

不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响^①

邓美华^{1,2}, 尹斌², 张绍林², 朱兆良², 石孝均¹

(1 西南农业大学资源环境学院, 重庆 400716;

2 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)

摘要: 采用密闭室法研究苏南地区稻麦轮作体系中, 不同施 N 量和施 N 方式对水稻和小麦生育期氨挥发损失的影响。结果表明, 优化施肥能明显降低稻-麦轮作系统中的氨挥发损失, 在整个稻麦轮作体系中, 优化和习惯的氨挥发损失占 N 肥施用量的百分比分别为 $7.05\% \pm 1.37\%$ 和 $9.81\% \pm 0.38\%$ 。稻季与麦季的氨挥发损失差异显著。稻季氨挥发损失量与 N 肥施用量呈乘幂关系上升, 麦季则呈正的线性关系。水稻施肥后氨挥发持续的时间短, 主要发生在施肥后 1 周以内, 麦季持续时间较长, 在施肥后 10 天左右。稻季和麦季的基肥阶段是主要的氨挥发时期, 占各自氨挥发损失 N 的 50% 左右。

关键词: 水旱轮作; 优化施肥; 习惯施肥; 氨挥发

中图分类号: S365

近年来, 由于化肥 N 的大量施用, 来自农田的氨挥发损失也随之增加, 这不仅给农民带来直接的经济损失, 而且通过沉降回到地面的 NH_4^+ 对森林、农田、水体等生态系统将产生不利的影[1-4]。研究表明, 无论在酸性还是碱性土壤上, 尿素施入稻田后都存在氨挥发损失[5-6], 其损失量占施 N 量的比例为 0.41%~40%[7]。为了降低氨挥发损失, 全世界已开展了大量的研究工作。如施入脲酶抑制剂和藻类抑制剂可以降低稻田氨挥发[8-9]; 混施尿素-氯化钾[10]、尿素-磷酸钙[11], 可以降低土壤微域的 pH 值, 从而减少氨挥发损失。另外, 在施肥管理措施方面, 旱地土壤混施尿素, 或尿素随雨水、灌溉水淋洗入土壤, 也可降低氨挥发损失; 在稻田中, 于灌水前混施尿素或深施大颗粒尿素也被证明是降低氨挥发的有利措施[12]。但是, 迄今有关整个稻麦轮作体系中氨挥发损失的研究还少见报道。为此, 我们在中国科学院常熟农业生态试验站进行了田间试验, 研究了稻麦轮作体系中不同尿素施用方法与不同尿素用量对水稻和小麦生育期氨挥发损失的影响, 旨在说明该地区稻麦轮作体系中, 施用尿素后氨挥发损失的数量及其动态变化过程, 为确定该地区适宜用 N 量, 提高 N 肥利用率, 减少 N 素损失对环境的污

染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2003 年 6 月至 2004 年 5 月在中国科学院常熟农业生态试验站进行。该站位于长江三角洲的腹地江苏省常熟市辛庄镇, 傍 205 国道; 属亚热带中部湿润季风气候, 年平均气温 15.5°C , $\geq 10^\circ\text{C}$ 的有效积温 4933.7°C , 年降水量 1038 mm 左右, 无霜期 201 天; 土壤为湖积物上发育的潜育型水稻土, pH 值为 7.5 左右, 主要粮食作物为水稻与小麦轮作。试验区水稻土基本性状见表 1。

1.2 试验设置

试验设置两种施肥方法: 习惯法(地方习惯施肥方法), 优化法(无水层混施或以水带 N); 每种施肥方法设 5 个施 N 水平: U0 (CK)、U1、U2、U3、U4, 共 9 个处理, 每个处理设 4 次重复, 完全随机排布, 共 36 小区, 小区面积为: $7.0\text{ m} \times 6.0\text{ m}$ 。肥料用量为: 稻季各处理分别施 N 肥(尿素) N 0、100、200、300、350 kg/hm^2 , P 肥(过磷酸钙) P_2O_5 60 kg/hm^2 , 钾肥(氯化钾) K_2O 120 kg/hm^2 ; 麦季各处理分别施 N: 0、100、150、200、250 kg/hm^2 ,

①基金项目: 国家自然科学基金重大项目(30390080), 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-413)资助。

* 通讯作者

作者简介: 邓美华(1978—), 女, 湖北人, 硕士研究生, 主要从事化肥氮在土壤中的转化及其环境效应的研究。E-mail: meihuad@163.com

表 1 供试土壤的基本性状

Table 1 Some basic properties of the soil in the field experiment

土壤	PH (H ₂ O)	有机质 (g/kg)	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	缓效 K (mg/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)	CEC (cmol/kg)
乌栅土	7.3	35.0	2.09	0.934	410	5.0	121.3	17.7

P₂O₅ 60 kg/hm², K₂O 60 kg/hm². N 肥施用分配为稻季基肥:分蘖肥:穗肥为 5: 2: 3; 麦季基肥:拔节肥:穗肥为 2: 1: 2. P、K 肥做基肥一次施入。

施 N 技术: 习惯法为当地习惯的表面撒施法; 优化法为水稻: 基肥无水层混施, 追肥“以水带 N”深施; 小麦: “以水带 N”深施。

1.3 测定项目及方法

(1) 氨挥发测定: 采用密闭室连续抽气法测定氨挥发^[13-17]。施肥后每天在上午 7:30—11:30 和下午 3:00—6:00 两个时间段抽气, 每间隔 0.5 h 抽 1 h, 用 20 g/kg 硼酸溶液吸收, 用 0.01 mol/L 的 H₂SO₄ 溶液滴定, 计算氨挥发累计损失量。

(2) 田面水 (稻季) NH₄⁺-N 含量测定^[17]: 各小区水样为 3 点随机取样混合样。NH₄⁺-N 采用靛酚蓝比色法测定。施肥后 1 周内每日测定, 1 周后隔两天测 1 次。

2 结果与分析

2.1 稻季的氨挥发损失

2.1.1 稻田氨挥发动态变化 稻季 N 肥施用时间分别为 2003 年 6 月 30 日、7 月 29 日、8 月 20 日, 尿素施入稻田后各时期的氨挥发动态变化基本一致, 这里以基肥时期为例进行阐述 (图 1)。结果表明: 与习惯施肥方式相比, 优化施肥的氨挥发通量相对较低; 而且优化施肥与习惯施肥的氨通量的动态变化趋势相似, 都表现为在施肥后 1~3 天内氨挥发通量达到最大, 之后逐日降低。在整个生育期中, 最大氨挥发通量发生在穗肥时期, 持续时间较短, 5 天左右; 而基肥时期氨挥发持续时间最长 (约 8 天), 如 U₃、U₁、U₄ 和 U₃ 优处理施肥后第 8 天氨通量仍然很高。从各个施肥处理来看, 各处理变化均表现出氨挥发通量随施肥量的增加而增加, 即 U₄>U₃>U₂>U₁>U₀。

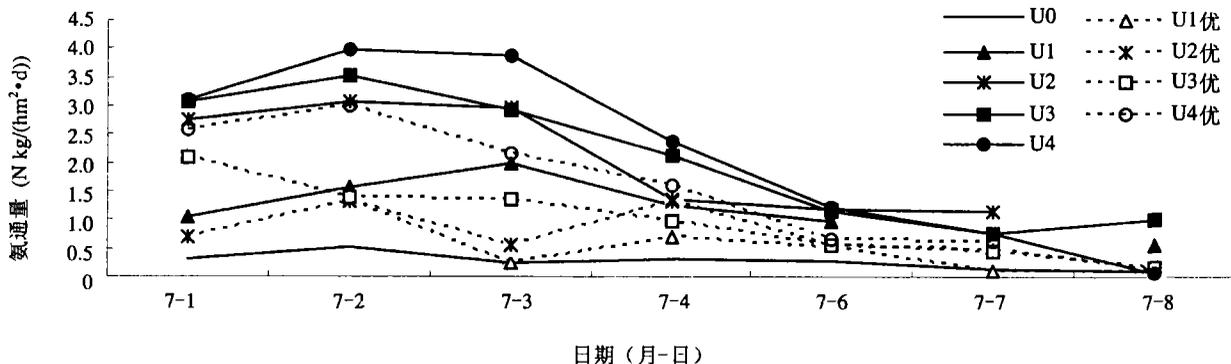


图 1 稻季基肥时期氨通量变化

Fig. 1 Variation of ammonia volatilization at the basal dressing period

in rice season

2.1.2 田面水 NH₄⁺-N 浓度动态变化 稻季施肥后田面水 NH₄⁺-N 的动态变化趋势与稻田氨挥发通量的动态特征相似 (图 1、图 2), 表现为: 优化施肥 NH₄⁺-N 浓度比习惯施肥低, 而且 NH₄⁺-N 浓度在施肥后 1~3 天内达峰值, 其后逐日降低, 并随施肥量的增加而增加, 即 U₀<U₁<U₂<U₃<U₄。经统计, 氨通量与 NH₄⁺-N 浓度呈显著的正线性相关 (P<0.01), 因此田面水 NH₄⁺-N 浓度的高低是影响

NH₄⁺ 转化为 NH₃ 的重要因素, 从而影响 NH₃ 向大气迁移。这与以前的研究结果相吻合^[17-19]。

2.1.3 稻季氨挥发损失与施 N 量的拟合模式 从表 2 可看出, 无论优化施肥或习惯施肥, 氨挥发量与施肥量的最佳模拟模式都遵循数学模拟公式 Y = Ae^{Bx} (A, B 为系数; Y 为氨挥发量, X 为施肥量), 且 R² 值都>0.9, 由此看出, 模拟相关性极好, P<0.01。与习惯施肥相比, 从模拟的回归系数 B 可发

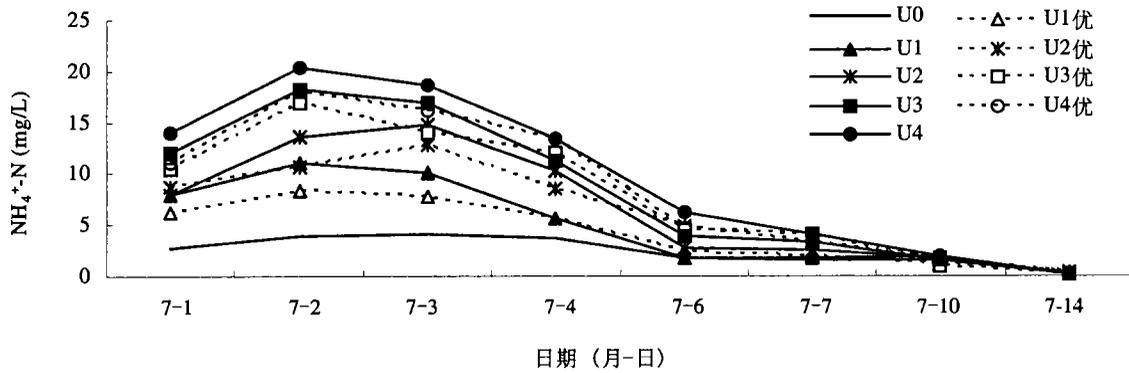


图 2 稻季基肥时期田面水 NH₄⁺-N 浓度

Fig. 2 Ammonium concentrations of surface water at the basal dressing period in rice season

表 2 氨挥发损失与施肥量的拟合结果

Table 2 Results of the fitting between ammonia loss and N application rate in rice season

时期	处理	拟合模式	R ²	P
基肥	习惯	$Y = 1.3343e^{0.009x}$	0.951	<0.01
	优化	$Y = 1.1611e^{0.0089x}$	0.9846	<0.01
蘖肥	习惯	$Y = 0.3436e^{0.0121x}$	0.9124	<0.01
	优化	$Y = 0.3337e^{0.0118x}$	0.9192	<0.01
穗肥	习惯	$Y = 0.8766e^{0.0079x}$	0.9307	<0.01
	优化	$Y = 0.7168e^{0.0072x}$	0.9075	<0.01
稻季总损失	习惯	$Y = 3.4294e^{0.0077x}$	0.9125	<0.01
	优化	$Y = 3.2615e^{0.007x}$	0.9198	<0.01

注：Y 为氨挥发量，单位 N kg/hm²；X 表示施肥量，单位 N kg/hm²。

现，不管是氨挥发总量还是各时期的挥发量都是优化施肥的 B 小，即随施 N 量的增加氨挥发量增加的速度较慢，表明在优化施肥方式下施 N 量对氨挥发的影响较小。而且系数 A 也是优化施肥的较小，进一步表明优化施肥比习惯施肥的氨挥发少。因此，随着施肥量的增加优化施肥的优越性更能充分体现。如本试验中的 U3、U4 处理，整个稻季氨挥发

损失优化施肥下分别为 N 22.10 kg/hm² 和 20.50 kg/hm²，习惯施肥则高达 N 34.16 kg/hm² 和 35.01 kg/hm²。

各时期的氨挥发损失相比，无论是优化或习惯施肥，模拟均表现出基肥时期系数 A 最大，其次是穗肥 A，而蘖肥时期 A 最小。而系数 B 值则体现出蘖肥 > 基肥 > 穗肥。这说明基肥、穗肥时期氨挥发主要受系数 A 的影响，而穗肥时期则主要受系数 B 的调控。

2.1.4 稻季氨挥发损失量 2003 年稻季 3 次施肥后累计氨挥发损失和整个稻季氨挥发损失总量及其损失率均表现出随施肥量的增加而增加，优化施肥方式低于习惯施肥（表 3）。整个稻季通过氨挥发带入大气的肥料 N：优化施肥为 N 7.30 ~ 29.70 kg/hm²，平均约占施肥量的 7.59% ± 0.61%，习惯施肥为 N 8.83 ~ 32.72 kg/hm²，平均占施肥量的 9.40% ± 0.44%，优化施肥比其约低 2 个百分点，统计检验表明，优化施肥比习惯施肥显著降低了稻田氨挥发损失（其 F 值为 11.52 > F_{0.05} = 10.10）。本试验测得的氨挥发量与蔡贵信等^[18]在黄泥土上测定的结果一

表 3 稻季各生育期氨挥发累计损失量与损失率

Table 3 Cumulative loss and loss rate of N due to ammonia volatilization in various growth periods in rice season

处理	基肥时期		蘖肥时期		穗肥时期		总损失	
	优化施肥	习惯施肥	优化施肥	习惯施肥	优化施肥	习惯施肥	优化施肥	习惯施肥
U0	1.03	1.03	1.25	1.25	-	-	2.29	2.29
U1	3.14 (6.28)	4.39 (6.71)	2.00 (3.76)	2.15 (4.49)	0.91 (3.04)	1.58 (5.28)	9.59 (7.30)	11.11 (8.83)
U2	7.88 (6.85)	7.86 (6.83)	4.28 (7.57)	5.65 (10.99)	4.02 (6.69)	5.93 (9.89)	16.50 (7.11)	21.41 (9.56)
U3	11.50 (6.98)	12.95 (7.95)	5.17 (6.53)	6.95 (9.50)	5.43 (6.03)	9.84 (10.93)	24.68 (7.47)	31.88 (9.87)
U4	14.33 (7.60)	15.78 (8.43)	8.52 (10.38)	9.03 (11.11)	7.78 (7.41)	12.03 (11.46)	31.99 (8.49)	35.01 (9.35)

注：括号外数据表示氨挥发累计损失量，单位：kg/hm²；括号内数据为氨挥发损失量占该时期施肥量的百分比。

致,每季水稻通过氨挥发损失的 N 约占施肥量的 9% 左右,但低于宋勇生等^[19]采用微气象学法测定的结果: NH_3 挥发量占施 N 量的 18.6% ~ 38.7%。各生育期氨挥发损失量表现为: 基肥期 > 穗肥期 > 蘖肥期, 与前人研究的结果穗肥时期氨挥发较少有所不同^[19]。基肥时期各施 N 水平的氨挥发量占其损失总量的 50% 左右, 该时期是氨挥发损失的主要时期。

但从损失率来看, 无论是整个稻季氨挥发损失率还是各时期损失率都没有随 N 肥施用量增加而增加的现象, 同时各时期损失率基本相当, 其氨挥发损失占该时期施 N 量的百分比平均分别为优化施肥 $6.95\% \pm 1.86\%$ 、习惯施肥 $8.63\% \pm 2.40\%$ 。

2.1.5 讨论 从上述结果可以看出, 稻田生态系统中施入尿素后的氨挥发损失受多因素综合影响。优化施肥的氨挥发明显低于习惯施肥。优化施肥方式下, 首先尿素被施入无水层的田面, 再灌水, 使得 N 肥进入较深层次的土壤中, 促进了水稻根系对 N 素的吸收, 提高了 N 肥利用率; 同时短期内田面缺水, 造成水稻水分胁迫, 促进了水稻根系生长^[20], 从而加强了水稻对 N 素的吸收。因此, 进入田面水的 NH_4^+ 较少, 使得田面水中的 NH_4^+ 浓度低, 减少了水面的 NH_3 进入大气层面, 从而减少了稻田生态系统的氨挥发。

氨挥发随施肥量的增加而增加, 两者呈乘幂关系。稻田施入尿素后, 在淹水条件下迅速水解, 产生大量的 NH_4^+ , 而水稻无法在短期内吸收掉尿素释放出的 NH_4^+ , 由此大量 NH_4^+ 进入田面水中, 尿素用量越高, 田面水中 NH_4^+ 浓度就越高, 促进了水面的 NH_3 进入大气层面^[18, 21], 因而加强了稻田的氨挥发损失。因此, 结合水稻目标产量可适当减少尿素的施用量。

在各生育期中, 基肥时期和穗肥时期氨挥发严重。基肥时期由于施肥量大, 占整个稻季施 N 量的 50%, 而且该时期水稻苗小对 N 素的需求较少, 而造成大量的氨挥发损失, 其损失量是整个稻季氨挥发损失的 50% 左右。因此, 基肥时期是控制稻田氨挥发损失的关键时期, 可考虑适当减少该时期施肥量, 以减少稻田生态系统氨挥发。同时穗肥时期其损失率最高, 这可能与该时期气候条件和水稻自身生理条件有关。尽管穗肥时期稻田郁闭度较高, 不利于田面的氨挥发^[7], 但该时期内, 田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高, 气温高, 平均温度在 32°C 左右, 光照强, 风大, 这可促进稻田氨挥发; 相比之下前两个时期基本无风, 田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较低, 尤其基肥时期虽然施肥量大, 由于气温较低, 还出现了阴雨天气, 部分 N 肥随雨水的径流渗漏而损失掉, 因此, 其氨挥发率不高。

2.2 麦季的氨挥发损失

2.2.1 麦季土壤氨挥发动态变化 麦季 3 次施肥分别在 2003 年 11 月 21 日、2004 年 1 月 3 日、2004 年 3 月 5 日进行。结果表明, 3 次施肥后麦田氨挥发通量的动态变化过程基本一致, 表现出 (图 3): 与习惯施肥方式相比, 各施肥水平下, 优化施肥的氨挥发通量相对较低。从施 N 量来看, 各时期氨的挥发量大致都是 $U_4 > U_3 > U_2 > U_1 > U_0$, 即随施 N 量的增加而增加; 而 U_0 水平下, 仅在 11 月 23 日和 11 月 25 日收集了少量挥发 NH_3 , 故在不施肥时, 麦田基本无氨挥发现象。氨挥发通量在施肥后 4 ~ 5 天达高峰, 此后出现较小的波动。从各时期来看, 基肥时期的氨挥发通量较高, 其次是穗肥时期即第 3 次施肥后, 拔节时期的氨通量较低; 麦田施肥后氨挥发持续的时间较长, 均在 9 天以上, 尤其穗肥时

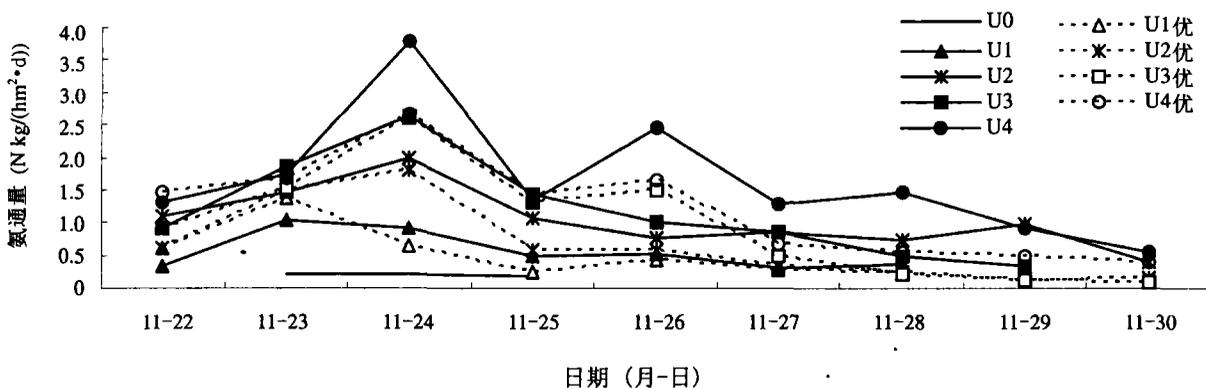


图 3 麦季基肥时期氨通量

Fig. 3 Ammonia volatilization at basal dressing period in wheat season

期长达 12 天, 这可能是由该时期的气温略有上升造成的。

2.2.2 麦季氨挥发损失与施肥量的拟合模式 在麦季试验中发现, 氨挥发损失量随施肥量的增加而增加。经回归分析, 氨挥发与施肥量呈线性关系, 其拟合方程符合 $Y = AX + B$ (表 4), 且相关性较好。从系数 A 可以看出, 施肥量与氨挥发量的关系, 即无论是各时期还是整个麦季氨挥发的总损失, 都是优化施肥的 A 小, 这说明优化施肥方式下施 N 量对氨挥发的影响较小, 而且与习惯施肥相比, 系数 B 除了拔节期优化施肥略大一点, 基本上优化施肥较

小, 进一步说明, 在施等量的尿素后优化施肥的氨挥发较少, 并随施 N 量的增加, 优化施肥的氨挥发比习惯施肥更少。由此表明, 按优化法施肥有利于减少氨挥发损失, 提高农田 N 肥利用率。

2.2.3 麦季氨挥发损失量 从表 5 可看出, 麦季氨挥发的损失, 优化施肥明显低于习惯施肥, 氨挥发损失量随施肥量的增加而增加。整个麦季通过氨挥发损失的肥料 N, 优化施肥为 N 7.36 ~ 15.55 kg/hm², 习惯施肥为 N 9.66 ~ 21.22 kg/hm²; 损失率分别为 6.75% ± 0.84%、9.38% ± 0.92%, 优化施肥比习惯施肥低约 2 个百分点。经统计分析, 优化施

表 4 麦季氨挥发损失与施肥量的拟合结果

Table 4 Results of fitting between ammonia loss and N application rate in wheat season

生育期	施肥处理	拟合模式	R ²	P
基肥	习惯	$Y = 0.0445X + 0.3968$	0.9658	<0.01
	优化	$Y = 0.0347X + 0.1727$	0.996	<0.01
拔节肥	习惯	$Y = 0.0072X + 0.103$	0.9118	<0.01
	优化	$Y = 0.0041X + 0.2162$	0.9772	<0.01
穗肥	习惯	$Y = 0.0261X + 0.6303$	0.9354	<0.01
	优化	$Y = 0.0223X + 0.2397$	0.994	<0.01
麦季总损失	习惯	$Y = 0.0778X + 1.1284$	0.9721	<0.01
	优化	$Y = 0.0619X + 0.5789$	0.9963	<0.01

注: X 代表施肥量, 单位 N kg/hm²; Y 为氨挥发量, 单位 N kg/hm²。

表 5 麦季各生育期氨挥发累计损失量与损失率

Table 5 Cumulative loss and loss rate of N due to ammonia volatilization in various growth periods in wheat season

处理	基肥时期		蘖肥时期		穗肥时期		总损失	
	优化施肥	习惯施肥	优化施肥	习惯施肥	优化施肥	习惯施肥	优化施肥	习惯施肥
U0	0.37	0.37	0.25	0.25	0.32	0.32	0.80	0.80
U1	3.43 (7.64)	4.04 (9.18)	0.75 (2.51)	0.66 (2.03)	2.44 (5.31)	3.01 (6.73)	8.16 (7.36)	10.46 (9.66)
U2	5.18 (8.02)	8.01 (12.74)	0.85 (1.99)	1.42 (3.91)	3.55 (5.39)	5.71 (8.98)	10.73 (5.86)	15.97(10.54)
U3	10.09 (12.15)	9.97 (12.00)	1.10 (2.14)	1.08 (2.07)	4.47 (5.19)	5.60 (6.60)	17.41 (7.57)	18.43 (8.82)
U4	11.16 (10.79)	13.11 (12.74)	1.22 (1.94)	2.74 (4.98)	6.03 (5.72)	6.72 (6.40)	19.86 (6.22)	22.02 (8.49)

注: 括号外数据表示氨挥发累计损失量, 单位: kg/hm²; 括号内数据为氨挥发损失量占该时期施肥量的百分比。

肥与习惯施肥差异显著 ($P < 0.05$)。但损失率没有随施肥量增加而增加的趋势。在其生育期中, 基肥时期氨挥发损失量最高, 均占总损失的 50% 左右; 拔节时期损失最少。因此, 基肥时期是麦季氨挥发损失的主要时期。

2.2.4 讨论 整个麦季氨挥发损失体现出: 优化施肥低于习惯施肥。麦季田面施入尿素后, 由于旱地土壤比较干燥, 在习惯施肥方式下, N 肥被暴露于土表, 不利于土壤固定, 也不利于植株吸收, 从而加强了土表的氨挥发。而优化施肥处理下, 在施

肥后进行浇水, 使尿素溶解于土壤溶液中, 促进了土壤对 N 素的固定, 同时也有利于小麦对 N 素的吸收, 因此可降低氨挥发损失。

从麦季各生育期来看, 拔节时期施肥少, 占整个麦季施肥量的 20%, 而且该时期内气温较低, 平均气温在 6.5 °C 左右, 还出现了阴雨天气, 部分 N 以 NO₃-N 形式随雨水以渗漏、径流等方式等损失掉, 氨挥发损失较少^[16]。而基肥、穗肥时期施肥量大, 均占麦季施肥量的 40%, 基肥时期温度较高, 平均气温为 10 °C, 大部分天气晴朗, 并伴有 4 ~ 5

级的阵风,这都有利于氨挥发。而穗肥时期气温极不稳定,气温在 4.5~15.5℃波动,因此随气温的变化其氨通量也随之波动。同时也由于不同生育期小麦对 N 素营养的需求有所不同,基肥时期,随着小麦不断生长,对 N 素的需求渐高,而且麦田的郁闭度也渐高,从而减少了麦田氨挥发损失。另外,麦季气温较低,施肥后氨通量历时较长,大约在 10 天左右。

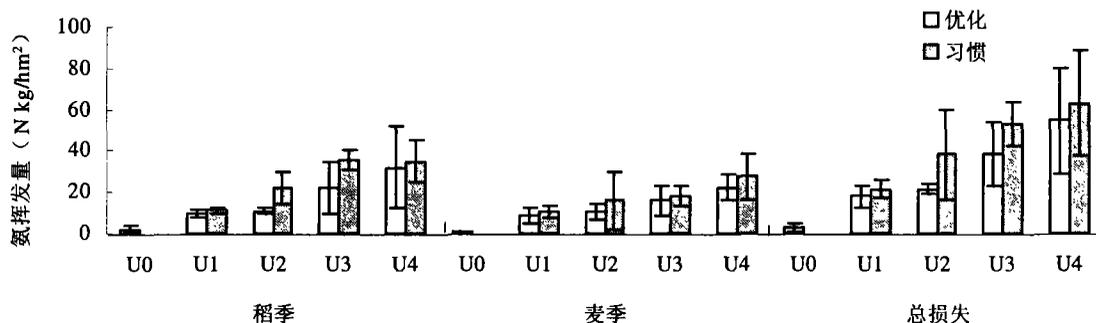


图 4 稻麦轮作体系中氨挥发损失

Fig. 4 Ammonia volatilization in the rice-wheat rotation system

挥发损失占整个轮作体系中氨挥发损失的 60% 左右。从损失率来看,稻麦季相当,稻季优化施肥和习惯施肥分别为 $7.59\% \pm 0.61\%$ 和 $9.40\% \pm 0.44\%$; 麦季分别为 $7.48\% \pm 0.70\%$ 和 $9.27\% \pm 0.75\%$ 。另外,稻季氨挥发发生在 1 周内,氨通量强度大,而麦季氨通量强度低,持续的时间较长,在 10 天左右。在淹水稻田系统和干旱麦田体系中,氨挥发过程差异显著。因此,可根据其损失特征进行合理管理。而且基肥时期是稻麦体系氨挥发的主要时期,占各收获季氨挥发损失的 50% 左右。

3 结论

上述结果表明,尿素的施用促进了农田氨挥发损失,并随施肥量的增加而增加,稻季氨挥发损失与施 N 量呈乘幂关系,麦季则呈线性关系。稻季的氨挥发损失比麦季严重,而且稻季氨挥发损失在施肥后 1 周左右进行,在施肥后 1~3 天内达到峰值,麦季则持续的时间较长,氨挥发通量较低。无论稻季还是麦季,均表现出优化施肥的氨挥发较少,随施肥量的增加,优化施肥的优越性更得以体现,而且优化施 N 操作也较简单,适合在施肥量较高的太湖地区推广。在作物各生育期中,稻麦季均是基肥时期氨挥发严重,因此,可适当减少基肥时期尿素

2.3 稻麦轮作体系中的氨挥发

由图 4 可以发现,整个稻麦轮作体系中通过氨挥发带入大气的肥料 N: 优化施肥为 N 14.74~51.49 kg/hm², 习惯施肥为 N 18.49~59.65 kg/hm², 随施肥量的增加而增加,分别占施肥量的 $7.05\% \pm 1.37\%$ 和 $9.81\% \pm 0.38\%$, 优化施肥比习惯施肥低约 3 个百分点。与麦季相比,稻季氨挥发损失量较高,其氨

N 的投入或采取有效措施以减少 N 肥的氨挥发损失,提高 N 肥利用率。

参考文献:

- [1] Bobbink R, Heil GW, Raessen MBAG. Atmospheric deposition and canopy exchange processes in heathland ecosystems. *Environmental Pollution*, 1992, 75: 29-37
- [2] Matson P, Lohse KA, Hall SJ. The globalization of nitrogen deposition: consequences for terrestrial ecosystems. *Ambio*, 2002, 31 (2): 113-119
- [3] Fan XH, Song YS, Lin DX, Yang LZ, Zhou JM. Ammonia volatilization losses from urea applied to wheat on a paddy soil in Taihu region, China. *Pedosphere*, 2005, 15 (1): 59-65
- [4] 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
- [5] Zhu ZL. Efluent management of nitrogen fertilizers for flooded rice in relation to nitrogen transformation in flooded soils. *Pedosphere*, 1992, 2 (2): 97-114
- [6] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 沈其荣. 农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应. *土壤*, 2005, 37 (2): 113-120
- [7] 曹金留, 田光明, 任立涛, 蔡祖聪, 何任红. 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
- [8] Freney JR. Effect of urease nitrification and algal inhibitors on ammonia loss and grain yield of flooded rice in Thailand. *Fertilizer Research*, 1995, 40: 225-233
- [9] Zhu ZL. Fate and management of fertilizer nitrogen in agroecosystems // Zhu Z, Wen Q, Freney JR. *Nitrogen in Soils of China*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1997: 239-279
- [10] Damodar DR, Sharma KL. Effect of amending urea fertilizer with chemical additives on ammonia volatilization loss and nitrogen-use efficiency. *Biol. Fertil. Soils*, 2000, 32: 24-27
- [11] Fan MX, Mackenzie AF. Urea and phosphate interactions in fertilizer microsites: ammonia volatilization and pH changes. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 839-845
- [12] 蔡贵信, 朱兆良. 稻田化肥氮的气态损失. *土壤学报*, 1995, 32 (增刊): 128-135
- [13] Kissel DE, Brewer HL, Arkin GF. Design and test of a sampler for ammonia volatilization. *J. Soil Sci. Soc. Am.*, 1977, 42: 1133-1138
- [14] 朱兆良, 蔡贵信, 徐银化等. 一种稻田氮肥氨挥发及其在氮素损失中的重要性研究. *土壤学报*, 1985, 22 (4): 320-328
- [15] 田光明, 曹金留, 蔡祖聪. 镇江丘陵地区稻田氨挥发损失研究. *南京大学学报 (自然科学)*, 1997, (专辑): 268-270
- [16] Tian GM, Cao JL, Cai ZC, Ren LT. Ammonia Volatilization from winter wheat field top-dressed with urea. *Pedosphere*, 1998, 8 (4): 331-336
- [17] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 沈其荣. 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): 1884-1888
- [18] 蔡贵信. 氨挥发 // 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: 171-196
- [19] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 杨林章, 周健民. 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
- [20] 潘瑞焜编著. *植物生理学*. 北京: 高等教育出版社, 2001: 290-292
- [21] 朱兆良, 邢光熹编著. *氮循环—维系地球生命生生不息的一个自然过程*. 北京: 清华大学出版社, 2002: 59-65

Effects of Rate and Method of N Application on Ammonia Volatilization in Paddy Fields

DENG Mei-hua^{1,2}, YIN Bin², ZHANG Shao-lin², ZHU Zhao-liang², SHI Xiao-jun¹

(1 Resource and Environment College, Southwest Agricultural University, Chongqing 400716, China;

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

Abstract: A continuous airflow enclosure chamber method was used to study ammonia volatilization from paddy field under the rice-wheat rotation system in South Jiangsu and effects of rate and method of nitrogen fertilizer application on ammonia emission from the field during the rice and wheat growing periods. Results showed that ammonia volatilization could be obviously reduced under the rice-wheat rotation system by optimizing fertilization, N loss through ammonia volatilization accounted for $7.05\% \pm 1.37\%$ and $9.81\% \pm 0.38\%$, respectively, of the total N applied for optimized and traditional ways of fertilization. The difference in ammonia volatilization between the rice season (water-logged) and the wheat season (dry) was notable. During the rice season N loss through volatilization rose with the application rate of nitrogen fertilizer, showing a power relationship while during the wheat season, a linear relationship. In the rice field, ammonia volatilization lasted short, and took place within a week after N application, while in the wheat field, it lasted longer for about ten days. Almost 50% of the ammonia volatilization took place during the basal dressing period in either rice or wheat season.

Key Words: Rice-wheat rotation, Optimized method, Traditional method, Ammonia volatilization