

张 翀, 李雪倩, 苏 芳, 等. 施氮方式及测定方法对紫色土夏玉米氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6):1194–1201.

ZHANG Chong, LI Xue-qian, SU Fang, et al. Effects of different fertilization and measurement methods on ammonia volatilization of summer maize in purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6):1194–1201.

## 施氮方式及测定方法对紫色土夏玉米氨挥发的影响

张 翀<sup>1</sup>, 李雪倩<sup>1</sup>, 苏 芳<sup>1</sup>, 朱 波<sup>2</sup>, 巨晓棠<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘 要:**以川中丘陵区紫色土为对象,研究了撒施尿素添加脲酶抑制剂及尿素深施对夏玉米季氨挥发的减排效果,为合理施肥和减少农田氨排放提供依据;同时,对比风洞法和密闭室连续抽气法测定氨挥发的结果,为准确定量农田氨挥发提供方法依据。设置5个施氮方式处理,分别为:不施氮(CK);农民传统施氮——雨后撒施尿素(BC);撒施添加有 Limus(德国 BASF 公司新开发的脲酶抑制剂)的尿素(BC+Limus);尿素一次性条施(Band1);尿素分两次条施(Band2)。除不施氮处理外,其他处理施氮量均为 150 kg·hm<sup>-2</sup>,各处理采用密闭室连续抽气法测定氨挥发。另外,选取农民传统施氮处理用风洞法测定氨挥发,以研究不同测定方法对氨挥发损失量的影响。结果表明:紫色土夏玉米季农民传统的施氮方式氨挥发损失率可高于 40%,而处理 BC+Limus、Band1、Band2 的氨挥发损失率分别为 4.8%、3.8%、1.3%,分别比处理 BC 减少了 90%、92%和 97%的氨挥发损失,均具有很好的减排效果。密闭室连续抽气法测定氨挥发量稍高于风洞法,氨挥发损失率分别为 48.4%和 41.9%,但差异不显著。

**关键词:**氨挥发;施氮方式;测定方法;紫色土;夏玉米;氨减排

中图分类号:S143.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)06-1194-08 doi:10.11654/jaes.2016.06.024

### Effects of different fertilization and measurement methods on ammonia volatilization of summer maize in purple soil

ZHANG Chong<sup>1</sup>, LI Xue-qian<sup>1</sup>, SU Fang<sup>1</sup>, ZHU Bo<sup>2</sup>, JU Xiao-tang<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Soil properties, local climatic conditions and fertilization method in purple soil regions may significantly affect ammonia volatilization (AV). In this study, the effects of different fertilization methods on AV from purple soil were investigated during summer maize growth in middle Sichuan Province. Two different AV measurement methods (i.e., wind tunnel method and continuous airflow enclosure method) were compared to better quantify ammonia emissions from croplands. Five fertilization methods with three replicates were used in the experiment included CK (no nitrogen fertilizer), BC (broadcast urea, which is the local conventional practice), BC+Limus [broadcast urea amended with urease inhibitor Limus (a new urease inhibitor developed by BASF)], Band1 (band urea once), Band2 (band urea twice). The AV in all the treatments was determined by enclosure method. For BC treatments, AV was monitored by a wind tunnel system simultaneously. Results showed that AV loss rates were greater than 40% in BC, but only 4.8%, 3.8% and 1.3% in BC+Limus, Band1 and Band2, respectively, a reduction of 90%, 92%, and 97% as compared with BC. Ammonia loss rate (48.4%) measured by continuous airflow enclosure method was slightly higher than that by wind tunnel method (41.9%), but no significant difference between them was found.

**Keywords:** ammonia volatilization; N fertilization method; measurement method; purple soil; summer maize; ammonia mitigation

收稿日期: 2015-12-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB417101)

作者简介: 张 翀(1987—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事农田氨挥发及减排措施研究。E-mail: jackzhang@cau.edu.cn

\* 通信作者: 巨晓棠 E-mail: juxt@cau.edu.cn

氮肥合理施用对粮食增产具有关键的作用<sup>[1]</sup>。在所有氮肥品种中,尿素因其含氮量高、安全且易于运输等特点,在发展中国家得到广泛使用<sup>[2]</sup>。尿素施入土壤后,需要经过水解转化为  $\text{NH}_4^+$  才能进一步被作物吸收利用。在适宜的水热条件下,这一水解过程很迅速,导致施肥点附近土壤的  $\text{NH}_4^+$  和 pH 迅速升高,增加了尿素氨挥发损失的风险<sup>[3]</sup>。大量研究表明,尿素的平均氨挥发损失率为 20%~25%,撒施尿素氨挥发损失率可高于 50%<sup>[4-5]</sup>。氮肥以氨挥发形式损失到环境中,不仅造成了直接的经济损失,而且对生态环境及人类健康造成负面影响<sup>[6-7]</sup>。

减少农田氨挥发的措施有多种,国内外常见的有氮肥深施、施肥后灌水(以水带氮)、改变氮肥形态和使用添加剂等。Rochette 等<sup>[8]</sup>研究表明,尿素施用深度大于 7.5 cm 时,氨挥发损失可忽略不计。受土壤性质的影响,能够有效降低氨挥发的灌水量一般在 5~75 mm 范围内<sup>[9-10]</sup>。通过改变氮肥的形态,如施用硝酸铵、缓/控释氮肥等也可明显降低氨挥发<sup>[11-12]</sup>。脲酶抑制剂通过减缓尿素水解而减少氨挥发损失,在所有的脲酶抑制剂中,NBPT(N-丁基硫代磷酰三胺)抑制效果显著,也是商业上最广泛使用的脲酶抑制剂。德国 BASF 公司在 NBPT 的基础上,研发出一种新型脲酶抑制剂 Limus, Limus 由 75% NBPT 和 25% NPPT 组成。关于该新型脲酶抑制剂在我国的使用效果,仅有北方的报道<sup>[13-14]</sup>。

农田氨挥发的测定方法较多,目前国内外常用的方法有通气法、密闭室连续抽气法、德尔格氨管法(简称 DTM)、风洞法、微气象法等。通气法<sup>[15]</sup>具有成本低,便于开展小尺度多田块监测的优点,但不能考虑田间风速对氨挥发的影响。DTM<sup>[16]</sup>虽考虑田间风速,但采样时间过短,且采用手泵抽气,可能会造成人为误差。微气象法是测定氨挥发绝对量的最可靠的方法<sup>[17]</sup>,但其对下垫面面积及技术要求很高,在我国应用尚少<sup>[18]</sup>。密闭室连续抽气法被很多国内研究者所采用<sup>[19-21]</sup>,该方法在一定程度上改善了箱内被测区域的微气象条件,使测量结果更接近真实值,且便于开展多处理的对比研究,不足之处是只能部分考虑田间风速对氨挥发的影响。风洞法能够使箱内气象条件、土壤条件及生物状况类似于外界条件,测量结果更有代表性,而且风洞能够实现 24 h 连续监测,因此测定结果更加准确,其测定结果已得到国内外的广泛认可<sup>[22-23]</sup>。但由于其使用和维护需要较高的技术和成本,不便做多处理的对比试验,限制了其广泛

使用。

受农民施肥习惯、土壤性质及气候条件的影响,紫色土夏玉米季氮肥的氨挥发损失严重<sup>[24]</sup>。本研究旨在通过使用脲酶抑制剂 Limus 及深施的方法,探讨改进施肥方式在紫色土夏玉米季的减排效果,为减少氮肥损失和环境影响提供依据。同时,本研究采用密闭室连续抽气法对氨挥发进行监测,并与课题组前期建立起的风洞系统进行同步研究,对比风洞法和密闭室连续抽气法的测定结果,为准确定量农田氨排放提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验环境条件

试验点位于中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站(31°16'N, 105°28'E),地处川中丘陵区域,海拔高度为 400~600 m。该区属亚热带季风气候,年均气温为 17.3 °C。多年平均降雨量为 826 mm,且季节分布不均,春季占 5.9%,夏季占 65.5%,秋季占 19.7%,冬季占 8.9%(1981—2006 年)。土壤类型为石灰性紫色土,土层厚度为 30~80 cm<sup>[25]</sup>。供试土壤(0~20 cm)的基本理化性质为:有机质含量 8.3 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 0.7 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 42.3 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷 4.5 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 120.1 mg·kg<sup>-1</sup>,容重 1.38 g·cm<sup>-3</sup>,pH8.3(水土比为 2.5:1)。

### 1.2 试验设计

为研究不同施氮方式对紫色土氨挥发的影响,本研究所用田块的作物种植类型为冬小麦-夏玉米轮作。夏玉米于 2015 年 5 月 18 日人工开穴播种,行距 50 cm,株距 30 cm。密闭室连续抽气法试验区共设 5 个施氮方式处理,3 次重复,小区面积为 2 m×2 m=4 m<sup>2</sup>。5 个处理分别为:不施氮(CK);农民传统施氮——雨后撒施(BC);撒施添加有 Limus 的尿素(BC+Limus);尿素一次性条施(Band1);尿素分两次条施(Band2)。除不施氮处理外,其他处理施氮量均为 150 kg·hm<sup>-2</sup>。处理 BC、BC+Limus、Band1 于 2015 年 6 月 15 日一次性追施氮肥,处理 Band2 于 2015 年 6 月 15 日和 7 月 29 日按照 3:2 的比例追施氮肥。各处理采用密闭室连续抽气法测定氨挥发,各处理施氮方式及施氮量见表 1,所有处理均不施磷钾肥。条施施肥深度为 10 cm,宽度为 8 cm。风洞法试验区仅设置一个农民传统施氮处理,3 次重复,三个风洞平行排列,间隔为 2 m。风洞法与密闭室连续抽气法中的农民传统施氮处理管理一致,以研究不同测定方法对氨挥发测定量的影响。

表1 施氮方式及施氮量

Table 1 Methods and rates of nitrogen application

| 处理代号<br>Code of treatment | 施氮方式<br>N application methods | 施氮量 N application rates/kg·hm <sup>-2</sup> |                      |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|
|                           |                               | 三叶期<br>3-leaf stage                         | 十叶期<br>10-leaf stage |
| CK                        | —                             | 0                                           | 0                    |
| BC                        | 撒施 Broadcast                  | 150                                         | 0                    |
| BC+Limus                  | 撒施 Broadcast                  | 150                                         | 0                    |
| Band1                     | 条施 Banding                    | 150                                         | 0                    |
| Band2                     | 条施 Banding                    | 90                                          | 60                   |

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 氨挥发

本研究所用风洞法装置,是课题组参照 Martin Kogge 等设计的风洞改造制作的,建造的风洞回收率能达到 90%以上,其内部的风速能够通过控制系统调节与外界风速一致,因而能够更好地模拟田间风速。其具体设计见文献[23]。风洞法测定氨挥发的原理如图 1 所示。在风扇(FC050,ZIEHL-ABEGG)驱动下,气流稳定地流过风洞洞体,只要测量风洞进气前后的氨气质量差,就可以获得氨挥发通量。进气口和出气口的空气在真空泵(N840.1.2FT.18,KNF Neuberger)驱动下,以转子流量计(D10A1197D,Bailey Fischer & Porter)控制恒定流速,分别经过 150 mL 浓度为 0.025 mol·L<sup>-1</sup> 的稀硫酸,最终将氨吸收在稀硫酸溶液中。每天在固定时间更换并采集气体收集瓶中的稀硫酸,收集到的溶液用靛酚蓝分光光度法测定其 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量,进而计算出氨挥发速率。

密闭室连续抽气法的装置参照文献[19],并加以改进。其测定氨挥发的原理如图 2 所示。通气管高 2.5 m,以保证进入空气室的氨浓度一致并处于较低的背景浓度。空气交换室外径 20 cm、内径 19 cm、高

8 cm,材质为有机玻璃。为保证气密性,每个空气交换室配有圆形底座。底座可插入土壤中,上部为高 3 cm 的密封水槽,下部为高 5 cm 的 PVC 圆管,四周均匀打孔,以保证水肥畅通。样品采集时将空气交换室置于水槽上,向水槽注入适量水,采样完毕后将空气交换室移走,以保证底座内外的土壤和气象条件与相应小区一致。向每个洗气瓶中加入 80 mL 的氨吸收液(浓度为 0.025 mol·L<sup>-1</sup> 的稀硫酸)。每天 8:00—10:00 和 15:00—17:00 开启真空泵采样,抽气速率以空气交换室体积的倍数计算,即换气频率。控制换气频率为 15~20 次·min<sup>-1</sup>,将收集到的氨吸收液带回实验室,用靛酚蓝分光光度法测定其 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量,从而计算出氨挥发速率。

#### 1.3.2 环境因子

试验田装有微型气象站,用以监测所在田块的风速及风向、风洞内外的大气温湿度、土壤温湿度等环境因子。降雨量数据由距试验田 10 m 的试验站综合气象场获取。微型气象站以 CR1000(Campbell scientific)数据采集器为核心,集成了风速风向仪(Met

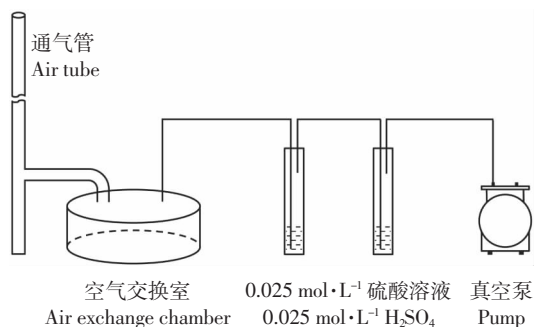


图2 密闭室连续抽气法测定氨挥发的原理图

Figure 2 Schematic diagram of measuring ammonia volatilization by continuous airflow enclosure chamber method

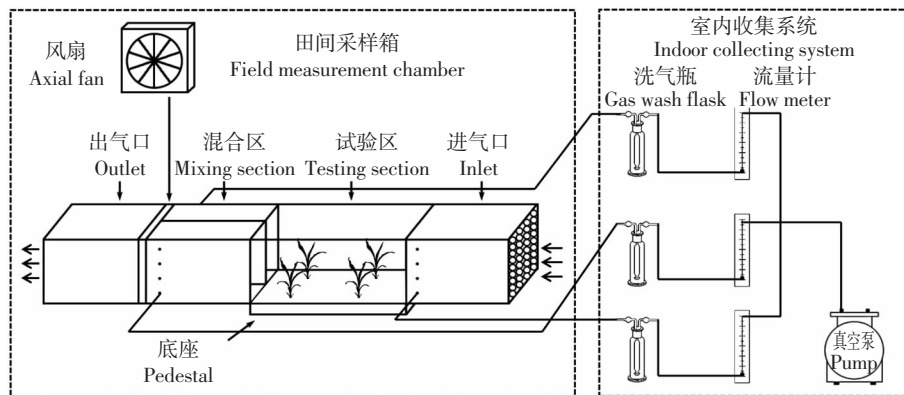


图1 风洞法测定氨挥发的原理图

Figure 1 Schematic diagram of measuring ammonia volatilization by wind tunnel method

One 034B, Campbell scientific)、空气温湿度传感器(HMP155, VAISALA)、土壤温度传感器(109, Campbell scientific)、湿度传感器(CS616, Campbell scientific)以及风洞内的风速传感器(8455, TSI)。微型气象站数据采集时间分辨率为10 min。

### 1.3.3 土壤指标

施肥前1 d及氨挥发测定期间每隔2~3 d采集对应施肥小区0~20 cm新鲜土壤样品,过3 mm土筛并测定土壤无机氮含量。采样时,不施氮和氮肥撒施的小区随机取两钻混合,氮肥条施的小区,在施肥带上随机选取两钻混合。风洞法因其全天连续工作,不便采集试验区域的土壤,因此仅采集抽气法试验区的土壤样品。称取12.00 g土样于250 mL塑料瓶中,加入100 mL 0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>溶液。振荡1 h后用无铵滤纸过滤至10 mL离心管中,放入-20℃冰箱冷冻保存,连续流动分析仪(TRAACS 2000, Bran and Luebbe)测定NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量。与此同时,称取25 g左右土样放入铝盒中,在105℃下烘干24 h测定土壤质量含水量。

### 1.4 数据处理

试验数据采用Microsoft Excel 2010和SPSS 20进行分析,采用Sigmaplot 12.5绘图。

#### 1.4.1 风洞法氨挥发计算方法

流经风洞进出气口氨的总质量计算式为:

$$M=C \times V \times N$$

式中: $M$ 为流经风洞进出气口氨的总质量,mg; $C$ 代表某一时间段进出气口采集到的吸收液氨氮浓度,mg·L<sup>-1</sup>; $V$ 是吸收液的体积,L; $N=v \times t \times a / (f \times t)$ ,为流经风洞气体体积除以抽气体积所得倍数, $v$ 为风洞内风速,m·s<sup>-1</sup>; $t$ 为测定时间,s; $a$ 为风洞进气口截面积,m<sup>2</sup>; $f$

为抽气总流量,m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>。

若 $C$ 为24 h内采集到的吸收液的氨氮浓度,则日氨挥发速率计算式为:

$$\text{NH}_3\text{-N}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) = [(M_o - M_i) / S] \times 10^{-2}$$

式中: $M_o$ 、 $M_i$ 分别为流经风洞进气口、出气口氨的总质量,mg; $S$ 为风洞试验区面积,m<sup>2</sup>,本研究所用风洞试验区面积为1.05 m<sup>2</sup>;10<sup>-2</sup>为单位换算系数。

#### 1.4.2 密闭室连续抽气法氨挥发计算方法

密闭室连续抽气法日氨挥发速率计算公式为:

$$\text{NH}_3\text{-N}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) = [\sum_{i=1}^4 C_i \times V \times 24 / (T \times S)] \times 10^{-2}$$

式中: $C_i$ 为1 d采集到的四个洗气瓶中吸收液的氨氮浓度,mg·L<sup>-1</sup>; $V$ 为吸收液体积,L; $T$ 为采样总时间,h,本研究为4 h; $S$ 为空气交换室所覆盖的面积,m<sup>2</sup>,本研究为0.028 m<sup>2</sup>;10<sup>-2</sup>为单位换算系数。

分别将风洞法和密闭室间歇通气法测得的日氨挥发速率相加得到氨累积排放量,作为紫色土夏玉米季氨挥发损失量。各施肥处理的氨挥发损失率为氨累积排放量(扣除不施肥处理氨累积排放量)占施氮量的比例。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施氮方式下紫色土氨挥发

图3a为夏玉米季三叶期施肥后各处理的氨挥发速率及环境因子动态变化。处理BC的氨挥发速率在施肥后第2 d即达到最大峰值,为13.6 kg·hm<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>。随后整体呈现下降的趋势;第9 d 99.8 mm的降雨使氨挥发速率迅速下降,但随着土壤温度升高,氨挥发速率有略微上升的趋势,随后降至与不施肥处理相当

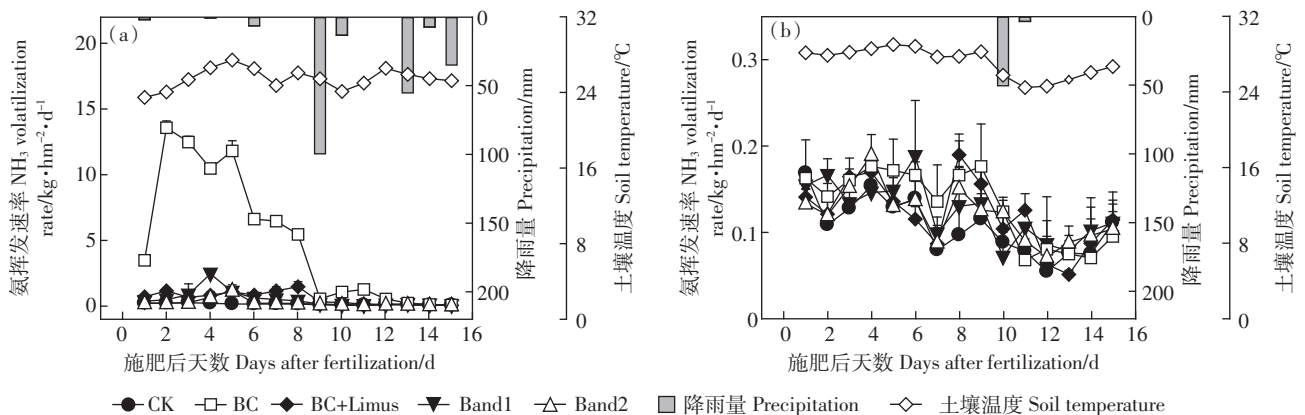


图3 不同施氮方式下紫色土氨挥发速率及环境因子动态变化(a:三叶期;b:十叶期)

Figure 3 Dynamics of ammonia volatilization rates and environmental factors under different fertilization methods in purple soil (a: 3-leaf stage; b: 10-leaf stage)

的水平。由于脲酶抑制剂对尿素水解的抑制作用,处理 BC+Limus 的氨挥发速率在施肥后前 8 d 一直处于波动状态,自施肥至测定结束期间,氨挥发速率在  $0.03\sim 1.44\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  的范围内波动。处理 Band1 的氨挥发速率呈先增加后下降的趋势,在施肥后第 4 d 出现最大峰值,为  $2.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。处理 Band2 氨挥发速率变化趋势与处理 Band1 相似,但氨挥发速率峰值推迟至第 5 d 出现,为  $1.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

图 3b 为夏玉米季十叶期施肥后各处理的氨挥发速率及环境因子动态变化。处理 Band2 虽然追氮  $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。但由于氮肥深施加之土壤含水量较低,氨挥发速率没有出现明显的峰值。各处理氨挥发速率变化趋势基本与土壤温度变化趋势一致。

图 4a 为三叶期施肥后不同处理土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量动态变化。由于处理 Band1 和处理 Band2 采集的是施肥带上的土壤,土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量很高,所有施肥处理土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量呈先增加后降低的趋势,且氨挥发峰值与土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  峰值的出现基本同步。由图 4b 可以看出,施肥后土壤  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  逐渐升高,第 9 d 累积降雨量为  $99.8\text{ mm}$  的暴雨将部分  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  淋洗至土壤下层,土壤表层  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  含量明显降低;此后,伴随着温度升高,一部分  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  转化为  $\text{NO}_3^+\text{-N}$ ,处理 BC+Limus、Band1 和 Band2 的  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  升高后又下降。

图 4c 为十叶期施肥后不同处理土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量动态变化。可以看出,不施肥的处理土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量很低。与三叶期不同的是,十叶期施肥时土壤干燥,处理 Band2 的尿素水解缓慢,土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量在施肥后第 6 d 才出现峰值,至测定结束,处理 Band2 土壤  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  含量一直呈上升的趋势(图 4d)。虽然在施肥后第 10 d 出现了  $50.2\text{ mm}$  的降雨,但由于土壤干燥,没有出现三叶期因降雨使表层土壤  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  降低的现象。

## 2.2 不同测定方法下紫色土氨挥发

图 5 为风洞法和密闭室连续抽气法测得的氨挥发速率及环境因子动态变化。可以看出,风洞法在施肥后第 3 d 出现氨挥发速率最大峰值,为  $15.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ,高于密闭室连续抽气法测得的氨挥发峰值。在施肥后的第 3~7 d,风洞法测得的氨挥发速率呈下降趋势,并且比密闭室连续抽气法测得的氨挥发速率低,可能是风洞内土壤温度比密闭室连续抽气法所在的大田温度低所致。施肥一周后,风洞法测得的氨挥发速率随着土壤温度升高而增大,随后逐渐降低。风洞的试验区在测定期间是不接收降雨的,因此没有出现降雨后氨挥发速率立即降低的趋势。风洞法和密闭室连续抽气法测得的氨挥发累积损失量分别为  $64.4$ 、 $75.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

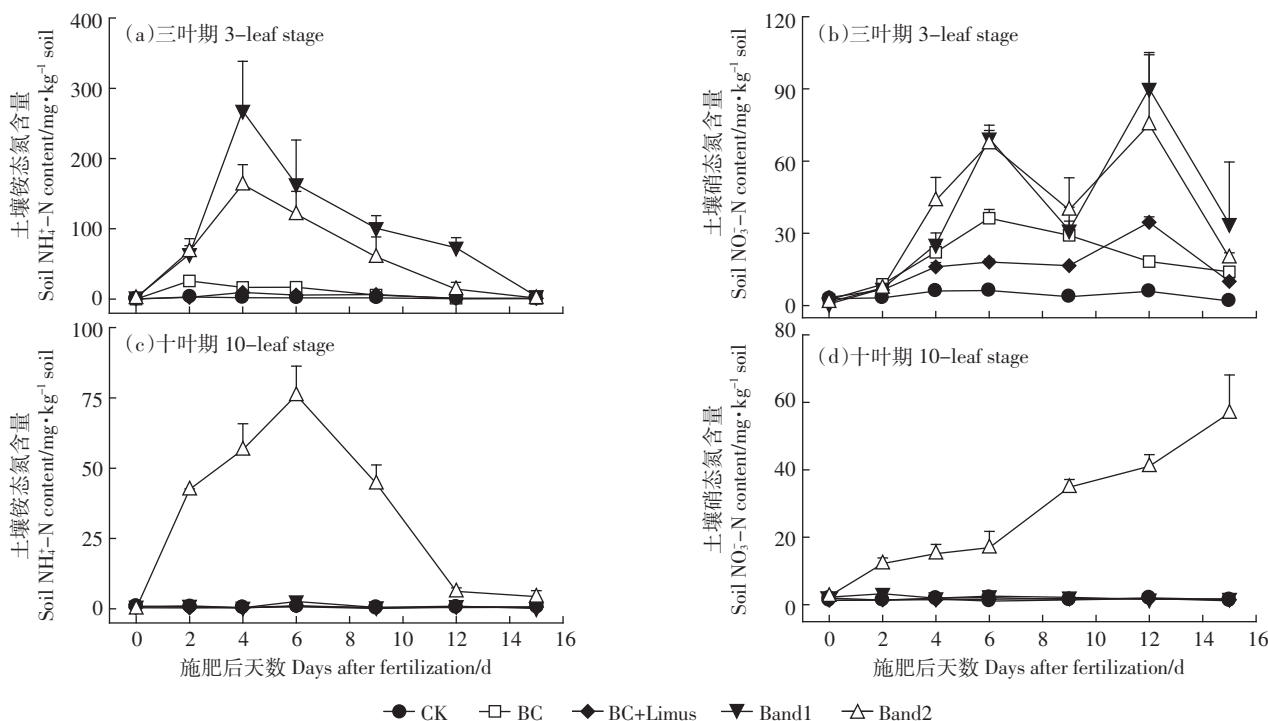


图 4 不同施氮方式下紫色土铵态氮和硝态氮动态变化

Figure 4 Dynamics of soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  content under different fertilization methods in purple soil

### 2.3 不同施氮方式及测定方法下紫色土氨挥发损失

对不同施氮方式及测定方法紫色土夏玉米季氨挥发损失汇总分析如图6所示,其中柱状图上方的百分数为氨挥发损失率,风洞法受设备限制不能同时做不施肥处理,其土壤的背景排放以抽气法中的不施肥处理为基数。由图6可以看出,氮肥撒施时,风洞法和密闭室连续抽气法氨挥发损失率分别为41.9%和48.4%。而处理BC+Limus、Band1、Band2有效地降低

了氨挥发损失,与撒施相比,分别可减少90%、92%、97%的氨挥发损失。

### 3 讨论

本课题组前期研究结果(2013年)表明,紫色土夏玉米季撒施尿素的氨挥发损失率为34.1%<sup>[24]</sup>,本研究在2015年用两种测定方法测得的撒施处理的氨挥发损失率均高于40%。这与施肥时的土壤湿度及测定期间的气象条件有关。周静等<sup>[26]</sup>在红壤上的研究结果表明,氨挥发峰值的出现随土壤含水量的增加而提前。2013年和2015年夏玉米季在施肥时土壤体积含水量分别为28.4%和30.3%。2015年两种测定方法均在施肥后前3d出现了氨挥发的最大峰值,此外在施肥后的一周内没有出现过强降雨,为氨挥发创造了适宜的条件。而在2013年夏玉米季,在氨挥发速率逐渐增大的过程中出现了强降雨和降温的天气,减小了氨挥发速率,从而减少了氨挥发累积损失量。综上所述,施肥时土壤湿度较高及施肥后一周内降雨很少是造成2015年夏玉米氨挥发损失比2013年高的原因。这一研究结果与Tian等<sup>[27]</sup>在江苏水稻-小麦轮作体系小麦季的研究一致。

脲酶抑制剂通过抑制脲酶活性减缓尿素水解及 $\text{NH}_4^+$ 的产生,进而减少尿素的氨挥发损失<sup>[28]</sup>。NBPT是一种被广泛使用的、能够有效减少氨挥发的脲酶抑制剂<sup>[29]</sup>。李欠欠<sup>[13]</sup>通过培养试验证明了新型脲酶抑制剂Limus的减排潜力要比NBPT大,并在我国北方研究了Limus的减排潜力,结果表明,添加Limus的尿素比普通尿素可减少65%~100%的氨挥发损失<sup>[14]</sup>。本研究中撒施添加有Limus的尿素,其氨挥发损失率仅为4.8%,比普通尿素减少了90%的氨挥发。然而选择何种方式减少氨挥发损失,还要综合考虑机械化水平、劳动力、氮肥市场及价格等因素。

氮肥深施后既增加了土壤颗粒对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附,又可阻碍 $\text{NH}_3$ (液相和气相)向上扩散,从而减少氨挥发损失<sup>[3]</sup>。Rochette等<sup>[8]</sup>在酸性粉砂壤土上研究了不同施肥深度对氨挥发的影响,结果表明:尿素条状表施时氨挥发损失率为50%,每深施1cm可在此基础上减少7%的氨挥发损失率,当施肥深度大于7.5cm时,氨挥发损失可忽略不计。本研究中,尿素条状深施10cm时氨挥发损失率为3.8%,高于上述研究。这一方面是由于石灰性紫色土pH较高,氨挥发潜力较大<sup>[30]</sup>;另一方面,如前所述,施肥时较高的土壤湿度及施肥后一周内很少的降雨都为氨挥发创造了适宜

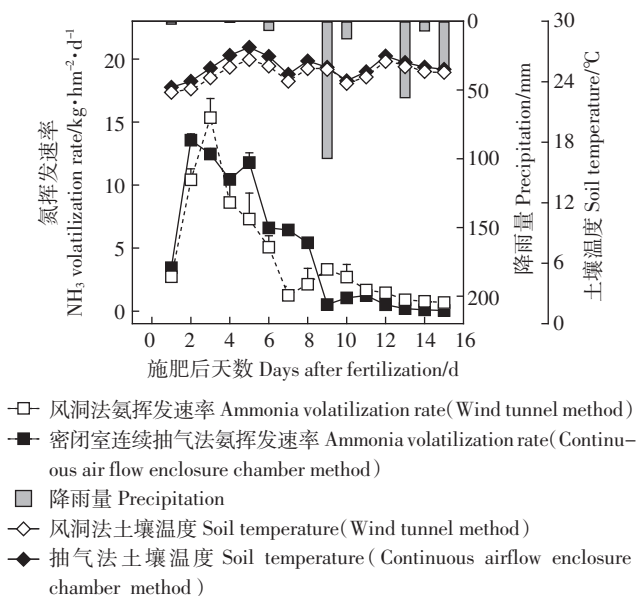
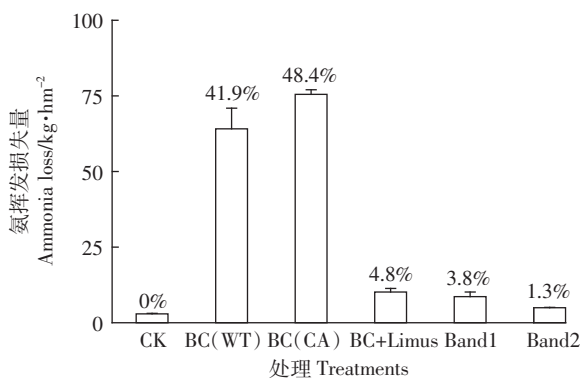


图5 不同测定方法下紫色土氨挥发速率及环境因子动态变化

Figure 5 Dynamics of ammonia volatilization rates and environmental factors under different measurement methods in purple soil



WT、CA 分别指风洞法和密闭室连续抽气法;  
柱状图上的百分数为氨挥发损失率

WT、CA is wind tunnel method and continuous airflow enclosure chamber method, respectively. Percentages above bar mean ammonia loss rates

图6 不同施氮方式及测定方法紫色土夏玉米氨挥发损失

Figure 6 Ammonia losses under different fertilization and measurement methods of summer maize in purple soil

条件。与农民传统施氮方式相比,氮肥一次性条施、分两次条施分别减少了92%和97%的氨挥发,均达到了很好的减排效果。

本研究中,密闭室连续抽气法测得的氨挥发损失高于风洞法。这可能与两种方法采用的风速有关,风洞法能够使系统内部的风速更接近自然环境条件<sup>[23]</sup>,而密闭室连续抽气法是一种强制交换的方法,将换气频率固定为15~20次·min<sup>-1</sup>。Kissel等<sup>[31]</sup>认为在外界风速变小时,空气交换室内部的风速高于土壤表面的实际风速,此时会导致氨挥发测定结果偏高。此外,密闭室连续抽气法是在每天的某一时段采样,进而换算为日氨挥发损失率。因此,采样时段的选择将直接影响到测定结果的准确性。密闭室连续抽气法测得的氨挥发损失量虽高于风洞法,但未达到显著水平( $P>0.05$ ),说明抽气法测定农田氨挥发的结果也有较高的可靠性。

## 4 结论

紫色土夏玉米季农民传统的施氮方式氨挥发损失严重,在适宜的气象条件下,氨挥发损失率可高于40%。此时,撒施添加有脲酶抑制剂 Limus 的尿素,氮肥一次性条施和氮肥分两次条施的氨挥发损失率仅为4.8%、3.8%和1.3%,均可减少90%以上的氨挥发损失,具有很好的减排效果。密闭室连续抽气法测定氨挥发结果略高于风洞法的测定结果,两者差异不显著。

**致谢:** 中国农业大学刘学军教授为本研究提供 Limus 尿素,在此表示感谢!

## 参考文献:

- [1] 蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 1-6.  
CAI Zu-cong, YAN Xiao-yuan, ZHU Zhao-liang. A great challenge to solve nitrogen pollution from intensive agriculture[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(1): 1-6.
- [2] Ni K, Pacholski A, Kage H. Ammonia volatilization after application of urea to winter wheat over 3 years affected by novel urease and nitrification inhibitors[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 184-194.
- [3] Sommer S G, Schjoerring J K, Denmead O T. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops[J]. *Advances in Agronomy*, 2004, 82: 557-622.
- [4] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. Reducing ammonia volatilization in a no-till soil by incorporating urea and pig slurry in shallow bands[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 84(1): 71-80.
- [5] Hunter F W, Alley M M, Thomason W, et al. Agronomic evaluation of coated urea to reduce ammonia volatilization from side-dress applications to corn[J]. *Crop Management*, 2013, 12(1). doi:10.1094/CM-2013-0117-01-RS.
- [6] Gu B J, Sutton M A, Chang S X, et al. Agricultural ammonia emissions contribute to China's urban air pollution[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(5): 265-266.
- [7] Stokstad E. Ammonia pollution from farming may exact hefty health costs[J]. *Science*, 2014, 343(6168): 238-238.
- [8] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: How deep to incorporate urea?[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(6): 1635-1642.
- [9] Ferguson R B, Kissel D E. Effects of soil drying on ammonia volatilization from surface-applied urea[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(2): 485-490.
- [10] Holcomb J C, Sullivan D M, Horneck D A, et al. Effect of irrigation rate on ammonia volatilization[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(6): 2341-2347.
- [11] 苏芳, 黄彬香, 丁新泉, 等. 不同氮肥形态的氨挥发损失比较[J]. 土壤, 2006, 38(6): 682-686.  
SU Fang, HUANG Bin-xiang, DING Xin-quan, et al. Ammonia volatilization of different nitrogen fertilizer types[J]. *Soils*, 2006, 38(6): 682-686.
- [12] 卢艳艳, 宋付朋. 不同包膜控释尿素对农田土壤氨挥发的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7133-7140.  
LU Yan-yan, SONG Fu-peng. Effects of different coated controlled-release urea on soil ammonia volatilization in farmland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7133-7140.
- [13] 李欠欠. 脲酶抑制剂 LIMUS 对我国农田氨减排及作物产量和氮素利用的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.  
LI Qian-qian. Effect of urease inhibitor LIMUS on ammonia mitigation and crop yield and nitrogen use efficiency in different croplands of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [14] Li Q Q, Yang A L, Wang Z H, et al. Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 175: 96-105.
- [15] 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.
- [16] 李欠欠, 李雨繁, 高 强, 等. 传统和优化施氮对春玉米产量、氨挥发及氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 571-579.  
LI Qian-qian, LI Yu-fan, GAO Qiang, et al. Effect of conventional and optimized nitrogen fertilization on spring maize yield, ammonia volatilization and nitrogen balance in soil-maize system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(3): 571-579.
- [17] Shah S B, Westerman P W, Arogo J. Measuring ammonia concentrations and emissions from agricultural land and liquid surfaces: A review[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, 56(7): 945-960.

- [18] Roelcke M, Li S, Tian X, et al. *In situ* comparisons of ammonia volatilization from N fertilizers in Chinese loess soils[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 62(1):73-88.
- [19] 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(5):893-900.  
TIAN Yu-hua, HE Fa-yun, YIN Bin, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region as affected by N and P combination in fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5):893-900
- [20] 山 楠, 赵同科, 毕晓庆, 等. 不同施氮水平下小麦田氨挥发规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9):1858-1865.  
SHAN Nan, ZHAO Tong-ke, BI Xiao-qing, et al. Ammonia volatilization from wheat soil under different nitrogen rates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9):1858-1865.
- [21] Shang Q Y, Gao C M, Yang X X, et al. Ammonia volatilization in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(5):715-725.
- [22] Gong W W, Zhang Y S, Huang X F, et al. High-resolution measurement of ammonia emissions from fertilization of vegetable and rice crops in the Pearl River Delta Region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 65:1-10.
- [23] 黄彬香, 苏 芳, 丁新泉, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——风洞法[J]. 土壤, 2006, 38(6):712-716.  
HUANG Bin-xiang, SU Fang, DING Xin-quan et al. German wind-tunnel system for measuring ammonia volatilization from agricultural soil[J]. *Soils*, 2006, 38(6):712-716.
- [24] 张 翀, 韩晓阳, 李雪倩, 等. 川中丘陵区紫色土冬小麦/夏玉米轮作氨挥发研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11):1359-1366.  
ZHANG Chong, HAN Xiao-yang, LI Xue-qian, et al. Ammonia volatilization in winter wheat/summer maize rotation system of purple soil in hilly area of Central Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(11):1359-1366.
- [25] Zhu B, Wang T, Kuang F H, et al. Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the Central Sichuan Basin, China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4):1419-1426.
- [26] 周 静, 崔 键, 王 霞. 红壤不同含水量对尿素氨挥发的影响[J]. 土壤, 2008, 40(6):930-933.  
ZHOU Jing, CUI Jian, WANG Xia. Effects of red soil moisture on ammonia volatilization of urea[J]. *Soils*, 2008, 40(6):930-933.
- [27] Tian G M, Gao J L, Cai Z C, et al. Ammonia volatilization from winter wheat field top-dressed with urea[J]. *Pedosphere*, 1998, 8(4):331-336
- [28] Gill J S, Bijay-Singh, Khind C S. Efficiency of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide in retarding hydrolysis of urea and ammonia volatilization losses in a flooded sandy loam soil amended with organic materials[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 53(3):203-207.
- [29] Chien S H, Prochnow L I, Cantarella H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts[J]. *Advances in Agronomy*, 2009, 102(9):267-322
- [30] 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 Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Soil nitrogen of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992:171-185.
- [31] Kissel D E, Brewer H L, Arkin G F. Design and test of a field sampler for ammonia volatilization[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(6):1133-1138.