

控释肥对土壤氮素反硝化损失和 N_2O 排放的影响

丁 洪^{1,2}, 王跃思², 秦胜金¹, 张玉树¹, 项虹艳¹, 李卫华¹

(1.福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350013; 2.中国科学院大气物理研究所, 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室(LAPC), 北京 100029)

摘 要:在实验室培养条件下,研究了3种控释肥对土壤氮素硝化反硝化损失和 N_2O 排放的影响。结果表明,控释肥具有明显控制氮素释放的作用。在培养的前23 d,控释肥处理的土壤 NH_4^+-N 含量低于尿素处理,而后则高于尿素处理。各肥料处理土壤 NO_3^--N 含量均随培养时间逐渐增加,但不同肥料处理间差异不显著。28 d 培养期间,施入控释肥的土壤反硝化氮损失量为 $30.33\sim 30.91 \text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土,比施加尿素处理土壤低 $13.83\sim 14.41 \text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土,差异达到显著水平($P<0.05$),控释肥降低氮肥的反硝化损失达 $3.45\sim 3.60$ 个百分点。控释肥处理土壤 N_2O 累积释放量约为 $15.71\sim 20.45 \text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土,比尿素处理高 $0.86\sim 5.60 \text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土,但差异未达到显著水平。

关键词:控释肥;尿素;硝化反硝化; N_2O 排放

中图分类号:S145.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)05-1015-05

Effects of Controlled Release Fertilizers on Nitrogen Loss by Denitrification and N_2O Emission

DING Hong^{1,2}, WANG Yue-si², QIN Sheng-jin¹, ZHANG Yu-shu¹, XIANG Hong-yan¹, LI Wei-hua¹

(1.Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 2.LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: A 28-days incubation experiment was conducted to study the effects of three Controlled Release Fertilizers (CRFs) on the nitrogen loss by denitrification and N_2O emission. The results showed the CRFs had significant delayed effect on the nitrogen release. Before day 23th of the incubation, the soil NH_4^+-N contents in CRFs treatments were lower than that in urea treatment, and the fact was opposite after day 23th. The soil NO_3^--N contents in all fertilizer treatments increased with the time of incubation, but, there were no significant differences among treatments. After 28 days, the N loss amounts by denitrification were $30.33\sim 30.91 \text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil in CRFs treatments, which were $13.83\sim 14.41 \text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil lower than that of urea treatment ($P<0.05$). The CRFs decreased the rates of denitrification losses in nitrogen fertilizer by $3.45\sim 3.60$ percentage point. The N_2O emission amounts were $15.71\sim 20.45 \text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil in CRFs treatments which were $13.83\sim 14.41 \text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil higher than in urea treatment, but, the differences did not reached significant levels.

Keywords: controlled released fertilizer; urea; nitrification-denitrification; N_2O emission

农田土壤硝化和反硝化过程是氮素损失的主要途径之一。氮肥的硝化和反硝化气态损失一方面降低了氮肥利用率,另一方面形成的氮氧化物释放又是大气重要的污染源^[1-2]。Aulakh 等^[3]研究认为反硝化过程

氮素损失量最高可达 $100 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$; Hauck^[4]估计氮肥损失中有 30%是由反硝化作用造成; Ryden 等^[5]报道,施肥量高的蔬菜水浇地反硝化损失可达 $200 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。为了降低氮肥的损失,研究者针对硝化反硝化过程的影响因素进行了大量研究。其中氮肥种类决定了土壤中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的有效性,从而成为影响土壤氮素硝化-反硝化作用的重要因子^[6]。施用有机肥可增加硝化过程氮素的损失^[6],施用不同品种化肥对土壤硝化反硝化过程也有显著的影响^[7-9]。

通常认为控释肥施用后,肥料养分的供应与植物需求基本一致,可防止土壤中有效氮过量的现象,明

收稿日期:2010-01-17

基金项目:福建省自然科学基金重点项目(2006J0009);福建省自然科学基金面上项目(2008J0120);LAPC 开放课题(LAPC-KF-04-11);福建省财政专项——福建省农业科学院科技创新团队建设基金(STIF-Y01);福建省科技厅科技计划项目(2002N002)

作者简介:丁 洪(1965—),男,江西安福人,研究员,主要从事氮素生物地球化学循环研究。E-mail: hongding@china.com

显减少施用过程中肥料氮素的损失量。因此,近年来针对控释肥的研究成为肥料研究的热点。有研究表明,控释肥可以降低初期土壤中的 NO_3^-N 浓度,进而可有效减少土壤 N_2O 的释放^[10]。但目前针对控释肥对土壤硝化反硝化过程的影响以及 N_2O 排放的研究仍较少见。本研究以本课题组开发的胶粘控释肥料为试验肥料(该肥料已通过鉴定),探讨控释肥对土壤氮素硝化反硝化损失和 N_2O 排放的影响,旨在为进一步研究控释肥对农田土壤氮素迁移转化过程的影响提供参考,并为农田施肥管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自福州市北峰。土壤的基本理化性质为 pH5.47,有机质 $36.50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $2.24\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $0.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾 $27.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $232.80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $66.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $136.90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,容重 $1.24\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。土壤质地为小于 0.002 mm 粒径占 27.20%, $0.02\sim 0.002\text{ mm}$ 粒径占 43.68%, $2\sim 0.02\text{ mm}$ 粒径占 27.20%。

1.2 试验方法

称取过 2 mm 孔筛的风干土 150 g ,装入广口瓶中进行培养试验。试验包括 5 个处理:无肥对照(以 CK 表示,下同)、施尿素处理(U)、施控释肥 CRF9(CRF9)、施控释肥 CRF10(CRF10)、施控释肥 CRF28(CRF28)。各处理肥料均按照 $400\text{ }\mu\text{gN}\cdot\text{g}^{-1}$ 土加入广口瓶中,并与土壤充分混匀,然后向各瓶中加水至土壤体积含水量的 80%。用带有两根玻璃管的软木塞塞住瓶口,涂上 704 胶,两根玻璃管均接一段硅胶管,其中一根接上三通阀(培养时为通气),另一根不密封,保持瓶内外自由通气,所有培养瓶都在 $28\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温箱中好气培养。培养过程中定期称量剩余培养瓶的整个瓶重,按损失的重量来补充水分。

所有培养瓶平均分为两部分,一部分用于 N_2O 排放测定,一部分用于反硝化氮素损失的测定。 N_2O 排放试验在取样前封闭两个通气口,培养 24 h 后抽取瓶中气样,同时采集瓶中土样测定土壤质量含水量(%),铵态氮和硝态氮含量。反硝化试验在取样前先用塑料注射针筒从培养瓶中抽出 10% 的气体弃去,并充入 10% 的乙炔气体,密闭通气口,继续培养 24 h 后抽取气样。取样用注射器抽取瓶中 20 mL 气体注入 18 mL 的真空玻璃瓶中,供分析用。按一定时间间距进行破坏性采样,每次取 3 个培养瓶作为重复。

1.3 样品测试与分析方法

土壤硝氮和氨氮测定方法采用代氏合金蒸馏法^[11]。气体样品分析应用美国惠普公司产的 HP6890 气相色谱,色谱柱为填充 $80/100$ 目 porapak Q 的填充柱,柱温 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$,检测器温度 $380\text{ }^{\circ}\text{C}$,EC 检测,定量六通阀进样,进样量 1 mL ,载气为 $5\%\text{ Ar}-\text{CH}_4$,流速 $20\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

1.4 数据统计分析

试验数据统计分析采用 SPSS13.0 软件。

2 结果与分析

2.1 控释肥对土壤铵态氮和硝态氮含量的影响

从图 1 可以看出,在整个培养期间各肥料处理土壤中的 NH_4^+-N 和 NO_3^-N 含量呈现明显的动态变化。培养进行 1 d 时,尿素处理土壤的 NH_4^+-N 含量即达到最大值 $376.17\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于控释肥处理土壤($P<0.05$)。随后,尿素处理土壤 NH_4^+-N 含量逐渐降低;控释肥处理的各土壤 NH_4^+-N 含量从培养起始逐渐升高,并在培养开始后 $4\sim 8\text{ d}$ 分别达到最高值 $361.33\sim 365.63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。培养 8 d 后,各施肥处理的 NH_4^+-N 含量均呈逐渐下降趋势。整个培养过程来看,培养的前 23 d ,尿素处理土壤 NH_4^+-N 含量基本上高于控释肥处理, 23 d 后则低于控释肥处理。

各处理土壤中硝态氮含量随着培养时间延长逐渐升高。培养的前 13 d ,土壤 NO_3^-N 含量增加缓慢,所有处理间差异不明显;培养 13 d 后,各施肥处理土壤的 NO_3^-N 含量迅速增加,在培养结束时施肥处理土壤的 NO_3^-N 含量达到 $248.19\sim 259.08\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但不同的施肥处理间差异均不显著。

土壤无机氮总量($NH_4^+-N+NO_3^-N$)在培养起始阶段,尿素处理土壤的含量最高,而控释肥处理则在培养 $4\sim 8\text{ d}$ 后达到极大值。培养结束时,尿素处理的土壤无机氮总量较培养初期略有下降,而各控释肥处理的含量则仍保持起始水平。因此,控释肥施入后可能更有利于土壤有效态氮素养分的保持,减少氮肥的气态损失。

2.2 控释肥对土壤反硝化氮损失速率和 N_2O 排放速率的影响

在土壤中通入乙炔可抑制硝化作用过程中 N_2O 的产生和反硝化作用过程中 N_2O 还原为 N_2 ,因此土壤中通入乙炔所测得的 N_2O 量为反硝化作用过程中所产生的 N_2O 和 N_2 之和,代表反硝化作用所造成的氮素损失量^[12]。从图 2 可以看出,培养期间不同处理土

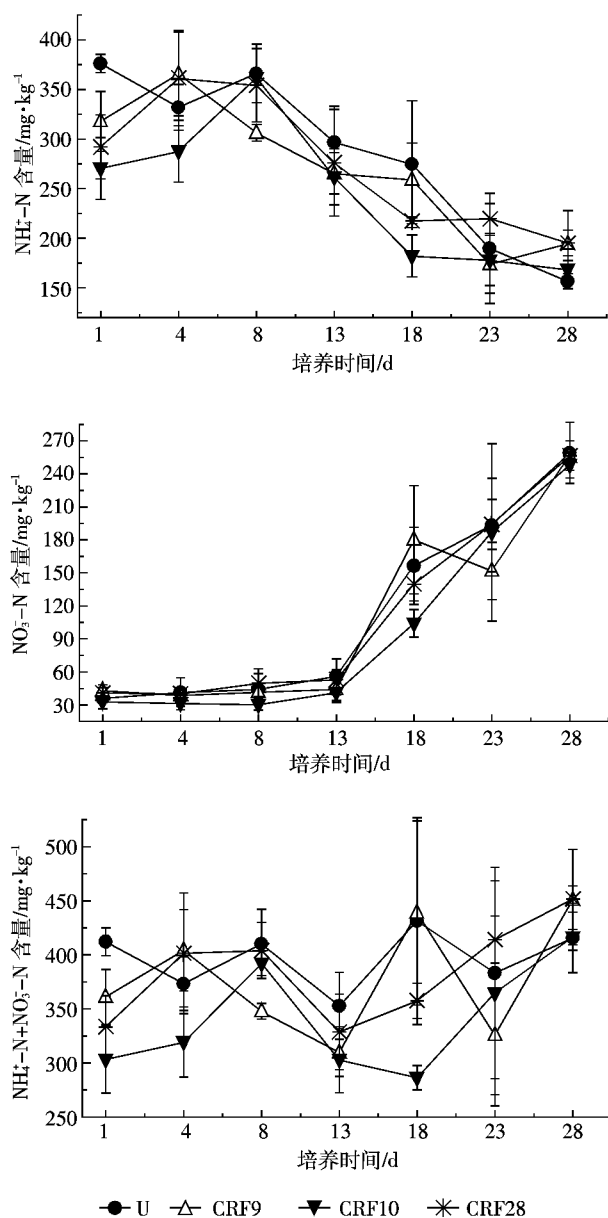


图1 不同肥料处理土壤 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和无机氮总量变化
Figure 1 Changes of NH_4^+-N , NO_3^--N and total inorganic nitrogen contents in soil under different fertilizer treatments

壤反硝化氮素损失速率的变化趋势相似。培养初始,各处理损失速率即出现一个峰值,为 $66.95\sim 98.46 \mu\text{gN}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,之后各处理的损失速率均降低,培养到第4 d降低到 $11.67\sim 19.42 \mu\text{gN}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。培养到第8 d,各处理的损失速率均再次出现一个峰值,尿素处理排放速率达到其最大值 $207.11 \mu\text{gN}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,比控释肥处理高 $118.17\sim 141.18 \mu\text{gN}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。随后,各处理的反硝化氮素损失速率快速下降,到第13 d以后,各处理的氮损失速率均呈缓慢下降趋势,其中尿素处理土壤的损失速率仍略高于控释肥处理。

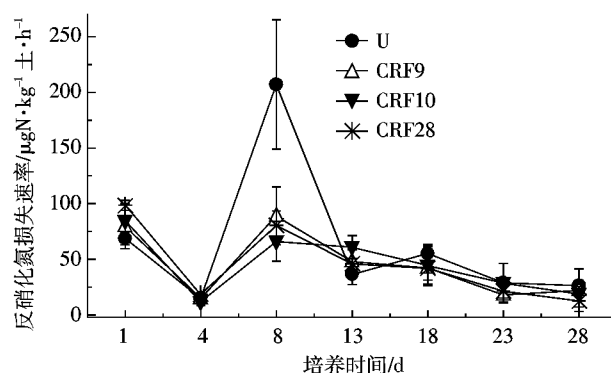


图2 不同肥料处理反硝化氮素损失速率
Figure 2 Nitrogen loss rates by denitrification under different fertilizer treatments

不同肥料处理下土壤的 N_2O 排放速率如图3所示。培养开始时,各肥料处理 N_2O 释放速率呈逐渐上升趋势,随着培养时间延长,各处理相继达到最大值,其中 CRF10 和尿素处理在培养的第13 d达到最大值,CRF9 和 CRF28 分别在培养的第18 d和23 d达到最大值。培养的前8 d,控释肥处理土壤 N_2O 释放速率低于尿素处理土壤,尤其在第4 d,控释肥处理 N_2O 释放速率仅为 $0.76\sim 2.64 \mu\text{gN}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,与不施肥处理释放速率接近(数据未列出),而施加尿素处理则达到 $12.05 \mu\text{gN}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,显著高于控释肥处理 ($P < 0.05$)。培养8 d以后,控释肥处理土壤的 N_2O 释放通量逐渐超过尿素处理,其中 CRF28 处理土壤与尿素处理达到显著差异 ($P < 0.05$)。

2.3 控释肥对土壤反硝化氮素损失量以及 N_2O 排放量的影响

经过28 d培养后,不同处理反硝化氮素累积损失量以及 N_2O 累积释放量如表1所示。尿素处理土壤

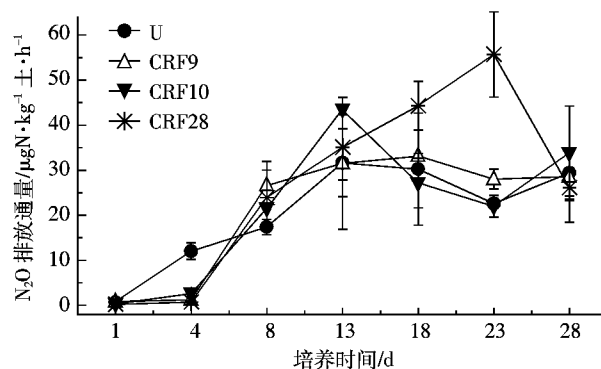


图3 不同肥料处理 N_2O 排放速率变化
Figure 3 Nitrogen loss rates by N_2O emission under different fertilizer treatments

的反硝化氮素损失量达 44.74 mgN·kg⁻¹ 土,而控释肥处理的反硝化氮素损失量为 30.33~30.91 mgN·kg⁻¹ 土,比尿素处理低 13.83~14.41 mgN·kg⁻¹ 土,差异达到显著水平($P<0.05$)。控释肥处理的氮素反硝化损失量占肥料氮素的比重较尿素低 3.45~3.60 个百分点,表明控释肥具有降低氮素的反硝化损失的作用。控释肥和尿素的施入均明显提高了土壤的 N₂O 排放量,培养 28 d 尿素处理的 N₂O 排放量为 14.85 mgN·kg⁻¹ 土,控释肥处理为 15.71~20.45 mgN·kg⁻¹ 土,比尿素处理高 0.86~5.60 mgN·kg⁻¹ 土,但差异未达到显著水平。控释肥的 N₂O 排放量占肥料氮素的百分比较尿素处理高 0.20~1.40 个百分点。

表 1 不同肥料处理土壤反硝化氮素累积损失量与 N₂O 累积排放量

Table 1 Nitrogen loss amounts by denitrification and N₂O emission under different fertilizer treatments

处理	反硝化氮 损失量/ mgN·kg ⁻¹ 土	N ₂ O 累积 排放量/ mgN·kg ⁻¹ 土	反硝化氮 损失占施肥量 百分比/%	N ₂ O 排放量 占施肥量 百分比/%
U	44.74 a	14.85 a	4.88	3.12
CRF9	30.33 b	15.88 a	1.28	3.37
CRF10	30.91 b	15.71 a	1.43	3.33
CRF28	30.33 b	20.45 a	1.28	4.52

注:表中同列内小写字母 a、b、c 为 5% 显著水平。

Note: The small letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level.

2.4 土壤铵态氮和硝态氮含量变化与反硝化氮素损失和 N₂O 排放的相关关系

由表 2 可见,土壤中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的变化与土壤反硝化氮素损失和 N₂O 排放速率没有显著相关关系。由于本实验在封闭的培养条件下,减少了土壤氮素的其他迁移损失途径;另外,土壤反硝化氮素损失速率和 N₂O 排放速率受土壤的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N

表 2 不同处理反硝化氮素损失和 N₂O 排放与土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和总无机氮含量相关性

Table 2 Correlation of nitrogen loss rates by denitrification and N₂O emission rates with NH₄⁺-N, NO₃⁻-N and total inorganic N contents of soil under different fertilizer treatments

相关系数	反硝化氮损失速率				N ₂ O 排放速率			
	U	CRF9	CRF10	CRF28	U	CRF9	CRF10	CRF28
NH ₄ ⁺ -N	0.52	0.39	0.47	0.42	-0.65	-0.71	-0.34	-0.66
NO ₃ ⁻ -N	-0.39	-0.51	-0.57	-0.63	0.59	0.53	0.40	0.57
总无机氮	0.35	-0.34	-0.33	-0.60	-0.09	-0.03	0.21	0.13

注: * $P<0.05$; $N=7$ 。

含量共同影响, 这些因素可能会掩盖土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的变化与硝化反硝化过程之间的相关关系。当在田间条件下它们之间的相关关系如何,还有待进一步研究。

3 讨论

施肥土壤的各形态氮素含量变化一方面与氮素本身的循环过程有关,更重要的是受肥料氮素释放的影响。本研究中尿素和控释肥的氮素释放过程均为先通过水解转化为 NH₄⁺-N,因此各肥料处理 NH₄⁺-N 含量培养初期较高,而后,随着硝化作用的进行含量逐渐降低。由于尿素养分释放较快,造成了培养初期尿素处理的土壤中 NH₄⁺-N 含量迅速升高,并在培养 1 d 时即达到最大值,而控释肥处理 NH₄⁺-N 含量峰值出现时间较晚,表明其对氮素释放具有控制作用,并延后了养分峰值时间。此外,在培养后期,尿素处理 NH₄⁺-N 含量下降较快并逐渐低于控释肥处理,主要与尿素养分释放快、后期氮素供给能力下降有关。

本研究表明控释肥和尿素处理土壤的 NO₃⁻-N 含量变化的差异较小。同样,李方敏等^[10]在控释肥料对稻田氧化亚氮排放的影响研究中也发现,控释肥和尿素处理的土壤水中的 NO₃⁻-N 含量差异很小。唐拴虎等^[13]对控释肥和水稻专用肥的对比研究结果也表明,在水稻生长前期和中期不同施肥处理 NO₃⁻-N 含量差异不大。这可能与 NO₃⁻-N 含量同时受到硝化和反硝化两个过程影响有关。尿素施加促进硝化活性增加土壤 NO₃⁻-N 含量,而同时本研究结果中尿素处理的反硝化氮素损失速率显著高于控释肥处理,较高的反硝化速率又会消耗更多的 NO₃⁻-N,因而表现为其 NO₃⁻-N 的水平与控释肥差异不显著。

施入肥料后可增加土壤 N₂O 排放的潜力^[14],但不同肥料对土壤硝化-反硝化氮素损失的影响不同。本研究中尿素处理的土壤反硝化氮素损失所占肥料氮素比重要高于其 N₂O 排放损失所占的比重,控释肥处理则与此相反,这与不同肥料氮素释放机制的差异有关。当土壤施用尿素后,肥料快速释放出的 NH₄⁺-N 为硝化作用提供了充足的底物,使土壤中硝化作用变得很活跃^[15],进一步又为反硝化过程提供了大量底物,从而促进反硝化过程的进行^[16],这也可能是造成培养 8 d 时尿素处理反硝化氮素损失速率出现一个明显的高峰的原因。但这一峰值过后,尿素处理土壤的反硝化速率迅速降低,这可能是因为是在容器培养的条件下,除 NH₃ 挥发损失外,土壤中氮素不存在植物吸收

和径流损失等去向,尿素处理养分释放较快,使土壤的 NH_4^+-N 含量迅速提高,可能造成较高的 NH_3 挥发损失,进而又影响土壤中的硝化-反硝化活性。此外,这一过程也会对土壤最终的 N_2O 排放量造成影响。本结果表明尿素处理 N_2O 排放量略低于控释肥处理,李芳敏等^[10]对控释肥 N_2O 排放损失的研究,也发现在基肥施入后的 1~25 d,控释肥处理的 N_2O 可能高于尿素处理,并指出这与肥料养分的释放机制不同有关。

4 结论

(1)本研究结果表明控释肥具有一定控制氮素释放的作用,培养的前 23 d 内,控释肥处理土壤 NH_4^+-N 含量低于尿素处理,培养 23 d 后则高于尿素处理;氮素释放的快慢对土壤氮素硝化反硝化活性与 N_2O 排放产生影响。

(2)控释肥显著降低了土壤的反硝化氮素损失量。控释肥处理的土壤反硝化氮损失量为 $30.33\sim 30.91\text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ 土}$,比尿素处理土壤低 $13.83\sim 14.41\text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ 土}$,差异达到显著水平,控释肥的氮素反硝化损失量占肥料氮素的比重比尿素低 3.45~3.60 个百分点。

(3)控释肥处理土壤 N_2O 累积排放量为 $15.71\sim 20.45\text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ 土}$,比施加尿素的土壤高 $0.86\sim 5.60\text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ 土}$,但差异不显著。

参考文献:

- [1] Ruan W R, Johnson C V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91:357-363.
- [2] Pérez T, Trumbore S E, Tyler S C, et al. Identifying the agricultural imprint on the global N_2O budget using stable isotopes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106:9869-9878.
- [3] Aulakh M S, Doran J W, Mosier A R. Soil denitrification-significance, measurement, and effect of management[J]. *Advances in Soil Science*, 1992, 18:1-57.
- [4] Hauck R D. Nitrogen fertilizer effects on nitrogen cycle processes[C]// Clark F E, Rosswall T, eds. *Terrestrial N Cycle*. Stockholm: Ecol. Bull, 1981. 33:551-562.
- [5] Ryden J C, Lund L J. Nature and extent of directly measured denitrification losses from some irrigated vegetable crop production units[J]. *Fertilizer Research*, 1995, 42:139-148.
- [6] Sanchez L, Diez J A, Vallejo A, et al. Denitrification losses from irrigated crops in central Spain[J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, 33(9):1201-1209.
- [7] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5):913-918.
DONG Yu-hong, OUYANG-Zhu, LI Yun-sheng, et al. Influence of fertilization and environmental factors on CO_2 and N_2O fluxes from agricultural soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5):913-918.
- [8] 丁洪, 王跃思, 李卫华. 玉米-潮土系统中不同氮肥品种的反硝化损失与 N_2O 排放量[J]. 中国农业科学, 2004, 37(12):1886-1891.
DING Hong, WANG Yue-si, LI Wei-hua. Denitrification losses and N_2O emission from different nitrogen fertilizers applied to maize-fluvo-aquic soil system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12):1886-1891.
- [9] 梁东丽, 方日尧, 李生秀, 等. 硝态氮、铵态氮肥对旱地土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1):67-72.
LIANG Dong-li, FANG Ri-yao, LI Sheng-xiu, et al. Effects of nitrogen types on N_2O emissions of dry-land soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(1):67-72.
- [10] 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 N_2O emission from paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11):2170-2174.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 1999:156-159.
LU Ru-kun. Analytical methods on agro-chemical properties of soil[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 1999:156-159.
- [12] Mosier A R. Acetylene inhibition of ammonium oxidation in soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1980, 12:443-444.
- [13] 唐桂虎, 陈建生, 徐培智, 等. 控释肥料氮素释放与水稻吸收动态研究[J]. 土壤通报, 2004, 25(2):186-190.
TANG Shuan-hu, CHEN Jian-sheng, XU Pei-zhi, et al. Nitrogen release and dynamic of controlled release fertilizer studied with rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 25(2):186-190.
- [14] Stehfest E, Bouwman L. N_2O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74:207-228.
- [15] Weiguo Cheng, Haruo Tsurutaa, Guanxiong Chen, et al. N_2O and NO production in various Chinese agricultural soils by nitrification[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(6):953-963.
- [16] Bandibas J, Vermoesen A, De Groot C J, et al. The effect of different moisture regimes and soil characteristics on nitrous oxide emission and consumption by different soils[J]. *Soil Science*, 1994, 158:106-114.