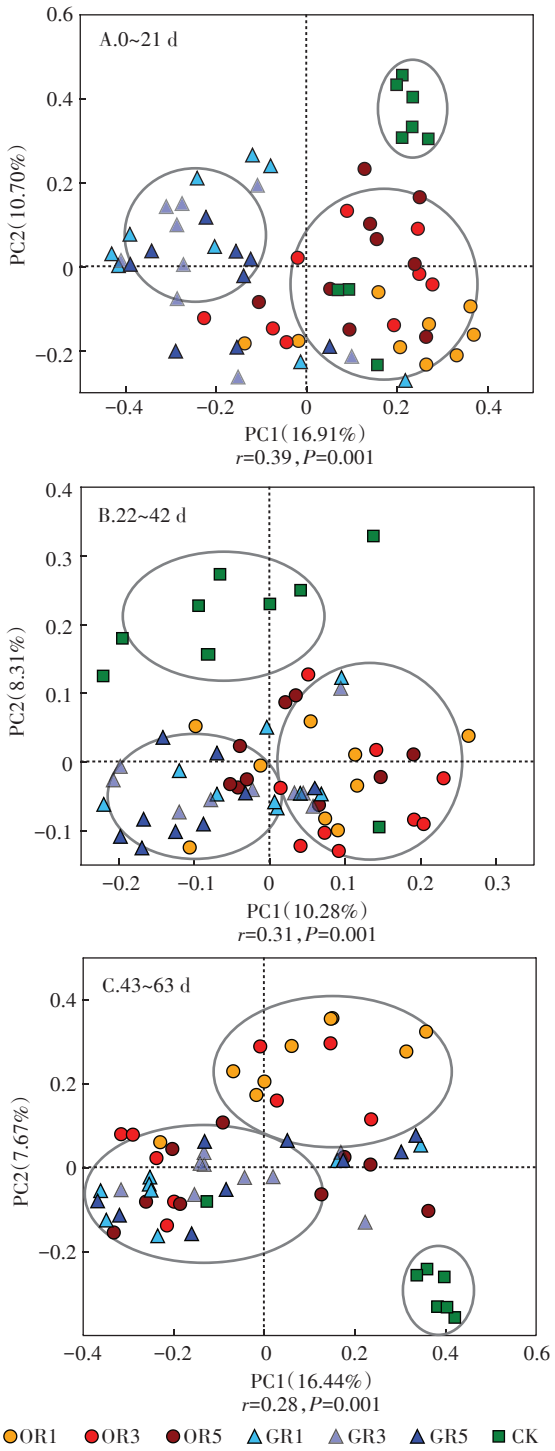


图 5　基于 OTU 水平下水体藻类群落的 PCoA 分析图

Figure 5　PCoA analysis of algae community at OTU level

增加以及逐渐长高，使水体光照减弱，藻类的生长受光照强度的影响较大，因此绿藻和蓝藻的数量因低透光率而逐渐降低[28-31]。本研究发现，从同一共作年限不同共作规模间的变化情况来看，共作规模对蓝藻有一定的影响，规模越大蓝藻的相对丰度越低。因为蓝藻是最独特的原核藻类，属于光合自养生物，对可见光要求较高，大规模的鸭群活动影响光照，从而抑制了其生长。蓝藻过量会导致水体富营养化，破坏水源地水质。长期大规模的稻鸭共作控制蓝藻的相对丰度，能够减小水体富营养化风险。

稻鸭共作系统能够提高水体藻类丰富度指数[32]，随着共作年限的增加，水体藻类 Ace 丰富度指数提高，物种数增多。这是因为稻鸭共作田施用有机肥，长期共作增加了土壤养分（特别是磷和氮）的积累[14,33-35]，鸭子扰动水体，改变了营养物质浓度及光线透射，影响了藻类生长[36-38]。而多样性指数受物种丰富度与均匀度的共同影响，长期稻鸭共作田在后期生态系统更加稳定，藻类均匀度更高，因此共作前期 GR 处理水体藻类 Shannon 多样性指数较高，而共作后期 OR 处理水体藻类 Shannon 多样性指数最高，群落多样性最高。从水体藻类群落结构来看，稻鸭共作与非稻鸭共作田的水体藻类群落结构差异较大，不同年限稻鸭共作系统水体藻类群落结构表现出一定的相似性，说明随着年限的增加，稻鸭共作水体生态系统逐渐趋于稳定，促进物质循环和能量转化，有利于农田可持续发展。

藻类群落分布与水体环境间存在一定的联系[33,39-40]，通过分析稻鸭共作水体藻类群落与环境因子之间的相关性，本研究发现共作后期生态系统稳定时，DO 是影响 CK 水体藻类群落结构的主要环境因子，而影响 OR、GR 水体藻类群落结构的主要环境因子是 AK、pH，这也解释了长期稻鸭共作后群落结构发生变化的原因。稻鸭共作能提高稻田水体可溶性钾含量，降低透光率和 pH，在光照、溶解氧、水体养分含量等诸多因素的共同作用下[41-42]，藻类群落结构发生改变。

4　结论

（1）稻鸭共作田与非稻鸭共作田水体藻类优势种均为裸藻、绿藻、蓝藻，但稻鸭共作田绿藻、蓝藻的相对丰度高于非稻鸭共作田。稻鸭共作田规模越大蓝藻相对丰度越低，能减小水体富营养化风险。稻鸭共作田水体藻类丰富度指数较高，且长期稻鸭共作藻类丰富度指数较短期高。稻鸭共作田藻类多样性指数比非稻鸭共作田高，稻鸭共作与非稻鸭共作田的水体藻类群落结构差异较大，但稻鸭共作田水体藻类群落结构上均表现出一定的相似性，对藻类群落结构影响较小。

冗余分析表明，共作后期影响非稻鸭共作田水体

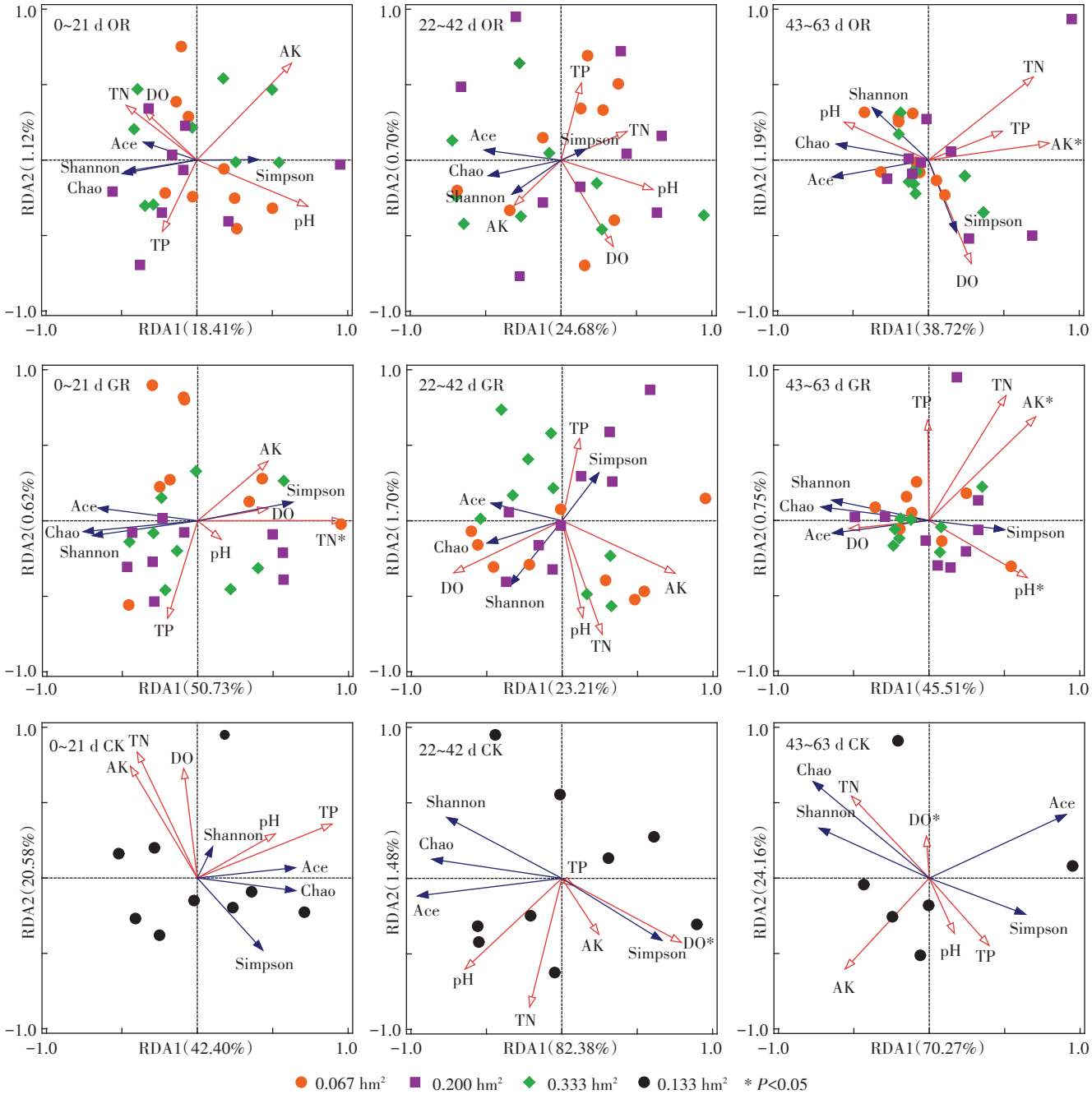


图6 水体藻类多样性指数与环境因子间的RDA分析图

Figure 6 RDA analysis between algae diversity index and environmental factors

藻类群落的环境因子是水体溶氧量，而影响稻鸭共作水体藻类群落结构的主要环境因子是可溶性钾和pH。

参考文献：

[1] 马国强, 庄雅津, 周铭成. 稻鸭共作无公害水稻生产技术初探[J]. 农业装备技术, 2002(2):20-21. MA G Q, ZHUANG Y J, ZHOU M C. A preliminary study on the production technology of pollution-free rice with rice andduck farming[J]. *Agricultural Equipment & Technology*, 2002(2):20-21.

[2] 杨静, 高亮, 朱毅. 稻鸭共作研究进展[J]. 作物杂志, 2020, 196(3):1-6. YANG J, GAO L, ZHU Y. Research progress on rice-duck farming[J]. *Crops*, 2020, 196(3):1-6.

[3] 王缨, 雷慰慈. 稻田种养模式生态效益研究[J]. 生态学报, 2000, 20(2):311-316. WANG Y, LEI W C. Studies on the ecological effect of plantingbreeding models in the rice field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2):311-316.

[4] 隆斌庆, 陈灿, 黄璜, 等. 稻田生态种养的发展现状与前景分析[J]. 作物研究, 2017, 31(6):607-612. LONG B Q, CHEN C, HUANG

H, et al. Development status and prospect analysis of ecological rice cultivation[J]. *Crop Research*, 2017, 31(6):607-612.

[5] 全国明, 章家恩, 陈瑞, 等. 稻鸭共作对稻田水体环境的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9):2023-2028. QUAN G M, ZHANG J E, CHEN R, et al. Effects of rice-duck farming on paddy field water environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9):2023-2028.

[6] 张金萍, 王冬青. 稻鸭共作高效种养技术及效益分析[J]. 现代农业科技, 2015(23):272, 274. ZHANG J P, WANG D Q. High-efficiency rice-duck co-cultivation technology and benefit analysis[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(23):272, 274.

[7] 杨华松, 彭吉萍, 彭凤梅, 等. 云南稻-鸭共作模式对稻田水地温及水稻干物质的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(21):10789-10791. YANG H S, PENG J P, PENG F M, et al. Effects of rice (*Orza sativa* L.) -duck integrated farming on water and soil temperature in paddy fields and dry weight of rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(21):10789-10791.

[8] ZHENG H, HUANG H, CHEN C, et al. Traditional symbiotic farming technology in China promotes the sustainability of a flooded rice production system[J]. *Sustainability Science*, 2017, 12(1):155-161.

[9] ZHENG H, HUANG H, LI D, et al. Assessment of nomadic rice-duck complex ecosystem on energy and economy[J]. *Ecological Processes*, 2014, 3(1):255-257.

[10] 王华, 黄璜, 杨志辉, 等. 湿地稻-鸭复合生态系统综合效益研究[J]. 农村生态环境, 2003, 19(4):23-26, 44. WANG H, HUANG H, YANG Z H, et al. Integrated benefits of paddy rice-duck complex ecosystem[J]. *Rural Eco-Environment*, 2003, 19(4):23-26, 44.

[11] 章家恩, 陆敬雄, 张光辉, 等. 鸭稻共作生态农业模式的功能与效益分析[J]. 生态科学, 2002, 21(1):6-10. ZHANG J E, LU J X, ZHANG G H, et al. Study on the function and benfit of rice-duck agroecosystem[J]. *Ecologic Science*, 2002, 21(1):6-10.

[12] 王昌付, 汪金平, 曹凑贵. 稻鸭共作对稻田水体底栖动物生物多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008(4):933-937. WANG C F, WANG J P, CAO C G. Effect of rice-duck farming ecosystem on zoobenthos biodiversity in paddy field[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008(4):933-937.

[13] 甄若宏, 王强盛, 周建涛, 等. 稻鸭共作复合系统的生态环境效应研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(21):9008-9011. ZHEN R H, WANG Q S, ZHOU J T, et al. Study on the ecology environment effect of rice-duck integrated farming[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(21):9008-9011.

[14] 汪金平, 曹凑贵, 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.

[15] 何文寿, 李生秀, 李辉桃. 水稻对铵态氮和硝态氮吸收特性的研究[J]. 中国水稻科学, 1998, 12(4):249-252. HE W S, LI S X, LI H T. Characteristics of ammonium and nitrate uptake in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1998, 12(4):249-252.

[16] BURGOS N R, NORMAN R J, GEALYD R, et al. Competitive N uptake between rice and weedy rice[J]. *Field Crops Research*, 2006, 99(2/3):96-105.

[17] 崔荣阳, 刘宏斌, 毛昆明, 等. 洱海流域稻田综合种养对田面水氮素和水稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(1):127-134. CUI R Y, LIU H B, MAO K M, et al. Effects of comprehensive planting and breeding from paddy fields on surface water nitrogen and rice yield in Erhai basin[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(1):127-134.

[18] 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.

[19] 张琪, 苑博, 周静, 等. 基于附着藻类多样性和TLI的府河水质评价[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2020, 40(5):536-542. ZHANG Q, YUAN B, ZHOU J, et al. Water quality assessment of Fuhe River based on periphyton diversity and trophic level index[J]. *Journal of Hebei University* (*Natural Science Edition*), 2020, 40(5):536-542.

[20] 杨柳燕, 杨欣妍, 任丽曼, 等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1):18-27. YANG L Y, YANG X Y, REN L M, et al. Mechanism and control strategy of cyanobacterial bloom in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(1):18-27.

[21] 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, 243. 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, 243.

[22] 曹凑贵, 汪金平, 金晖, 等. 稻鸭共育对稻田水体藻类群落的影响[J]. 水生生物学报, 2007, 31(1):146-148. CAO C G, WANG J P, JIN H, et al. Effects of rice-duck farming on algal community in paddy field[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(1):146-148.

[23] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S]. 北京:中国标准出版社, 2002. National Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for surface water: GB 3838—2002[S]. Beijing: China Standards Press, 2002.

[24] YOON T H, KANG H E, KANG C K, et al. Development of a cost-effective metabarcoding strategy for analysis of the marine phytoplankton community[J]. *PeerJ*, 2016, 4(1):e2115.

[25] GUPTA V, RATHA S K, SOOD A, et al. New insights into the biodiversity and applications of cyanobacteria (blue-green algae): Prospects and challenges[J]. *Algal Research*, 2013, 2(2):79-97.

[26] SCHINDLERD W, HECKY R E, FINDLAYD L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment[J]. *PNAS*, 2008, 105(32):11254-11258.

[27] 张本华, 张宇虹, 孔爱菊, 等. 放养密度对稻田内鸭子运动规律及杂草控制效果的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3):234-239. ZHANG B H, ZHANG Y H, KONG A J, et al. Influence of feeding density of ducks in rice field on movement behaviour and weeds control[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(3):234-239.

[28] MADONI P. The contribution of ciliated protozoa to plankton and benthos biomass in a European rice field[J]. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 1996, 43(3):193-198.

[29] ZOHARY T, PADISÁK J, NASELLI-FLORES L. Phytoplankton in the physical environment:Beyond nutrients, at the end, there is some light[J]. *Hydrobiologia*, 2010, 639(1):261-269.

[30] OBERTEGRGER U, FLAIM G, BRAIONI M G, et al. Water residence time as adriving force of zooplankton structure and succession [J]. *Aquatic Sciences*, 2007, 69(4):575-583.

[31] JÖHNK K D, HUISMAN J, SHARPLES J, et al. Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(3):495-512.

[32] 崔利峰. 水口水库雄江段浮游植物季节变化及其生物多样性[J]. 渔业研究, 2019, 41(1):26-33. CUI L F. Seasonal change of phytoplankton and biodiversity in Xiongjiang reaches of Shuikou Reservoir [J]. *Journal of Fisheries Research*, 2019, 41(1):26-33.

[33] 汪金平, 曹凑贵, 李成芳, 等. 稻鸭共育稻田水体藻类动态变化[J]. 生态学报, 2009, 29(8):4353-4360. WANG J P, CAO C G, LI C F, et al. Elgal change in paddy water under rice-duck complex ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8):4353-4360.

[34] 刘欣, 王强盛, 许国春, 等. 稻鸭共作农作系统的生态效应与技术模式[J]. 中国农学通报, 2015, 31(29):90-96. LIU X, WANG Q S, XU G C, et al. Ecological effect and technology mode of rice-duck farming system[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(29):90-96.

[35] 赵江海, 闵思桂, 高汝霞, 等. 高邮市稻田综合生态种养现状及发展对策[J]. 现代农业科技, 2020(11):221-222. ZHAO J H, MIN S G, GAO R X, et al. Status and development countermeasures of integrated ecological planting and breeding of rice fields in Gaoyou City [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(11):221-222.

[36] REYNOLDS C S. Environmental requirements and habitat preferences of phytoplankton:Chance and certainty in species selection[J], *Botanica Marina*, 2012, 55(1):1-17.

[37] PAERL H W, HALL N S, CALANDRINO E S. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(10):1739-1745.

[38] HALDNA M, MILIUS A, LAUGASTE R, et al. Nutrients and phytoplankton in Lake Peipsiduring two periods that differed in water level and temperature[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 599:3-11.

[39] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭、稻鱼共作对稻田P素动态变化的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2):126-131. LI C F, CAO C G, WANG J P, et al. Phosphorus variations of paddy fields in rice-duck and rice-fish ecosystems[J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2009, 18(2):126-131.

[40] 周康才, 邹陈勇, 樊丛丛. 探索稻鸭共作高效种养模式[J]. 农业与技术, 2017, 37(8):140. ZHOU K C, ZOU C Y, FAN C C. Exploring an efficient rice-duck farming model[J]. *Agriculture & Technology*, 2017, 37(8):140.

[41] 秦伯强, 宋玉芝, 高光. 附着生物在浅水富营养化湖泊藻-草型生态系统转化过程中的作用[J]. 中国科学C辑, 2006, 36(3):283-288. QIN B Q, SONG Y Z, GAO G. The role of attached organisms in the transformation of algae-grass ecosystems in shallow eutrophic lakes[J]. *Science in China(Series C)*, 2006, 36(3):283-288.

[42] 王菁, 陈家长, 孟顺龙. 环境因素对藻类生长竞争的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(17):52-56. WANG J, CHEN J Z, MENG S L. The effects of environmental factors on the growth and competition of algae[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(17):52-56.