

“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

黄巍, 余经纬, 李玉成, 张学胜, 王宁

(安徽大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: [目的] 对“稻—鸭—虾”生态种养模式水体中氮磷浓度及藻类生物量的变化进行研究, 为控制稻田排水中氮磷引起的农业面源污染, 改善稻田生态环境提供科学参考。[方法] 对比“稻—鸭—虾”生态种养模式与常规种植模式, 分析不同种植模式下的差异及优越性, 重点研究“稻—鸭—虾”的内在协同作用对水体中氮磷及藻类的变化影响。[结果] ① 相比于常规种植, “稻—鸭—虾”生态种养稻田水体中总氮(TN)、总磷(TP)含量分别减少 32.43% 和 19.35%, 且对初始灌溉水中 TN, TP 的去除率可达到 38.7% 和 26.9%。② “稻—鸭—虾”生态种养可改变稻田水体中氮磷的形态, 在水稻全生育期内, 可溶性磷(DTP)和颗粒态磷(PP)比例更加稳定, 而在水稻后期, 稻田水体中有机氮(ON)比例显著提高。③ “稻—鸭—虾”生态种养改善了水体中藻类植物群落结构, 稻田排水中藻类生物多样性指数提高到 2.34。④ 相比于常规种植, “稻—鸭—虾”生态种养中水稻的有效穗、穗粒数和结实率分别提高了 4.83%, 5.28% 和 2.84%, 稻米中蛋白质含量增加了 8.15%, 显著提高经济效益。[结论] 相比于常规种植, “稻—鸭—虾”生态种养既能有效减少稻田水体中 N, P 含量, 增加水体稳定性, 又能提高水稻的有效穗、穗粒数和结实率, 增加了经济效益, 且并未带来重金属污染风险, 是值得推广的大田种养技术。

关键词: “稻—鸭—虾”生态种养; 氮磷; 藻类; 生物多样性指数; 经济效益

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)04-0229-07

中图分类号: S19, X171.5

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.036; Huang Wei, Yu Jingwei, Li Yucheng, 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.

Changes of Nitrogen, Phosphorus and Algae in Water Under Rice-Duck-Shrimp Ecological Planting and Breeding Model

Huang Wei, Yu Jingwei, Li Yucheng, Zhang Xuesheng, Wang Ning

(School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: [Objective] The changes of nitrogen and phosphorus and algae in the water under "rice-duck-shrimp" ecological planting and breeding model were studied in order to provide a scientific reference for controlling agricultural non-point source pollution caused by nitrogen and phosphorus in the drainage of rice fields and improving the ecological environment of rice fields. [Methods] The differences and advantages of different planting modes were analyzed by comparing the ecological planting and breeding model of rice-duck-shrimp and the conventional planting model. The study focused on the impact of the internal synergy of rice-duck-shrimp on the changes of nitrogen, phosphorus and algae in water. [Results] ① The contents of total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) in rice-duck-shrimp ecological paddy field reduced by 32.43% and 19.35%, respectively. The removal rates of total TN and total TP in initial irrigation water were 38.7% and 26.9%, respectively. ② The changes of nitrogen and phosphorus forms were altered by the ecological planting and breeding mode of rice-duck-shrimp. During the whole growth period of rice, the proportion of soluble phosphorus(DTP) and granular phosphorus(PP) was more stable. However, the proportion of organic

收稿日期: 2019-01-10

修回日期: 2019-02-22

资助项目: 国家科技重大专项“水源涵养和生态保育清洁小流域技术综合集成应用推广”(2017ZX07603-002)

第一作者: 黄巍(1994—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 硕士研究生, 研究方向为水污染防治。E-mail: 1437156052@qq.com.

通讯作者: 李玉成(1963—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 博士, 教授, 主要从事环境生物地球化学和水污染防治研究。E-mail: Li-yucheng@163.com.

nitrogen(ON) in paddy water significantly increased in the later period of rice. ③ The rice-duck-shrimp ecological planting breeding model could improve the community structure of algae in water. The algae biodiversity index in paddy field drainage increased to 2.34. ④ Compared with conventional cultivation, the effective panicles, grains per spike and seed setting rate of rice in rice-duck-shrimp ecological planting breeding model increased by 4.83%, 5.28% and 2.84%, respectively. Moreover, the protein content of rice increased by 8.15%, which significantly improved the economic benefits. [Conclusion] Compared with conventional cultivation, rice-duck-shrimp ecological planting and breeding model could not only effectively reduce the content of N and P in rice field water, increase the stability of water, but also improve the effective panicles, grains per spike and seed setting rate of rice, which increases economic benefits and does not bring the risk of heavy metal pollution. Therefore, it was worth popularizing as a farming technology.

Keywords: rice-duck-shrimp ecological planting and breeding; nitrogen and phosphorus; algae; biodiversity index; economic benefits

作为我国重点治理的“三湖”之一,巢湖的水体污染问题主要是氮磷含量过高导致的水体严重富营养化,而农业面源污染是造成巢湖氮磷含量过高的主要因素之一^[1-2]。巢湖流域农田中大量施用化肥农药,未被利用的氮磷等污染物通过径流、淋溶等方式汇入巢湖,成为巢湖富营养化加快的主要原因之一^[3]。如何有效防治农业面源污染,修复受损水体是目前亟待解决的重要问题^[4]。环巢湖流域稻田分布广泛,其在生产粮食的同时,也发挥着人工湿地的功能^[5]。因此,合理的稻田种植模式可缓解农业面源污染,有效削减流入巢湖的污染物量。生态种养是我国循环农业发展的重要模式,“稻—鸭”、“稻—虾”生态种养模式是在常规种植的基础上,一方面利用鸭、虾的活动除草除虫代替农药和除草剂,鸭粪和虾粪替代常规种植模式下使用的化肥,另一方面通过水稻对氮磷的吸收,不但降低了农药和化肥的投入,又能有效地改变氮磷的污染迁移,从而去除氮磷,降低农业环境污染^[6-8]。但是,目前关于生态种养的研究主要集中在单一种养模式,如稻鸭共生对水稻生长^[9]、土壤性质^[10]、病虫害的控制效果^[11]以及稻渔对水稻生育特点^[12]、水体环境^[13]的影响等方面,鲜有研究结合这两种单一种养模式以及沟渠湿地进行考虑,并对其相应的水体中氮磷及藻类进行研究。为此,本试验在环巢湖流域通过大规模的稻田种植,以“稻—鸭—虾”生态种养模式和常规种植模式下的水稻田为研究对象,一方面考察了水稻生育期内田面水中各形态氮磷、藻类生物量变化特征,另一方面对其所带来的经济效益进行分析,旨在保证经济效益的前提下,为降低农业面源污染提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于安徽省合肥市庐江县北圩村,地处中

纬度地带,属北亚热带湿润季风气候,四季分明,阳光充沛,无霜期长,梅雨特征显著。平均气温为 15.8℃,平均降水量为 1 188.1 mm,平均无霜期为 238 d,土壤类型为典型的水稻土。

1.2 研究材料

试验水稻选用“南粳 46”,审定编号:沪农品审水稻(2009)第 003 号,全生育期 158 d 左右,株型适中,叶色淡绿,熟期转色好;抗倒性差。平均株高 104.9 cm,每 1 hm² 有效穗 3.30×10⁶,穗长 14.9 cm,每穗总粒数 120~130 粒,结实率 90%,千粒重 25.5 克;鸭的品种为“巢湖麻鸭”;虾的品种为“克氏原螯虾”;基肥为安徽某公司生产的复合肥(N:P₂O₅:K₂O 为 21:9:10);追肥为安徽某公司生产的尿素(含氮量为 46%)。

1.3 试验设计与栽培管理

1.3.1 试验设计 本试验在 2017 年晚稻生育期间采取田间试验。试验分为两种处理区:常规种植模式处理区(CK)和“稻—鸭—虾”生态种养模式处理区(RDS)。各土壤的基本理化性质详见表 1。每个处理区面积为 1.78 hm²,3 次重复。处理区 CK:不放入鸭、虾,按照当地种植模式,稻田基肥施用量为 600 kg/hm²,追肥施用量为 150 kg/hm²,晚稻整个生育期内根据水稻病虫害施用农药(4 次)和除草剂(2 次)。处理区 RDS:放入鸭、虾,每个小区四周挖宽 2.5 m,深 2 m 的“回”形沟渠,沟渠中种植轮叶黑藻、水花生和当地杂草,沟渠和稻田内水体互通,水互相循环。稻田肥料施用量减半化处理,基肥施用量为 300 kg/hm²,追肥施用量 75 kg/hm²,在水稻的整个生育期内不施用农药和除草剂。

1.3.2 栽培管理 各处理区均于 2017 年 7 月 1 日旋耕整田,秧苗于 7 月 3 日移栽,栽插规格为株行距 20 cm×20 cm,每穴 4 棵秧苗。秧苗移栽之前各处理区均施入基肥,7 月 11 日施入追肥,各处理区田面水

均维持在 8~10 cm,水稻乳熟期才开始排水晒田,11月14日收割水稻。灌溉水来自于试验区周围三叉河,其总磷(TP)、可溶性磷(DTP)、总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)的浓度分别为0.52, 0.38, 3.46, 2.04和0.54 mg/L,藻类总生物量为6.54 mg/L。“稻—鸭—虾”生态种养小区四周用2 m

高的尼龙网设置防逃网,用塑料薄膜沿沟渠四周架设防逃设施,以免敌害生物进入和鸭、虾的逃逸,均匀布设简易鸭棚,供鸭子休憩和喂食。于7月1日在沟渠放入125 kg/hm² 虾苗,沟渠水深1.2 m,7月13日稻田放入195只/hm²的10日龄麻鸭,9月11日待水稻抽穗时赶鸭出田,同时捕捞虾。

表1 试验地土壤的基本理化性质

处理区	容重/ (g·cm ⁻³)	pH 值	有机质/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
RDS	1.26±0.04	5.47±0.16	26.34±0.42	148.73±4.62	19.74±0.31	118.62±2.75
CK	1.33±0.07	5.39±0.09	24.78±0.73	140.42±3.97	20.65±0.42	109.58±4.09

注:RDS为“稻—鸭—虾”生态种养模式处理区,CK为常规种植模式处理区。下同。

1.4 样品采集与测定方法

1.4.1 表层水 按五点法在水稻的移栽期(7月3日)、返青期(7月7日)、分蘖前期(7月19日)、分蘖后期(8月17日)、孕穗期(9月3日)、抽穗期(9月16日)和乳熟期(9月28日)采集各处理区的表层水样。水样中的TP和DTP浓度采用钼蓝比色法测定;TN浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;NH₄⁺-N浓度采用纳氏比色法测定;NO₃⁻-N浓度采用紫外分光光度法测定^[14];ON浓度和PP浓度通过差减法计算。

1.4.2 浮游藻类 按照《淡水浮游生物研究方法》^[15]在水稻的移栽期、返青期、分蘖前期、分蘖后期、孕穗期、抽穗期和乳熟期(时间同表层水样采集时间一致)采集、定性和定量分析各处理区中的浮游藻类样品。用25号浮游生物网采集定性样品;用采水器取1L混合均匀后的定量样品,现场加入1%鲁哥氏液固定,回实验室后经48h沉淀浓缩至30ml,吸取浓缩样品0.1ml置于0.1ml计数框内,在10×40倍光学显微镜下用视野法计数。浮游藻类鉴定主要依据《中国淡水藻类》^[16],浮游藻类生物量测定是在计数的基础上,依照体积法,按水的比重换算成生物量^[15]。

1.4.3 水稻 水稻成熟期后各处理区水稻单产单收,脱谷后实测产量;各处理区调查单位面积(1m²)收获穗数,取代表性稻株5穴用以考种;稻谷晒干后按照《GB/T17891-2017 优质稻谷》测定稻米中蛋白质含量;按照《GB5009.15-2014》测定稻米中Cd含量。

1.5 数据处理

浮游藻类多样性用Shannon-Wiener^[17]多样性指数来计算,即:

$$H = - \sum_{i=1}^s (n_i/N) \log_2 (n_i/N)$$

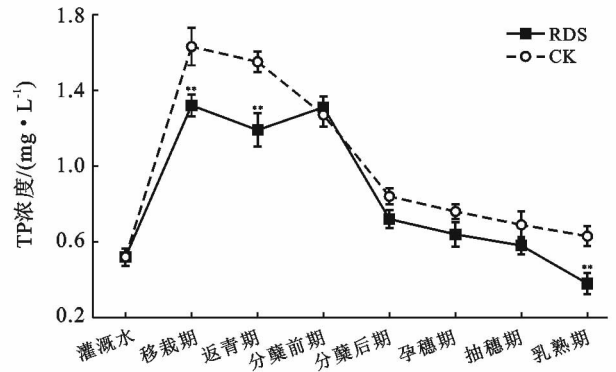
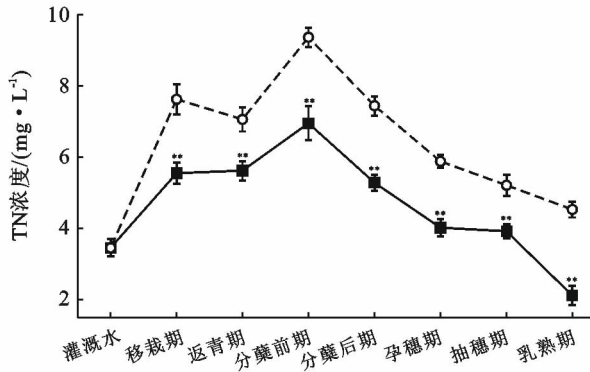
式中:H——Shannon-Wiener多样性指数; n_i ——物种*i*的生物量; N ——群落样本个体总生物量。

试验数据采用SPSS 21.0采用独立样本*t*检验进行分析,Origin 8.5进行制图分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理氮磷浓度变化特征

在水稻生长期,各处理区中稻田水体的TN和TP浓度变化趋势如图1所示。由图1可以看出,水稻全生育期内,处理区RDS中TN和TP的浓度整体上比处理区CK中TN和TP的浓度低32.43%和19.35%。处理区CK乳熟期稻田排水中的TN(4.53 mg/L)、TP(0.63 mg/L)浓度远超《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》中规定的V类水标准(TN≤2 mg/L,TP≤0.4 mg/L),而处理区RDS乳熟期排水中的TP(0.38 mg/L)浓度处于V类水标准,仅TN(2.12 mg/L)浓度略微超过V类水标准。各处理区稻田水体中TN和TP的浓度整体上均呈现出先上升后下降的趋势(图1),且均在水稻的生长前期达到峰值,随后逐渐下降。在水稻的分蘖前期,处理区RDS中TP浓度超过了处理区CK。水稻分蘖后期,各处理区中TN,TP浓度均出现大幅度下降。在水稻的整个生育期内,TN浓度在各处理间均出现极显著差异($p < 0.01$);在水稻的分蘖后期,TP浓度在各处理间出现显著差异($p < 0.05$),而在水稻的移栽期、返青期和乳熟期,TP浓度在各处理间出现极显著差异($p < 0.01$)。相比于初始灌溉水浓度,经过一季晚稻种植后处理区CK增加了水体中N,P的含量,而处理区RDS能有效地去除水体中的N和P含量,TN,TP的去除率达到38.7%和26.9%,对N的去除效果要优于P。



注: * 表示各处理间差异显著($p < 0.05$), ** 表示各处理间差异极显著($p < 0.01$)。下同。

图 1 水稻生长时期各处理区氮磷浓度变化

在水稻生长期内,各处理区中水体不同形态 N、P 比例变化趋势如图 2 所示。从图 2 可以看出,不同处理区稻田水体中各形态 N、P 浓度比例有明显差异。在水稻生育前期,各处理区稻田水体中磷素的形态均以 DTP 为主,随着水稻的生长发育,处理区 RDS 稻田水体中的 DTP 比例明显高于处理区 CK,且在水稻的分蘖前期和分蘖后期差异显著($p < 0.05$),在水稻的抽穗期和乳熟期差异极显著($p < 0.01$);相比于处理区 CK,处理区 RDS 稻田水体中各形态 P 均维持

在一个相对稳定的比例范围内。从各形态 N 的浓度比例来看,在水稻全生育期内各处理区中无机氮是稻田水体中主要的氮素形态, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 占 TN 比例均呈现出先上升后下降的趋势,跟稻田水体中 TN 浓度变化趋势类似,说明稻田水体中 TN 浓度的减少主要是由于水稻对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的吸收;相比于处理区 CK,处理区 RDS 在水稻的分蘖后期、孕穗期和抽穗期中 ON 所占比例明显增加(详见图 2c, 2d),且差异极显著($p < 0.01$)。

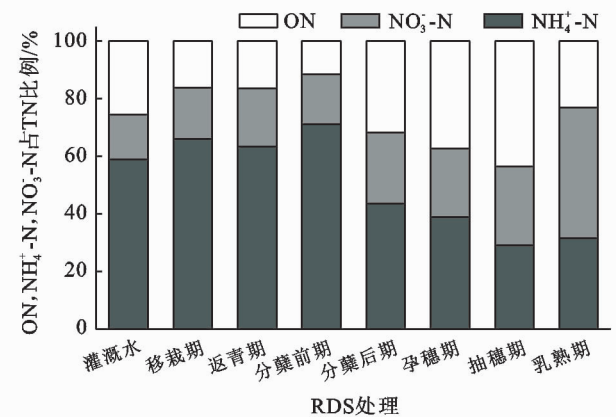
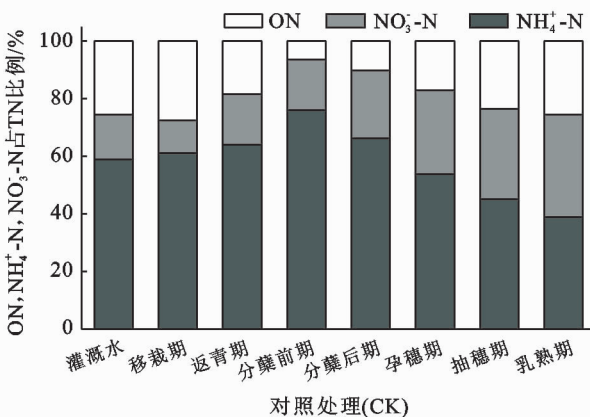
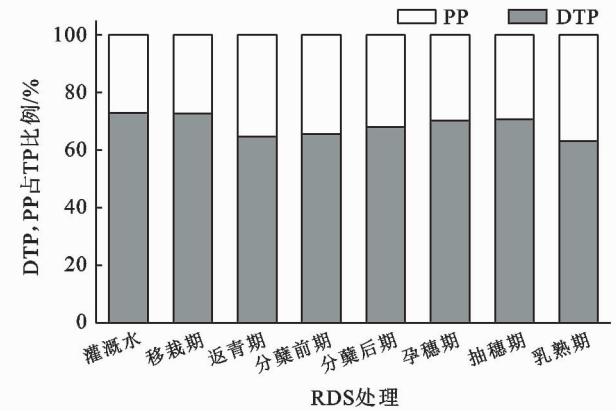
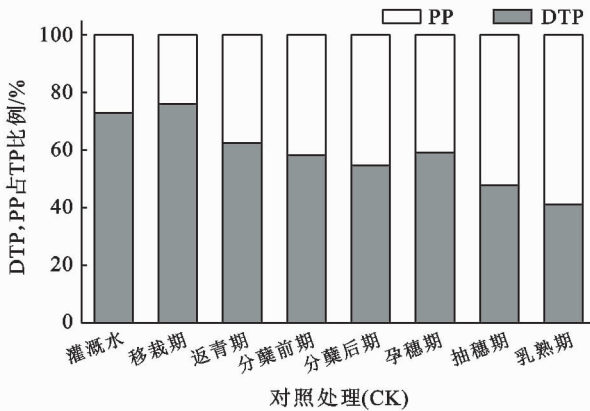


图 2 水稻生长时期各处理区不同形态氮磷浓度的比例

2.2 不同处理藻类变化特征

2.2.1 不同处理藻类生物量变化 藻类总生物量是反映出水体浮游藻类含量多少的主要指标。从图 3

中可以看出,在水稻整个生长期内,各处理区中藻类总生物量均呈现出先升后降的变化趋势。在水稻的分蘖期、孕穗期和抽穗期,处理区 RDS 中藻类总生物

量低于处理区 CK,且差异性显著($p < 0.05$),表明处理区 RDS 中的藻类繁殖受到一定程度的抑制。各处理区中藻类总生物量均在水稻的分蘖前期达到峰值,分别为 18.54 和 12.34 mg/L。处理区 RDS 中藻类总生物量在水稻的分蘖后期和抽穗期降幅明显,分别减少了 29.8%和 38.9%,而在水稻的孕穗期降幅并不明显,在水稻的乳熟期,藻类总生物量在一定程度上甚至有所增加。处理区 CK 藻类总生物量在水稻的分蘖后期、孕穗期和乳熟期降幅明显,分别减少了 17.8%和 33.9%和 32%。相比于初始灌溉水藻类总生物量,各处理区均能减少水体中的藻类总生物量,但效果并不显著。

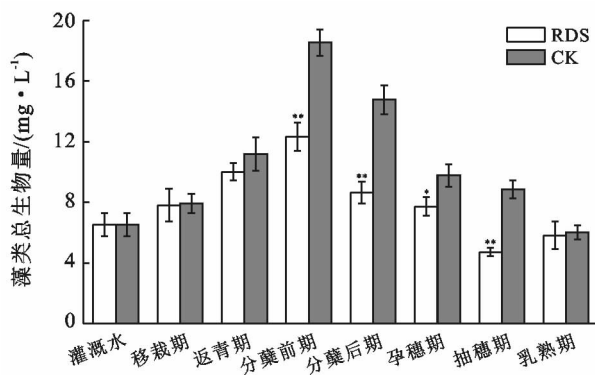


图 3 水稻生长时期各处理区藻类生物量变化

2.2.2 不同处理乳熟期水中藻类群落结构 各处理区乳熟期稻田排水中藻类的鉴定结果如表 2 所示。

表 2 水稻乳熟期排水中各处理区藻类种数和生物量

处理区	测定项目	蓝藻门	绿藻门	硅藻门	隐藻门	裸藻门	甲藻门	合计	H
RDS	种类(种)	11	22	26	9	11	2	81	2.34
	生物量(mg/L)	0.97	1.62	1.76	0.54	0.71	0.23	5.83	
CK	种类(种)	24	32	12	2	6	2	78	1.77
	生物量(mg/L)	2.83	2.24	0.44	0.12	0.28	0.15	6.06	

2.3 不同处理产量、米质及经济效益分析

由表 3 可知,与处理区 CK 相比,处理区 RDS 中水稻的有效穗、穗粒数和结实率分别提高了 4.83%, 5.28%和 2.84%,水稻的有效穗和结实率在各处理间差异显著($p < 0.05$),稻谷单位面积实际产量增加 5.67%,但稻谷总产量减少 13.44%。各处理区中稻米

从表 2 可以看出,各处理区中藻类群落均包括蓝藻门、绿藻门、硅藻门、隐藻门、裸藻门和甲藻门这 6 门,且总种类数量差异不大,但藻类各门间的种类数量有很大差异。其中,处理区 RDS 中藻类种类较多的是硅藻门和绿藻门,分别占藻类总种类数的 32.10%和 27.16%;而处理区 CK 中藻类种类较多的是蓝藻门和绿藻门,分别占藻类总种类数的 30.77%和 41.03%。从各处理区乳熟期稻田排水中藻类各门间的生物量来看(表 2),处理区 RDS 中的优势种主要集中在绿藻门(占总生物量的 27.79%)和硅藻门(占总生物量的 30.19%),而处理区 CK 中的优势种主要集中在蓝藻门(占总生物量的 46.70%)和绿藻门(占总生物量的 36.96%)。乳熟期稻田排水中处理区 RDS 中藻类的生物多样性指数明显高于处理区 CK。一般而言,群落中物种的种类越丰富或者分布越均匀,其 Shannon-Wiener 多样性指数(H)就越大,对于环境的反馈功能就越强,稳定性和水质越好;反之,如果水体受到污染,会影响一部分敏感型物种的生存,导致耐污性物种大量繁殖,群落结构简单化,水质恶化。0 为严重污染环境;0~1 为重污染环境;1~2 为中污染环境;2~3 为轻污染环境;大于 3 为清洁环境^[18-19]。从表 1 可以看出,处理区 RDS 中排水的 H 值为 2.34,水质为轻度污染类型,而处理区 CK 中排水的 H 值为 1.77,水质为中度污染类型。结果表明,“稻—鸭—虾”生态种养模式改善了藻类群落结构,增加了稻田排水体中水体的稳定性,降低了水体的污染程度。

重金属 Cd 的含量均未超过《食品安全国家标准(GB2762-2017)》中所规定的稻米卫生标准($Cd \leq 0.2$ mg/kg),且无显著差异。蛋白质作为稻米的主要营养来源,相比于处理区 CK,处理区 RDS 中稻米的蛋白质含量显著增加 8.15%。从经济效益来看,相比于处理区 CK,处理区 RDS 的总净收入增加了 5 280 元/hm²(表 4)。

表 3 各处理区水稻产量构成及米质

处理区	有效穗 (穗/m ²)	穗粒数 (粒/穗)	结实率/ %	千粒重/ g	实际产量/ (t·hm ⁻²)	Cd 含量/ (mg·kg ⁻¹)	蛋白质含量/ %	总产量/ t
RDS	275.19±5.32*	154.53±7.69	87.66±0.72*	24.92±1.53	8.39±0.17*	0.07±0.01	8.23±0.23*	36.78
CK	262.51±4.67	146.78±5.45	85.24±0.88	24.75±1.36	7.96±0.11	0.08±0.01	7.61±0.26	42.51

注:数据为平均值±标准差; * 表示各处理间差异显著($p < 0.05$), ** 表示各处理间差异极显著($p < 0.01$)。

表 4 “稻—鸭—虾”生态种养稻田与常规稻田
经济效益估算表

处理区	现金支出		现金收入		净收入
	项目	金额	项目	金额	
RDS	稻种	195	稻谷	20 670	15 620
	化肥	1 010	肉鸭	10 700	
	机械作业费	6 600	虾	7 695	
	鸭苗	765			
	虾苗	1 875			
	饲料	3 800			
	人工	5 200			
	防护设施费	1 600			
	其他	2 400			
	合计	23 445	合计	39 065	
CK	稻种	260	稻谷	21 890	10 340
	化肥	2 400			
	农药、除草剂	2 150			
	机械作业费	2 650			
	人工	2 700			
	其他	1 390			
	合计	11 550	合计	21 890	

3 讨论

“稻—鸭—虾”生态种养模式下稻田水体中 N、P 含量整体低于常规种植,表明“稻—鸭—虾”生态种养稻田中的 N、P 流失风险低于常规种植。相关研究^[20-21]结果表明,采用有机肥替代部分化肥,稻田与沟渠湿地协同处理均可以有效降低水体中 N、P 输出负荷,且稻鸭共育提高了水稻秸秆的 N、P 吸收量^[22]。本研究表明通过降低水稻田中化肥农药的使用量,以及利用沟渠中基质底泥和水生植物对 N、P 的吸附吸收,减少了稻田水体中 N、P 含量,降低因稻田排水带来的水体富营养化风险。在水稻分蘖前期,水稻还处于秧苗期,对磷素的需求低,而处理区 RDS 中刚放鸭不久,鸭粪中的有机质氧化分解释放磷元素,且鸭子在田间踩踏,使土壤表层颗粒中的磷元素被诱导释放到水体中,从而导致了处理区 RDS 的 TP 浓度有了一定程度的增加。由于水稻分蘖前补充了氮肥,各处理区水体中 TN 浓度在水稻分蘖前期均达到峰值。随着水稻的生长发育,水稻对 N、P 营养元素需求的增强,加上沟渠湿地的净化,水稻生长后期水体中 N、P 含量迅速降低。薛利红^[23]等研究发现稻田湿地在水稻拔节期和灌浆期,对水体中的 TN、TP 有很高的去除率,与本文研究结果一致。

罗春燕等^[24]研究表明 DTP 是动物粪便中 TP 的主要成分,DTP 主要以正磷酸盐形式存在,能直接被植物吸收利用^[25],而 PP 在湿地中的去除机理主要是

通过沉积作用,不能被植物直接吸收。本研究显示在水稻的生长发育后期,处理区 RDS 稻田水体中的 DTP 比例明显高于处理区 CK,且处理区 RDS 稻田水体中各形态 P 的比例更加稳定,可能是因为“稻—鸭—虾”生态种养模式中植物对 DTP 的吸收与沟渠对 PP 的吸附处于一个动态平衡状态。此外,鸭粪、虾粪有机肥中的 ON 进入水体,导致处理区 RDS 在水稻的孕穗期和抽穗期,稻田水体中 ON 比例明显增加。各处理区中 NH_4^+-H 所占比例变化趋势与水体中 TN 的浓度变化趋势类似,这是因为水稻是喜氮植物,水稻对水体中 TN 的去除主要是吸收水体中的 NH_4^+-H 。

藻类的生长繁殖受到光照、营养盐、水生动物、食水生动物鱼类等多种因素的影响^[26]。在水稻的生长前期,稻田中光照和营养盐含量充足,此时水稻尚处于生长期,在和藻类对光照和营养盐的竞争中并不占优势,导致各处理区水体中藻类快速繁殖。宋玉芝^[27]等研究发现藻类随着水体中氮含量的增加而增加,与沉水植物是否存在并无关系,而处理区 RDS 的藻类总生物量在水稻分蘖前期增幅并不明显,原因可能是鸭和虾是滤食性动物,摄食水体中的藻类,在一定程度上减缓了藻类的繁殖速度。随着水稻的生长,水稻竞争性以及遮光性的增强,各处理区水体中的藻类总生物量均出现大幅度下降。处理区 CK 在水稻的抽穗期藻类总生物量的变化并不明显,可能与处理区 CK 在水稻抽穗前田间施洒农药有关,沈宏等^[28]研究发现较低浓度的有机物可以促进藻类的繁殖。处理区 RDS 在水稻的乳熟期藻类总生物量小幅度上升可能是由于鸭、虾的离田,藻类缺少捕食者。

处理区 RDS 水体中藻类总生物量低于处理区 CK,这是由于处理区 RDS 水体的营养盐含量低,且鸭、虾对藻类的摄食,水生植物对光照和营养盐的竞争导致处理区 RDS 水体中藻类繁殖受到抑制。张萍^[29]等研究发现,在养殖克氏原螯虾的水中添加有机肥,会抑制蓝藻等有害藻类的繁殖,且在流动的水体中,往往能快速繁殖的藻类如硅藻等更具竞争优势^[30]。本文研究得出处理区 RDS 乳熟期排水中藻类总生物量主要以硅藻和绿藻为主,与处理区 CK 有明显差异,可见水生植被的修复和水质的改善会对藻类的群落结构造成显著影响^[31]。相比于处理区 CK,处理区 RDS 乳熟期排水中 Shannon-Wiener 指数更高,水体稳定性更强,水体污染程度更小,与汪金平^[32]等研究结果类似。

鸭子在田间的穿行和啄食,刺激了水稻的根系生长,使水稻植株更加健壮,提高群体质量,减少了水稻

的无效分蘖,有效提高了处理区 RDS 中水稻的有效穗数、穗粒数、结实率和产量。处理区 RDS 中由于利用鸭粪、虾粪作为有机肥替代部分化肥,不施农药和除草剂,使水稻在一个优质的环境中生长发育,提高了稻米中蛋白质的营养含量。各处理区稻米中 Cd 含量均在稻米卫生标准之内,表明鸭、虾进入稻田生态系统并没有带来稻米重金属 Cd 的污染风险,与张帆^[33]等研究结果一致。本研究处理区 RDS 中将一部分稻田面积改造成沟渠,来净化水体中氮磷,降低了稻田内的种植面积,故在稻谷总产量上有一定程度的降低,但是由于有鸭和虾的产出,处理区 RDS 的总净收入要远远高于处理区 CK。

“稻—鸭—虾”生态种养通过将部分稻田改造成沟渠,利用水稻、鸭和虾的共生关系,发挥了水稻田系统的生产、养殖和环境调控功能,在提高经济效益的同时,降低了稻田排水带来的富营养化风险,具有良好的应用前景。

4 结论

(1) 相比于常规种植,“稻—鸭—虾”生态种养能有效减少稻田水体中 N、P 含量,TN、TP 含量分别减少了 32.43% 和 19.35%,降低了因 N、P 流失带来的水体富营养化风险。经过一季种植,“稻—鸭—虾”生态种养对初始灌溉水中的 TN、TP 的去除率分别达到 38.7%,26.9%,对氮磷有较好净化作用。

(2) “稻—鸭—虾”生态种养稻田水体中 N、P 各形态变化与常规种植有明显差异。在水稻全生育期内,DTP 和 PP 比例更加稳定,而在水稻后期,稻田水体中 ON 比例明显增加。

(3) “稻—鸭—虾”生态种养改善了藻类植物群落结构,稻田排水中藻类 Shannon-Wiener 多样性指数提高到 2.34,有效增加水体的稳定性,降低水体污染程度。

(4) 相比于常规种植,“稻—鸭—虾”生态种养中水稻的有效穗、穗粒数和结实率分别提高了 4.83%,5.28% 和 2.84%,稻米中蛋白质含量增加了 8.15%,提高了经济效益,且并未带来重金属污染风险,是值得推广的大田种养技术。

[参 考 文 献]

[1] 王桂苓,马友华,孙兴旺,等. 巢湖流域麦稻轮作农田径流氮磷流失研究[J]. 水土保持学报,2010,24(2):6-10.

[2] 武慧君,袁增伟,毕军. 巢湖流域农田生态系统磷代谢分析[J]. 中国环境科学,2010,30(12):1658-1663.

[3] 李如忠,汪家权,钱家忠. 巢湖流域非点源营养物控制对策研究[J]. 水土保持学报,2004,18(1):119-121.

[4] 彭世彰,熊玉江,罗玉峰,等. 稻田与沟塘湿地协同原位削减排水中氮磷的效果[J]. 水利学报,2013,44(6):657-663.

[5] Natuhara Y. Ecosystem services by paddy fields as substitutes of natural wetlands in Japan[J]. Ecological Engineering, 2013,56(S):97-106.

[6] Frei M, Becker K. A greenhouse experiment on growth and yield effects in integrated rice-fish culture[J]. Aquaculture, 2005,244(1/4):119-128.

[7] Halwart M. Biodiversity and nutrition in rice-based aquatic ecosystems[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2006,19(6/7):747-751.

[8] 王强盛,黄丕生,甄若宏,等. 稻鸭共作对稻田营养生态及稻米品质的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(4):639-645.

[9] 张苗苗,宗良纲,谢桐洲. 有机稻鸭共作对土壤养分动态变化和经济效益的影响[J]. 中国生态农业学报,2010,18(2):256-260.

[10] 李成芳,曹凑贵,潘圣刚,等. 稻鸭共作生态系统稻田土壤固定态铵含量及有效性[J]. 生态学报,2008,28(6):2729-2737.

[11] 杨治平,刘小燕,黄璜,等. 稻田养鸭对稻鸭复合系统中病、虫、草害及蜘蛛的影响[J]. 生态学报,2004,24(12):2756-2760.

[12] 杨勇,张洪程,胡小军,等. 稻渔共作水稻生育特点及产量形成研究[J]. 中国农业科学,2004,37(10):1451-1457.

[13] 丁伟华,李娜娜,任伟征,等. 传统稻鱼系统生产力提升对稻田水体环境的影响[J]. 中国生态农业学报,2013,21(3):308-314.

[14] 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会. 水与废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 陈辉煌,陆开宏,郑忠明,等. 夏季混养鳊和银鲫对凡纳滨对虾低盐养殖池塘浮游藻类群落结构的影响[J]. 生态科学,2014,33(3):459-466.

[18] 沈蕴芬,章宗涉,龚循矩,等. 微型生物监测新技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990.

[19] 李军,刘丛强,肖化云,等. 太湖北部夏季浮游藻类多样性与水质评价[J]. 生态环境,2006,15(3):453-456.

[20] 崔虎,王莉霞,欧洋,等. 牛粪—化肥配施对水稻田氮磷迁移转化的影响[J]. 中国环境科学,2018,38(6):2233-2242.

28%;减少经济林的现有施肥量,蛇鱼川小流域农业生产活动的 N,P 污染负荷能够削减 43.9%和 48.9%。

[参 考 文 献]

- [1] 李怀恩. 水文模型在非点源污染研究中的应用[J]. 陕西水利, 1987(3):18-23.
- [2] 鲍全盛, 王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望[J]. 地理科学, 1996, 16(1):66-71.
- [3] 刘昌明, 王中根, 杨胜天, 等. 水循环多元综合模拟系统(HIMS)的研究进展[J]. 水利发展研究, 2010, 8(3):5-15.
- [4] 刘昌明, 洪宝鑫, 曾明焯. 黄土高原暴雨径流预报关系初步实验研究[J]. 科学通报, 1965, 2(2):158-161.
- [5] 刘昌明, 白鹏, 巩同梁, 等. 西藏稀缺资料地区洪峰流量推求[J]. 南水北调与水利科技, 2013(1):1-6.
- [6] 刘昌明, 杨胜天, 温志群, 等. 分布式生态水文模型 Eco-HAT 系统开发及应用[J]. 中国科学, 2009(6):1112-1121.
- [7] 史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(7):1041-1049.
- [8] 杨胜天, 程红光, 步青松, 等. 全国土壤侵蚀量估算及其在吸附态氮磷流失量匡算中的应用[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3):366-374.
- [9] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷估算方法研究的意义、难点和关键技术[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3):362-365.
- [10] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3):375-383.
- [11] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 农业区非点源污染潜在危险性评价:以于桥水库流域磷流失为例[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3):262-269.
- [12] 王晓燕, 王一岫, 王晓峰, 等. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1):30-33.
- [13] 黄满湘, 章申, 唐以剑, 等. 模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1):6-10.
- [14] 石辉. 水土流失型非点源污染[J]. 水土保持通报, 1997, 17(7):99-101.
- [15] 晏维金, 尹澄清, 孙濮, 等. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3):312-316.
- [16] 刘高焕, 刘俊卫, 朱会议. 基于 GIS 的小流域地块单元划分与汇流网络计算[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2):139-145.
- [17] 张亦弛. 黄河多沙粗沙区 LCM 模型分布式构建与应用[D]. 北京:北京师范大学, 2014.
- [18] 刘昌明, 李道峰, 田英, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. 地理科学研究, 2003, 22(5):437-445.
- [19] 吴敬东. 北京蛇鱼川生态清洁小流域水环境承载力研究[D]. 北京:北京林业大学, 2010.
- [20] 夏立忠, 卜兆宏, 张祖兴, 等. 土壤与养分流失综合监测方法在密云水库流域应用[J]. 地球科学进展, 2007, 22(3):241-248.

(上接第 235 页)

- [21] 彭世彰, 熊玉江, 罗玉峰, 等. 稻田与沟塘湿地协同原位削减排水中氮磷的效果[J]. 水利学报, 2013, 44(6):657-663.
- [22] 张帆. “稻鸭共生”养分归还特征及水稻植株对氮、磷的吸收[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3):265-269.
- [23] 薛利红, 杨林章. 太湖流域稻田湿地对低污染水中氮磷的净化效果[J]. 环境科学研究, 2015, 28(1):117-124.
- [24] 罗春燕, 冀宏杰, 张维理, 等. 鸭粪和猪粪中易溶性磷含量特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1320-1325.
- [25] 何军, 崔远来, 王建鹏, 等. 不同尺度稻田氮磷排放规律试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10):56-62.
- [26] Paerl H W, Fulton R S, Moisaner P H, et al. Harmful freshwater algal Blooms, with an emphasis on cyanobacteria[J]. The Scientific World Journal, 2001, 4(1):76-113.
- [27] 宋玉芝, 秦伯强, 高光. 氮及氮磷比对附着藻类及浮游藻类的影响[J]. 湖泊科学, 2007, 19(2):125-130.
- [28] 沈宏, 周培疆. 环境有机污染物对藻类生长作用的研究进展[J]. 水生生物学报, 2002, 26(5):529-535.
- [29] 张萍, 周鑫, 秦伟, 等. 不同饵料培养基对克氏原螯虾池塘浮游藻类及水质的影响[J]. 南方农业学报, 2014, 45(8):1474-1480.
- [30] McIntire C D, Garrison R L, Warren P C E. Primary production in laboratory streams[J]. Limnology and Oceanography, 1964, 9(1):92-102.
- [31] 濮培民, 李裕红, 张晋芳, 等. 用生态修复调控浮游植物种群局部控制富营养化:以贵州红枫湖水水质生态修复工程为例[J]. 湖泊科学, 2012, 24(4):503-512.
- [32] 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.
- [33] 张帆, 李海露, 程凯凯. “稻鸭共生”生态系统重金属镉的转化、迁移及循环特征[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(9):1206-1213.