

东北黑土区不同作物系统氮肥反硝化损失与 N₂O 排放量

丁 洪^{1,2}, 王跃思²

(1. 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建 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: 在田间条件下, 应用原状土柱培养 - 乙炔抑制法测定不同作物系统中氮肥反硝化损失和 N₂O 排放量。结果表明, 在东北黑土旱作系统中土壤氮素反硝化损失量很低: 不施肥条件下, 小麦、玉米和大豆地反硝化损失量分别为 0.42, 0.48 和 0.79 kgN · hm⁻²; 施肥条件下为 0.84, 0.83 和 0.64 kgN · hm⁻², 作物间均无显著差异; 氮素损失率仅占施肥量的 0.61%、0.26% 和 -0.58%。小麦、玉米和大豆地 N₂O 排放量在不施肥条件下作物间无显著差异, 为 0.74, 0.41 和 0.48 kgN · hm⁻²; 施肥条件下差异极显著, 排放量为 0.72, 1.37 和 0.44 kgN · hm⁻²; 排放量分别占施氮量的 -0.02%、0.69% 和 -0.14%。在玉米作物上施肥量较大, 极显著地增加 N₂O 排放量; 在大豆作物上施肥量较低, 表现出极显著地降低 N₂O 排放量; 小麦作物上施肥量也低, 处理间 N₂O 排放量差异不显著。

关键词: 黑土; 小麦; 玉米; 大豆; 反硝化; 氧化亚氮

中图分类号: S131.1 文献标识码: A 文章编号: 1672 - 2043(2004)02 - 0323 - 04

Denitrification Losses of Nitrogen Fertilizer and N₂O Emission from Different Crop - Black Soil Systems in North - east China

DING Hong^{1,2}, WANG Yue-si²

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

Abstract: A field experiment was conducted to measure denitrification losses of nitrogen fertilizer and emission amounts of N₂O from wheat, maize and soybean - black soil systems in North - east China through the intact soil core incubation - acetylene inhibition technique. The results showed that denitrification loss amounts were low in the systems, which were 0.42, 0.48 and 0.79 kg N · hm⁻² respectively when no fertilizer applied, and 0.84, 0.83 and 0.64 kg N · hm⁻² when fertilizer applied, which accounted for 0.61%, 0.26% and -0.58% of fertilizer amount applied. No significant differences appeared in three crop - soil systems. There was no significant difference in the emission amounts of N₂O from the three crop - soil systems with 0.74, 0.41 and 0.48 kg · hm⁻² respectively when no fertilizer applied; while, when fertilizer applied, there existed significant differences among the systems with the emission amounts of N₂O 0.72, 1.37 and 0.44 kg · hm⁻² which accounted for -0.02%, 0.69% and -0.14% of nitrogen fertilizer applied. N₂O emission amount very significantly increased with higher quantity of nitrogen fertilizer applied in maize - soil system and significantly decreased with lower quantity of nitrogen fertilizer in soybean - soil system. No significant difference in N₂O emission amount was found in wheat - soil system.

Keywords: black soil; wheat; maize; soybean; denitrification; nitrous oxide

目前, 我国氮肥利用率还很低, 大约在 30% ~ 35%, 损失率平均达 45%^[1]。氮肥施入农田后通过氨挥发、硝化 - 反硝化气态损失和硝酸盐淋失等途径损失, 但以哪一条途径为主目前尚无一致的看法, 有些

方面还存在争议。

对于氮肥的硝化 - 反硝化气态损失量究竟有多大, 在许多报道中是众说不一。Aulakh 等^[2]认为, 反硝化损失量为微量 ~ 100 kgN · hm⁻²; Hauck^[3]估计, 氮

收稿日期: 2003 - 07 - 22

基金项目: 国家自然科学基金(49901010); 中科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开放课题(LAPC -

KF - 2003 - 02)资助

作者简介: 丁 洪(1965—), 男, 研究员, 博士后, 主要研究方向为新型肥料和氮素生物地球化学循环。E - mail: hongding@china.com

肥损失中有 30% 是缘于反硝化作用; Ryden 等^[4]报道, 施肥量高的蔬菜水浇地反硝化损失可达 200 kgN · hm⁻² · a⁻¹; 而 Groffman^[5] 在评述中认为, 在温暖地区和大多数热带农业系统中, 反硝化作用不可能是氮肥损失的重要途径。国内在 20 世纪 80 年代末开始这方面的研究, 但在田间直接测定的工作仍不多, 近年来有几篇有关华北平原潮土和褐土上测定结果的报道^[7,8], 测得的反硝化损失量均较低。

硝化反硝化作用还产生温室气体 N₂O 排放, 对全球气温升高有很大影响, 同时 N₂O 破坏大气臭氧层, 使更多的紫外线辐射到地面, 对生物产生伤害^[8]。土壤硝化反硝化过程释放的 N₂O 是全球 N₂O 的主要源, 约占生物圈释放到大气中 N₂O 总量的 90%^[9]; 化学氮肥的使用每年产生约 1.5 × 10⁶t N₂O - N, 占人类活动向大气输入 N₂O - N 量的 44% 和每年向大气输入 N₂O 总量的 13%^[10]。我国在 20 世纪 90 年代以来开展了一些测定工作, 但对有些重要的农业生态系统还缺乏研究。东北平原是我国第二大平原, 也是重要的农业生产区之一, 黑土又是该区域的主要土壤类型, 但迄今为止, 对该土壤氮素的硝化反硝化损失和 N₂O 排放量还鲜有研究报道。

1 材料和方法

1.1 试验地点和作物

试验地点选择在黑龙江省中国科学院海伦农业生态实验站, 经纬度 126°55'E, 47°27'N。试验小麦品种龙麦 19, 玉米品种海玉 6 号, 大豆品种合丰 25。试验土壤为草甸型中厚层黑土, 有机质 4.82%, 全氮 0.26%, 速效磷 64.58 mg · kg⁻¹、速效钾 228.9 mg · kg⁻¹、pH6.3。

1.2 试验设计

3 种作物播种和施肥均按当地习惯。小麦在平整土地后条播条施, 行距 30 cm; 玉米和大豆作垄后开沟施肥、播种, 垄宽 70 cm, 玉米每垄单行播种, 行距 70 cm, 株距 30 cm; 大豆每垄双行播种, 2 行距离 12 cm, 株距 10 cm。小区面积均为 42 m², 设施肥和不施肥 2 个处理, 3 次重复。小麦 4 月 9 日播种, 肥料全作基肥, 尿素 110 kg · hm⁻², 磷二铵 100 kg · hm⁻²; 玉米 5 月 10 日播种, 肥料分基肥和两次追肥施用, 基肥施尿素 16 kg · hm⁻², 磷二铵 150 kg · hm⁻², 第一次追肥 6 月 15 日, 尿素 150 kg · hm⁻², 第二次追肥 7 月 5 日, 尿素 75 kg · hm⁻²; 大豆 5 月 11 日播种, 肥料作基肥一次施入, 磷二铵 150 kg · hm⁻², 硫酸钾 54 kg ·

hm⁻²。

1.3 田间气样采集和分析测试方法

试验采用原状土柱培养 - 乙炔抑制法, 大量试验表明该方法适用于旱地土壤测定反硝化作用^[11], 也可用于测定 N₂O 排放^[12]。具体做法为: 采用 PVC 材料制作成 12.5 cm × 15 cm 的圆形培养桶, 底部密封, 桶侧面和桶盖各有一抽气或充气孔, 用橡皮塞塞住, 桶与盖之间垫上一密封圈, 用螺丝固定使桶与盖密封。每个桶中放入 8 个用内径 3.2 cm 的不锈钢土钻取出 15 cm 长的原状土柱, 密封后埋在地里 24 h。然后用注射器抽取 20 mL 气体注入 18 mL 的真空玻璃瓶中, 带回室内进行分析。

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 °C, 检测器温度 380 °C, ECD 检测, 定量六通阀进样, 进样量 1 mL, 载气为 5% Ar - CH₄, 流速 20 mL · min⁻¹。气体重量计算公式: $N_2O = M \times 1.25 \times 10^{-9} \times (V_1 - V_2) / S \times 10$ (kgN · hm⁻²), M 为测定的 N₂O 浓度, V_1 为桶的体积, V_2 为土壤体积, S 为土柱表面积。

2 结果与分析

2.1 不同作物系统中 N₂O 排放通量及其季节变化

小麦、玉米和大豆整个生育期 N₂O 排放通量都有明显的时间变化, 见图 1、图 2 和图 3。未施肥条件下, N₂O 排放通量变幅分别为 0.001 ~ 0.07 kg · hm⁻² · d⁻¹, 0.001 ~ 0.006 kg · hm⁻² · d⁻¹ 和 0.001 ~ 0.01 kg · hm⁻² · d⁻¹; 施肥条件下变幅分别为 0.001 ~ 0.029 kg · hm⁻² · d⁻¹, 0.001 ~ 0.025 kg · hm⁻² · d⁻¹ 和 0.001 ~ 0.006 kg · hm⁻² · d⁻¹。3 种作物中, 施肥与未施肥处理 N₂O 排放通量变化趋势都一致。

从排放峰出现的时间上看, 小麦地的 N₂O 排放峰出现在施肥后几天和 4 月 23 日—5 月 19 日; 玉米地出现在 5 月 29 日—9 月 1 日, 排放持续的时间较长; 大豆地在 6 月 14 日—8 月 4 日之间。从作物间排放通量差异上看, 小麦地明显高于玉米地和大豆地, 玉米地略高于大豆地。从施肥处理间差异上看, 小麦地未施肥处理的 N₂O 排放通量比施肥处理还高。玉米地未施肥处理 N₂O 排放通量很低, 施肥处理明显高于未施肥处理。大豆地施肥与未施肥处理的 N₂O 排放通量差异不大。本试验表明, 同一区域不同作物系统中 N₂O 排放时间和排放通量是有差异的。

2.2 不同作物系统反硝化作用的差异及其季节变化

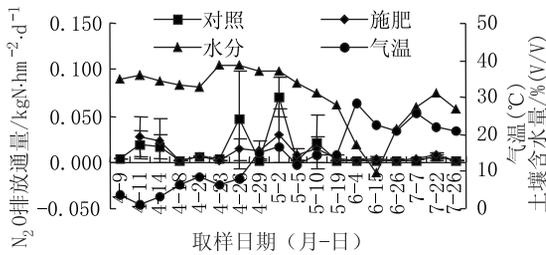
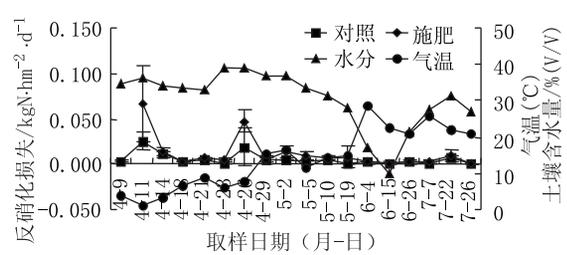
图1 小麦地中N₂O排放通量的动态变化Figure 1 Temporal variation of N₂O flux from wheat field

图4 小麦地反硝化作用的动态变化

Figure 4 Temporal variation of denitrification in wheat field

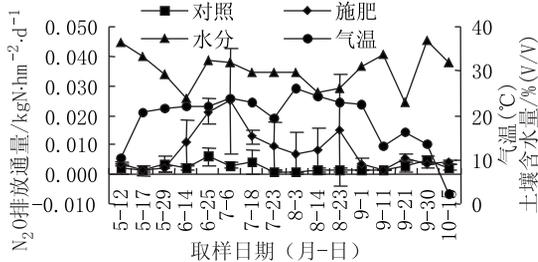
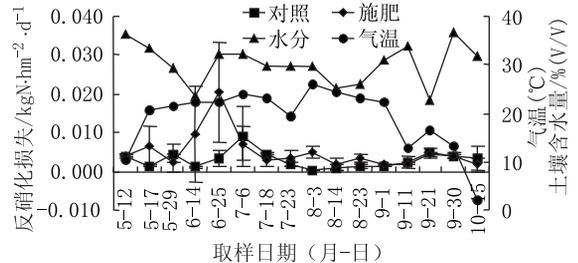
图2 玉米地 N₂O 排放通量的动态变化Figure 2 Temporal variation of N₂O flux from maize field

图5 玉米地反硝化作用的动态变化

Figure 5 Temporal variation of denitrification in maize field

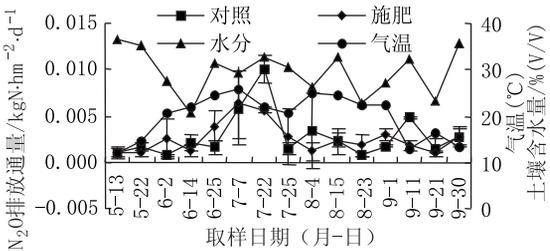
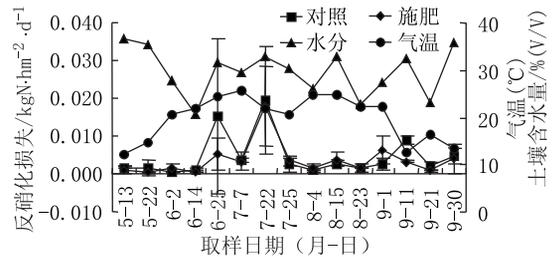
图3 大豆地 N₂O 排放通量的动态变化Figure 3 Temporal variation of N₂O flux from soybean field

图6 大豆地反硝化作用的动态变化

Figure 6 Temporal variation of denitrification in soybean field

小麦、玉米和大豆地中反硝化作用也有明显的时间变化,见图4、图5和图6。未施肥处理,反硝化损失量变幅分别为 $0.001 \sim 0.025 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, $0 \sim 0.009 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.001 \sim 0.019 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;施肥处理的变幅分别为 $0.001 \sim 0.066 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, $0.001 \sim 0.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0 \sim 0.018 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

小麦地2次出现较强的反硝化活性,即在施肥后几天和4月23日—4月29日;玉米地出现1次,在5月29日—7月18日;大豆地出现两次,在6月14日—7月25日之间。其活性表现为小麦地明显高于玉米地和大豆地。不同作物施肥处理间的活性也有差异,小麦地和玉米地施肥处理明显高于未施肥处理,大豆地施肥与未施肥处理间的差异不大。可见,同一区域不同作物系统中反硝化活性也是有差异的。

2.3 土壤性状和气温等因素与反硝化作用和N₂O排放的相关关系

土壤硝化反硝化活性和N₂O排放受诸多因子的影响,如土壤水分、质地、pH、有机质含量、含氮量、温度和微生物群体量与活性等。表1数据显示,小麦、玉米和大豆作物上N₂O排放通量,除小麦施肥处理表现出与土壤水分和NO₃⁻含量显著、极显著相关外,其它都无明显相关性。反硝化活性在小麦上与温度显著或极显著负相关,在玉米未施肥处理时与NO₃⁻含量极显著相关,其他的也都无显著相关性。可以认为,在诸多影响因子中哪一种为主要限制因子,在不同生态地区、同一地区不同季节作物甚至同一季节不同作物上是不同的,在大多数情况下是受多个因子的综合影响。

2.4 不同作物系统中氮素反硝化损失量与N₂O排放量

在东北黑土旱作系统中土壤氮素反硝化损失量很低(见表2)。不施肥条件下,小麦、玉米和大豆反硝化损失量分别为 $0.42, 0.48$ 和 $0.79 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2}$;施肥条件下分别为 $0.84, 0.83$ 和 $0.64 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮肥反

表 1 土壤水分、含氮量和气温与反硝化活性和 N₂O 排放通量的相关性

Table 1 Correlations among soil water content, nitrogen content, air temperature, denitrification activities and N₂O flux in soil - crop systems

作物	项目	N ₂ O 排放通量		反硝化活性	
		对照	施肥	对照	施肥
小麦		<i>n</i> = 18	<i>N</i> = 17	<i>n</i> = 18	<i>N</i> = 17
	土壤水分	0.395	0.498*	0.431	0.436
	气温	-0.183	-0.475	-0.542*	-0.561**
	NH ₄ ⁺ 含量	-0.096	0.473	-0.264	0.400
	NO ₃ ⁻ 含量	0.304	0.615**	0.266	0.290
玉米		<i>n</i> = 16	<i>N</i> = 16	<i>n</i> = 16	<i>N</i> = 16
	土壤水分	0.272	-0.190	0.239	0.034
	气温	-0.075	0.469	-0.14	0.253
	NH ₄ ⁺ 含量	-0.027	0.394	0.117	0.324
	NO ₃ ⁻ 含量	0.386	0.432	0.753**	0.045
大豆		<i>n</i> = 15	<i>N</i> = 15	<i>n</i> = 15	<i>N</i> = 15
	土壤水分	0.204	0.186	0.325	0.264
	气温	0.150	0.470	0.102	0.220
	NH ₄ ⁺ 含量	-0.055	0.179	0.147	-0.183
	NO ₃ ⁻ 含量	0.024	0.290	-0.146	-0.218

注: * *P* < 0.05, ** *P* < 0.01

表 2 东北黑土上不同作物系统氮素反硝化损失与 N₂O 排放量(kgN · hm⁻²)

Table 2 Denitrification losses of nitrogen and N₂O emission from different soil - crop systems in North - east China(kgN · hm⁻²)

作物	处理	N ₂ O 排放量	反硝化损失	处理	作物	N ₂ O 排放量	占施氮量%	反硝化损失	氮肥损失率%
小麦	对照	0.738aA	0.424aA	对照	小麦	0.738aA		0.424aA	
	施肥	0.722aA	0.844aA		玉米	0.407aA		0.479aA	
玉米	对照	0.407bB	0.479bA	施肥	大豆	0.479aA		0.793aA	
	施肥	1.366aA	0.824aA		小麦	0.722bB	-0.02	0.844aA	0.61
大豆	对照	0.479aA	0.793aA	玉米	1.366aA	0.69	0.834aA	0.26	
	施肥	0.441bB	0.636bB	大豆	0.441bB	-0.14	0.636aA	-0.58	

显著。N₂O 排放增量分别占施氮量的 -0.02% , 0.69% 和 -0.14%。该地区在玉米作物上施肥量较大, 施肥增加了 N₂O 排放量; 小麦和大豆作物上施肥量小, N₂O 排放量比不施肥时还略低。

参考文献:

- [1] 李庆远, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1997. 38 - 51.
- [2] 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.
- [3] Hauck R D. Nitrogen fertilizer effects on nitrogen cycle processes[A]. In: Clark F E, Rosswall T, eds. *Terrestrial N Cycle*. Ecol. Bull. Stockholm. 1981, 33: 551 - 562.
- [4] Ryden J C, Lund L J. Nature and extent of directly measured denitrification losses from some irrigated vegetable crop production units[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1980, 44: 505.
- [5] Groffman P M. A conceptual assessment of the importance of denitrification as a source of soil nitrogen loss in tropical agro - ecosystems[J]. *Fert Res*, 1995, 42: 139 - 148.

硝化损失率仅占施肥量的 0.61% , 0.26% 和 -0.58% , 作物间无显著差异。但不同作物的处理间出现显著差异, 玉米施肥处理极显著高于不施肥处理, 大豆则相反, 小麦无显著差异。

N₂O 排放量在不施肥条件下作物间无显著差异, 排放量为 0.41 ~ 1.74 kgN · hm⁻²; 施肥条件下差异极显著, 排放量为 0.44 ~ 1.37 kgN · hm⁻², 玉米极显著高于小麦和大豆; 其 N₂O 排放量分别占施氮量的 0.69%、-0.02% 和 -0.14%。在玉米作物上施肥量较大, 极显著地增加 N₂O 排放量; 在大豆作物上施肥量较低, 表现出极显著地降低 N₂O 排放量; 小麦作物上施肥量也较低, 各处理间 N₂O 排放量差异不显著。

3 结论

(1) 在东北黑土区小麦、玉米和大豆作物系统中氮肥反硝化损失量很低, 仅占施肥量的 0.61% , 0.26% 和 -0.58% , 不同作物系统间无显著差异。

(2) 不施肥条件下, 小麦、玉米和大豆作物系统间 N₂O 排放量无显著差异; 施肥条件下作物间差异极

- [6] 丁 洪, 蔡贵信, 王跃思, 等. 玉米 - 潮土系统中氮肥硝化反硝化损失和 N₂O 排放[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(4): 416 - 421.
- [7] 张玉铭, 董文旭, 曾江海, 等. 玉米地土壤反硝化速率与 N₂O 排放通量的动态变化[J]. *中国生态农业学报*, 2001, 9(4): 70 - 72.
- [8] IPCC Report. Estimated sources and sinks of nitrous oxide. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- [9] Bouwman A F. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere[A]. In: Bouwman A F(ed) *Soil and the Greenhouse Effect*[C]. Wiley, New York, 1990. pp61 - 127.
- [10] CAST. Preparing US agriculture for global climate change. Task Force Report no. 119. Council for Agricultural Science and Technology. Ames. Iowa, 1992.
- [11] Mulakh 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.
- [12] 丁 洪, 蔡贵信, 王跃思, 等. 华北平原不同作物 - 潮土系统中 N₂O 排放量的测定[J]. *农业环境保护*, 2001, 20(1): 7 - 9, 30.

致谢: 田间采样得到赵全同志的帮助, 王德禄助研帮助分析土壤样品, 项虹艳硕士协助数据统计分析, 谨此表示感谢。