

# 改善农学管理措施减少太湖稻麦轮作 $\text{NH}_3$ 和 $\text{NO}$ 排放<sup>①</sup>

赵 淼<sup>1,2</sup>, 田玉华<sup>1</sup>, 张 敏<sup>1</sup>, 姚元林<sup>1</sup>, 尹 斌<sup>1\*</sup>, 朱兆良<sup>1</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**在太湖稻麦轮作体系下,采用密闭室-间歇通气法和静态箱-化学发光法对空白(不施氮肥)、当地常规(农民习惯管理方式)和保产增效(与当地常规相比,改善作物种植、水分和养分管理方式)3个田间小区下的氨( $\text{NH}_3$ )挥发和一氧化氮( $\text{NO}$ )排放通量进行原位观测,并对作物产量和氮利用率进行评价。结果表明:与当地常规处理相比,保产增效处理在施氮量减少 25% 的情况下,总作物产量没有降低,且农学利用率提高了 39%;  $\text{NH}_3$  挥发量在稻季和麦季分别减少了 26% 和 44%;  $\text{NO}$  排放量在稻季较低( $0.75 \pm 0.03 \text{ kg/hm}^2$ ),与空白和当地常规处理均没有显著差异( $P < 0.05$ ),但在麦季则显著降低了 49%。因此,保产增效措施不仅能保障高产和提高氮利用率,还能减少  $\text{NH}_3$  和  $\text{NO}$  排放,值得在太湖地区推广。

**关键词:** 氨挥发; 一氧化氮排放; 稻麦轮作; 农学管理

**中图分类号:** S143; X131

保障粮食安全是中国乃至全球面临的重大战略问题。氮肥施用可以显著提高粮食产量,但是当前,由于普遍存在不合理施用或施用量过多的问题,我国氮肥利用率偏低,农业生态环境污染加剧。据报道,太湖地区稻麦轮作制度下氮肥(以  $\text{N}$  计)用量高达  $550 \text{ kg/hm}^2$  以上(稻季  $300 \text{ kg/hm}^2$ , 麦季  $250 \text{ kg/hm}^2$ ),氮利用率低于 30%,大约 40% 的氮素通过氨( $\text{NH}_3$ )挥发和硝化/反硝化( $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{N}_2$ )损失进入环境中<sup>[1-2]</sup>。

挥发到大气中的  $\text{NH}_3$  会参与大气气溶胶的形成过程,影响大气能见度和损害人体健康<sup>[3]</sup>;  $\text{NH}_3$  还会在大气迁移过程中干湿沉降到陆地和水生生态系统,导致土壤酸化、生物多样性减少、水体富营养化和水质恶化等<sup>[4]</sup>。一氧化氮( $\text{NO}$ )排放太湖地区也进行了一些研究,但多数限于旱作作物研究,对淹水稻田鲜有报道<sup>[5-7]</sup>。尽管  $\text{NO}$  在大气中属于痕量气体,但其在大气中的化学行为与臭氧层破坏、温室效应、酸雨形成和光化学烟雾的产生等息息相关<sup>[8-9]</sup>。

现已明确,作物产量、氮利用率和氮损失主要受氮肥施用<sup>[10-11]</sup>、灌溉方式<sup>[12-13]</sup>、种植密度<sup>[14-15]</sup>和品种特性<sup>[16-17]</sup>等因素的影响。研究指出,减少氮肥施

用量,并同时改善作物种植、水分和养分管理方式能保障作物高产且提高氮利用率<sup>[16-18]</sup>。但该措施能否削减  $\text{NH}_3$  挥发和  $\text{NO}$  排放量?如果能,能削减多少?需进一步研究。

因此,本研究以空白(不施氮肥)和当地常规为对照,设计了氮肥投入减少 25%,并同时增加作物种植密度、施肥频率和采用适度干湿交替灌溉管理的保产增效措施,监测其在太湖地区稻麦轮作制度下的  $\text{NH}_3$  挥发和  $\text{NO}$  排放量,旨在评价保产增效措施能否显著削减  $\text{NH}_3$  挥发和  $\text{NO}$  排放量。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2013—2014 年在中国科学院常熟农业生态实验站( $31^\circ 32' 56'' \text{N}$ ,  $120^\circ 41' 53'' \text{E}$ )进行。该站位于太湖流域,属于亚热带湿润气候,稻麦轮作是其主要粮食种植制度。供试土壤为湖积物发育而成的潜育型水稻土(乌栅土);表层 0~20 cm 土壤理化特征: pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 7.36、有机质 35.0 g/kg、全氮 2.09 g/kg、全磷 0.93 g/kg、速效氮 12.4 g/kg、速效磷 5.0 g/kg、速效钾 121.3 g/kg、CEC 17.7 cmol/kg<sup>[19]</sup>。试验期间日平

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2013CB127401)、公益性行业(环保)科研专项(201309035)和公益性行业(农业)科研专项(201003014)资助。

\* 通讯作者(byin@issas.ac.cn)

作者简介: 赵淼(1984—),男,河南信阳人,博士研究生,主要从事氮素环境化学与面源污染研究。E-mail: miaozhao@issas.ac.cn

均气温与降雨量由实验站自动监测装置记录(图 1), 年平均气温为 17.8 °C, 年降雨量为 992.8 mm。

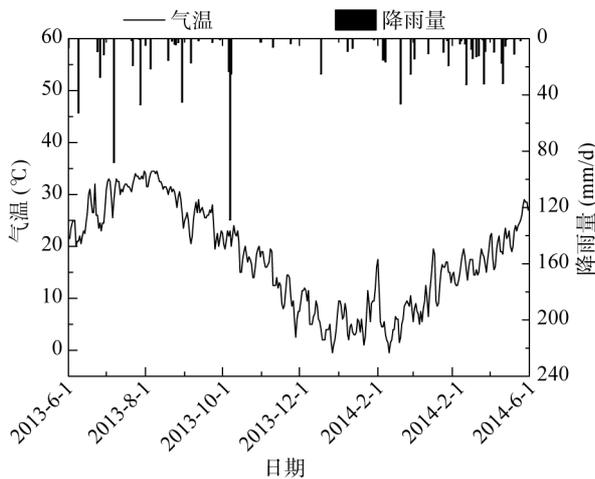


图 1 2013—2014 年稻麦轮作期间日平均气温和降雨量  
Fig. 1 Daily air temperature and precipitation during rice-wheat rotation system

## 1.2 试验设计

试验设 3 个处理, 每个处理 4 个重复:

1) 空白处理: 稻麦轮作均不施氮肥, 磷肥(过磷酸钙, 含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 135 g/kg)和钾肥(氯化钾, 含 K<sub>2</sub>O 600 g/kg)作为基肥一次施用, 稻季分别为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 120 kg/hm<sup>2</sup>, 小麦季分别为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 54 kg/hm<sup>2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 72 kg/hm<sup>2</sup>; 种植密度和水分管理均按当地农民习惯。水稻移栽行距为 20 cm × 20 cm, 除生育中期排水搁田外, 其余时期保持水层(4 ~ 5 cm)至收获前一周断水; 小麦播种密度为 180 kg/hm<sup>2</sup>, 除了种子萌发阶段 2013 年 12 月 2 日进行一次灌溉, 其他时期不进行灌溉。

2) 当地常规处理: 稻麦轮作总施氮量为 480 kg/hm<sup>2</sup> (尿素, 含 N 460 g/kg)。其中稻季为 300 kg/hm<sup>2</sup>, 基肥: 分蘖肥: 穗肥比例为 6:2:2, 麦季为 180 kg/hm<sup>2</sup>, 基肥: 返青肥: 拔节肥比例为 6:1:3。磷钾肥的用量、种植密度及水分管理方式同空白处理。

3) 保产增效处理: 稻麦轮作施氮量均比当地常规处理少 25%, 其中稻季为 225 kg/hm<sup>2</sup>, 按基肥: 分蘖肥: 促花肥: 保花肥=5:1:2:2 施用, 麦季为 135 kg/hm<sup>2</sup>, 按基肥: 返青肥: 拔节肥=6:1:3 施用。稻麦季磷钾肥施用量均同空白和当地常规, 但除了稻季的钾肥分基肥和拔节肥等量施用外, 其他均于基肥一次性施入。水稻种植密度增加至 20 cm × 15 cm; 整个生育期采用浅水层和交替灌溉模式: 从移栽后开始, 灌溉后保持 2 ~ 3 cm 水层, 自然落干至低限土壤水势为 -25 kPa, 再次灌溉并保持相应水层, 以此循环至水稻收获前 1 周排水落干。小麦播种密度和田间管理同空白和当地常规。

供试水稻和小麦品种分别为杂交粳稻常优 5 号和扬麦 16 号。水稻移栽日期为 2013 年 6 月 16—17 日, 小麦播种日期为 2013 年 11 月 21 日, 播种后和基肥一起翻耕。追肥均为表层均匀撒施。水稻和小麦收获日期分别为 2013 年 10 月 26—27 日, 2014 年 5 月 30—31 日。

## 1.3 采样与测定

NH<sub>3</sub> 挥发采用密闭室间歇通气法-稀硫酸吸收-靛酚蓝比色测定, 具体方法和原理见文献[19]。密闭室内的换气频率为 15 ~ 20 次/min。采集时间为每天 7:00—9:00 和 15:00—17:00, 以这 4 h 的 NH<sub>3</sub> 挥发量为每日的平均通量, 从而估算日 NH<sub>3</sub> 挥发总量。采集日期从每次施肥后的第 2 天开始, 直至 NH<sub>3</sub> 挥发通量与空白处理无显著差异为止。

NO 采用静态箱-化学发光法测定<sup>[5]</sup>。静态箱装置是由透明有机玻璃制成的圆柱体, 尺寸为 40 cm × 75 cm (直径 × 高)。箱体底端开放, 顶部设置一个采样口, 中部侧边开一口放置温度计记录箱内温度。采样前, 将一个 40 cm × 50 cm (直径 × 高) 的 PVC 桶一端埋入田间小区土下 35 cm。当采样时, 将静态箱置于 PVC 桶上, 并密封箱体的连接处, 30 min 后通过静态箱顶端采样口用小型抽气泵抽取 3 ~ 4 L 的气体于 5 L 的抽气袋中, 并记录箱体中的气体温度, 同时抽取采样前后箱体周围的空气。采样于每天 15:00—17:00 进行。施肥后 7 ~ 10 天内连续采样, 之后 1 ~ 2 周左右采样 1 次。每次采集的样品均在 5 h 内用化学发光法氮氧化物监测仪(武汉天虹仪表有限责任公司制造)在线测定, 仪器监测分辨率为 0.001 ml/m<sup>3</sup>。根据箱体内 NO 浓度与周围空气中 NO 背景浓度差值来计算 30 min 内 NO 排放通量, 并用箱体内气体温度进行浓度单位换算校准。

## 1.4 数据处理与分析

NH<sub>3</sub> 挥发通量计算公式为:

$$F_{\text{NH}_3} = C_1 \times V_1 \times \frac{24}{t_1} \times \frac{10^{-2}}{\pi \times R^2}$$

式中:  $F_{\text{NH}_3}$  表示 NH<sub>3</sub> 挥发通量(N, kg/(hm<sup>2</sup>·d));  $C_1$  表示吸收液中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度(mg/L);  $V_1$  表示吸收液体积(L);  $t_1$  表示 NH<sub>3</sub> 收集时间(h);  $R$  表示密闭室半径(m)。

NO 排放通量计算公式为:

$$F_{\text{NO}} = H(C_2 - C_0) \times \frac{M}{22.4} \times \frac{273}{273 + T} \times \frac{1}{t_2} \times 10^3$$

式中:  $F_{\text{NO}}$  表示 NO 排放通量(N, μg/(m<sup>2</sup>·h));  $H$  表示密闭室高度(m);  $C_2$  表示密闭室内 NO 浓度(ml/m<sup>3</sup>);  $C_0$  表示密闭室外空气 NO 浓度(ml/m<sup>3</sup>);  $M$  表示 NO-N 的摩尔质量(g/mol);  $T$  表示密闭室内温度(°C);  $t_2$  表

示气体采集时间(h)。

$\text{NH}_3$  挥发和  $\text{NO}$  排放通量均为 4 次重复平均值。 $\text{NH}_3$  挥发和  $\text{NO}$  排放累计通量根据已观测的通量值进行线性插值计算。

单因素方差分析和多重比较对不同处理间作物产量、农学利用率、 $\text{NH}_3$  挥发和  $\text{NO}$  排放累计通量进行差异性分析。线性或非线形回归分析对环境因子与  $\text{NH}_3$  挥发和  $\text{NO}$  排放通量进行相关性分析。SPSS 19.0 和 Origin 7.5 软件进行数据处理分析和制图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 作物产量和氮肥利用率

由表 1 可以看出,在稻麦轮作制度下,与当地常

规处理相比,保产增效处理的总作物产量没有下降,且农学利用率(ANUE)提高了 39%,这主要归于水稻季的“肥料、作物和灌溉”集成管理模式。在稻季,尽管保产增效处理的氮肥投入量减少了 25%,但由于其增加施肥频率能更好地匹配作物生长过程对养分供应的需求<sup>[20]</sup>,适宜的增加种植密度有助于提高单位面积的水稻颖花数<sup>[16]</sup>,低水层的干湿交替灌溉有利于提高水稻的抗倒伏能力、结实率和粒重<sup>[13]</sup>,结果其产量与 ANUE 分别比当地常规处理高出 16% 和 53%。对于麦季,由于仅仅氮肥投入量减少 25% 而没有进行其他措施改善,结果其产量和 ANUE 分别降低了 27% 和 17%。

表 1 稻麦轮作制度下作物产量与氮肥农学利用率  
Table 1 Crop yields and agronomic nitrogen use efficiency in the rice-wheat rotation system

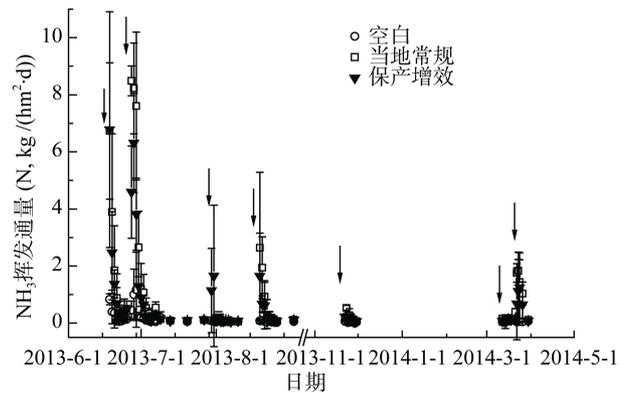
处理	水稻		小麦		稻麦轮作	
	产量(t/hm <sup>2</sup> )	ANUE(kg/kg)	产量(t/hm <sup>2</sup> )	ANUE(kg/kg)	产量(t/hm <sup>2</sup> )	ANUE(kg/kg)
空白	6.24 ± 1.78 c		1.16 ± 0.12 c		7.40 ± 1.65 b	
当地常规	8.85 ± 1.33 b	8.70 b	4.15 ± 0.52 a	16.61 a	13.00 ± 1.21 a	11.67 b
保产增效	10.23 ± 0.89 a	13.3 a	3.02 ± 0.64 b	13.78 b	13.25 ± 0.83 a	16.25 a

注: ANUE 表示氮肥农学利用率;同一列不同小写字母表示处理间存在显著差异( $P < 0.05$ ),下同。

### 2.2 稻麦轮作下 $\text{NH}_3$ 挥发动态特征

稻麦轮作下  $\text{NH}_3$  挥发通量受施肥影响显著(图 2)。施肥处理  $\text{NH}_3$  挥发峰值几乎都出现在施肥后 7 ~ 10 天内,且水稻季排放通量显著高于麦季,这和先前研究结果一致<sup>[21-22]</sup>。稻季的主要通量出现在基肥和第一次追肥后,这主要由于大部分氮肥(当地常规和保产增效处理分别占 80% 和 60%)集中在这两次施用,大量氮肥施用必然导致田面水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度上升。通过对田面水的监测发现(图 3),田面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的浓度变化与  $\text{NH}_3$  挥发通量变化基本一致,且存在显著正相关( $R^2 = 0.80$ ,  $P < 0.001$ ),而此时水稻植株幼小,吸氮能力弱,另外,适宜的温度 28°C(25 ~ 33 °C)和  $\text{pH} > 8$ (图 1 和 3),这些因素共同导致了  $\text{NH}_3$  挥发高峰的出现。此外,田面水中高  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度也导致了高的  $\text{NH}_3$  挥发通量,于是平均  $\text{NH}_3$  挥发通量:当地常规处理(1.29 kg/(hm<sup>2</sup>·d)) > 保产增效(0.95 kg/(hm<sup>2</sup>·d)) > 空白(0.17 kg/(hm<sup>2</sup>·d))。而对于水稻生育中后期,尽管温度上升,但水稻植株吸氮能力强,氮投入少,结果  $\text{NH}_3$  挥发通量较低。

3 个处理在麦季的平均  $\text{NH}_3$  挥发通量分别为 0.07 (空白处理)、0.42(当地常规处理) 和 0.26 kg/(hm<sup>2</sup>·d) (保产增效处理),均显著低于稻季。其原因除了麦季氮肥施用量和温度显著低于稻季外,还因非淹水土壤



(图中向下箭头表示施肥日期;下同)

图 2 稻麦轮作下  $\text{NH}_3$  挥发通量季节变化

Fig. 2 Seasonal  $\text{NH}_3$  flux during rice-wheat rotation system

的透气条件会导致硝化速率增强,降低土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度,另外,淹水稻田在施肥后会因藻类大量爆发导致  $\text{pH}$  显著高于麦季。还与稻季不同的是,麦季  $\text{NH}_3$  挥发通量主要出现在第三次追肥期间。尽管麦季基肥施用量较高(占 60%),但由于基肥期间降雨较少(3.5 mm),土壤空隙透气性强,尿素水解速率较慢,硝化作用强,低的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度最终导致低的  $\text{NH}_3$  挥发通量(图 1)。而在第 3 次施肥期间,由于施肥前持续降雨(29.9 mm)导致土壤含水量上升,有利于施入土壤后尿素水解速率的提高, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度增大,伴随着温度不断上升的同时, $\text{NH}_3$  挥发通量也不断地增加(图 1)。

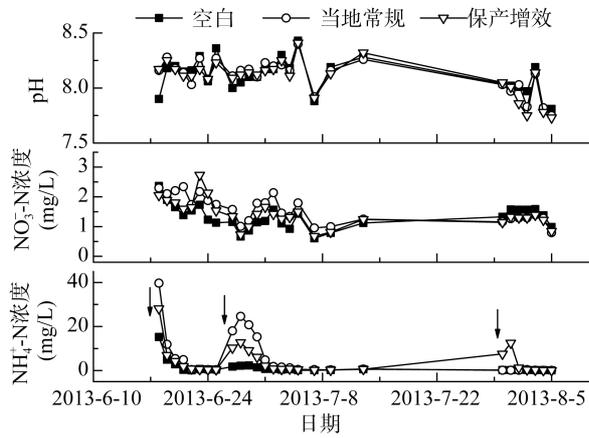


图 3 稻田面水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度及 pH 动态变化  
Fig. 3 Diurnal dynamics of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and pH in surface water during rice-growing period

### 2.3 稻麦轮作下 NO 排放季节变化特征

相较于 NH<sub>3</sub> 挥发, NO 排放通量主要集中在麦季(图 4)。稻季 NO 排放几乎监测不到排放峰值, 空白、当地常规与保产增效 3 个处理的平均通量分别为 1.56、1.27 和 1.62 μg/(m<sup>2</sup>·h), 处理间没有显著差异 (P<0.05)。稻季较低的 NO 排放量和先前研究一致, 如周再兴等<sup>[23]</sup>观测到华东地区水田 NO 排放仅占整个稻麦轮作周期排放总量的 3%, Fang 和 Mu<sup>[24]</sup>在长三角地区也观测到淹水稻田 NO 平均排放通量为 2.8 μg/(m<sup>2</sup>·h); 但他们在水稻生育期烤田或排水期均观测到一定的排放高峰, 本研究中未观测到排放高峰可能有两方面的原因: 一方面, 烤田时, 排水不彻底导致土壤透气性不好; 另一方面, 本试验供试土壤乌栅土排水性能较弱, 土壤自然含水量和田间持水量高。

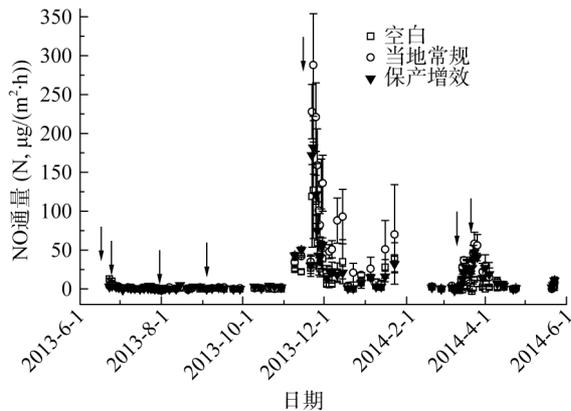


图 4 稻麦轮作下 NO 排放通量的季节变化  
Fig. 4 Seasonal NO flux during rice-wheat rotation system

麦季的 NO 排放峰值主要出现在基肥后, 当地常规与保产增效处理的最大通量分别为 288 和 182 μg/(m<sup>2</sup>·h), 这主要由于 60% 的氮肥都集中在基

肥施用, 而此时小麦处于种子萌发阶段吸氮量较低, 另外在基肥期间仅有 3.5 mm 的降雨(图 1), 土壤平均质量含水量<350 g/kg(图 5), 透气性较好, 土壤平均温度>10℃(8~15℃), 有利于硝化速率提高, 这些因素共同导致了 NO 排放高峰的出现。两次追肥期间没有监测到较大的 NO 排放峰值, 除了施氮量较基肥低外, 施肥期间降雨量达到 40.5 mm, 土壤平均质量含水量>380 g/kg(主要是第一次追肥期间), 抑制了硝化作用, 且小麦处于分蘖期与抽穗期对养分的吸收增强, 进而降低了土壤中速效氮的含量, 最终导致 NO 排放量相对较弱。因此除了施肥因素外, 水分也是影响麦季 NO 排放的重要因素。同样, 麦季 NO 平均排放通量(空白, 当地常规与保产增效处理分别为 12.19, 30.59 和 16.24 μg/(m<sup>2</sup>·h))显著高于稻季也应当归于水分因素。

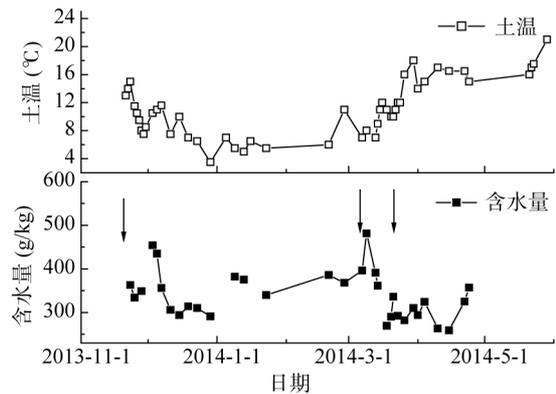


图 5 麦季土壤质量含水量和温度动态变化  
Fig. 5 Diurnal dynamics of gravimetric soil water content and soil temperature (0-5 cm) during wheat-growing period

### 2.4 保产增效措施对稻麦轮作 NH<sub>3</sub> 和 NO 排放的影响

对于 NH<sub>3</sub> 累计挥发通量, 水稻季与小麦季各处理均呈现显著差异(表 2)。其中水稻季, 平均累计通量为 33.02 kg/hm<sup>2</sup>(7.03~52.75 kg/hm<sup>2</sup>), 保产增效处理比当地常规处理低 26%, 二者排放因子分别为 14.31% 和 15.24%; 小麦季, 平均通量为 5.88 kg/hm<sup>2</sup>(1.71~10.21 kg/hm<sup>2</sup>), 保产增效处理比当地常规处理低 44%, 排放因子分别为 2.98% 和 4.72%。对于稻麦轮作累计总量, 保产增效处理比当地常规处理低 29%, 其 NH<sub>3</sub> 排放因子分别为 10.07% 和 11.30%。

对于 NO 累计排放通量, 水稻季各处理没有显著差异, 平均通量为 0.71 kg/hm<sup>2</sup>。而小麦季各处理有显著差异, 平均通量为 8.73 kg/hm<sup>2</sup>(5.46~13.68 kg/hm<sup>2</sup>), 其中保产增效处理比当地常规处理要低 49%, 排放因子分别为 1.17% 和 4.57%。对于稻麦轮作累计总量,

表 2 稻麦轮作制度下 NH<sub>3</sub> 挥发与 NO 排放累计通量和排放因子Table 2 Seasonally and annually cumulative emissions for NH<sub>3</sub> and NO and their direct emission factors in rice-wheat rotation system

时期	处理	NH <sub>3</sub> 挥发		NO 排放	
		累计通量(N, kg/hm <sup>2</sup> )	排放因子(%)	累计通量(N, kg/hm <sup>2</sup> )	排放因子(%)
水稻季	空白	7.03 ± 3.18 c		0.70 ± 0.03 a	
	当地常规	52.75 ± 4.18 a	15.24	0.68 ± 0.03 a	—
	保产增效	39.28 ± 6.25 b	14.31	0.75 ± 0.03 a	—
小麦季	空白	1.71 ± 0.45 c		5.46 ± 0.98 c	
	当地常规	10.21 ± 2.39 a	4.72	13.68 ± 3.69 a	4.57
	保产增效	5.73 ± 2.14 b	2.98	7.04 ± 2.85 b	1.17
稻麦轮作	空白	8.74 ± 2.81 c		6.15 ± 0.51 c	
	当地常规	62.96 ± 3.36 a	11.30	14.37 ± 2.84 a	1.71
	保产增效	45.01 ± 4.71 b	10.07	7.80 ± 2.15 b	0.46

保产增效处理比当地常规处理低 46% ,排放因子分别为 0.46% 和 1.71%。

### 3 结论

在稻麦轮作制度下,与当地常规处理相比,保产增效处理的氮肥投入量减少 25% ,但总作物产量没有降低,且 ANUE 有较大提高;保产增效处理还显著降低了稻麦轮作周期的 NH<sub>3</sub> 和 NO 排放量。因此,保产增效措施值得在太湖地区推广。

### 参考文献:

- [1] Ju XT, Xing GX, Chen XP, Zhang SL, Zhang LJ, Liu XJ, Cui ZL, Yin B, Christie P, Zhu ZL, Zhang FS. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(9): 3 041–3 046
- [2] Zhao X, Xie YX, Xiong ZQ, Yan XY, Xing GX, Zhu ZL. Nitrogen fate and environmental consequence in paddy soil under rice-wheat rotation in the Taihu lake region, China[J]. Plant and Soil, 2009, 319(1/2): 225–234
- [3] Aneja VP, Roelle PA, Murray GC, Southerland J, Erisman JW, Fowler D, Asman WAH, Patni N. Atmospheric nitrogen compounds II: emissions, transport, transformation, deposition and assessment[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(11): 1 903–1 911
- [4] Asman WAH, Sutton MA, SchjØrring JK. Ammonia: emission, atmospheric transport and deposition[J]. New Phytologist, 1998, 139(1): 27–48
- [5] Zheng XH, Huang Y, Wang YS, Wang MX. Seasonal characteristics of nitric oxide emission from a typical Chinese rice-wheat rotation during the non-waterlogged period[J]. Global Change Biology, 2003, 9(2): 219–227
- [6] Fang SX, Mu YJ. NO<sub>x</sub> fluxes from three kinds of agricultural lands in the Yangtze Delta, China[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(22): 4 766–4 772
- [7] Mei B, Zheng X, Xie B, Dong H, Zhou Z, Wang R, Deng J, Cui F, Tong H, Zhu J. Nitric oxide emissions from conventional vegetable fields in southeastern China[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(17): 2 762–2 769
- [8] Stohl A, Williams E, Wotawa G, Kromp-Kolb H. A European inventory of soil nitric oxide emissions and the effect of these emissions on the photochemical formation of ozone[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(22): 3 741–3 755
- [9] Fowler D, Pilegaard K, Sutton MA, Ambus P, Raivonen M, Duyzer J, Simpson D, Fagerli H, Fuzzi S, Schjoerring JK, Granier C, Neftel A, Isaksen ISA, Laj P, Maione M, Monks PS, Burkhardt J, Daemmgen U, Neiryneck J, Personne E, Wichink-Kruit R, Butterbach-Bahl K, Flechard C, Tuovinen JP, Coyle M, Gerosa G, Loubet B, Altimir N, Gruenhage L, Ammann C, Cieslik S, Paoletti E, Mikkelsen TN, Ro-Poulsen H, Cellier P, Cape JN, Horváth L, Loreto F, Niinemets, Palmer PI, Rinne J, Misztal P, Nemitz E, Nilsson D, Pryor S, Gallagher MW, Vesala T, Skiba U, Brüggemann N, Zechmeister-Boltenstern S, Williams J, O'dowd C, Facchini MC, De LeeuwG, Flossman A, Chaumerliac N, Erisman JW. Atmospheric composition change: Ecosystems–Atmosphere interactions[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(33): 5 193–5 267
- [10] 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 韩涛. 施氮量对高产早稻氮素利用特征及产量形成的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(8): 1 409–1 416
- [11] 杨新泉, 冯锋, 宋长青, 冷疏影. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 373–376
- [12] Yan J, Yu J, Tao GC, Vos J, Bouman BAM, Xie GH, Meinke H. Yield formation and tillering dynamics of direct-seeded rice in flooded and nonflooded soils in the Huai River Basin of China[J]. Field Crops Research, 2010, 116(3): 252–259
- [13] Zhang H, Chen TT, Wang ZQ, Yang JC, Zhang JH. Involvement of cytokinins in the grain filling of rice under alternate wetting and drying irrigation[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(13): 3 719–3 733

- [14] Xin LH, Rui PC, Liang LX, Qi YZ, Ping XY. Effects of ratio of row spacing to intrarow spacing on yield and top three leaves of super high-yielding early and late rice [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2014, 15(1): 52–56
- [15] 徐春梅, 王丹英, 邵国胜, 章秀福. 施氮量和栽插密度对超高产水稻中早 22 产量和品质的影响[J]. *中国水稻科学*, 2008, 22(5): 507–512
- [16] 薛亚光, 王康君, 颜晓元, 尹斌, 刘立军, 杨建昌. 不同栽培模式对杂交粳稻常优 3 号产量及养分吸收利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(23): 4 781–4 792
- [17] Katsura K, Maeda S, Horie T, Shiraiwa T. Analysis of yield attributes and crop physiological traits of Liangyoupeijiu, a hybrid rice recently bred in China[J]. *Field Crops Research*, 2007, 103(3): 170–177
- [18] 薛亚光, 葛立立, 王康君, 颜晓元, 尹斌, 刘立军, 杨建昌. 不同栽培模式对杂交粳稻群体质量的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 280–291
- [19] Cao YS, Tian YH, Yin B, Zhu ZL. Assessment of ammonia volatilization from paddy fields under crop management practices aimed to increase grain yield and N efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2013, 147: 23–31
- [20] Fan MS, Lu SH, Jiang RF, Liu XJ, Zhang FS. Triangular transplanting pattern and split nitrogen fertilizer application increase rice yield and nitrogen fertilizer recovery[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(6): 1 421–1 425
- [21] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 朱兆良, 石孝均. 不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(3): 263–269
- [22] 夏文建, 周卫, 梁国庆, 王秀斌, 孙静文, 李双来, 胡诚, 陈云峰. 优化施氮下稻-麦轮作体系氮肥氨挥发损失研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 6–13
- [23] 周再兴, 郑循华, 王明星. 华东稻麦轮作农田 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 和 NO 排放特征[J]. *气候与环境研究*, 2007, 12(6): 751–760
- [24] Fang SX, Mu YJ. NO<sub>x</sub> fluxes from several typical agricultural fields during summer-autumn in the Yangtze Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(16): 2 665–2 671

## Improving Agronomic Practices to Reduce Ammonia and Nitric Oxide Emissions from Rice-wheat Rotation Field in Tai Lake Region, China

ZHAO Miao<sup>1,2</sup>, TIAN Yu-hua<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>1</sup>, YAO Yuan-lin<sup>1</sup>, YIN Bin<sup>1\*</sup>, ZHU Zhao-liang<sup>1</sup>

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, China)

**Abstract:** Winter wheat-summer rice rotation is one of the general cropping systems in the Tai Lake Region, China, but which is favor ammonia (NH<sub>3</sub>) and nitric oxide (NO) emission to atmosphere due to high N input with low N use efficiency (NUE), thus it is necessary to improve the agronomic management practices to alleviate the detrimental impacts of these gaseous compound emissions. This study is to illustrate the effectiveness of an improved integrated crop cultivation, water and nutrient practice for mitigating NH<sub>3</sub> and NO emissions. Dynamic and static chambers were employed to simultaneously estimate NH<sub>3</sub> and NO emissions from a rice-wheat rotation field with three different treatments of 1) CK (control, without N input), 2) FP (the farmer's practice); and 3) IP (the improved crop cultivation, water and nutrient management practice with nitrogen dose reduced by 25% compared to FP in the Tai Lake Region. Crop yield and agronomic N use efficiency (ANUE) were appraised. In the rice-wheat rotation, the total crop yield from IP treatment was consistent with FP, and ANUE increased by 39% ( $P < 0.05$ ). Compared to FP, IP in the rice and wheat seasons mitigated seasonal NH<sub>3</sub> emissions by 26% and 44%, respectively. In meanwhile, IP emitted marginal NO (N 0.75±0.03 kg/hm<sup>2</sup>) into the atmosphere in rice growing season, which was in consistent with CK and FP. Besides, IP decreased NO emission by 49% in wheat growing season. Thus, IP practice should be advocated in this region for it sustaining crop yield and decreasing the environmental risk by mitigating significantly NH<sub>3</sub> and NO emissions at the same time.

**Key words:** Ammonia volatilization; Nitric oxide emission; Rice-wheat rotation; Agronomic practice