植物营养与肥料学报 2015,21(3):571-579 doi: 10.11674/zwyf.2015.0303
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

传统和优化施氮对春玉米产量、氨挥发及氮平衡的影响

李欠欠[1], 李雨繁[2], 高 强[2], 李世清[3], 陈新平[1], 张福锁[1], 刘学军[1*]
(1 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193; 2 吉林农业大学资源与环境学院,吉林长春 130118;
3 西北农林科技大学水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】本文通过在陕西省长武县(CW)和吉林省梨树县(LS)的春玉米田间试验,研究了传统和优化施氮对春玉米产量、土壤氨挥发及氮平衡的影响,以探讨春玉米氮肥优化的潜力及其对农田氨减排的效果。**【方法】**试验设对照、传统施氮(长武 N 250 kg/hm^2, 梨树 N 300 kg/hm^2)及优化施氮(N 200 kg/hm^2)3 个处理,分别以 N0、Ncon、Nopt 表示。氨挥发采用德尔格氨管法(简称 DTM 法)进行原位测定,通过田间气象因素的校正计算氨挥发累积量。**【结果】**长武和梨树点不同施氮处理下春玉米的产量结果表明,除对照(长武 7.9 t/hm^2、梨树 3.8 t/hm^2)外,传统和优化施氮处理间均无显著差异(长武 10.6～10.8 t/hm^2, 梨树 9.5～9.6 t/hm^2)。玉米氮肥利用率表现为优化施氮(44.3%～44.5%)显著高于传统施氮(33.6%～36.4%),其中长武点氮肥利用率提高了 8.1 个百分点,梨树点氮肥利用率增加了 10.7 个百分点。氨挥发田间监测结果显示,基肥翻耕入土后,伴随降雨的产生,长武和梨树点均未产生氨挥发。喇叭口追肥期表施氮肥后,长武和梨树点均产生大量氨挥发(占追施尿素氮量的 16%～22%),减少追肥用量 N 30 kg/hm^2(长武点)和 N 100 kg/hm^2(梨树点)能显著减少氨挥发损失 N 8 和 15 kg/hm^2。土壤-春玉米系统氮平衡估算的结果显示,与长武点氮素表观矿化 N 97 kg/hm^2 相比,梨树点仅为 N 16 kg/hm^2。优化施氮比传统施氮处理显著降低表观氮素盈余 N 48～88 kg/hm^2。长武点各施氮处理的表观氮素盈余中,约 46% 的氮素残留在 0—1 m 的土壤中,54% 损失到环境中,氨挥发占总损失的 15%～30%;梨树点表观氮素盈余中,35% 损失到环境中,其中氨挥发占总损失的 54%～75%,约有 65% 残留在 0—1m 的土壤中。梨树点传统施氮处理 0—1 m 土层的氮素残留达 N 140 kg/hm^2,部分残留在土壤中的氮素也将面临淋洗、硝化和反硝化等损失的风险。与优化施氮相比传统施氮氮素表观损失增加了约 N 30～40 kg/hm^2,除氨挥发损失外,淋洗和硝化/反硝化等也是土壤-春玉米系统中不可忽视的氮素损失途径。**【结论】**我国春玉米主产区农民传统的氮肥用量偏高,增产效应不明显,氮肥损失风险加剧,尤其是氨挥发损失较大,氮肥的优化潜力高达 20%～33%,相当于可减少施氮 N 50～100 kg/hm^2。

关键词: 春玉米; 产量; 氮肥利用率;氨挥发; 氮平衡
中图分类号: S513.062; S153.6$^+$1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)03-0571-09

Effect of conventional and optimized nitrogen fertilization on spring maize yield, ammonia volatilization and nitrogen balance in soil-maize system

LI Qian-qian[1], LI Yu-fan[2], GAO Qiang[2], LI Shi-qing[2], CHEN Xin-ping[1], ZHANG Fu-suo[1], LIU Xue-jun[1*]
(*1 College of Resource and Environment Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China;*
2 College of Resource and Environment Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;
3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract:【Objectives】 Two field experiments were conducted in spring maize at Changwu county (CW) of Shaanxi province and Lishu county (LS) of Jinlin province, to compare the effects of optimized and conventional N fertilization on crop yield, NH_3 volatilization, and N balance in soil-spring maize system. The objective of the paper

收稿日期: 2014-02-17 **接受日期:** 2014-05-09
基金项目: 国家自然科学基金项目(41071151)资助。
作者简介: 李欠欠(1984—),女,江苏徐州人,博士研究生,主要从事植物营养与肥料方面的研究。E-mail: cute_lq@163.com
* 通信作者 E-mail: liu310@cau.edu.cn

was to quantify the N saving potential and NH_3 mitigation potential in spring maize under optimization N fertilization. 【**Methods**】NH_3 volatilization was monitored *in situ* with a Dräger-Tube Method (DTM), which was corrected by a micrometeorological flux method in previous work. Three N treatments: CK (no N application), Ncon (conventional N fertilizer, N 250 kg/hm^2 at CW and N 300 kg/hm^2 at LS) and Nopt (optimized N fertilization, N 200 kg/hm^2), were designed at the two sites. 【**Results**】Except CK treatment (7.9 t/hm^2 at CW and 3.8 t/hm^2 at LS), no significant difference of maize yield between Ncon and Nopt was found at both sites (10.6–10.8 t/hm^2 at CW and 9.5–9.6 t/hm^2 at LS). In contrast, apparent N recovery was significantly higher in Nopt (44.3% –44.5%) than in Ncon (33.6% –36.4%). Compared with Ncon, apparent N recovery increased by 8.1 percentage points and 10.7 percentage points in Nopt at CW and LS, respectively. No obvious NH_3 loss was detected during the basal fertilization period with uniformly incorporated fertilizer into soil, combined with later precipitation at both sites. However substantial NH_3 volatilization, accounting for 16% –22% of N applied, was found at the two sites during N top-dressing period. Reduced N application of N 30 kg/hm^2 (CW) and N 100 kg/hm^2 (LS) could significantly reduce NH_3 volatilization (N 8 kg/hm^2 at CW and N 15 kg/hm^2 at LS). Calculated N balance results showed regional difference for N surplus and apparent N loss between CW and LS sites. For apparent N mineralization, N 97 kg/hm^2 was observed at CW site, while only N 16 kg/hm^2 at LS site. The Nopt significantly decreased N surplus N 48–88 kg/hm^2 compared with Ncon. At CW, about 46% of N surplus was as 0–1 m residual soil N, and 54% of N surplus lost to environment, and NH_3 volatilization accounted for 15% –30% of total N loss. At LS, about 65% N surplus existed as 0–1 m residual soil N, 35% of N surplus lost to environment, and NH_3 volatilization accounted for 54% –75% of total N loss. Nearly N 140 kg/hm^2 of residual soil N in Ncon treatment at LS, while parts of residual soil N may be lost due to N leaching and/or nitrification/denitrification. Compared with Ncon, the Nopt treatment significantly decreased N 30–40 kg/hm^2 of N loss. The N loss results also showed large amounts of N unaccounted for (other N loss) was not NH_3 loss but a considerable amount of N leaching, and/or denitrification. 【**Conclusions**】Out results reveal that there is a N saving potential of N 50–100 kg/hm^2 or 20% –33% of conventional N rate in major spring maize production area of China without yield loss but significant less N loss to the environment.

Key words: spring maize; grain yield; N recovery; ammonia volatilization; apparent N balance

我国氮肥用量占全球氮肥用量的30%左右[1]。氮肥施入农田土壤后,作物吸收利用率普遍低于50%,大部分损失于环境中,氨挥发是氮肥损失的重要途径之一[2-3]。进入到大气中的氨可以沉降方式返回陆地、海洋生态系统[4],过量的氨沉降可引起生态系统酸化、富营养化、降低生物多样性等一系列问题;同时,氨作为空气中二次颗粒物(如$PM_{2.5}$)来源的重要组成部分,与人体呼吸系统健康也有密切联系[5-6]。玉米作为我国的三大粮食作物之一,其种植区域主要分布于我国华北、东北以及西北。目前针对玉米体系的田间氨挥发损失已有研究,但主要集中于华北平原[7-10]。针对东北及西北的春玉米体系氨挥发损失研究很少[11-12],还需进一步系统研究。此外,由于技术及多处理试验小区面积等限制,微气象方法(如梯度扩散法、质量平衡法)对土壤氨挥发测定在我国进行较少[13]。目前国内许多氨挥发研究采用的是简易密闭箱式法[12]、海绵通气法[14]等,虽然满足了小尺度多处理田块上氨挥发监测,但由于无法考虑自然条件下的风速等气象条件,通常与氨挥发的实际排放量有一定差异。为此,本研究参考 Pacholski 等的研究[15-17],结合自然条件下的风速等气象条件,采用校正的德尔格氨管法(简称 DTM 法)对东北、西北春玉米季的田间氨挥发开展原位测定,评价春玉米体系的土壤氨挥发通量。此外,通过比较传统和优化施氮条件下土壤氨挥发通量、春玉米产量以及土壤-春玉米作物系统氮素表观平衡,以期为春玉米体系氮素优化管理、减少氮素损失及提高氮肥利用率等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

春玉米田间试验于2011年分别设在两个典型的北方春玉米种植区域,为西北的陕西省长武县(CW)和东北的吉林省梨树县(LS)。长武县位于黄

土高原渭北旱塬,35°12′N,107°47′E,海拔 1184 m,属暖温带半湿润易旱气候区,年均气温 9.1℃,无霜期 171 d,土壤类型为黑垆土,2011 年春玉米生育期间的降水量为 500 mm;东北的吉林省梨树县,地处 43°18′N,124°20′E,海拔 155 m,属寒温带半湿润大陆性气候区,年均气温 5.8℃,无霜期 140 d,土壤类型为黑土,2011 年春玉米生育期间的平均降水量为 340 mm。两试验区的土壤基本理化性状见表 1。

表 1　供试土壤(0—20cm)基本理化性状

Table 1　Soil(0–20 cm) physical-chemical properties at two experimental sites

地点 Site	pH	有机质(g/kg) Organic matter	全氮(g/kg) Total N	无机氮(mg/kg) Nmin	有效磷(mg/kg) Olsen-P	速效钾(mg/kg) Exc-K
长武 Changwu county	8.3	14.4	1.0	11.7	21.2	161.6
梨树 Lishu county	5.5	17.6	1.2	11.0	30.4	119.0

1.2　试验设计

两试验点均设 3 个施氮处理,为不施氮对照,传统施氮(施氮量长武点为 N 250 kg/hm^2,梨树点为 N 300 kg/hm^2)和优化施氮(两点均为 N 200 kg/hm^2),分别以 N0、Ncon、Nopt 表示。每处理 3 次重复,小区面积为 40 m^2,田间完全随机排列。两试验点具体施肥的方法和时间见表 2。所有处理磷肥和钾肥施用量相同,均为 P_2O_5 60 kg/hm^2、钾肥 K_2O 60 kg/hm^2,在播种时作基肥一次施入。此外,依照长武当地的管理方式,所有处理均采用半膜覆盖技术,长武点春玉米种植密度为 75000 plant/hm^2。梨树点春玉米种植密度为 60000 plant/hm^2。

玉米品种均为先玉 335,春玉米生长季无灌溉,除草、病虫害防治等田间管理也均采用当地的传统方式进行。

表 2　试验期间长武、梨树点的施肥量与施肥时间

Table 2　N application rates and dates for conventional and optimized N treatments at Changwu and Lishu

地点 Site	时期 Stages	施肥方式 Fertilization mode	施氮日期(m-d) Fertilization date	施肥量 N rate(N kg/hm^2)	
				优化 Ncon	传统 Nopt
长武 Changwu county	播种期 Seeding time	翻耕入土 Uniformly incorporated after broadcast	5–8	160	80
	喇叭口期 Trumpet period	条状表施 Strip surface broadcasting	7–10	90	120
梨树 Lishu county	播种期 Seeding time	翻耕入土 Uniformly incorporated after broadcast	5–2	60	60
	喇叭口期 Trumpet period	条状表施 Strip surface broadcasting	6–28	240	140

注(Note):除梨树点播种期氮肥采用 15–15–15 氮磷钾复合肥外,其他氮肥均采用尿素 Except seeding time's N application at LS site conducted as NPK(15–15–15) compound fertilizer, and all the other treatments conducted as urea.

1.3　德尔格氨管法(DTM)氨挥发的原位测定方法

德尔格氨管法(DTM 方法)测定氨挥发,属动态密闭箱原位测定法,田间装置如图 1 所示。具体方法为:用 4 个密闭罐(各罐子覆盖面积为 100 cm^2,体积 370 cm^3)捕获气体,各罐子上的 2 个管道(直径 0.5 cm)用于气体的输入和输出,在出气口用特氟龙管连接 4 个罐子(特氟龙管广泛用于流体输送,具有耐温耐磨损,柔软性高等优良特性),用手泵抽气时(每次泵入体积 100 cm^3),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,Drägerwerk AG, Lübeck, Germany),抽气结束后(抽气次数一般 5～10 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,计算氨挥发浓度。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 氨气的检测。每次氨

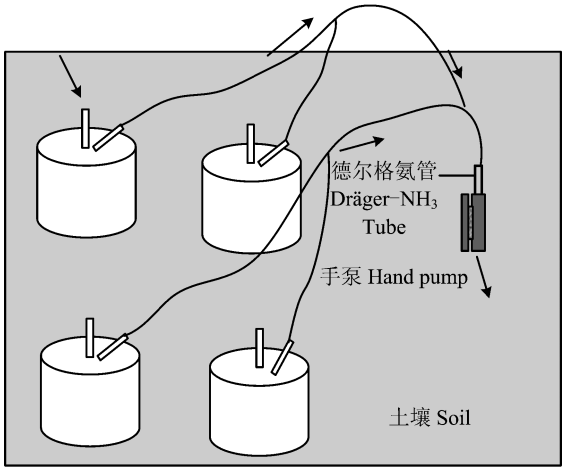

图1 测定氨挥发的DTM试验装置示意图

Fig. 1 Experimental set-up of DTM for ammonia volatilization

测定约3 min,由于测定时间短,密闭罐下的温度、辐射、水分等因素的变化很小,不计其影响。

1.4 氨挥发的计算方法

DTM氨挥发原位测定计算公式为

$$F_{Ng} = V \cdot |\ conc.\ | \cdot 10^{-6} \cdot pNH_3 \cdot U_N \cdot U_F \cdot U_Z$$

式中:F_{Ng}为氨排放量[N mg/(m^2·h)];V为抽气的体积(L);| conc. |为氨气的浓度(μl/L);pNH_3为该温度气压下NH_3密度(mg/L);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)。

经过为气象学方法校正的DTM氨挥发的计算方法为:

冬季 $\ln(NH_3\ flux_{IHF}) = 0.444 \cdot \ln(NH_3\ flux_{DTM}) + 0.590 \cdot \ln(V_{2m})$

夏季 $\ln(NH_3\ flux_{IHF}) = 0.456 \cdot \ln(NH_3\ flux_{DTM}) + 0.745 \cdot \ln(V_{2m}) - 0.280 \cdot \ln(V_{0.2m})$

式中:$NH_3\ flux_{IHF}$表示由IHF微气象法测定的氨挥发量[N kg/(hm^2·h)];V_{2m}与$V_{0.2m}$分别表示距地面2 m与0.2 m的风速(m/s);$NH_3\ flux_{DTM}$表示DTM测定的氨挥发量[N kg/(hm^2·h)]。

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微气象学法进行了校验,所得结果接近于IHF法,而且具有操作简便的特点,无需将氨采集后再进行实验室分析。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。有关此DTM法的详细介绍可参考文献[13,15-17]。

本研究在进行氨挥发监测时,试验田安装了实时风速自动测定仪,用于监测0.2 m和2 m的风速(m/s)。氨挥发监测频率可依据当时氨挥发速率进行监测次数的调整。低浓度的氨挥发下,每天采样1次(在10:00);随着挥发强度的增加,采样频率增加到每天2~3次(分别在6:00、10:00、18:00),若遇到降雨等特殊天气,可以在时间上进行一定调整,一般进行14 d的连续采样,直至仪器测不出明显的氨挥发损失。DTM方法的最低监测限为N 0.06 mg/(m^2·h),相当于N 0.6 g/(hm^2·h)。

2 结果与分析

2.1 春玉米产量、吸氮量及氮肥利用率

两个试验点传统和优化施氮处理的产量、生物量和籽粒吸氮量均显著高于对照处理(表3),但传统和优化施氮处理间无显著差异,可见长武和梨树点的传统施肥处理的施氮量(N 250和300 kg/hm^2)超过了春玉米的需氮量,增产不明显。两试验点的氮肥利用率优化施氮较传统施氮均显著提高8~10个百分点,进一步说明传统施氮量偏高,在当前的生产条件下优化施氮至少可以减少施氮N 50~100 kg/hm^{2}即减少氮肥用量20%~33%(表2),但仍可保持春玉米高产(10.8~9.6 t/hm^2),同时还可提高氮肥利用率8~10个百分点。

2.2 春玉米生长季氨挥发的动态变化及累积量

春玉米播种期基肥均翻耕入土,其中长武点基肥翻耕入土后的第1天降雨30 mm,梨树于第3天降雨9 mm,两试验点在基肥期间用DTM法均未监测到氨挥发。一方面是因为基肥翻耕入土后导致土壤表层氮素浓度低,氨的底物NH_4^+-N的浓度低(NH_4^+-N浓度普遍低于N 0.5 mg/kg),不利于氨挥发产生;另一方面基肥翻耕入土后产生的降雨以及低温环境,进一步将尿素水解之后的NH_4^+-N滞留在土壤深层进行硝化反应,而不能扩散到土壤表层。

喇叭口追肥期尿素表施后,由DTM原位监测的氨挥发动态变化(图2)来看,两个试验点的氨挥发速率差异较大。追肥期长武点优化施氮处理的氨挥发速率高于传统施氮(图2a),主要是因为播种期长武点优化施氮的施氮量比传统施氮减少了N 80 kg/hm^2(播种期未监测到氨挥发),追肥期优化施氮比传统施氮的施氮量高N 30 kg/hm^2。一般情况下,氨挥发会随着施氮量的升高而增加,因此导致长武点追肥期的优化施氮处理的氨挥发略高于传统施

表 3　不同施肥处理下长武和梨树点春玉米产量、吸氮量和氮素利用率

Table 3　Effect of different N treatments on grain yield, N uptake, and apparent N recovery (ANR) of spring maize at Changwu and Lishu sites

地点 Site	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (t/hm^2)	地上生物量 Shoot biomass (t/hm^2)	籽粒吸氮量 Grain N uptake (kg/hm^2)	地上部吸氮量 Total N uptake (kg/hm^2)	氮肥利用率 ANR (%)
长武 Changwu county	N0	7.93 b	14.82 b	64 b	118 b	—
	优化 Ncon	10.65 a	18.36 a	132 a	209 a	36.4 b
	传统 Nopt	10.83 a	18.48 a	130 a	207 a	44.5 a
梨树 Lishu county	N0	3.81 b	7.43 b	35 b	57 b	—
	优化 Ncon	9.51 a	16.97 a	105 a	157 a	33.6 b
	传统 Nopt	9.59 a	16.06 a	106 a	145a	44.3 a

注(Note): 籽粒产量是指包括 14% 含水量的玉米产量,地上生物量是指籽粒、棒芯和秸秆的干物质总量 The grain yield denotes air dry grain yield with 14% moisture and the shoot biomass refers to total dry matter yield of grain, cobs and straw. 氮素利用率(ANR%) = (施肥区氮吸收 - 对照区氮吸收)/氮肥施用量 × 100, ANR% = (N uptake in fertilized treatment-N uptake in unfertilized treatment)/N applied in fertilized treatment × 100. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

氮。在长武点,表施尿素后,尿素很快溶解并进一步水解,在施肥不到 1 d 的时间里便产生了氨挥发,之后氨挥发在施肥后的第 3 d 出现高峰[N 140 ~ 165 g/(hm^2 · h)],伴随第 6 d 之后的连续降雨,氨挥发速率逐渐减少。追肥期梨树点优化施氮处理的氨挥发速率低于传统施氮(图 2b)。在梨树点,表施尿素后,土壤表层干燥使得尿素颗粒在施用后的前 2 d 都没有溶解,随后出现的 6 mm 及 10 mm 降雨加速了尿素的溶解,伴随着尿素的进一步水解从而产生氨挥发。梨树点的氨挥发高峰出现在第 5 d,传统施氮处理的氨挥发高峰值为 N 400 g/(hm^2 · h),优化施氮的氨挥发高峰值仅为 N 100 g/(hm^2 · h)。在施肥后的第 8 d,因 7 mm 降雨及后期底物 NH_4^+-N 浓度的降低,氨挥发逐渐停止。

将 DTM 原位监测的氨挥发速率结合面积及风速校正后,得到追肥期间氨累积挥发量(图 3)。长武点,追肥期优化施氮处理的氨挥发累积量为 N 23.2 kg/hm^2,占施氮量的 19.3%;传统施氮的氨挥发累积量为 N 14.6 kg/hm^2,占施氮量的 16.2%(图 3a)。梨树点,追肥期优化施氮处理的氨挥发累积量为 N 30.7 kg/hm^2,占施氮量的 21.9%;传统施氮的氨挥发累积量为 N 45.3 kg/hm^2,占施氮量的 18.9%(图 3b)。可见,在长武及梨树点,表面追施尿素均能产生大量的氨挥发(占追施尿素的 16% ~

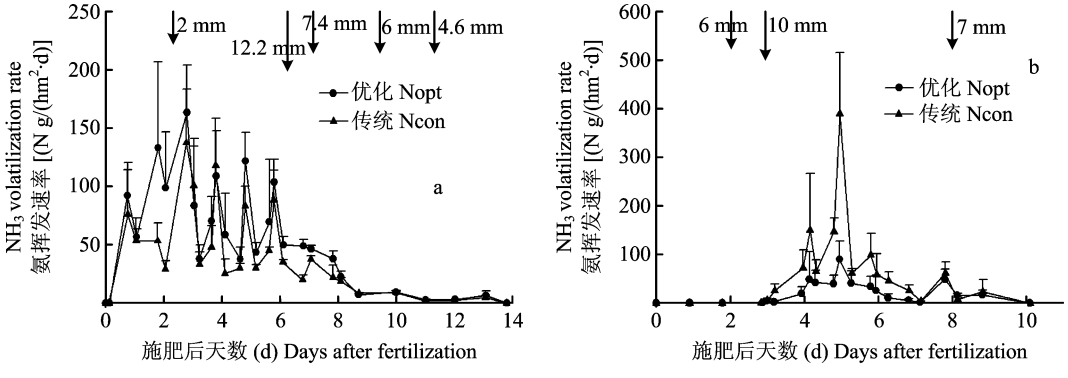

图 2　追肥期长武(a)和梨树(b)春玉米田间氨挥发动态

Fig. 2　Rate of NH_3 losses in Changwu county (a) and Lishu county (b) spring maize field with top-dressing fertilization

[注(Note): 箭头表示降雨 Arrows denote rainfall events.]

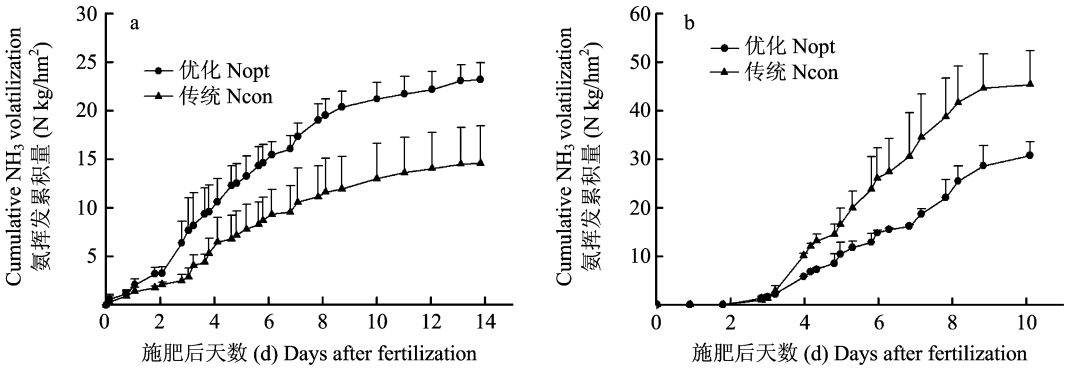

图3 追肥期长武(a)和梨树(b)春玉米田间氨挥发累积量

Fig. 3 Cumulative NH_3 losses at Changwu county(a) and Lishu county(b) sites during N top-dressing of spring maize

22%),因此在长武及梨树点分别减少尿素氮施用量30 kg/hm² 及100 kg/hm² 可减少氨挥发量N 8 kg/hm² 和N 15 kg/hm²。

2.3 春玉米生长季的氮素平衡

由长武及梨树试验点春玉米季土壤-作物系统的氮素平衡。结果(表4)表明,两试验点在氮素输出项中,传统与优化施氮相比,随氮肥投入量的增加,未被作物吸收的氮量显著增加,而优化施氮比传统施氮的氮素盈余(N 48～88 kg/hm²)、土壤氮残留(N 22～45 kg/hm²)和氮表观损失(N 26～43 kg/hm²)均降低。可见,农民传统施氮处理导致的氮肥过量投入,不仅不能促进作物的吸氮量,且增加了氮肥的残留及损失风险。长武点的表观氮损失中,除了N 15～23 kg/hm² 的氨挥发损失外,其余氮损失(如淋洗、硝化、反硝化等)为N 52～86 kg/hm²,氨挥发占表观氮损失的15%～30%;梨树点氮素表观损失中,其余氮损失为N 10～38 kg/hm²,氨挥发占表观氮损失的54%～75%。因此,两试验点的氨挥发均是氮肥表观损失的主要途径之一。此外,0—1 m土层中施氮处理的氮残留结果显示,长武点氮残留为N 65～87 kg/hm²,梨树点为N 94～139 kg/hm²。随春玉米收获后,残留氮在约6个月的休闲期间将面临一定程度的淋洗和硝化/反硝化损失的风险,部分残留氮将不能被下一季作物吸收利用。两试验点土壤氮素表观矿化量存在显著差异,长武点氮矿化量为N 97 kg/hm²,远高于梨树点N 16 kg/hm² 的氮矿化量,在一定程度上反映了土壤、气候、耕作等环境条件对土壤供氮能力的影响。

3 讨论与结论

3.1 氮肥的玉米产量效应与节氮潜力

与传统施氮相比,长武和梨树点的优化施氮处理在减少氮肥用量20%～33%的基础上不但能保证玉米的高产,同时氮肥利用率还可提高8～10个百分点。林治安等[20]22年的长期定位试验结果也显示,当产量提高到一定水平后,继续高量施肥无助于作物产量的提高。本试验中优化施氮处理的结果与Liu等[18]、Ju等[19]在夏玉米上得出的结果基本一致,但本试验条件下的春玉米产量高于夏玉米,而节氮潜力和氮肥利用率的提升略低于后者。两试验点的产量结果显示,对照处理的产量长武点比梨树点高4.1 t/hm²,传统和优化施氮处理的产量长武点比梨树点增加了约1.2 t/hm²。导致区域产量差异的部分因素可能有:1)长武点种植密度比梨树点增加了15000 plant/hm²,耕作栽培上可通过稳定氮肥用量并结合适量增加密度达到增产增效的目的。2)以往研究表明[21-22],地膜覆盖能够改善土壤微环境,贮水保墒,提高作物产量及水分、养分利用效率。与梨树点相比,长武点采取的半膜覆盖技术为玉米生长提供了优越的水热条件,此外长武点春玉米生育期降水量也高出梨树点160 mm。可见,除了施肥增产的效应外,田间管理及土壤气候等因素对作物产量潜力的实现起到不可忽视的作用。

3.2 玉米季的氮肥氨挥发损失特征

DTM法监测的春玉米氨挥发动态表明,长武和梨树点在追肥期不同施氮处理下氨挥发速率高峰期分别出现在第3 d[N 140～165 g/(hm²·h)]及第5 d[N 100～400 g/(hm²·h)]。氨挥发不仅受氮素形态及施氮量的影响,与温度、降水等环境因素也有密切关系。梨树点追肥后的第2 d和3 d分别降雨6 mm及10 mm,从而促进了氨挥发的产生;与梨树点降雨对氨挥发的影响结果不同,Sanz-Cobena

表 4　不同施肥处理下长武和梨树春玉米田间氮的表观平衡

Table 4　Apparent N balance in soil-spring maize system at Changwu and Lishu sites

地点 Site	项目 Item	N0	优化 Ncon	传统 Nopt
长武 Changwu county	氮输入 N input(kg/hm^2)(A)			
	土壤播前 Nmin Initial soil Nmin(a)	50	50	50
	施氮量 Applied N(b)	0	250	200
	氮矿化 N mineralization(c)	97	97	97
	氮输出 N output(kg/hm^2)(B)			
	作物吸氮量 Plant N uptake(d)	118	209	207
	氮盈余 N surplus(kg/hm^2)(C, A - B)	29	188	140
	土壤残留 Nmin Residual soil Nmin(e)	29	87	65
	表观氮损失 Apparent N loss(f, C - e)	0	101	75
	NH_3挥发 NH_3 emission(g)	0	15	23
	其他氮损失 Other N loss(h, f - g)	0	86	52
梨树 Lishu county	氮输入 N input(kg/hm^2)(A)			
	土壤播前 Nmin Initial soil Nmin(a)	63	63	63
	施氮量 Applied N(b)	0	300	200
	氮矿化 N mineralization(c)	16	16	16
	氮输出 N output(kg/hm^2)(B)			
	作物吸氮量 Plant N uptake(d)	57	157	145
	氮盈余 N surplus(kg/hm^2)(C, A - B)	22	222	134
	土壤残留 Nmin Residual soil Nmin(e)	22	139	94
	表观氮损失 Apparent N loss(f, C - e)	0	83	40
	NH_3挥发 NH_3 emission(g)	0	45	30
	其他氮损失 Other N loss(h, f - g)	0	38	10

注(Note): 氮矿化 = (对照区吸氮量 - 播前对照区 0—1 m 土壤无机氮量 + 收获后对照区 0—1 m 土壤无机氮残留量)

N mineralization = N uptake from control-initial 0-1 m soil Nmin in the control + residual 0-1 m soil Nmin in the control

等[22]在裸土上通过灌溉模拟降雨的试验结果表明,施肥后立即降水 3 mm 能促进氨挥发损失,而 7 ~ 14 mm 的降水能显著减少 84% 的氨挥发。这种结果的差异可能是因为,降雨前梨树点土壤表层干燥使尿素颗粒无法溶解,以及降雨发生后玉米叶片对雨水的拦截作用减少了到达土壤表层的降雨量和降雨后的温度(23℃),有利于氨挥发有关;此外,施肥一周后的降雨均使两个试验点的氨挥发大大降低,表明氨挥发不仅与降雨量有关,也受降雨时间的影响。

DTM 法结合气象因子(风速)校正后,长武点追肥期氨挥发累积量为 N 14.6 ~ 23.2 kg/hm^2,梨树点追肥期氨挥发累积量为 N 30.7 ~ 45.3 kg/hm^2,两点累积挥发量约占追施氮肥的 16% ~ 22%。与苏芳等[9]采用风洞法连续 2 年监测华北平原夏玉米追肥期的氨挥发(N 47 ~ 66 kg/hm^2,占追施尿素的 23% ~ 33%)相比,两试验点春玉米体系的氨挥发潜力略低。两试验点氨挥发高于纪玉刚等[11]采用通气法对春玉米的研究结果(氨挥发 N 11 kg/hm^2,约占追施尿素的 7%)。

3.3　氮素优化对土壤 - 玉米体系氮素平衡的影响

通过对不同施氮处理长武和梨树点春玉米田间氮的表观平衡研究显示,两试验点土壤氮素表观矿化量存在显著差异,与长武点氮素表观矿化量 N 97 kg/hm^2 相比,梨树点仅为 N 16 kg/hm^2,与高强等[23]在吉林研究的春玉米的表观氮矿化量(N 13 ~

24 kg/hm^2)的结果相当。氮素盈余量与氮肥投入量紧密相关,与优化施氮处理相比,传统施氮的氮素盈余量提高了N 48～88 kg/hm^2。收获后大量氮素残留于0—1 m土层,尤其是梨树点的传统施氮处理的氮素残留达N 139 kg/hm^2。研究表明,春玉米收获后,残留在土壤中的氮素也将面临损失风险,尤其是当土壤氮残留超过N 100 kg/hm^{2}时[23-24]。传统施氮处理也导致了当季作物约N 80～100 kg/hm^{2}的氮素损失,除了氨挥发损失,淋洗和硝化/反硝化等也是氮肥的重要损失途径。以往研究表明,淋洗是玉米体系氮损失的主要途径之一[18-19]。

综合以上分析,长武和梨树点春玉米生产中农民传统施氮量偏高,氮肥增产效应不明显,优化潜力高达20%～33%。与优化施氮处理相比,传统施氮的氮肥利用率降低了约10个百分点,导致土壤中约N 90～140 kg/hm^{2}的残留无机氮,增加了当季氮肥的环境损失风险,其中氨挥发损失N 15～45 kg/hm^2,其他损失N 38～86 kg/hm^2。

参考文献:

[1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2004.
Editorial Committee of China Agricultural Yearbook. China agricultural yearbook [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2004.

[2] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction [J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1-6.

[3] Cui S H, Shi Y A, Groffman P M *et al*. Centennial-scale analysis of the creation and fate of reactive nitrogen in China(1910-2010) [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013,110: 2052-2057.

[4] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W *et al*. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. Science, 2008, 320: 888-892.

[5] Liu X J, Duan L, Mo J M *et al*. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview [J]. Environmental Pollution, 2011, 159: 2251-2264.

[6] Sutton M A, Oenema O, Erisman J W *et al*. Too much of a good thing[J]. Nature, 2011, 472: 159-161

[7] 李宗新, 董树亭, 王空军, 等. 不同肥料运筹对夏玉米田间土壤氮素淋溶与氨挥发影响的原位研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 998-1005.
Li Z X, Dong S T, Wang K J *et al*. In situ study on influence of different fertilization strategies for summer maize on soil nitrogen leaching and volatilization [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(6): 998-1005.

[8] 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.
Li G T, Li B G, Chen D L. Ammonia volatilization from large field planted with winter wheat and summer maize [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2002, 17(1): 76-81.

[9] 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[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 409-413.
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 [J]. China Environmental Science, 2007, 27(3): 409-413.

[10] 张玉铭, 胡春胜, 董文旭. 华北太行山前平原农田氨挥发损失[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 417-419.
Zhang Y M, Hu C S, Dong W X. Ammonia volatilization from wheat-maize rotation field in the piedmont of Taihang[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(3): 417-419.

[11] 纪玉刚, 孙静文, 周卫, 等. 东北黑土玉米单作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 Y G, Sun J W, 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.

[12] 王连君, 刘中军, 王继红. 黑土玉米农田生态系统氮磷配施氨挥发规律[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(7): 87-90.
Wang L J, Liu Z J, Wang J H. Ammonia volatilization of corn farm land ecosystem under various proportions of nitrogen and phosphorus in black soil [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(7): 87-90.

[13] Roelcke M, Li S X, Tian X H *et al*. In situ comparisons of ammonia volatilization from N fertilizers in Chinese loess soils [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 62: 73-88.

[14] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 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 Z H, Liu X J, Ju X T, Zhang F S. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 205-209.

[15] 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: 361-369.

[16] Pacholski A, Cai G X, Nieder R *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: 259-273.

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

[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 Crops Research, 2003, 83: 111-124.

[19] 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 of the United States of America, 2009, 106: 3041-3046.

[20] 李建奇. 地膜覆盖对春玉米产量、品质的影响机理研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(5): 87-92, 97.
Li J Q. The mechanism study of the influences of plastics film mulch on grain yield and seed quality of spring maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(5): 87-92, 97.

[21] 宋淑亚, 刘文兆, 王俊, 等. 覆盖方式对玉米农田土壤水分、作物产量及水分利用效率的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 210-217.
Song S Y, Liu W Z, Wang J *et al*. Effects of different mulching modes on soil moisture, grain yield and water use efficiency in a corn fields[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(2): 210-217.

[22] Sanz-Cobena A, Misselbrook T, Camp V, Vallejo A. Effect of water addition and the urease inhibitor NBPT on the abatement of ammonia emission from surface applied urea[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45: 1517-1524.

[23] 高强, 蔡红光, 黄立华, 等. 吉林省半干旱地区春玉米连作体系氮素平衡研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(8): 127-132.
Gao Q, Cai H G, Huang L H *et al*. Study on soil nitrogen balance of spring maize continuous cropping in semi-arid area of Jilin Province [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2009, 37(8): 127-132.

[24] 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 H G, Mi G H, Chen F J *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.