

# 冬绿肥二月兰-春玉米体系中施肥后的土壤氨挥发特征

熊 静<sup>1</sup>,王改兰<sup>1</sup>,曹卫东<sup>2,3</sup>,白金顺<sup>2</sup>,杨 璐<sup>4</sup>,高嵩涓<sup>4</sup>,志水胜<sup>5</sup>,曾闹华<sup>2</sup>

(1. 湖南农业大学 资源环境学院 湖南 长沙 410128; 2. 农业部作物营养与施肥重点开放实验室 中国农业科学院 农科资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 青海大学 青海 西宁 810016; 4. 中国农业科学院 研究生院 北京 100081; 5. 筑波大学 农林学系 日本 茨城县 305-8572)

**摘要:** 在二月兰-春玉米体系中,运用土壤氨挥发原位测定方法,分别在玉米基肥和追肥时期测定土壤氨挥发量,以探索二月兰翻压后土壤氨挥发特征。结果表明,基肥时期氨挥发量在 0.94~3.27 kg/hm<sup>2</sup>,氨挥发导致的氮损失率为 1.34%~2.91%,占玉米季氨挥发总量的 3.12%~6.80%;相同施氮水平下,有绿肥处理氨挥发量高于无绿肥处理,平均高出 1.04 kg/hm<sup>2</sup>。追肥时期,各施肥处理的氨挥发量为 27.17~46.81 kg/hm<sup>2</sup>,氨挥发引起的氮损失率为 34.50%~41.61%,占氨挥发总量的 93.20%~96.88%。相同施氮水平下有无绿肥处理之间无明显差异。从春玉米整个生育期来看,氨挥发随着施氮量的增加而增加,二月兰翻压对氨挥发无明显影响,各施肥处理春玉米季由于氨挥发导致的氮损失量为 28.50~48.32 kg/hm<sup>2</sup>,氮损失率为 16.28%~20.20%。

**关键词:** 二月兰; 氨挥发; 春玉米

中图分类号: S142 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2013)02-0150-05

## The Characteristics of Ammonia Volatilization after Fertilization in February Orchid/Spring Maize System

XIONG Jing<sup>1</sup>, WANG Gai-lan<sup>1</sup>, CAO Wei-dong<sup>2,3</sup>, BAI Jin-shun<sup>2</sup>, YANG Lu<sup>4</sup>,  
GAO Song-juan<sup>4</sup>, SHIMIZU Katsuyoshi<sup>5</sup>, ZENG Nao-hua<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China; 3. Qinghai University, Xining 810016, China; 4. The Graduate School, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China; 5. Institute of Agriculture and Forestry, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki-ken 305-8572, Japan)

**Abstract:** In the February Orchid (*Orychophragmus violaceus*)/Spring Maize (*Zea mays* L.) system, ammonia volatilization was investigated by the method of in situ field determination during the basal and top dressing fertilization periods of spring maize to study the characteristics of ammonia volatilization after the February Orchid was incorporated into soil as green manure. The results showed that the ammonia volatilization amounts ranged from 0.94 kg/ha to 3.27 kg/ha after the basal fertilization, the N loss rates resulted from ammonia volatilization were 1.34%~2.91%, accounting for 3.12%~6.80% of the total ammonia volatilization amounts of the whole spring maize season. Under the same nitrogen application levels, the ammonia volatilization amounts of treatments with green manure were averagely 1.04 kg/ha higher than those without green manure. After top dressing fertilization, the ammonia volatilization amounts were 27.17~46.81 kg/ha, and the N loss rates caused by ammonia volatilization varied from 34.50% to 41.61%, accounting for 93.20%~96.88% of the total ammonia volatilization amounts. No obvious differences were observed between the treatments with and without green manure. In general, the ammonia volatilization increased as a result of the N addition, while was little affected by the green manure. During the whole spring maize season, total ammonia volatilization amounts ranged from 28.50 kg/ha to 48.32 kg/ha in the treatments of fertilization, meanwhile, the N loss rates caused by ammonia volatilization varied from 16.28% to 20.20%.

收稿日期: 2013-01-15

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201103005); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 202-6); 作物种质资源保护和利用项目(NB2012-2130135-34); 国家农作物种质资源平台运行服务项目

作者简介: 熊 静(1987-),女,重庆人,在读硕士,主要从事植物营养与施肥研究。

通讯作者: 曹卫东(1968-),男,安徽贵池人,研究员,博士,主要从事绿肥利用与清洁农业生产研究。

**Key words:** February Orchid; Ammonia volatilization; Spring maize

我国耕地占全球耕地的 9% ,人口总数占世界的 22% ,肥料消耗却占 35%<sup>[1]</sup> ,其中高氮肥投入现象尤为明显。1990 年以来,华北地区小麦-玉米轮作体系的氮素年总输入量为 665.7 kg/hm<sup>2</sup> ,年总输出量为 539.0 kg/hm<sup>2</sup> ,农田土壤氮素年盈余量达 126.7 kg/hm<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。过量氮素的存在,增加了氮素损失的风险。华北平原为石灰性土壤,氮挥发是化学氮肥主要的损失途径之一,占施氮量的 23%<sup>[3]</sup>。氮挥发带来了许多环境问题,如大气沉降、NH<sub>3</sub> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的积累导致水体富营养化,同时在大气中转化为 N<sub>2</sub>O、NO 等温室气体,引起空气质量恶化等<sup>[4]</sup>。

氮挥发受土壤理化性质、气候条件、耕作方式等的影响<sup>[5-6]</sup>。氮挥发随着土壤 pH 值、温度、风速的增加而增加,土壤含水量适中时氮挥发量最高<sup>[7-8]</sup>。有学者利用微气象学法(梯度扩散法)对大面积冬小麦-夏玉米地土壤氮挥发进行了测定,结果显示,灌溉后表面撒施尿素时的氮挥发为 24% ,而雨后表面撒施尿素时的氮挥发为 37%<sup>[9]</sup>。

利用绿肥作物生长过程中所产生的全部或部分绿色体,直接或间接翻压到土壤中作肥料,这部分绿色体称为绿肥<sup>[10]</sup>。目前华北地区冬小麦面积逐渐萎缩,大田栽培作物向一年一熟制演变趋势加剧,导致大量土地冬春季节闲置。京津冀地区冬闲土地面积近 200 万 hm<sup>2</sup> ,这些地区春玉米收获到翌年播种前,有 7 个月左右的时间处于空闲裸露状态。为了减少土地裸露,研发了以二月兰(*Orychophragmus violaceus*) 作为冬季覆盖作物的春玉米种植体系,其中二月兰作为冬绿肥在冬春季节覆盖地表、春季盛花期翻压作绿肥。

有机无机配施可以有效减少氮挥发损失,其中有机肥和化肥各半配施时氮挥发损失量和占施氮量的比例最低<sup>[11-12]</sup>。绿肥作为一种有机体,其种植翻压也可能会影响着土壤氮及肥料氮的去向,目前关于绿肥翻压对氮挥发影响的研究报道较为少见。本试验对二月兰翻压后春玉米地土壤氮挥发特征进行了研究,为京津冀地区冬绿肥-春玉米体系应用提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验在中国农业科学院廊坊万庄试验基地(116°35'E、39°34'N) 进行。该地属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温为 11.9℃ ,年平均日照时数

在 2 660 h 左右,无霜期为 183 d 左右;年降水量为 554.9 mm ,6-8 月降水量达全年总降水量的 70%~80%。

供试土壤为砂质石灰性潮土,基本理化性质为 pH 值 8.39、有机质 4.16 g/kg、全氮 0.34 g/kg、全磷(P) 0.54 g/kg、全钾(K) 19 g/kg、碱解氮 17.6 mg/kg、有效磷(P) 4.2 mg/kg、速效钾(K) 73.0 mg/kg、阳离子交换量 10.6 cmol(+)/kg、容重 1.24 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

试验为定位试验,始于 2008 年。试验设有、无绿肥两因素和 0、70%、85%、100% 这 4 个施肥水平,共计 8 个处理,分别为绿肥+0 化肥(G+F1)、绿肥+70% 化肥(G+F2)、绿肥+85% 化肥(G+F3)、绿肥+100% 化肥(G+F4)、0 化肥(F1)、70% 化肥(F2)、85% 化肥(F3)、100% 化肥(F4)。100% 化肥的用量为 N 225.0 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 112.5 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 112.5 kg/hm<sup>2</sup>。春玉米季氮肥按照 1:1 的比例分别在播前基施和十叶期追施,磷、钾肥一次性基施。采用随机区组排列,4 次重复。小区面积 2.4 m×4.8 m=11.52 m<sup>2</sup>。

供试绿肥作物为二月兰,玉米品种选用郑单 958。试验于 2011 年 7 月撒播二月兰,2012 年 4 月 21 日翻压二月兰并施基肥,二月兰翻压量 22 500 kg/hm<sup>2</sup>。玉米 4 月 28 日播种,播种密度为 75 000 株/hm<sup>2</sup> ,2012 年 6 月 21 日施追肥,施肥方式为大田开沟均匀撒施。

### 1.3 氨气捕获

本试验采用通气法捕获氨气<sup>[13]</sup>。所用的收集装置由 PVC 管制成,内径为 15 cm,高为 12 cm。测定过程中分别将两块厚度均为 2 cm、直径为 16 cm 的海绵浸上 15 mL 的磷酸甘油溶液(50 mL 磷酸+40 mL 丙三醇,定容至 1 000 mL) 后,置于 PVC 管中,下层海绵为氨气吸收层、距管底 5 cm,上层海绵为外部隔离层、与管顶部相平。取样时,将下层海绵取出,迅速按小区分别装入塑料袋中、密封,同时换上另一块刚浸过磷酸甘油的海绵。取下的海绵带回实验室后,置于 500 mL 塑料瓶中,加入 300 mL 2 mol/L 的 KCl 溶液,使海绵完全浸入其中,振荡 1 h,测定浸提液中的铵态氮含量。

分别在玉米基肥与追肥时期测定田间氨挥发。施肥后当天在各个小区分别放置 2 个氨气收集装置,然后在施肥后第 1、2、3、4、5、6、7、10、13、20、27 天取样并放置新的收集装置,每次取样在当天 8:00

进行。

#### 1.4 测定方法

浸提液中的铵态氮用连续流动分析仪( AutoAnalyzer3 德国 SEAL 公司) 测定。

氨挥发速率计算公式:  $\text{NH}_3\text{-N}(\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})) = (\text{M}/(\text{A}\cdot\text{D}))/100$ , 其中 M 为通气法单个装置平均每次测得的氨量( $\text{NH}_3\text{-N}$ , mg)、A 为捕获装置的截面积( $\text{m}^2$ )、D 为每次连续捕获的时间(d)。

占氨挥发总量百分比 = ( 某次施肥后氨挥发量 / 春玉米季总氨挥发量 )  $\times 100\%$ 。

氨挥发量占施氮量比例 = ( ( 氨挥发量 - 不施氮小区氨挥发量 ) / 小区施氮量 )  $\times 100\%$ 。

#### 1.5 数据处理

试验数据均采用 SAS 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥后土壤氨挥发速率及其挥发量变化

从施基肥后土壤氨挥发排放速率来看( 图 1 ), 各个处理的氨挥发动态变化基本一致。所有处理均出现 2 个排放峰值, 分别为施肥后第 1 天和第 7 天。随施肥量的增加氨挥发速率上升, 同一施氮水平下有绿肥处理高于无绿肥处理。

施肥后第 1 天( 4 月 21 日 ) , 各个处理的氨挥发速率已出现 1 个峰值, 最高达  $0.38 \text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$ 。随后各个处理氨挥发速率迅速下降, 在施肥后第 2 天达到低值。从施肥后第 3 天开始, 各个处理氨挥发速率又逐渐上升, 在施肥后第 7 天( 4 月 27 日 ) 时出现第 2 个峰值, 最高达  $0.24 \text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$ 。其中, 在施肥后第 3 天, 有绿肥处理氨挥发速率明显大于无绿肥处理, 到施肥后第 7 天时, 有绿肥处理氨挥发速率最高值达到  $0.24 \text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$ , 无绿肥处理氨挥发速率最高值仅为  $0.10 \text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$ 。连续测定至第 27 天( 5 月 17 日 ) 时, 各个处理氨挥发速率已无明显差异, 处于  $0.04 \sim 0.09 \text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$ 。

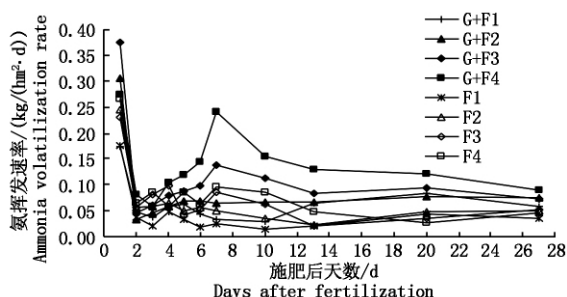


图 1 施用基肥后不同处理土壤的氨挥发速率

Fig. 1 Rate of ammonia volatilization after basal-dressing with different treatments

从图 2 可以看出, 在施用追肥后各个处理( 不

施肥处理除外) 的氨挥发动态变化基本一致, 施肥是影响氨挥发的主要因素, 氨挥发速率随施肥量的增加明显上升。所有处理均在施肥后第 5 天出现氨挥发速率峰值, 之后第 7 天又出现一小高峰, 此时各个施肥处理氨挥发速率基本一致, 随后逐渐下降。从各个处理来看, 氨挥发速率表现为同一施氮水平下有绿肥处理与无绿肥处理无明显差异。

各个处理的氨挥发速率从施肥后第 1 天( 6 月 21 日 ) 逐渐上升, 第 4 天开始迅速上升, 最大上升幅度达到  $10.56 \text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$ 。到第 5 天时, 各个处理( 不施肥处理除外 ) 达到峰值为:  $0.24 \sim 16.85 \text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$ , 各个处理之间表现为:  $\text{G} + \text{F4} \approx \text{F4}$ 、 $\text{G} + \text{F3} \approx \text{F3}$ 、 $\text{G} + \text{F2} \approx \text{F2}$ 、 $\text{G} + \text{F1} \approx \text{F1}$ 。随后各个处理氨挥发速率迅速下降。连续测定至第 27 天( 7 月 16 日 ) 时, 各个处理氨挥发速率已无明显差异, 处于  $0.01 \sim 0.24 \text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$ 。追肥后的挥发速率大大高于基肥时期, 主要是受温度和土壤水分的影响。

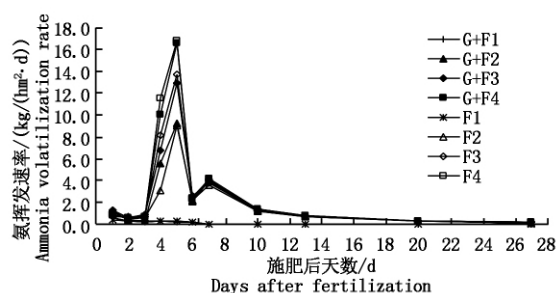


图 2 施用追肥后不同处理土壤的氨挥发速率

Fig. 2 Rate of ammonia volatilization after top-dressing with different treatments

### 2.2 施肥后土壤氨挥发量的变化

表 1 是 2 次施肥后土壤氨挥发情况。可以看出, 施用基肥和追肥时期, 不同施肥方式的氨挥发量均随着施氮量的增加而增加。施基肥后氨挥发量绝对值较低, 氨挥发量在  $0.94 \sim 3.27 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , 所引起的氮损失率为  $1.34\% \sim 2.91\%$ ; 同一施氮水平下有绿肥处理氨挥发量略大于无绿肥处理, 平均高出  $1.04 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。在追肥时期, 除 2 个不施氮肥处理外, 其他施肥处理的氨挥发量达到  $27.17 \sim 46.81 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , 氨挥发导致的氮损失率为  $34.50\% \sim 41.61\%$ 。追肥时期, 同一施氮水平下有无绿肥处理之间的氨挥发量无明显差异。

从整个生育期来看, 两次施肥春玉米季氨挥发引发的氮损失率为  $16.28\% \sim 20.20\%$ , 同一施氮水平下有无绿肥之间无明显差异。施追肥后氨挥发占玉米季氨挥发的绝大部分, 追肥时期氨挥发量占挥发总量的  $93.20\% \sim 96.88\%$ , 基肥时期氨挥发量仅为玉米季挥发总量的  $3.12\% \sim 6.80\%$ 。追肥时期氮

挥发量远远高于基肥时期的主要原因应该是受气温和土壤水分的影响(图3)。追肥时期平均气温为 25.62 ℃,基肥时期平均气温仅为 18.85 ℃。温度升高能增加液相中氨态氮在铵态氮和氨态氮总量中的比例,还能增加氨分配在气相中的比例,其中氨气

的扩散速率也会随着温度的上升而增加<sup>[5]</sup>。在 2 个施肥时期,降雨量也有很大差别,追肥时期降雨总量达到 169.60 mm,而基肥时期仅为 37.60 mm。土壤水分随着降雨量的增加而增加,土壤水分含量增加能促进尿素的水解,进而促进氨气的挥发<sup>[14]</sup>。

表 1 不同处理春玉米季施肥后的氮挥发量及其引起的氮损失率

Tab. 1 Ammonia volatilization amounts and N loss rates after fertilizations in Spring Maize with different treatments

处理 Treatments	基肥后氮挥发 Ammonia volatilization after basal fertilization			追肥后氮挥发 Ammonia volatilization after top-dressing fertilization			氮挥发总量 Total Amount of ammonia volatilization	
	挥发量 /(kg/hm <sup>2</sup> ) Amount	占基施氮 百分比/% Percent to base fertilizer N	占氮挥发总量 百分比/% Percent to total amount of ammonia volatilization	挥发量 /(kg/hm <sup>2</sup> ) Amount	占追施氮 百分比/% Percent to topdressing N	占氮挥发总 量百分比/% Percent to total amount of ammonia volatilization	总量 /(kg/hm <sup>2</sup> ) Total amount	占总施氮量 百分比/% Percent to total N application
G + F1	1.66bcd	—	47.82	1.81e	—	52.18	3.47	—
G + F2	1.96bc	2.49	5.96	30.97d	39.32	94.04	32.93	18.70
G + F3	2.45ab	2.56	6.02	38.22c	39.97	93.98	40.63	19.45
G + F4	3.27a	2.91	6.80	44.89ab	39.90	93.20	48.16	19.86
F1	0.94d	—	32.89	1.92e	—	67.11	2.87	—
F2	1.34cd	1.70	4.69	27.17d	34.50	95.31	28.50	16.28
F3	1.40cd	1.47	3.42	39.63bc	41.45	96.58	41.04	19.96
F4	1.51cd	1.34	3.12	46.81a	41.61	96.88	48.32	20.20

注: 同一列不同字母表示在 5% 水平下差异显著。

Note: Different letters in a column mean significant at 5%.

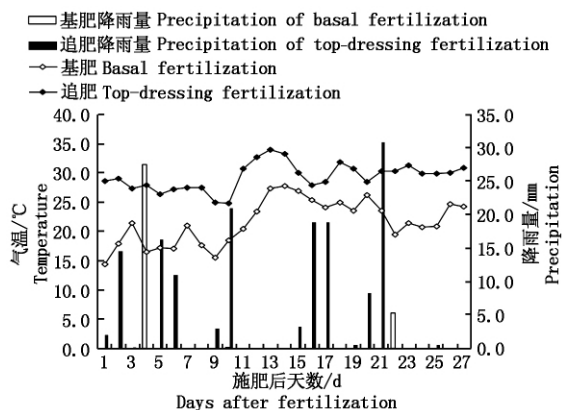


图 3 春玉米季施肥阶段气温与降雨量

Fig. 3 Air temperature and precipitation during the fertilization period in the Spring Maize season

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

大气中的氨以不同的方式危害着自然环境,如通过大气沉降到地面引起水污染和改变生物多样性等<sup>[15-16]</sup>。其主要来源是农业生产活动,据统计德国 95.4% 的氨气来自于农业<sup>[17]</sup>。农业中大量氮肥的施用导致了大量氮素流入大气中,氨气就是主要气体之一。目前对减少氨挥发的措施已有不少研究,如有机无机肥配施。与单施有机肥或单施无机肥相比,有机无机肥配施能够减少土壤的氨挥发损失量,

其中有机肥与化肥各半为最佳施入比例<sup>[11-12]</sup>。主要原因是有机肥施入土壤后转化为  $\text{NH}_4^+$  的速度比较慢,使土壤中的  $\text{NH}_4^+$  浓度较低,限制了土壤中的氨挥发<sup>[18]</sup>。二月兰生长会产生大量有机体,它的种植和翻压也可能会影响着土壤的氨挥发。

基肥时期氨挥发速率峰值出现在施肥后第 1 天和第 7 天,追肥时期氨挥发速率峰值出现在施肥后第 5 天。出现这一规律的原因是由于尿素本身性质和二月兰翻压。尿素在春季(10~14 ℃)施入土壤后 6 d 为分解挥发的高峰,夏季(33~35 ℃)3 d 后达到分解挥发的高峰<sup>[19]</sup>。在本试验中,基肥时期平均温度在 18.85 ℃,追肥平均温度在 25.62 ℃。基肥时期,第 1 天出现了一次排放高峰,原因可能是大量二月兰的翻入会提高土壤的温度,进而促进土壤中氨的挥发。

基肥时期,二月兰翻压对氨挥发有一定影响,表现为相同施氮水平下,有二月兰处理氨挥发量高于无二月兰处理。导致这一现象的原因,主要是绿肥本身氮素养分转化和腐解过程导致物理化学变化所引起的。一是二月兰本身在腐解过程中其体内氮素转化会释放出氨气。收割的绿肥通过微生物作用会产生  $\text{NH}_4^+$ ,而这些  $\text{NH}_4^+$  又极易生成氨气<sup>[20]</sup>。微生物的数量与活性决定着  $\text{NH}_4^+$  的量,而氮素是微生物主要食物来源,因此,不同的绿肥释放的氨气量不

同<sup>[21]</sup>。绿肥含氮量越高,氨气释放量越大<sup>[22]</sup>。二是二月兰翻入土壤后,腐解过程中会提高表层土壤含水量、地温和脲酶活性<sup>[23]</sup>,同时改变了土壤的疏松度。在一定含水量范围内,旱地土壤氨挥发随着含水量的增加而增加,同时地温的升高和疏松度的提高也会促进氨气的挥发<sup>[5]</sup>。脲酶作为尿素水解产生氨气的条件酶,其活性的增强必定会促进氨气的产生。

追肥时期,二月兰的翻压对氨气排放无明显影响,表现为同一施氮水平下,有二月兰处理氨挥发量与无二月兰处理基本一致。二月兰翻压后氮素释放规律为前期快,后期慢,在翻压 14 d 后,氮的释放量能占到总量的 50.01%<sup>[24]</sup>。追肥时间为 6 月 21 日,此时二月兰已经翻压了 62 d,二月兰的大部分氮素已经释放,所以此时期二月兰本身释放的氨气量较少,也对土壤氨挥发无明显影响。追肥时期氨挥发量远远大于基肥时期,其主要原因是,追肥时期温度和降雨量均高于基肥时期。对尿素来说,脲酶活性会因为温度的升高而增强<sup>[25]</sup>。在旱作上土壤水分含量对氨挥发有重大的影响,奚振邦<sup>[14]</sup>研究了上海郊区甘蓝地上尿素的氨挥发损失,结果表明,与水稻田间试验相比,在施肥后灌水,使表层土壤含水量升高会导致氨挥发量的剧增。本试验中,追肥时期大量的降雨提高了土壤含水量,一定程度上促进了土壤氨挥发量的增加。

### 3.2 结论

本研究结果表明,从春玉米整个生育期来看,土壤氨挥发损失主要集中在施肥后 7 d 内,不同施肥方式下氨挥发速率和氨挥发量均随着施氮量的增加而增加;二月兰翻压对氨挥发无明显影响。在基肥时期,相同施氮水平下,有绿肥处理氨挥发速率及挥发量高于无绿肥处理,挥发量平均高出 1.04 kg/hm<sup>2</sup>,氨挥发引起的氮损失率为 1.34%~2.91%,占玉米季氨挥发总量的 3.12%~6.80%;在追肥时期,有无绿肥处理之间无明显差异,各施肥处理的氨挥发量为 27.17%~46.81 kg/hm<sup>2</sup>,氨挥发导致的氮损失率为 34.50%~41.61%,占氨挥发总量的 93.20%~96.88%。

致谢:感谢青岛农业大学资源与环境学院本科生吕鹏超、杨少伟;华中农业大学资源与环境学院本科生王晓茹在试验取样和测试过程中给予的极大帮助。

### 参考文献:

- [1] 粮农组织统计数据库[DB]. 2009.
- [2] 陈新平,张福锁. 冬小麦-夏玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京:中国农业出版社,2006.
- [3] 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.

- [4] Hayashi K, Nishimur 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, 3909: 485 - 494.
- [5] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1992: 220 - 282.
- [6] 徐万里,刘 骅,张云舒,等. 施肥深度、灌水条件和氨挥发监测方法对氮肥氨挥发特征的影响[J]. *新疆农业科学*, 2011, 48(1): 86 - 93.
- [7] 曲清秀. 铵态氮肥在石灰性土壤中损失的研究[J]. *土壤肥料*, 1980(3): 31 - 35.
- [8] 赵振达,张金盛,任顺荣. 旱地土壤中氮的挥发损失[M]. 北京:科学出版社,1986.
- [9] 李贵桐,李保国,陈德立. 大面积冬小麦夏玉米农田土壤的氨挥发[J]. *华北农学报*, 2002, 17(1): 76 - 81.
- [10] 曹卫东,徐昌旭,刘忠宽,等. 中国主要农区绿肥作物生产与利用技术规程[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2010.
- [11] 葛顺峰,姜远茂,彭福田,等. 春季有机肥和化肥配施对苹果园土壤氨挥发的影响[J]. *水土保持学报*, 2010(10): 199 - 203.
- [12] 刘红梅,庞凤梅,赖 欣,等. 供氮水平和有机无机配施对麦田土壤氨挥发的影响[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(12): 7119 - 7122, 7249.
- [13] 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.
- [14] 奚振邦,施秀珠,黄伟祥,等. 应用微气象学方法测定尿素的氨挥发损失[J]. *上海农业学报*, 1987(3): 47 - 56.
- [15] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O *et al.* Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands[J]. *Science*, 2004, 303: 1869 - 1876.
- [16] Emmett B A. Nitrogen saturation of terrestrial ecosystems: some recent findings and their implications for our conceptual framework[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2007, 7: 99 - 109.
- [17] Statistisches Bundesamt. Statistisches Jahrbuch 2004 für die Bundesrepublik Deutschland[M]. 2005.
- [18] 王旭刚,郝明德,陈 磊,等. 长期施肥条件下小麦农田氨挥发的原位研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(7): 998 - 1005.
- [19] 刘宗衡,罗亦云,邢 竹,等. 尿素肥料在土壤中分解、转化、移动规律的研究[J]. *土壤肥料*, 1980(3): 36 - 39.
- [20] Riedo M, Milford C, Schmid M *et al.* Coupling soil-plant-atmosphere exchange of ammonia with ecosystem functioning in grasslands[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 158: 83 - 110.
- [21] De Neve S, Hofman G. Modeling N mineralization of vegetable crop residues during laboratory incubations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 1451 - 1457.
- [22] Kooijman A M, Kooijman-Schouten M M, Martinez-Hernandez G B. Alternative strategies to sustain N-fertility in acid and calcareous beech forests: low microbial N-demand versus high biological activity[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9: 410 - 421.
- [23] Rochette P, Denis A, Angers *et al.* Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-tilled soils: A laboratory comparison[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 13: 310 - 315.
- [24] 刘 佳. 二月兰的营养特性及其绿肥效应研究[D]. 北京:中国农业科学院,2010.
- [25] Mulvaney R L, Bremner J M. Control of urea transformation in soils[J]. *Soil Biochemistry*, 1981(5): 153 - 196.