

水氮耦合对水稻田间氨挥发规律的影响

肖 新, 杨露露, 邓艳萍, 汪建飞

(安徽科技学院城建与环境学院, 安徽 凤阳 233100)

摘要:在防雨棚池栽试验中应用通气法研究了水氮耦合对稻田土壤氨挥发速率的动态变化及损失量。结果表明,稻田施用氮肥后有明显 NH_3 挥发损失,整个生育期累计氨挥发量为 $31.67\text{--}69.70 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占施氮量的 17.95%~28.64%;不同生育时期氨挥发量的大小依次为返青期>拔节孕穗期>分蘖期>抽穗开花期>乳熟期,挥发高峰出现在施氮肥后的 1~3 d 内;随着施氮水平增加,田间氨挥发量显著增加。与此同时,稻田水分状况对 NH_3 挥发损失具有重要影响,与常规灌溉模式相比,控制灌溉条件下氨挥发总量和氨挥发损失率均较小,且不同施氮水平间差异显著。就氨挥发损失率而言,在试验条件下水氮耦合效应显著,以控制灌溉模式下施氮量为 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的氨挥发损失率最低,为 17.59%。

关键词:控制灌溉;氮肥;稻田;氨挥发

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)10-2066-06

Effects of Irrigation and Nitrogen Fertilization on Ammonia Volatilization in Paddy Field

XIAO Xin, YANG Lu-lu, DENG Yan-ping, WANG Jian-fei

(Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China)

Abstract: Controlling the ammonia (NH_3) volatilization from nitrogen (N) fertilization could be a good strategy to reduce N loss in crop growing season. The interaction of irrigation and N fertilization NH_3 volatilization were conducted in an experiment of pool culture within rain-proof shelter in paddy field. Data were collected during the growing season of 2009 and 2010 from treatments under controlled and conventional irrigation receiving N application of $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and $270 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. The NH_3 volatilization was determined by the venting method. Results showed that the total amounts of NH_3 volatilization in the whole growth period ranged from $31.67 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ to $69.70 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ among the treatments, accounting for 17.95%~28.64% of N applied. The peak of ammonia volatilization appeared in 1~3 days after each N application, regardless of treatments. The NH_3 volatilization during the whole growing season was in order: returning green stage>jointing-booting stage>tillering stage>heading-flowering stage>milky stage. Irrigation and N fertilization significantly influenced on NH_3 volatilization. Total amounts and loss rate of NH_3 were lower in controlled irrigation compared with conventional irrigation. With the increment of N application rates, NH_3 volatilization significantly increased. The loss rate of NH_3 volatilization (17.59%) was lowest under controlled irrigation with N application of $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. We concluded that combining controlled irrigation and reducing N fertilization can reduce NH_3 volatilization in the Paddy field.

Keywords: controlled irrigation; nitrogen fertilization; paddy field; ammonia volatilization

氮素和水是水稻生产的两大重要因素,氮素影响仅次于水,但却构成了水稻生产成本的主要投入部分。在稻田土壤系统中,水稻氮肥利用效率较低,损失量较大,氨挥发占很大比例,国内外研究表明稻田氨挥发损失占施氮量的 10%~60%,是稻田氮肥损失

的主要途径之一^[1]。与此同时,我国农田水分利用效率比较低,其中农田灌溉水的利用率平均仅为 40%~45%,农田灌溉水的利用效率仅为 $0.25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,远远低于发达国家的 70%~80% 和 $1.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的水平^[2-3]。研究表明,适宜的灌溉管理、施肥方式、水肥互作调控措施对提高水稻水氮利用效率与促进增产均具显著作用^[4]。近年来,国内学者围绕水氮综合考虑对水稻的产量、吸氮量、生理形状、品质、氮代谢关键酶活性的影响等进行了大量研究^[4-6],目前关于稻田氨

收稿日期:2012-02-26

基金项目:安徽省青年科学基金项目(10040606Q12)

作者简介:肖 新(1980—),男,博士,副教授,主要从事环境生态与区域规划研究。E-mail:xiaoxin8088@126.com

挥发损失的研究大都针对单一的氮肥或灌水措施^[1,7-10],而水氮互作对氨挥发的影响鲜见报道。为此,本研究通过防雨棚池栽试验分析了节水灌溉和氮肥施用对稻田氨挥发的影响,以期为明确优质高效水稻生产中最佳水氮利用模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2009年与2010年在安徽省凤阳县安徽科技学院种植科技园进行。试验区位于南方丘陵地带,属于北亚热带亚湿润季风气候区,年平均温度15.2℃,日照时数1711.0 h,平均无霜期212 d,年降雨量1236.2 mm,年蒸发量1609.7 mm,降水年度和季节分布极不均匀,常年约50%降水集中在4—6月,夏秋之交高温少雨,7—9月蒸发量接近全年的一半,常出现季节性干旱。供试土壤为黄棕壤,其基本理化性质为:pH6.21,速效磷32.8 mg·kg⁻¹,速效钾64.9 mg·kg⁻¹,有机质9.87 g·kg⁻¹,碱解氮68.10 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验设置两种水分条件(C1—控制灌溉:返青期田间保持10~20 mm的水层,黄熟期自然落干,其他各生育期灌水后均不建立水层,土壤含水率上限为饱和含水率,在分蘖前期、分蘖中期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗扬花期、灌浆期和乳熟期的土壤含水率下限分别取饱和含水率的70%、65%、60%、80%、80%和70%。C2—常规灌溉:灌溉制度参照当地农民的大田灌水,除分蘖末期晒田和黄熟期不建立水层外,各生育阶段保持浅水层(10~60 cm)和3个氮肥(纯氮)施用水平(N1—90 kg·hm⁻²、N2—180 kg·hm⁻²、N3—270 kg·hm⁻²),共6个处理(C1N1采用控制灌溉和施氮水平90 kg·hm⁻²、C1N2采用控制灌溉和施氮水平180 kg·hm⁻²、C1N3采用控制灌溉和施氮水平270 kg·hm⁻²、C2N1采用常规灌溉和施氮水平90 kg·hm⁻²、C2N2采用常规灌溉和施氮水平180 kg·hm⁻²、C2N3采用常规灌溉和施氮水平270 kg·hm⁻²),每个处理设3个重复,共计18个小区,随机区组排列,每个小区面积3.75 m²(3 m×1.25 m),小区深度1.2 m。各小区之间用砖砌混凝土隔离,防止小区的水分交换,小区上设有防雨棚。

供试水稻品种为冈优527。6月8日移栽,10月8日收获。分蘖肥和穗肥分别于6月20日和7月16日施用,氮肥施用量为基肥:分蘖肥:穗肥=5:2:3,氮、磷、钾肥料品种分别为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P₂O₅

12%)75 kg·hm⁻²和氯化钾(含K₂O 60%)150 kg·hm⁻²,基肥结合土壤耕翻,施于土壤中,追肥与水充分混合,结合灌溉施于田间。病虫害的防治及除草等栽培管理同当地大田水稻生产。

1.3 氨挥发的测定

采用通气法测定氨的挥发量^[11],这种方法适用于小区试验和多因素的对比研究,其原理是应用原位测定将氨捕获在一个聚氯乙烯硬质塑料管和两片浸过磷酸甘油的海绵中,再用KCl来浸取下层海绵吸收土壤挥发的氨,浸取液中的铵态氮用蒸馏定氮法或连续流动分析仪(TRACCS2000)测定。田间土壤的氨挥发速率计算公式为:

$$\text{氨挥发速率} = [M/(A \times D)] \times 10^{-2}$$

式中:氨挥发速率为单位时间内单位面积上氨挥发量(以纯氮计),kg·hm⁻²·d⁻¹;M为通气法单个装置平均每次测得的铵态氮量,mg;A为捕获装置的横截面积,m²;D为每次连续捕获的时间,d。

氨挥发损失率的计算公式为:

$$\text{氨挥发损失率} = (\text{氨挥发损失量}/\text{氮肥总施肥量}) \times 100\%$$

1.4 数据处理

采用Excel 2003和SPSS10.0软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 对稻田氨挥发速率动态变化的影响

从图1可以看出,移栽施基肥后,田间土壤氨挥发迅速增强,施肥后的2 d内,各处理小区的氨挥发速率已达最高,为5.30~19.66 kg·hm⁻²·d⁻¹,处理之间表现为C2N3>C1N3>C2N2>C1N2>C2N1>C1N1,此后迅速下降。连续测定至第7 d(6月15日)时,不同处理小区的氨挥发速率已无明显差异,其值介于0.08~0.44 kg·hm⁻²·d⁻¹之间。

水稻分蘖期(6月20日)追肥后,田间土壤氨挥发的动态变化和移栽施基肥后的情况基本一致(图2)。各处理小区的氨挥发速率均在施肥后3 d内达到最大值0.46~1.22 kg·hm⁻²·d⁻¹,处理之间表现为C2N3>C1N3>C2N2>C2N1>C1N2>C1N1,均小于移栽施基肥后的氨挥发最大速率;施肥后第3 d迅速降低,氨挥发速率降幅达0.20~0.67 kg·hm⁻²·d⁻¹。连续测定至第7 d(6月27日)时,不同处理小区氨挥发速率已无明显差异,其值介于0~0.16 kg·hm⁻²·d⁻¹之间。

水稻抽穗期(7月17日)追肥后,田间土壤氨挥

发的动态变化和前两次施肥后的情况基本一致(图3)。各处理小区的氨挥发速率均在施肥后一天内达到最大值 $1.64\sim6.13\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 处理之间表现为C1N3>C2N3>C1N2>C2N2>C1N1>C2N1, 连续测定至

第7 d时(7月24日), 不同处理小区氨挥发速率已无明显差异, 其值介于 $0.02\sim0.42\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间。

综合考虑稻田全生育期氨挥发动态而言(图1、图2和图3), 稻田氨挥发速率在全生育期出现3次

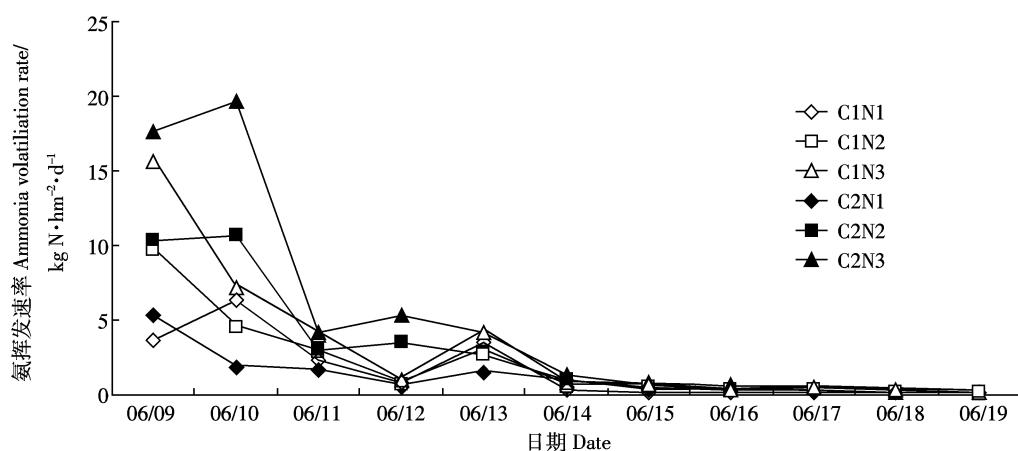


图1 施基肥后不同处理稻田氨挥发速率的动态变化

Figure 1 Dynamic changes of different treatments on field ammonia volatilization after application of fertilizer at planting

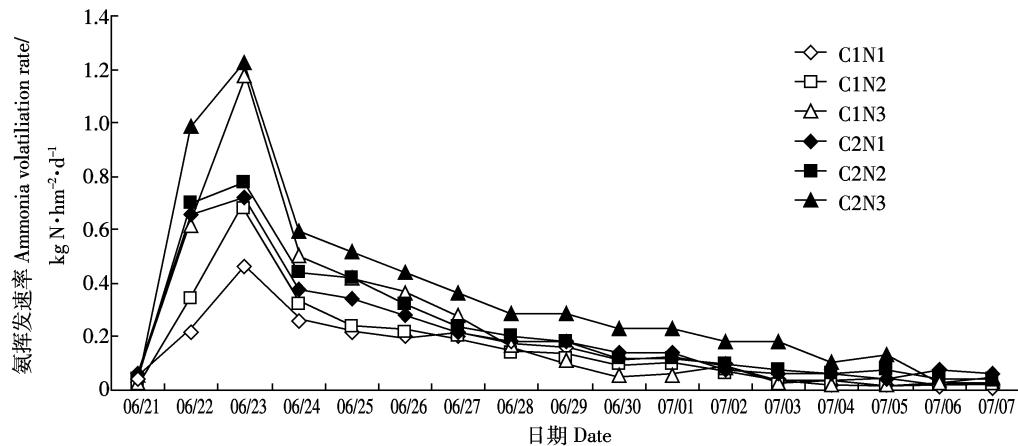


图2 施分蘖肥后不同处理稻田氨挥发速率的动态变化

Figure 2 Dynamic changes of different treatments on field ammonia volatilization after application of tillering fertilizer

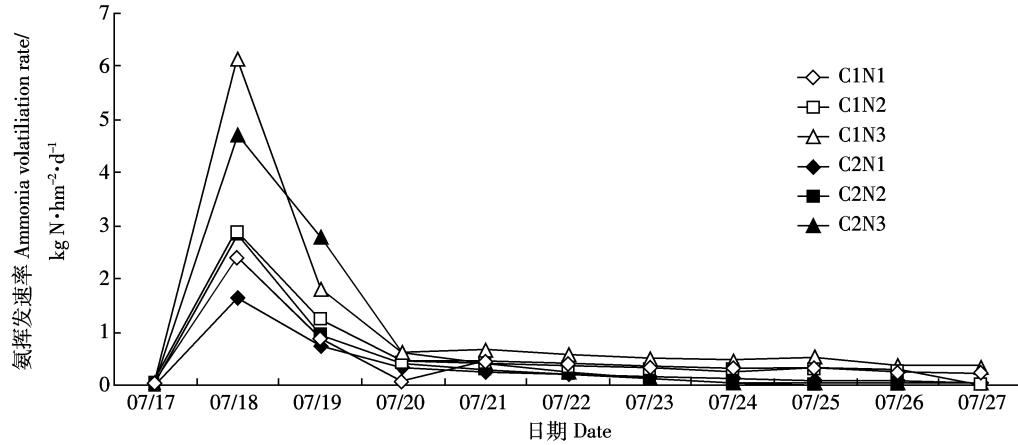


图3 施穗肥后不同处理稻田氨挥发速率的动态变化

Figure 3 Dynamic changes of different treatments on field ammonia volatilization after application of panicle fertilizer

峰值,施肥后1~3 d是稻田氨挥发速率的高峰期,施穗肥后氨挥发速率峰值介于施基肥和施分蘖肥后氨挥发速率峰值之间,施肥后7 d稻田氨挥发速率变化趋于平稳,不同处理氨挥发速率已无明显差异。在相同水分条件下,氨挥发速率峰值随着施氮量增加而增加;而在相同的施肥水平下,施基肥和施分蘖肥后控制灌溉的氨挥发速率峰值低于相应的常规灌溉处理。

上述结果表明,稻田氨挥发速率主要受施肥量和田间水分状况的影响,施肥后1~3 d是采取措施减少稻田氨挥发的关键时期。

2.2 对稻季氨挥发损失率的影响

从图4可以看出,各处理稻季氨挥发损失率均达到了显著差异,其排列顺序为C2N1>C2N3>C2N2>C1N1>C1N3>C1N2。控制灌溉条件下N1、N2、N3三个氮肥施用水平的氨挥发损失率分别为22.95%、17.59%、19.22%,常规灌溉条件下N1、N2、N3三个氮肥施用水平的氨挥发损失率分别为28.64%、23.22%、25.81%。相同施肥水平条件下,控制灌溉的稻季氨挥发损失率均显著小于常规灌溉的氨挥发损失率;相同水分管理条件下,随着施氮量增加,稻季氨挥发损失率表现出先降低后增加的趋势。综合水氮耦合效应,就氨挥发损失率而言,在本试验条件下,此效应显著,以控制灌溉模式下施氮量 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时的氨挥发损失率最低,为17.59%。

上述结果表明,采取节水灌溉与氮肥施用量控制在适当水平是减少氮肥损失、提高氮肥利用效率、降低农业面源污染的主要措施之一。

2.3 对稻田氨挥发量的影响

从不同生育时期稻田氨挥发量的变化(表1)可以看出,不同生育时期的氨挥发量排列顺序为返青期>拔节孕穗期>分蘖期>抽穗开花期>乳熟期,氨挥发集中在水稻生育前中期的6—8月,这3个月的氨挥发量占稻季氨挥发总量的97%以上,主要是由于施肥全部分布在水稻生育中前期,且该时段气温较高。

从图5可以看出,各处理稻季氨挥发损失量表现为与氨挥发速率有所差异的大小顺序,为C2N3>C1N3>C2N2>C1N2>C2N1>C1N1,方差分析结果显示,各处理间差异达到显著水平。控制灌溉条件下N1、N2、N3三个氮肥施用水平的氨挥发损失量分别为20.66、31.67、51.88 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,常规灌溉条件下N1、N2、N3三个氮肥施用水平的氨挥发损失量分别为25.78、41.81、69.70 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。相同水分管理条件下,不同氮肥处理间氨挥发量存在显著差异,表现出随施

氮量的增加NH₃挥发量显著增加的趋势;相同施肥水平条件下,控制灌溉比常规灌溉稻田氨挥发量低,与常规灌溉条件相比,控制灌溉条件下N1、N2、N3三个氮肥施用水平的氨挥发损失量分别减少了9.04、10.27、18.17 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

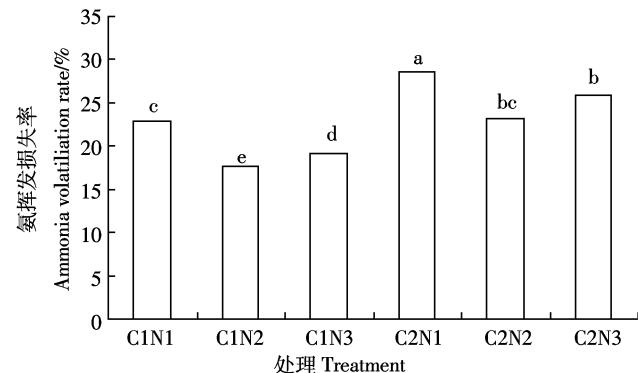


图4 不同处理对稻季累计氨挥发损失率的影响
Figure 4 Effects of different treatments on cumulative field volatile ammonia loss rate

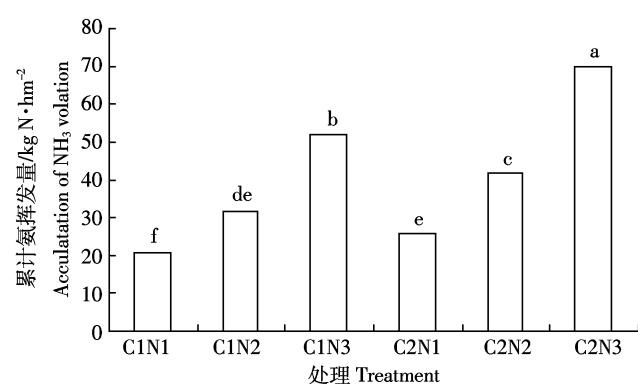


图5 不同处理对田间累计氨挥发量的影响
Figure 5 Effects of different treatments on cumulative field ammonia volatilization

表1 不同生育时期稻田氨挥发量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 1 The amounts of paddy field ammonia volatilization at different stages ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
C1N1	11.62	3.31	5.14	0.40	0.19
C1N2	21.40	3.55	6.09	0.48	0.15
C1N3	33.71	5.64	11.88	0.38	0.27
C2N1	17.32	4.53	3.73	0.14	0.06
C2N2	31.70	4.89	4.96	0.18	0.08
C2N3	53.09	7.24	9.04	0.18	0.15

注:T₁返青期,T₂分蘖期,T₃拔节孕穗期,T₄抽穗开花期,T₅乳熟期。Note:T₁,returning green stage;T₂,tillering stage;T₃,jointing-booting stage;T₄,heading-flowering stage;T₅,milky stage.

3 讨论

南方丘陵区是我国重要的水稻产区,该区降水年度和季节分布极不均匀,常年约50%集中在4—6月,夏秋之交高温少雨,7—9月蒸发量接近全年的一半,常出现季节性干旱,严重阻碍水稻产业可持续发展。与此同时,水稻生产中普遍存在沿袭常规施氮量和常规灌溉模式,导致水分利用效率低和氮肥过量施用的问题,尤其氮肥当季的利用率过低,大部分损失于环境中,而氨挥发是氮肥损失的重要部分。因此,对南方丘陵季节性干旱区稻季农田氨挥发损失进行测定和评估,具有重要的生产指导意义。本试验采用简便易行的通气法,研究了节水灌溉条件下氮肥施用对稻季农田土壤氨挥发的影响。

研究结果表明,水稻在整个生长期施用氮肥后有明显的氨挥发现象,氨挥发高峰出现在氮肥施用后的1~3 d内,不同生育时期的氨挥发量为返青期>拔节孕穗期>分蘖期>抽穗开花期>乳熟期。稻田氨挥发主要集中在水稻生育前中期的6—8月,且这3个月的氨挥发量占稻季氨挥发总量的97%以上,一方面是由于施肥全部分布在水稻生育中前期,且该时段气温较高,另一方面是由于基肥、分蘖肥与穗肥的施用采用水层表施氮肥,这在一定程度上增加氨挥发。因此,在基肥的施用过程可采用翻地撒施尿素,水解NH₄⁺-N被土壤吸附,可显著减少表层土壤和田面水层肥料氮的存在量^[12],从而有效抑制了氨挥发。

水分条件是影响田间氨挥发的主要因素之一^[13],与常规灌溉条件相比,控制灌溉条件下N1、N2、N3三个氮肥施用水平的氨挥发损失量分别减少了9.04、10.27、18.17 kg·hm⁻²。这可能是由于控制灌溉下稻田在由施肥时建立的薄水层变成无水层的过程中,肥料水解后产生大量的氨离子随水向土壤下层迁移,减少了氨分压和氨挥发。控制灌溉模式在节水的同时,减少了稻田氨挥发损失,提高了氮素利用,有利于改善大气环境。

分析不同施氮时期的氨挥发量的差异,基施氮肥时期氨挥发量最大并且持续时间较长,两次追肥后氨挥发量较少且持续时间较短,产生这种差异的原因可能是:

(1)因3次施肥都是在灌水条件下进行,基肥时期的氮肥较多,而两次追肥时期的氮肥较少,这可能是不同时期NH₃挥发产生差异的主要原因之一。

(2)虽然第一次追肥的分蘖期的平均气温和地面

温度都高于其他时期,而NH₃挥发与温度呈显著正相关,高温有利于NH₃挥发^[14],但由于此时期施氮量最少,NH₃浓度较低,所以挥发量低。

(3)第二次追肥处于水稻抽穗期,此时期水稻需要的养分较多,吸收肥料氮的速度较快,因而使田面的NH₃和NH₄⁺浓度降低,氨挥发损失减少;植被遮荫也使水面升温变慢,从而使NH₃挥发速率减小^[15];该时期降雨增多,也在一定程度上降低了NH₃挥发量^[16]。

4 结论

水分和氮素养分不仅是水稻生长过程中最重要和最活跃的两大肥力因子,同时又是整个稻田生态系统中调控最为频繁、力度最大的作物生长环境因子,而氨挥发对于作物提高氮肥利用效率至关重要。稻田施用氮肥后有明显NH₃挥发损失,整个生育期累计氨挥发量为31.67~69.70 kg·hm⁻²,占施氮量的17.95%~28.64%;不同生育时期的氨挥发量为返青期>拔节孕穗期>分蘖期>抽穗开花期>乳熟期,挥发高峰出现在施氮肥后的1~3 d内;随着施氮水平增加,田间氨挥发量显著增加。与此同时,稻田水分状况对NH₃挥发损失具有重要影响,与常规灌溉模式相比,控制灌溉条件下氨挥发总量和氨挥发损失率均较小,且不同施氮水平间差异显著。

就氨挥发损失率而言,在本试验条件下,水氮耦合效应显著,以控制灌溉模式下施氮量180 kg·hm⁻²时氨挥发损失率最低,为17.59%。

参考文献:

- [1] 彭世彰,杨士红,徐俊增. 节水灌溉稻田氨挥发损失及影响因素[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8):35~39.
PENG Shi-zhang, YANG Shi-hong, XU Jun-zeng. Ammonia volatilization and its influence factors of paddy field under water-saving irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(8):35~39.
- [2] 武雪萍,梅旭荣,蔡典雄,等. 节水农业关键技术发展趋势及国内外差异分析[J]. 中国农业资源与区划, 2005, 26(4):35~37.
WU Xue-ping, MEI Xu-rong, CAI Dian-xiong, et al. Trend and difference for development on key technology of agricultural water-saving in China and developed countries[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2005, 26(4):35~37.
- [3] Romeo J Cabangon, Tuong T P. Management of cracked soils for water saving during land preparation for rice cultivation[J]. *Soil & Tillage Research*, 2000, 56:105~116.
- [4] 孙永健,孙园园,李旭毅,等. 水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系[J]. 作物学报, 2009, 35(11):2055~2063.
SUN Yong-jian, SUN Yuan-yuan, LI Xu-yi, et al. Relationship of ac-

- tivities of key enzymes involved in nitrogen metabolism with nitrogen utilization in rice under water–nitrogen interaction[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(11):35–37.
- [5] 尤小涛, 荆奇, 姜东, 等. 节水灌溉条件下氮肥对粳稻稻米产量和品质及氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(2):199–204.
YOU Xiao-tao, JING Qi, JIANG Dong, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen utilization and grain yield and quality in rice under water saving irrigation[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(2): 199–204.
- [6] 潘圣刚, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 不同灌溉模式下氮肥水平对水稻氮素利用效率、产量及其品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2):283–289.
PAN Sheng-gang, CAO Cou-gui, CAI Ming-li, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen use efficiency, grain yields and qualities of rice under different water regimes[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2):283–289.
- [7] Sommer S G, Schoerring J K, Denmead O T. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops[J]. *Advances in Agronomy*, 2004, 82:557–622.
- [8] 胡小凤, 王正银, 游媛, 等. 缓释复合肥在不同土壤水分条件下氨挥发特性研究[J]. 环境科学, 2010, 31(8):1937–1943.
HU Xiao-feng, WANG Zheng-yin, YOU Yuan, et al. Ammonia volatilization of slow release compound fertilizer in different soils water conditions[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(8):1937–1943.
- [9] 陈振华, 陈利军, 武志杰, 等. 辽河下游平原不同水分条件下稻田氨挥发[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12):2771–2776.
CHEN Zhen-hua, CHEN Li-jun, WU Zhi-jie, et al. Ammonia volatilization from rice field under different water conditions in lower Liaohe River Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12):2771–2776.
- [10] 叶世超, 林忠成, 戴其根, 等. 施氮量对稻季氨挥发特点与氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(1):71–78.
YE Shi-chao, LIN Zhong-cheng, DAI Qi-gen, et al. Effects of nitrogen application rate on ammonia volatilization and nitrogen utilization in rice growing season[J]. *China Rice Science*, 2011, 25(1):71–78.
- [11] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定: 通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2):205–209.
WANG Zhao-hui, LIU Xue-jun, JU Xiao-tang, et al. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2):205–209.
- [12] 杨淑莉, 朱安宁, 张佳宝, 等. 不同施氮量和施氮方式下田间氨挥发损失及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2010, 27(3):415–421.
YANG Shu-li, ZHU An-ning, ZHANG Jia-bao, et al. Ammonia volatilization loss and its affecting factors under different amounts and ways of N application in field[J]. *Arid Zone Research*, 2010, 27(3): 415–421.
- [13] 吴萍萍, 刘金剑, 杨秀霞, 等. 不同施肥制度对红壤地区双季稻田氨挥发的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(1):85–93.
WU Ping-ping, LIU Jin-jian, YANG Xiu-xia, et al. Effects of different fertilization systems on ammonia volatilization from double-rice cropping field in red soil region[J]. *China Rice Science*, 2009, 23(1):85–93.
- [14] 贺发云, 尹斌, 金雪霞, 等. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2):253–259.
HE Fa-yun, YIN Bin, JIN Xue-xia, et al. Ammonia volatilization from urea applied to two vegetable fields in Nanjing suburbs[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2):253–259.
- [15] 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[J]. 土壤学报, 2004, 41(2):265–269.
SONG Yong-sheng, FAN Xiao-hui, LIN De-xi, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2):265–269.
- [16] 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 Xu-gang, HAO Ming-de, CHEN Lei, et al. In situ study of ammonia volatilization from wheat cropland under long-term continuous fertilization[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1): 18–24.