

太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究*

宋勇生¹ 范晓晖^{1†} 林德喜² 杨林章¹ 周健民¹

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 福建农林大学资源环境学院, 福州 353000)

摘要 应用微气象学方法研究太湖地区水稻三个不同施肥期施用尿素后的氨挥发损失, 并对其影响因素(气候、田面水中 NH_4^+ -N 浓度和作物覆盖等)的作用进行了分析研究。结果表明, 水稻施用尿素后的氨挥发损失为各时期施氮量的 18.6%~38.7%, 其中以分蘖肥时期损失最大, 其次为基肥, 穗肥氨挥发损失最小。氨挥发损失主要时期是在施肥后 7 d 内。在水稻不同生长期, 各因素对氨挥发的影响能力大小并不一样, 三个施肥期的氨挥发损失通量与施肥后田面水中铵态氮浓度呈显著正相关。

关键词 稻田; 尿素; 氨挥发; 影响因素

中图分类号 S158.3 文献标识码 A

在稻田氮肥损失中, 氨挥发占很大比例, 是稻田土壤系统中氮肥损失的主要机制之一。国外许多研究表明, 氮肥表施时氨挥发损失占总施氮量的 10%~60%^[1]; 我国研究报道在稻田系统中, 氨挥发损失可达总施氮量的 9%~40%^[2]。1990 年全球氨挥发总量约为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 54 Tg, 其中由于化肥应用导致的氨挥发为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 9 Tg^[3]。我国农业生态系统中, 1990 年农田向环境中释放的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 达 1.80 Tg, 约占化肥 N 施用量的 11%^[4], 1995 年增至 2.71 Tg。氨挥发量稻田高于旱地, 分别为 18% 和 9%^[4]。因此, 研究稻田氨挥发过程及数量, 制定合理的施肥措施, 对于减少施肥对环境的影响有着重要意义。

影响氨挥发损失的因素主要有气候条件(温度、光照和风速等)、土壤与田面水性质、施肥量和施肥方式以及作物覆盖情况等。氨挥发随土壤和气候条件的变化波动很大^[5]。氨的平衡蒸汽压 p_{NH_3} 和掠过田间的空气流动等对氨的挥发速率都有明显的影响^[6]。尿素是我国水稻生产中使用的主要氮肥品种, 但其当季利用率只有 30% 左右, 主要以氨挥发损失^[7,8]。太湖地区是我国水稻高产区和氮肥高用量地区, 但至今对该区水稻生产中氨挥发损失过程和损失数量缺乏系统研究。本文研究旨在阐明太湖地区水稻生产中, 施入稻田的尿素通过氨挥发损失

的过程和数量, 以及土壤和气候等条件对其的影响, 为减少该地区尿素氮肥氨挥发损失, 同时提高氮肥利用率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验于 2002 年在江苏省常熟市辛庄镇东塘村的稻田中进行, 土壤类型为乌栅土(潜育水耕人为土), 耕层土壤 pH 为 7.07(W_{\pm} : $W_{\text{水}}$ = 1:2.5), 有机质 43.9 g kg^{-1} , 全 N 2.62 g kg^{-1} , 全 P 0.81 g kg^{-1} , 全 K 18.41 g kg^{-1} , 速效 P 22.3 mg kg^{-1} , 速效 K 127.4 mg kg^{-1} 。

1.2 试验设计

试验采用微气象学技术, 研究现行施肥方法下氮肥氨挥发和氮素总损失。大田总面积为 1.09 hm^{-2} , 长 158 m, 宽 69 m。试验区为设在大田中的两个半径为 12.5 m 的圆形地块, 沿圆周筑埂, 埂高约 15 cm。两个圆形区分别施尿素折合纯氮 135 kg hm^{-2} 为低氮(LN)处理和 270 kg hm^{-2} 为高氮(HN)处理, 两区相隔约 47 m。肥料分三次施入, 其比例为基肥: 分蘖肥: 穗肥 = 3:4:3。在上水耙平筑埂后, 于 6 月 22 日 18 点左右, 将氮肥作基肥撒施于

* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999011802)、中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-413-3)、国家自然科学基金重大项目(30390080)资助

† 通讯作者

作者简介: 宋勇生(1977~), 江西吉水人, 硕士, 从事土壤肥料与植物营养方面研究

收稿日期: 2003-06-09; 收到修改稿日期: 2003-10-20

田面水中, 随即插秧, 分蘖肥和穗肥也是在有水层中撒施。栽培的密度依据于当地习惯, 每 hm^2 约 30 万株左右, 水稻品种为苏香粳。基肥观测期为 6 月 22 日至 6 月 30 日; 分蘖肥于 7 月 20 日施入, 观测期为 7 月 20 日至 7 月 29 日; 穗肥在 8 月 20 日施入, 观测期为 8 月 20 日至 8 月 31 日。

另外布置施肥处理与圆形区一致的两个采样区供采集新鲜水样, 以免干扰圆形区试验。田面水样采集后立即测定 NH_4^+-N 浓度, 或立即冻藏后待测定。所有处理 P、K 肥相同, P 肥为 P_2O_5 60 kg hm^{-2} , K 肥为 K_2O 120 kg hm^{-2} , P、K 肥也按比例 (3: 4: 3) 分三次施入。

1.3 氨挥发的观测方法

用微气象学技术观测施肥后一段时间内的氨挥发。具体作法是: 在每个圆形区的中心设一竖杆, 在竖杆的 5 个高度处安装氨采样器装置。这 5 个高度分别为距地面 0.4、0.8、1.2、1.6、2.0 m。氨采样装置为一连通的火箭筒形状, 内吸附 2.5% 的草酸溶液, 供吸收空气中的氨气用。每天取样 1~2 次, 测定吸收液中氨的浓度(靛酚蓝比色法), 由采样器中氨浓度计算氨挥发量。同时测量田面水的温度、pH 和 NH_4^+-N 的浓度。另外在两个圆形区的东边约 40 m 处设一竖杆, 测定空气中氨浓度的背景值。

2 结果与讨论

2.1 稻田尿素氨的挥发

2.1.1 不同时期的氨挥发通量 通过公式^[9]计算出稻田尿素各施肥期氨挥发通量的变化如图 1、图 2 和图 3 所示。氨挥发通量的高峰都是出现在施肥后的 2~4 d 内。比较水稻不同生长期和不同施肥量的氨挥发通量, 可以看出, 氨挥发通量以分蘖肥最高, 其 HN 和 LN 处理的最大 NH_3-N 通量分别为 N 11.17 和 $6.79 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 基肥其次, 分别为 N 7.49 和 $3.01 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 穗肥最低, 为 N 5.52 和 $1.72 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。其中高氮处理的最大氨通量是同一时期低氮处理的 1.65~3.21 倍。

从上述图中可以看出, 施肥后前 6 d 是尿素水解为铵态氮和氮素挥发损失的关键时期, 这 6 d 内的氨挥发量占对应各施肥期氨挥发总量的 80.7%~94.3%。其中以分蘖肥时期的氨挥发量和比例最大, 基肥最低, 各施肥期间气候条件的差异是造成氨挥发差异的主要原因。

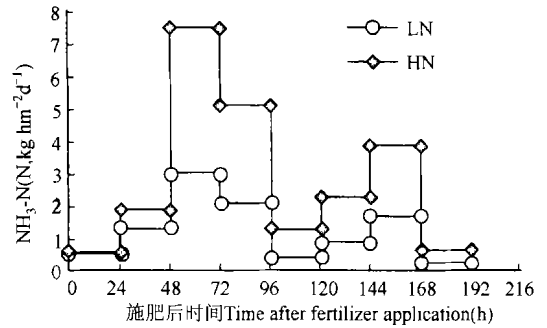


图 1 水稻基肥氨挥发通量(6月22日施肥)

Fig 1 Flux density of NH_3 volatilization

from the basal fertilizer

LN: 低氮 Low N level; HN: 高氮 High N level

(下同 The same below)

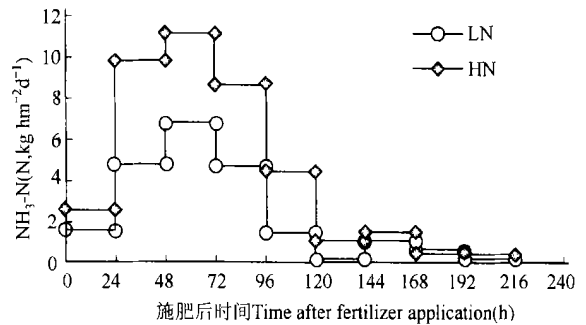


图 2 水稻分蘖肥氨挥发通量(7月20日施肥)

Fig 2 Flux density of NH_3 volatilization

from the tillering fertilizer

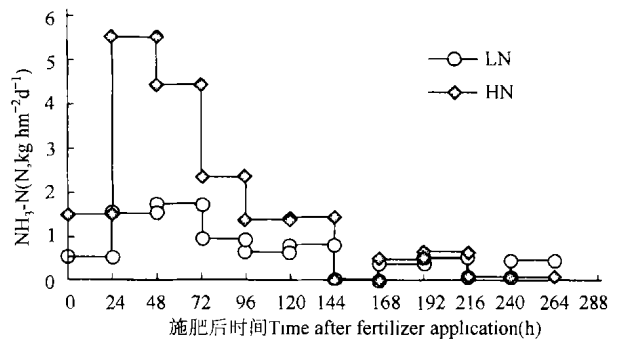


图 3 水稻穗肥氨挥发通量(8月20日施肥)

Fig 3 Flux density of NH_3 volatilization

from the ear bearing fertilizer

2.1.2 不同时期的氨挥发损失量 施肥量增加, 氨挥发损失的量也随之增加(表 1)。在基肥期间, LN 和 HN 处理的氨挥发损失量分别为 N 10.28 和 23.08 kg hm^{-2} , 占施肥量的 25.4% 和 28.5%; 分蘖肥期间, LN 和 HN 处理的氨挥发损失量为 N 20.91 和 39.79 kg hm^{-2} , 分别占施肥量的 38.7% 和 36.8%;

表 1 不同处理和施肥期稻田的氨挥发损失

Table 1 NH_3 volatilization loss after fertilizing during the different periods of rice growth (N, kg hm^{-2})

处理代号 Treatment code	总施氮量 Total amount of applied N	氨挥发量 NH_3 losses			水稻生长期间的氨挥发总量 Total amount of NH_3 losses during periods of rice growth
		基肥期 Basal dressing	分蘖肥期 Tillering top dressing	穗肥期 Ear bearing top dressing	
		LN	135	10.3(25.4)	
HN	270	23.1(28.5)	39.8(36.8)	17.9(22.1)	80.8(29.9)

注: 括号内的数值表示占该时期施肥量的百分数 The number in parentheses indicated the percentage of the amount of applying N fertilizer

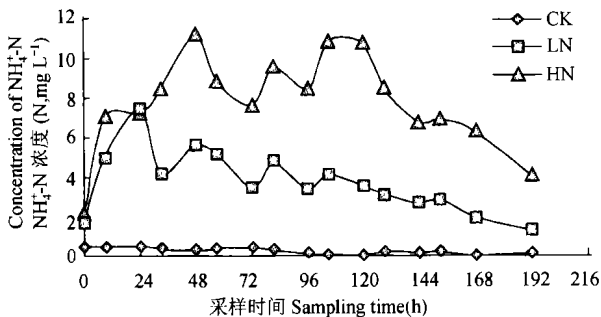
穗肥期间, LN 和 HN 处理的氨挥发损失量为 N 7.53 和 17.89 kg hm^{-2} , 分别占施肥量的 18.6% 和 22.1%。总的来看, 在稻田生产系统中, 氨挥发损失一般占施肥量的 18.6% ~ 38.7%, 大大高于蔡贵信等在黄泥土上研究的尿素氨挥发为 9% 的结论^[10], 差异的主要原因在于这两个试验点土壤 pH 值差异较大, 黄泥土 pH 为 5.4, 而本次试验乌栅土的 pH 为 7.07, 土壤 pH 是稻田氨挥发的主要影响因子。从水稻生长的不同施肥时期来看, 本次试验氨挥发损失为分蘖肥 > 基肥 > 穗肥。

2.2 影响稻田氨挥发的因素

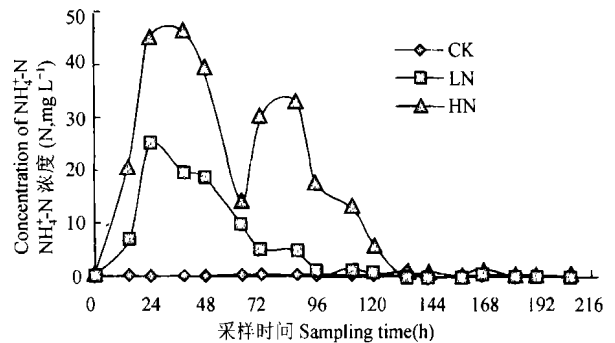
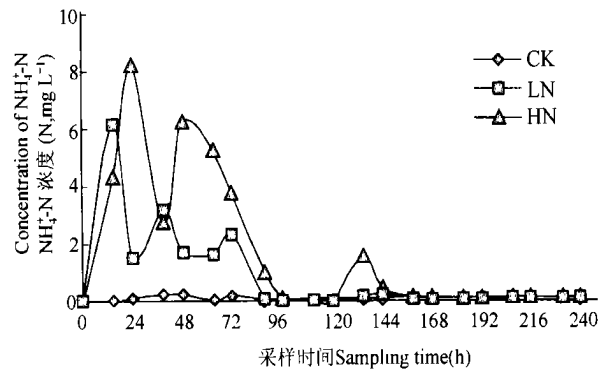
2.2.1 田面水 NH_4^+ -N 浓度对氨挥发的影响

图 4~ 图 6 分别为施基肥、分蘖肥和穗肥后田面水中 NH_4^+ -N 浓度的动态变化, 与对应的图 1、图 2、图 3 相比较可以看出, 田面水中 NH_4^+ -N 浓度变化与其对应的氨通量变化趋势基本一致。这与许多研究结果认为田面水中 NH_4^+ -N 浓度是决定稻田氨挥发量的最主要因素之一相吻合^[1, 5, 10, 11]。

施肥后田面水中的 NH_4^+ -N 浓度迅速升高, 在 24~ 48 h 内很快达到顶峰, 随后开始下降。由于基肥时温度相对较低, 因此其达到峰值的时间也相对

图 4 施基肥后田面水 NH_4^+ -N 的变化Fig. 4 Change of NH_4^+ -N concentration in floodwater after applying the basal fertilizer

CK: 对照 Check; LN: 低氮 Low N level; HN: 高氮 High N level
(下同 The same below)

图 5 施分蘖肥后面水 NH_4^+ -N 的变化Fig. 5 Change of NH_4^+ -N concentration in floodwater after applying the tillering fertilizer图 6 施穗肥后面水 NH_4^+ -N 的变化Fig. 6 Change of NH_4^+ -N concentration in floodwater after applying the ear bearing fertilizer

较迟(图 4)。各施肥时期不同处理的田面水最大 NH_4^+ -N 浓度是: 基肥 LN 和 HN 处理分别为 N 7.43 和 11.26 mg L^{-1} ; 分蘖肥 LN 和 HN 处理分别为 N 25.04 和 46.62 mg L^{-1} ; 穗肥 LN 和 HN 处理分别为 N 6.13 和 8.21 mg L^{-1} 。虽然分蘖肥的施肥量只是穗肥和基肥的 1.3 倍, 但它的最高 NH_4^+ -N 浓度却分别是穗肥的 4.1 倍 (LN) 和 5.7 倍 (HN), 是基肥的 3.4 倍 (LN) 和 4.1 倍 (HN)。

显著性检验表明,基肥各处理之间 NH_4^+-N 浓度达到极显著差异 ($p < 0.01$); 分蘖肥期间施肥与对照间差异显著 ($p < 0.05$) 或极显著 ($p < 0.01$); 穗肥期间 HN 与对照处理差异极显著 ($p < 0.01$), HN 与 LN 处理差异显著 ($p < 0.05$)。

2.2.2 气候条件对氨挥发的影响 通过比较氨挥发通量与温度、光照、风速和降雨的关系,发现在水稻不同生长期间的氨挥发受气候条件的影响各有侧重。

蔡贵信等^[10]认为,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。本试验也证实了这一点,水稻基肥时雨水比较多,主要是多云和阴雨天,光照比较弱。最大日降雨量达到了 45.2 mm,而此时太阳日均辐射只有 12.94 MJ m^{-2} 。

分蘖肥氨挥发测定期间,气温比较高,最高达 40.9°C ,平均气温在 $26.7\sim 31.7^\circ\text{C}$ 之间;光照充足,日均辐射为 17.96 MJ m^{-2} ,降水较少。可见这一时期的高温、强光照、少雨等气候条件共同作用增加了脲酶活性,促使尿素快速分解释放出大量铵态氮,促进氨挥发损失。

穗肥阶段气温一般在 $26.7\sim 30.4^\circ\text{C}$ 之间,略低于分蘖肥时期的温度。光照比较强,太阳日均辐射为 19.74 MJ m^{-2} 。降雨量累计为 29.1 mm,高于分蘖肥时期的降雨量,但是低于基肥时期的降雨量。平均风速在 $0.60\sim 4.28 \text{ m s}^{-1}$ 之间。穗肥期间各气象因素中,以光照和气温对氨挥发影响最为明显,其相关性 R^2 值分别为 0.2278 ($p < 0.05$, $n = 24$) 和 0.477 ($p < 0.01$, $n = 24$) (图 7, 图 8)。

2.2.3 田间覆盖和藻类生长对氨挥发的影响 穗肥期间,水稻已经生长得非常茂盛,行与行之间已经被水稻叶覆盖严实,比分蘖肥时期同样处理的植株要高出 $20\sim 30 \text{ cm}$ 。从图 9 可看出,施高氮处理

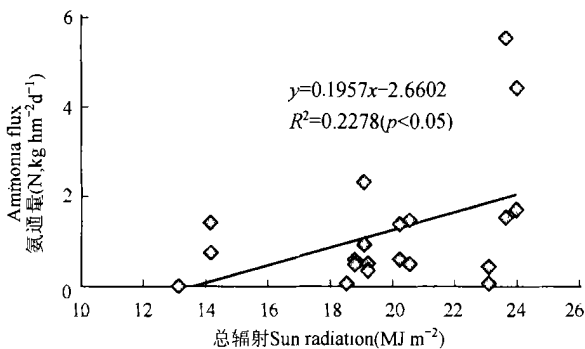


图 7 穗肥氨通量与光照的关系

Fig 7 Correlation between the flux of NH_3 volatilization and sun light intensity after applying the ear bearing fertilizer

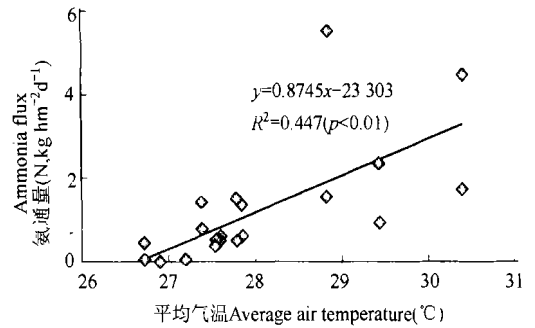


图 8 穗肥氨通量与温度的关系

Fig. 8 Correlation between the flux of NH_3 volatilization and temperature after applying the ear bearing fertilizer

(HN) 的这种现象更加明显 ($p < 0.05$), 植株高度要比 LN 处理高出 10 cm 左右。由于覆盖,一方面挡住了直射到田面水中的阳光,使得田面水层的温度难以升高,同时也抑制了藻类的生长和田面水 pH 的升高^[12];另一方面由于这种物理阻挡作用的存在,加上穗肥时期水稻对养分的大量需求,导致了穗肥时期氨挥发最少。

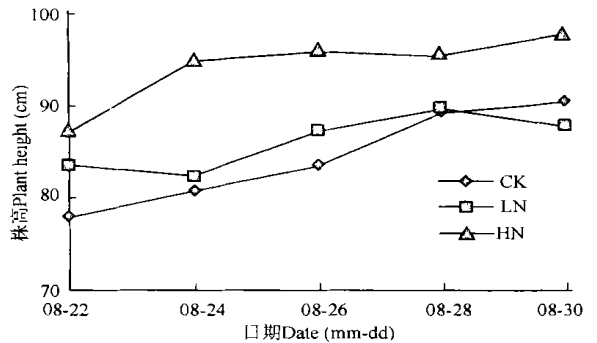


图 9 穗肥氨挥发期间的水稻植株高度

Fig 9 Plant height of rice during ear bearing top dressing period

3 结论

本试验稻田生产系统中,氨挥发损失占各个时期施氮量的 18.6% ~ 38.7%。分蘖肥期间的氨挥发无论从总量上还是从比例上都最大。气候条件尤其是温度、光照、降雨对不同水稻生长期氨挥发的影响表现出差异。田面水中 NH_4^+-N 浓度的大小和变化直接决定着氨挥发通量的大小。水稻三个施肥期氨挥发大小为:分蘖肥 > 基肥 > 穗肥。因此,可以根据水稻各施肥期氨挥发的特点,控制高挥发期间氮肥用量,延迟尿素水解速率,可能对稻田氨挥发减少起到一定作用。本文研究可为今后研究稻田合理施肥、减少氨挥发和提高氮肥利用率提供一些基础资料。

参考文献

- [1] Filley R P, De Datta S K. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizer as a N loss mechanism in flooded rice fields. *Fert. Res.*, 1986, 9: 78~ 98
- [2] 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(Supp.): 128~ 135
- [3] Oliver J G J, Bouwman A F, Hoek K W V, *et al.* Global air emission inventories for anthropogenic sources of NO_x , NH_3 and N_2O in 1990. *Environmental Pollution*, 1998, 102(Supp. 1): 135~ 148
- [4] Xing G X, Zhu Z L. An assessment of N loss agricultural fields to the environment in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 57: 67~ 73
- [5] 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. 171~ 196. Cai G X. Ammonia volatilization. In: Zhu Z L, Wen Q X. eds. *Nitrogen in Soils of China* (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technique Press, 1992. 171~ 196
- [6] Larsen S, Gunary D. Ammonia loss from ammoniac fertilizers applied to calcareous soils. *J. Sci. Food Agric.*, 1962, 13: 566~ 572
- [7] 中华人民共和国化工部. 中国化工年鉴. 北京: 中国化学工业出版社, 1996. 326~ 328. Ministry of Chemical Industry of the People's Republic of China. *Chemical Industry Yearbook of China* (In Chinese). Beijing: Chemical Industry Press of China, 1996. 326~ 328
- [8] 朱兆良. 农田生态系统中化肥氮的去向和氮素管理. 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. 213~ 249. Zhu Z L. Management in nitrogen and fate of fertilizer nitrogen in agroecologic system. In: Zhu Z L, Wen Q X. eds. *Nitrogen in Soils of China* (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technique Press, 1992. 213~ 249
- [9] Freney J R, Trevitt A C F, 朱兆良, 等. 水田氨挥发的测定方法. *土壤学报*, 1987, 24(2): 142~ 151. Freney J R, Trevitt A C F, Zhu Z L, *et al.* Methods for estimating volatilization of ammonia from flooded rice fields (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1987, 24(2): 142~ 151
- [10] 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
- [11] Freney J R, Leuning R, Simpson J R, *et al.* Estimating ammonia volatilization from flooded rice fields by simplified techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985, 49: 1 049~ 1 054
- [12] 田光明,蔡祖聪,曹金留,等. 镇江丘陵地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

AMMONIA VOLATILIZATION FROM PADDY FIELDS IN THE TAIHU LAKE REGION AND ITS INFLUENCING FACTORS

Song Yongsheng¹ Fan Xiaohui¹ Lin Dexi² Yang Linzhang¹ Zhou Jianmin¹

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 353000, China)

Abstract Ammonia volatilization was assessed with a nondisturbing micrometeorological technique after urea application in three different periods in paddy fields (Gley stagnic Anthrosol) of the Taihu Lake region. And some factors (such as climate, NH_4^+ -N concentration in floodwater, *et al.*) influencing the ammonia loss were also studied. The results indicated that the ammonia volatilization loss from the applied urea in the paddy fields varied between 18.6% and 38.7% of the total N applied each time. The peak of ammonia loss occurred within the first week after the application, amounting to 80.7%~ 94.3% of the total ammonia loss in each period.

The highest ammonia volatilization flux from the paddy fields occurred within the first 24~ 72 hours after the application of basal fertilizer, tillering fertilizer and ear bearing fertilizer, being 7.49 , 11.17 , and $5.52 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectively in Treatment HN and N 3.01, 6.79, and $1.72 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in Treatment LN.

The ammonia loss from the tillering fertilizer was the highest and from the ear bearing fertilizer was the lowest. Factors influencing ammonia volatilization loss varied in effect in different rice growing stages. Significantly positive relationship was observed between NH_3 loss and NH_4^+ -N concentration in the surface water in the paddy fields in all the three fertilization periods.

Key words Paddy field; Urea; Ammonia volatilization; Influencing factor