

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.

不同施肥管理对东北黑土区氮损失的影响

焉莉, 王寅, 冯国忠, 杜晓晴, 刘烁然, 操梦颖, 高 强*

(吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘 要:为了明确不同施肥管理的肥料利用率及其氮损失对环境的影响,采用自然降雨条件下土槽模拟试验方法,系统研究了在东北黑土玉米单作体系下不同施肥管理(尿素、秸秆还田和缓控释肥)在一次性施用条件下的农田氨挥发、氮径流淋溶损失及土壤硝态氮累积特性。结果表明:农民习惯施肥、秸秆还田施肥及控释肥氮挥发总量分别为 26.1、24.2、23.9 kg N·hm⁻²,占化肥施用量的 10.9%、10.1%、10.0%;氮径流淋溶损失分别占化肥施用量的 1.4%、1.5%、0.9%,且以氮径流损失为主;土壤 0~50 cm 土层氮残留分别为 42.2、42.3、54.6 kg N·hm⁻²。秸秆还田处理可以在保证产量的前提下,减少土壤氮残留、提高肥料利用率;控释肥在降雨量少的条件下氮残留相对较高,应当降低施氮量。

关键词:黑土;秸秆还田;控释肥;氮损失

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)09-1816-08 doi:10.11654/jaes.2016-0412

Effect of different fertilization management on nitrogen loss in black soils in Northeast China

YAN Li, WANG Yin, FENG Guo-zhong, DU Xiao-qing, LIU Shuo-ran, CAO Meng-ying, GAO Qiang*

(Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources in the Commodity Grain Bases, College of Resource & Environmental Science in Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: In this research, the effect of different fertilization (urea, straw returning and controlled release fertilizer) in a one-time application on ammonia volatilization, nitrogen loss by runoff and leaching, and nitrogen residue on black soils was studied by soil box simulation method in order to know the nitrogen loss effect on environment and nitrogen use efficiency of different fertilization management. The results showed that ammonia volatilization accumulation amount of farmer conventional fertilization, straw returning fertilizer and controlled release fertilizer were 26.1 kg N·hm⁻², 24.2 kg N·hm⁻² and 23.9 kg N·hm⁻², the fertilizer loss rate was 10.9%, 10.1% and 10.0%, respectively; nitrogen loss by runoff and leaching was accounted for 1.4%, 1.5% and 0.9% of nitrogen application rate, in which the nitrogen loss by runoff was the main form. Inorganic nitrogen residue in 0~50 cm soil layer of farmer conventional fertilization, straw returning fertilizer and controlled release fertilizer were 42.2 kg N·hm⁻², 42.3 kg N·hm⁻² and 54.6 kg N·hm⁻², respectively. Straw returning could reduce the nitrogen residue on soils, as well as maintaining yield and increasing nitrogen utilization efficiency; controlled release fertilization should decrease the nitrogen rate in less rainfall year due to higher risk of nitrate accumulation in soils.

Keywords: black soils; straw returning; controlled release fertilizer; nitrogen loss

收稿日期:2016-03-28

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAC09B01);公益性行业(农业)专项(201103003);国家级大学生创业创新项目(201610193013)

作者简介:焉莉(1980—),女,吉林长春人,讲师,从事农业环境管理领域研究。E-mail:yanli02002@hotmail.com

*通信作者:高 强 E-mail:gaoqinglunwen@163.com

玉米是我国第二重要的粮食作物,种植玉米比种植其他作物需要更多的氮肥^[1]。由于近些年农业氮肥的过量投入^[2],肥料中未利用的养分进入大气、地表水、地下水及土壤中,导致温室气体排放增加、水体富营养化和土壤中硝态氮累积,引发地下水危机^[3-6]。因此,了解东北黑土区玉米施肥过程中氮损失现状对我国玉米生产的可持续发展具有重要意义。

目前对农田氮损失的研究,主要集中在不同氮水平导致的农田氮损失和不同施肥措施对氮损失中某一方面如氨挥发、氮径流淋溶流失的影响。如 N_2O 排放和 N 淋溶损失随着施氮量和氮盈余的增加都呈现指数上升的趋势, NH_3 挥发则随着施氮量增加而直线上升^[7]。但综合考虑东北地区玉米的氮流失特征及不同施肥管理对氮损失影响的研究相对较少。目前国内通过改变耕作模式、控制灌溉模式、作物间作或轮作模式、生态拦截等技术进行面源污染的防控^[8-9],但从源头控制农业活动中污染物的产生和迁移,减少面源污染的形成是治理面源污染的根本。肥料管理越来越被重视,秸秆还田和控释肥成为当前肥料施用的新趋势。

位于黄金玉米带和世界三大黑土地之一的吉林省,玉米种植面积和产量都居全国前列,单产更是国家平均水平的1.34倍^[10],因此黑土玉米种植是东北地区农业种植里至关重要的一部分,而在此种植过程中所导致的面源污染问题也引起了人们的关注。目前有关施肥对氨挥发和水体富营养化的影响已有一些研究^[11-14]。随着全球气候变暖和厄尔尼诺现象的频发,干旱年份和多雨年份交替频繁,针对新的气候变化条件下东北黑土雨养玉米种植区氨挥发及氮流失的综合研究相对较少。本文利用土槽模拟试验研究在干旱年

份不同施肥管理(农民习惯施肥、秸秆还田施肥和控释肥)对黑土玉米地氨挥发、氮素径流淋溶损失及在土壤中硝态氮累积的影响,为相关单位制定应对东北地区农业减排策略提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2014年4—10月在长春市净月区吉林农业大学资源与环境学院试验地($43^{\circ}48'N$, $125^{\circ}24'E$)开展,配有气象工作站。该地属温带大陆性季风气候区,年降雨量570.3 mm,年均降水日98.7 d,主要集中在4—9月,土壤类型为典型黑土,以玉米种植为主。土壤有机质为 $29.57 g \cdot kg^{-1}$,总氮、总磷、总钾分别为1.68、0.62、21.2 $g \cdot kg^{-1}$,碱解氮、有效磷、速效钾分别为157.1、43.2、283.2 $mg \cdot kg^{-1}$,0~50 cm土层铵态氮、硝态氮含量分别为14.2、24.6 $kg \cdot hm^{-2}$,pH 6.63。根据气象台多年温度和降雨量统计数据 and 国内外较常用的降雨年型划分标准^[15],2014年总降雨量为431.6 mm,为干旱年型,基于当地气象工作站对当年玉米氨挥发监测期间气候与降雨情况记录如图1。

1.2 试验设计

试验采用土槽模拟方法^[16]。土槽使用长、宽、高分别为1、0.4、0.6 m的PVC板材制作,下面设置铁架子坡度为 5° ,在土槽的前部设置一个宽0.4 m、高0.1 m的导流槽,使得降雨后径流随着导流槽进入收集器中。为防止雨水直接进入收集器中,用塑料布将导流槽和收集器遮盖,以保证试验数据的准确性。为使模拟状态接近现实,在土槽底部共设置了20个直径为0.5 cm的渗流洞,以保证降雨情况下水在土壤中的垂直淋溶作用,并用导管收集。在土槽内设置塑料管用

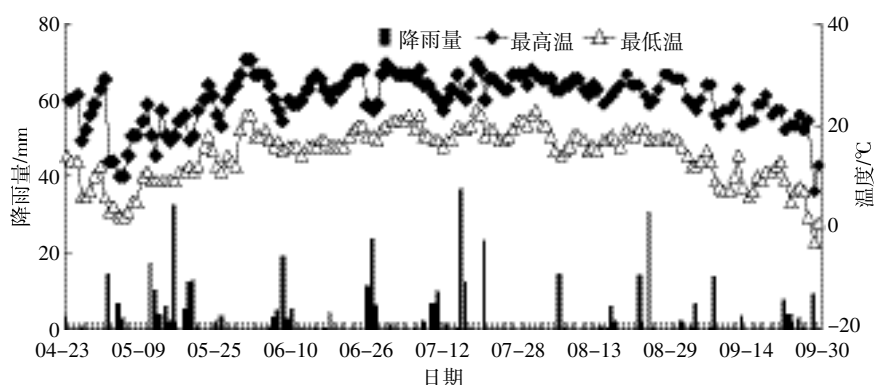


图1 试验地当年降雨量及温度变化(2014年4月23日—10月1日)

Figure 1 Rainfall and temperature map in experiment station(23rd Apr. 2014—1st Oct. 2014)

通气法测氨挥发。土样从试验区采集并按照 0~30 cm 和 30~50 cm 的深度顺序依次填入土槽中,静置 3 个月使土层自然沉降到稳定状态。

供试作物为玉米郑单 948,于 2014 年 4 月 26 日施肥,5 月 1 日播种,10 月 1 日收获。试验共设 4 个处理,分别为不施肥(CK)、农民习惯施肥(F)、秸秆还田施肥(R)和控释肥(C),将 CK 处理的测定值作为土壤背景值,用以计算肥料氨挥发强度。每个处理 3 次重复,播种密度为 75 000 株·hm⁻²。各处理均一次性施肥,具体施肥量见表 1。秸秆还田量为 3000 kg·hm⁻²,先分析其氮磷钾含量,与农民习惯处理保持相同养分投入量,不足的氮磷钾用化学肥料补充,所用磷肥为磷酸二氢钙,钾肥为氯化钾,农民习惯和秸秆还田采用普通尿素,控释肥采用控释尿素。

1.3 样品采集与测试

1.3.1 氨挥发测定

氨挥发采集使用通气法^[12],用聚乙烯硬质塑料管制成内径 8 cm、高 12 cm 的氨气捕获装置,将两块厚度为 2 cm、直径为 10 cm 的海绵均匀浸以 5 mL 的磷酸甘油溶液(50 mL 磷酸加 40 mL 丙三醇,定容至 1000 mL),置于其中,下层海绵距管底 5 cm,用于吸收土壤挥发出来的氨,上层海绵与管顶相平,用于防止外界气体污染。施肥当天将采集装置放入土槽中,每个土槽放置 4 个塑料管,第 2 d 开始取样,将下层海绵取出,立即放入样品袋中密封,同时将新浸过的海绵重新放入塑料管中。将换下的海绵带回实验室,分别放入 500 mL 塑料瓶,加 300 mL 1 mol·L⁻¹ 的 KCl 溶液,使海绵完全浸入并振荡 1 h,测定浸提液中的铵态氮含量。上层海绵视干湿情况,3~7 d 更换一次。试验第一周每天取样一次,第 2~3 周 3 d 取样一次,之后延长到 7~10 d,直到监测不到氨挥发为止。

1.3.2 径流淋溶测定

2014 年 4 月 26 日至 10 月 1 日雨季即整个玉米生长季节内,在每次降雨产流后,立即测定每个收集

器水位,计算径流量。采集收集器内水样,采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定总氮(TN),水样取回后一般立即测定,如果不能测定的,滴加浓硫酸并冰冻保存,5 d 内测定完毕。

1.3.3 土壤硝态氮、铵态氮测定

播种前和玉米收获后,在每个土槽中取土壤表层(0~30 cm)及亚表层(30~50 cm)各 4 个采样点,将样品制备成混合样并四分法取土 50 g,过 2 mm 筛后保存于-20 ℃冰箱中,测定前取 10 g 放入 250 mL 的三角瓶中,加入 1 mol·L⁻¹ 的 KCl 溶液 100 mL,摇床振荡 60 min 后过滤用连续流动分析仪(Skalar, Netherland)测定土壤铵态氮及硝态氮含量。播种前的土壤铵态氮和硝态氮含量之和为初始氮残留;收获后土壤铵态氮和硝态氮含量之和为收获后土壤氮残留。

1.3.4 玉米产量及吸氮量测定

收获期取土槽中 3 株玉米,分为茎叶及籽粒两部分,烘干称重,然后将其分别粉碎并采用 H₂SO₄-H₂O₂ 进行消化,凯氏定氮法分别测定其含氮量。产量数据为 14%含水率的玉米籽粒产量,作物吸氮量数据为籽粒吸氮量和茎叶吸氮量之和。

1.4 数据计算与处理

氨挥发速率: $\text{NH}_3\text{-N}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})=M/(A\times D)\times 10^{-2}$
式中: M 为单个装置每次测得的氨量($\text{NH}_3\text{-N}$),mg; A 为捕获装置的横截面积,m²; D 为每次连续捕获的时间,d。

累积氨挥发量为玉米整个生育期氨挥发总量:

$$\Sigma \text{NH}_3\text{-N} = \Sigma C_i \times d_i$$

式中: C_i 为第 i 次测定的氨挥发速率; d_i 为第 i 次测定时连续捕获的时间,d。

$$\text{土壤氮残留 } N_{\min} = N_{\text{NH}_4} + N_{\text{NO}_3}$$

式中: N_{NH_4} 为土壤铵态氮含量; N_{NO_3} 为土壤硝态氮含量。

生育期土壤氮素净化量=不施氮肥区作物吸氮量+不施氮肥区土壤残留 $N_{\min}$ -不施氮肥区土壤起始 $N_{\min}$ ^[17]

表 1 不同处理的肥料用量(kg·hm⁻²)

Table 1 Fertilizer rate of different treatments(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	描述 Description	基肥(纯氮) Basal fertilizer(N)	秸秆 Straw	总氮 TN	总磷 TP	总钾 TK
CK	不施肥	0	0	0	0	0
F	农民习惯	240	0	240	100	100
R	秸秆还田	215.4	3000	240	100	100
C	控释肥	240		240	100	100

注: 秸秆氮磷钾含量 N 0.82%, P₂O₅ 0.39%, K₂O 1.26%。

Note: Straw: N 0.82%, P₂O₅ 0.39%, K₂O 1.26%。

氮素表观利用率(%)=(施氮区作物吸氮量-不施氮区作物吸氮量)/施氮量 $\times 100\%$ ^[17]

氮素表观残留率(%)=(施氮区土壤氮残留-不施氮区土壤氮残留)/施氮量 $\times 100\%$ ^[17]

氮素表观损失率(%)=100-氮素表观利用率-氮肥表观残留率^[17]

氮肥表观损失率包括了所有的未知去向的肥料氮,包括土壤的生物固定、淋洗、氨挥发等。

采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件对数据进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理产量、氮吸收量及肥料利用率

施肥可以显著提高玉米籽粒产量。由表 2 可知,三种施肥处理的产量没有明显差异,与不施肥处理相比,可以显著提高产量,最高增产达到 49.3%。三种施肥处理的作物吸氮量也没有显著差异,缓控释肥处理(C)的吸氮量最大,氮肥利用率达到 34.0%;秸秆还田施肥处理虽然作物吸氮量不是最高,但因其施氮肥量较其他两个施肥处理低,所以氮肥利用率最高为 34.4%;农民习惯(F)是所有施肥处理中肥料利用率最低的,为 31.6%。

2.2 不同施肥处理土壤氮残留

玉米收获后,对不同施肥处理的土壤铵态氮、硝

态氮残留进行采集和测定,从表 3 土壤氮残留 $N_{\min}$ 数据可知,在土壤表层(0~30 cm)和亚表层(30~50 cm),施肥处理的铵态氮和硝态氮残留均高于不施肥处理,尤其是硝态氮明显增加;三种施肥处理中,在土壤亚表层缓控释肥处理可以显著增加硝态氮残留,从而导致缓控释肥处理在 0~50 cm 土层显著增加了土壤硝态氮残留。与播前土壤(0~50 cm)土层中铵态氮和硝态氮含量相比,不施肥处理可降低土壤氮残留,施肥处理可增加土壤氮残留。

2.3 不同施肥处理的氨挥发损失

2.3.1 不同施肥处理氨挥发速率动态变化

氨挥发速率是评价氨挥发的重要指标。不同施肥处理,土壤中氨挥发变化具有明显的规律性(图 2)。试验于 2014 年 4 月 26 日施入肥料,当日出现小雨,次日除控释肥处理(C)外其余普通尿素施肥处理都出现氨挥发的小高峰,之后 5 d 温度明显升高且无降雨,而且由于土槽受到阳光照射,土壤温度要高于大田地温,各处理氨挥发速率缓慢升高。在施肥后第 6 d,出现一次中等降雨,土壤湿度增大使矿化速率增大或固定的氨挥发被释放出来。农民习惯处理(F)和秸秆处理(R)在降雨后出现氨挥发最大速率;此时控释肥(C)释放速率增快但未到达峰值,直到第 15 d 才出现氨挥发速率高峰。从图 2 可以看出,由普通尿素作为肥料的处理氨挥发峰值主要集中在施肥后前 5 d,

表 2 不同施肥处理的籽粒产量、吸氮量及氮肥利用率

Table 2 Yield, N uptake and N use efficiency of different treatment

处理 Treatment	籽粒产量 Yield/kg·hm ⁻²	作物吸氮量 N uptake/kg·hm ⁻²	氮肥利用率 NUE N utilization efficiency/%
CK	6430±536b	51.8±1.7b	—
F	8987±224a	127.7±6.1a	31.6
R	9281±403a	125.9±4.5a	34.4
C	9598±317a	133.3±5.5a	34.0

注:表中不同字母代表处理间差异性显著($P<0.05$)。下同。

Note: different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different treatments. The same below.

表 3 不同施肥处理对土壤氮残留的影响(kg·hm⁻²)

Table 3 Effect of different treatment on soil N residue(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	0~30 cm		30~50 cm		0~50 cm		0~50 cm
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	$N_{\min}$
CK	5.70±0.43b	4.24±2.44b	6.08±0.33ab	1.79±1.68c	11.78±0.74b	6.03±2.26c	17.82±2.93c
F	7.41±1.00ab	18.23±5.19a	5.70±0.55b	10.86±3.45b	13.11±1.43ab	29.09±5.36b	42.20±6.23b
R	8.43±2.44a	14.70±7.65a	6.46±0.45a	12.72±1.37b	14.88±2.85a	27.42±7.28b	42.31±7.70b
C	8.61±0.44a	20.26±1.28a	6.17±0.47ab	19.53±0.56a	14.78±0.71a	39.78±1.78a	54.56±2.45a

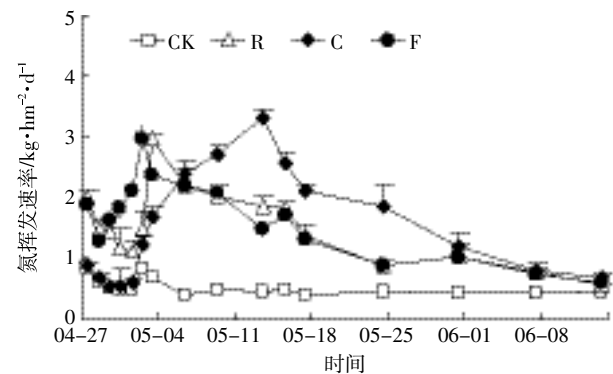


图 2 不同施肥处理的氨挥发速率

Figure 2 NH₃ rate of different treatment

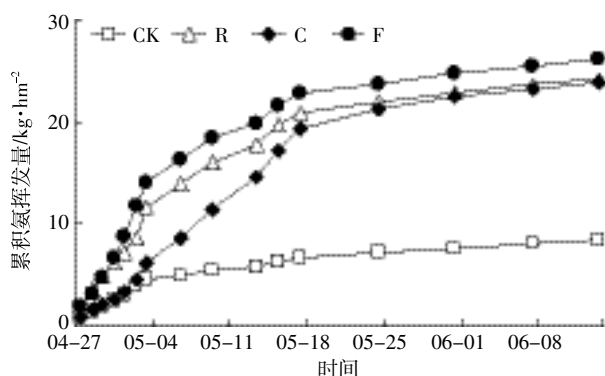


图3 不同施肥处理的氨挥发累积量

Figure 3 Accumulative NH_3 of different treatment

控释肥处理(C)峰值主要集中在第10~20 d。随着时间延长,土壤中的铵态氮逐渐被转化或消耗,含量逐渐减少,日挥发量也逐渐降低。至6月8日时,各施肥处理氨挥发速率与不施肥处理的氨挥发速率基本一致,趋于平稳,肥料氨挥发现象不再明显。

2.3.2 不同施肥处理氨挥发累积损失量

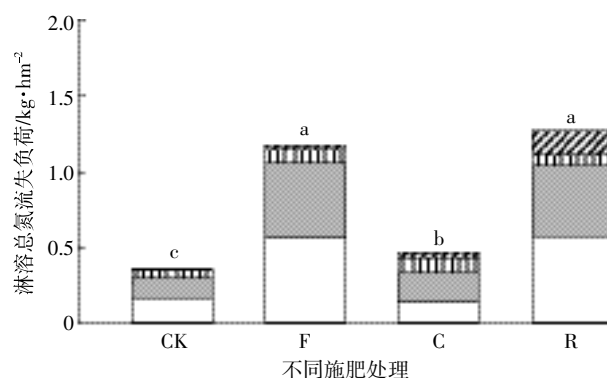
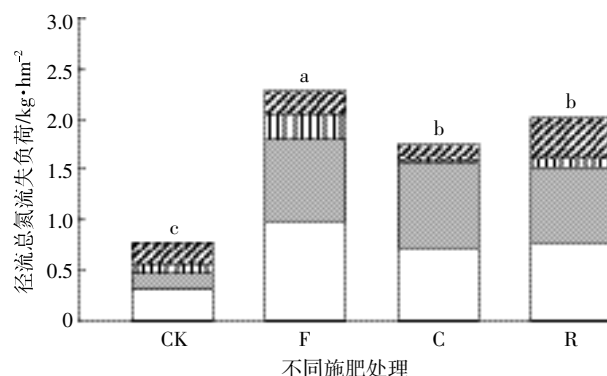
从氨挥发总量(图3)来看,农民习惯处理(F)氨挥发累积量最高,达到 $26.1 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。秸秆还田处理(R)和控释肥处理(C)的氨挥发累积量基本持平,分别为 $24.2 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $23.9 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,与农民习惯相比降低了7.3%和8.4%。

2.4 不同施肥处理氮径流淋溶损失

2014年整个玉米生育期东北地区降雨量极少,一般情况下,旱地小雨和中雨条件下很难产流,但因雨季出现连续中雨情况,所以一部分中雨出现了明显径流现象。如果部分时期出现连续两日降雨,采样时将2 d的径流合并混合处理,故在整个玉米生长期,共出现四次径流和淋溶。径流和淋溶中总氮流失负荷如图4。各处理的氮流失负荷存在显著差异,径流氮流失负荷表现为农民习惯>秸秆还田>控释肥>不施肥,淋溶氮流失负荷表现为秸秆还田>农民习惯>控释肥>不施肥,秸秆还田的淋溶氮流失负荷高主要是由于其淋溶量高所致。各处理的前两次径流淋溶氮负荷占到了总径流淋溶氮流失负荷的70%以上。从本次试验数据看出,黑土玉米地氮流失负荷主要以径流流失负荷为主,占径流淋溶流失总负荷的60%以上。农民习惯施肥、秸秆还田施肥及控释肥径流淋溶氮损失负荷分别占化肥施用量的1.4%、1.5%和0.9%。

2.5 氮表观损失

根据土壤-作物体系中氮平衡原理,基于系统输



□ 第一次 ▨ 第二次 ▨ 第三次 ▨ 第四次

图4 玉米生育期内各处理径流淋溶总氮流失负荷

Figure 4 Nitrogen loss load of different treatment by runoff and leaching in maize growth period

入量(包括施氮量、土壤矿化量和播前土壤无机氮)等于系统输出量(包括作物吸氮量、土壤无机氮残留和氮肥表观损失)可以计算各处理氮损失量。从氮肥表观损失数据看(表4),秸秆还田处理氮表观损失最多,达 $141.4 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,与农民习惯和控释肥相比,氮表观损失分别增加 $1.7 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $19.7 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$;但从肥料损失率看,控释肥的损失率最低,仅为50.7%,与农民习惯施肥和秸秆还田施肥相比,损失率分别减少了7.5%和8.2%。

3 讨论

在考虑土壤氮素矿化和其本身无机氮残留的前提下,研究土壤作物系统的氮平衡能够为土壤整个的氮循环提供更加详实的信息,而且能够在一定程度上反映氮损失^[18-19]。本研究发现不同施肥管理对玉米的产量影响不大,但氮损失量及氮损失率却存在差异。有研究表明秸秆还田后会被微生物利用发生腐解,其矿化出来的氮素会被作物吸收利用,从而增加作物产量^[20]。秸秆还田可明显增产、贮存土壤水分和降低玉

表 4 不同施肥处理的氮表观损失
Table 4 N appearance loss of different treatment

处理 Treatment	输入 Input/kg N·hm ⁻²			输出 Output/kg N·hm ⁻²			损失率 Loss rate/%
	施氮量 N rate	初始氮残留 Initial N _{min}	氮矿化量 Mineralization	吸氮量 N uptake	氮残留 N Residue	氮损失 Appearance nitrogen loss	
CK	0	38.8	30.8	51.8b	17.8c	0c	—
F	240	38.8	30.8	127.7a	42.2b	139.7a	58.2a
R	240	38.8	30.8	125.9a	42.3b	141.4a	58.9a
C	240	38.8	30.8	133.3a	54.6a	121.7b	50.7b

米生育期耗水量^[21];同时可以提高土壤团聚体含量^[22],增加土壤有机碳含量^[23-25]。在本研究中秸秆还田处理添加了有机物料并减少了化肥的施用量,但产量和氮损失与农民习惯相比无显著差异,其可能的原因是,秸秆还田增加了土壤碳氮比,为微生物活动提供了充足的碳源,使反硝化作用明显,从而增加了氮损失^[26]。秸秆还田处理并未出现明显的增产和增效现象,可能与生育期降雨量少导致秸秆腐解效果不明显有关。在本研究中控释肥可以在保证作物产量的前提下显著降低氮损失,这与前人的研究结果一致^[14,27-28]。控释肥可以控制肥料中有效养分的释放速率,做到养分供应规律与作物在生育期的需肥规律相一致,从而提高作物产量和氮肥利用率^[29-31]。本研究因数据有限,在氮平衡计算中未考虑氮沉降问题,Liu 等^[32]研究表明北方地区平均每年的干湿氮沉降量为 26~38 kg N·hm⁻²。因此,在未来的氮素平衡计算和推荐使用氮肥量时,应该对该地区的干湿氮沉降予以考虑^[19]。

本研究结果表明,三种施肥处理的作物吸氮量均占施氮量的 40%以上,氮挥发和径流淋溶损失约占施氮量的 10%,剩下的氮肥主要是硝化反硝化和未知损失,与我国农田化肥氮去向评估基本一致^[31]。氮挥发是氮损失的重要途径,温度、水分及 pH 值都对氮挥发损失有显著影响^[33-34]。本次试验农民习惯、秸秆还田和控释肥的氮挥发损失的总累计量分别为 26.1、24.2、23.9 kg N·hm⁻²,占施氮量的 10.9%、10.1%和 10.0%,其损失率与华北小麦-玉米轮作体系氮挥发损失率 9.9%~37%相比明显低^[35],主要由于土壤 pH 对氮挥发影响明显。华北地区土壤为潮土偏碱性,pH 值较高有利于水溶态 NH₃ 形成;东北地区黑土 pH 为中性,H⁺浓度较高,会降低水溶性 NH₃ 产生,提高 NH₄⁺的浓度^[36],因此氮挥发量相对较低。但此次试验与前人在东北黑土玉米连作体系研究结果相比氮挥发量明显高^[34],主要原因有两方面:一是温度,二是水分。本试验前期处于高温干旱期,4 月下旬出现当期历史最高温,

而且试验采用土槽装置,其四周均受到阳光照射,经过监测发现同一试验地槽内地温要高于大田地温,高温导致氮挥发量增多^[37]。同时由于前期降雨量很少,土壤中水分较少,导致尿素和控释肥料氮挥发量增多,与 Yan 等^[38]的研究结果一致。

由于试验年份降雨量与多年降雨量相比明显减少,径流淋溶的氮负荷较少,仅约占氮肥总量的 2%,其中径流的氮负荷占总负荷的 60%以上。该地在多雨年份,径流氮总负荷仅为肥料总量的 3%左右^[16],如果按上面的径流淋溶氮负荷比例计算,径流淋溶总负荷也仅为 5%。根据如上计算,东北黑土区玉米连作体系的径流淋溶损失量与我国南方和华北小麦玉米轮作体系径流淋溶损失相比要小很多。在径流淋溶总氮流失负荷中,与农民习惯施肥相比,控释肥可以显著降低氮流失负荷。这是由于控释肥养分释放速度慢,与作物对养分的需求同步,释放的养分与土壤接触少,减少了土壤理化作用或生物作用对养分的分解和固定,且其颗粒大不易随水流失,从而在源头上显著减少氮流失^[39]。

在土壤氮残留方面,王小明等^[40]研究表明,缓控施肥相比常规施肥可降低土壤剖面尤其是深层土壤硝态氮的淋洗累积效应,使硝态氮累积降低 20%~70%,从而减小对地下水产生污染的风险。本研究可监测的土壤剖面(0~50 cm)土层中控释肥累积氮残留相对较高,与降雨量少导致控释肥释放不充分有密切关系^[41],因而在降雨相对较少年份,应适当控制控释肥的施用量。

4 结论

在东北黑土玉米连作系统中,缓控释肥在保证作物产量及作物吸氮量的同时,可明显降低肥料的氮损失,是消减农业面源污染的有效途径。但在降雨量相对较少的年份,应适当控制控释肥的施用量,以降低土壤硝态氮累积的风险。

参考文献:

- [1] IFA—International Fertilizer Industrial Association. <http://www.fertilizer.org/ifa/HomePage/STATISTICS/FUBC>, 2009.
- [2] 房丽萍, 孟 军. 化肥施用对中国粮食产量的贡献率分析: 基于主成分回归 C-D 生产函数模型的实证研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(17): 156–160.
FANG Li-ping, MENG Jun. Application of chemical fertilizer on grain yield in China analysis of contribution rate: Based on principal component regression C-D production function model and its empirical study [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(17): 156–160.
- [3] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860[J]. *Nature Geoscience*, 2009(2): 659–662.
- [4] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1018.
- [5] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(9): 3041–3046.
- [6] Reay D S, Davidson E A, Smith K A, et al. Global agriculture and nitrous oxide emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 410–416.
- [7] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514: 486–490.
- [8] Gimay G, Singh B R, Nyssen J, et al. Runoff and sediment associated nutrient losses under different land uses in Tigray[J]. *Northern Ethiopia Journal of Hydrology*, 2009, 376(1/2): 70–80.
- [9] 黄东风, 李卫华, 王利民, 等. 水肥管理措施对水稻产量、养分吸收及稻田氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 62–66.
HUANG Dong-feng, LI Wei-hua, WANG Li-min, et al. Effects of water and fertilizer managements on yield, nutrition uptake of rice and losses of nitrogen and phosphorus by runoff from paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 62–66.
- [10] 中华人民共和国国家统计局. <http://data.stats.gov.cn/workspace/index?m=hgnd>, 2012.
National Bureau of Statistics of the people's Republic of China. <http://data.stats.gov.cn/workspace/index?m=hgnd>, 2012.
- [11] 顾海燕. 施氮量及时期对稻田氮素挥发、淋失和水稻利用的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
GU Hai-yan. Effects of nitrogen application amount and time on ammonia volatilization, nitrogen leaching and use efficiency[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012.
- [12] 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[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 359–365.
WANG Zhao-hui, LIU Xue-jun, JU Xiao-tang, et al. *In situ* determination of ammonia volatilization from wheat-maize rotation system field in North China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 359–365.
- [13] 贺发云, 尹 斌, 金雪霞, 等. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 253–259.
HE Fa-yun, YIN Bin, JIN Xue-xia, et al. Ammonia volatilization from urea applied to two vegetable fields in Nanjing suburbs[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2): 253–259.
- [14] 杜建军, 毋永龙, 田吉林. 控缓释肥料减少氨挥发和氮淋溶的效果研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 49–52.
DU Jian-jun, WU Yong-long, TIAN Ji-lin. Effect of several controlled/slow-release fertilizers on decreasing ammonia volatilization and N leaching[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 49–52.
- [15] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 等. 黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1234–1240.
ZHANG Bei-ying, XU Xue-xuan, LIU Wen-zhao, et al. Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different yearly precipitation patterns[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1234–1240.
- [16] 焉 莉, 高 强, 张志丹, 等. 自然降雨条件下减肥和资源再利用对东北黑土玉米地氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 1–6.
YAN Li, GAO Qiang, ZHANG Zhi-dan, et al. Effect of reducing fertilizer and resource recycling on nitrogen and phosphorus loss on black soil with planting maize in northeast region under natural rainfall condition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 1–6.
- [17] 蔡红光, 米国华, 陈范骏, 等. 东北春玉米连作体系中土壤氮矿化、残留特征及氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1144–1152.
CAI Hong-guang, MI Guo-hua, CHEN Fan-jun, et al. Characteristics of nitrogen mineralization and residual in the soil and nitrogen balance in the continuous spring maize cultivation system in Northeast China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1144–1152.
- [18] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, et al. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. *Field Crop Res*, 2003, 83(2): 111–124.
- [19] 黄 涛. 长期碳氮投入对土壤有机碳氮库及环境影响的机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
HUANG Tao. The effects of long-term C and N inputs on soil organic C and N pools and environments[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [20] Malhi S S, Nyborg M, Solberg E D, et al. Improving crop yield and N uptake with long-term straw retention in two contrasting soil types[J]. *Field Crop Res*, 2011, 124(3): 378–391.
- [21] 解文艳, 樊贵盛, 周怀平, 等. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 61–67.
XIE Wen-yan, FAN Gui-sheng, ZHOU Huai-ping, et al. Effect of straw incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas[J]. *Acta of Agricultural Mechanism*, 2011, 42(11): 61–67.
- [22] 张 鹏, 贾志宽, 王 维, 等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1513–1520.
ZHANG Peng, JIA Zhi-kuan, WANG Wei, et al. Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in Southern Ningxia of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(8): 1513–1520.
- [23] 陈尚洪, 朱钟麟, 刘定辉, 等. 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (4): 806–809.
CHEN Shang-hong, ZHU Zhong-lin, LIU Ding-hui, et al. Influence of straw mulching with no-till on soil nutrients and carbon pool manage-

- ment index[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 806-809.
- [24] 宋明伟, 李爱宗, 蔡立群, 等. 耕作方式对土壤有机碳库的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 622-626.
- SONG Ming-wei, LI Ai-zong, CAI Li-qun, et al. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 622-626.
- [25] 田慎重, 宁堂原, 王 瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 373-378.
- TIAN Shen-zhong, NING Tang-yuan, WANG Yu, et al. Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 373-378.
- [26] 董海波, 郑循华, 黄 耀, 等. 大气 CO₂ 浓度升高和秸秆还田对稻麦轮作农田 N₂O 排放的影响[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(1): 1-8.
- DONG Hai-bo, ZHENG Xun-hua, HUANG Yao, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ on N₂O emission from rice-wheat rotation fields with different wheat straw incorporation rates[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(1): 1-8.
- [27] 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.
- [28] 纪 洋, 刘 刚, 马 静, 等. 控释肥施用对小麦生长期 N₂O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 526-533.
- JI Yang, LIU Gang, MA Jing, et al. Effect of controlled release fertilizer (CRF) on nitrous oxide emission during the wheat growing period[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3): 526-533.
- [29] 隋常玲, 张 民. ¹⁵N 示踪控释氮肥的氮肥利用率及去向研究[J]. 西北农业学报, 2014, 23(9): 120-127.
- SUI Chang-ling, ZHANG Min. Nitrogen recovery and fate of polymer coated ¹⁵N-urea fertilizers under corn-wheat rotation[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23(9): 120-127.
- [30] 徐明岗, 李菊梅, 李冬初, 等. 控释氮肥对双季水稻生长及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料, 2009, 15(5): 1010-1015.
- XU Ming-gang, LI Ju-mei, LI Dong-chu, et al. Effect of controlled-release nitrogen fertilizer on growth and fertilizer nitrogen use efficiency of double rice in Southern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1010-1015.
- [31] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
- ZHU Zhao-liang. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778-783.
- [32] Liu X J, Ju X T, Zhang Y, et al. Nitrogen deposition in agroecosystems in the Beijing area[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2006, 113(1-4): 370-377.
- [33] 俞巧钢, 符建荣. 含 DMPP 抑制剂尿素的氨挥发特性及阻控对策研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 744-748.
- YU Qiao-gang, FU Jian-rong. Ammonia volatilization loss character of urea with DMPP addition and its controlling strategy[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4): 744-748.
- [34] 纪玉刚, 孙静文, 周 卫, 等. 东北黑土玉米单做体系氨挥发特征研究[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]. *plant Nutrition and fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1044-1050.
- [35] 胡小凤, 王正银, 孙倩倩, 等. 缓释复合肥料在不同 pH 值紫色土中氨挥发特性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 100-103.
- HU Xiao-feng, WANG Zheng-yin, SUN Qian-qian, et al. Characteristics of ammonia volatilization of slow release compound fertilizer in different pH values of purple soils[J]. *Transaction of the CSAE*, 2009, 25(6): 100-103.
- [36] Mengel K, Robin P, Salsac L. Nitrate reductase activity in shoots and roots of maize seedlings as affected by the form of nitrogen nutrition and pH of the nutrition solution[J]. *Plant Physiol*, 1983, 71(3): 618-622.
- [37] Rawluk G C D, Racz G J. Ammonia volatilization from soils fertilizer with urea and varying rates of urease inhibitor NBPT[J]. *Can J Soil Sci*, 2001, 81(2): 239-246.
- [38] Yan L, Zhang Z D, Chen Y, et al. Effect of water and temperature on ammonia volatilization of maize straw returning[J]. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2016, DOI: 10.1080/02772248.2015.1133382
- [39] 颜 旺. 缓控释肥减氮对旱地氮素损失、利用及作物产量的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- YAN Wang. Effects of slow-controlled release fertilizer and reducing nitrogen application on loss and utilization of nitrogen and upland crop yield[D]. Changshang: Hunan Agricultural University, 2014.
- [40] 王小明, 谢迎新, 张亚楠, 等. 新型肥料施用对玉米季土壤硝态氮累积的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 13(5): 232-236.
- WANG Xiao-ming, XIE Ying-xin, ZHANG Ya-nan, et al. Effect of new type fertilizers application on accumulation of soil nitrate nitrogen in the maize season[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 13(5): 232-236.
- [41] 孙红帅, 张永清, 曹 兵, 等. 适用于半干旱气候条件下的微水溶性缓释肥料在夏玉米上的肥效研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(24): 127-132.
- SUN Hong-shuai, ZHANG Yong-qing, CAO Bing, et al. Study on the fertilizer efficiency on the summer corn of the water-soluble slow-release fertilizer suitable for semi arid climate conditions[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(24): 127-132.