

稻鸭共作对稻田氮素变化及土壤微生物的影响

李成芳, 曹凑贵*, 展 茗, 汪金平

(华中农业大学作物栽培与生理生态研究中心, 武汉 430070)

摘要:通过田间试验研究稻鸭共作生态系统中土壤与田面水全 N、无机 N 的动态变化及水稻吸 N 的规律和土壤微生物数量的变化规律。结果表明, (1) 与常规稻作相比, 稻鸭共作稻田土壤、田面水全 N 含量略有提高, 土壤、田面水 NH_4^+ 含量和水稻含 N 量显著提高, 而土壤、田面水 NO_3^- 含量无明显变化; (2) 稻鸭共作极显著提高了水稻总吸 N 量, 高于常规稻作 17.8%; 相关分析显示, 水稻吸 N 量与 NH_4^+ 含量呈一元二次方程式关系, 达到显著或极显著相关。 (3) 与常规稻作相比, 稻鸭共作能显著提高土壤微生物数量, 其中细菌数最多, 放线菌次之, 真菌最少。

关键词:稻鸭共作; NH_4^+ ; NO_3^- ; 土壤微生物; 吸 N 量

文章编号: 1000-0933(2008)05-2115-08 中图分类号: Q143, S154.1, S181 文献标识码: A

The N variations of paddy fields and amounts of soil microorganisms in rice-duck complex ecosystems

LI Cheng-Fang, CAO Cou-Gui*, ZHAN Ming, WANG Jin-Ping

Crop production, Physiology and Ecology Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2115 ~ 2122.

Abstract: Research on N variations in field surface water and soils, rules of N uptakes of rice and amounts of soil microorganisms in rice-duck ecosystem was conducted by field experiments. The results showed: (1) Compared with conventional paddy fields, total nitrogen content in surface water and soils increased appreciably in rice-duck complex ecosystem, and NH_4^+ content in the field surface water and soils and N uptake of rice increased significantly in rice-duck complex ecosystem, meanwhile NO_3^- content in the field surface water and soils scarcely any changed; (2) Rice-duck complex ecosystem boosted significantly total N uptake of rice and 17.8% higher than that of conventional paddy fields. Correlation analysis revealed that the relation between N uptake of rice and NH_4^+ content was fitted with by a unitary quadratic equation; (3) Rice-duck complex ecosystem could increase significantly soil microorganisms amount, in which bacteria amount were largest, actinomyces amount took second and the fungi amount were least.

Key Words: Rice-duck complex ecosystems; NH_4^+ ; NO_3^- ; soil microorganisms; N uptake

稻田生态系统是一个以水稻为主体的生物与环境统一体。N 素是该系统最为活跃的营养元素之一, 它积

基金项目: 国家重大科技专项资助项目 (2004BA520A02)

收稿日期: 2007-05-10; 修订日期: 2007-10-22

作者简介: 李成芳 (1978 ~), 男, 福建省厦门市人, 博士生, 主要从事农业生态系统分析与水土保持研究. E-mail: lichengfang@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cecui@mail.hzau.edu.cn

致谢: 感谢胡红青教授, 胡荣桂教授对试验给予的指导与帮助, 感谢华中农业大学资源与环境学院叶祥盛高级工程师和植物科技学院蔡明历老师在测定分析提供的便利。

Foundation item: The project was financially supported by National Foundation of Key Science of China (No. 2004BA520A02)

Received date: 2007-05-10; **Accepted date:** 2007-10-22

Biography: LI Cheng-Fang, Ph. D. candidate, mainly engaged in agricultural ecosystem and soil and water conservation. E-mail: lichengfang@126.com

极参与稻田生态系统内各种生物化学过程。已报道的稻田 N 动态变化的研究主要针对 N 转化的一个或者几个不同方面,如无机 N 转化^[1,2],田面水 N 变化^[3,4],水稻吸 N^[5~7],多种形态 N 素的损失^[8~10]等。研究发现,不同稻作下稻田氮素的主要形态和动态变化各不同^[1,11,12],同时水稻对 N 吸收能力也各有差异^[13,14],从而说明稻田中 N 素动态变化的复杂性,因此进一步研究 N 素的转化及水稻吸 N 规律,可更好地了解稻田 N 素的供应状况并为合理施用肥料提供理论依据。

土壤微生物是稻田生态系统的重要组成部分。土壤微生物是稻田生态系统物质循环中重要的参与者,其组成、数量在很大程度上影响稻田生态系统的物质循环与转化;土壤微生物通过分解动植物残体而参与稻田生态系统的能量流动和物质循环,影响着水稻的生长发育,是土壤肥力的重要指标之一^[15~17]。

稻鸭共作生态系统是一种综合利用的稻鸭种养模式,即以水田为基础、种稻为中心、家鸭野养为特点的自然生态和人为干预相结合的复合生态系统。研究已表明稻鸭共作具有较高的经济效益和良好的生态效应^[18~21],然而目前对稻鸭共作下稻田 N 素动态特征及土壤微生物变化的研究尚少,本文通过田间试验对稻鸭共作生态系统中氮的动态变化和土壤微生物的组成、数量进行研究,综合评价稻鸭共作系统的生态效应,为推广稻鸭共作技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点和土壤

本试验从 2003 年 5 月至 2006 年 9 月在华中农业大学试验农场进行。每年 5 月至 9 月为稻鸭共作期,11 月至来年 5 月初为油菜种植期。本研究 2006 年 5 月至 9 月进行。实验地土壤为第四纪黄土性沉积物发育的水稻土,耕层土壤厚 20cm,下为 10cm 厚的犁底层。2006 年 5 月 30 测其基本肥力性质为:全 N 1.09g/kg,全 P 1.17g/kg,有机质 16.76g/kg,硝态氮 12.1mg/kg,铵态氮 0.52mg/kg,土壤 pH 值为 6.8。

1.2 试验材料

中稻品种:两优培九(*Liangyoupeijiu Oryza*),鸭子为本地麻鸭(*Tadorna tadorna*)。

1.3 田间设置及管理

1.3.1 试验设计

试验田面积 840 m²,分为 6 个小区,每小区 140 m²。设 2 个处理,一为不放鸭处理(CK);,另一为放鸭 6 只处理(RD),各小区随机区组设计,3 次重复。

1.3.2 田间管理

田间整地时施基肥(尿素)225kg/hm²,在水稻生长期不再追肥。田间开挖围沟深 30cm、宽 40cm,以便鸭子嬉水及取样。小区间用泥巴砌成田埂,覆上地膜,防止肥水串流。以 4 指规格尼纶丝网沿田埂围隔,围网高度为 0.6~0.8m,以防鸭逃走。水稻以宽窄行栽插,各小区均实行浅水淹灌(无沟处水深 10cm)。2006 年 5 月 10 日播种,6 月 5 日移栽,水稻移栽后 10d 放 15~20 日龄的雏鸭。在养鸭小区一角落放置一鸭棚,以便鸭子休憩和喂食(其目的为防止饲料进入稻田土壤和水体;饲料为农家肉鸡花料,碳水化合物饲料,主要组分为玉米 60.2%,豆粕 27%,鱼粉 2%,菜粕 4%,棉粕 3%,磷酸氢钙 1.3%,石粉 1.2%,食盐 0.3%,添加剂 1%);在水稻齐穗期(8 月 20)收鸭子,在此期间稻鸭共同生长,且此后稻田不再灌溉。在水稻全生育期常规小区除不放鸭,施用化学除草、杀虫剂,其他措施均与养鸭小区一致。

1.4 田间取样及分析方法

1.4.1 田间取样

采样方式为 S 形 5 点采样法,时间从 6 月 20 日起,每隔 15d 采一次样。

土样采样作层 0~20cm 表土,混匀,送回实验室进行前处理;用 50ml 医用注射器,不扰动土层小心抽取 5 处田面水,注入 500ml 集水瓶中,立即送回实验室测定;用铲子挖 5 株水稻植株(包括根系),洗去根系上土壤,烘干后称重,磨碎混合,测定植株含氮量。

1.4.2 分析方法

土壤和植株全 N 含量,浓 H₂SO₄ + 催化剂和浓 H₂SO₄ + H₂O₂消化-FIAstar5000 连续流动注射分析仪测定;

水样全 N, 过硫酸钾高温消化-FIAstar5000 连续流动注射分析仪测定; 土壤 NH_4^+ 、 NO_3^- 为 2mol/L KCL 浸提-FIAstar5000 连续流动注射分析仪测定^[22]; 水样 NH_4^+ 、 NO_3^- , 过滤后直接上 FIAstar5000 连续流动注射分析仪测定。

细菌培养采用牛肉蛋白胨琼脂培养基, 真菌培养采用查彼克氏 (Czapek) 培养基, 放线菌培养采用淀粉铵琼脂培养基^[23]。放线菌、真菌和细菌的计数均采用稀释平板法。

水稻植株吸氮量为水稻含氮量与干物质重的乘积。

试验结果均以每次测得的 3 次重复分析的平均值与标准差来表示, 试验数据采用 SPSS10.0 软件统计分析。

2 结果与分析

2.1 稻田土壤 N 素变化

2.1.1 稻田土壤全 N 变化

由图 1 可看出, 两处理土壤全 N 的总体变化均呈现出“升—降”的趋势, 即移栽后一个月达到峰值, 随后下降, 至收获时达到最小值。水稻生长发育的每个时期, 处理 RD 土壤全 N 均高于空白处理 CK, 处理 RD 土壤全 N 平均值为 $(0.81 \pm 0.13) \text{ g/kg}$, 是空白处理 CK ($(0.77 \pm 0.12) \text{ g/kg}$) 的 105%。此外, 水稻收获时土壤全 N 含量 (RD, 0.61 g/kg ; CK, 0.58 g/kg) 低土壤本底 1.09 g/kg 。方差分析显示, 在水稻全生育期, 两处理土壤全 N 含量差异不显著 ($p > 0.05$)。

2.1.2 稻田土壤无机 N 变化

从图 2 可知, 随着生育期的发展, 稻田土壤 NH_4^+ 含量迅速下降, 到 8 月 20 日有所回升, 随后下降, 至收获期达最低值。在水稻生长发育各时期, 处理 RD 土壤 NH_4^+ 含量均高于空白处理 CK, 两处理 RD 和 CK 的土壤 NH_4^+ 含量均高于 5 mg/kg , 季节平均值分别为 $(8.62 \pm 2.56) \text{ mg/kg}$, $(7.40 \pm 1.84) \text{ mg/kg}$; 处理 RD 土壤 NH_4^+ 含量是处理 CK 的 1.16 倍。方差分析显示, 两处理土壤 NH_4^+ 含量差异极显著 ($p < 0.01$)。与稻田土壤 NH_4^+ 相比, 水稻营养生长期两处理土壤 NO_3^- 含量远小于土壤 NH_4^+ , 且都在 1 mg/kg 以下 (图 2), 而在收获期迅速增加。这与旱作不同, 水作水稻在营养生长期是以铵态氮营养为主的^[1]。在水稻各生育期, 两处理间土壤 NO_3^- 含量无明显变化。

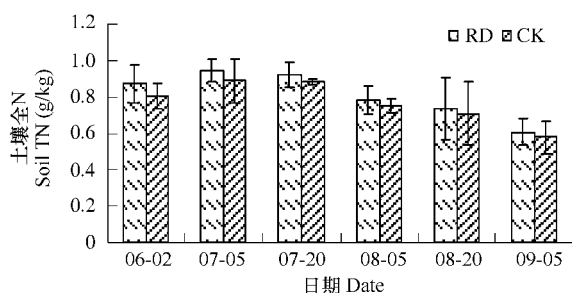


图 1 稻田土壤全 N 季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of soil total N in paddy fields

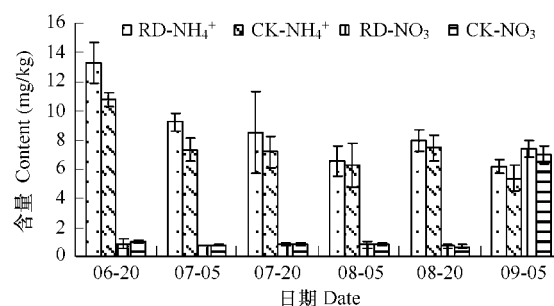


图 2 稻田土壤无机 N 季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of soil inorganic N in paddy fields

2.2 稻田田面水 N 素变化

2.2.1 稻田田面水全 N 变化

不同处理田面水全 N 含量以移栽后半个月较高, 随后下降并趋于稳定 (图 3)。水稻生育期内, 处理 CK 田面水全 N 含量平均值为 $(22.22 \pm 7.19) \text{ mg/L}$, 较处理 RD 田面水全 N 含量提高了 8.1%。方差分析表明, 两处理田面水全 N 含量差异不显著。

2.2.2 稻田田面水无机 N 变化

稻田田面水无机 N 浓度的变化见图 4。田面水 NH_4^+ 浓度在 6 月 20 日和 7 月 5 日较高, 其他观测期较

低,尤以8月20日最低。除6月20日空白处理CK田面水 NH_4^+ 浓度高于处理RD外,其他各观测期,处理CK田面水 NH_4^+ 浓度均低于同期处理RD。在整个淹水期间,处理RD田面水 NH_4^+ 浓度为 (3.27 ± 0.55) mg/L,较处理CK田面水 NH_4^+ 浓度显著提高了10.2% ($p < 0.05$)。与田面水 NH_4^+ 浓度相比,田面水 NO_3^- 浓度只为田面水 NH_4^+ 浓度的1/7~1/6,且在整个淹水期间浓度波动不大,为0.39~0.60 mg/L。这说明在水稻淹水期间,田面水无机N以 NH_4^+ 为主,也说明淹水期间田面水 NH_4^+ 是水稻植株主要的无机N营养源之一。

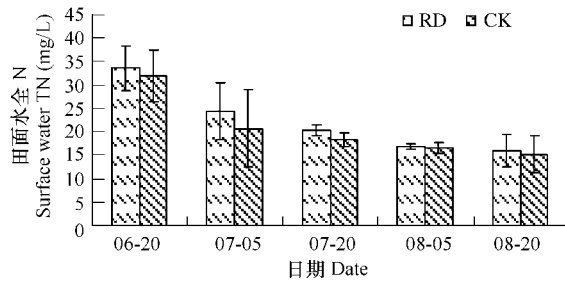


图3 稻田田面水全N季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of total N of surface water in paddy fields

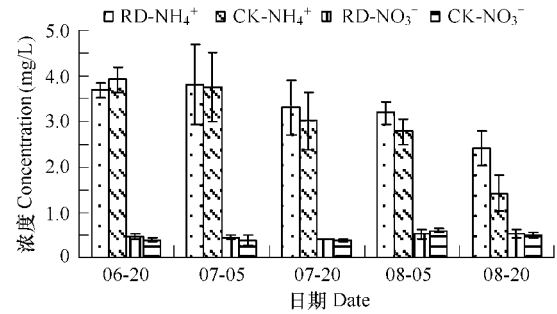


图4 稻田田面水无机N季节变化

Fig. 4 Seasonal variations of inorganic N of surface water in paddy fields

2.3 稻田水稻植株吸N

2.3.1 稻田水稻植株含N量及水稻植株总吸N量变化

由图5可知,两处理水稻植株TN含量在6月20日为最高,随后缓慢下降。对处理CK,各个时期的水稻植株含氮量均低于同期处理RD的水稻植株含氮量,且在水稻全生育期水稻植株平均含氮量为RD处理的92%;方差分析显示,两者差异显著($p < 0.05$)。

不同生育期水稻植株吸N量变化如表1所示。两处理的水稻植株吸N量总体变化趋势为:除处理CK在8月5日吸N量有所回落,这可能采样误差导致,在其他观测期,两处理水稻植株吸N量随时间延长不断增加。与处理CK相比,处理RD在每个观测期水稻植株

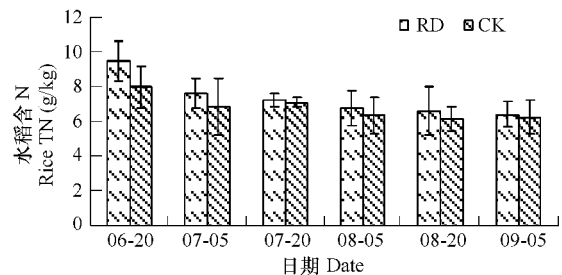


图5 稻田水稻植株含N量季节变化

Fig. 5 Seasonal variations of total N content of rice in paddy fields

吸N量均高于处理CK,分别是同时期处理CK的1.44,1.10,1.07,1.15,1.32倍和1.18倍。方差分析显示,在8月20日与9月5日,两处理水稻植株吸N量差异显著,而在其他观测期均差异不显著。

表1 稻田水稻植株吸N量

Table 1 N uptake of rice in paddy fields (kg/hm^2)

处理 Treatments	日期 Date							总吸N量 Total N uptake
	06-05	06-20	07-05	07-20	08-05	08-20	09-05	
RD	0.2	229.7a	358.3a	470.8a	490.8a	614.3a	778.7a	778.5A
CK	0.2	160a	325.5a	440.6a	427.4a	464.6b	660.8b	660.6B

同一时期不同小写(大写)字母表示在5%(1%)水平上的显著差异 Values in the same date in different treatments that do not contain the same small (capital) letters are significantly different at the 5% (1%) level

2.3.2 稻田水稻植株不同生育阶段总吸N量

从各生育阶段水稻植株总吸N量来看(表2),水稻对N的吸收以06-20~07-20阶段最高,水稻植株在8月20日前就吸收了绝大多数的N,占总吸N量的70%以上。在07-20~08-20阶段,水稻吸收较少N,在总吸

N 量中所占比例较小。从移栽至 8 月 20 日期间,即水稻进行营养生长阶段,水稻总吸 N 量显著高于成熟期。相对于处理 CK,处理 RD 在 8 月 20 日前水稻吸收的 N 量明显高于处理 CK,是处理 CK 的 1.32 倍;收获时,处理 RD 水稻总吸 N 量极显著高于处理 CK 17.8% ($p < 0.01$)。

表 2 稻田水稻植株不同生育阶段总吸 N 量

Table 2 Total N uptake of rice in different growth periods of rice in paddy fields

生育时段 Growth periods	RD		CK	
	吸氮量 N uptake(kg/hm ²)	比例 Proportion(%)	吸氮量 N uptake(kg/hm ²)	比例 Proportion(%)
06-05 ~ 06-20	229.5 A	29.5	159.8 A	24.2
06-20 ~ 07-20	241.1 A	31.0	280.6 B	42.5
07-20 ~ 08-20	143.5 A	18.4	24 B	3.6
08-20 ~ 09-05	164.4 A	21.1	196.2 B	29.7

同一生育时段不同大写字母表示在 1% 水平上的显著差 Values in the same growth period in different treatments that do not contain the same capital letters are significantly different at the 1% level

2.4 稻田土壤微生物数量变化

由表 3 可见,两种处理的细菌数量变化均表现为逐步上升的趋势;真菌数量变化均为升高—平稳—升高;而放线菌数量变化,与处理 CK 先升高后下降的趋势相比,处理 RD 表现出逐步上升的趋势。同时,两种处理的各种微生物数量大小均为:细菌 > 放线菌 > 真菌。方差分析显示,两处理各种微生物数量均达到显著差异水平($p < 0.05$),且较之处理 CK,处理 RD 土壤细菌、放线菌、真菌数量分别增加了 963%、705%、262%;养鸭处理 RD 的土壤细菌平均数量分别为放线菌、真菌的 57、1536 倍,可说明稻鸭共作对稻田土壤菌的影响最大,放线菌次之,对真菌的影响最小。

表 3 稻田土壤微生物数量变化

Table 3 Amounts of soil microorganisms in different periods in paddy fields

项目 Items		日期 Date			
		06-20	07-05	07-20	08-20
RD	放线 Actinomyce	8.81×10^4	7.57×10^4	1.27×10^5	9.67×10^5
	真菌 Fungi	1.81×10^2	5.81×10^2	6.90×10^2	4.50×10^4
	细菌 Bacteria	2.70×10^5	5.00×10^6	2.48×10^7	4.13×10^7
CK	放线菌 Actinomyce	1.25×10^4	3.93×10^4	6.81×10^4	5.85×10^4
	真菌 Fungi	0.51×10^2	5.51×10^2	4.20×10^2	1.67×10^4
	细菌 Bacteria	1.60×10^5	2.16×10^6	2.18×10^6	2.91×10^6

3 讨论

3.1 稻田无机 N 素变化

研究表明施 N 肥的土壤比未施 N 的土壤有更强的氮矿化^[24],导致土壤 NH_4^+ 量的增加。从本试验来看,两处理土壤 NH_4^+ 含量均在施用基肥后显著提高,此后随着淹水时间延长和土壤温度升高,土壤 N 矿化速率不断加快, NH_4^+ 释放增加,但由于水稻生长前期对 N 素需求量较小,导致 NH_4^+ 在土壤中大量积累,在分蘖期(6 月 20 日)出现一峰值;而后由于水稻生长速率加快,吸收 N 量增加,土壤 NH_4^+ 持续降低,但由于试验田持续淹水,故至成熟期土壤 NH_4^+ 仍保持较高水平。闫德智等报道,施肥能迅速提高稻田田面水 NH_4^+ 浓度,同时田面水 NH_4^+ 浓度随着时间延长而降低^[25]。这是由于 N 肥施用后,尿素迅速水解转化为 NH_4^+ ,并且本试验在 6,7,8 月份,温度高,使得氨挥发作用加强,同时部分 NH_4^+ 被作物吸收和下渗淋失。

由图 2,图 4 可知,处理 RD 土壤与田面水 NH_4^+ 含量均显著高于处理 CK,这与鸭的粪便和鸭的活动有关。据报道,一只鸭日平均产鲜粪 0.14 kg,如果 1hm² 稻田围栏养鸭 300 只,在一季水稻田中生活 60d,能排出鲜粪 2520 kg,可对稻田增加全 N 27.72 kg^[21]。同时,鸭子的活动搅动水体与土壤,增加了水体溶解氧量,改善了

土壤氧化还原状况,使得稻田 N 矿化加强;养鸭抑制了杂草的生长,减少了对 NH_4^+ 的吸收;此外,鸭子的活动降低了水温,使得氨的挥发减弱,因而土壤与田面水 NH_4^+ 含量增加^[20,21,26]。

水稻移栽后,灌水导致土壤呈还原状态,反硝化作用增强,又因水稻秧苗对土壤氮素的吸收,耕层土壤中 NO_3^- 迅速减少^[27]。但土壤水分落干后,土壤呈一定氧化状态,因而部分 NH_4^+ 被转化为 NO_3^- ,故土壤中 NO_3^- 的含量回升。稻田田面水 NO_3^- 主要是尿素水解产生的 NH_4^+ 通过硝化作用形成的,但田面水硝化作用较弱,所以稻田田面水中 NO_3^- 比较少。本试验两处理土壤与田面水 NO_3^- 含量均无明显变化,这主要是淹水期间稻田硝化作用被抑制,导致 NO_3^- 含量过低的缘故。

3.2 水稻全 N 变化

如上分析,N 肥施用能加速土壤 N 的矿化,又因水稻对 NH_4^+ 的吸收不断增加,使得土壤全 N 含量下降;尿素施用后,在田面水中迅速分解, NH_4^+ 是它的最初分解产物。故施氮后,田面水 NH_4^+ 达到最大,但由于硝化作用、水稻吸收作用和氮素下渗等,致使 NH_4^+ 随时间流逝而下降,田面水全 N 含量降低。对于处理 RD,由于鸭子粪便的加入,土壤和田面水全 N 量较处理 CK 有所提高。这与前人的研究结果一致^[28,29]。

3.3 水稻植株吸 N 量变化及与 NH_4^+ 的相关性

由表 1 可看出,水稻植株吸 N 量随生育期的延长亦呈明显的上升趋势。这是由于早期水稻根系不发达,吸收能力低下,随着水稻生长发育,水稻对 N 的吸收加强的缘故。由表 1、表 2 可知,处理 RD 水稻植株总吸 N 量显著高于处理 CK,这与处理 RD 具有更多的 N 源及鸭子的活动有关。鸭子的活动可以改善土壤的供 N 能力^[20,21],同时鸭子昼夜在稻丛间活动,不断刺激、促进水稻植株分蘖,增强根活力,对水稻的生长有明显的促进作用,从而提高了水稻植株对 N 的吸收^[30,31]。

表 4 水稻植株吸 N 量与土壤和田面水 NH_4^+ 含量的相关性

Table 4 Relationship between N uptake of rice (y) and NH_4^+ contents in soil (x_1) or surface water (x_2)

处理 Treatments	土壤 NH_4^+ Soil NH_4^+	相关系数 r Coefficient r	田面水 NH_4^+ Surface water NH_4^+	相关系数 r Coefficient r
	方程式 Equations		方程式 Equations	
RD	$y = 0.005x_1^2 - 0.0282x_1 + 16.233$	0.818 **	$y = -0.05x_2^2 + 0.0061x_2 + 3.1672$	0.508 *
CK	$y = 6 \times 10^{-10}x_1^2 - 0.0157x_1 + 12.064$	0.784 **	$y = -0.005x_2^2 + 0.0037x_2 + 3.863$	0.819 **

$n = 15$, $r_{0.05} = 0.497$, $r_{0.01} = 0.623$; $n = 18$, $r_{0.05} = 0.456$, $r_{0.01} = 0.575$

对两处理水稻吸 N 量与稻田各形态氮的相关性进行分析,结果显示吸 N 量与 NH_4^+ 呈一元二次方程式相关。由方程及 r 值可知,两处理 RD 水稻吸 N 量与土壤、田面水 NH_4^+ 含量呈极显著或显著相关,说明水稻吸 N 规律与 NH_4^+ 动态变化具有高度相关性,这与余冬立等的试验结果基本一致^[32]。

3.4 稻田土壤微生物数量的变化

土壤微生物是土壤中极为重要和最为活跃的部分,在土壤养分转化循环、抗干扰能力以及土壤可持续生产力中占据主导地位^[33,34]。施用有机肥料或有机-无机结合,增加了土壤养分,有利于微生物数量的增加。Ndayeyamiye 和 Cote 的研究结果表明,施用有机肥或有机-无机肥可提高土壤细菌、真菌和放线菌数量^[35]。Nanda 和 Das 等的研究表明,施用有机-无机肥增加了细菌数量^[36]。本试验表明处理 RD 土壤微生物数量显著高于处理 CK,这是因为鸭子生活产生的粪便增加了土壤养分,为微生物的增殖提供了良好条件;此外,鸭子的活动能改善稻田土壤氧化还原电位,有利于土壤微生物大量增殖^[21,37]。

4 结论

4.1 与常规稻作相比,稻鸭共作稻田土壤、田面水全 N 含量增加,土壤、田面水 NH_4^+ 含量和水稻含 N 量显著提高,而土壤、田面水 NO_3^- 含量无明显变化;

4.2 与常规稻作相比,稻鸭共作极显著提高了水稻总吸 N 量,高于常规稻作 17.8%;相关性分析显示,水稻吸 N 量与 NH_4^+ 含量呈一元二次方程式关系,且显著或极显著相关。

4.3 与常规稻作相比,稻鸭共作能显著提高土壤微生物数量,其中细菌数最多,放线菌次之,真菌最少。

References:

- [1] Shi Y, Shen Q R, Mao Z S, *et al.* Time and horizontal spatial variations of NH_4^+ -N and NO_3^- -N of rhizospheric soil with rice cultivation on upland condition mulched with half-decomposed rice straw. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(5):520—524.
- [2] Zhu J G, Liu G, Han Y, *et al.* Nitrate distribution and denitrification in the saturated zone of paddy field under rice/wheat rotation. *Chemosphere*. 2003, 50:725—732.
- [3] Zhang Z J, Dong L, Zhu Y M. The dynamic characteristics and modeling of nitrogen in paddy field surface water and nitrogen loss from field drainage. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 21(4):475—480.
- [4] Wang Q, Yang J P, Shen J G, *et al.* Study on dynamic change of three kinds of nitrogen in surface water of paddy field. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(3):51—54.
- [5] Cui Y L, Li Y H, Lv G A *et al.* Nitrogen movement and transformation with different water supply for paddy rice. *Advances In Water Science*, 2004, 15(3):280—285.
- [6] Phongpan S and Mosier A R. Effect of crop residue management on nitrogen dynamics and balance in a lowland rice cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 66: 133—142.
- [7] Zhong L, Yagi K, Sakai H, *et al.* Influence of elevated CO_2 and nitrogen nutrition on rice plant growth, soil microbial biomass, dissolved organic carbon and dissolved CH_4 . *Plant and Soil*, 2004, 258: 81—90.
- [8] Owens L B, Edwards W M, Van Keuren R W. Nitrate leaching from grassed lysimeters treated with ammonium nitrate or slow-release nitrogen fertilizer. *J Environ Qual*, 1999, 28:1810—1816.
- [9] Quenmada M, Lasa B, Lamsfus C, *et al.* Ammonia volatilization from surface or incorporated biosolids by the addition of dicyandiamide. *J Environ Qual*, 1998, 27:980—983.
- [10] Wang J Y, Wang S J, Chen Y. Study on leaching loss of nitrogen in rice fields by using large undisturbed monolith lysimeters. *Pedosphere*, 1994, 4(1):87—92.
- [11] Arth I, Frenzel P, Conrad R. Denitrification coupled to nitrification in the rhizosphere of rice. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30:509—515.
- [12] Kronzucker H J, Kirk G J D, Siddiqi M Y, *et al.* Effects of hypoxia on $^{13}\text{NH}_4^+$ flux in rice roots: kinetics and compartmental analysis. *Plant Physiol*, 1998, 116:581—587.
- [13] He W S, Li S X, Li H T. Characteristics of NH_4^+ -N and NO_3^- -N uptake of rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 1998, 12(4):249—252.
- [14] Nilda, Richard, David, *et al.* Competitive N uptake between rice and weedy rice. *Field Crops Research*, 2006, 99: 96—105.
- [15] Yin X Q, Li J D. Diversity of soil animal community in *Leymus chinensis* grassland. *Chin J Appl Ecol*, 1998, 9(2):186—188.
- [16] Xu Q, Yang L Z, Dong Y H, *et al.* Rice field ecosystem in China. Beijing: Agricultural Press, 1998. 158—170.
- [17] Wang H X, Yin X Q, Zhou D W. Ecological study on small middle size soil animals in a compound ecosystem of farmland, grassland and woodland in the grassland region of Songnen Plain. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14(10):1715—1718.
- [18] Ekurem E, Ryohei Y. Comparative studies on behavior, weeding and pest control of duck free ranged in paddy fields. *Jpn. Poult. Sci*, 1996, 33: 261—267.
- [19] Zheng Y H, Deng G B, Lu G M. Eco-economic benefits of rice-fish-duck complex ecosystem. *Chin J. Appl. Ecol*, 1997, 8(4):431—434.
- [20] Wang H, Huang H. Analysis on ecological and economic benefits of complex ecosystem in wetland paddy fields. *Chin. Agric. Sci. Bull*, 2002, 18(1):71—75.
- [21] Wang H, Huang H, Yang Z H, *et al.* Studies on integrated benefits of wetland rice-duck complex ecosystem. *Rural Eco-Environ*, 2003, 3: 45—48.
- [22] Bao S D. Soil agriculture chemistry analysis. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000. 42—56, 265—266.
- [23] Ye W Q. Soil microorganisms experimental technique. Beijing: Science Press, 1985. 54—59.
- [24] Campbell C A, LaFond G P A, Leyshon J. Effect of cropping practices on the initial potential rate of N mineralization in a thin chernozem. *Can. J. Soil Sci*, 1991, 71:43—53.
- [25] Yan D Z, Wang D J, Lin J H. Effects of fertilizer-N application rate on soil N supply, rice N uptake and groundwater in Taihu region. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3):440—446.
- [26] Wang Y, Lei W C. Studies on ecological benefits of planting and breeding model in rice fields. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 311—316.
- [27] Wang D J, Lin J H, Xia L Z. Characteristics of nitrogen leaching of rice-wheat rotation field in Taihu Lake area. *Chinese Journal of Eco-*

Agriculture, 2001, 9(1):16—18.

- [28] Zhang J E, Lu J X, Zhang G H, *et al.* Study on the function and benefit of rice-duck agroecosystem. *Ecologic Science*, 2002, 21(1):6—10.
- [29] Yang Z H, Huang H, Wang H. Paddy soil quality of a wetland rice-duck complex ecosystem. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(2):117—121.
- [30] Ma G Q, Zhuang Y J, Zhou M C. Study of rice-duck complex ecological technique on green food. *Agricultural Equipment and Technology*, 2002, 104(2):20—21.
- [31] Yu S M, Ouyang Y N, Zhang Q Y, *et al.* Effects of rice-duck farming system on *Oryza sativa* growth and its yield. *Chin J. Appl. Ecol*, 2005, 16(7):1252—1256.
- [32] She D L, Wang K R, Xie X L. Effects of application of N fertilizer and incorporation of rice straw on soil Nitrogen supply and rice yield. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(2):16—20, 44.
- [33] Doran J W, Coleman D C, Stewart B A. Defining soil quality for a sustainable environment. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA, 1994.
- [34] Abbott L K, Murphy D V. Soil biological fertility. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [35] Ndayeyamiye A, Cote D. Effect of long-term pig slurry and solid cattle manure application on soil chemical and biological properties. *Canadian Journal of Soil Science*, 1989, 69(1):39—47.
- [36] Nanda S K, Das P K, Behera B. Effects of continuous manuring on microbial population, ammonification and CO₂ evolution in a rice soil. *Oryza*, 1998, 25(4):413—416.
- [37] Tan Z J, Tang H T, Yu C X. Dynamic changes of soil microbes based on rice straw incorporation. *Hunan. Agric. Sci.*, 2001, 4:30—31, 33.

参考文献:

- [1] 石英,沈其荣,茆泽圣,等.旱作水稻根际土壤铵态氮和硝态氮的时空变异. *中国农业科学*, 2002, 35(5):520—524.
- [3] 张志剑,董亮,朱荫涓.水稻田面水氮素的动态特征、模式表征及排水流失研究. *环境科学学报*, 2001, 21(4):475—480.
- [4] 王强,杨京平,沈建国,等.稻田田面水中三氮浓度的动态变化特征研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3):51—54.
- [5] 崔远来,李远华,吕国安,等.不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究. *水科学进展*, 2004, 15(3):280—285.
- [13] 何文寿,李生秀,李辉桃.水稻对氨态氮和硝态氮吸收特性的研究. *中国水稻科学*, 1998, 12(4):249—252.
- [15] 殷秀琴,李建东.应用生态学报. *应用生态学报*, 1998, 9(2):186—188.
- [16] 徐琪,杨林章,董元华,等.中国稻田生态系统.北京:农业出版社, 1998. 158—170.
- [17] 王海霞,殷秀琴,周道玮.松嫩草原区农牧林复合系统中小型土壤动物群落生态研究. *应用生态学报*, 2003, 14(10):1715—1718.
- [19] 郑永华,邓国彬,卢光敏.稻鱼鸭复合生态经济效益的初步研究. *应用生态学报*, 1997, 8(4):431—434.
- [20] 王华,黄璜.湿地稻田养鱼、鸭复合生态系统生态经济效益分析. *中国农学通报*, 2002, 18(1):71—75.
- [21] 王华,黄璜,杨志辉,等.湿地稻-鸭复合生态系统综合效益研究. *农村生态环境*, 2003, 3:45—48.
- [22] 鲍士旦.土壤农化分析.北京:中国农业出版社, 2000. 42—56, 265—266.
- [23] 叶维青.土壤微生物实验法.北京:科学出版社, 1985. 54—59.
- [25] 闫德智,王德建,林静慧.太湖地区氮肥用量对土壤供氮、水稻吸氮和地下水的影响. *土壤学报*, 2005, 42(3):440—446.
- [26] 王纍,雷慰慈.稻田种养模式生态效益研究. *生态学报*, 2000, 20(2):311—316.
- [27] 王德建,林静慧,夏立忠.太湖地区稻麦轮作农田氮素淋洗特点. *中国生态农业学报*, 2001, 9(1):16—18.
- [28] 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. *生态科学*, 2002, 21(1):6—10.
- [29] 杨志辉,黄璜,王华.稻-鸭复合生态系统稻田土壤质量研究. *土壤通报*, 2004, 35(2):117—121.
- [30] 马国强,庄雅津,周铭成.稻鸭共作无公害水稻生产技术初探. *农业装备技术*, 2002, (2):20—21.
- [31] 禹盛苗,欧阳由男,张秋英,等.稻鸭共育复合系统对水稻生长与产量的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(7):1252—1256.
- [32] 余冬立,王凯荣,谢小立,等.施 N 模式与稻草还田对土壤供 N 量和水稻产量的影响. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(2):16—20, 44.
- [37] 谭周进,汤海涛,余崇祥.秸秆还田栽培晚稻土壤微生物动态研究. *湖南农业科学*, 2001, 4:30—31, 33.