

# 太湖地区氮磷肥施用对稻田氨挥发的影响\*

田玉华<sup>1,2</sup> 贺发云<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 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要** 在太湖地区乌栅土上, 采用田间小区试验连续两年研究了施氮(N)量为 0、180、255、330 kg hm<sup>-2</sup>, 施磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)量为 0、30、90、180 kg hm<sup>-2</sup>的 6 个组合(对照 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>、低氮 N<sub>180</sub>P<sub>90</sub>、优化 N<sub>255</sub>P<sub>90</sub>、低磷 N<sub>255</sub>P<sub>30</sub>、高磷 N<sub>255</sub>P<sub>180</sub>、高氮 N<sub>330</sub>P<sub>90</sub>)以及三个施肥时期对稻田氨挥发损失的影响, 氨挥发采用密闭室间歇通气法测定。结果表明, 稻田氨挥发损失主要发生在施肥后 6d 内, 基肥和第一次追肥后各处理氨挥发量占施氮量的 0.4%~11.5%, 而第二次追肥后氨挥发损失比例较大, 对照、低氮、优化、低磷、高磷和高氮处理的氨挥发在 2002 年稻季分别占施氮量的 5.8%、9.7%、25.6%、15.6%和 11.6%, 在 2003 年稻季则分别为 27.4%、26.2%、30.0%、35.1%和 27.6%。若施肥后遇阴雨天气或正值水稻拔节孕穗期, 氨挥发量便降低。田面水中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度是氨挥发的决定因素之一, 与氨挥发通量呈正相关。施磷量相同时, 氨挥发随施氮量增加而增加; 施氮量相同时, 高磷和低磷处理氨挥发均高于优化处理, 表明在氮磷不平衡施用, 氮肥氨挥发损失会加剧, 从氨挥发损失方面考虑, 稻田推荐施磷量不宜超过 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg hm<sup>-2</sup>。

**关键词** 稻田; 尿素; 磷肥; 氨挥发

**中图分类号** S143.1; S143.2

**文献标识码** A

水稻是我国种植最多的作物之一, 同时也是施磷量最多的作物之一, 中国稻田氮肥用量约占氮肥总消费量的 24%左右<sup>[1]</sup>。研究表明, 氮肥的作物表观利用率仅为 30%~35%<sup>[2]</sup>, 甚至更低<sup>(1)</sup>。而损失则可达 50%以上。氨挥发是稻田氮肥损失的主要途径之一<sup>[3-5]</sup>。许多研究表明, 氮肥表施时氨挥发损失占总施氮量的 10%~60%<sup>[6]</sup>, 蔡贵信等<sup>[7]</sup>研究表明, 稻田生态系统中氨挥发损失可以达到总施氮量的 9%~40%。氨挥发损失氮不仅造成重大经济损失, 而且还给环境带来了巨大的压力, 如 NH<sub>3</sub>可以通过大气干湿沉降进入地表, 加剧水体富营养化, 大气对流层中的 NH<sub>3</sub>也可以生成温室气体 N<sub>2</sub>O 等<sup>[8,9]</sup>。稻田氨挥发的研究已进行了许多年, 包括氨挥发的发生机理、测定方法, 以及土壤类型、氮肥种类、施氮量、水肥管理措施以及各种抑制剂对氨挥发的影响等, 取得了丰富的成果。除水和氮两个因子, 磷肥也是影响水稻生长的重要因素, 它对于作物以及土壤各种生物包括与氮素转化有关的微生物、酶及藻类的生长都会产生重要影响<sup>[10,11]</sup>, 但是, 磷

肥的施用量对氮肥氨挥发损失影响的研究还鲜有报道, 为此, 本试验于 2002 年稻季和 2003 年稻季, 采用田间小区试验研究不同氮磷肥施用量、不同水稻生育期施肥后的氨挥发损失, 旨在阐明太湖地区稻田尿素氮通过氨挥发的损失数量与过程, 不同氮磷肥施用量对氨挥发损失的影响, 为减少氮肥损失提高氮肥利用率提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验在中国科学院常熟农业生态试验站(120°41'88"E, 31°32'93"N)进行。该站地处长江三角洲腹地, 太湖流域, 属阳澄湖低洼湖荡平原, 为亚热带中部湿润季风气候区, 年平均气温 15.5℃, 最高气温 39.1℃, 10℃的有效积温 4934℃, 年平均降雨量 1 038 mm, 无霜期 242 d。站区地形海拔 3.2 m。稻-麦两熟为该地区的主要耕作制度。

\* 国家自然科学基金项目(40571077, 30390080)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX-413)资助

† 通讯作者, E-mail: byin@issas.ac.cn, Tel: 025-86881024

作者简介: 田玉华(1980~), 女, 河南夏邑人, 博士研究生, 研究方向为氮素植物营养和环境。E-mail: yhtian@issas.ac.cn

(1) 李荣刚. 高产农田氮素肥效与调控途径——以江苏太湖地区稻麦两熟农区为例推及全省. 中国农业大学博士学位论文, 2000

收稿日期: 2006-05-10; 收到修改稿日期: 2006-09-10

## 1.2 供试土壤

试验选择太湖平原地区有代表性的乌栅土(普

通筒育水耕人为土)作为供试土壤,其 0~15 cm 土层土壤基本性状如表 1。

表 1 供试土壤基本性状

Table 1 Some basic properties of soil used for field experiment

土壤 Soil	pH (H <sub>2</sub> O)	有机质 O. M. (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P (g kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P (mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg kg <sup>-1</sup> )	阳离子代换量 CEC (c mol kg <sup>-1</sup> )
普通筒育水耕人为土 Cleyed paddy soil	7.3	35.0	2.09	0.93	5.0	121	17.7

## 1.3 试验处理

试验设置 6 个处理为:对照(CK)、低氮(LN)、优化(OPT)、低磷(LP)、高磷(HP)、高氮(HN),各处理 4 次重复,随机区组排列,共 24 小区,每个小区面积为 6.8 m × 6.0 m = 40.8 m<sup>2</sup>。稻季施肥量见表 2。水稻基肥、第一次和第二次追肥的分配比例:处理 HN 为 0.5 0.3 0.2;其他处理为 0.45 0.30 0.25,磷钾肥作基肥一次施入。基肥的施用方法是泡田后将肥料洒入田中,随即用田耙耙入土中。2002 年稻季三次施肥分别是在 6 月 28 日、8 月 4 日、8 月 27 日,2003 年稻季分别是在 6 月 24 日、7 月 28 日和 8 月 18 日。

表 2 NH<sub>3</sub>挥发试验处理的施肥量

Table 2 Application rate for each treatment in the experiment

处理 Treatment	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg hm <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> O (kg hm <sup>-2</sup> )	N (kg hm <sup>-2</sup> )
对照(CK)	0	0	0
低氮(LN)	90	90	180
优化(OPT)	90	90	255
低磷(LP)	30	90	255
高磷(HP)	180	90	255
高氮(HN)	90	90	330

## 1.4 小区管理

各小区均设有单独的排水口和进水口,灌溉用水为附近河水,水稻移栽后,除水稻分蘖后期烤田 1 周,以及收获前 10~14 d 小区不进水,其余时间保持田面水层 4~5 cm,当田面水低于 2 cm 时,小区灌水,在傍晚进行,其他管理与周围大田一致。

## 1.5 测定方法

氨挥发采用密闭室间歇通气法测定<sup>[12,19,20]</sup>,密闭室为直径 20 cm(内径 19 cm)、高 15 cm 的底部开放的有机玻璃圆筒,顶部留有一通气孔(直径 25 mm)与 2.5 m 高的通气管连通,将通气管架到地面 2.5 m 高处,保证交换空气氨浓度一致。将密闭室嵌入表土中,上面留有约 8~10 cm 高的密闭室空间。每天上午 7:00~9:00 和下午 3:00~5:00 测定。换气频率

15~20 次 min<sup>-1</sup>,在洗气瓶中装 20 g L<sup>-1</sup>硼酸溶液 60 ml 用于吸收 NH<sub>3</sub>,并用标准稀硫酸溶液滴定,以这 4 h 的通气值作为每天氨挥发的平均通量。施肥第 2 天开始测定,直至施氮处理与对照的氨挥发通量无差异时停止。从施氮后第 2 天起,每天早晨定时采集田面水样品,各小区取至少 5 个点混合样 100 ml 左右,取样持续到田面水中氨浓度降至稳定。水样带回实验室过滤,采用靛酚蓝比色法测定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N。

## 1.6 数据处理

采用 GLM 过程(SPSS 10.0)对数据进行统计分析,用 LSD 法对均值进行比较各处理之间的差异( $p = 0.05$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 稻田氨挥发损失过程

2002 年稻季施用基肥后氨挥发很低,日挥发量低于 N 1 kg hm<sup>-2</sup>(图 1A),基肥采用撒施后翻入表层土的方法,使较多的尿素水解形成的铵离子被土壤吸附,从而可在一定程度上降低了氨挥发损失。许多研究表明:氮肥深施可大大降低氮肥的氨挥发损失<sup>[3,13]</sup>。而 2002 年稻季基肥氨挥发量低的主要原因是刚刚布置完小区试验设施,土壤松动,造成基肥施用后田面水漏水严重,每天都要进行灌溉而导致田面水中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度很低(图 2),而田面水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 是氨挥发的来源,从而导致基肥氨挥发损失甚微。2003 年稻季基肥氨挥发主要集中在前 3 d,各施肥处理日挥发量为 N 2~4 kg hm<sup>-2</sup>,之后几乎检测不到氨挥发,原因是在施肥后第 4 天和第 5 天降了一次暴雨,产生了径流以及雨水的稀释作用,造成田面水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度迅速降低。

第一次追肥后各施肥处理均在施肥后第 1 天出现氨挥发的高峰,氨挥发速率分别为 N 2~5 kg hm<sup>-2</sup>。2002 年稻季在第一次追肥后第 3 天出现了暴雨和降温天气,之后几乎检测不到氨挥发(图 1A)。

第二次追肥后各施肥处理在第 2 天氨挥发达到峰值,低磷和高磷处理明显高于其他处理,2002 年和 2003 年稻季其最高速率分别为  $N 7 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$  和  $N 10 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ,这一次氨挥发延续的时间也较长,持续 1 周左右。第二次追肥氨挥发高峰较第一次相对较迟,尽管气温并不比第一次追肥时低,主要是因为这次追肥时水稻生长茂密而产生的荫蔽效果使尿素水解速度较慢,但挥发量较高的原因可能是

在这次施肥期间没有出现降雨和降温现象,同时,这次施肥和作物的吸氮高峰没有很好地吻合,在 8 月底水稻已快进入开花期,研究表明水稻的吸氮高峰在分蘖盛期和孕穗期,而进入开花期后吸收的氮素很少<sup>[14]</sup>,水稻在开花期后施肥,氮肥利用效率很低<sup>[15]</sup>,而第一次追肥时水稻已进入拔节和幼穗分化期,处于吸氮高峰,水稻对氮素的迅速吸收而减少了氨挥发损失。

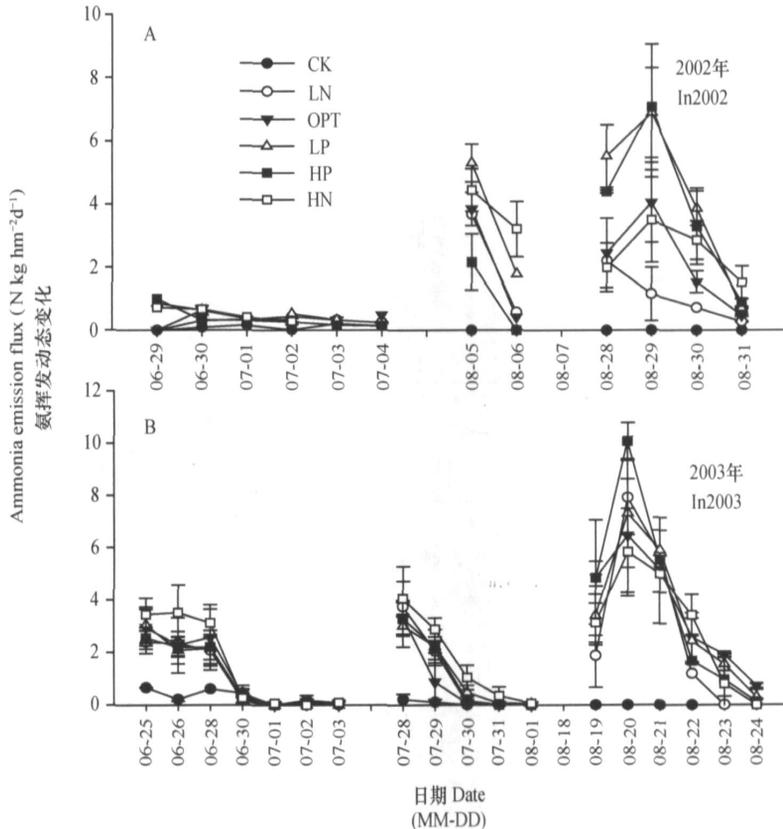


图 1 2002 年(A)和 2003 年(B)稻季三次施肥后氨挥发动态变化(CK-对照, LN-低氮, OPT-优化, LP-低磷, HP-高磷, HN-高氮)

Fig. 1 Patterns of ammonia volatilization following three times of fertilization in 2002(A) and 2003(B) rice seasons

## 2.2 施肥后面水 $\text{NH}_4^+$ -N 浓度和 pH 对氨挥发的影响

田面水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度在施肥后 1~3 d 内达到峰值,基肥比追肥达到峰值速度慢,而且峰值不太明显(图 2),这与施肥方法和施肥时的温度有关,氮肥深施可显著降低田面水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度<sup>[11]</sup>,同时,基肥施用后气温(26 )较追肥时(31 和 29 )低,尿素水解速度没有追肥时快。2002 年稻季基肥施用后由于田间漏水每天都灌溉,导致田面水  $\text{NH}_4^+$ -N 在  $N 5 \text{ mg L}^{-1}$  以下。基肥和两次追肥后面水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度与氨挥发量相关性分析表明,两者存在显著正相关关系( $p = 0.05$ ),图 3、图 4 和图 5 列出了 2003 年的相关性分析结果,2002 年也存在类似的相关性(具体结果未列出)。

由三次施肥后面水 pH 变化(图 6)可以看出,田面水 pH 在 7.5~8.0 之间,pH 大于 7 时,氨挥发随 pH 的升高而增加<sup>[16]</sup>,因此,此类稻田氨挥发易于进行。施用追肥后面水 pH 当天达到 8 左右,随后逐渐下降,最低值较开始下降了 0.2~0.4 个 pH 单位,3~4 d 后稳定或略有升高,主要与氨挥发过程是一个酸化过程有关。追肥施用后高磷 HP 处理田面水 pH 较其他处理 pH 值高(图 6),与相应的氨挥发损失量一致,高磷 HP 处理可能通过促进藻类生长影响田面水 pH,进而影响到氨挥发损失;而基肥施用后 pH 变化规律不太明显,由于水溶性酸性磷肥的施入,刚施入第 2 天田面水 pH 随施磷量的增加而降低,随后维持在 7.7 左右。

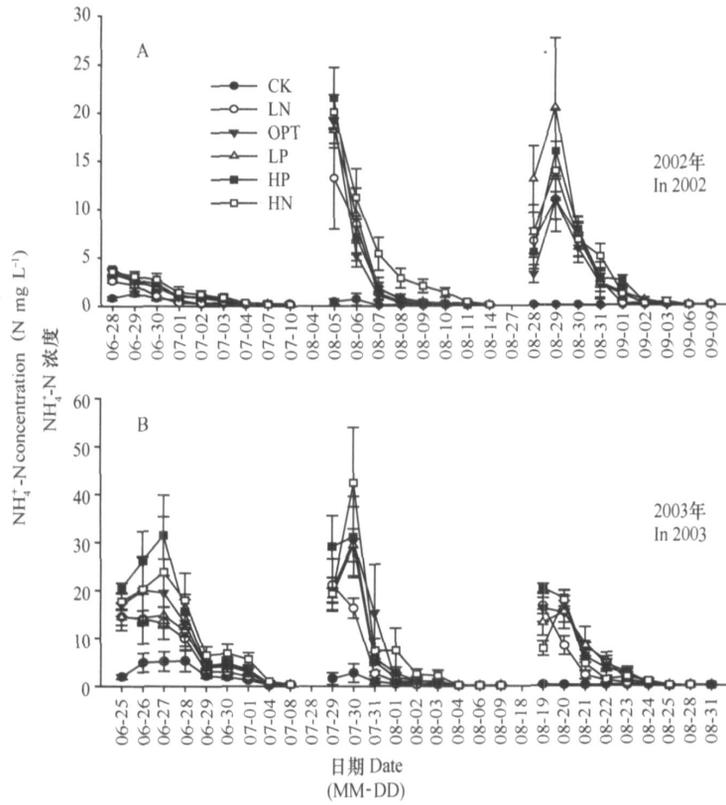


图2 2002年(A)和2003年(B)稻季田面水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度变化动态(CK对照、LN-低氮、OPT优化、LP-低磷、HP-高磷、HN-高氮)

Fig. 2 Dynamic change in NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration of surface water in 2002(A) and 2003(B) rice seasons

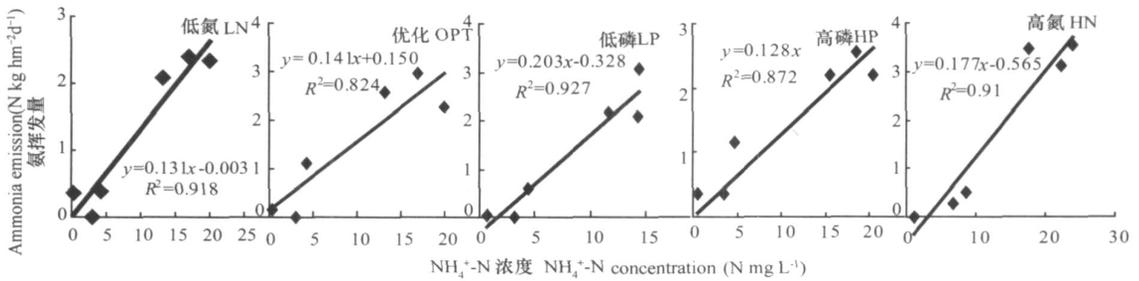


图3 2003年稻季基肥施用后氨挥发量与田面水铵浓度相关性分析结果( $p=0.05$ )

Fig. 3 Simulation of ammonia emission per day in relation to NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration in surface water after base fertilization ( $p=0.05$ )

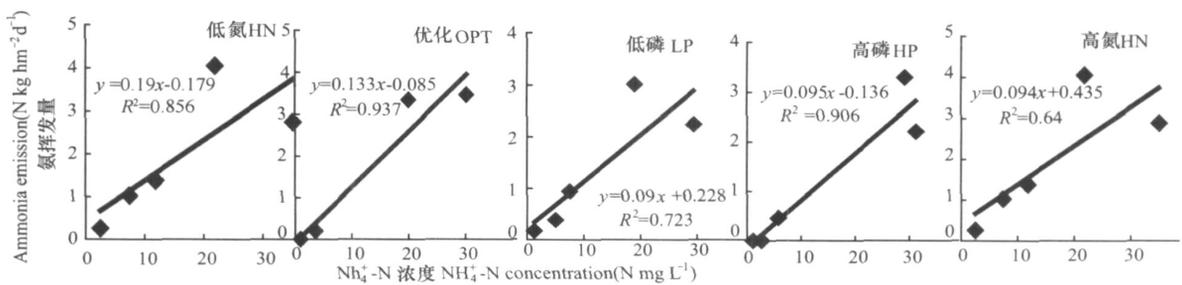


图4 2003年稻季第一次追肥施用后氨挥发量与田面水铵浓度相关性分析结果( $p=0.05$ )

Fig. 4 Simulation of ammonia emission per day in relation to NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration in surface water after the first top-dressing fertilization ( $p=0.05$ )

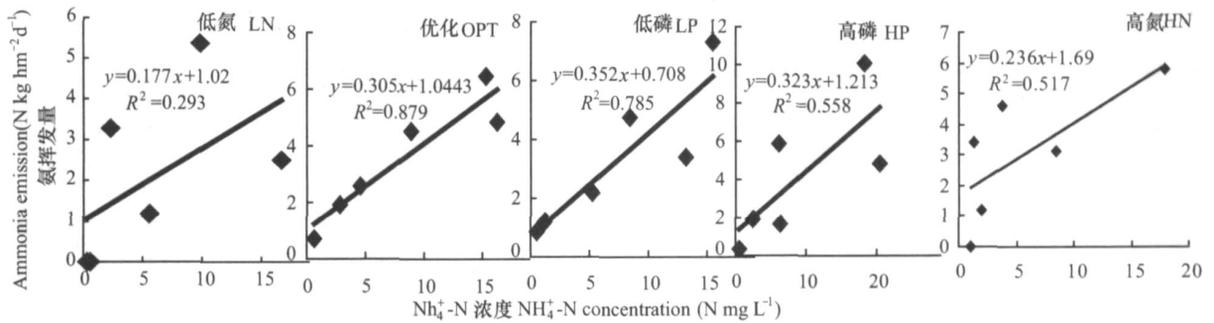


图5 2003年稻季第二次追肥施用后氨挥发量与田面水铵浓度相关性分析结果( $p=0.05$ )

Fig. 5 Simulation of ammonia emission per day in relation to  $\text{NH}_4^+$ -N concentration in surface water after the second top-dressing fertilization ( $p=0.05$ )

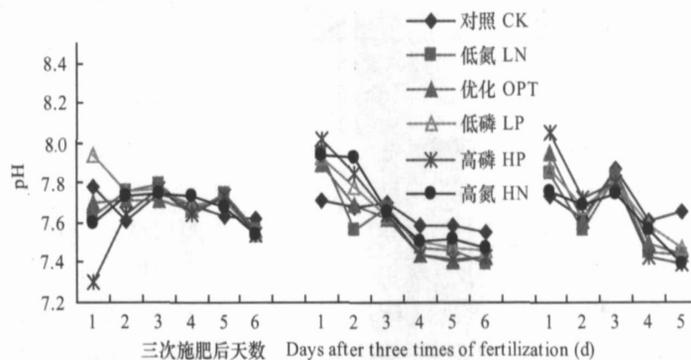


图6 2003年稻季施肥后田面水pH变化(图中从左至右分别为基肥、第一次和第二次追肥后pH变化)

Fig. 6 Change of pH in surface water after fertilization in 2003 rice season (Basal, the first top-dressing, and the second top-dressing fertilization from left to right)

### 2.3 氮磷肥不同施用量对稻田氮肥氨挥发损失量和损失率的影响

2002年和2003年稻季三次施肥后的氨挥发量见表3。2002年稻季各处理氨挥发量低于2003年,氨挥发量分别为 $\text{N } 5.35 \sim 23.53 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $24.32 \sim 33.79 \text{ kg hm}^{-2}$ ,两年氨挥发损失率同样是2002年低于2003年稻季,2002年为 $3.0\% \sim 9.2\%$ ,2003年达到 $10.9\% \sim 14.6\%$ ,这与文献结果<sup>[7,17]</sup>相比偏低。原因是2002年稻季基肥施肥后田间漏水导致田面水 $\text{NH}_4^+$ -N浓度很低( $\text{N } 5 \text{ mg L}^{-1}$ 以下),决定了基肥施用后氨挥发量很低,而在第一次追肥施用后第3天发生了暴雨及降温,使得田面水中铵态氮浓度迅速降低,氨挥发几乎检测不到,而基肥和分蘖肥占总施肥量的 $75\% \sim 80\%$ ,这就决定了2002年稻季氨挥发总损失较低。2003年稻季基肥施用后第3天开始降暴雨和降温,导致氨挥发损失骤减。因此,评价稻田氨挥发时,施肥后的气象条件十分重要,其中最为重要的是施肥后降雨及降温情况;蔡贵信等<sup>[18]</sup>指出,稻田施尿素后氮肥氨挥发主要决定于天气状况,倘若以多云或阴雨为主,氨挥发可能比较低,本试验

的结果也证实了这一点。

从水稻生长不同时期的施肥来看,本试验连续两年氨挥发损失都以第二次追肥最多,对于基肥和第一次追肥,2002年第一次追肥高于基肥,而2003年两者相差不多,与以往在稻田上做的一些试验结果似乎有些差异<sup>[17,19~20]</sup>,但分析其施肥时间就不难找出原因,文献中的第一次追肥时间都是在7月中上旬,而第二次追肥在8月上旬,与本试验第一次追肥时间一致,此时水稻追肥正值需氮高峰,植株生长茂密,加上对地表产生的遮盖作用,抑制了藻类繁殖,因而降低了此次追肥的氨挥发损失。文献中的分蘖肥和本试验中的第二次追肥(8月下旬)不在作物需氮高峰,大量的 $\text{NH}_4^+$ -N滞留在田面水和表层土壤中,遇到适宜的温度及pH条件,容易通过氨挥发损失掉。所以,评价不同时期氨挥发损失量和损失率时,除气象条件外,作物生育期同样是一个关键因素,因为氮肥的吸收和损失是一个相互消长的关系,作物快速吸收氮素必然降低氨挥发损失的风险。而这一个因素是可以人为调节的,因此,降低稻田氨挥发损失的经济可行的方式可以选择合适施肥时期,即水稻的需氮高峰。

表3 2002年和2003年稻季施肥后的氮挥发

Table 3 Ammonia emission after fertilization in 2002 and 2003 rice season ( $\text{N kg hm}^{-2}$ )

处理 Treatment	2002年稻季 Rice season in 2002						2003年稻季 Rice season in 2003					
	对照 CK	低氮 LN	优化 OPT	低磷 LP	高磷 HP	高氮 HN	对照 CK	低氮 LN	优化 OPT	低磷 LP	高磷 HP	高氮 HN
基肥 After basal fertilization	0.25	0.62	0.93	1.03	0.53	0.79	0.91	6.79	5.68	7.56	8.87	10.6
第一次追肥 After the first top-dressing	—	(0.8)	(0.8)	(0.9)	(0.5)	(0.4)	—	(8.4)	(5.0)	(6.6)	(7.7)	(5.1)
第二次追肥 After the second top-dressing	0	2.12	3.85	6.20	2.03	5.11	0.40	5.19	5.51	6.76	5.96	9.10
全生育期 Entire growing season	—	(3.9)	(5.0)	(8.1)	(2.7)	(5.2)	—	(9.6)	(7.2)	(8.8)	(7.8)	(11.5)
占施氮量的% % against applied N	0	2.61	6.19	16.30	9.96	9.57	0	12.3	16.7	19.1	22.4	18.2
	—	(5.8)	(9.7)	(25.6)	(15.6)	(11.6)	—	(27.4)	(26.2)	(30.0)	(35.1)	(27.6)
	0.25c	5.35b	11.0ab	23.5a	12.5ab	15.5ab	1.31c	24.3b	27.9b	33.4a	37.2a	37.8a
	—	2.97b	4.30ab	9.23a	4.91ab	4.68ab	—	13.5a	10.9a	13.1a	14.6a	11.5a

注:括号内的数值表示占该时期施肥量的百分数,不同处理间字母相同的表示无显著性差异( $p=0.05$ ) Note: The number in parentheses indicated the percentage of N applied at that time against the total N applied. The same letters denote no significant difference ( $p=0.05$ ) between the treatments

在施磷量相同的三个处理中,氮挥发随施氮量增加而增加,2002年和2003年稻季表明氮挥发损失与施氮量呈显著正相关( $y=0.0674x-6.597$ ,  $r^2=0.996$ ,  $n=9$ 和 $y=0.096x+0.7395$ ,  $r^2=0.74$ ,  $n=9$ )。施氮量相同的三个处理中,高磷HP和低磷LP两处理氮挥发量均高于优化OPT处理,2002年以低磷LP最高,为 $\text{N } 23.53 \text{ kg hm}^{-2}$ ,2003年以高磷HP最高,为 $\text{N } 37.21 \text{ kg hm}^{-2}$ 。2002年LP和HP处理的氮挥发损失率分别为9.2%和4.9%,较优化施肥提高了115%和14%,2003年两处理损失率分别为14.59%和13.11%,较优化施肥提高33.4%和19.8%。原因可能是与养分的不平衡施用有关,施磷肥过高会引起藻类的大量繁殖,造成田面水pH较优化处理高(图4),从而促进氮肥的氮挥发,而磷肥施入太少,可能与磷的不足而导致作物对氮吸收的减弱有关,可能还有其他途径的生物固持作用(如微生物和藻类固定)相对减弱有关,致使大量氮肥通过氮挥发等途径损失掉,其机理还有待于进一步探讨。因此从氮肥氮挥发损失方面考虑,稻田推荐施磷量是本试验的优化施肥处理,即施磷量在 $\text{P}_2\text{O}_5$   $90 \text{ kg hm}^{-2}$ 左右。

### 3 小结

稻田田面水pH为7.0~8.5,有明显氮挥发损失,挥发损失量为 $5.35 \sim 33.79 \text{ kg hm}^{-2}$ ,氮挥发损失率为3.0%~14.6%,在施肥时期相同的前提下,氮挥发损失年际之间差别明显,主要影响因子是气象条件,若施肥后遇到阴雨天气,氮挥发量就很低。

不同时期施肥后氮挥发损失量,除受气象条件影响外,水稻生长状况是十分重要的影响因素,若在水稻拔节及幼穗分化时施用氮肥可大大降低氮肥的氮挥发损失,若追肥时间过晚,氮挥发损失量和损失率都很大,应避免或减低在水稻非生长旺盛期施氮。

田面水中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度是影响稻田氮挥发的主要因素之一,施氮后田面水中的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度迅速升高,与氮挥发呈显著正相关关系。

施磷量相同条件下,氮挥发随施氮量增加而增加,氮挥发损失量与施氮量呈显著正相关;施氮量相同条件下,HP(高磷)和LP(低磷)两处理均高于OPT(优化)处理,表明在养分的不平衡施用条件下,氮肥损失会加剧,从氮肥氮挥发损失方面考虑,稻田推荐施磷量不宜超过 $\text{P}_2\text{O}_5$   $90 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

### 参考文献

- [1] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等.提高中国稻田氮肥利用率的研究策略.中国农业科学,2002,35(9):1095~1103. Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095~1103
- [2] 李庆远.中国农业持续发展中的肥料问题.南昌:江西科学技术出版社,1997. Li Q K. Fertilizer Issues in the Sustainable Development of China Agriculture (In Chinese). Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1997
- [3] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策.土壤与环境,2000,9(1):1~6. Zhu Z L. Losses of fertilizer N from soil-plant system and strategies and techniques for its reduction (In Chinese). Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1~6
- [4] 沈善敏.氮肥在中国农业发展中的贡献和农业中氮的损失.土壤学报,2002,39(6):12~25. Shen S M. Contribution of nitrogen

- fertilizer to the development of agriculture and its loss in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(6): 12 ~ 25
- [ 5 ] Datta S K. Nitrogen transformations in wetland rice ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1995, 42(1/3): 193 ~ 203
- [ 6 ] Fillery R P, De Datta S K. Ammonia volatilization from nitrogen volatilization as a N loss mechanism in flooded rice fields. *Fertilizer Research*, 1986, 9: 78 ~ 98
- [ 7 ] 蔡贵信, 朱兆良. 稻田中化肥氮的气态损失. *土壤学报*, 1995, 32(增刊): 128 ~ 135. Cai G X, Zhu Z L. Evaluation of gaseous nitrogen losses from fertilizers applied to flooded rice fields (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32 (Suppl.): 128 ~ 135
- [ 8 ] Schulze E D, Hanhs M, Rosen, *et al.* Critical loads for nitrogen deposition on forest ecosystems. *Water, Air, Soil Pollut.*, 1989, 48: 451 ~ 456
- [ 9 ] Dentener F J, Crutzen P J. A three-dimensional model of the global ammonia cycle. *Atmos. Chem.*, 1994, 41(4): 770 ~ 771
- [ 10 ] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究. *土壤通报*, 2004, 35(4): 523 ~ 525. Liu J X. Correlative research on the activity of enzyme and soil nutrient in the different types of farmland (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4): 523 ~ 525
- [ 11 ] 蔡贵信. 氨挥发. 见: 朱兆良, 文启孝主编. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. Cai G X. Ammonia volatilization. In: Zhu Z L, Wen Q X. eds. *Nitrogen in Soil of China* (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992
- [ 12 ] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 等. 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气氮的湿沉降. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1 884 ~ 1 888. Su C G, Yin B, Zhu Z L, *et al.* Ammonia volatilization loss of nitrogen fertilizer from rice field and wet deposition of atmospheric nitrogen in rice growing season (In Chinese). *Chinese J. Appl. Ecol.*, 2003, 14(11): 1 884 ~ 1 888
- [ 13 ] Freney J R, Trevitt A C F, Datta S K, *et al.* The interdependence of ammonia volatilization and denitrification as nitrogen loss processes in flooded rice fields in the Philippines. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, 9(1): 31 ~ 36
- [ 14 ] Takahashi S, Yagi A. Losses of fertilizer-derived N from transplanted rice after heading. *Plant and Soil*, 2002, 242: 245 ~ 250
- [ 15 ] Linquist B, Sengxua P. Efficient and flexible management of nitrogen for rainfed lowland rice. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 67: 107 ~ 115
- [ 16 ] 朱兆良, 邢光熹. 氮循环. 北京: 清华大学出版社, 2002. 63 ~ 64. Zhu Z L, Xing G X. *Nitrogen Cycle* (In Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 63 ~ 64
- [ 17 ] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究. *土壤学报*, 2004, 41(2): 265 ~ 269. Song Y S, Fan X H, Lin D X, *et al.* Ammonia volatilization from paddy field in the Taihu Lake region and its influencing factors (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 265 ~ 269
- [ 18 ] 蔡贵信, 朱兆良, 朱宗武, 等. 水稻田中碳铵和尿素的氮素损失的研究. *土壤*, 1985, 17(5): 225 ~ 229. Cai G X, Zhu Z L, Zhu Z W, *et al.* Study on nitrogen loss of ammonium bicarbonate and urea from paddy field (In Chinese). *Soils*, 1985, 17(5): 225 ~ 229
- [ 19 ] 田光明, 蔡祖聪, 曹金留, 等. 镇江丘陵区稻田化肥氮的氨挥发及其影响因素. *土壤学报*, 2001, 38(3): 324 ~ 332. Tian G M, Cai Z C, Cao J L, *et al.* Ammonia volatilization from paddy field and its affecting factors in Zhenjiang hilly region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3): 324 ~ 332
- [ 20 ] 曹金留, 田光明, 任立涛, 等. 江苏南部地区稻麦两熟土壤中尿素的氨挥发损失. *南京农业大学学报*, 2000, 23(4): 51 ~ 54. Cao J L, Tian G M, Ren L T, *et al.* Ammonia volatilization from urea applied to the field of wheat and rice in southern Jiangsu Province (In Chinese). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2000, 23(4): 51 ~ 54

## AMMONIA VOLATILIZATION FROM PADDY FIELDS IN THE TAIHU LAKE REGION AS AFFECTED BY N AND P COMBINATION IN FERTILIZATION

Tian Yuhua<sup>1,2</sup> He Fayun<sup>1</sup> Yin Bin<sup>1†</sup> Zhu Zhaoliang<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** A two-year field experiment was conducted to investigate ammonia volatilization from Geyed paddy soil in the Taihu Lake region. The experiment was designed to have four N levels (0, 180, 255, 330 kg hm<sup>-2</sup>) and four P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> levels (0, 30, 90, 180 kg hm<sup>-2</sup>), forming six NP combinations (CK-N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>, LN-N<sub>180</sub>P<sub>90</sub>, OPT-N<sub>255</sub>P<sub>90</sub>, LP-N<sub>255</sub>P<sub>30</sub>, HP-N<sub>255</sub>P<sub>180</sub> and HN-N<sub>330</sub>P<sub>90</sub>). Ammonia volatilization was measured with the enclosure method. Results show that ammonia emission occurred within the first 6 days after fertilizer application, and it was less after the basal dressing and the first top-dressing than after the second top-dressing. N loss through ammonia emission accounted for 0.4% ~ 12% of the total nitrogen applied for the basal and the first top dressings. However for the second top-dressing the percentage was 5.8%, 9.7%, 25.6%, 15.6%, 11.6% during the 2002 rice season, and 27.4%, 26.2%, 30.0%, 35.1%, 27.6% during the 2003 rice season for Treatments LN, OPT, LP, HP and HN, respectively. Ammonia loss was low when fertilization was followed by rainy days or was done right at the elongating or booting stage

of the rice crop. Positive correlation was observed between  $\text{NH}_3$  loss and  $\text{NH}_4^+$ -N concentration in the surface water in all the three fertilization periods. When the rate of phosphorus fertilizer remained the same,  $\text{NH}_3$  loss increased with N fertilizer rates, whereas when at the rate of N fertilizer stayed unchanged,  $\text{NH}_3$  loss was higher in treatments higher and lower in P rate treatments than in treatments optimum in P rate, suggesting that ammonia loss would be greater when NP combination is unbalanced.  $\text{P}_2\text{O}_5$  is recommended to be no more than  $90 \text{ kg hm}^{-2}$  for rice.

**Key words** Paddy fields; Urea; Phosphorus fertilizer; Ammonia volatilization