

不同施氮水平下小麦田氨挥发规律研究

山楠^{1,2}, 赵同科¹, 毕晓庆¹, 安志装¹, 赵丽平¹, 杜连凤^{1*}

(1.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 2.河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071000)

摘要:为了研究施氮水平对农田土壤氨挥发的影响机制,依据北京房山农田土壤类型,结合当地农民种植与施氮习惯,设定 N0~N7 共 8 个施氮水平,施肥量分别为 0、50、100、150、200、250、300、400 kg·hm⁻²,利用田间试验原位测定的方法,研究分析了京郊冬小麦田种植体系氨挥发损失的规律及氮肥剂量效应。结果表明,冬小麦种植体系在施入氮肥后发生了明显的氨挥发,且氨挥发主要发生在施肥后 1~2 周内,在施肥后 2~3 d 出现氨挥发速率峰值,基肥与追肥后氨挥发速率最大分别达到 2.41、1.42 kg·hm⁻²·d⁻¹,基肥期氨挥发量在 0.81~14.29 kg·hm⁻²,追肥期氨挥发量在 2.20~6.91 kg·hm⁻²。在整个冬小麦生长期,高施氮量处理的氨挥发量均高于低施氮量处理。当施氮量超过 150 kg·hm⁻² 时,由于氨挥发增加导致农田氮损失显著提高,优化施肥量能明显降低冬小麦种植过程中的氨挥发损失。施氮水平为 150 kg·hm⁻² 的冬小麦产量为 5 493.63 kg·hm⁻²,高于其他施氮水平处理的小麦产量。可见,合理的氮肥用量能够兼顾产量和生态环境,本研究中在 150 kg·hm⁻² 的氮肥水平下,小麦产量最高且氨挥发损失较低。

关键词:施氮量;氨挥发;冬小麦;原位测定

中图分类号:S143.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)09-1858-08 doi:10.11654/jaes.2014.09.026

Ammonia Volatilization from Wheat Soil Under Different Nitrogen Rates

SHAN Nan^{1,2}, ZHAO Tong-ke¹, BI Xiao-qing¹, AN Zhi-zhuang¹, ZHAO Li-ping¹, DU Lian-feng^{1*}

(1. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: Ammonia volatilization is a major pathway of nitrogen losses from soils. Here a field experiment with different nitrogen rates was set up in Fangshan district, Beijing. The nitrogen rates included N0 (0 kg·hm⁻²), N1 (50 kg·hm⁻²), N2 (100 kg·hm⁻²), N3 (150 kg·hm⁻²), N4 (200 kg·hm⁻²), N5 (250 kg·hm⁻²), N6 (300 kg·hm⁻²), and N7 (400 kg·hm⁻²). Ammonia volatilization from soil in winter wheat field was measured using in-situ measurement method. Detectable ammonia volatilization occurred 1~2 weeks after N fertilization in winter wheat field, and the peaks of ammonia volatilization happened 2~3 days after fertilization. The ammonia volatilization rates were the highest after basal fertilization and top dressing, which were 2.41 and 1.42 kg·hm⁻²·d⁻¹, respectively. The amount of ammonia volatilization varied from 0.81~4.29 kg·hm⁻² after basal fertilization, 2.20~6.91 kg·hm⁻² after top dressing. Throughout the entire winter wheat growing period, ammonia volatilization was higher in high- than low-nitrogen treatments. At nitrogen rates exceeding 150 kg·hm⁻², total nitrogen loss increased sharply due to elevated ammonia volatilization. In the treatment with 150 kg·N hm⁻², the winter wheat yield was as high as 5 493.63 kg·hm⁻², higher than that of all other nitrogen treatments. Therefore, optimizing nitrogen rates could reduce ammonia volatilization loss without decreasing wheat production. The present data show that 150 kg·hm⁻² nitrogen would be optimal for better yield and less ammonia volatilization losses.

Keywords: nitrogen fertilizer; ammonia volatilization; winter-wheat; in situ determination

氮肥在农业生产中发挥着重要的作用。近 50 多年来,我国农田化肥 N 的使用量大幅度增加。2011

年,我国氮肥使用量已达到 2 381.4 万 t^[1],FAO 也于报道中提到:中国 N 肥用量占全球的 35%左右,是世界上最大的 N 肥生产和消费国。但是大量的研究表明,在施肥量增加的同时,农田化肥氮素的利用率降低,大部分氮素以各种形式进入到大气或水环境,不仅造成肥料和能源的浪费,而且会对环境产生污染^[2]。合理使用氮肥,减少环境污染,是现代农业生产急需解

收稿日期:2014-02-13

基金项目:国家科技支撑计划(2012BAD15B01)

作者简介:山楠(1988—),女,河北唐山人,在读硕士,主要从事施肥与环境方面研究。E-mail:sn.47@163.com

*通信作者:杜连凤 E-mail:dulianfengyzs@163.com

决的问题。大量研究表明,氨挥发是氮素损失的主要途径^[3-4]。Zhu等^[5]综合我国部分地区主要作物田间原位观测结果,估算我国氮损失总计约478万t,其中以氨气形式进入大气的约273万t,占总损失量的56.1%。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^[6-7],其损失量占施N量的比例为0.41%~40%^[8]。杨晶秋等^[9]研究了稳定型有机无机复合肥与尿素氨挥发的差异看出,有机无机复合肥与尿素相比氨挥发抑制率达57%。氨挥发进入大气以干、湿沉降的方式返回陆地生态系统,虽然可增加土壤有效态氮^[10],然而过量的氨挥发损失不仅加大了氮肥投入,造成间接的经济损失,而且进入大气后产生一系列环境问题,如土壤酸化、水体富营养化等,会给陆地和水体生态系统带来严重危害^[11-13]。过量施用氮肥导致的氮素利用率低、环境污染,已成为我国乃至全球农业可持续发展的严重威胁。

为了降低氨挥发损失,全世界已开展了大量的研究工作,研究表明,农田氨挥发损失是农田施N素损失的主要途径之一,其中,稻田氨挥发损失占施氮量的4%~10%^[14]。朱兆良等^[2]采用微气象学方法研究了我国水田生态系统的土壤氨挥发,发现水稻田尿素的氨挥发损失高达9%~30%。冬小麦是京郊地区主要粮食作物,小麦平均施氮量(以N计)达到349 kg·hm⁻²,远高于全国平均施氮水平^[15],然而氮肥利用率却仅为10%~20%^[16],有关京郊地区小麦田的氨挥发损失鲜有报道。田间氨挥发原位测定方法很多,在比较不同施肥多重处理的氨挥发速率时,本文采用田间原位测定农田氨挥发的装置及方法研究了京郊冬小麦田不同施氮水平条件下氨挥发损失规律,目的在于了解该区氨挥发损失特征,揭示农田土壤小麦季中氨挥发排放规律,从对环境友好的角度寻求最佳施氮量,以期减少氮素损失,提高氮素利用率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2012年10月至2013年6月在北京市房山区农科所院内进行。该区位于北纬39°30′~39°55′,

东经115°25′~116°15′。全区总面积2019 km²。该区属温带大陆性气候,春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季秋高气爽而短促,冬季寒冷干燥。年平均气温为11.6℃,年平均降水量687 mm,降水集中在6—8月,占全年降水量的85%,降雨强度大,多冰雹、大风。年平均无霜期185 d。该区主要耕作方式为冬小麦与夏玉米轮作。

1.2 试验设置

试验在原位土柱上进行,微区直径80 cm,微区面积0.5 m²。供试土壤为潮土,pH8.3左右,土壤基本性状见表1。试验设置8个处理,每个处理重复3次,共24个小区,完全随机排列,具体施肥处理见表2。根据当地农民平时施氮量,设置1个常规处理N4(200 kg·hm⁻²),磷钾肥均采用优化用量,磷100 kg·hm⁻²,钾120 kg·hm⁻²。磷钾肥全部基施,尿素基肥和追肥各占50%。供试冬小麦品种为吴联211小麦常规种。2012年10月13日播种,当天表面撒施尿素、磷肥(P₂O₅)、钾肥(K₂O),2013年4月24日追肥。每次施肥后灌水40 mm,共80 mm。试验地2012年10月、2013年4月的月平均日地表温度分别为14.51、14.85℃。

1.3 氨气的捕获与测定方法

通过分析以往测定方法的优缺点,本研究采用田间原位测定农田氨挥发的装置及方法^[17],包括空气交换室、通气杆、真空抽气控制设备、氨吸收剂、氨测定方法。试验装置见图1。空气交换室为底端开放,顶部有两个出口的有机玻璃圆柱体,两个出口分别用于进

表2 各处理氮肥施用量
Table 2 Nitrogen rates for different treatments

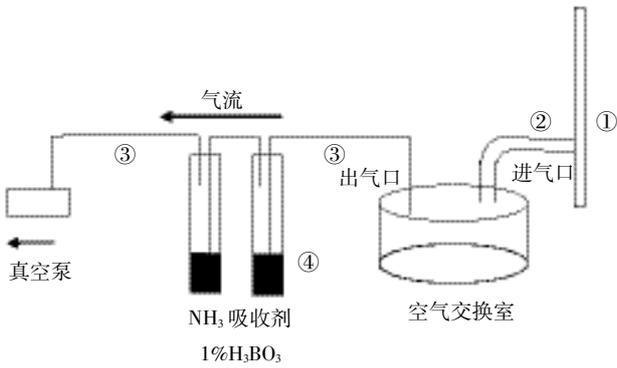
施肥处理编号 Number of treatments	施肥量 Applications/kg·hm ⁻²			
	N(基肥) (Basic fertilization)	N(追肥) (Top dressing)	P ₂ O ₅	K ₂ O
N0	0	0	100	120
N1	25	25	100	120
N2	50	50	100	120
N3	75	75	100	120
N4	100	100	100	120
N5	125	125	100	120
N6	150	150	100	120
N7	200	200	100	120

表1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physic-chemical properties of soil in tested field

土壤 Soil	pH(H ₂ O)	有机质 SOM/g·kg ⁻¹	全氮 TN/g·kg ⁻¹	全磷 TP/g·kg ⁻¹	速效磷 AP/mg·kg ⁻¹	速效钾 AK/mg·kg ⁻¹	NO ₃ -N/mg·kg ⁻¹	NH ₄ -N/mg·kg ⁻¹
潮土	8.3	15.9	0.09	0.34	105.6	87.7	9.6	3.9

Note: SOM: Soil organic matter; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium.



①通气杆(PVC管),2 m,垂直于地面;②编织管,连接空气交换室与PVC通气管;③硅胶管,连接空气交换室与氨吸收装置;④氨吸收装置(孟氏洗气瓶)。

图1 氨挥发交换法装置图

Figure 1 Measurement unit for ammonia volatilization

气和出气,进气口通过螺纹管与高度为2.5 m的中空塑料通气杆相连,出气口与氨吸收装置相连,真空泵提供的负压将交换室内产生的氨抽吸至吸收液内。本研究中采用的吸收液是含有混合指示剂的1%硼酸溶液,通过控制阀保持交换室内空气交换频率为10~15次·min⁻¹,抽气结束后将吸收液带回实验室,用标准稀硫酸滴定来计算氨挥发量。

取样时,1%的硼酸溶液即用即配,量取60 mL硼酸溶液装入洗气瓶,于上午9:00—10:00用电动泵抽取采集氨气。气体样品被0.01 mol·L⁻¹的硼酸溶液吸收,收集的溶液用标准稀硫酸滴定法测定。施肥后连续采样15 d,以15 d的氨挥发累积量作为冬小麦田氮肥基施冬前氨挥发总排放量。氨挥发计算式:

$$NH_3-N(mg) = N \times C \times 14$$

式中:*N*为硫酸滴定读数,L;*C*为标准硫酸浓度,mol·L⁻¹;14为N的相对分子质量。

氨挥发速率由下式得出:

$$NH_3-N(kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}) = M \times 10^{-2} / (A \times T) \times 24$$

式中:*M*为测得的NH₃-N量,mg;*A*为捕获装置的横截面积,m²;*T*是连续收集氨气的时间,h。

2 结果与分析

2.1 施肥后氨挥发动态变化

本研究中,小麦生育期施肥包括基肥和一次追肥。两次施肥后氨挥发日变化规律相同,随着时间的延长,氨挥发均呈现先增加后降低的趋势(图2)。不同水平施肥处理氨挥发动态变化趋势基本一致,氨挥发速率在施肥后2~3 d出现第一个峰值,随后逐渐降

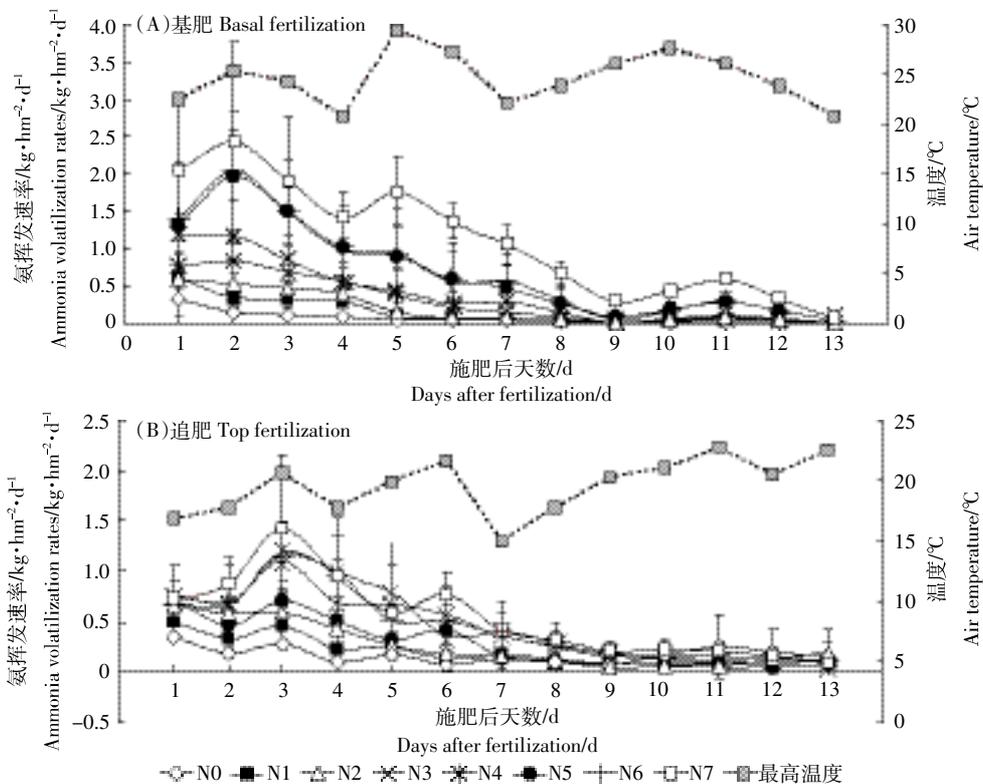


图2 不同氮肥处理对氨挥发速率的影响

Figure 2 Ammonia volatilization rates after basal and top dressing fertilization

低,直至无明显变化。高施氮量处理氨挥发速率高于低施氮量处理;基肥时期各个施肥处理氨挥发速率高于追肥时期各个施肥处理,且基肥时期各处理的氨挥发持续期较追肥时期氨挥发持续期长。

基施氮肥后(图2A)的第2d氨挥发速率最高(第一个高峰),随后降低,到第13d氨挥发均小于 $0.06 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,氨挥发过程基本结束。不同水平施肥处理氨挥发变化趋势基本一致。N0、N1、N2、N3氨挥发速率变化幅度分别为 $0\sim 0.33$ 、 $0\sim 0.61$ 、 $0\sim 0.59$ 、 $0\sim 0.82 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,均小于 $1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;N4、N5、N6、N7氨挥发速率变化幅度分别为 $0\sim 1.19$ 、 $0.04\sim 1.96$ 、 $0.04\sim 2.03$ 、 $0.05\sim 2.42 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,氨挥发速率随着施氮量的增加有明显升高。N0~N7的平均氨挥发速率分别为 0.14 、 0.34 、 0.54 、 0.82 、 1.17 、 1.96 、 2.03 、 $2.41 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

追肥后氨挥发速率(图2B)整体趋势与基肥情况基本一致,升高到最大值后逐渐降低。氨挥发速率峰值出现在施肥后第3d。施肥一周后,挥发速率锐减,逐渐消失,说明硝化作用基本在施肥一周内完成。施肥后第11d天气骤然转暖,温度升高,导致氨挥发速率有较小升高,但随即降至对照水平。在追肥期间的

氨挥发过程中,N0、N1氨挥发速率变化幅度接近,分别为 $0.15\sim 0.35$ 、 $0.05\sim 0.49 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,均小于 $0.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;随着施氮量的增加氨挥发速率增加,N2~N7氨挥发速率变化幅度分别为 $0.06\sim 0.66$ 、 $0.06\sim 1.10$ 、 $0.09\sim 1.19$ 、 $0.07\sim 0.73$ 、 $0.12\sim 1.14$ 、 $0.09\sim 1.42 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。N0~N7的平均氨挥发速率分别为 0.27 、 0.45 、 0.60 、 1.09 、 1.19 、 0.70 、 1.14 、 $1.42 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。与基肥施用后相比,氨挥发持续的时间较短。主要由于追肥期气温较高,氮素转化达到平衡较快。

2.2 不同施氮水平下氨挥发累积情况

冬小麦种植体系基肥和追肥时期氨累积挥发排放量分别见图3、图4。随着施肥天数的增加,冬小麦田的氨累积挥发量也出现增加的趋势。基肥施用13d的累积氨挥发排放量见图3A,在施氮量25、50、75、100、125、150、200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,第1d氨挥发排放量分别为 0.61 、 0.59 、 0.75 、 1.19 、 1.32 、 1.39 、 $2.03 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其损失比例(第1d的氨挥发量/15d氨挥发总量,下同)分别为 33.2% 、 23.9% 、 19.8% 、 23.5% 、 15.2% 、 15.6% 、 14.2% (图3B)。施肥后2d内的氨挥发累积损失比例分别为 51.7% 、 45.7% 、 41.4% 、 46.4% 、 37.8% 、

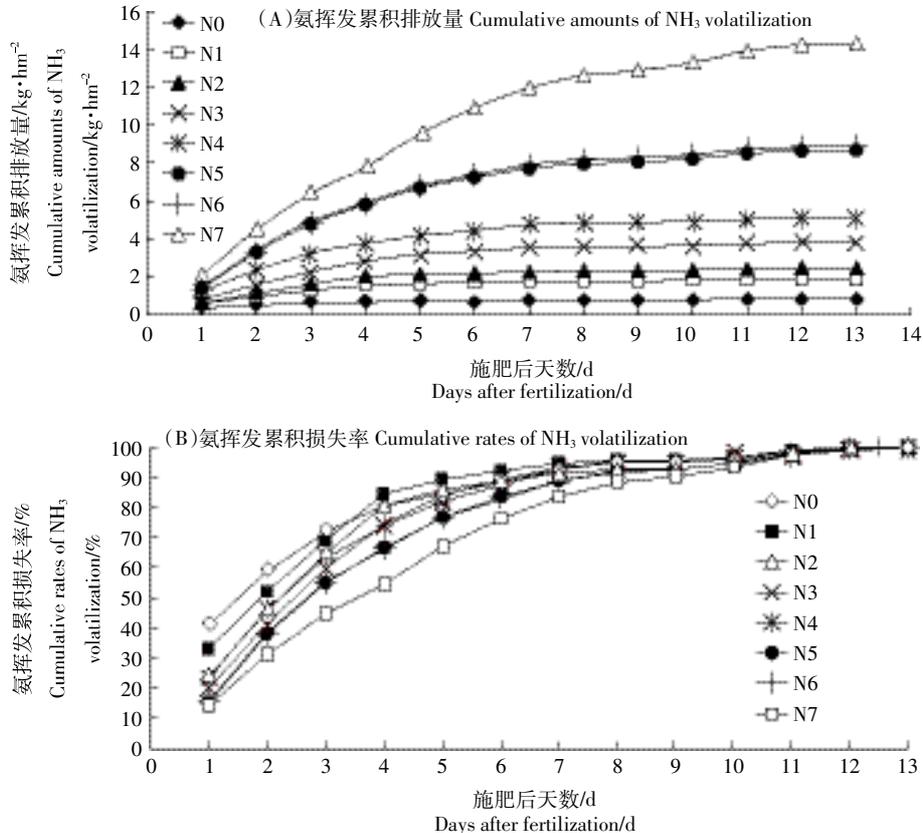


图3 基肥时期不同氮肥处理氨挥发累积排放量和累积损失率

Figure 3 Cumulative amount and rates of ammonia volatilization after basal fertilization

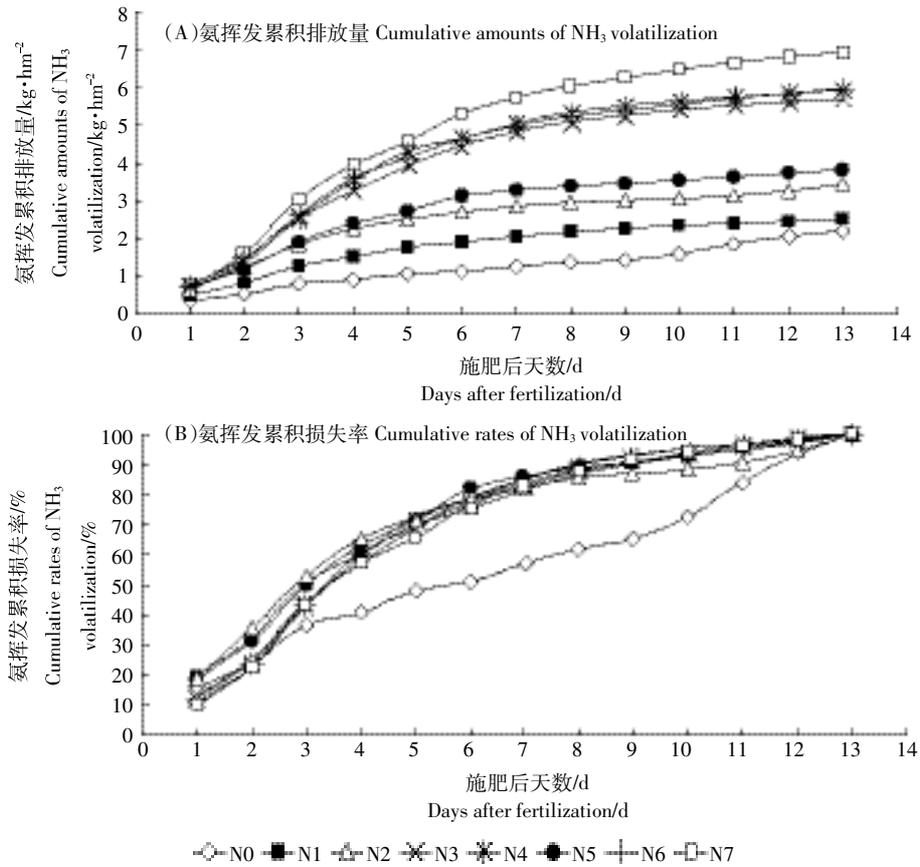


图4 追肥时期不同氮肥处理氨挥发累积排放量和累积损失率

Figure 4 Cumulative amount and rates of ammonia volatilization after top dressing fertilization

38.5%、31.2%。与第1 d相比,增加了16.9%~22.9%。第7 d氨挥发累积排放量分别为1.73、2.25、3.52、4.73、7.71、7.92、11.95 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氨挥发累积损失比例分别为94.5%、91.4%、93.0%、92.8%、88.7%、89.0%、83.6%。

追肥后累积氨挥发排放量见图4A,在13 d的连续测定期间,追肥后第1 d冬小麦N1~N7氨挥发量分别为0.49、0.66、0.75、0.69、0.73、0.78、0.71 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,相应的损失比例为19.4%、19.0%、13.2%、11.7%、19.1%、13.1%、10.3%(图4B)。前2 d N1~N7氨挥发累积排放量分别为0.80、1.23、1.44、1.35、1.19、1.47、1.59 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氨挥发累积损失比例分别为32.6%、35.5%、25.5%、22.7%、31.3%、24.6%、23.0%,与第1 d相比,增加了8.3%~13.3%。第7 d N1~N7氨挥发累积排放量为2.06~5.73 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氨挥发累积损失比例分别为57.1%、82.6%、85.1%、85.2%、85.9%、83.5%、82.8%。基肥和追肥期间,前7 d内N1~N7的氨挥发累积损失比例分别为83.6%~94.5%和57.1%~82.8%。除N0外,90%左右的氨挥发损失是发生在施肥后7 d内,7 d之后氨挥发量仅占10%左右。

冬小麦田氨挥发总量见图5。从图中可以看出,除N0在追肥时期氨挥发量要明显高于基肥时期外,其他施氮处理,追肥时期氨挥发普遍低于基肥时期,主要由于追肥时期作物生长旺盛,吸收氮素较高。在基肥试验期间,N0氨挥发损失量为0.81 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,N1~N7处理的氨挥发总量分别为1.83、2.46、3.79、5.09、8.69、8.90、14.29 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别占施氮量的2.04%、2.20%、2.98%、3.43%、4.5%、5.4%、6.74%。追肥试验期间,N0氨挥发损失量为2.20 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,N1~N7处理的氨挥发总量分别为2.53、3.45、5.67、5.93、3.82、5.97、6.91 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别占施氮量的0.7%、1.7%、3.5%、3.0%、1.1%、2.2%、2.4%。

随着施氮量的增加,冬小麦整个种植体系的氨挥发总量呈线性增加趋势。整个生育期N0~N7氨挥发量分别为3.01、4.35、5.91、9.46、11.03、14.64、14.87、21.20 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。氨挥发损失率符合二次方程曲线,通过模拟,施肥量大于150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氨挥发损失率增加。这说明当氮肥的施用量超过150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时由氨挥发造成的氮损失不容忽视。

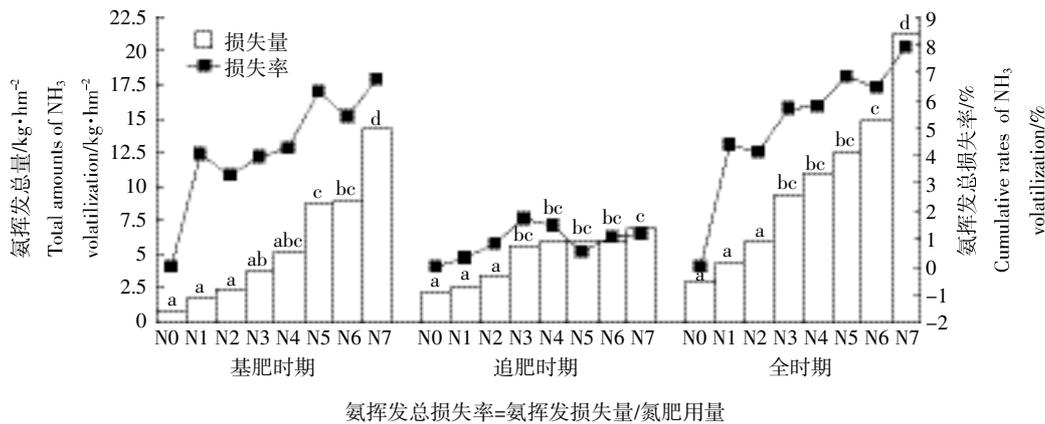


图5 不同施肥时期不同处理氨挥发排放损失量与损失率

Figure 5 Total amounts and loss rates of ammonia volatilization in different treatments at different fertilization times

2.3 冬小麦产量与氨挥发量分析

图6所示,冬小麦N0~N7处理的产量曲线符合方程:

$$y = -0.0388x^2 + 16.83x + 3400.6 \quad (R^2 = 0.6836)$$

在该试验条件下,最高产量为5225.7 kg·hm⁻²,最高产量施肥量是216.9 kg·hm⁻²。施用氮肥可以提高冬小麦产量,但过量施肥引起产量降低。同时,氨挥发量随着施氮量的增加而增大。本试验中N3施氮水平下,小麦产量高于其他处理下的产量,且氨挥发损失率小于其他处理。可见优化施肥不仅可以提高粮食产量,还可以节约施肥成本,减少环境污染风险。

3 讨论

3.1 不同施肥时期对土壤氨挥发的影响

施肥主要影响表层土壤的铵态氮总浓度,从而影响氨挥发速率。本试验共有2个不同的施肥时期,一个时期是在冬小麦季以基肥的方式施入,其余是在拔

节期以追肥的方式施入。对比不同施肥时期土壤表面氨挥发排放情况,结果表明:冬小麦基肥和追肥施用后,氨挥发速率均于2~3 d达到最高值,基肥时期介于0.34~2.41 kg·hm⁻²·d⁻¹,拔节期介于0.27~1.42 kg·hm⁻²·d⁻¹,然后逐渐下降。各处理基肥后氨挥发速率峰值高于拔节期追肥后氨挥发的峰值。冬小麦田基肥后氨挥发损失量为1.83~14.29 kg·hm⁻²,占氮损失比例为2.0%~6.7%,而拔节期追肥后氨挥发损失量介于2.53~6.91 kg·hm⁻²,占氮损失比例为0.3%~1.2%。冬小麦各施肥处理氨挥发损失量基肥高于追肥。邓美华等^[18]研究指出,在小麦整个生育期中,氨挥发损失表现为基肥时期>穗肥时期>拔节肥时期,基肥时期是麦季氨挥发损失的主要时期,氨挥发损失量占该时期施氮量的比例为27.3%。高施氮量处理,氨挥发量显著高于其他处理。90%左右的氨挥发损失是发生在施肥后的7 d内。因此,适当控制基肥氮肥投入,可以降低氨挥发损失。

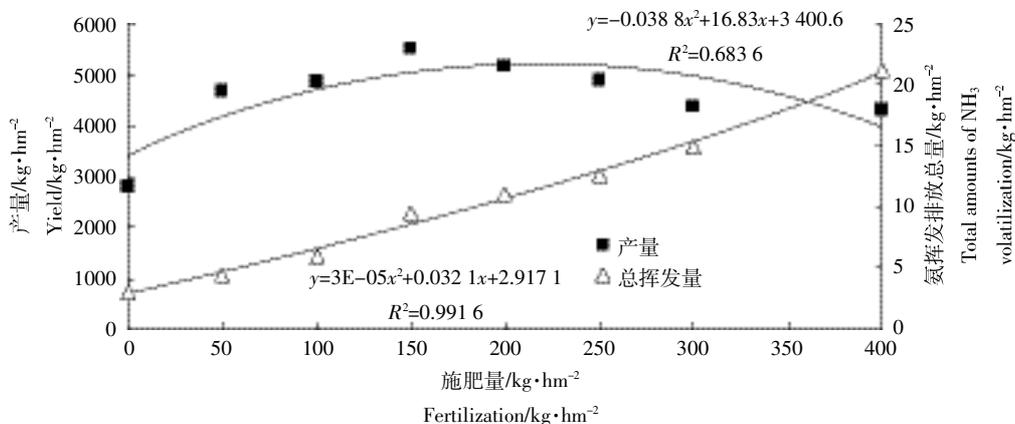


图6 冬小麦产量与氨挥发总量

Figure 6 Winter-wheat yield and total ammonia volatilization

3.2 水分以及温度对氨挥发的影响

氮肥施入土壤迅速水解成铵态氮,易挥发损失。在试验期间,随着时间的推移表层土壤含水量逐渐降低,当遇到降雨后会有所回升,与氨挥发速率变化具有较好的一致性。气象因子中除风速外,温度是影响氨挥发的一个重要因子。基肥试验期间(图2A),地表温度10~20℃,前期持续高温,促进了尿素的水解和铵态氮的形成,导致前期较高的氨挥发。该试验中第2和第3个高峰均是在两次降雨后由于气温回升出现的。在施肥后的第3d降雨(降雨量8.5mm)后,气温降低8℃,第5d气温回升,此时地表温度突升至21℃,因此各处理在第5d均出现了第二个高峰。第二次降雨在施肥后第9d(降雨量微小,无降雨量数据),气温降到16℃,第11d地表温度有小幅升高,为19℃,因此第11d氨挥发速率略有升高,但幅度较小。此外,有人研究氨挥发量与土壤水分散失呈正相关^[9],温度升高,土壤水分散失量增加,氨挥发量相应增加,与本研究结果一致。

小麦追肥期地温高(18~28℃),尿素水解快,表层土壤的氨分压(浓度)较高,高温还可以促进 NH_4^+-N 向 NH_3 的转化,故氨挥发量增加。在小麦田追肥后11d温度突然升高至27℃,部分处理的氨挥发日排放量略有小幅度上升。当温度低时,脲酶活性低,不利于尿素水解,因而产生 NH_3 少^[20]。

4 结论

(1)本试验采用田间原位测定农田氨挥发的装置及方法,测得冬小麦种植体系中施肥后有明显的氨挥发,各处理氨挥发速率均表现为先升高后下降,氨挥发速率于2~3d达到最高值,基肥时期介于 $0.14\sim 2.41\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,追肥时期介于 $0.27\sim 1.42\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。麦田氨挥发损失率为2.0%~6.7%。

(2)基肥时期氨挥发量高于追肥时期。N0~N7基肥时期氨挥发排放总量介于 $0.81\sim 14.29\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,追肥时期氨挥发总量介于 $2.20\sim 6.90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(3)氨挥发损失主要发生在施肥后15d内,其中前7d氨挥发量占整个施肥时期的90%左右。

(4)N3处理施肥水平下冬小麦田产量为 $5\ 493.63\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与N1、N2、N4、N5、N6、N7处理相比,冬小麦田产量分别增加17.5%、12.8%、6.2%、12.5%、26.1%、27.3%。N3处理中整个小麦季肥料氮的氨挥发总量为 $9.46\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其损失率为5.7%。除N3处理外,N1~N7处理中整个小麦季肥料氮的氨挥发总量分别为4.35、

5.91、11.03、14.64、14.87、21.20 $\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,损失率分别为4.4%、4.1%、5.8%、6.8%、6.5%、7.9%。N3处理中冬小麦季氨挥发损失率均小于除N1和N2以外的各个处理。优化肥料用量(N3处理)不仅可以提高农田作物产量,还可以节约生产成本,同时减少肥料对环境的污染,提高肥料利用率。本试验中N3施氮水平下,小麦产量较高,氨挥发损失较低。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook 2012[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012.
- [2] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992: 213-249, 171-196. ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Nitrogen N soil of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1992: 213-249, 171-196.
- [3] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2-3): 117-127.
- [4] 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 & Tillage Research*, 2009, 103(2): 310-315.
- [5] Cai G X, Chen D L, Ding H, et al. Nitrogen loss from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63: 187-195.
- [6] Zhu Z L. Efficient management of nitrogen fertilizers for flooded rice in relation to nitrogen transformations in flooded soils[J]. *Pedosphere*, 1992, 2(2): 97-114.
- [7] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 等. 农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应[J]. 土壤, 2005, 37(2): 113-120. SU Cheng-guo, YIN Bin, ZHU Zhao-liang, et al. Gaseous loss of nitrogen from fields and wet deposition of atmospheric nitrogen and their environmental effects[J]. *Soil*, 2005, 37(2): 113-120.
- [8] 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 Jin-liu, TIAN Guang-ming, REN Li-tao, et al. Ammonia volatilization from urea applied to the field of wheat and rice in southern Jiangsu Province[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2000, 23(4): 51-54.
- [9] 杨晶秋, 姚腾云, 王作尊, 等. 稳定型有机无机复合肥氮的释放[J]. 华北农学报, 2001, 16(4): 97-99. YANG Jing-qiu, YAO Teng-yun, WANG Zuo-zun, et al. Nitrogen releasing of stable organic-inorganic compound fertilizer (LF₃-3)[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2001, 16(4): 97-99.
- [10] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6. ZHU Zhao-Liang. Loss of fertilizer n from plants-soil system and the

- strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1-6.
- [11] Krupa S V. Effects of atmospheric ammonia(NH_3) on terrestrial vegetation: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124: 179-221.
- [12] Sutton M A, Lee D S, Dollard G J. Atmospheric ammonia: Emission, deposition and environmental impacts[C]//International conference on atmospheric ammonia. Oxford: AEA Technology, NETCEN, Culham, 1995.
- [13] Chen X P. Optimization of the N fertilizer management of a winter wheat/summer maize rotation system in the Northern China Plain[D]. Stuttgart: University of Hohenheim, 2003.
- [14] Liang X, Chen Y, Li H, et al. Nitrogen interception in floodwater of rice field in Taihu region of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(12): 1474-1481.
- [15] 朱兆良, 张福锁. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 264-275.
- ZHU Zhao-liang, ZHANG Fu-suo. Basic research on behavior and efficient use of nitrogen fertilizer in mainly agricultural ecosystem[M]. Beijing: Science Press, 2010: 264-275.
- [16] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143: 117-125.
- [17] 田玉华, 周伟, 尹斌. 田间原位测定氨挥发的装置及方法: 中国, 102207454 A[P]. 2011-10-05.
- TIAN Yu-hua, ZHOU Wei, YIN Bin. Device and method of field in-situ determination of ammonia volatilization: China, 102207454 A[P]. 2011-10-05.
- [18] 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 Mei-hua, YIN Bin, ZHANG Shao-lin, et al. Effects of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy fields[J]. *Soil*, 2006, 38(3): 263-269.
- [19] 高鹏程, 张一平. 氨挥发与土壤水分散失关系的研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 29(6): 22-26.
- GAO Peng-cheng, ZHANG Yi-ping. Research on relationship between volatilization of ammonia and evaporation of soil water[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2006, 29(6): 22-26.
- [20] 王朝辉, 田霄鸿, 李生秀, 等. 冬小麦生长后期地上部分氮素的氨挥发损失[J]. 作物学报, 2004, 27(1): 1-6.
- WANG Zhao-hui, TIAN Xiao-hong, LI Sheng-xiu, et al. Nitrogen losses from winter wheat plant by NH_3 volatilization in late growing stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 27(1): 1-6.