

不同施肥模式下夏玉米田间土壤氨挥发规律

李宗新^{1,2}, 王庆成¹, 刘开昌¹, 董树亭^{2,*}, 王空军², 张吉旺², 刘春晓²

(1. 山东省农业科学院玉米研究所, 济南 250100; 2. 山东农业大学作物生物学国家重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 利用通气法田间原位试验, 研究了不同施肥模式对夏玉米田间土壤氨挥发的影响。结果表明: 单施化肥与秸秆还田配施化肥处理的田间氨挥发速率日变化与白天田间土壤表层温度 (简称地温) 变化表现基本一致, 呈现由低到高的“单峰”趋势。夏玉米田间氨挥发损失的高峰期主要发生在白天 11:00 ~ 13:00。但持续时间较短, 单施化肥与秸秆还田配施化肥处理均在氮肥施入当天田间氨挥发速率达最高值, 此后迅速降低, 氨挥发损失主要集中于前 7d, 累计氨挥发量占总量的 88.57% ~ 96.72%。与单施化肥相比, 秸秆还田配施化肥可显著减少氨挥发损失 4.06 ~ 8.25 kg·hm⁻², 氨挥发损失率降低 0.37% ~ 1.17%。夏玉米大喇叭口期后对氮素需求较多, 较高的田间土壤持水量均可以削弱氨挥发损失。确定适宜的秸秆与氮肥配比量, 适量增加大喇叭口期的氮肥追施量配合及时浇水, 是提高氮肥利用效率的有效途径之一。

关键词: 夏玉米; 氮肥; 氨挥发; 施肥模式

文章编号: 1000-0933(2009)01-0307-08 中图分类号: Q142, Q948, S314, S513 文献标识码: A

Law of field soil ammonia volatilization in summer maize under different fertilizer patterns

LI Zong-Xin^{1,2}, WANG Qing-Cheng¹, LIU Kai-Chang¹, DONG Shu-Ting^{2,*}, WANG Kong-Jun², ZHANG Ji-Wang², LIU Chun-Xiao²

1 Maize Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China

2 State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 0307 ~ 0314.

Abstract: *In situ* experiments combined with venting method were conducted to study the effects of different fertilization patterns on ammonia volatilization from soil in the growth season of summer maize. The results showed that the NH₃ volatilization rate of treatment of single fertilizer and treatment of wheat straw plus fertilizer had one peak and it first increased and then decreased after application of fertilizer. This trend behaved accordant with the change of earth temperature during the daytime. Ammonia volatilization occurred primarily during the daytime and the peak volatilization appeared between 11:00 — 13:00 each day. The high speed of volatilization continued for only a short period. Whether treated with single fertilizer or with wheat straw plus fertilizer, the NH₃ volatilization rate peaked, and then rapidly decreased. The accumulative ammonia volatilization of the first 7 days accounted for 88.57% ~ 96.72%. Compared with single fertilizer, wheat straw plus fertilizer reduced the total rate of accumulative ammonia volatilization significantly, which was 4.06 ~ 8.25 kg·hm⁻² less in treatment of wheat straw plus fertilizer, and its loss rate reduced 0.37% ~ 1.17%. More N fertilizer was demanded after period of flare opening of summer maize, and high field water capacity could weaken loss of ammonia volatilization. The results also indicated that increasing rate of N fertilizer at the rapid growth stage and assuring the optimal proportion of wheat straw to N fertilizer could reduce NH₃ volatilization and was an effective approach to increase nitrogen use efficiency.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30471025); “十一五” 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAD02A09, 2007BAD89B09, 2007BAD31B03); 山东省农业科学院创新基金资助项目 (2007YCX024)

收稿日期: 2008-02-15; **修订日期:** 2008-11-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: stdong@sdaa.edu.cn

Key Words: summer maize; N fertilizer; ammonia volatilization; fertilization pattern; *in situ*

氮素是植物生长发育过程中最重要的元素之一^[1],氮肥的大量施用有力地保障了粮食生产,但随着氮肥施用量逐年增大以及施用方法不合理,由此带来的环境和生态问题已然影响到农业的可持续发展^[2]。相关研究一直是农业与环境科学研究的热点和重点^[2]。大量的研究表明,我国农田氮肥的利用率只有 20% ~ 40%^[2],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,而且对环境产生污染。其中,氨挥发(ammonia volatilization)是氮素损失的重要途径之一,全世界施入土壤中的氮肥,1% ~ 47% 氨挥发进入大气^[3]。

近几十年来国内外有关田间土壤氨挥发的研究报道也很多,测定方法主要有密闭法^[4]、微气象法^[5]、风洞法^[6],微气象法和风洞法的准确性高,但要求较大的试验区域,多适用于大型生态区域的气体动态研究,通气法是在密闭法基础上设计改良的,氨捕获装置结构简单,操作简便易行,适用于田间小区试验原位测定^[7]。由于水田氮肥施用多撒施于表层,氨挥发损失较大^[8],国内的相关研究多侧重于稻田^[9~11],较系统地研究了气候条件^[12,13]、土壤性质^[14]、化肥品种^[15]和施用方式^[16]等对氨挥发的影响,旱地氨挥发试验相对较少,且多为研究方法^[7,17]或单一肥料运筹^[18,19]的相关研究,缺乏不同肥料运筹条件下旱地氨挥发规律的研究与评估。

关于秸秆还田和氮肥配施对土壤的培肥与增产效果已有过不少报道^[20,21]。世界上农业发达的国家大都非常重视秸秆还田,发展生态农业^[22],我国的传统农业亦很重视,且秸秆还田沿用已久^[23]。但随着化肥在农业生产的大量应用,秸秆还田多配施常规用量或高量的氮肥,导致单位播种面积的施氮量迅速上升,氮肥的利用率却一直不高,这就意味着绝大部分氮素损失了^[24]。小麦、玉米连作或套作是黄淮海平原地区的重要种植模式^[25],夏玉米生长季节高温加上土壤 pH 较高,导致黄淮海平原旱地的氨挥发较为严重^[26]。因此,在黄淮海平原粮食主产区研究分析多样肥料施用条件下氨挥发规律及其损失率,具有重要的生产指导意义。本试验对黄淮海平原地区小麦、玉米连作制度下不同施肥模式对夏玉米生长季节田间土壤氨挥发损失规律的影响进行了原位研究,以期了解该地区气候和施肥条件下的氨挥发损失特征,为抑制旱地氮素损失,提高氮肥利用效率及夏玉米优质高产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2003 ~ 2004 年在山东农业大学玉米科技园试验田进行,位于黄淮海平原地区,属于半湿润暖温带大陆性季风气候区,全年降雨集中在夏季(6 ~ 10 月份),年平均降雨量为 700 mm 左右,年均气温为 11 ~ 15 °C^[25]。该区主要的粮食种植方式为冬小麦/夏玉米轮作。供试土壤为棕壤,其基本理化性质为:pH 值 6.15,容重 1.25 g·cm⁻³,总孔隙度 48.5%,有机质含量 11.74 g·kg⁻¹,全氮含量 0.91 g·kg⁻¹,碱解氮含量 53.5 mg·kg⁻¹,速效钾(K)含量 54.8 mg·kg⁻¹,速效磷(P)含量 32.6 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验供试材料为夏玉米鲁单 50,6 月 16 日播种,10 月 2 日收获。试验设 5 个处理,分别为:HS(麦秸 7 500 + N 414 kg/hm²)、LS(麦秸 7 500 + N 174 kg/hm²)、HU(N 480 + P₂O₅ 6 + K₂O 5 4.75 kg/hm²)、LU(N 240 + P₂O₅ 6 + K₂O 5 4.75 kg/hm²)、CK(0 kg/hm²)。处理 HS 与 HU 的氮素投入量基本相等、处理 LS 与 LU 的氮素投入量基本相等,HS、LS、HU、LU 的施磷、钾量基本相等,麦秸的氮(N)、磷(P)、钾(K)含量分别为 0.88%、0.08% 和 0.73%,氮、磷、钾肥料品种分别为尿素(含 N 46%),过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)和硫酸钾(含 K₂O 50%)。每处理 3 次重复,共 15 个小区,随机排列,每小区种植 6 行玉米,株距 25cm,密度 60 000 株·hm⁻²。

播种前将麦秸耙碎翻耕还田,磷肥、钾肥在播种时做基肥施入,氮肥按 4:6 比例分别于 6 月 16 日(基肥)、7 月 15 日(追肥)于行间开沟施入,深度 10cm。播种后(6 月 19 日)大水灌溉 1 次,灌溉水量为 630 m³·hm⁻²,其后不再进行灌溉,其它栽培管理都按常规方法进行。

1.3 试验方法和结果统计

1.3.1 土壤氮挥发的测定方法

通气法(王朝辉法)^[4,17]:试验所用的通气法装置(图1)由聚氯乙烯硬质塑料管制成,内径15 cm,高12 cm。测定过程中分别将两块厚度均为2 cm、直径为16 cm的海绵均匀浸以15 ml的磷酸甘油溶液(50 ml磷酸+40 ml丙三醇,定容至1000 ml)后,将两层海绵置于硬质塑料管中,下层的海绵距地面5 cm,上层的海绵与管顶部相平。

土壤挥发氮的捕获于施肥后的当天开始,在各小区的不同位置,分别放置3个通气法氮捕获装置,次日7:00取样。取样时,将通气装置下层的海绵取出,迅速按小区号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。上层的海绵视其干湿情况3~7d

更换1次。变动摆放位置后,将装置重新放好,开始下一次田间吸收。把取下的海绵带回试验室,分别放入500 ml塑料瓶中,加1 mol/L KCl溶液300 ml,将海绵完全浸于其中,振荡1 h,测定浸提液的铵态氮含量。第1周,每天取样1次;第2~3周,每2~3 d取样1次,以后取样间隔可延长到7 d,直至监测不到氮挥发为止。

采用同样的方法,于施种肥和追肥后的第2天,从7:00开始,至19:00对HS、HU两个处理的田间土壤氮挥发速率进行测定,每隔2h测定1次;同时在两个处理各小区按照对角线分布分别放置5个地温计,埋设于表层土壤下5 cm,与田间土壤氮挥发速率测定同步观测、记录田间表层土壤温度。

氮挥发($\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$)计算公式: $\text{NH}_3\text{-N} = [M/(A \cdot D)] \times 10^{-2}$,其中, M 为通气法单个装置平均每次测的氨量($\text{NH}_3\text{-N}$, mg); A 为捕获装置的截面积(m^2); D 为每次连续捕获的时间,试验中以1d或1h为1个测定循环的单位。

1.3.2 分析方法和结果统计

铵态氮浸提液置于 -4°C 低温冰箱保存,用靛酚蓝比色法测定^[27]铵态氮浓度,每隔1d测定1次;测定结果用Excel、DPS分析软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 施种肥后不同施肥模式田间土壤氮挥发速率的动态变化

从图2可以看出,播种施肥后,田间土壤氮挥发迅速增强,施肥后第1天(6月16日),各处理小区的氮挥发速率已达最高,为 $0.58 \sim 9.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,处理之间表现为: $\text{HU} > \text{HS} > \text{LU} > \text{LS} > \text{CK}$;此后迅速降低,各施肥处理第2天氮挥发速率降幅达 $2.14 \sim 4.61 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,高氮肥处理HU、HS的氮挥发速率高于对应低氮肥处理LU、LS,秸秆还田配施氮肥处理HS、LS的氮挥发速率分别小于对应单施氮肥处理HU、LU。连续测定至第7天(6月22日)时,不同处理小区的氮挥发速率已无明显差异,介于 $0.03 \sim 0.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.2 追肥后不同施肥模式田间土壤氮挥发速率的动态变化

玉米大喇叭口期(7月15日)追肥后,田间土壤氮挥发的动态变化和播种施肥后的情况基本一致(图3)。各处理小区的氮挥发速率均在施肥后的第1天(7月15日)达到最大值 $0.31 \sim 7.53 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,处理之间表现为 $\text{HU} > \text{HS} > \text{LU} > \text{LS} > \text{CK}$,均普遍小于播种施肥后的氮挥发最大速率;施肥后第2天迅速降低,氮挥发速率降幅达 $2.11 \sim 4.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。因降雨中断测定3d,第6天各处理的氮挥发速率降低幅度不大,甚至略有回升,这与雨后天晴,地面温度升高氮挥发增强有关。至第7天(7月21日)后,各处理小区的氮挥发速率差异不明显,介于 $0.01 \sim 0.06 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

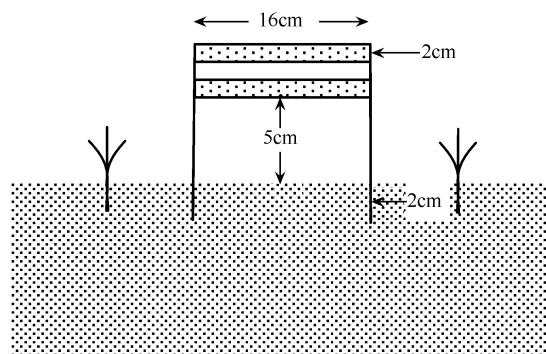


图1 田间氮挥发捕获器示意图

Fig. 1 Sketch map of methods for mensuration of ammonia volatilization from soil in field

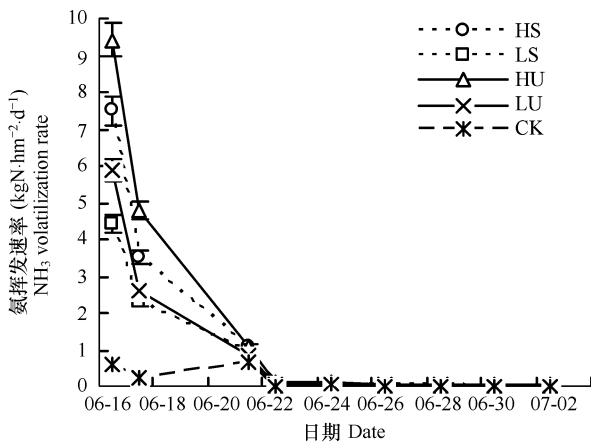


图2 施种肥后田间土壤氨挥发速率的动态变化

Fig. 2 Changes of NH_3 volatilization after application of fertilizer at planting

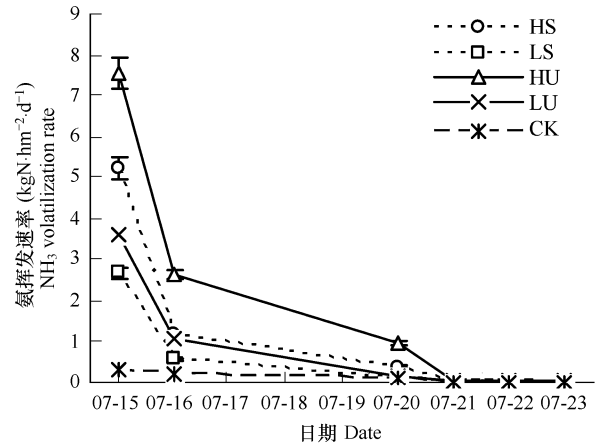


图3 追肥后田间土壤氨挥发速率的动态变化

Fig. 3 Changes of NH_3 volatilization after fertilizer application at side-dressing

2.3 不同施肥模式对田间土壤累计氨挥发量的影响

从图4可以看到,施种肥和追肥后各处理的累计氨挥发量均表现为与氨挥发速率相一致的大小顺序: $\text{HU} > \text{HS} > \text{LU} > \text{LS} > \text{CK}$; 方差分析结果显示,各处理间差异均极显著, HU 、 LU 的累计氨挥发量极显著高于对应的 HS 、 LS , HS 、 HU 的累计氨挥发量极显著高于对应的 LS 、 LU ; 施种肥后各处理的累计氨挥发量介于 $1.61 \sim 22.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,明显高于追肥后各处理的累计氨挥发量 $0.64 \sim 11.40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 低施氮量水平 LS 、 LU 追肥后的累计氨挥发量比施种肥后的减少量 ($2.543 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $3.82 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 明显低于高施氮量水平 HS 、 HU 的减少量 ($4.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $4.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

施肥处理中氨挥发损失一是来源于土壤原来残留的氮素,二是施入的氮素。假定施肥处理来自土壤残留氮素的氨挥发损失量等于不施氮小区的氨挥发损失量,那么施肥处理来自肥料的氨挥发损失量即氨挥发净损失量可由其与不施肥处理的差值来估算^[17],累计氨挥发净损失量与对应施氮肥量的比率即为氨挥发淋失率。运用差减法估算分析了施肥处理的累计氨挥发净损失量与氨挥发损失率,结果显示,各处理的累计氨挥发净损失量与其不同施肥期的累计氨挥发量差异基本一致,含量大小表现为: $\text{HU} > \text{HS} > \text{LU} > \text{LS}$, HS 、 LS 、 HU 、 LU 处理的氨挥发损失率分别为 3.99% 、 4.786% 、 5.16% 、 5.15% 。

各施肥处理间的累计氨挥发净损失量差异极显著,高施氮量水平 HS 、 HU 的累计氨挥发净损失量比对应低施氮量水平 LS 、 LU 分别高 8.22 、 $12.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; HS 、 LS 的累计氨挥发净损失量比对应施氮水平的 HU 、 LU 分别减少 8.25 、 $4.06 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。 HS 、 LS 的氨挥发损失率显著低于 HU 、 LU 处理,分别减小 1.17% 、 0.37% ,高施氮量水平 HS 、 HU 的氨挥发损失率与施低氮量水平 LS 、 LU 的差异不显著。

2.4 不同施肥模式田间土壤氨挥发与地温的关系

夏玉米播种施肥后第2天,7:00至19:00, HS 、 HU 两个处理的田间土壤氨挥发速率的变化趋势基本相

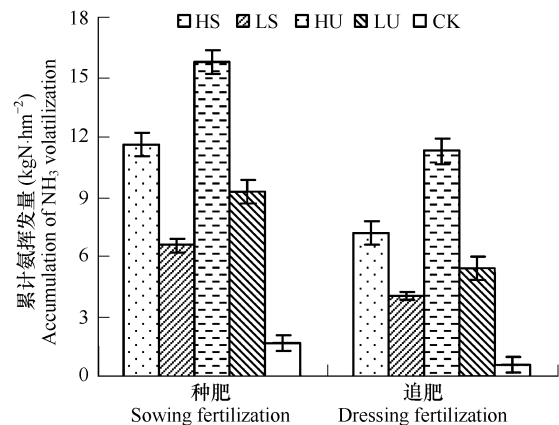


图4 不同施肥模式对田间土壤累计氨挥发量的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization mode on accumulation of NH_3 volatilization

不同字母表示差异达0.01显著水平 The letters indicate difference at 0.01 level

似,均表现与地温变化过程基本一致的“单峰”趋势(图 5a)。7:00~9:00,HS、HU 的田间土壤氮挥发速率均较低,处理之间差异不大;此后,二者均随地温不断升高而递增,HU 的田间土壤氮挥发速率增高速度快于 HS,且二者的差值逐渐变大;11:00~13:00,HS、HU 的田间土壤氮挥发速率达峰值,后者比前者高 0.057 kg·hm⁻²·h⁻¹,此后,HU 的田间土壤氮挥发速率迅速下降,而 HS 的则缓慢下降,15:00 后,HS、HU 的田间土壤氮挥发速率均下降趋于平缓,且 HS 的田间土壤氮挥发速率略高于 HU 的。

表 1 不同施肥模式田间土壤氮累计挥发损失量和氮挥发损失率的方差分析

Table 1 Analysis results by ANOVA for the pure NH ₃ volatilization loss and NH ₃ volatilization losing rate of different fertilization mode					
因子 Factors	变异来源 Variance source	离差平方和 Type III sum of squares	自由度 df	均方差 Mean square	F
累计氮挥发损失量 Accumulative pure NH ₃ volatilization loss	处理间 Between-treatments variance	446.0169	3	148.6723	7961.054 *
	处理内 Inter-treatment variance	0.1494	8	0.0187	
	总变异 Population variance	446.1663	11		
氮挥发损失率 NH ₃ volatilization losing rate of N	处理间 Between-treatments variance	8.7218	3	2.9073	43.007 *
	处理内 Inter-treatment variance	0.5408	8	0.0676	
	总变异 Population variance	9.2626	11		

追肥后第 2 天,HS、HU 的田间土壤氮挥发速率的变化趋势与施种肥后的基本相同(图 5 b)。7:00~15:00,HU 的田间土壤氮挥发速率明显高于 HS 的,15:00 后,二者差异不大。

比较两个时期对应时段的田间土壤氮挥发速率值可发现,追肥后 HS、HU 处理的田间土壤氮挥发速率明显低于施种肥后的,这与前面分析的生育期内田间土壤氮挥发速率变化规律及累计氮挥发量差异相一致。

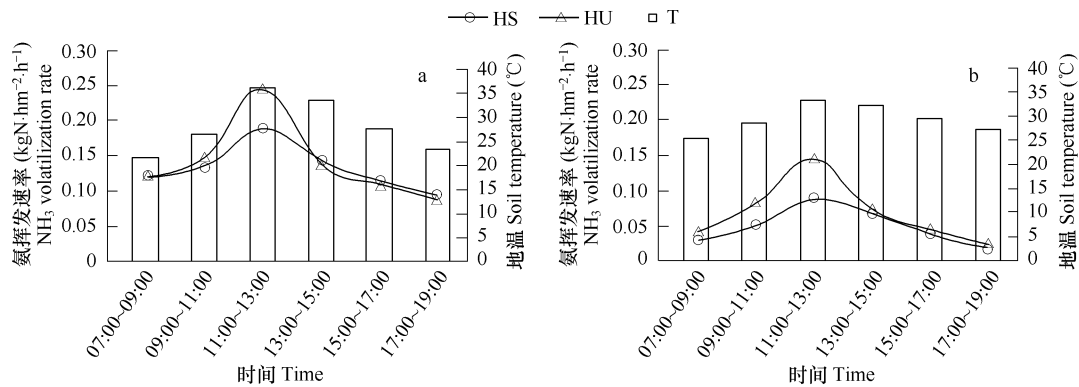


图 5 施种肥(a)和追肥(b)后田间土壤氮挥发速率与表层土壤温度的关系

Fig. 5 Relationship between NH₃ volatilization and temperature in surface soil after fertilizer application at planting (a) and side-dressing (b)

3 讨论

黄淮海平原是我国重要的粮食产区,小麦收获后秸秆还田,套种或直播夏玉米是一种重要的种植模式^[25],生产中普遍存在或不考虑还田秸秆沿袭常规施氮量,或为平衡 C/N 比有意识提高施氮量等导致氮肥过量施用的问题,氮肥当季的利用率仅为 36.3%^[26],大部分损失于环境中,而氮挥发是氮肥损失的重要部分。因此,对黄淮海平原地区两熟制度下氮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,研究了化肥单施与秸秆还田配施化肥不同施肥模式对夏玉米田间土壤氮挥发的影响。

研究结果表明,温度是影响田间氮挥发的主要气候因素之一^[16]。本试验条件下,夏玉米播种施肥后与大

喇叭口期追肥后,单施化肥与秸秆还田配施化肥的田间氨挥发速率均表现由低到高的“单峰”趋势,挥发高峰多出现在 11:00 ~ 13:00,这与白天田间地温的变化过程是基本一致的。夏玉米施肥在炎热的夏季,田间地温为 22 ~ 35℃,无论是单施化肥还是秸秆还田配施化肥,均表现出氮肥施入的当天其田间氨挥发速率即达最高值,此后均迅速降低,氨挥发高峰期持续时间较短,前 7d 的累计氨挥发量占总挥发量的 88.57% ~ 96.72%;7 ~ 8d 后,不同施肥模式的氨挥发速率已无明显差异;这说明持续的高温容易促进尿素在夏玉米田间土壤中的水解,导致 NH_4^+ -N 浓度迅速升高,氨挥发过程自然十分迅速;当然,夏玉米田间土壤较为适宜的水分含量(18% ~ 22% 左右)也促进了氨挥发^[28]。同时研究发现,在 7:00 前和 18:00 后,夏玉米田间氨挥发速率均很低,因此,可以推断认为夏玉米田间氨挥发损失主要发生在白天。

与单施化肥相比,秸秆还田配施化肥可显著减少氨挥发损失,一是表现在白天的同等气候条件下,等量施氮水平的秸秆还田配施化肥的田间氨挥发速率明显小于单施化肥处理的,后者的峰值要比前者高 $0.057 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;二是在夏玉米生长期,秸秆还田配施化肥的田间氨挥发速率与累计氨挥发损失量明显小于单施化肥处理的,前者的累计氨挥发损失量要比后者减少 $4.06 \sim 8.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其氨挥发损失率可显著低减小 $0.37\% \sim 1.17\%$ 。由于将小麦秸秆耙碎翻耕入土,降低了土壤容重,从而增大了土壤总孔隙度^[29],试验中是先施肥后浇水,一方面易使施入的尿素淋溶到土壤深层,减少了可供水解的表层土壤氮素,另一方面,秸秆还田提高了田间土壤水分含量,导致液相中 NH_4^+ -N 浓度降低^[30],从而降低了氨分压和氨挥发速率;同时,秸秆还田配施氮肥供应碳源和氮源,促进土壤微生物活动,而微生物在分解有机质的过程中转变无机氮成有机氮,可能是减少挥发基质、从而减少氨挥发的一个原因^[31]。

同时发现,虽然大喇叭口期追肥量 2 倍于种肥量,可追肥后的累计氨挥发损失量却显著地小于施种肥后的,说明相比于施种肥,大喇叭口期追肥可以减少氨挥发。一方面结合本试验田间土壤氨挥发速率与地温的关系研究分析认为,大口追肥后,连续的降雨,使田间土壤持水量较高,降低了液相中 NH_4^+ -N 浓度^[28],在一定程度上抑制了氨挥发;二是大喇叭口期后夏玉米生长发育旺盛,需要的养分较多,吸收肥料氮的速度较快^[1,25],因而使土壤中铵和氨的浓度迅速降低,也削弱了氨挥发。因此,在夏玉米大喇叭口期追施氮肥,并及时浇水,可有效地减少氨挥发损失。

高量氮肥的氨挥发速率始终明显高于低量氮肥的,前者田间土壤的氨挥发净损失量显著高于后者的,但二者的氨挥发损失率却差异不大,单施 $240, 480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥的氮素损失率分别为 5.15%、5.16%;秸秆还田配施的氮肥量增加,氨挥发净损失量增大,但氨挥发损失率减小。这说明在本试验条件下,氨挥发损失率并不能科学衡量氮肥利用效率,氨挥发净损失量可更全面地反映施入氮肥的损失,据此研究确定适宜的还田秸秆与氮肥配比量,是提高氮素利用效率的重要途径。

值得注意的是,夏玉米冠层对地面挥发出的氨可能存在一定的阻挡作用^[32],玉米对氨的叶面吸收可能也是氨挥发减少的原因之一^[12],由于夏玉米大喇叭口期后植株高大,运用通气法却很难监测到,可借助密闭室法或矫正试验进行全面研究。

References:

- [1] Lu J L, Hu A T. Principle of Plant Nutrition. Beijing: China Agricultural University Press, 1994.
- [2] Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in soil of China. Nanjing: Technology Press of Jiangsu, 1992. 213—249.
- [3] Tian C M, Cao J L, Cai Z C, *et al.* Ammonia volatilization from winter wheat field top dressed with urea. *Pedosphere*, 1998, 8(4): 331—336.
- [4] Wang Z H, Liu X J, Ju X T. *In situ* determination of ammonia volatilization from wheat-maize rotation system field in North China. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 359—365.
- [5] Kissel D E, Brewer H L, Arkin G F. Design and test of a field sample for ammonia volatilization. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41: 1133—1138.
- [6] Denmead O T. Micrometeorological method for measuring gaseous losses of nitrogen in the field. Freney J R, Simpson J R, eds. *Gaseous losses of nitrogen from plant soil systems*. New York: Martinus Nijhoff Dr W Junk Publishers, 1983. 133—157.
- [7] Dong W X, Hu C S, Zhang Y M. *In situ* determination of ammonia volatilization in field of North China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,

- 2006, 14(3): 46—48.
- [8] Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in soil of China. Nanjing: Technology Press of Jiangsu, 1992. 171—185.
- [9] Su C G, Yin B, Zhu Z L, *et al.* Ammonia volatilization loss of nitrogen fertilizer from rice field and wet deposition of atmospheric nitrogen in rice growing season. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1884—1888.
- [10] Yu G F, Wu H T, Wei Y S, *et al.* Study on nitrogen migration in purple soil and nitrogen uptake by rice. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(4): 316—320.
- [11] Zhuang S Y, Yin B, Zhu Z L. Simulation study on the effect of surface film-forming material on ammonia volatilization. Soils, 2001, (2): 60—63.
- [12] 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. Journal of Nanjing Agricultural University, 2000, 23(4): 51—54.
- [13] Li J M, Xu M G, Qin D Z, *et al.* Effect of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia volatilization and rice yield in red paddy soil. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(1): 51—56.
- [14] Schlegel A J, Nelson D W, Sommers L E. Field evaluation of urease inhibitor for corn production. Agronomy Journal, 1986, 78: 1007.
- [15] Zhang Q L, Zhang M, Yang Y C, *et al.* Volatilization of ammonium bicarbonate and urea in main soil of Shandong province. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(1): 32—34.
- [16] Xu J Q, Heeraman D A, Wang Y. Fertilizer and temperature effects on urea hydrolysis in undisturbed soil. Biology and Fertility of Soils, 1993, 16: 63—65.
- [17] Wang Z H, Liu X J, Ju X T. Field *in situ* determination of ammonia volatilization from soil: venting method. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 205—209.
- [18] Ju X T, Liu X J, Zhou G Y, *et al.* Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system. Agricultural Sciences in China, 2002, 35(12): 1493—1499.
- [19] Su F, Ding X Q, Gao Z L, *et al.* Ammonia volatilization from nitrogen fertilization of winter wheat-summer maize rotation system in the north china plain. China Environmental Science, 2007, 27(3): 409—413.
- [20] Jiang Y H, Yu Z R, Ma Y L. The effect of stubble return on agro-ecological system and crop growth. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(5): 209—213.
- [21] Fan J, Hao M D, Shao M A. Nitrate accumulation in soil profile of dry land farming in Northwest China. Pedosphere, 2003, 13(4): 367—374.
- [22] Li W L, Liu W R. Research status and development trends of giving the straws back to the field technique on maize. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2007, 32(3): 32—34.
- [23] Zhao Y, Li W, Zhou Z H, *et al.* Changes of microbial community structure in straw amended soil. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(6): 1114—1118.
- [24] Li T J. Soil Environmental Science. Beijing: Higher Education Press, 1995.
- [25] Guo Q F, Wang Q C, Wang L M. Chinese Maize Cultivation. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2004.
- [26] Chen J, Song C M, Liu Y H. Characteristics of N loss and its environmental effects in the dryland of Huang-Huai-Hai plain. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(2): 99—102.
- [27] Lu R K. Method of soil and agricultural chemistry analysis. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [28] Gao P C, Zhang Y P. Research on relationship between volatilization of ammonia and evaporation of soil water. Journal of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. And For, 2001, 29(6): 22—26.
- [29] Chang C, Entz T J. Soil chemistry after eleven annual application of cattle feedlot manure. Environmental Quality, 1996, 25: 145—153.
- [30] Xi J G, Zhou J B. Leaching and transforming characteristics of urea N added by different ways of fertigation. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(3): 271—275.
- [31] Tan Z J, Li Q, Chen D L, *et al.* On the effect of rice-straw returned to the field on microbes and enzyme activity in paddy soil. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3385—3392.
- [32] Tian G M, Cai Z C, Cao J L, *et al.* Ammonia volatilization from paddy field and its affecting factors in zhenjing hilly region. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(3): 324—332.

参考文献:

- [1] 陆景陵, 胡霭堂. 植物营养学. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- [2] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科技出版社, 1992. 213—249.
- [4] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 北方冬小麦/夏玉米轮作体系土壤氮挥发的原位测定. 生态学报, 2002, 22(3): 359—365.

- [7] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 华北农田土壤氨挥发原位测定研究. 中国生态农业学报, 2006, 14(3): 46~48.
- [8] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科技出版社, 1992. 171~185.
- [9] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 等. 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气氮的湿沉降. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1884~1888.
- [10] 余贵芬, 吴泓涛, 魏永胜, 等. 氮在紫色土中的移动和水田氮素利用率的研究. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(4): 316~320.
- [11] 庄舜尧, 尹斌, 朱兆良. 表面分子膜抑制稻田氨挥发的模拟研究. 土壤, 2001, (2): 60~63.
- [12] 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. 南京农业大学学报, 2000, 23(4): 51~54.
- [13] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 等. 有机肥无机肥配施对稻田氨挥发和水稻产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 51~56.
- [15] 张庆利, 张民, 杨越超, 等. 碳酸氢铵和尿素在山东省主要土壤类型上的氨挥发特性研究. 土壤通报, 2002, 33(1): 32~34.
- [17] 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. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205~209.
- [18] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1493~1499.
- [19] 苏芳, 丁新泉, 高志岭, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥的氨挥发. 中国环境科学, 2007, 27(3): 409~413.
- [20] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响. 土壤通报, 2001, 32(5): 209~213.
- [22] 李万良, 刘武仁. 玉米秸秆还田技术研究现状及发展趋势. 吉林农业科学, 2007, 32(3): 32~34.
- [23] 赵勇, 李武, 周志华, 等. 秸秆还田后土壤微生物群落结构变化的初步研究. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1114~1118.
- [24] 李天杰. 土壤地理学. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [25] 郭庆法, 王庆成, 汪黎明. 中国玉米栽培学. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.
- [26] 陈键, 宋春梅, 刘云慧. 黄淮海平原旱田氮素损失特征及其环境影响研究. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 99~102.
- [27] 鲁如坤. 《土壤农业化学分析方法》. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [28] 高鹏程, 张一平. 氨挥发与土壤水分散失关系的研究. 西北农林科技大学学报, 2001, 29(6): 22~26.
- [30] 习金根, 周建斌. 不同灌溉施肥方式下尿素态氮在土壤中迁移转化特性的研究. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 271~275.
- [31] 谭周进, 李倩, 陈冬林, 等. 稻草还田对晚稻土微生物及酶活性的影响. 生态学报, 2006, 26(10): 3385~3392.
- [32] 田光明, 蔡祖聪, 曹金留, 等. 镇江丘陵区稻田化肥氮的氨挥发及其影响因素. 土壤学报, 2001, 38(3): 324~332.