植物营养与肥料学报 2010,16(1):6-13
Plant Nutrition and Fertilizer Science

优化施氮下稻-麦轮作体系氮肥氨挥发损失研究

夏文建[1],周 卫[1*],梁国庆[1],王秀斌[1],孙静文[1],李双来[2],胡 诚[2],陈云峰[2]
(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,农业部作物营养与施肥重点开放实验室,北京 100081;
2 湖北省农业科学院植保土肥所,湖北武汉 430064)

摘要:采用密闭室连续通气法研究了优化施氮下湖北稻-麦轮作体系农田氨挥发损失。结果表明,肥料氮素氨挥发损失量随施肥量增加而增加。施肥处理小麦季氨挥发损失量为 N 11.37~17.05 kg/hm^2,肥料氮氨挥发损失率为 4.75%~5.43%,氨挥发峰值大约发生在施肥后的第 3~5 d,肥料氨挥发过程持续 7~10 d 水稻季氨挥发损失量为 N 32.50~62.82 kg/hm^2,肥料氮氨挥发损失率为 8.24%~19.38%,氨挥发峰值大约发生在施肥后的第 2~3 d,氨挥发过程持续 5~7 d。水稻季和小麦季氨挥发之间差异显著,整个稻-麦轮作体系氨挥发主要发生在水稻季,约占整个轮作体系的 74.08%~78.65%。同习惯施氮相比,基于作物阶段氮素吸收增加追肥比例和施肥次数的优化施氮能有效减少肥料氮的氨挥发损失。

关键词:稻麦轮作;氨挥发;水稻土;优化施氮
中图分类号:S344.13;S143.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2010)01-0006-08

Effect of optimized nitrogen application on ammonia volatilization from paddy field under wheat-rice rotation system

XIA Wen-jian[1], ZHOU Wei[1*], LIANG Guo-qing[1], WANG Xiu-bin[1], SUN Jing-wen[1], LI Shuang-lai[2], HU Cheng[2], CHEN Yun-feng[2]
(*1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS/Key Lab of Crop Nutrition and Fertilization Science, MOA, Beijing 100081, China; 2 Institute of Plant Protection, Soil and Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China*)

Abstract: A continuous airflow enclosure method was used to measure the ammonia volatilization (AV) from paddy field under the wheat-rice rotation system in Hubei Province. The results indicated that total amount of AV loss generally increased with the urea application rate. In wheat growing season, AV loss varied from N 11.37-17.05 kg/ha which accounted for 4.75 to 5.43 percent of applied N, the AV from fertilizer N lasted for 7-10 days and peak of AV occurred within 3-5 days after fertilization; While in rice growing season, AV loss varied from N 32.50-62.82 kg/ha which ranged from 8.24 to 19.38 percent of applied N, the AV from fertilizer N lasted for 5-7 days and the peak occurred within 2-3 days after fertilizer was applied. Most of the AV loss occurred in the rice season, which ranged from 74.08% to 78.65% of total AV loss in the entire rotation system. Compared to farmer practice, optimizing N application associated with increasing ratios of dress N to base N fertilizer and times of split application based on plant N uptake at different growth stages could obviously reduce the AV loss under the rice-wheat rotation system.

Key words: wheat-rice rotation system; ammonia volatilization; paddy soil; optimizing N application

我国稻田氮肥用量约占氮肥总消费量的 24%,占世界水稻氮肥总消耗量的 37%,然而利用率却较低,只有 30%~35%[1-2]。氨挥发是氮素进入农田后主要的损失途径之一[3-4]。由于氨挥发受气候因素、土壤环境、施肥状况、植株生长等多种因素影响[5],稻田氨挥发损失因试验条件结果迥异。邓美

收稿日期:2009-02-18　　**接受日期**:2009-07-11
基金项目:国家水稻产业技术体系课题;国家重点基础研究发展计划课题(2007CB109307);国家科技支撑计划课题(2006BAD25B01);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助。
作者简介:夏文建(1982—),男,湖北人,博士研究生,主要从事养分循环研究。E-mail:xiawenjian@163.com
通讯作者 Tel:010-82108671, E-mail:wzhou@caas.ac.cn

华等[6]研究发现,稻、麦季均是基肥时期氨挥发最严重,建议适当减少基肥氮肥量;曹金留等[7]得出氮素损失基肥比例最小,分蘖肥比例最大;苏成国等[8]发现稻田氨挥发表现出明显的年际差异,认为氨挥发受到气候因素影响。

研究表明,通过水分管理[9]、改变耕作措施[10]、优化施氮方式[6]能有效减少氨挥发损失。然而整个稻-麦轮作体系中,如何合理运筹氮肥,减少氮肥用量,从而提高作物产量和氮肥利用率有待探索。为此,本文采用适用于田间小区试验的密闭室连续通气法[11-12]研究氨挥发损失,采用基于作物阶段氮素吸收量而增加追肥比例和施肥次数的氮肥优化施用方法,研究湖北稻-麦轮作体系氨挥发损失的特征,从而为科学施用氮肥,实现作物高产高效提供科学依据和技术途径。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验设置在湖北省农业科学院南湖实验站,位于长江中下游平原,属于典型的亚热带季风气候区。年平均日照时数为 2079.5 h,日平均气温 ≥10℃的总积温为 5189.4℃,年降水量 1300 mm 左右,年蒸发量 1500 mm,无霜期 230～300 d。土壤类型为黄棕壤发育的水稻土。主要种植方式为小麦-水稻轮作。播前 0—20 cm 土壤有机质含量 20.69 g/kg,全氮 0.864 g/kg,硝态氮和铵态氮含量分别为 5.94 mg/kg 和 13.83 mg/kg,有效磷 20.0 mg/kg,速效钾 158.47 mg/kg,pH 6.3,土壤容重 1.34 g/cm^3。

1.2　试验设计

1.2.1　小麦田间试验　基于该区域小麦施肥状况进行试验设计。按该地目标产量 4000 kg/hm^2 以及氮肥利用率 40% 计算,推荐施氮量为 N 157.5 kg/hm^2 [(目标产量－无氮肥区产量)×形成 100 kg 子粒的吸氮量/0.4/100],无氮区产量 1800 kg/hm^2,100 kg 子粒吸氮量(N)3.0 kg,而该地区农民的习惯施氮量达 N 225 kg/hm^2;同时发现苗期～拔节期,拔节期～孕穗期,以及孕穗期～成熟期小麦吸氮量大约各占总吸氮量的 1/3,而农民习惯施氮处理则是底肥和拔节肥各半。基于此,试验设 4 个处理:(1)不施氮肥(N0,对照 CK);(2)习惯施氮(N225/2,N 225 kg/hm^2 分两次施用,基肥与拔节肥各半);(3)氮肥减量(N157.5/2,N 157.5 kg/hm^2 分两次施用,基肥与拔节肥各半);(4)优化施氮(N157.5/3,N 157.5 kg/hm^2 分三次施用,基肥,拔节肥和孕穗肥各占 1/3)。氮肥为尿素(含 N 46.4%),施用方式为基肥撒施后混入土壤,追肥为撒施。各小区磷、钾肥用量相同,分别为 P_2O_5 120 kg/hm^2 和 K_2O 105 kg/hm^2,品种分别为普通过磷酸钙(含 $P_2O_5$17%),氯化钾(含 K_2O 60%),小区面积 8 m×7 m,随机区组排列,三次重复。小麦品种为郑麦 9023,2007 年 11 月 5 日施肥播种,基本苗 210×10^4 株/hm^2,2008 年 3 月 27 日施拔节肥,2008 年 4 月 22 日施孕穗肥。田间管理同当地高产田。2008 年 5 月 22 日收获。

1.2.2　水稻田间试验　基于该区域水稻施肥状况进行试验设计。该区按目标产量 6000 kg/hm^2 以及氮肥利用率 40% 计算,推荐施氮量为 N 147 kg/hm^2 [(目标产量－无氮肥区产量)×形成 100 kg 子粒的吸氮量/0.4/100],无氮区产量 3000 kg/hm^2,100 kg 子粒吸氮量(N)2.1 kg,而该地区农民的习惯施氮处理达 N210 kg/hm^2;同时发现苗期～分蘖期,分蘖期～孕穗期,以及孕穗期～成熟期水稻吸氮量大约各占总吸氮量的 1/3,而农民的习惯施氮处理则是底肥和分蘖肥各半。基于此,试验设 4 个处理:(1)不施氮肥(N0,对照对照);(2)习惯施氮(N210/2,N 210 kg/hm^2 分两次施用,基肥与分蘖肥各半);(3)氮肥减量(N147/2,N 147 kg/hm^2 分两次施用,基肥与分蘖肥各半);(4)优化施氮(即氮肥减量后移,N147/3,N 147 kg/hm^{2}分三次施用,基肥,分蘖肥和孕穗肥各占 1/3)。氮肥为尿素(含 N 46.4%),基肥为撒施后混入土壤,追肥为撒施。各小区磷、钾肥用量相同,磷、钾肥分别为普通过磷酸钙(含 P_2O_5 17%),氯化钾(含 K_2O 60%),分别为 P_2O_5 75 kg/hm^2 和 K_2O 120 kg/hm^2,全部做底肥一次施入。小区面积 8 m×7 m,随机区组排列,三次重复。水稻品种为 II 优 838。2008 年 6 月 11 日施基肥,6 月 13 日插秧,基本苗 20×10^{4}株/hm^2。氮肥追肥分别为 2008 年 7 月 23 日分蘖肥,2008 年 8 月 6 日孕穗肥,2008 年 9 月 22 日收获。

1.3　氨气的捕获方法

采用密闭室连续抽气法测定[11-12]。密闭室采用透明有机玻璃材料制作,内径 18 cm,装置高度 30 cm,密闭室真实高度根据田间水深和插入泥土中的深度调整。室顶部有两个通气孔,其中一个通气孔(直径 30 mm)与架在离地面 2.0 m 高度的通气管相连,以减少地表空气交换对氨挥发测定的影响,另一通气孔(直径 11 mm)与装有硼酸吸收液(80 mL H_3BO_3 20 g/L)的洗气瓶相连(图 1)。通过抽气减压方式使密闭室中空气通过硼酸吸收液从而将其中的

氨吸收固定，抽气速率为 15～20 倍（密闭体积）/min[13]。用标准酸（0.01 mol/L H_2SO_4）滴定硼酸计算所吸收的氨。

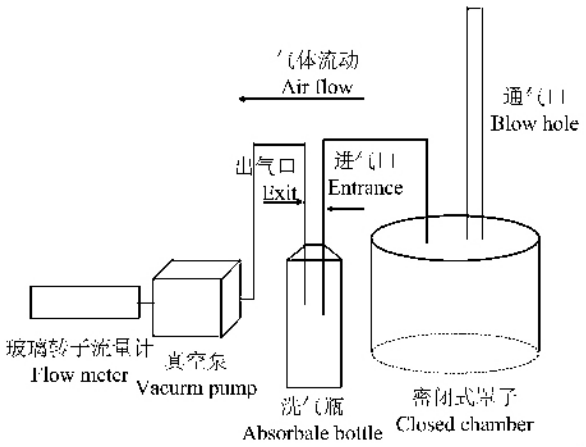

图 1 田间小区氨挥发收集装置示意图

Fig.1 Sketch of NH_3 absorption equipment in the field plots

土壤氨挥发于尿素施入后当天开始测定，每天取样 2 次，分别为上午 8:00～10:00 和下午 14:00～16:00 连续抽气 2 h，连续取样 7～14 d，直到各处理同对照间无明显差异。每次抽气同时记录田间气温、地表温度（水稻季记录田间水温）。

1.4 测定方法

采用 0.01 mol/L 硫酸滴定硼酸中所吸收的氨；土壤 pH 采用 1:1 的土水比，电位计法测定；土壤有机质、有效磷、速效钾浓度采用常规方法测定。

1.5 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS13.0 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 小麦季氨挥发

2.1.1 小麦季氨挥发损失速率 基肥时期氨挥发速率最低，持续时间最长（图 2），主要原因是该时期气温和地表温度是在三个施肥时期最低，分别为 5～23.5℃和 17～24℃（图 3）。在尿素基施第 3 d 各处理出现第一个氨挥发高峰，不施氮肥（N0）、习惯施氮（N225/2）、氮肥减量（N157.5/2）和优化施氮（N157.5/3）处理氨挥发速率分别为 N 0.06、0.39、0.18 和 0.09 kg/(hm²·d)，第 4 d 由于降雨和温度下降，氨挥发速率明显下降，第 5 d 出现第二个氨挥发高峰，各处理分别为 N 0.03、0.35、0.18 和 0.10 kg/(hm²·d)。随后氨挥发速率逐渐下降，大约持续 10 d 左右，之后各施肥处理氨挥发速率基本无差异。

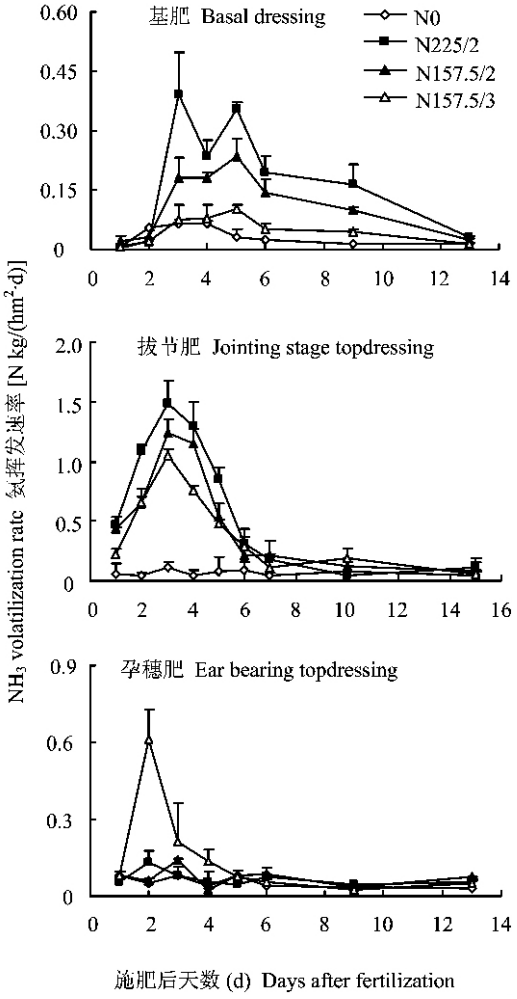

图 2 小麦季氨挥发速率

Fig.2 Ammonia volatilization rate during wheat growing season

（N225/2—习惯施氮 Farmer practice；N157.5/2—氮肥减量 Reducing N application；N157.5/3—优化施氮 Optimizing N application）

拔节期气温逐渐上升，但温差不大，平均气温 23～27℃，地表温度 25～29.5℃（图 3）。施肥后氨挥发速率逐渐上升，第 3 d 达到氨挥发高峰，N0、N225/2、N157.5/2 和 N157.5/3 处理氨挥发速率分别为 N 0.11、1.48、1.24、和 1.05 kg/(hm²·d)，氨挥发速率随氮肥用量减少而降低。其后氨挥发速率逐渐下降，第 7 d 各处理氨挥发速率在 N 0.04～0.21 kg/(hm²·d)，处理间无显著差异。

孕穗期平均气温 25～32℃，地表温度 27～34℃（图 3）。期间仅优化施氮处理追施尿素，氨挥发在施肥后第 2 d 达到最大值 N 0.91 kg/(hm²·d)，随后

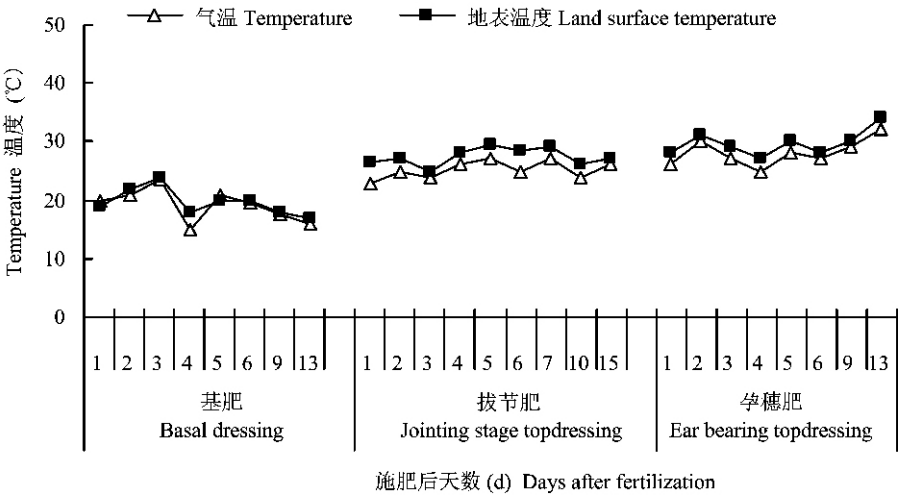

图 3　小麦季氨挥发测定时期田间温度

Fig.3　*In situ* temperature during the wheat experiment period

逐渐下降,第 6 d 与其余各处理无显著差异。孕穗期间未施肥的各处理氨挥发速率在 N 0.03～0.14 kg/(hm^2·d),无明显氨挥发峰。

在整个冬小麦生长时期由于气温较低(图 3),氨挥发速率均不高,各施肥时期氨挥发变化规律基本一致,氨挥发峰值一般出现在施肥后 3～5 d,氨挥发速率峰值随施肥量减少而降低,氨挥发持续时间为 7～10 d。基肥时期由于温度最低,氨挥发速率最低,持续时间最长,另一方面可能与基肥撒施后翻入土中的施肥方式有关。拔节期和孕穗期随着温度的上升,氨挥发持续时间有减少的趋势。

2.1.2　小麦季不同施肥时期累积氨挥发损失量　从图 4 可看出,小麦不同施肥时期累积氨挥发损失量不同,氨挥发集中在基肥和拔节肥两个关键的施肥时期,基肥期各施肥处理氨挥发损失量范围为 N 0.39～1.39 kg/hm^2。氨挥发最高发生在拔节期,各施肥处理氨挥发损失量范围为 N 3.81 ～ 5.82 kg/hm^2。由于作物品种及气候条件等因素,拔节肥施用时期较晚,当时气温已经较高(23～27℃),促进了氨挥发损失。孕穗肥时期,优化施氮处理(N157.5/3)累积氨挥发损失量为 N 1.25 kg/hm^2,其余处理 N 0.44～0.58 kg/hm^2。总体上氨挥发量拔节期 > 基肥期 > 穗肥期,其中拔节期较高,占整个生育期的 35.1%～47.5%。

2.2　水稻季氨挥发

2.2.1　水稻季氨挥发损失速率　同小麦季相比,水稻季氨挥发速率明显提高(图 5)。基肥时期各处理在施肥后第 2 d 即达到氨挥发高峰,不施氮肥(N0)、习惯施氮(N210/2)、氮肥减量(N147/2)和优化施氮(N147/3)分别为 N 0.48、2.98、2.26 和 0.81 kg/(hm^2·d),第 3 d 由于温度降低各处理氨挥发均有较大下降。习惯施氮第 4 d 的氨挥发速率较高,达到 N 2.96 kg/(hm^2·d),而其他处理氨挥发速率未见明显上升。第 5 d 灌水,其后各处理氨挥发速率略有上升,但差异不显著,不施肥对照氨挥发速率也较高,主要是因为当时气温高达 30℃,有利于氨挥发的进行。

分蘖期平均气温 32～38℃,水温 30～33℃,为整个生育期中最高气温(图 6),各处理氨挥发速率也最高。施肥后第 2 d 各处理达到氨挥发高峰,氨挥发速率 N0、N210/2、N147/2 和 N147/3 分别为 N 1.64、8.29、5.24 和 3.31 kg/(hm^2·d),第 3 d 灌水导致氨挥发速率有所下降,施肥处理氨挥发速率范围为 N 1.74～4.86 kg/(hm^2·d)。第 4、5 d 由于温度较高(37～38℃),氨挥发速率较高,施肥处理达 N 1.19～6.15 kg/(hm^2·d)。其后氨挥发速率迅速下降,除习惯施肥持续到第 9 d 外,其余处理第 6 d 后与对照间无显著差异。

孕穗肥时期平均气温 29～32.5℃,水温 27～30.5℃(图 6)。期间仅优化施氮处理 N147/3 追施尿素,氨挥发在施肥后第 2 d 达到最大值 N 3.47 kg/(hm^2·d),第 3 d 降低为 N 3.02 kg/(hm^2·d),之后迅速下降,第 5 d 后与其余各处理无显著差异。

整个水稻施肥期氨挥发持续时期短但强度大,在 3～5 d 后氨挥发速率即降到对照水平。与小麦季氨挥发规律一致,水稻季氨挥发速率峰值随施肥量减少而降低,习惯施氮处理由于施肥量较高,且受到灌水和温度等影响,氨挥发作用持续时间较长。

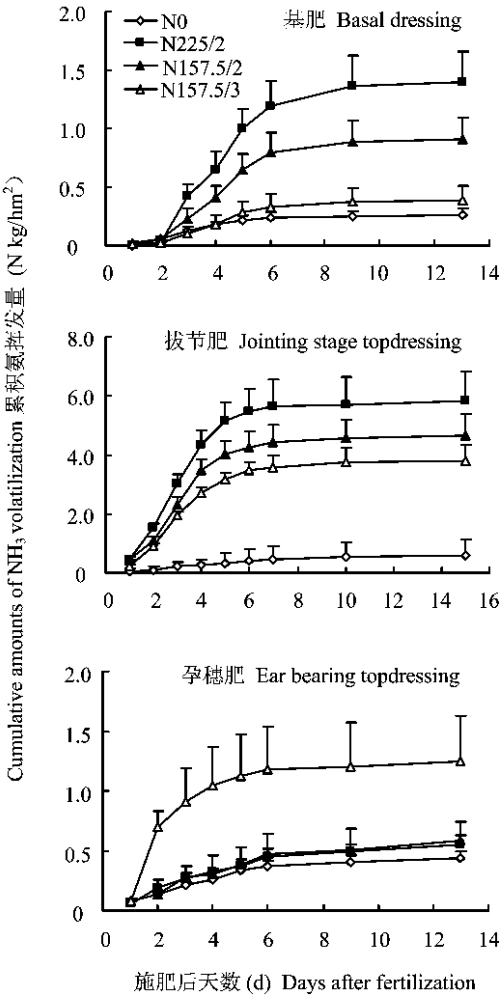

图4 小麦季累积氨挥发损失量

Fig.4 Cumulative amounts of ammonia volatilization in soil during wheat growing season

(N225/2—习惯施氮 Farmer practice ;N157.5/2—氮肥减量 Reducing N application ;N157.5/3—优化施氮 Optimizing N application)

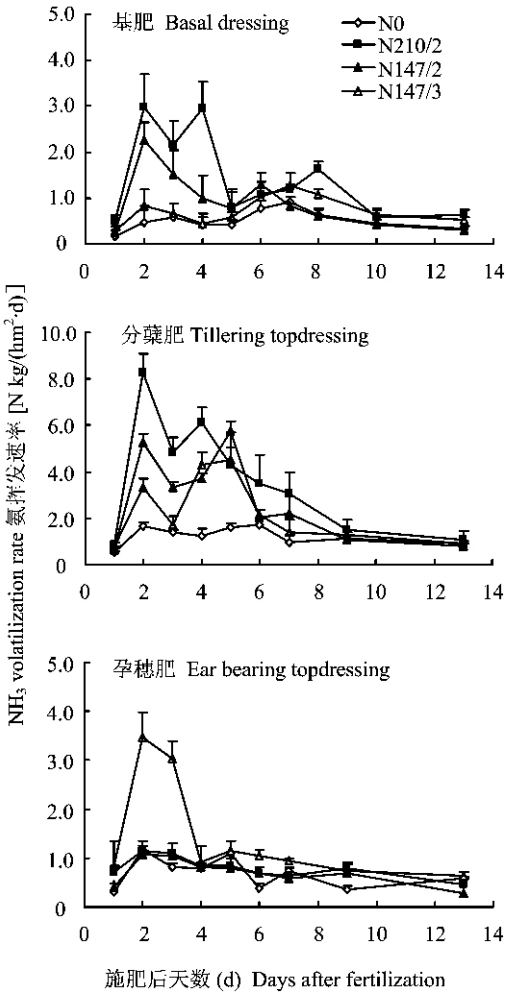

图5 水稻季氨挥发速率

Fig.5 Ammonia volatilization rate during rice growing season

(N210/2—习惯施氮 Farmer practice ;N147/2—氮肥减量 Reducing N application ;N147/3—优化施氮 Optimizing N application)

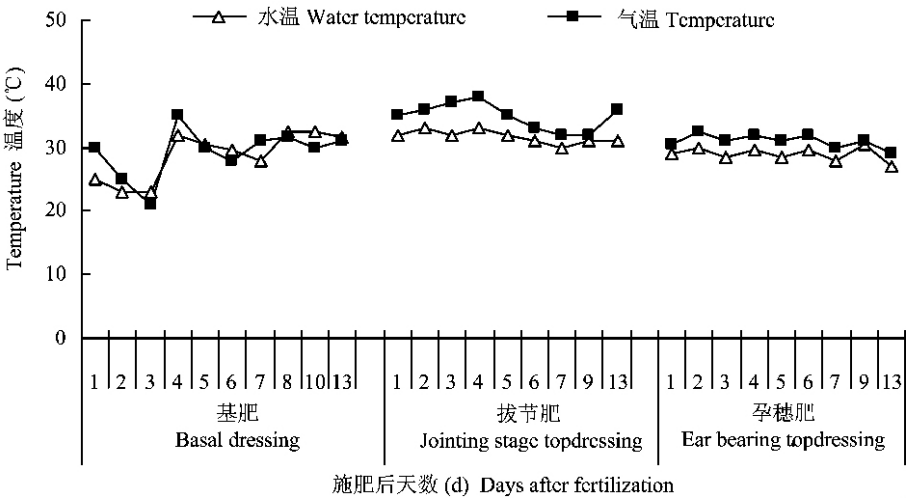

图6 水稻季氨挥发测定时期田间温度

Fig.6 *In situ* temperature during the rice experiment period

2.2.2　水稻季不同施肥时期累积氨挥发损失量

水稻季氨挥发主要发生在基肥期和分蘖肥时期(图7),施肥处理氨挥发损失分别为 N 7.31～14.48 kg/hm²和 N 12.84～33.65 kg/hm²;孕穗肥时期优化施氮处理氨挥发量为 N 12.82 kg/hm²,其余处理累积氨挥发损失量为 N 6.29～7.22 kg/hm²。累积氨挥发损失量显著高于小麦季。与小麦季有明显差异的是水稻季不施氮肥(N0)处理有较高的氨挥发损失,基肥、分蘖肥和孕穗肥时期分别达到 N 5.16、11.13、6.29 kg/hm²,这可能主要是由于高温和田间灌溉水含有较高的铵离子(4.20 mg/L)而引起的。不同时期氨挥发损失量分蘖期 > 基肥 > 孕穗期,分蘖期氨挥发损失量占整个生育期的 43.2%～50.9%。孕穗期累积氨挥发损失量较低,可能是由于该时期水稻植株冠层较厚,田间郁闭度较高抑制了氨挥发[7]。

2.3　整个稻麦轮作周期氨挥发损失特征

土壤氨挥发速率和氨挥发总量均受施肥量影响,施肥量越高氨挥发速率和氨挥发损失总量均越大。不同施肥时期氨挥发动态变化趋势一致,均在施肥后出现一个短暂的氨挥发高峰,然后迅速下降。小麦季氨挥发高峰发生在施肥后的 3～5 d,大约持续 10 d(图 2),水稻季氨挥发在施肥后第 2 d 即达到峰值,大约持续 5～7 d(图 5)。氨挥发速率主要受当次施肥的影响,受前期施肥或土壤养分含量影响不大。因此控制氨挥发损失措施的关键时期是施肥后一周内。

在整个稻麦轮作周期,不同处理土壤氨挥发损失总量在 N 26.95～79.88 kg/hm²,氮肥氨挥发损失率在 6.49%～12.19%(表 1)。小麦季土壤氨挥发损失量范围为 N 4.83～17.05 kg/hm²,肥料氮氨挥发损失率为 4.75%～5.43%;水稻季土壤氨挥发损失量为 N 22.11～62.82 kg/hm²,肥料氮氨挥发损失率为 8.24%～19.38%。稻麦轮作体系肥料氮氨挥发损失主要发生在水稻季,占整个轮作周期氨挥发总量的 74.08%～78.65%,大约是小麦季的 3 倍。

优化施氮处理能有效降低氨挥发损失总量,减少肥料氮的氨挥发损失率。与同等施肥量的推荐氮肥用量处理相比,优化施氮氨挥发量减少了 N 5.32kg/hm²,氨挥发损失率降低了 1.75%(表 1)。因此基于作物阶段氮素吸收增加追肥比例和施肥次数的优化施氮能有效减少肥料氮的氨挥发损失。

2.4　小麦和水稻产量

与不施氮肥处理相比,小麦季习惯施氮、氮肥减量和优化施氮处理,产量分别增加了 106.9%、96.4% 和 108.8%,水稻季分别增加了 18.4%、15.5%和 18.3%(表 2)。可见与习惯施氮相比,优化施氮处理在不降低作物产量的基础上能节约氮肥 30%。

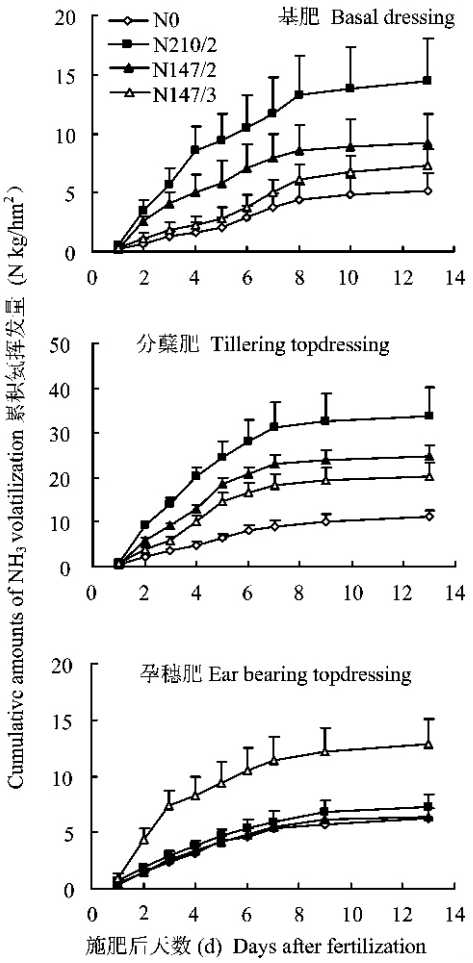

图 7　水稻季累积氨挥发损失量

Fig.7　Cumulative amounts of ammonia volatilization in soil during rice growing season

(N210/2—习惯施氮 Farmer practice;N147/2—氮肥减量 Reducing N application;N147/3—优化施氮 Optimizing N application)

3　讨论与结论

农田氨挥发受温度和降水影响。Tian[14]研究认为气温是氨挥发的重要驱动因子。良好的土壤水分环境有利于尿素水解向铵态氮转化,会增加氮的氨挥发损失量[14-15],但降水通常也会使尿素等随水下渗到深层土壤,从而降低氨挥发速率[7,16]。湖北地区冬小麦生长季节集中在冬季和春季,降雨较多,且通常伴随着降温,不利于氨挥发的发生。本研究表明该地区冬小麦季肥料氮的氨挥发持续时间长,可

表1 小麦-水稻轮作周期土壤氨挥发损失(N kg/hm²)

Table 1 NH_3 volatilization loss in wheat-rice rotation system

处理 Treatments	小麦季 Wheat season	水稻季 Rice season	总损失 Total amount of NH_3 volatile. loss
N0(CK)	4.83 ± 1.02	22.11 ± 3.31	26.95
小麦 Wheat N225/2, 水稻 Rice N210/2	17.05 ± 3.24(5.43)	62.82 ± 3.86(19.38)	79.88(12.17)
小麦 Wheat N157.5/2, 水稻 Rice N147/2	13.03 ± 3.24(5.20)	45.88 ± 4.58(16.16)	58.91(10.50)
小麦 Wheat N157.5/3, 水稻 Rice N147/3	12.32 ± 2.34(4.75)	41.27 ± 2.53(13.03)	53.59(8.75)

注(Note):N225/2,N210/2—习惯施氮 Farmer practice;N157.5/2,N147/2—氮肥减量 Reducing N application;N157.5/3,N147/3—优化施氮 Optimizing N application. 括号内表示氨挥发占施肥量的% The number in parentheses indicated the percentage of the amount of applying N fertilizer.

表2 小麦和水稻子粒产量

Table 2 Grain yield of wheat and rice

处理 Treatments	小麦季 Wheat season (kg/hm²)	增产 Increment (%)	水稻季 Rice season (kg/hm²)	增产 Increment (%)
N0(CK)	1780 b		4242 b	
小麦 Wheat N225/2, 水稻 Rice N210/2	3682 a	106.9	5021 a	18.4
小麦 Wheat N157.5/2, 水稻 Rice N147/2	3497 a	96.4	4898 a	15.5
小麦 Wheat N157.5/3, 水稻 Rice N147/3	3717 a	108.8	5018 a	18.3

注(Note):N225/2,N210/2—习惯施氮 Farmer practice;N157.5/2,N147/2—氮肥减量 Reducing N application;N157.5/3,N147/3—优化施氮 Optimizing N application. 同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant at 5% level.

达7～10 d,但损失量较少,施肥处理氨挥发损失量为N 11.37～17.05 kg/hm²,损失率为4.75%～5.43%。而水稻生长季节气温较高,稻田处于淹水条件,施入的尿素能很快进行水解。当气温高、水分蒸发速率大时,田间水中的氨会随水分大量逸散[9]。从而造成水稻季氨挥发损失量较大且集中发生在较短时间内,Iqbal等[17]研究发现,氨挥发损失发生在施肥后的6 d内,张静等[18]研究认为氨挥发过程主要发生在施肥后的3 d内。我们在长江中下游地区的研究结果表明,水稻季氨挥发在施肥后可持续5～7 d。施肥处理氨挥发损失量为N 32.50～62.82 kg/hm²,损失率为8.24%～19.38%(表1)。在整个稻麦轮作周期,氮肥氨挥发损失主要发生在水稻季,占氨挥发总量的74.08%～78.65%,大约是小麦季的3倍。邓美华等[6]研究也显示稻季的氨挥发损失比麦季严重,且麦季持续时间长,氨挥发通量低,稻季氨挥发损失在施肥后1周左右,与我们的研究结果一致。因此在稻-麦轮作体系控制氮肥氨挥发损失应更多关注水稻生长季。

农田氨挥发受作物生长状况的影响。作物本身是氨的释放体和吸收体[19],作物生长状况是氨挥发的重要影响因素[20]。曹金留等[7]研究认为较高的稻田郁闭度对氨挥发的抑制作用大于气候条件的影响。我们的研究结果显示,小麦拔节期和水稻分蘖期由于气温较高,田间郁闭度低,施肥处理累积氨挥发损失量分别占整个生育期的35.1%～47.5%和43.2%～50.9%。小麦季氨挥发量拔节期 > 基肥 > 穗肥,水稻季氨挥发量分蘖期 > 基肥 > 孕穗期,稻麦季均为穗肥时期最低,可能是由于田间郁闭度高抑制了氨挥发。因此在稻-麦轮作体系中控制氮肥氨挥发损失应该重点在小麦拔节期和水稻分蘖期,宋勇生等[21]在太湖地区稻季的研究也有类似的结论。

农田氨挥发受氮肥运筹方式影响。尿素的施用促进了农田氨挥发损失,并随施肥量增加而增加[6,22-23]。过量施用氮肥不仅不会增加作物产量反而增加了氮肥损失风险,因此推荐合适的氮肥用量显得非常重要。Lin等[22]研究认为太湖地区水稻季最经济的氮肥用量为N 227 kg/hm²。本文研究结果表明,减少氮肥用量能有效降低农田氨挥发损失,但作物产量也会有所降低,如果采用减少施肥量并结合对氮肥施用时期进行合理调控的优化施氮,作物产量不会减少,同时还能进一步减少氮肥的氨挥发损失。可见,基于作物阶段氮素吸收增加追肥比例

和施肥次数的优化施氮能有效减少肥料氮的氨挥发损失。

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[J]. 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[J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(9):1095-1103.

[2] 李庆逵. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌:江西科学技术出版社,1997.
Li Q K. Fertilizer issues in the sustainable development of China agriculture[M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1997.

[3] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素 [M]. 南京:江苏科技出版社,1992. 171-185.
Zhu Z L, Wen Q X. Soil nitrogen in China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 171-185.

[4] 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[J]. 土壤,1985,17(5):225-229.
Cai G X, Zhu Z L, Zhu Z W *et al*. The study of nitrogen losses from ammonium bicarbonate and urea in paddy field [J]. Soils, 1985, 17(5):225-229.

[5] Alberto S C, Thomas H M, Augusto A *et al*. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions [J]. Agric. Ecosys. Environ., 2008, 126:243-249.

[6] 邓美华,尹斌,张绍林,等. 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.
Deng M H, Yin B, Zhang S L *et al*. Effects of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy fields [J]. Soil. 2006, 38(3):263-269.

[7] 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[J]. 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 [J]. J. Nanjing Agric. Univ., 2000, 23(4):51-54.

[8] 苏成国,尹斌,杨林章,等. 太湖地区稻季氮肥的氨挥发损失及其防止措施[J]. 西南农业学报,2004,17(增):250-255.
Su C G, Yin B, Yang L Z *et al*. Ammonia volatilization of nitrogen fertilizer from rice fields in Taihu lake region and its reduction methods [J]. Southwest China J. Agric. Sci., 2004, 17 (Suppl.):250-255.

[9] Li H, Liang X L, Chen Y X *et al*. Ammonia volatilization from urea in rice fields with zero-drainage water management [J]. Agric. Water Manag., 2008, 95:887-894.

[10] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H *et al*. Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-till soils. A laboratory comparison[J]. Soil Till. Res., 2009, 103(2):310-315.

[11] Kissel D E, Brewer H L, Arkin G F. Design and test of a sampler for ammonia volatilization[J]. Soil Sci. Soci. Am. J., 1977, 42:1133-1138.

[12] Fillery I R P, De Date S K. Ammonia volatilization from nitrogen volatilization as an N loss mechanism in flooded rice fields[J]. Fert. Res., 1986, 9:78-98.

[13] Pancras H, Khanif Y M. Effect of air-flow rates on laboratory measurement of NH_3 volatilization[J]. Pertanika, 1988, 11(2):323-325.

[14] Tian G M, Gao J L, Cai Z C *et al*. Ammonia volatilization from winter wheat field top-dressed with urea[J]. Pedosphere, 1998, (4):331-336.

[15] 王旭刚,郝明德,陈磊,等. 长期施肥条件下小麦农田氨挥发损失的原位研究[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(1):18-24.
Wang X G, Hao M D, Chen L *et al*. In situ study of ammonia volatilization from wheat cropland under long-term continuous fertilization[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(1):18-24.

[16] 张玉铭,胡春胜,董文旭. 华北太行山前平原农田氨挥发损失[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(3):417-419.
Zhang Y M, Hu C S, Dong W X. Ammonia volatilization from wheat-maize rotation field in the piedmont of Taihang [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(3):417-419.

[17] Iqbal T, Tian G M, Liang X Q *et al*. Measurement of ammonia emission following surface application of urea fertilizer from irrigated paddy rice fields[J]. Agric. Sci. China., 2005, 4(4):288-293.

[18] 张静,王德建. 太湖地区乌栅土稻田氨挥发损失的研究[J]. 中国生态农业学报,2007,11(15):84-87.
Zhang J, Wang D J. Ammonia volatilization in gleyed paddy field soils of Taihu Lake region [J]. Chin. J. Eco-Agric., 2007, 11(15):84-87.

[19] Hayashi K, Nishimura S, Yagi K, Ammonia volatilization from a paddy field following applications of urea: Rice plants are both an absorber and an emitter for atmospheric ammonia [J]. Sci. Total Environ., 2008, 390:485-494.

[20] 田玉华,贺发云,尹斌,等. 太湖地区氮磷肥施用对稻田氨挥发的影响[J]. 土壤学报,2007,44(4):893-900.
Tian Y H, He F Y, Yin B, *et al*. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region as affected by N and P combination in fertilization[J]. Acta Pedol. Sin., 2007, 44(4):893-900.

[21] 宋勇生,范晓辉,林德喜,等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究[J]. 土壤学报,2004,41(2):265-269.
Song Y S, Fan X H, Lin D X *et al*. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region and its influence factors [J]. Acta Pedol. Sin., 2004, 41(2):265-269.

[22] Lin D X, Fan X H, Hu F *et al*. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu lake region[j]. Pedosphere, 2007, 17(5):639-645.

[23] 黄进宝,范晓晖,张绍林. 太湖地区铁渗水耕人为土稻季上氮肥的氨挥发[J]. 土壤学报,2006,43(5):786-792.
Huang J B, Fan X H, Zhang S L. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizer in the rice field of Fe-leachi-stagnic anthrosols in the Taihu lake region [J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 43(5):786-792.