

谢 勇, 荣湘民, 张玉平, 等. 控释氮肥减量施用对春玉米土壤 N_2O 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 N_2O emissions and ammonia volatilization in spring maize soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 596-603.

控释氮肥减量施用对春玉米土壤 N_2O 排放和氨挥发的影响

谢 勇, 荣湘民*, 张玉平, 何 欣, 石敦杰, 刘 强

(湖南农业大学资源环境学院, 农田污染控制与农业资源利用湖南省重点实验室, 植物营养湖南省普通高等学校重点实验室, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 长沙 410128)

摘 要: 在大田条件下采用密闭室间歇通气法和密闭式静态箱法研究了控释氮肥不同施氮水平对春玉米土壤 N_2O 排放和氨挥发的影响。结果表明:与 T2(普通尿素)处理相比,控释氮肥处理(T3~T6) N_2O 排放通量变化趋势平稳,无明显的峰值;从累积排放量上看,与 T2 处理相比,T3(240 kgN·hm⁻²)、T4(216 kgN·hm⁻²)、T5(192 kgN·hm⁻²)、T6(168 kgN·hm⁻²)处理 N_2O 排放量分别减少 27.80%、33.66%、45.85%、55.12%,但 T2 与 T3、T4 处理之间差异不显著($P>0.05$),与 T5、T6 处理之间差异显著($P<0.05$);各控释氮肥处理间差异均不显著($P>0.05$),与施肥量呈极显著的指数函数关系($P<0.01$)。T2 处理氨挥发速率在施肥后的 2~4 d 内出现峰值,而各控释氮肥处理在基肥、苗肥、穗肥施用后,分别在第 9、6、1~2 d 出现峰值;与 T2 处理相比,T3、T4 处理氨挥发量反而分别增加了 8.02%和 0.97%,但差异均不显著($P>0.05$),T5、T6 处理氨挥发量分别减少了 8.86%($P>0.05$)和 16.65%($P<0.05$);各控释氮肥处理间,与 T3 相比,T4、T5、T6 处理氨挥发量分别减少了 6.53%($P>0.05$)、15.62%($P<0.05$)和 22.84%($P<0.01$),且氨挥发量与施氮量呈极显著线性关系($P<0.01$)。从产量上看,各施氮肥处理玉米产量均显著高于不施氮肥处理,但各施氮肥处理间差异不显著($P>0.05$)。综合产量和 N_2O 排放、氨挥发考虑,控释氮肥的合理减氮施用能够发挥更大的环境效益。

关键词: 控释肥;施氮量; N_2O 排放;氨挥发;产量

中图分类号:S143.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)03-0596-08 doi:10.11654/jaes.2016.03.025

Effects of reduced CRNF applications on N_2O emissions and ammonia volatilization in spring maize soil

XIE Yong, RONG Xiang-min*, ZHANG Yu-ping, HE Xin, SHI Dun-jie, LIU Qiang

(Hunan Provincial Key Laboratory of Farmland Pollution Control and Agricultural Resources Use, Hunan Provincial Key Laboratory of Nutrition in common University, National Engineering Laboratory on Soil and Fertilizer Resources Efficient Utilization, College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Effects of controlled-release nitrogen fertilizer (CRNF) applied at different rates on N_2O emissions and ammonia volatilization from spring maize soil were studied using both closed chamber with intermittent aeration and closed static chamber. The treatments were no-nitrogen control (T1), common urea at normal rate (240 kg·hm⁻², T2); controlled-release urea at normal rate (240 kg·hm⁻², T3); controlled-release urea at 10% less (216 kg·hm⁻², T4); controlled-release urea at 20% less (192 kg·hm⁻², T5); and controlled-release urea at 30% less (168 kg·hm⁻², T6). Results showed that the dynamics of N_2O emissions from the treatments T3~T6 were relatively stable, with no obvious peaks, compared with the treatment T2. Cumulative N_2O emissions were 27.80%, 33.66%, 45.85%, and 55.12% lower in T3, T4, T5, and T6 than in T2, respectively. The N_2O emissions in T3 and T4 were not significantly different from that in T2, whereas there were significant differences in N_2O emissions between T2 and T5 and T6. However, no significant differences were found among CRNF treatments (T3~T6). The N_2O emission had an exponential relationship with N application rate ($P<0.01$). The peak of ammonia volatilization in T2 emerged

收稿日期:2015-05-23

基金项目:国家科技支撑计划课题(2012BAD15B04);省教育厅平台项目(15K056)

作者简介:谢 勇(1990—),男,湖南攸县人,博士研究生,主要从事农业面源污染及防控研究。E-mail:2497000692@qq.com

*通信作者:荣湘民 E-mail:rongxm2005@126.com

on the 2nd~4th day of fertilization, but on the 9th, 6th, and 1st~2nd day of base fertilization, seedling fertilization and panicle fertilization, respectively, in treatments T3~T6. The ammonia volatilization in T3 and T4 was 8.02% and 0.97% higher than that in T2, respectively, with no significant differences between them. However, the ammonia volatilization in T5 and T6 were 8.86% and 16.65% lower than that in T2. A linear relationship between ammonia volatilization and N application was found ($P < 0.01$). The yields of maize in all treatments with N applications were significantly higher than in the control, but no significant differences were found among nitrogen-applied treatments. The present results suggest that appropriate reduction of CRNF would alleviate N₂O emissions and ammonia volatilization while maintaining maize yields.

Keywords: CRNF; nitrogen application rate; N₂O emission; ammonia volatilization; yield

农业生产过程中,农田土壤 N₂O 和 NH₃ 产生及其向大气环境释放是土壤氮素气态损失的两个引人关注的肥料资源流失去向。N₂O 是《京都议定书》中明确规定要减少的 6 种温室气体之一^[1],是除 CO₂ 和 CH₄ 以外的第三大温室气体,具有很大的增温潜能,1 kg N₂O 的增温效应相当于 296~310 kg CO₂ 的,对温室效应的贡献率约为 5%^[2-3]。土壤向大气排放的 N₂O 占生物圈释放到大气中 N₂O 总量的 90%^[4],且其中 80%~90% 的 N₂O 排放来自于农田土壤^[5],故农田土壤是全球重要的 N₂O 排放源^[6]。NH₃ 的挥发是土壤养分 NH₄⁺ 的气态损失,既浪费了养分资源,又带来了许多环境问题,如大气沉降、NH₃ 和 NH₄⁺ 累积导致的水体富营养化,同时在大气中转化为氮氧化物等温室气体,造成空气质量恶化^[7]。

我国农业生产高氮肥投入的现象很突出,在占全球 9% 的耕地上消耗了世界上 35% 的肥料^[8],而且氮肥利用率仅为 30%~35%,损失率平均高达 45%^[9]。氮肥施入土壤后,部分被作物吸收,剩余的随降水和灌溉水淋失进入土壤深层或地下水、地表水,或经过氨挥发、硝化反硝化作用以 NH₃、NO_x 等气态形式进入大气,其中氨挥发是氮肥气态损失的重要途径。研究表明,我国北方潮土上种植的水稻、玉米和小麦施肥后氨挥发损失率分别为 30%~39%、11%~48% 和 1%~20%^[10]。据全球范围内估计,农业土壤因施用化肥而直接导致 N₂O 排放量达 36%,田间监测数据表明绝大部分 N₂O-N 排放系数变化于 0.1%~2.0% 之间^[11-12]。

N₂O 排放和氨挥发受土壤理化性状(质地、pH、含水量等),气候条件(温度、降水、光照),农业措施(氮肥品种、施肥量、施肥及灌溉方式)等的影响。而运用科学合理的农业管理措施(施肥量、施肥时间或施肥方式等)是降低气态氮素损失的重要途径。大量研究表明,N₂O 排放量和氨挥发损失是随着施氮量的增加而增加的^[13-14]。不同施肥方式对土壤 N₂O 排放和氨挥发损失的研究也较多。如曹兵等^[15]研究表明,基肥尿素表施方式下氨挥发损失率最高达 46.1%,而深施和

表施结合灌溉处理方式下的氨挥发损失率分别为 6.2% 和 3.8%;李鑫等^[16]认为,撒施后翻耕和条施后覆土能有效抑制氨挥发和 N₂O 排放损失。肥料品种的选用也是降低损失的关键,近年来选择控释肥已经成为热点。已有研究表明,施用控释肥可明显降低因氮肥施用而产生的土壤 N₂O 排放和氨挥发损失^[17-18]。本试验在研究氮循环的过程中对南方丘陵地区春玉米氮肥施用造成 N₂O 排放和氨挥发进行了研究,以了解施肥种类和施肥量的变化对环境污染的程度,为合理施肥、减少氮肥的气态损失、提高肥料利用率、保护农业环境提供研究依据和方法。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试玉米:品种掖单 13 号,由山东省莱州市明星种业公司提供。

供试肥料:普通尿素(N:46%),湖南省湘农农业生产资料集团有限公司生产;树脂包膜控释尿素(N:42%,养分释放期有 1、2、3 个月三种),山东金正大生态工程股份有限公司生产;钙镁磷肥(P₂O₅:12%),湖北祥云化工股份有限公司生产;氯化钾(K₂O:60%),俄罗斯生产。

1.2 试验地基本情况

试验于 2014 年在湖南省浏阳市原种场(沿溪镇花园村)长期定位试验基地进行。该地区属亚热带季风性湿润气候,全年的降水集中在 6—9 月,降水量为 1552 mm,年平均气温 17.3 ℃。供试土壤为河潮土,其部分理化性质为:pH 值 5.75,有机质 14.57 g·kg⁻¹,全氮 3.51 g·kg⁻¹,碱解氮 49.30 mg·kg⁻¹,全磷 0.47 g·kg⁻¹,速效磷 11.80 mg·kg⁻¹,全钾 14.51 g·kg⁻¹,速效钾 157.10 mg·kg⁻¹。

1.3 试验设计

本试验共设 6 个处理:处理 1,不施氮肥(CK, T1);处理 2,常量施肥(普通尿素纯 N 量 240 kg·hm⁻², T2);处理 3,常量控释尿素(树脂尿素纯 N 量 240 kg·

hm⁻², T3); 处理 4, 控释尿素减氮 10% (树脂尿素纯 N 量 216 kg·hm⁻², T4); 处理 5, 控释尿素减氮 20% (树脂尿素纯 N 量 192 kg·hm⁻², T5); 处理 6, 控释尿素减氮 30% (树脂尿素纯 N 量 168 kg·hm⁻², T6)。所有处理的施磷量和施钾量均为 150 kg·hm⁻²。为保证普通尿素和控释氮肥施肥方式一致, 控释氮肥也根据肥料释放期的长短分 3 次施入土壤, 按施氮量的 40% 作基肥 (3 个月释放期的控释氮肥), 30% 作苗肥 (2 个月释放期的控释氮肥), 30% 作穗肥 (大喇叭口期施, 1 个月释放期的控释氮肥); 磷肥全作基肥施用; 钾肥施用量各小区按处理的 50% 作基肥, 50% 作穗肥 (大喇叭口期施)。各处理小区以水泥砂浆筑埂分隔而成, 水泥埂高为 110 cm, 筑埂后填土 80 cm, 使田埂上表面距土面高 30 cm, 小区面积为 4 m×5 m, 每个处理设 3 次重复, 共 18 个小区, 随机排列, 种植 112 株玉米, 种植密度为 56 000 株·hm⁻²。玉米施肥方式为撒施后覆土混匀, 每次施肥后都浇水灌溉, 其他栽培管理都按照常规方法进行。

玉米于 2014 年 3 月 25 日施基肥、播种 (播种后的第 1~27 d 记为基肥期), 4 月 22 日施苗肥 (播种后的第 28~74 d 记为苗肥期), 6 月 7 日施穗肥 (播种后的第 75~106 d 记为穗肥期), 7 月 9 日收获, 全生育期为 106 d。

1.4 采样与测定

N₂O 采用密闭式静态箱法测定。采样箱由两部分构成, 即箱体和底座。箱体为不锈钢材料 (规格: 60 cm×50 cm×50 cm), 外表面被绝热材料包裹, 侧面上部固定位置设一气密性气体取样口和箱温监测接口, 底部开口可以罩在底座上。底座上表面为四周有水槽的正方形设计 (边长 50 cm), 测定前将底座插入 20 cm 土中。测定时, 水槽内注满水, 然后将箱体罩上, 形成一个密闭性气体空间, 再从取样口用注射器取气体样品。施肥后第 1、2、3、5、7 d 采样, 以后每周采样 1 次。采样时间是每天的 9:00—11:00, 采样时每隔 10 min 采集 1 次, 共采集 3 次, 每次取样 40 mL, 同时测定气温、箱内温度和 5 cm 土温。采集好的样品带回实验室, 立即用 Clarus580 气相色谱仪分析测定, 气体排放通量由 3 个气样浓度经线性回归分析得出。N₂O 排放通量计算公式为:

$$F=[273/(273+T)]\times(28/22.4)\times H\times 60\times (dc/dt)$$

式中: F 为 N₂O 排放通量, 以 N₂O-N 计, mg·m⁻²·h⁻¹; T 为箱内温度, °C; 28 为每摩尔 N₂O 分子中 N 的质量数, g·mol⁻¹; 22.4 为温度在 273 K 时的 N₂O 摩尔体积,

L·mol⁻¹; H 为采样箱高度, m; c 为 N₂O 气体浓度, μL·L⁻¹; t 为关箱时间, min; dc/dt 为采样箱内 N₂O 气体浓度的变化率, μL·L⁻¹·min⁻¹。

N₂O 累积排放量以每次采样时 N₂O 排放通量平均值与相邻两次采样间隔时间相乘后再相加而得; N₂O-N 损失率是施氮处理与 CK 处理的 N₂O 累积排放量差值占该施氮处理施氮量的百分比。

氨挥发的田间原位测定采用密闭室间歇式通气法, 其原理和示意图参见文献[16]。每次施肥后连续 10 d 采样, 之后每周采集 1 次, 直至测定的氨挥发量与对照无差异时为止。每日测定的时间是上午 10:00—11:00 和下午 4:00—5:00, 该时间段为土壤全天产生气态氨的平均水平^[19]。当遇到降雨时, 氨挥发的测定加密。测定时, 将罩子扣入土壤表面 10 cm 深, 位置在小区内任选。氨挥发通量计算公式如下:

$$F=(c\times V\times 14\times 10^{-2}/S)\times(24/t)$$

式中: F 为氨挥发通量, 以 NH₃-N 计, kg·hm⁻²·d⁻¹; c 为标准稀盐酸的滴定浓度, mol·L⁻¹; V 为滴定消耗稀盐酸的体积, mL; 14 为每摩尔 NH₃ 中 N 的质量数, g·mol⁻¹; S 为捕获装置的截面积, m²; t 为氨挥发收集时间, h。

累积氨挥发量是各测定时期的氨挥发通量之和; NH₃-N 损失率是施氮处理与 CK 处理的累积氨挥发量差值占该施氮处理施氮量的百分比。

1.5 产量

按小区收获分别计产。

1.6 数据分析

试验数据采用 Excel 2007 和 DPSv14.10 软件进行统计分析, 用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和新复极差法 (SSR) 比较不同数据组间的差异。

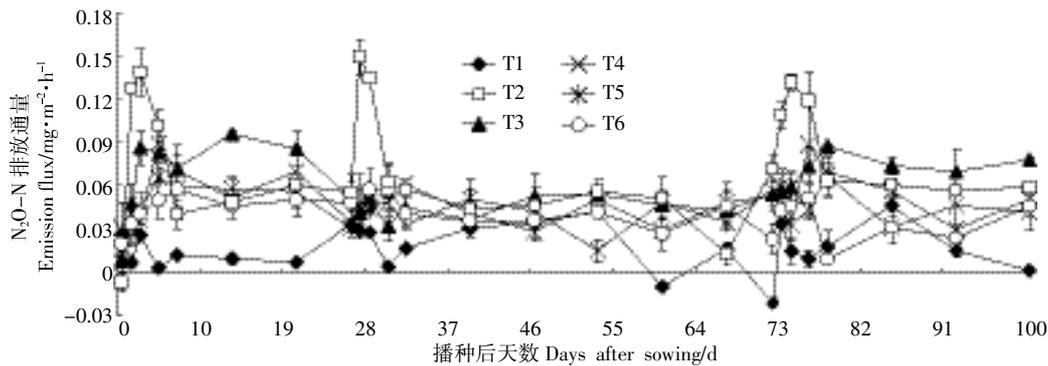
2 结果与分析

2.1 控释肥施用对春玉米生长期土壤 N₂O 排放的影响

2.1.1 N₂O 排放通量动态变化

由图 1 可知, 各处理 N₂O 排放通量动态变化随着处理的不同而不同。玉米生长期, T2 处理的 N₂O 排放通量出现了 3 次排放高峰, 分别达到 0.14、0.15、0.13 mg·m⁻²·h⁻¹, 且都是在施肥后的 2~3 d 发生。这是因为普通尿素施肥前后土温保持在 20~30 °C 之间, 并伴有 30~70 mm 的降水, 使得尿素在 2~3 d 内发生完全水解, 大量氮素养分进入土壤, 为土壤氮素的硝化和反硝化作用提供了充足的反应底物。

控释肥 T3~T6 处理 N₂O 排放通量动态变化相对

图1 N₂O 排放通量动态变化Figure 1 Dynamic changes of N₂O emission fluxes in different treatments

平稳,趋势大体一致,平均值分别为0.061、0.049、0.045、0.040 mg·m⁻²·h⁻¹,玉米生长周期内N₂O平稳排放主要是由于控释尿素养分缓慢释放于土壤中,基本保持与作物养分需求同步,在持续给土壤供给氮素和作物吸收的情况下,保持了土壤氮素含量的相对稳定。另外,试验分析发现,控释肥处理苗肥期的N₂O排放通量略低于基肥期和穗肥期,即苗肥期T3~T6处理N₂O排放通量的平均值分别为0.045、0.044、0.038、0.044 mg·m⁻²·h⁻¹,基肥期的分别为0.069、0.051、0.048、0.043 mg·m⁻²·h⁻¹,穗肥期的分别为0.069、0.053、0.050、0.034 mg·m⁻²·h⁻¹。苗肥期略低可能是因为这个时期玉米生长旺盛,氮素养分吸收能力激增,吸收量大,土壤有效氮含量降低;同时该期间降水总量高达427 mm,占全生育期降水的57.70%,极易产生土壤氮素养分地表径流和渗漏的迁移损失。T3~T6处理N₂O排放通量动态变化趋势显示施肥量越多,N₂O排放通量相应也会有所提高。

2.1.2 N₂O 累积排放量变化

如表1所示,2014年春玉米种植期间,不同施肥处理的土壤N₂O累积排放情况是T2>T3>T4>T5>T6>

表1 不同施肥处理下N₂O的排放量(kgN·hm⁻²)Table 1 Cumulative N₂O emissions under different fertilization treatments(kgN·hm⁻²)

处理 Treatment	基肥期 Basal stage	苗肥期 Seedling stage	穗肥期 Panicle stage	累积排放量 Cumulative emissions	损失率 Loss rate/%
T1	0.08b	0.21b	0.09b	0.38c	—
T2	0.64a	0.94a	0.47a	2.05a	0.70
T3	0.47ab	0.51b	0.50a	1.48ab	0.46
T4	0.54ab	0.47b	0.34ab	1.36ab	0.45
T5	0.31ab	0.43b	0.37ab	1.11bc	0.38
T6	0.29ab	0.42b	0.20ab	0.92bc	0.32

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different small letters mean significant difference at 0.05 level.

T1,表明随着施氮量的减少,N₂O排放量相应减少。施用普通尿素的T2处理造成旱地N₂O累积排放量高达2.05 kgN·hm⁻²,损失率为0.70%,施用控释肥的T3~T6分别为1.48、1.36、1.11、0.92 kgN·hm⁻²,损失率在0.30%~0.50%之间。与T2比较,T3、T4分别减少了27.80%、33.66%,但差异不显著($P>0.05$),T5、T6分别减少了45.85%、55.12%,差异显著($P<0.05$)。可知,控释肥减氮20%~30%时,N₂O减排效果明显。

多重比较结果表明,各个时期不同处理间N₂O排放量呈现一定的差异,与T2比较,控释肥处理T3~T6的N₂O排放量在基肥期和穗肥期差异不显著($P>0.05$),苗肥期达显著差异水平($P<0.05$)。这可能是不同施肥期影响N₂O排放的主导因子不同而导致的差异。基肥期温度较低,降水较少,尿素氮形态转化慢;穗肥期土壤氮素含量偏低和强降水导致氮素流失大,降低了N₂O排放的差异;苗肥期的土壤温度适宜(25℃左右),降水充沛(395 mm以上),肥料释放量增多,给土壤提供了较多的氮源,利于土壤硝化反硝化作用的同时进行,苗肥期T1~T6处理N₂O累积排放量占整个玉米生长周期的比例分别达55.26%、45.85%、34.46%、34.56%、38.74%、45.65%。由此可知,苗肥期施用尿素导致N₂O排放量接近累积排放总量的一半,此时期施用控释肥处理N₂O排放量占累积排放总量的比重随着施氮量的减少而增大。苗肥期排放通量的结论与其截然相反,可能表明本试验苗期周期长(约占玉米生长的半个周期)是个关键因子。综上可知,本实验条件下,春玉米苗肥期是N₂O排放的关键时期,适当减量施肥是控制减少N₂O排放的有效措施。

2.2 控释肥施用对春玉米生长期土壤氨挥发的影响

2.2.1 土壤氨挥发速率变化

由图2可知,控释尿素不同施氮水平下,春玉米

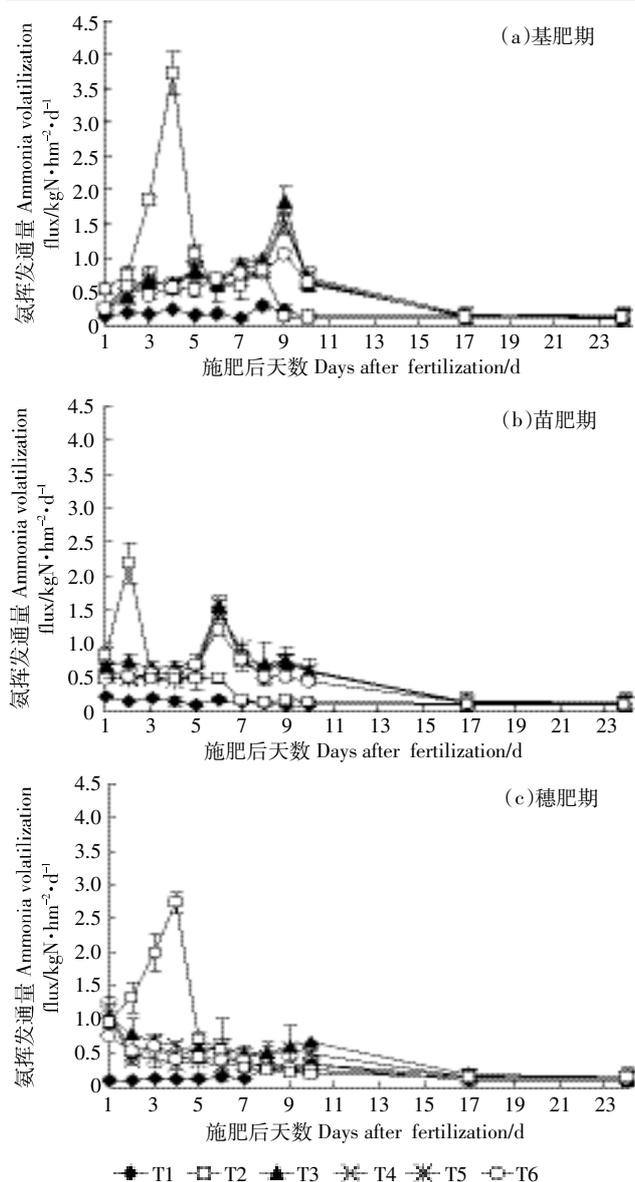


图2 不同施肥条件下对春玉米耕作土壤氨挥发动态监测

Figure 2 Changes of ammonia volatilization rates from spring maize soil under different fertilization

生长周期内基肥、苗肥和穗肥三阶段的土壤氨挥发速率存在明显差异。T2~T6 处理三次施肥后,各自土壤氨挥发速率达到峰值的时间和大小有差异,T2 处理均在施肥后的 2~4 d 内达到峰值,分别为 3.73、2.20、2.74 $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,而 T3~T6 处理达到峰值的时间基本一致,基肥期是在施肥后的第 9 d,峰值分别为 1.83、1.59、1.52、1.05 $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,苗肥期是在施肥后的第 6 d,峰值分别为 1.56、1.58、1.46、1.21 $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,穗肥期是在施肥后的 1~2 d,峰值分别为 1.05、1.12、1.19、0.76 $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。这可能是由于温度越来越高和降水的增减以及作物生长养分需要导致控释

尿素养分释放和土壤氮素残留水平的差异,进而影响土壤氨挥发速率。T2 达到排放高峰后迅速下降趋近于 T1,说明本试验条件下普通尿素的水解作用在 4 d 内基本完成,此时也是氨挥发损失最大时。T3~T6 各自达到排放高峰后,缓慢降低,逐渐趋于平稳。基肥期和苗肥期在施肥第 17 d 之后,氨挥发速率与 T1、T2 无明显差异,但穗肥期在施肥第 17 d 之后的氨挥发速率略高于 T1、T2。这可能是由于在基肥后期土温稍低,降水相对较少,控释尿素养分释放慢且少,而作物开始了部分吸收,抑制了肥料的土壤氨挥发损失;在苗肥后期玉米进入营养生长和生殖生长旺盛期,养分需求大,控释尿素释放的养分被作物大量吸收,一定程度上降低了土壤氨挥发损失;在穗肥后期玉米停止了旺盛营养生长,养分吸收少,控释尿素仍然释放养分,使得土壤氨挥发比 T1、T2 偏高。

2.2.2 土壤氨挥发累积量变化

由表 2 可知,T1~T6 处理的累积氨挥发量分别达 10.48、31.05、33.54、31.35、28.30、25.88 $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$,即 $\text{T3}>\text{T4}>\text{T2}>\text{T5}>\text{T6}>\text{T1}$ 。与 T2 比较,T3、T4 氨挥发累积量分别高出 8.02%和 0.97%,但差异不显著($P>0.05$),T5、T6 氨挥发累积量分别减少 8.86%和 16.65%。T3、T4 氨挥发累积量高于 T2 的可能原因在于控释氮肥养分释放慢,径流和下渗损失小,普通尿素则相反。相同施氮水平下,T2 和 T3 氨挥发在各个时期的排放量和累积挥发量存在差异,苗肥期差异极显著($P<0.01$)。T2 在基肥期和穗肥期氨挥发量比苗期明显多 58.37%~64.08%,这是因为苗期作物生长吸收了大量的养分和强降水养分的下渗和径流损失,极大减少了

表 2 不同施肥处理下氨累积挥发量($\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 2 Cumulative NH_3 volatilization under different fertilization treatments($\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	基肥期 Basal stage	苗肥期 Seedling stage	穗肥期 Panicle stage	累积排放量 Cumulative emissions	损失率 Loss rate/%
T1	3.55cB	2.97dC	3.96dD	10.48dC	—
T2	12.06aA	7.35cB	11.64aA	31.05abAB	8.57
T3	11.44abA	11.51aA	10.60abA	33.54aA	9.61
T4	11.39abA	10.66abA	9.31bAB	31.35abAB	9.66
T5	10.66abA	10.31abA	7.32cBC	28.30bcAB	9.28
T6	9.88bA	9.23bcAB	6.77cC	25.88cB	9.17

注:不同大、小写字母分别表示处理间差异极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)。

Note: Different capital and small letters mean significant difference at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

氨挥发底物来源;T3在各个时期的挥发量无明显差异($P>0.05$),这是控释氮肥释放特征调控了土壤养分含量的稳定所致。控释氮肥处理下土壤氨挥发量随施氮量的减少而减少。T3和T6在基肥期氨挥发量差异不显著($P>0.05$),苗肥期仅有T6与T3差异达到显著水平($P<0.05$),穗肥期与T3比较,T5、T6差异均极显著($P<0.01$),说明玉米生长后期氨挥发损失受施肥量的影响较显著。从玉米全生育期累积氨挥发量来看,T3和T5、T4和T6之间存在显著差异($P<0.05$),T3和T6之间达极显著差异($P<0.01$),其他均无显著差异($P>0.05$)。所以在T3施氮量的基础上控释氮肥减氮30%施用,可以显著降低氨挥发损失。

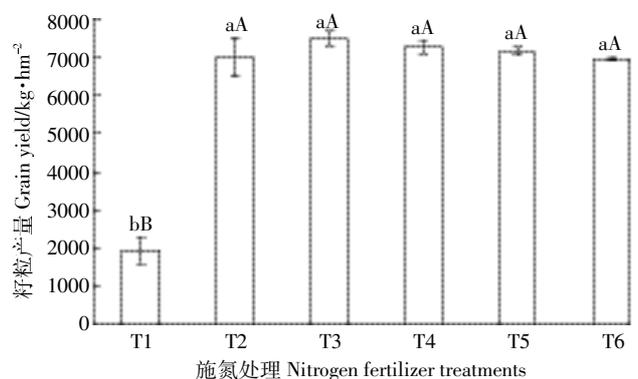
2.3 控释尿素施氮量与土壤气态氮素(N₂O、NH₃)损失变化的关系

通过表1、表2的试验结果分析得到的结论是:控释肥施氮量与土壤N₂O排放量和氨挥发量的关系呈正相关,施氮量减少,气态损失也减少。经过相关性作图分析发现(图3),占气态损失比例较少的N₂O排放的氮素损失量与控释肥施氮量之间呈极显著性指数关系($y=0.372e^{0.0005x}$, $R^2=0.993$, $P<0.01$),而损失比例较大的氨挥发氮素损失与控释肥施氮量之间呈极显著线性关系($y=0.094x+10.54$, $R^2=0.997$, $P<0.01$)。施用一定量的氮肥可促进旱地玉米土壤气态氮素损失,所以对于南方高温多雨的玉米种植期间,减量施用控释肥能够极大降低氨挥发损失和N₂O排放损失,有效减少肥料成本投入。

2.4 不同施肥处理玉米产量状况

如图4所示,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(T1)差异极显著($P<0.01$)。等量施氮240 kg·hm⁻²水平下,控释氮肥处理(T3)较

普通尿素处理(T2)玉米产量高6.95%($P>0.05$),说明施用控释氮肥对玉米产量的增收具有一定的促进作用。减量施用控释氮肥的处理(T4~T6)与T3比较,T4、T5和T6的玉米产量分别降低了3.01%($P>0.05$)、4.69%($P>0.05$)和7.17%($P>0.05$)。同时发现,T4和T5的玉米产量较T2分别高出3.73%($P>0.05$)和1.93%($P>0.05$),T6较T2减产0.72%($P>0.05$)。可见,相比普通尿素的施用,控释氮肥减少10%~20%的氮肥投入,能够促进玉米产量的稳产增收;减少30%的氮肥投入,玉米有一定的减产,但影响不明显。



不同大、小写字母分别表示处理间差异极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)

Different capital and small letters mean significant difference at 0.01 and 0.05 levels, respectively

图4 不同施氮处理对玉米产量的影响

Figure 4 Effects of different nitrogen fertilizer treatments on yields of maize

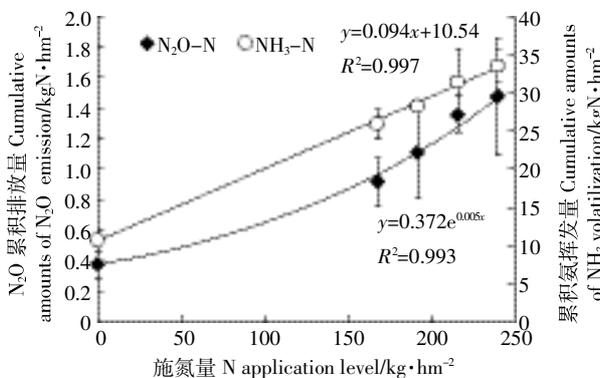


图3 施氮量对土壤气态氮素损失的影响规律

Figure 3 Effects of N application levels on gaseous nitrogen losses in soil

3 讨论

本试验区春玉米生长时期内,温度缓慢上升,降雨增多,而生产中一般都是在施肥后浇水或降雨,这样的施肥方式和气候条件使施入的氮肥极易发生硝化反硝化作用和氨挥发,导致氮素的大量气态损失。T2处理普通尿素施入土壤后2~4 d内迅速水解为铵态氮,此时N₂O排放和氨挥发均达到峰值,与李鑫等^[16]的研究发现一致,一方面大量铵态氮很快与土壤、水结合,以较快的速度形成很高的氨分压,极易导致直接的较多氨挥发损失,另一方面土壤铵态氮含量的增加促进了土壤硝化作用,产生少量N₂O,同时硝化作用所形成的硝态氮随降水或灌溉水淋溶到土壤深层,继而发生反硝化作用产生较多N₂O。3次施肥后产生的N₂O排放峰值无差异,这是每次施肥的施氮量、土温、土壤含水量和作物生长差异交互作用的结果,但

氨挥发排放峰值苗肥期最低,是由于玉米生长旺盛期吸收了大量的土壤有效氮,尿素分解后残留在土壤中的氮素相对较少,降低了土壤液相中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的浓度,从而削弱了氨挥发。同等施氮量的 T3 处理施用的是控释尿素, N_2O 排放通量波动不大,趋于平稳,无明显峰值,主要是由于控释尿素与普通尿素不同,它的包膜材料有疏水性,可有效减缓膜内尿素溶出过程所需水分的运移补充^[20-21],在较高施氮量的情况下仍能保持较好的控释效果,不会造成土壤有效氮含量忽高忽低变化,与李方敏等^[22]在稻田试验得出的结论一致。控释肥处理(T3~T6)氨挥发出现 3 次排放高峰,分别是在施肥后的第 9、6、1~2 d,基肥期的出峰时间与赵斌等^[23]的研究结果一致,但在苗肥期和穗肥期出峰时间有所提前。这可能是春玉米种植中后期追施的氮肥和前面未释放完全的氮肥在土温适宜(25℃左右)、降水较多(约 601 mm)的条件下,增大了控释尿素的养分释放速率和释放量,有利于激发土壤氨挥发。从累积排放量来看,丁洪等^[24]在实验室培养条件下研究认为,等氮量控释氮肥处理的 N_2O 累积排放量略高于尿素处理,但无显著差异($P>0.05$),本试验 T2 低于 T3 处理的 N_2O 排放量,也并没有显著差异($P>0.05$),结论相一致。T2 和 T3 处理 N_2O 和氨挥发累积排放量差异的不显著($P>0.05$),表明等量施氮条件下,控释氮肥对于减少氮肥施用的气态损失没有优越性,需要通过改变施肥量、施肥方式等条件来进一步研究。本试验结果表明,在减氮 30% 的条件下, T6 处理 N_2O 排放量与 T3 的差异不显著($P>0.05$),但与 T2 的差异显著($P<0.05$),而氨挥发损失量与 T3 的差异极显著($P<0.01$),与 T2 的差异显著($P<0.05$)。

监测周期内, T3~T6 各处理的 N_2O 排放通量和氨挥发速率变化趋势均一致,累积损失量都是随着施氮量的减少而降低。本试验的 T4~T6 处理在 T3 处理基础上,施氮量降低 10%~30%,对应的 N_2O 累积排放量减少了 8.11%~37.84%,并与施氮量呈极显著的指数函数关系(图 3)。梁东丽等^[25]研究发现,土壤 N_2O 排放量随着施肥量的增加而上升;邱炜红等^[26]也发现在蔬菜地里存在类似变化趋势,并指出不同蔬菜季 N_2O 排放总量均与施氮量呈显著的指数函数关系,说明土壤 N_2O 排放量随着施氮量的增加而缓慢上升,当超过了一定施氮量水平,土壤 N_2O 排放量会急剧增加,所以适当减少施氮量是减少土壤 N_2O 排放量的关键。另外,受施氮量增加的影响, N_2O -N 损失率也有上升趋势。邱炜红等^[26]对菜地研究发现, N_2O -N 损失率为

0.40%~1.4%,丁洪等^[27]在田间条件下研究了玉米地的 N_2O -N 损失率为 6.90%,而本试验 N_2O -N 损失率为 0.30%~0.70%,对应的氨挥发量也减少了 6.53%~22.84%,并与施氮量呈显著的线性函数关系(图 3)。这与施氮量显著影响土壤氨挥发的结论一致^[14,28]。李银坤等^[29]在温室土壤中的研究发现,减施氮 25% 处理与减施氮 50% 处理的氨挥发量分别减少了 22.10% 和 37.20%,与本试验研究结果趋势一致。

4 结论

(1)控释肥施用对春玉米土壤 N_2O 排放通量和氨挥发排放通量的动态变化有一定的影响。与普通尿素相比,各控释氮肥处理 N_2O 排放通量变化趋势平稳,无明显峰值,且苗肥期排放通量较低;氨挥发排放通量在施肥后存在明显的峰值,且出峰时间各有不同。

(2)减少控释氮肥施氮量既对春玉米土壤 N_2O 和氨挥发的减排有一定的作用,又能稳产增收。玉米生育期内, N_2O 排放量和氨挥发量均随施氮量的减少而减少。控释氮肥减氮 20% 时,相比普通尿素既能降低 33.66% ($P>0.05$) 的 N_2O 排放量和 8.86% ($P>0.05$) 的氨挥发量,又能增产 1.93% ($P>0.05$)。

(3)土壤 N_2O 排放量与控释肥施氮量呈极显著性指数关系 $y=0.372e^{0.005x}$ ($R^2=0.993$, $P<0.01$),累积氨挥发量与之呈极显著线性关系 $y=0.094x+10.54$ ($R^2=0.997$, $P<0.01$)。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of working group to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. England: Cambridge University Press. 2001.
- [2] 付晓青, 李勇. 土壤氧化亚氮排放时空变异性及其方法研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(3): 724-730.
FU Xiao-qing, LI Yong. Spatiotemporal variability of soil nitrous oxide emission and its study methods: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(3): 724-730.
- [3] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.
ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, ZHANG Jia-bao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2 , CH_4 and N_2O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 966-975.
- [4] Bouwman A F. The role of soil and land use in the greenhouse effect[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1989, 37(1): 13-19.
- [5] Hansen J E, Lacis A A. Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change[J]. *Nature*, 1990, 346(6286): 713-719.
- [6] Mellilo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cy-

- cle feedbacks to the climate system[J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2173-2176.
- [7] Hayashi, Nishimur S, Yagi K. Ammonia volatilization from a paddy field following applications of urea: Rice plants are both an absorber and an emitter for atmospheric ammonia[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2/3): 485-494.
- [8] 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>.
- [9] 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.
- [10] Cai G X, Chen D L, Ding H, et al. Nitrogen loss from fertilizers applied to maize-wheat and rice in the North China plain[J]. *Nutrient Cycling in Agro-Ecosystems*, 2002, 63(2): 187-195.
- [11] Mosier A R, Kroeze C, Nevison C, et al. Closing the global N₂O budget: Nitrogen oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle[J]. *Nutrient Cycling in Agro-Ecosystems*, 1998, 52(2): 225-248.
- [12] Bouwman A F. Soils and the greenhouse effect[J]. *New York: John Wiley and Sons*, 1990.
- [13] 纪洋, 刘刚, 马静, 等. 控释肥施用对小麦生长期 N₂O 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.
- [14] 李宗新, 王庆成, 刘开昌, 等. 不同施肥模式下夏玉米田间土壤氨挥发规律[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 307-314.
LI Zong-xin, WANG Qing-cheng, LIU Kai-chang, et al. Law of field soil ammonia volatilization in summer maize under different fertilizer patterns[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 307-314.
- [15] 曹兵, 李新慧, 张琳, 等. 冬小麦不同基肥施用方式对土壤氨挥发的影响[J]. *华北农学报*, 2001, 16(2): 83-86.
CAO Bing, LI Xin-hui, ZHANG Lin, et al. Effect of different basal-dressing application methods on soil ammonia volatilization from winter wheat field[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2001, 16(2): 83-86.
- [16] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 99-104.
LI Xin, JU Xiao-tang, ZHANG Li-juan, et al. Effect of fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 99-104.
- [17] 黄国宏, 陈冠雄, 张志明, 等. 玉米田 N₂O 排放及减排措施研究[J]. *环境科学学报*, 1998, 18(4): 345-349.
HUANG Guo-hong, CHEN Guan-xiong, ZHANG Zhi-ming, et al. N₂O emission in maize field and its mitigation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(4): 345-349.
- [18] 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, 24(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, 24(4): 136-140.
- [19] Hou H, Zhou S, Massaki H, et al. Ammonia emissions from anaerobically digested slurry and chemical fertilizer applied to flooded forage rice[J]. *Water, Air, Soil Pollut*, 2007, 183(1): 37-48.
- [20] 张民, 史衍玺, 杨守祥, 等. 控释和缓释肥的研究现状与进展[J]. *化肥工业*, 2001, 28(5): 27-30.
ZHANG Min, SHI Yan-xi, YANG Shou-xiang, et al. Status quo of study of controlled-release and slow-release fertilizers and progress made in this respect[J]. *Journal of the Chemical Fertilizer Industry*, 2001, 28(5): 27-30.
- [21] 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 Zhao-liang. 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.
- [22] 李方敏, 樊小林, 刘芳, 等. 控释肥料对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2170-2174.
LI Fang-min, FAN Xiao-lin, LIU Fang, et al. Effects of controlled-release fertilizers on N₂O emission from paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2170-2174.
- [23] 赵斌, 董树亭, 王空军, 等. 控释肥对夏玉米产量及田间氨挥发和氮素利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(11): 2678-2684.
ZHAO Bin, DONG Shu-ting, WANG Kong-jun, et al. Effects of controlled-release fertilizers on summer maize grain yield, field ammonia volatilization, and fertilizer nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11): 2678-2684.
- [24] 丁洪, 王跃思, 秦胜金, 等. 控释肥对土壤氮素反硝化损失和 N₂O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5): 1015-1019.
DING Hong, WANG Yue-si, QIN Sheng-jin, et al. Effects of controlled release fertilizers on nitrogen loss by denitrification and N₂O emission[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 1015-1019.
- [25] 梁东丽, 同延安, Ove E, 等. 菜地不同施肥量下 N₂O 逸出量的研究[J]. *西北农林科技大学学报*, 2002, 30(2): 73-77.
LIANG Dong-li, TONG Yan-an, Ove E, et al. N₂O losses from vegetable field of applying different amounts of NO₃-N[J]. *J of Northwest Sci-Tech Univ and For*, 2002, 30(2): 73-77.
- [26] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 等. 不同施氮水平对菜地土壤 N₂O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(11): 2238-2243.
QIU Wei-hong, LIU Jin-shan, HU Cheng-xiao, et al. Effects of nitrogen application rates on nitrous oxide emission from a typical intensive vegetable cropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11): 2238-2243.
- [27] 丁洪, 王跃思. 东北黑土区不同作物系统氮肥反硝化损失与 N₂O 排放量[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(2): 323-326.
DING Hong, WANG Yue-si. Denitrification losses of nitrogen fertilizer and N₂O emission from different crop-black soil systems in North-east China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2): 323-326.
- [28] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 不同施肥土壤对尿素 NH₃ 挥发的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 76-79.
DONG Wen-xu, HU Chun-sheng, ZHANG Yu-ming. Effects of different soil fertilization on NH₃ volatilization of urea[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 76-79.
- [29] 李银坤, 武雪萍, 梅旭荣, 等. 常规灌溉条件下施氮对温室土壤氨挥发的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 23-30.
LI Yin-kun, WU Xue-ping, MEI Xu-rong, et al. Effects of nitrogen application on ammonia volatilization in greenhouse soil under condition of conventional irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7): 23-30.