

宋梓璇, 李 虎, 李建政, 等. 控释肥对东北春玉米产量和土壤氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2342–2349.

SONG Zi-xuan, LI Hu, LI Jian-zheng, et al. Effect of controlled-release fertilizer on the yield and soil ammonia volatilization of spring maize in northeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2342–2349.

控释肥对东北春玉米产量和土壤氨挥发的影响

宋梓璇¹, 李 虎¹, 李建政², 尹彩霞³, 王迎春¹, 山 楠⁴, 王立刚^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部面源污染控制重点实验室/中国农业科学院-美国新罕布什尔大学可持续农业生态系统研究联合实验室, 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081; 3. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033; 4. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要:针对控释肥施用条件下作物产量与土壤氨挥发特征不明晰的问题,以东北春玉米种植模式为研究对象,采用德尔格氨管法(DTM法)研究了不同施肥处理[农民常规施肥处理(施氮量为 $180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, FP)、控释肥施氮量 $180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理(CRF180)和控释肥施氮量 $144 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理(CRF144)]下土壤氨挥发动态变化特征、土壤氨挥发总量及玉米产量。结果表明:受施肥和降雨因素的影响,每个处理氨挥发峰值均出现在施肥后(基肥和追肥)第1~2 d、第11~12 d左右;FP处理在12~14 d后氨挥发速率降低至零,但CRF180、CRF144处理仍有少量挥发。全生育期FP、CRF180、CRF144处理来自氮肥的氨挥发量依次为 19.9 、 23.8 、 $19.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 差异不显著($P>0.05$), 损失率分别为 11.06% 、 13.22% 、 13.61% 。CRF144处理和FP处理产量都保持在 $12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上, 其两者不存在显著差异, 但CRF144处理能够显著地提高氮肥农学效率和偏生产力($P<0.05$)。综合考虑氨挥发量与产量,在现有施氮量基础上减少20%,并且施用控释肥是该地区春玉米农田减肥增效适宜的推广技术。

关键词:控释肥;东北春玉米;氨挥发

中图分类号:S143.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)10-2342-08 doi:10.11654/jaes.2017-1762

Effect of controlled-release fertilizer on the yield and soil ammonia volatilization of spring maize in northeast China

SONG Zi-xuan¹, LI Hu¹, LI Jian-zheng², YIN Cai-xia³, WANG Ying-chun¹, SHAN Nan⁴, WANG Li-gang^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Non-point Sources Pollution Control, Ministry of Agriculture/CAAS-UNH Joint Laboratory for Sustainable Agro-ecosystem Research, Beijing 100081, China; 2. Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033; 4. College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The impacts of applying nitrogen controlled-release fertilizer (CRF) on crop yield and ammonia volatilization from spring maize systems are unclear. To provide clarity to this issue, we investigated the impacts of different fertilization treatments, i.e., conventional farmer's practices (FP) ($180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$), CRF180 ($180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$), and CRF144 ($144 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$), on maize yield and ammonia volatilization from spring maize systems in northeast China by using the Drager-Tube Method (DTM). The results showed that the characteristics of ammonia volatilization were primarily controlled via fertilization and rainfall and were similar across different treatments. Peaks of ammonia volatilization were observed on days 1~2 and 11~12 following base and top fertilization, respectively. The peaks gradually decreased to

收稿日期:2017-12-27 录用日期:2018-04-10

作者简介:宋梓璇(1993—),女,内蒙古乌兰察布人,硕士研究生,从事春玉米农田化肥施用环境效应研究。E-mail:183959925@qq.com

*通信作者:王立刚 E-mail:wangligang@caas.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFE0101100, 2016YFD0201204, 2017YFD0201801);国家自然科学基金项目(31770486);公益性行业(农业)科研专项(201303126-2, 201303103);中国农业科学院协同创新工程(CAAS-XTCX2016008-02)

Project supported: National Key Research and Development Program (2016YFE0101100, 2016YFD0201204, 2017YFD0201801); The National Natural Science Foundation of China (31770486); The Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201303126-2, 201303103); The Chinese Academy of Agricultural Sciences Innovation Project (CAAS-XTCX2016008-02)

zero 12~14 days following the fertilization events under FP. However, there was a small amount of ammonia volatilization under CRF180 and CRF144 14 days after the fertilization events. The annual total ammonia emissions were 19.9, 23.8, and 19.6 kg·hm⁻², respectively, under FP, CRF180, and CRF144 and were not significantly ($P>0.05$) different across the treatments. The ammonia loss rates accounted for 11.06%, 13.22%, and 13.61% of the nitrogen applied, respectively, for FP, CRF180, and CRF144. The maize yields were higher than 12 t·hm⁻² for both FP and CRF144. There was no significant difference in agronomic efficiency between CRF180 and FP and in maize yield between CRF144 and FP. However, the CRF144 treatment significantly improved agricultural efficiency and the partial productivity of nitrogen fertilizer ($P<0.05$) and had a positive effect on reducing the labor cost. Therefore, the practice of reducing the nitrogen application by 20% in combination with applying CRF is a suitable technology for increasing crop yield of and reducing ammonia volatilization from spring maize fields in this area.

Keywords: controlled-release fertilizer; northeast China spring maize; ammonia volatilization

我国氮肥用量占全球氮肥用量的35%左右^[1],而作物利用率普遍低于50%,损失率平均高达45%^[2],其中,氨挥发是氮肥损失的重要途径之一,其损失氮量约占施氮量的10%~60%^[3-4]。氨挥发主要受到农业管理措施、土壤理化性状和气候条件等影响,科学合理的施肥措施是降低农田土壤氨挥发损失的重要途径^[5]。肥料品种的选择是降低损失的关键环节之一,控释肥通过控制肥料养分逐步释放,以满足作物生长发育对养分的需求,在提高氮肥利用率、减少劳动力、降低环境污染等方面表现出较好的效果,已成为国内外研究的热点^[6-7]。农业部颁布的《到2020年化肥使用量零增长的行动方案》中明确提出要加大控释肥料的应用。目前粮食作物生产系统中,控释肥施用条件下氨挥发及其产量表现的研究尚不明确。部分研究者认为单一控释肥(硫包衣尿素或树脂尿素)对降低氨挥发损失并不显著^[8],只有通过几种控释肥的配比施用,让其养分释放符合作物生长的需求,才能显著降低氨挥发;也有研究表明,在与常规施肥尿素等氮条件下,施用控释肥氨挥发量增加了8.02%,当控释减氮20%、30%时,氨挥发量相比常规施肥减少了8.86%、16.65%^[5];一些研究者通过室内试验研究发现包膜控释肥和高分子控释肥的氨挥发量显著低于普通复合肥处理,高分子控释肥的氨挥发量是普通复合肥的70%^[9];大田试验夏玉米施用控释肥各处理氨挥发通量、氨挥发累积损失量、损失率均显著低于施用普通尿素处理,且均随总氮素施用量的降低而降低^[10]。控释肥在提升作物产量及氮素利用率方面也取得了显著的效果,目前研究表明控释肥能够提高肥料利用效率和作物产量^[2],有研究者^[11]认为控释尿素在水稻上的增产幅度达到36.5%以上,其单位面积有效穗数及每穗结实粒数明显提高;刘飞等^[12]研究表明,控释肥对于提高马铃薯产量、氮肥利用率和经济

效益都具有明显优势,控释肥减量20%施用并未对其干物质积累量和产量造成明显影响;近年来,随着科学技术发展,控释氮肥的生产成本逐步降低,逐渐应用于大田粮食作物中,小麦、玉米可增产10%以上^[13]。

春玉米是东北主要种植模式,播种面积占全国玉米总播种面积的30%以上,产量占全国玉米总产量的29%^[14]。受劳动力短缺和成本等条件限制,目前东北农民习惯施肥方式逐渐从二次施肥方式转变成一次性施肥方式,控释肥在该方面具有一定的优势,在农业生产实际中施用量也呈现逐渐增加的态势。而目前对控释肥的研究主要集中在控释肥的生产工艺、养分释放特性以及田间施用过程中作物性状与产量水平等方面^[15-17],而对其施用方式下氨挥发及其产量的研究尚不系统,因此,本研究以东北典型春玉米种植模式为例,研究控释肥施用对土壤氨挥发特征、产量及其氮肥利用效率的影响,旨在为其农田应用与环境评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于吉林省公主岭市刘房子镇吉林省农业科学院试验地,地处东经124°53′,北纬43°34′。以春玉米种植系统为主,地势平坦,年平均气温4~5℃,无霜期125~140 d,有效积温2600~3000℃,年降水量450~600 mm,年蒸发量1200~1600 mm,全年平均日照时数2500~2700 h。试验田为玉米连作区,土壤为典型黑土(中层黑土)。土壤基本理化性状为:有机质25.69 g·kg⁻¹,碱解氮127.15 mg·kg⁻¹,速效磷32.9 mg·kg⁻¹,速效钾124.05 mg·kg⁻¹,土壤容重1.37 g·cm⁻³,pH5.45。玉米种植品种为先玉335。

1.2 试验设计

本试验开始于2013年,设计了4个处理,分别为:

对照处理(CK),尿素常规施肥处理(FP),控释肥 180 kg N·hm⁻²处理(CRF180),控释肥 144 kg N·hm⁻²处理(CRF144),见表1。每个处理3次重复,共12个试验小区,随机区组排列,小区面积为12.7 m×3.15 m=40 m²。尿素常规施肥处理(FP)分两次施用(条状施入),底肥于播种前施入,肥种间隔以防止烧苗,施肥深度9~12 cm,施入后立即覆土;于6月27日进行追肥。控释肥处理氮肥则在播种时一次性施入(条状施入),施肥深度与FP处理深度相同。试验地全年无灌溉,其他管理措施与当地农民常规措施一致,6月8日除虫打药,6月18日除草。尿素含氮量46.7%,控释肥选用金正大树脂包膜尿素,含氮量为42%,包膜率4%,金正大控释肥肥料氮素养分释放率采用网袋法进行测定。在作物施肥当天,在种植地旁边空地,埋入由聚丙烯网袋(10 cm×10 cm)包裹的控释肥,设定3个重复。每个网袋控释肥量是5 g(精确至0.000 1 g),分别于第3、7、14、28、42、56、70、84、112 d 取样并称重,并测量氮素含量,见图1。磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅ 46%),钾肥为氯化钾(K₂O 60%)。

1.3 氨挥发与产量的采集及测定

氨挥发监测试验于2017年进行,采用 Drager-
Tube Method(DTM 方法),属动态密闭箱法原位测定

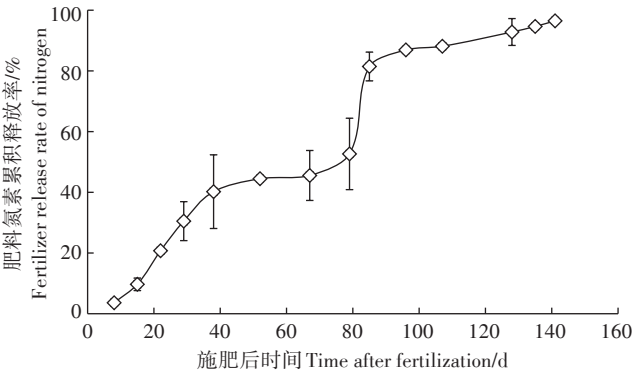


图1 控释肥氮素释放率

Figure 1 Nitrogen release rate of controlled release fertilizer

(图2)。用四个密闭罩(各罐子覆盖面积为100 cm²,体积370 cm³)捕获气体,各罐子上的2个管道(直径0.5 cm)用于气体的输入输出,在出气口用特氟龙管子连接四个密闭罩,四个密闭罩分别置于两垄相邻的作物周边,每垄两个。用手泵抽气时(每次泵入体积100 cm³),气体经过一个德尔格氨检测管(手泵和氨管均购于德国德尔格公司,DrSgerwerkAG, LFPbeck, Germany),氨检测管中填充固态酸性混合物以及遇碱变蓝的pH指示剂溴苯酚,氨检测管可进行0.05~700 μL·L⁻¹氨气的监测。抽气结束后(抽气次数一般15~30次),记录氨管上的读数和手泵抽气的次数、时间,并参考测定时期的平均大气压和温度,用于氨挥发浓度的计算。每次氨挥发测定约3 min,氨挥发监测频率可依据当时氨挥发的速率来进行调整,一般进行施肥后14 d 内连续采样,直至仪器测不出明显的氨挥发损失^[18]。

玉米产量的测定取每个处理5垄中间的第二、第三垄,长度6 m×宽度1.26 m,每个处理每个重复测产面积为7.56 m²,测取平均单株穗数、平均穗粒数及千粒重。

1.4 数据计算与分析

氨挥发通量和总量的计算:

通过DTM进行原位测定,结合气象数据(以风速为主),校正为微气象学(IHF)下的氨挥发通量。由于该监测方法已和IHF微气象学法进行校验,所得结

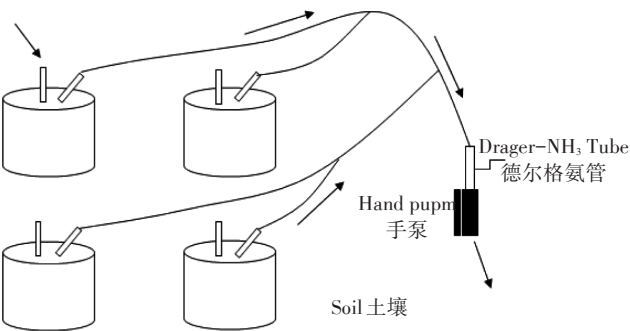


图2 测定氨挥发的DTM试验装置示意图

Figure 2 Experimental set-up of DTM for ammonia volatilization

表1 各处理氮肥施用量

Table 1 Nitrogen rates for different treatments

处理Treatment	施肥日期(月-日) Fertilization date(m-d)	N(基肥量)/kg N·hm ⁻² Basic fertilization	施肥日期(月-日) Fertilization date(m-d)	N(追肥量)/kg N·hm ⁻² Top fertilization	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	K ₂ O/kg·hm ⁻²
CK	04-25	0	06-27	0	75	90
FP	04-25	45	06-27	135	75	90
CRF180	04-25	180	06-27	0	75	90
CRF144	04-25	144	06-27	0	75	90

果与IHF法一致^[14];而且具有操作简便的特点,无需将氨采集进行实验室分析。因此,该方法在进行多个处理的田间氨挥发测定中具有明显的优势。

DTM氨挥发原位测定计算方法如下:

$$F_{N_g} = V \cdot \text{conc.} \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{NH_3} \cdot U_N \cdot U_F \cdot U_Z \quad (1)$$

式中: F_{N_g} 为氨排放量, $\text{mg N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; V 为抽气的体积, L ; conc. 为氨气的浓度, $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$; ρ_{NH_3} 为该温度气压下 NH_3 密度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; U_N 为 NH_3 换算为 N 的分子量换算因子; U_F 为表面积换算因子, m^2 ; U_Z 为时间换算因子, h 。

经过气象学方法校正的DTM氨挥发的计算方法为:

$$\ln(NH_3\text{flux}_{IHF}) = 0.444 \cdot \ln(NH_3\text{flux}_{DTM}) + 0.590 \cdot \ln(V_{2m}) \quad (2)$$

式中: $NH_3\text{flux}_{IHF}$ 为由IHF微气象法测定的氨挥发量, $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; V_{2m} 表示距地面2 m的风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $NH_3\text{flux}_{DTM}$ 为DTM测定的氨挥发量, $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。有关此DTM法的校正方程及依据的详细介绍可参考文献[19–21]。

氮肥利用率:

氮肥农学效率=(施氮区产量-对照区产量)/施氮量
氮肥偏生产力=籽粒产量/施氮量。

采用Excel表格对数据进行处理,使用SPSS 23.0进行不同处理间的差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 控释肥施用对春玉米氨挥发的影响

2.1.1 氨挥发动态变化

本研究中,春玉米整个生育期主要受施肥影响,氨挥发变化整体呈现“升高-降低-再升高-再降低”的态势(图3A),并受降雨等因素影响,FP、CRF180、CRF144处理在作物生育后期也有少量氨挥发,且 $CRF180 > CRF144 > FP$,控释肥处理氨挥发表现的更为持久。

FP、CRF180、CRF144处理氨挥发速率第一个高峰出现在施肥后的第2 d(图3B),FP处理氨挥发速率低于控释肥处理,是由于常规施肥处理基施氮量仅占总施氮量的25%。第11 d降雨,加强了氮素水解,各处理氨挥发速率有明显的升高($CRF180 > CRF144 > FP$),第12 d开始氨挥发速率均小于 $0.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,FP处理氨挥发过程基本结束,但控释肥处理仍有少量释放。这个阶段CK、FP、CRF180、CRF144处理氨挥发速率变化幅度分别为 $0 \sim 2.44$ 、 $0 \sim 2.65$ 、 $0 \sim 2.90$ 、 $0 \sim 2.85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,平均氨挥发速率分别为 0.70 、 0.93 、 1.00 、 $0.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

FP处理追肥后氨挥发速率明显升高,追肥后7 d

持续高于控释肥处理(图3C),CRF180、CRF144处理在此期间氨挥发较为平稳。追肥后第12 d受降雨影响,各个处理氨挥发速率有所回升,之后逐渐降低。在追肥后的氨挥发过程中,CRF180、CRF144处理氨挥发速率变化幅度接近,分别为 $0.64 \sim 3.18$ 、 $0.32 \sim 3.01 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,FP处理氨挥发速率变化幅度在 $0 \sim 3.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间。FP、CRF180、CRF144的平均氨挥发速率分别为 2.61 、 2.39 、 $2.34 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.1.2 氨挥发总量

在春玉米整个生长周期中,施用控释肥各处理的土壤氨挥发总量与尿素常规施肥处理相比差异并不显著(表2),FP、CRF180、CRF144处理氨挥发总量分别为 59.97 、 63.87 、 $59.67 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,即 $CRF180 > FP > CRF144$ 。CRF180处理的土壤氨挥发总量较FP处理升高6.5%,CRF144处理的土壤氨挥发总量较FP处理降低0.5%。全生育期FP、CRF180、CRF144处理来自氮肥的氨挥发依次为 19.9 、 23.8 、 $19.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别相当于施氮量的11.06%、13.22%、13.61%。说明等氮量控释尿素相对普通分次施肥没有降低田间土壤的氨挥发总量,反而有所增加,但在相同氮肥不同施氮水平下,施氮量低的处理土壤氨挥发总量也较低。

表2 不同施肥处理下氨挥发总量及氨挥发损失率

Table 2 Cumulative NH_3 volatilization and loss ratio under different fertilization treatments

处理 Treatment	施肥量/ $\text{N kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ Fertilization	氨挥发总量/ $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ Cumulative emissions	损失率 Loss rate/%
CK	0	40.07b	—
FP	180	59.97a	11.06
CRF180	180	63.87a	13.22
CRF144	144	59.67a	13.61

注:表中同列不同小写字母表示差异达5%显著水平,下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significance of difference at 5% level. The same below.

2.2 控释肥对春玉米产量及氮肥效率的影响

2013—2017年,各施氮肥处理间玉米产量没有显著差异,但均与不施肥处理(CK)差异显著($P < 0.05$),见表3。由此看出,控释肥施用条件下,能够保障作物产量。从产量构成因素来看,控释肥处理的玉米穗行数、行粒数和FP处理相当,CRF144处理穗粒数高于其他处理,但千粒重略低于FP处理。CRF180处理氮肥农学效率和FP处理相当(表4),但其氮肥偏生产力略低于FP处理;CRF144处理氮肥农学效率和氮肥偏生产力均明显高于FP处理,差异达到显著水

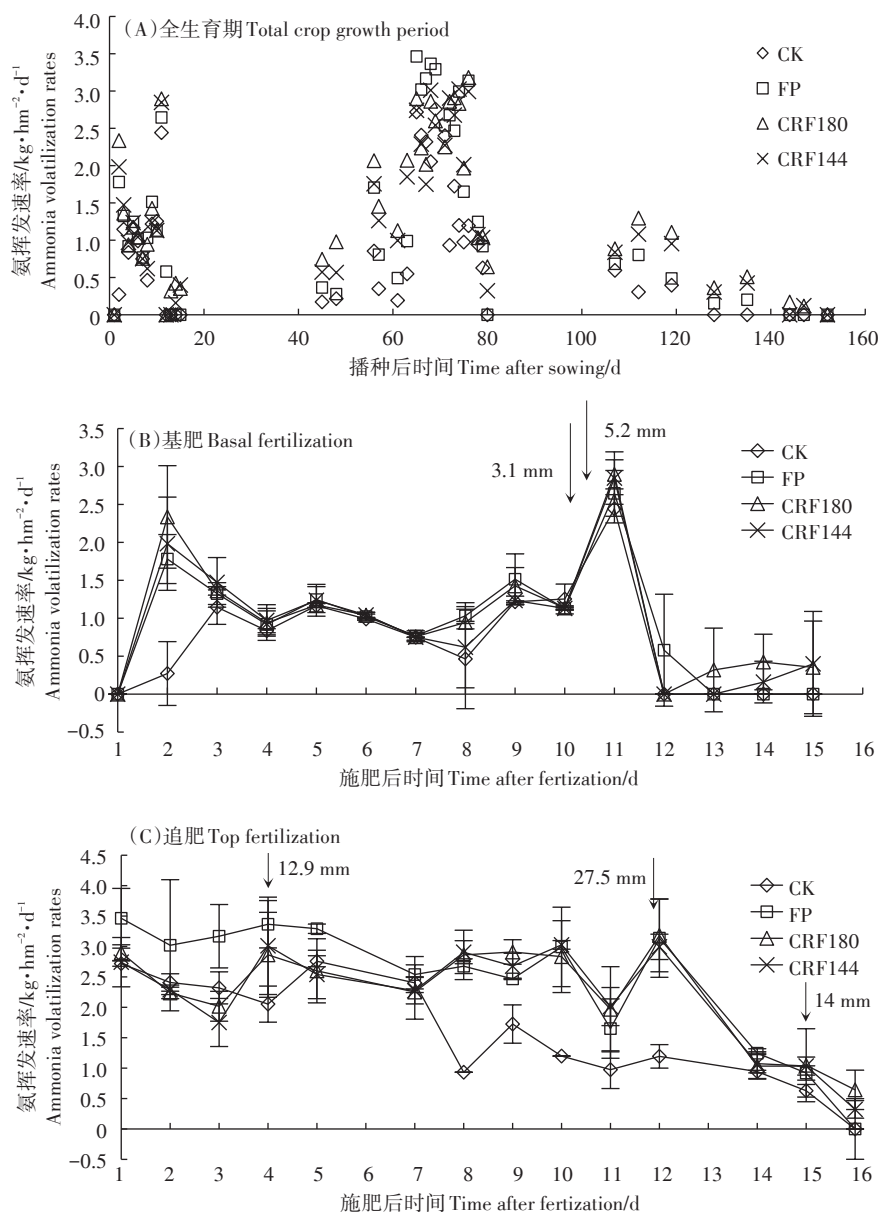


图3 不同氮肥处理对氨挥发速率的影响

Figure 3 Ammonia volatilization rates after basal and top dressing fertilization

平($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同肥料对土壤氨挥发速率的影响

本研究表明春玉米施肥后氨挥发整体呈现“升高-降低-再升高-再降低”的变化情况,控释肥在试验后期仍有少量氨挥发,氨挥发速率峰值均于施肥后1~2 d出现,这与部分研究者的结果相似^[10]。但有些研究者表明控释肥氨挥发峰值出现在6~12 d^[5,22],出现该差异的原因可能是由于采用包膜控释肥料不同,导致肥料疏水性和释放率有所差异,且试验地降水等

环境因素对其也会有所影响。FP处理追肥期氨挥发速率高于基肥期,这是追肥的施氮量占总施氮量的75%导致,而追肥期土温适宜(25℃左右),在有所降水(50 mm)的条件下,增大了肥料养分释放速率和释放量,有利于土壤氨挥发过程的进行,这与纪玉刚等^[22]研究结果一致。依照当地农民习惯及作物生长情况,于6月8日除虫打药,6月18日除草等人为因素引起施肥后45~63 d之间氨挥发速率的小幅度增加,但其影响机制还有待于深入探讨。

3.2 不同肥料对土壤氨挥发总量的影响

氨挥发是氮肥损失的重要途径之一,据统计此过

表3 不同施肥处理对玉米产量及其构成因素的影响
Table 3 Effects of different fertilizer treatments on yield and its component of maize

处理 Treatment	穗行数 Rows per ear	行粒数 Kernels per row	穗粒数 Kernels per ear	千粒重/g 1000-kernel weight	地上生物量/t·hm ⁻² Shoot biomass	籽粒产量 Grain yield/t·hm ⁻²				
						2013	2014	2015	2016	2017
CK	—	—	—	315.33	7.92	9.60b	9.43b	4.77b	4.36b	3.22b
FP	17.4	34.4	598.6	351.33	24.41	12.76a	10.75a	7.84a	13.11a	12.73a
CRF180	17.6	34.1	598.8	349.67	25.17	12.78a	10.38a	7.72a	12.88a	12.57a
CRF144	17.6	34.7	609.8	343.00	24.06	12.73a	10.01ab	7.96a	13.31a	12.70a

表4 控释肥对玉米氮素效率的影响
Table 4 Effects of different controlled-release fertilizer treatments on nitrogen efficiency of maize

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield/t·hm ⁻²	氮肥农学效率 Agronomic N use efficiency/kg·kg ⁻¹ N	氮肥偏生产力 Soil N dependent rate/kg·kg ⁻¹ N
CK	3.22	—	—
FP	12.73	52.83b	70.71b
CRF180	12.57	51.94b	69.82b
CRF144	12.70	65.83a	88.18a

程损失的氮量约占施氮量的10%~60%^[3-4],试验中春玉米农田全生育期FP、CRF180、CRF144处理来自氮肥的氮挥发依次为19.9、23.8、19.6 kg·hm⁻²,损失率为11.06%、13.22%、13.61%,低于李欠欠等^[18]采用DTM法监测在陕西省长武县和吉林省梨树县春玉米氮挥发总量约占施氮肥量16%~22%的结果,也低于苏芳等^[23]采用风洞法连续2年在华北平原监测夏玉米氮挥发(47~66 kg·hm⁻²,占施氮量的23%~33%)的结果,这可能是由于李欠欠、苏芳等试验施氮量高于本试验所导致。但高于纪玉纲等^[22]采用通气法对春玉米的研究结果(10.47~12.52 kg·hm⁻²,占施氮量的3.17%~4.49%)。从本试验结果可以看出,氮挥发量CRF180处理略高于FP处理,但差异并不显著。FP处理尿素施入土壤后,发生尿素水解反应,导致初期就有大量氨气挥发;而控释肥则不同,它的树脂包膜材料具有疏水性,可以控制其膜内尿素缓慢持续释放^[24],因此在FP氮挥发趋近于零时,控释肥仍有持续少量挥发,导致同等施氮水平下控释肥氮挥发量略高于FP处理,这与卢艳艳等^[25]、焉莉等^[26]试验结果有所区别。不同施氮水平下氮挥发损失研究表明,施氮量低的处理土壤氮挥发总量也较低^[27],与本次试验结论一致。本试验中空白对照处理也存在一定的氮挥发损失,这可能由于各处理间没有隔离带,受周围施肥处理影响,以及取气过程中人为扰动等因素造成。

3.3 环境因素对土壤氮挥发的影响

氮肥施入土壤水解成铵态氮,易引起挥发损失,同时受各种环境因素的影响。在本试验期间,随着时

间的推移表层土壤含水量逐渐降低,当遇到降水后会 有所回升,与氮挥发速率变化具有较好的一致性。也有研究^[2]认为,施肥结合灌水时氮挥发损失量可以降低至2%~8%。同时,温度也显著影响氮挥发。春玉米施肥时正值春季,表层土壤温度在15~19℃之间;玉米拔节期FP追肥时是炎热的夏季,地表温度达25~35℃。温度升高加速铵向氨(NH₃)的转化,促进氨由土壤表面向大气的挥发,当温度低时,脲酶活性低,不利于尿素水解,因而产生NH₃较少^[28]。

由于本次试验时间较短,数据量不足以支撑环境因素对氮挥发的影响研究,可在后续试验中,进一步探究氮挥发机理以及氮挥发特征与温度、水分的关系。土壤氮挥发受土壤特征、气候因素、农业措施等因素的影响,年际间有所差异,因此还需持续观测以明确控释肥施用对环境效应的影响^[29]。

3.4 控释肥对玉米产量及氮肥利用效率的影响

本试验中各施氮肥处理间玉米产量没有显著差异,可以看出控释肥施用条件下,对作物产量有一定的保障。朱红英等^[30]研究了不同控释肥对玉米产量及产量性状的影响,结果表明大部分控释肥都能使玉米产量提高,大都增产10%左右,并对玉米生长发育、百粒重、单株粒重有明显作用,产量增幅为14.7%~20%,本试验中CRF144处理穗粒数要高于其他处理。相同施氮水平不同氮肥品种条件下,CRF180处理氮肥农学效率和FP处理相当,不同施氮水平下控释肥减氮20%的CRF144处理氮肥农学效率和氮肥偏生产力均明显高于FP处理,差异达到显

著水平($P<0.05$),这与部分研究者的结果是类似的^[31]。由于当前农村劳动力缺乏的因素,农作物施肥日趋简化,一次性施肥已相当普遍。目前市场上销售的肥料基本上为速效高氮型复合肥,存在苗期旺长或后期脱肥的风险。而控释肥可以在一定程度上控制肥料在农作物生长季节的释放率,使肥料养分释放规律与作物养分吸收规律趋向一致。可以看出控释肥一次性施肥方式下,在保障作物产量、减氮、提高氮肥利用率等方面具有一定的优势。

4 结论

(1)本试验各个处理受施肥和降雨影响,氨挥发峰值均出现在施肥后(基肥和追肥)第1~2 d、第11~12 d左右。12~14 d后FP处理氨挥发速率减少至0,但CRF180、CRF144处理仍有少量挥发。FP处理追肥后7 d氨挥发速率持续高于控释肥处理,CRF180、CRF144处理在此期间氨挥发相对较为平稳。

(2)全生育期FP、CRF180、CRF144处理来自氮肥的氨挥发量依次为19.9、23.8、19.6 kg·hm⁻²,差异不显著($P>0.05$),损失率分别为11.06%、13.22%、13.61%。表明等氮量控释尿素相对普通分次施肥并没有降低田间土壤的氨挥发总量,反而有所增加。

(3)本试验条件下,控释肥处理能够保障作物产量在12 t·hm⁻²以上,与FP处理差异不显著($P>0.05$)。CRF144较FP处理提高了氮肥农学效率13%和氮肥偏生产力17.47%,差异显著($P<0.05$)。因此,综合氨挥发、作物产量和氮肥利用效率,在现有施氮量基础上减少20%,并且施用控释肥是该地区春玉米农田减肥增效适宜的推广技术。

参考文献:

- [1] 世界粮农组织统计数据库[DB/OL]. <http://faostat3.fao.org/home/E>.
FAO statistical database[DB/OL]. <http://faostat3.fao.org/home/E>.
- [2] 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[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1493-1499.
JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZOU Guo-yuan, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12): 1493-1499.
- [3] Liang X Q, Chen Y X, Hua L I, et al. Nitrogen interception in floodwater of rice field in Taihu region of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(12): 1474.
- [4] 宋勇生,范晓辉,林德喜,等.太湖地区稻田氨挥发及影响因素研究[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.
- [5] 谢勇,荣湘民,张玉平,等.控释氮肥减量施用对春玉米土壤N₂O排放和氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 596-603.
XIE Yong, RONG Xiang-min, ZHANG Yu-ping, et al. Effects of reduced CRNF applications on N₂O emissions and ammonia volatilization in spring maize soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 596-603.
- [6] 王空军,张吉旺,郭玉秋,等.我国北方玉米品种个体产量潜力与氮利用效率研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 879-884.
WANG Kong-jun, ZHANG Ji-wang, GUO Yu-qiu, et al. Individual grain yield potential and nitrogen utilization efficiency of *Zea mays* cultivars widely planted in north China[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(5): 879-894.
- [7] 刘轶.控释肥氮释放对小麦玉米产量及氮素利用率的影响[D].泰安:山东农业大学, 2016.
LIU Yi. Effects of nitrogen release from controlled release fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of wheat and maize[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2016.
- [8] 邢晓鸣.高缓控释肥种类及施肥方式对水稻产量、稻田氨挥发及光合物质生产的影响实现[D].南京:南京农业大学, 2015.
XING Xiao-ming. Effects of types of controlled released nitrogen and fertilization modes on yield, ammonia volatilization of japonica rice, and characteristics of photosynthesis and dry mass production[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [9] 程冬冬.高分子缓/控释肥的养分释放特征及应用效果研究[D].太原:中北大学, 2015.
CHENG Dong-dong. Study on nutrient release characteristics and the application effect of polymeric slow controlled release fertilizer[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [10] 颜旺,刘强,张玉平,等.夏玉米施用控释尿素的土壤氨挥发特征[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(4): 136-140.
YAN Wang, LIU Qiang, ZHANG Yu-ping, et al. Ammonia volatilization features of the soil applied with controlled-release urea in summer maize field[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42(4): 136-140.
- [11] 符建荣.控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 145-152.
FU Jian-rong. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and N recovery[J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2001, 7(2): 145-152.
- [12] 刘飞,张民,诸葛玉平,等.马铃薯玉米套作下控释肥对土壤养分垂直分布及养分利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1351-1358.
LIU Fei, ZHANG Min, ZHUGE Yu-ping, et al. Effects of controlled-release fertilizer on vertical distribution of soil nutrients and nutrient use efficiencies under potato and maize relay cropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer Science*, 2011, 17(6): 1351-1358.
- [13] 马心宇.论粮食安全的可持续发展[J]. 粮食科技与经济, 2011(a2): 79-79.
MA Xin-yu. On sustainable development of food security[J]. *Food Science and Economics*, 2011(a2): 79-79.
- [14] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计

出版社, 2008—2010.

National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistics yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2008—2010.

- [15] 任利沙, 顾日良, 贾光耀, 等. 灌浆期控水和施用控释肥对杂交玉米制种产量和种子质量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(16): 3108—3118.

REN Li-Sha, GU Ri-liang, JIA Guang-yao, et al. Effects of water management and controlled-release fertilizer on seed yield and seed quality of maize (*Zea mays* L.)[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(16): 3108—3118.

- [16] 卢艳丽, 白由路, 王 磊, 等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 209—215.

LU Yan-li, BAI You-lu, WANG Lei, et al. Efficiency analysis of slow/controlled release fertilizer on wheat-maize in north China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1): 209—215.

- [17] 赵先贵, 肖 玲. 控释肥料的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(3): 95—97.

ZHAO Xian-gui, XIAO Ling. Current research on controlled release fertilizers[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(3): 95—97.

- [18] 李欠欠, 李雨繁, 高 强, 等. 传统和优化施氮对春玉米产量、氮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]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(3): 571—579.

- [19] Gericke D, Pacholski A, Kage H. Measurement of ammonia emissions in multi-plot field experiments[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 108(2): 164—173.

- [20] Pacholski A, Cai G X, Fan X H, et al. Comparison of different methods for the measurement of ammonia volatilization after urea application in Henan Province, China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(3): 361—369.

- [21] Andreas P, Cai G, Rolf N, et al. Calibration of a simple method for determining ammonia volatilization in the field-comparative measurements in Henan Province, China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74(3): 259—273.

- [22] 纪玉刚, 孙静文, 周 卫, 等. 东北黑土玉米单作体系氮挥发特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1044—1050.

Ji Yu-gang, SUN Jing-wen, ZHOU Wei, et al. In situ study of ammonia volatilization from black soil with maize monoculture system[J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1044—1050.

- [23] 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氮挥发[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 409—413.

SU Fang, DING Xin-quan, GAO Zhi-ling, et al. Ammonia volatiliza-

tion from nitrogen fertilization in winter wheat-summer maize rotation system in the North China Plain[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(3): 409—413.

- [24] 韩蔚娟. 新型肥料在黑土上的施用效果及环境效应研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.

HAN Wei-juan. Study on the application effectiveness and environmental effect of new-type fertilizer in the black soil[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2015.

- [25] 卢艳艳, 宋付朋, 赵 杰, 等. 控释尿素对土壤氮挥发和无机氮含量及玉米氮素利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 79—82.

LU Yan-yan, SONG Fu-peng, ZHAO Jie, et al. Effects of controlled-release urea on ammonia volatilization and inorganic nitrogen of soil and nitrogen use efficiency in maize[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2010, 24(6): 79—82.

- [26] 焉 莉, 王 寅, 冯国忠, 等. 不同施肥管理对东北黑土区氮损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1816—1823.

YAN Li, WANG Yin, FENG Guo-zhong, et al. Effect of different fertilization management on nitrogen loss in black soils in northeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9): 1816—1823.

- [27] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 华北农田土壤氮挥发原位测定研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 16(3): 46—48.

DONG Wen-xu, HU Chun-sheng, ZHANG Yu-ming, et al. In situ determination of ammonia volatilization in field of north China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 16(3): 46—48.

- [28] 王朝辉, 田霄鸿, 李生秀. 冬小麦生长后期地上部分氮素的氮挥发损失[J]. 作物学报, 2001, 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*, 2001, 27(1): 1—6.

- [29] 李雨繁. 不同类型高氮复混(合)肥氮挥发特性及氮素转化研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014.

LI Yu-fan. Ammonia volatilization characteristics and nitrogen transformation of different kinds of high-nitrogen compound fertilizers[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2014.

- [30] 朱红英, 董树亭, 胡昌浩. 不同控释肥料对玉米产量及产量性状影响的研究[J]. 玉米科学, 2003, 11(4): 86—89.

ZHU Hong-ying, DONG Shu-ting, HU Chang-hao. Research on the yield and characters of maize in different controlled release fertilizer[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2003, 11(4): 86—89.

- [31] 赵 斌. 不同控释复合肥对夏玉米产量和品质影响的生理机制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.

ZHAO Bin. Physiological mechanisms of different controlled release compound fertilizers influencing on yield and quality of summer maize[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2007.