

# 稻鸭稻鱼共作生态系统 N 素平衡的研究

李成芳<sup>1</sup>, 曹凑贵<sup>1</sup>, 汪金平<sup>1</sup>, 展 茗<sup>1</sup>, 袁伟玲<sup>1</sup>, 高 超<sup>2</sup>, 潘圣刚<sup>1</sup>

(1.华中农业大学作物栽培与生理生态研究中心, 湖北 武汉 430070; 2.湖北省水土保持监测中心, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:**通过田间采样与室内分析相结合的方法,对华中地区稻鸭、稻鱼共作生态系统 N 素动态及平衡进行了系统研究。结果表明,对于各处理,主要的 N 输入来自施肥、降雨和灌溉水,其中降雨的 N 输入量为  $42.83 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,灌溉水 N 的输入量分别为  $34.36 \text{ (CK)}$ 、 $32.72 \text{ (RD)}$ 和  $41.72 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ (RF)}$ 。主要的 N 损失包括  $\text{N}_2\text{O}$  释放、 $\text{NH}_3$  挥发、N 淋失、鸭和鱼的收获及水稻吸 N。 $\text{CK}$   $\text{N}_2\text{O}$  释放损失量为  $4.04 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,显著低于 RD 的  $4.31 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  和高于 RF 的  $3.76 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,表明稻田养鸭能增加  $\text{N}_2\text{O}$  释放损失而养鱼则降低  $\text{N}_2\text{O}$  释放损失。RD 和 RF  $\text{NH}_3$  挥发损失分别为  $43.09$  和  $44.89 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,低于 CK,这与鸭和鱼的存在降低了田面水 pH 有关。 $\text{CK}$ 、RD 和 RF N 淋失量分别为  $6.73$ 、 $6.11$  和  $5.81 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因鸭和鱼收获而损失的 N 量分别为  $0.60$  和  $0.18 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。水稻 N 的吸收是稻田最主要的 N 损失,CK、RD 和 RF N 吸收量分别为  $(219.95 \pm 20.61)$ 、 $(273.65 \pm 53.49)$ 和  $(279.22 \pm 17.47) \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。N 平衡分析显示,施肥和水稻吸 N 是影响 N 平衡最主要的影响因素,而  $\text{NH}_3$  挥发损失、降雨和灌溉水 N 的输入也是影响 N 平衡的重要因素;与 CK 相反,由于鸭和鱼的存在,RD 和 RF 为 N 平衡为正,表明鸭和鱼的存在加速了土壤有机 N 营养的周转,从而显著提高了水稻 N 输出。

**关键词:**稻鸭、稻鱼生态系统;灌溉水;N 淋失;N 平衡; $\text{NH}_3$  挥发; $\text{N}_2\text{O}$  释放

**中图分类号:**X171.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)04-1326-09

## Studies on Nitrogen Cycling in Integrated Rice-duck, Rice-fish Ecosystems

LI Cheng-fang, CAO Cou-gui, WANG Jin-ping, ZHAN Ming, YUAN Wei-ling, GAO Chao, PAN Sheng-gang

(1.Crop Production, Physiology and Ecology Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2.The Soil and Water Conservation Monitoring Center of Hubei Province, Wuhan 430071, China)

**Abstracts:**Field experiments on nitrogen dynamics and cycling in integrated rice-duck and rice-fish ecosystems in subtropical region of China were conducted from May to September in 2007. The experiment field was equally divided into nine plots for three different treatments: (1)conventional rice field (CK), (2)integrated rice-duck ecosystem (RD) and (3)rice-fish ecosystem (RF). The N input from precipitation was  $42.83 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ . The N input from irrigation water in CK, RD and RF were estimated to be  $34.36$ ,  $32.72$  and  $41.72 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. N losses via  $\text{N}_2\text{O}$  emission in CK, RD and RF were  $4.04$ ,  $4.31$  and  $3.76 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively, which showed that compared with CK, RD enhanced N losses via  $\text{N}_2\text{O}$  emission while RF decreased N losses via  $\text{N}_2\text{O}$  emission. N losses via  $\text{NH}_3$  volatilization in RD and RF were  $43.09$  and  $44.89 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively, lower than  $46.30 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  in CK. This was because the presence of ducks and fish resulted in marked decrease in floodwater pH. N outputs via leaching in CK, RD and RF were  $6.73$ ,  $6.11$  and  $5.81 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. N outputs via ducks and fish removal were  $0.60$  and  $0.18 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. N uptake by rice was the major N output and was  $(219.95 \pm 20.61)$ ,  $(273.65 \pm 53.49)$  and  $(279.22 \pm 17.47) \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  in CK, RD and RF, respectively. The N balance analysis showed that fertilization and N uptake of rice were the main factors to affect N balance while N output via  $\text{NH}_3$  volatilization and N input from precipitation and irrigation were also significant. Moreover, due to the presence of ducks and fish, the apparent N balance in RD and RF was positive in contrast to CK, suggesting that the presence of ducks and fish accelerated the turnover of soil organically bound nutrients and thus significantly increased N output via rice uptake.

**Keywords:**integrated rice-duck and rice-fish ecosystems; irrigation water; leaching; nitrogen cycling;  $\text{NH}_3$  volatilization;  $\text{N}_2\text{O}$  emission

收稿日期:2008-02-13

基金项目:国家重大科技专项资助项目(2004BA520A02)

作者简介:李成芳(1978—),男,福建厦门人,博士,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:曹凑贵 E-mail:cogui@mail.hzau.edu.cn

中国 N 肥施用量占世界 N 肥施用量的 1/4<sup>[1]</sup>, 然而 N 肥的利用率低下, 通常为 20%~40%<sup>[2]</sup>, 这不仅导致农民的经济损失, 同时也对环境造成危害。稻田 N 的输入与输出受一系列物理的和化学的过程影响。N 的输入主要来自施肥、灌溉水、降雨、作物根茬和生物固 N, 而 N 的输出包括径流流失、下渗淋失、气态损失和水稻 N 的吸收, 其中气态损失主要为  $N_2$  与  $N_2O$  释放及其  $NH_3$  挥发。关于稻田 N 循环的研究, 已有众多的报道<sup>[3-5]</sup>, 但研究结果各不相同。Reddy<sup>[3]</sup>和 Kyaw 等<sup>[4]</sup>对稻田 N 平衡的研究指出, 稻田 N 输出大于 N 输入; 而 Koyama 和 App 的研究<sup>[5]</sup>却表明 N 输入高于 N 输出, 稻田具有 N“库”的作用。因此, 对稻田 N 循环进一步的研究, 有利于发展有效的稻田 N 肥管理措施, 同时也为发展持续农业和提高环境质量提供理论依据。

稻鱼共作生态系统是我国南方稻作区主要的一种种养模式, 具有 1 700 多年的历史<sup>[6]</sup>。以田面水养鱼为主的稻田复合生态农业形式或模式, 已成为一项提高水稻栽培产量和生态经济效益的技术措施<sup>[7-14]</sup>; 稻田露宿养鸭是在其基础上发展起来的一种综合利用方式, 研究已表明稻鸭共作具有较高经济价值和生态效益<sup>[15-17, 19, 20]</sup>。然而目前对稻鸭、稻鱼共作生态系统 N 素平衡的研究尚少, 因此本文通过田间试验研究了稻鸭、稻鱼共作生态系统 N 的输入和输出的规律, 为稻田肥料管理及推广稻鸭、稻鱼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

本研究于 2007 年 5 月至 9 月在华中农业大学试验农场进行, 前作为油菜。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 20 cm, 下为 10 cm 厚的犁底层; 地下水位常年深埋在 1.5 m 以下。其基本肥力性质为: 全 N 1.09 g·kg<sup>-1</sup>, 全 P 1.17 g·kg<sup>-1</sup>, 有机质 16.76 g·kg<sup>-1</sup>, 硝态氮 12.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 铵态氮 0.52 mg·kg<sup>-1</sup>, 土壤 pH 值为 6.8, 土壤容重为 1.18 g·cm<sup>-3</sup>。

### 1.2 试验材料

中稻品种为两优培九(*Oryza sativa* L.), 鸭子为本地麻鸭(*Tadorna*), 鱼为鲫鱼(*Carassius auratus gibelio*)。

### 1.3 田间设置

#### 1.3.1 试验设计

试验田面积 1 260 m<sup>2</sup>, 分为 9 个小区, 每小区 140 m<sup>2</sup>。设 3 个处理: 处理 I, 不放鸭不放鱼(CK); 处理 II,

放鸭 6 只(RD, 以每公顷放养 450 只公鸭为标准); 处理 III, 放养 200 条鲫鱼(RF, 以每公顷放养 15 000 尾鱼苗为标准)。各小区随机区组设计, 3 次重复。

#### 1.3.2 田间管理

5 月 25 日田间整地, 并于泡田后 4 d 施基肥(尿素) 225 kg N·hm<sup>-2</sup>, 在水稻生长期不再追肥。移栽, 每 667 hm<sup>2</sup> 15 000 穴, 每穴 1 苗, 9 月 8 日收割。

小区间用泥巴砌成田埂, 覆上地膜, 防止肥水串流。田间开挖围沟, 深 30 cm、宽 40 cm。对于养鱼小区, 于返青期(6 月 14 日)放入 200 尾鱼苗(长约 5 cm), 并于 8 月 20 日收回, 养鱼期间不投饲料。对于养鸭处理, 小区以 4 指规格尼纶丝网沿田埂围隔, 围网高度为 0.6~0.8 m, 以防鸭逃走。水稻以宽窄行(26.6 cm×16.6 cm)栽插。水稻移栽后半个月放 15 日龄的雏鸭。在养鸭小区角落放置一鸭棚, 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, N 含量为 13.08 g·kg<sup>-1</sup>, 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 日)收鸭子, 并称重, 在此期间稻鸭共同生长, 且此后稻田不再灌溉。稻田灌溉用水来自附近的野芷湖。在每个小区四角及中心处各直立放置一标尺, 用以记录田面水水深(即 5 处水深的平均值)。对于各处理, 田面水水深均维持在 10 cm, 当田面水降至 5 cm, 稻田即灌水, 并记录灌溉次数。在水稻全生育期, 常规小区除不放鸭不养鱼, 其他农艺措施均与养鸭小区一致。

5 月 30 日于试验区放置一雨量器(SDM6 型, 天津气象仪器厂造)和蒸发皿(AM3 型, 上海气象仪器厂造), 用以记录和测定试验期间降雨量和稻田田面水蒸发量。每次降雨后, 即测定其体积, 并根据降雨量大小于 6 月 1 日、6 月 12 日、6 月 20 日、6 月 26 日、7 月 2 日、7 月 10 日、7 月 16 日、7 月 23 日、7 月 27 日、8 月 3 日、8 月 16 日、8 月 26 日和 9 月 3 日测定雨水全 N 浓度。水稻水分蒸腾量用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 型便携式光合作用测定仪测定, 在每次  $N_2O$  的采集后进行水稻水分蒸腾量测定, 具体测定方法见文献[38]。

#### 1.4 $N_2O$ 采集及测定

6 月 1 日至 9 月 7 日进行  $N_2O$  的采集及测定。采用密闭箱-气相色谱法测定稻田  $N_2O$  排放量。采样箱为透明有机玻璃制成, 大小为 60 cm×60 cm×110 cm(长×宽×高)。为防止采样对水体和土体的扰动, 一个

跳板在田埂水和采样箱间被搭建。水稻移栽后,每个月采样 4 次;每次从早上 9:00 在 3 个处理同时采样。采样时间分别为关箱后的 0、10、20、30 min,每次抽样 20 mL。用改装后 Shimadzu GC-14B 气相色谱仪分析气样中  $N_2O$  浓度。检测器为 ECD,分离柱内填充料为 80/100 目 PorapakQ,检测温度 300  $^{\circ}C$ ,注射温度 100  $^{\circ}C$ ,柱温 65  $^{\circ}C$ ,载气为氮气,流速 40  $mL \cdot min^{-1}$ 。 $N_2O$  流通量根据下面方程计算<sup>[21]</sup>:

$$F = \rho \cdot h \cdot dC/dt \cdot 273 / (273 + T)$$

式中: $F$  是气体流通量,  $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ;  $\rho$  是标准状态下气体密度,  $mg \cdot cm^{-3}$ ;  $h$  是箱高,  $m$ ;  $dC/dt$  为采样箱内气体浓度变化率;  $T$  为采样过程中采样箱内的平均温度,  $^{\circ}C$ 。

### 1.5 $NH_3$ 采集及测定

6 月 1 日至 8 月 20 日进行  $NH_3$  的采集,每隔 7~9 d 采 1 次样。利用密闭式硼酸吸收法测定稻田  $NH_3$  挥发<sup>[22]</sup>,即将装有 0.033  $mol \cdot L^{-1}$   $H_3BO_3$  和指示剂的培养皿放置于距田面水 5 cm 高处,并用高 40 cm、直径 30 cm 的透明塑料桶覆盖,并保持桶内外田面水相通。当培养皿内溶液由蓝色变为浅红色,即换  $H_3BO_3$  和指示剂。此外,在采集  $NH_3$  同时测定田面水 pH。硼酸和指示剂液中  $NH_3$  浓度采用靛酚蓝比色法测定<sup>[25]</sup>。

在水稻生育期间,总气体排放量(包括  $N_2O$  和  $NH_3$ )为每相邻的两采样时期的气体排放量之和,而每相邻的两采样时期的气体排放量为平均排放通量与采样时间的乘积<sup>[23]</sup>。

### 1.6 N 淋失

稻田犁底层的性质决定了根系很难通过,因此随田面水下渗并通过土壤犁底层的氮素是不为水稻利用的。为了更好地在自然条件下,定量地研究稻田施氮后氮素的淋失状况,特设计了本渗漏计。施肥前(5 月 24 日)在每个小区埋入自行设计的 PVC 管渗漏计用于取样测定稻田系统渗漏水中的 N 素变化。PVC 管渗漏计管径 20 cm,长 90 cm,底部封闭,并在距底部 20 cm 处从下而上 10 cm 内均匀打 3 排孔径为 5 mm 的渗水小孔,其外用塑料纱网紧贴管壁将渗水小孔包住,以阻隔淤泥进入管中,埋入后,第一排孔距表土层约 40 cm。为防止田间表层水溶液沿管壁下渗,在第一排孔距地表 30 cm 深处,沿管外壁四周,紧贴管壁,缠上一片塑料薄膜,并使薄膜水平向外延伸约 20 cm,然后在其上回垫原层土。PVC 管口高于土壤表面 20 cm,以免田面水过多时,管口被淹,并配一管盖,以防止雨水尘土进入管内

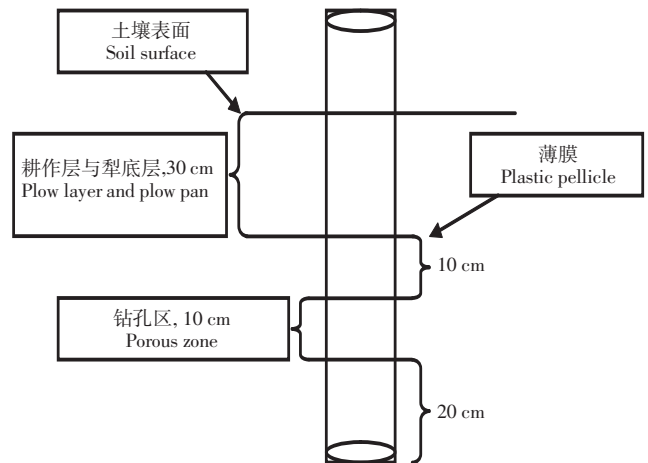


图 1 PVC 管渗漏计设置简图

Figure 1 PVC lysimeter setting sketch

(见图 1)。

稻田氮素渗漏量以汪华等<sup>[18]</sup>的方法进行估算:每一 PVC 管直径 20 cm,埋入土壤中时最上排孔距土壤表面为 40 cm,所以将其抽象为每一 PVC 管所收集的渗漏水及氮素量为一个 30 cm 直径(40/2+20/2)、长轴为 40 cm 的半椭球体土壤所贡献的渗漏水,而不考虑各个半球体相互间的侧渗。根据半椭球体体积计算公式( $4/3 \times \pi \times a \times b^2$ ,  $a$  为短轴,  $b$  为长轴)计算出半椭球体体积为 0.018 85  $m^3$ ,则面积为 1  $hm^2$  的 40 cm 厚土层含有 212 206.6 个半椭球体,进而估算稻田氮素渗漏量。

不考虑稻田土壤 N 素的淋失, N 肥淋失量即为 N 下渗淋失量。

### 1.7 田间取样及分析方法

#### 1.7.1 田间取样

在淹水前(5 月 23 日)和收获时(9 月 8 日)采集试验区 0~20 cm 层表土,混匀,室内完全自然风干,过 100 目筛。在水稻收获时,每个小区随即取 3 个点(地上部植株)测产,每点 1 m×1 m;一部分水稻植株烘干称重,磨碎混合,用于测定植株含 N 量;另一部分水稻植株进行脱粒,风干并称重;鸭和鱼于 105  $^{\circ}C$  烘 24 h,称重,粉碎过 100 目筛<sup>[35]</sup>。

$N_2O$  和渗漏水采集:在 6 月 1 日至 8 月 27 日期间,每隔 7~9 d 采 1 次样;在 8 月 27 日至成熟收获期间,只在 9 月 7 日采 1 次样。PVC 管中渗漏水达到最上层入渗小孔时(防止管里水位过高导致田面水下渗受影响),即取渗漏水,用带有 2 m 长橡胶管的 50 mL 医用注射器将水样全部抽出,同时记录水样体积,水样采集后立即送回实验室进行分析。



### 1.7.2 分析方法

土壤、植株和鱼鸭(干物质)全 N 含量采用浓  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HClO}_4$  消化-FIAstar5000 连续流动注射分析仪测定<sup>[24]</sup>;雨水、灌溉水和渗漏水总 N 含量采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;渗漏水  $\text{NO}_3^-$  含量采用紫外分光光度法测定<sup>[25]</sup>;田面水 pH 采用带有玻璃电极的酸度计测定。

水稻植株吸 N 量为水稻含 N 量与干物质重的乘积;而水稻总吸 N 量为收获时水稻吸 N 量与秧苗吸 N 量之差。

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 SPSS11.5 软件统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 降雨

在水稻生育期,总的降雨量为 472.35 mm,降雨的 N 输入量为  $42.83 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,表明稻田大气 N 沉降是不可忽视的(图 2)。研究表明,日本稻田降雨的 N 输入量为  $12 \sim 15 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[14]</sup>,在韩国为  $20 \sim 39.5 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[26,27]</sup>。可看出本试验区的降雨 N 输入量远大于日本和韩国。

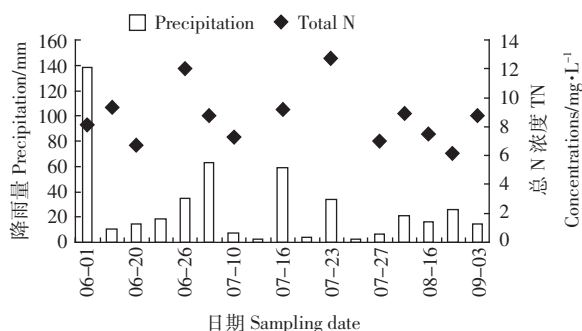


图 2 降雨量及雨水全 N 浓度

Figure 2 Amount of rainfall and concentrations of total N in rain water

### 2.2 灌溉水

水稻生长期灌溉水的 N 输入如表 1 所示。灌溉水总 N 平均浓度为  $(8.22 \pm 2.18) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , CK、RD 和 RF 灌溉水体积分别为 4 180.08、3 980.08 和 5 076.05  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因此,基于灌溉水全 N 平均浓度和灌溉水体积,CK、RD 和 RF 灌溉水的 N 输入分别为 34.36、32.72 和 41.72  $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。结果表明,高的灌溉水全 N 浓度导致稻田高的 N 量输入,稻田高的 N 量输入则可能导致对地下水的污染。

表 1 稻田灌溉水总 N 量

Table 1 Amounts of total N from irrigation water in different treatments

| 处理 Treatments | 总 N 平均浓度 Mean concentrations of TN/mg·L <sup>-1</sup> | 灌溉水体积 Volumes of irrigation water/m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> | 灌溉水 N 量 N amounts in irrigation water/kg N·hm <sup>-2</sup> |
|---------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| CK            | 8.22±2.18                                             | 4 180.08                                                           | 34.36                                                       |
| RD            | 8.22±2.18                                             | 3 980.08                                                           | 32.72                                                       |
| RF            | 8.22±2.18                                             | 5 076.05                                                           | 41.72                                                       |

### 2.3 土壤全 N

水稻吸收的 N 有部分来自土壤 N<sup>[4]</sup>。由表 2 可知,本研究土壤初始全 N 含量无显著差异,因此可认为 3 个处理土壤的供 N 能力是相同的。收获后各处理土壤全 N 含量略低于初始全 N 含量,可推测土壤 N 是水稻的 N 源之一。

表 2 淹水前和收获后稻田土壤全 N 含量

Table 2 Soil total N contents in paddy fields before flooding and after harvesting

| 项目 Items         | 土壤全 N 含量 Soil total N contents/g·kg <sup>-1</sup> |           |           |
|------------------|---------------------------------------------------|-----------|-----------|
|                  | CK                                                | RD        | RF        |
| 初始全 N Initial TN | 0.71±0.02                                         | 0.74±0.02 | 0.72±0.01 |
| 收获后全 N Final TN  | 0.64±0.01                                         | 0.64±0.01 | 0.72±0.07 |
| ΔN               | -0.07                                             | -0.10     | -0.01     |

注:ΔN 等于收获后土壤全 N 与初始土壤全 N 含量之差。

Notes: ΔN=Initial N content subtracted from final N content.

### 2.4 N<sub>2</sub>O 释放

图 3 是稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量变化趋势图。施肥后 2 周,稻田出现一个明显的释放峰,这与施肥促进 N<sub>2</sub>O 排放有关<sup>[28,29]</sup>;在稻鸭、稻鱼共作期间(6 月 16 日至 8 月 20 日),N<sub>2</sub>O 排放通量处于较低水平;此后,稻田排干,土壤局部氧化,N<sub>2</sub>O 大量释放,这与 Bronson 等人的研究结果一致<sup>[29-32]</sup>。

在水稻生长期,CK N<sub>2</sub>O 平均排放通量为  $(0.14 \pm$

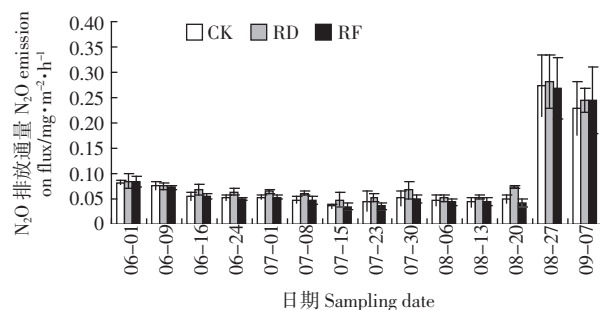


图 3 不同处理稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量

Figure 3 Variations of N<sub>2</sub>O emission fluxes from paddy fields in different treatments

0.07)mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,显著低于 RD(0.15±0.07)mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 的 8%(*P*<0.01)和高于 RF(0.13±0.08)mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 的 7%(*P*<0.05)。同时,在稻鸭、稻鱼共作期间,RD 和 RF N<sub>2</sub>O 平均排放通量分别为(0.061±0.011)和(0.046±0.009)mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,是 CK 的 1.26(*P*<0.01)和 0.94 倍(*P*<0.05)。RD 氧化亚氮释放量高于 CK,这与鸭的存在有关。第一,我们的研究<sup>[19]</sup>和其他学者的研究<sup>[16,17,20]</sup>表明,稻田养鸭抑制了稻田杂草、浮游生物和其他需氧有机生物生长,被水体生物所消耗的溶解氧减少,水体溶解氧量增加(表 4),土壤 Eh 值升高<sup>[17]</sup>,故 N<sub>2</sub>O 释放增加。第二,鸭子栖息和活动,加速了土壤与大气的交换,增加了土壤与氧气接触的机会,提高了水体和土壤溶解氧量(表 4),改善了土壤的氧化还原状况<sup>[17]</sup>,导致 N<sub>2</sub>O 释放的增加。第三,稻田淹水期间,水溶性 N<sub>2</sub>O 扩散和传输缓慢,使得 N<sub>2</sub>O 释放量少;而鸭子的活动搅

动了水体和土壤,使得水溶性 N<sub>2</sub>O 扩散加快,因此大量 N<sub>2</sub>O 释放。第四,鸭子的粪便含高浓度的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,落入土壤后迅速被硝化;同时,鸭的粪便含有丰富的 C、N 源,为土壤反硝化提供了物质和能源<sup>[33]</sup>,因此大量 N<sub>2</sub>O 释放。与 RD 相反,RF 降低了 N<sub>2</sub>O 的释放。这可能是鱼的活动搅浑水体,减弱了水体藻类的光合作用,同时鱼对溶解氧的消耗,降低了田面水 DO 浓度(表 4),提高了稻田水-土界面的还原状况<sup>[11,14,34]</sup>,因此 N<sub>2</sub>O 的排放量减少。

由表 3 可知,由于施肥和稻田排干引起的 N<sub>2</sub>O 释放损失量为 3.05~3.38 kg N·hm<sup>-2</sup>,是稻田 N<sub>2</sub>O 总释放损失量的 78%~81%,表明施肥和水分管理措施是影响稻田 N<sub>2</sub>O 释放的重要因素。在稻鸭、稻鱼共作期间,RD N<sub>2</sub>O 释放损失量最大,为 0.93 kg N·hm<sup>-2</sup>;CK 次之,为 0.75 kg N·hm<sup>-2</sup>;而 RF 最小,为 0.71 kg N·hm<sup>-2</sup>;同时,在水稻全生育期间,RD N<sub>2</sub>O 释放损失量为 4.31 kg N·hm<sup>-2</sup>,而 RF 最小,为 3.76 kg N·hm<sup>-2</sup>。表明 RD 提高了稻田 N<sub>2</sub>O 释放,RF 则降低了稻田 N<sub>2</sub>O 释放。

## 2.5 NH<sub>3</sub> 挥发

图 3 可知,当施肥后一周内,NH<sub>3</sub> 以很高的排放通量挥发;此后,NH<sub>3</sub> 挥发迅速减少,并保持稳定。在施肥后一周,各处理间差异不显著;而在稻鸭、稻鱼共作期间,RD 和 RF NH<sub>3</sub> 排放通量分别为(0.41±0.21)和(0.52±0.24)mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,是 CK 的 68%(*P*<0.01)和 87%(*P*<0.1)。图 3 还可知,CK 平均 pH 为(8.00±0.20),显著高于 RD 的(7.92±0.22)(*P*<0.01)和 RF(7.95±0.20)(*P*<0.1)。在稻鸭、稻鱼共作期间,由于鸭和鱼的存在,RD 和 RF 降低了 NH<sub>3</sub> 挥发。这是因为鸭和鱼的存在降低了田面水 pH,从而降低了 NH<sub>3</sub> 挥发。鸭和鱼抑制了藻类的生长<sup>[13,16,17,19,35]</sup>,藻类的光合作用减弱,参与光合作用的 CO<sub>2</sub> 量减少,导致田面水 pH 显著降低(图 4);在低 pH 条件下,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>不易被挥发<sup>[14,22]</sup>,故 NH<sub>3</sub> 挥发减少。

由表 3 可知,在施肥后 2 周内,NH<sub>3</sub> 挥发损失量占总 NH<sub>3</sub> 挥发损失量的 78.7%~86.6%,表明了施肥后 2 周内是控制 N 肥挥发的关键时期;在稻鸭、稻鱼共作期间,RD 和 RF NH<sub>3</sub> 挥发损失量分别是 NH<sub>3</sub> 总挥发损失量的 13.4%和 17.5%,为 5.79 和 7.87 kg N·hm<sup>-2</sup>,显著低于 CK NH<sub>3</sub> 挥发损失量;同时,在水稻全生育期间,CK NH<sub>3</sub> 总挥发损失量为 46.30 kg N·hm<sup>-2</sup>,是 RD 和 RF 的 1.07 和 1.03 倍,这表明 RD 和 RF 能降低稻田 NH<sub>3</sub> 挥发损失。

表 3 水稻不同生育阶段稻田 N<sub>2</sub>O 释放、NH<sub>3</sub> 挥发损失量及 N 淋失量(kg N·hm<sup>-2</sup>)

Table 3 Losses of N<sub>2</sub>O emission, NH<sub>3</sub> volatilization and N leaching during different growth periods of rice(kg N·hm<sup>-2</sup>)

| 项目<br>Items         | 06-01—06-16        | 06-16—08-20       | 08-20—09-07       | 总损失<br>Total N losses |
|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| CK-N <sub>2</sub> O | 0.26 <sup>a</sup>  | 0.75 <sup>b</sup> | 3.03 <sup>a</sup> | 4.04 <sup>b</sup>     |
| RD-N <sub>2</sub> O | 0.27 <sup>a</sup>  | 0.93 <sup>c</sup> | 3.11 <sup>a</sup> | 4.31 <sup>c</sup>     |
| RF-N <sub>2</sub> O | 0.26 <sup>a</sup>  | 0.71 <sup>a</sup> | 2.79 <sup>a</sup> | 3.76 <sup>a</sup>     |
| CK-NH <sub>3</sub>  | 36.43 <sup>a</sup> | 9.88 <sup>c</sup> | —                 | 46.30 <sup>a</sup>    |
| RD-NH <sub>3</sub>  | 37.30 <sup>a</sup> | 5.79 <sup>a</sup> | —                 | 43.09 <sup>a</sup>    |
| RF-NH <sub>3</sub>  | 37.02 <sup>a</sup> | 7.87 <sup>b</sup> | —                 | 44.89 <sup>a</sup>    |
| CK-NO <sub>3</sub>  | 1.49 <sup>a</sup>  | 1.00 <sup>b</sup> | 0.34 <sup>a</sup> | 2.83 <sup>b</sup>     |
| RD-NO <sub>3</sub>  | 1.54 <sup>a</sup>  | 0.74 <sup>a</sup> | 0.29 <sup>a</sup> | 2.57 <sup>a</sup>     |
| RF-NO <sub>3</sub>  | 1.37 <sup>a</sup>  | 0.81 <sup>a</sup> | 0.27 <sup>a</sup> | 2.45 <sup>a</sup>     |
| CK-TN               | 2.59 <sup>a</sup>  | 3.42 <sup>b</sup> | 0.72 <sup>b</sup> | 6.73 <sup>b</sup>     |
| RD-TN               | 2.50 <sup>a</sup>  | 3.04 <sup>b</sup> | 0.57 <sup>a</sup> | 6.11 <sup>a</sup>     |
| RF-TN               | 2.39 <sup>a</sup>  | 2.96 <sup>a</sup> | 0.46 <sup>a</sup> | 5.81 <sup>a</sup>     |

注:同一列相同字母表示在 5%水平上差异不显著。

Notes: Common letters in a column are not significantly different at the 5% level.

表 4 稻田田面水 DO 动态变化(mg·L<sup>-1</sup>)

Table 4 Variations of floodwater DO concentrations in different treatments(mg·L<sup>-1</sup>)

| Treatments | 06-16     | 07-08     | 07-23     | 08-06     | 08-20     | Mean                   |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------|
| CK         | 4.74±0.35 | 5.53±0.30 | 6.23±0.60 | 5.98±0.31 | 5.55±0.73 | 5.61±0.67 <sup>b</sup> |
| RD         | 4.72±0.25 | 6.95±0.64 | 7.54±0.71 | 8.18±0.46 | 6.24±0.44 | 6.73±1.31 <sup>c</sup> |
| RF         | 4.78±0.30 | 5.17±0.85 | 5.92±0.47 | 5.78±0.26 | 4.93±0.80 | 5.32±0.51 <sup>a</sup> |

注:同一列相同字母表示在 5%水平上差异不显著。

Notes: Common letters in a column are not significantly different at the

5% level.

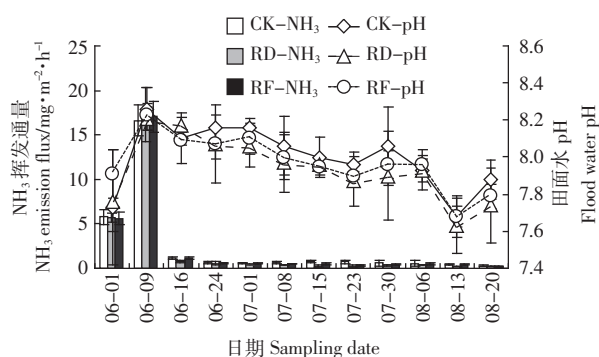
图 4 稻田  $\text{NH}_3$  的挥发

Figure 4 Variations of  $\text{NH}_3$  emission fluxes from fertilizer in paddy fields in different treatments

## 2.6 N 淋失

本研究表明,在施肥后渗漏水  $\text{NO}_3^-$  含量立即达到最大值(图 5),这与施肥可以增加渗漏水中  $\text{NO}_3^-$  的淋失有关<sup>[36,37]</sup>;此后,随着时间的延长,渗漏水  $\text{NO}_3^-$  含量降低,这是因为田面水中尿素随时间而逐渐减少,田面水  $\text{NH}_4^+$  量逐渐减少,因此形成的  $\text{NO}_3^-$  量也减少,导致渗漏的  $\text{NO}_3^-$  量也随之减少。在水稻全生育期,RD 和 RF  $\text{NO}_3^-$  平均浓度分别为  $(1.94 \pm 1.96)$  和  $(2.01 \pm 1.97) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,是 CK 的 89% ( $P < 0.01$ ) 和 92% ( $P < 0.01$ )。

水稻苗期,渗漏水  $\text{NO}_3^-$  浓度较其他时期高,主要是移栽前稻田土壤通气性良好,有利于硝化作用进行,因此稻田淹水后大量  $\text{NO}_3^-$  随水下渗。在水稻收获

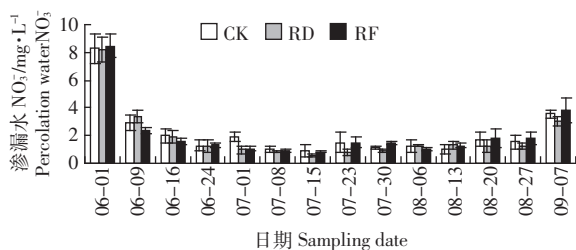
图 5 稻田渗漏水  $\text{NO}_3^-$  浓度

Figure 5 Variations of  $\text{NO}_3^-$  concentrations in percolation water in paddy fields in different treatments

期,渗漏水中  $\text{NO}_3^-$  浓度又有所回升,浓度在  $3.50 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右,这与稻田排干后土壤具有较高硝化势和降雨有关。在收获期,由于稻田落干,土壤通气性得到改善,硝化作用强烈,同时在此期间有短暂的降雨,因此  $\text{NO}_3^-$  淋失量增加。从表 3 可看出,RD 和 RF 渗漏水  $\text{NO}_3^-$  量为 2.57 和  $2.45 \text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,是 CK ( $2.83 \text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 的 91% 和 87%,表明了稻田养鸭养鱼降低了  $\text{NO}_3^-$  淋失。

稻田渗漏水 TN 浓度变化趋势如图 6 所示。渗漏水 TN 浓度明显高于  $\text{NO}_3^-$  浓度。与  $\text{NO}_3^-$  类似,渗漏水 TN 浓度在施肥后一周内达到最高值,此后迅速降低。施肥后一周渗漏水 TN 浓度较高,这与水稻苗期肥料 N 淋失较多,同时作物对肥料 N 的吸收较少有关。RD 和 RF TN 平均浓度分别为  $(5.11 \pm 2.78)$  和  $(5.10 \pm 2.69) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,是 CK ( $5.49 \pm 2.82 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 的 93% ( $P < 0.05$ ) 和 93% ( $P < 0.05$ )。同时,RD 和 RF 总 N 淋失量分别为 6.11 和  $5.81 \text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,低于 CK 的  $6.73 \text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  (表 3)。表明稻田养鸭养鱼能降低 N 的下渗淋失,同时稻田养鱼减少 N 淋失的效果好于养鸭。

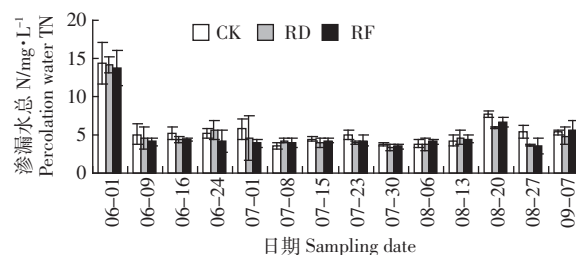


图 6 稻田渗漏水总 N 浓度

Figure 6 Variations of total N concentrations in percolation water in paddy fields in different treatments

## 2.7 鸭和鱼 N 输出

鸭和鱼的 N 输出是受鸭和鱼产量(干物质)及鸭和鱼含 N 量的影响。由表 5 可知,初始鸭和鱼的 N 量分别为 0.13 和  $0.48 \text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,收获后的 N 量分别为 0.31 和  $1.08 \text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,因此收获时 N 输出量分别为

表 5 鸭和鱼的 N 输出

Table 5 N output from duck and fish removal

| 项目<br>Items | 初始 N Initial total N              |                                                                        |                                                                    | 最终 N Final total N              |                                                                      |                                                                  | $\Delta \text{N}/$<br>$\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ |
|-------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
|             | 初始产量(干物质)<br>Initial yields/<br>g | 初始含 N 量<br>Initial total N content/<br>$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 初始 N 量<br>Initial N amounts/<br>$\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ | 最终产量(干物质)<br>Final yields/<br>g | 最终含 N 量<br>Final total N content/<br>$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 最终 N 量<br>Final N amounts/<br>$\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ |                                                          |
| 鱼 Fish      | 729                               | $15.53 \pm 0.66$                                                       | 0.13                                                               | 3 612                           | $7.15 \pm 0.56$                                                      | 0.31                                                             | 0.18                                                     |
| 鸭 Duck      | 2 406                             | $16.59 \pm 0.90$                                                       | 0.48                                                               | 8 352                           | $10.88 \pm 0.81$                                                     | 1.08                                                             | 0.60                                                     |

注:  $\Delta \text{N}$  为收获后与初始鸭(鱼) N 量之差。

Notes:  $\Delta \text{N}$  = Initial N amounts subtracted from final N amounts.

0.18 和 0.60 kg N·hm<sup>-2</sup>。可看出,鸭和鱼的 N 输出明显低于 N<sub>2</sub>O 释放损失量和 N 淋失量,并远小于 NH<sub>3</sub> 挥发损失量和水稻 N 吸收量。

## 2.8 水稻 N 输出

在成熟期,各处理间水稻吸 N 量呈显著差异(表 6)。CK 水稻总的 N 输出为(219.95±20.61)kg N·hm<sup>-2</sup>,显著低于 RD 和 RF 的(273.65±53.49)(*P*<0.01)和(279.22±17.47)kg N·hm<sup>-2</sup>(*P*<0.01)。RD 和 RF 能显著提高水稻吸 N 量,这与鸭和鱼的存在有关。鸭和鱼抑制了藻类的生长<sup>[13、16、17、19、35]</sup>,减少了杂草、藻类和其他微生物对土壤和水体 N 的吸收,同时,鸭和鱼的粪便增加了土壤 N<sup>[7、17]</sup>,因此水稻对 N 的吸收增加。

## 2.9 产量

表 6 表明,各处理产量间差异不显著。即稻田养鸭养鱼没有降低水稻产量,这与王缨等<sup>[20]</sup>和 Oehme 等<sup>[35]</sup>的报道一致。

## 2.10 水量平衡

由表 7 可知,稻田水输入主要来自灌溉和降雨,水输出主要是淋失、田面水蒸发和水稻蒸腾。CK、RD 和 RF 水输入量分别为 8 903.58、8 703.58 和 9 799.55

m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,而水的输出量分别为 5 586.96、5 520.29 和 5 486.96 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,水输入量是水输出量的 2~3 倍,由此可知 CK、RD 和 RF 不平衡的水量分别是-3 316.62、-3 183.29 和-4 312.59 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,故推测,部分不平衡的水可能通过稻田测渗损失。

## 2.11 N 平衡

稻田 N 平衡等于总的 N 输出减去总的 N 输入。N 输入包括降雨、灌溉水和施肥,而 N 输出包括了 N<sub>2</sub>O 释放、NH<sub>3</sub> 挥发、N 淋失、鸭和鱼 N 的输出及水稻 N 输出。本研究未能测定生物固 N,因此生物固 N 不包括在此平衡中。从表 8 可以看出,施肥和水稻 N 输出是影响 N 平衡最主要的因素,NH<sub>3</sub> 挥发、降雨和灌溉水也是影响 N 平衡的重要因素,而 N<sub>2</sub>O 释放、N 淋失与鸭和鱼 N 的输出对 N 平衡的贡献不大。与 CK 不同,RD 和 RF N 平衡为正,这意味着有部分未知的 N 被水稻吸收和利用,例如土壤有机质;同时,这也表明了鸭和鱼的存在加速了土壤有机养分的周转,因此显著地提高了水稻 N 的输出。

## 3 结论

本文研究了稻鸭、稻鱼共作生态系统 N 的输入和输出的规律,研究表明:

(1)相对于 CK,由于鸭和鱼的存在,RD 和 RF 降低了 NH<sub>3</sub> 挥发和 N 淋失,提高了水稻吸 N 量;此外,RD 显著提高了 N<sub>2</sub>O 释放而 RF 降低了 N<sub>2</sub>O 释放。

(2)稻田养鸭养鱼没有降低水稻产量。

(3)稻田水输入与输出间并不平衡,表明部分不平衡的水可能通过稻田测渗损失。

(4)稻田 N 平衡分析表明,施肥和水稻吸 N 是影响 N 平衡最主要的因素,NH<sub>3</sub> 挥发、降雨和灌溉水也是影响 N 平衡的重要因素,而 N<sub>2</sub>O 释放、N 淋失与鸭

表 6 水稻吸 N 量及产量

Table 6 Rice N uptake and yields in different treatments

| 处理<br>Treatments | 产量<br>Yields<br>/kg·hm <sup>-2</sup> | 水稻吸 N 量 N uptake of rice/kg N·hm <sup>-2</sup> |                           |                           |
|------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                  |                                      | 初始 N 量<br>Initial N amounts                    | 最终 N 量<br>Final N uptake  | 总吸 N 量<br>Total N uptake  |
| CK               | 6 983±880 <sup>a</sup>               | 3.17±1.48 <sup>a</sup>                         | 223.12±21.00 <sup>a</sup> | 219.95±20.61 <sup>a</sup> |
| RD               | 7 451±812 <sup>a</sup>               | 3.33±0.40 <sup>a</sup>                         | 276.98±53.09 <sup>b</sup> | 273.65±53.49 <sup>b</sup> |
| RF               | 7 382±222 <sup>a</sup>               | 3.61±1.50 <sup>a</sup>                         | 282.83±18.92 <sup>b</sup> | 279.22±17.47 <sup>b</sup> |

注:同一列相同字母表示在 5%水平上差异不显著。

Notes: Common letters in a column are not significantly different at the 5% level.

表 7 稻田水量平衡(m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>)

Table 7 Water balance in paddy fields in different treatments(m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>)

| 项目<br>Items             | CK        |           | RD        |           | RF        |           |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                         | 输入 Input  | 输出 Output | 输入 Input  | 输出 Output | 输入 Input  | 输出 Output |
| 灌溉水 Irrigation          | 4 180.08  |           | 3 980.08  |           | 5 076.05  |           |
| 降雨 Precipitation        | 4 723.50  |           | 4 723.50  |           | 4 723.50  |           |
| 水稻蒸腾 Rice transpiration |           | 2 451.12  |           | 2 451.12  |           | 2 451.12  |
| 田面水蒸发 Evaporation       |           | 2 002.50  |           | 2 002.50  |           | 2 002.50  |
| 淋失 Leaching             |           | 1 133.34  |           | 1 066.67  |           | 1 033.34  |
| 总量 Total                | 8 903.58  | 5 586.96  | 8 703.58  | 5 520.29  | 9 799.55  | 5 486.96  |
| ΔW (水量平衡 Water balance) | -3 316.62 |           | -3 183.29 |           | -4 312.59 |           |

注:ΔW 为总的水量输出与总的水量输入之差。

Notes: ΔW= total water output subtracted from the total water input.



表 8 稻田 N 平衡(kg N·hm<sup>-2</sup>)  
Table 8 Nitrogen balance in paddy fields in different treatments(kg N·hm<sup>-2</sup>)

| 项目<br>Items                                       | CK       |           | RD       |           | RF       |           |
|---------------------------------------------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
|                                                   | 输入 Input | 输出 Output | 输入 Input | 输出 Output | 输入 Input | 输出 Output |
| 降雨 Precipitation                                  | 42.83    |           | 42.83    |           | 42.83    |           |
| 灌溉水 Irrigation                                    | 34.36    |           | 32.72    |           | 41.72    |           |
| 施肥 Fertilizer                                     | 225      |           | 225      |           | 225      |           |
| 饲料 Feedstuff                                      | 0        |           | 0        |           | 5.68     |           |
| N <sub>2</sub> O 释放 N <sub>2</sub> O emission     |          | 4.04      |          | 4.31      |          | 3.76      |
| NH <sub>3</sub> 挥发 NH <sub>3</sub> volatilization |          | 46.3      |          | 43.09     |          | 44.89     |
| N 淋失 N leaching                                   |          | 6.73      |          | 6.11      |          | 5.81      |
| 鸭和鱼 N 输出 Ducks and fish removal                   |          | 0         |          | 0.60      |          | 0.18      |
| 水稻 N 输出 Rice uptake                               |          | 219.95    |          | 273.65    |          | 279.22    |
| 总量 Total                                          | 302.19   | 277.02    | 300.55   | 327.76    | 315.23   | 333.86    |
| Δ(N 平衡 N balance)                                 | -25.17   |           | 27.21    |           | 18.63    |           |

注:ΔN 等于总的 N 输出减去总的 N 输入。

Notes:ΔN= total N output subtracted from the total N input.

和鱼 N 的输出对平衡 N 的贡献不大;同时,分析还表明,与 CK 不同,RD 和 RF N 平衡为正,表明了鸭和鱼的存在加速了土壤有机养分的周转,因此显著地提高了水稻 N 的输出。

#### 参考文献:

- [1] FAO. Fertilizer. FAO yearbook Vol[M]. 1998. 48.
- [2] Vlek P L G, Byrens B H. The efficacy and loss of fertilizer N in lowland rice[J]. *Fertil Res*, 1986, 9(1-2): 131-147.
- [3] Reddy K R. Nitrogen cycling in a flooded-soil ecosystem planted to rice (*Oryza sativa* L. )[J]. *Plant Soil*, 1982, 67: 209-220.
- [4] Kyaw K M, Toyota K, Okazaki M, et al. Nitrogen balance in a paddy field planted with whole crop rice (*Oryza sativa* cv. Kusahonami)during two rice-growing seasons[J]. *Biol Fertil Soils*, 2005, 42: 72-82.
- [5] Koyama T, App A. Nitrogen balance in flooded rice soils [C].//International Rice Research Institute (Eds.) Nitrogen and rice. IRRI, Los Baños, Philippines, 1979. 95-104.
- [6] Lu J B, Li X. Review of rice-fish-farming systems in China—one of the globally important ingenious agricultural heritage systems (GIAHS)[J]. *Aquaculture*, 2006, 260: 16-113.
- [7] Panda M M, Ghosh B C, Sinhababu D P. Uptake of nutrients by rice under rice-cum-fish culture in intermediate deep water situation (up to 50-cm depth)[J]. *Plant Soil*, 1987, 102: 131-132.
- [8] Yuan X Q. Role of fish in pest control in rice farming[C].//dela Cruz CR, Lightfoot C, Costa-Pierce BA, Carangal VR, Bimbao MP. (Eds.) Rice Fish Research and Development in Asia. ICLARM Conf Proc, 1992. 235-243.
- [9] Halwart M. Fish as biological control agents in rice [M]. Margraf Verlag, Weikersheim Germany. 1994. 169.
- [10] Frei M, Becker K. Integrated rice fish culture; coupled production saves resources[J]. *Nat Resour Forum*, 2005, 29: 135-143.
- [11] Frei M, Becker K. Integrated rice fish production and methane emission under greenhouse conditions[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2005, 107: 51-56.
- [12] Frei M, Becker K. A greenhouse experiment on growth and yield effects in integrated rice-fish culture[J]. *Aquaculture*, 2005, 244: 119-128.
- [13] Frei M, Khan M A M, Razzak M A, et al. Effects of a mixed culture of common carp, *Cyprinus carpio* L., and Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.), on terrestrial arthropod population, benthic fauna, and weed biomass in rice Wields in Bangladesh[J]. *Biol Control*, 2007, 41: 207-213.
- [14] Frei M, Razzak M A, Hossain M M, et al. Methane emissions and related physicochemical soil and water parameters in rice-fish systems in Bangladesh [J]. *Agric Ecosyst Environ*, doi:10. 1016/j. agee. 2006. 10. 013, 2007.
- [15] Ekurem E, Ryohei Y. Comparative studies on behavior, weeding and pest control of duck free ranged in paddy fields[J]. *Jpn Poult Sci*, 1996, 33: 261-267.
- [16] 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[J]. 中国农学通报, 2002, 18(1): 71-75.  
WANG Hua, HUANG Huang. Analysis on ecological and economic benefits of complex ecosystem in wetland paddy fields[J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2002, 18(1): 71-75.
- [17] 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, 3: 23-26, 44.  
WANG Hua, HUANG Huang, YANG Zhi-hui, et al. Integrated benefits of rice-duck complex ecosystem [J]. *Rural Eco-Environ*, 2003, 3: 23-26, 44.
- [18] 汪 华, 杨京平, 金 洁, 等. 不同氮素用量对高肥力稻田水稻-土壤-水体氮素变化及环境影响分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 50-54.  
WANG Hua, YANG Jing-ping, JIN Jie, et al. N variation in rice-soil-water system under defferent N application level in high-yielding paddy field and its environment effect[J]. *J Soil Water Conservation*, 2006, 20(1): 50-54.



- [19] 汪金平, 曹凑贵, 金 晖, 等. 稻鸭共育对稻田水生生物群体的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(10):2001–2008.  
WANG Jin-ping, CAO Cou-gui, JIN Hui, et al. Effects of rice-duck farming on aquatic community in rice fields[J]. *Sci Agric Sinica*, 2006, 39(10):2001–2008.
- [20] 王 纓. 稻田种养模式生态效益研究[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 311–316.  
WANG Ying. Studies on ecological benefits of planting and breeding model in rice fields[J]. *Acta Ecol Sinica*, 2000, 20(2):311–316.
- [21] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields[J]. *Adv Atmos Sci*, 1998, 15(4):569–579.
- [22] Choudhury A T M A, Kennedy I R. Nitrogen fertilizer losses from rice soils and control of environment pollution problems[J]. *Commun Soil Sci Plan*, 2005, 36:1625–1639.
- [23] Singh J S, Sing S, Raghubansi A S, et al. Methane flux from rice/wheat agroecosystem as affected by crop phenology, fertilization and water lever[J]. *Plant Soil*, 1996, 183:323–327.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 42–56.  
BAO Shi-dan. Soil agriculture chemistry analysis[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000. 42–56.
- [25] 国家环保总局. 水和废水分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 256–258, 278–280.  
SEPA. Methods for examination of water and wastewater[M]. Beijing: China environmental science press, 2002. 256–258, 278–280.
- [26] Cho J Y, Han K W, Choi J K. Balance of nitrogen and phosphorus in a paddy field of central Korea[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2000, 46:343–354.
- [27] Cho J Y, Han K W, Choi J K, et al. N and P losses from a paddy field plot in Central Korea[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2002, 48:301–306.
- [28] Suratno W, Murdiyarsob D, Suratmoe F G, et al. Nitrous oxide flux from irrigated rice fields in West Java [J]. *Environ Polluti*, 1998, 102(S1): 159–166.
- [29] Xiong Z Q, Xing G X, Zhu Z L. Nitrous oxide and methane emissions as affected by water, soil and nitrogen[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(2):146–155.
- [30] Bronson K F, Neue H U, Singh U, et al. Automated chamber measure-  
ment of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil: I. Residue, nitrogen, and water management [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1997, 61:981–987.
- [31] Jagadeesh B Y, Li C, Frolking S, et al. Field validation of DNDC model for methane and nitrous oxide emissions from rice-based production systems of India[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2006, 74:157–174.
- [32] Kreye C, Dittert K, Zheng X H, et al. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China[J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2007, 77:293–304.
- [33] Rochette P, van Bochove E, Prevost D, et al. Soil carbon and nitrogen dynamics following application of pig slurry for the 19th consecutive year. II. Nitrous oxide fluxes and mineral nitrogen[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64:1396–1403.
- [34] Vromant N, Chau N T H, Ollevier F. The effect of rice-seeding rate and fish stocking on the floodwater ecology of the trench of a concurrent, direct-seeded rice-fish system[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 457:105–117.
- [35] Oehme M, Frei M, Razzak M A, et al. Studies on nitrogen cycling under different nitrogen inputs in intergrated rice-fish culture in Bangladesh[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2007, 79:181–191.
- [36] Zhu J G, Han Y, Liu G, et al. Nitrogen in percolation water in paddy fields with a rice/wheat rotation [J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2000, 57: 75–82.
- [37] Mailhol J C, Ruelle P, Nemeth I. Impact of fertilisation practices on nitrogen leaching under irrigation[J]. *Irrig Sci*, 2001, 20:139–147.
- [38] 程建平, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 不同灌溉方式对水稻生物学特性与水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10):1859–1865.  
CHENG Jian-ping, CAO Cou-gui, CAI Ming-li, et al. Effects of different irrigation modes on biological characteristics and water use efficiency of paddy rice[J]. *Chinese J Appl Ecol*, 2006, 17(10):1859–1865.

**致谢:**感谢华中农业大学资源与环境学院叶祥盛高级工程师、张丽梅博士和植物科技学院蔡明历工程师在测定分析时提供的便利。