

# 有机无机氮肥配施对茼蒿土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响<sup>①</sup>

汤桂容<sup>1,2</sup>, 周旋<sup>3</sup>, 田昌<sup>1</sup>, 彭辉辉<sup>2</sup>, 张玉平<sup>1</sup>, 荣湘民<sup>1\*</sup>

(1 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2 长沙环境保护职业技术学院, 长沙 410004;

3 湖南省农业科学院土壤肥料研究所, 长沙 410125)

**摘要:**采用静态箱-气相色谱法研究不同种类有机无机氮肥配合施用对盆栽茼蒿土壤 N<sub>2</sub>O 排放规律及排放量的影响。试验设置不施肥(CK)、不施氮肥(PK)、施纯化肥(NPK)、有机无机肥配施 1(20% 猪粪氮 + 80% 化肥氮, NPKM1)、有机无机肥配施 2(20% 沼渣沼液氮 + 80% 化肥氮, NPKM2)和有机无机肥配施 3(20% 猪粪堆肥氮 + 80% 化肥氮, NPKM3)共 6 个处理。结果表明:茼蒿生育期各处理施肥后土壤 N<sub>2</sub>O 排放出现多个峰值, 出峰时间和大小不一; 累积排放量随着生育期的进程逐渐增加, 处理间差异更为明显。茼蒿生育期各处理土壤 N<sub>2</sub>O 平均排放通量及累积排放量范围分别为 0.10 ~ 0.25 mg/(m<sup>2</sup>·h) 和 1.37 ~ 3.42 kg/hm<sup>2</sup>, 大小均表现为 NPK>NPKM2>PK>NPKM1>NPKM3>CK。土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数范围为 0.13% ~ 0.68%, 大小表现为 NPK>NPKM2>NPKM1>NPKM3。与 NPK 处理相比, NPKM1、NPKM2 和 NPKM3 处理茼蒿土壤 N<sub>2</sub>O 累积排放量均分别降低 48.08%、25.75% 和 48.30%, 产量分别增加 48.66%、22.13% 和 53.76%。总之, 施用纯化肥会促进菜地土壤 N<sub>2</sub>O 的排放, 而不同种类有机无机氮肥配施能有效减少 N<sub>2</sub>O 排放且提高作物产量, 以猪粪类配施效果最佳。因此, 有机无机配施是菜地 N<sub>2</sub>O 减排、降低蔬菜种植中氮素损失的重要途径。

**关键词:**有机无机氮肥配施; 茼蒿; 氧化亚氮; 排放特征

中图分类号: S153.6; S344.1 文献标识码: A

氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)是一种受人类活动影响较大的温室气体, 其增温效应是 CO<sub>2</sub> 的 296 倍 ~ 310 倍, 能在大气中滞留较长时间, 参与大气中的光化学反应, 破坏臭氧层<sup>[1]</sup>。氮(N)肥在农田中的大量投入是大气 N<sub>2</sub>O 浓度增长的最主要因素<sup>[2]</sup>。我国蔬菜种植面积逐年增加, 2010 年增加到 1.84 × 10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup>, 占全部作物种植面积的 11.6%。菜地土壤施肥量高、施肥次数多, 且肥水同期, 是重要的 N<sub>2</sub>O 排放源<sup>[3-5]</sup>。菜地单季投入氮肥量可达 N 1 000 kg/hm<sup>2</sup> 或更高, 京郊菜地的氮肥用量是粮田的 3 倍 ~ 4 倍<sup>[6]</sup>, 保护地蔬菜肥料用量是大田作物的 4 倍 ~ 5 倍<sup>[7-8]</sup>。土壤高氮含量为 N<sub>2</sub>O 的生成和排放创造有利条件<sup>[9]</sup>。此外, 设施菜田不仅受自然因素如气温、光照及土壤条件等影响, 而且人为因素如耕作、施肥及灌溉等效应更加直接和强烈, 导致 N<sub>2</sub>O 排放存在明显的时空变异<sup>[10]</sup>。

近年来, 规模化畜禽养殖粪便的集中排放, 给养殖场周边的环境造成巨大压力<sup>[11]</sup>。随着沼气工程发展步伐的加快, 养殖场畜禽污水经沼气工程处理后产生

的大量沼渣、沼液又成为新的污染源, 这使废弃物再利用与净化技术研究显得更加迫切<sup>[12]</sup>。目前, 有机无机肥料配合施用是设施菜田较为常见的施肥方式, 可协调养分平衡供应, 满足作物整个生育期对养分的需求, 同时减少化肥的用量。茼蒿(*Lactuca sativa* L.) 具有生长周期相对较短、病虫害较少、经济产值较高等特点, 是湖南省主要种植的蔬菜种类之一。Xiong 等<sup>[13]</sup>研究发现, 南京郊区蔬菜地一年 5 茬蔬菜 N<sub>2</sub>O 平均排放系数为 0.73%, 茼蒿当茬高达 2.2%。目前, 已有设施菜田 N<sub>2</sub>O 排放的研究主要集中在肥料用量上<sup>[14-15]</sup>, 而关于不同来源有机肥与化肥配施对菜地土壤温室气体排放影响的研究鲜有报道<sup>[16]</sup>。本文采用盆栽试验, 开展不同有机无机肥(猪粪、猪粪堆肥及沼渣沼液与化肥)配施对菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放影响的研究, 探讨不同有机无机配施条件下, 菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放规律和排放量的差异, 以及 N<sub>2</sub>O 排放系数之间的关系, 为菜地土壤的合理培肥、温室气体减排和高产增效提供科学理论依据。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800500)和湖南省重点研发计划项目(2016NK2112)资助。

\* 通讯作者(rongxm2005@126.com)

作者简介: 汤桂容(1978—), 女, 湖南攸县人, 博士研究生, 讲师, 主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: zhouxuan\_123@126.com

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 供试材料

供试土壤采自湖南省长沙市长沙县榔梨镇大元村(28°11'0.72" N, 113°06'23.79" E)蔬菜基地的耕作层(0~20 cm)。该地属于亚热带大陆性季风气候,年平均气温为 17.2℃,年降雨量为 1 360 mm,为紫色菜园土。土样采集后风干,挑去肉眼可见的细根和石块后过 5 mm 筛备用。土壤基本理化性质为:土壤容重 1.11 g/cm<sup>3</sup>,pH 5.18,有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 14.66、2.30、0.76、13.91 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 123.62、51.10、224.75 mg/kg。供试莴苣品种为“四季白尖叶”,由四川种都种业有限公司提供。供试氮肥为尿素(含 N 460 g/kg),钾肥为氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 600 g/kg),磷肥为钙镁磷肥(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 g/kg)。供试有机肥中猪粪、沼渣沼液从农户家收集,猪粪堆肥自制。供试有机肥的营养含量见表 1。

表 1 供试有机肥养分含量(g/kg)

Table 1 Nutrient contents of organic fertilizers tested

肥料种类	全氮	全磷	全钾
猪粪	9.60	7.24	6.15
沼渣沼液	0.70	0.09	0.32
猪粪堆肥	12.00	14.65	10.42

### 1.2 试验设计

本试验在湖南农业大学盆栽试验基地进行。试验共设置 6 个处理,分别为:不施肥处理(CK)、不施氮肥处理(PK)、施纯化肥处理(NPK)、有机无机肥配施处理 1(20% 猪粪氮 + 80% 化肥氮, NPKM1)、有机无机肥配施处理 2(20% 沼渣沼液氮 + 80% 化肥氮, NPKM2)、有机无机肥配施处理 3(20% 猪粪堆肥氮 + 80% 化肥氮, NPKM3)。各处理随机区组排列,重复 6 次。试验用盆钵高为 34 cm,内圆直径为 33 cm,装土 6.25 kg。所有施肥处理氮、磷、钾用量相等, N 300 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 220 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 220 kg/hm<sup>2</sup>。有机肥和磷肥全作基肥一次性施用,氮、钾肥 60% 作基肥,40% 作追肥。每盆种植 1 株莴苣。2013 年 9 月 2 日播种,10 月 1 日移栽,10 月 12 日追肥,11 月 23 日收获计产。

### 1.3 温室气体采集和测定

采用密闭箱-气相色谱法采集和测定土壤 N<sub>2</sub>O 排放。密闭箱箱体呈圆柱状,直径 30 cm,高 60 cm,由气体收集箱和底座两部分组成<sup>[17]</sup>。采样时间为上午 8:00—11:00,以此时间段代表全天 N<sub>2</sub>O 排放通量平均值。移栽、翻耕、施肥后第 1、2、3、5 和 7 天

分别采集气样,其余时间每周采集 1 次。收集气体的同时记录箱内温度、大气温度及 5 cm 土温<sup>[18]</sup>。采样结束后,立即移开采样箱,将样品带回实验室,采用 GC7900 型气相色谱仪进行分析测定。

### 1.4 数据处理

N<sub>2</sub>O 排放通量计算公式为:

$$F = \rho \times h \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{(273 + T)} \quad (1)$$

式中:  $F$  为 N<sub>2</sub>O 排放通量(mg/(m<sup>2</sup>·h));  $\rho$  为标准状态下 N<sub>2</sub>O 密度(kg/m<sup>3</sup>);  $h$  为采气箱高度(m);  $\Delta c/\Delta t$  为  $\Delta t$  时间内采气箱内 N<sub>2</sub>O 气体浓度的变化率(μl/(L·h));  $T$  为采气箱内温度(℃)。

N<sub>2</sub>O 累积排放量计算公式<sup>[17]</sup>为:

$$M = \sum \left( \frac{F_{i+1} + F_i}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式中:  $M$  为 N<sub>2</sub>O 累积排放量(kg/hm<sup>2</sup>);  $F$  为 N<sub>2</sub>O 排放通量(mg/(m<sup>2</sup>·h));  $i$  为采样次数;  $t$  为采样时间即定植后天数(d); 24 为一天小时数。

N<sub>2</sub>O 排放系数计算公式为:

$$\text{N}_2\text{O 排放系数}(\%) = \frac{\text{施氮处理 N}_2\text{O 排放量} - \text{不施氮处理 N}_2\text{O 排放量}}{\text{施氮量}} \times 100 \quad (3)$$

本研究采用 DPS V14.10 数据处理系统和 Microsoft Excel 2003 软件进行数据分析,处理间差异显著性检验采用 LSD 法。

## 2 结果与分析

### 2.1 莴苣生育期土壤 N<sub>2</sub>O 排放

**2.1.1 土壤 N<sub>2</sub>O 排放规律及平均排放通量** 由图 1 可知,基肥施用一周内,CK 和 PK 处理趋势一致,未出现明显 N<sub>2</sub>O 排放。NPK 处理施肥后第 2 天最先出现 N<sub>2</sub>O 排放峰值(1.16 mg/(m<sup>2</sup>·h))。表明纯化肥处理会促进土壤的硝化/反硝化作用,加速土壤 N<sub>2</sub>O 的产生和排放。NPKM1、NPKM2、NPKM3 处理相继于第 4、4、7 天出现 N<sub>2</sub>O 排放峰值。基肥期各处理峰值大小表现为: NPK > NPKM2 > NPKM1 > NPKM3 > CK > PK。表明施用氮肥促进土壤 N<sub>2</sub>O 排放,以纯化肥处理尤为明显。追肥后,土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量再次出现峰值,整体表现为先上升再下降,最后趋于平稳。NPK 和 NPKM1 处理峰值出现在追肥后第 3 天,分别为 0.96、1.30 mg/(m<sup>2</sup>·h); PK 和 NPKM2 处理峰值出现在追肥后第 5 天,分别为 0.61、0.49 mg/(m<sup>2</sup>·h); NPKM3 处理在第 7 天出现峰值(0.48 mg/(m<sup>2</sup>·h))。追肥期各处理峰值大小表现为: NPKM1 > NPK > PK > NPKM2 > NPKM3 > CK。说明不同种类施肥处理后期对土壤 N<sub>2</sub>O 的产生和排放均有促进作用。

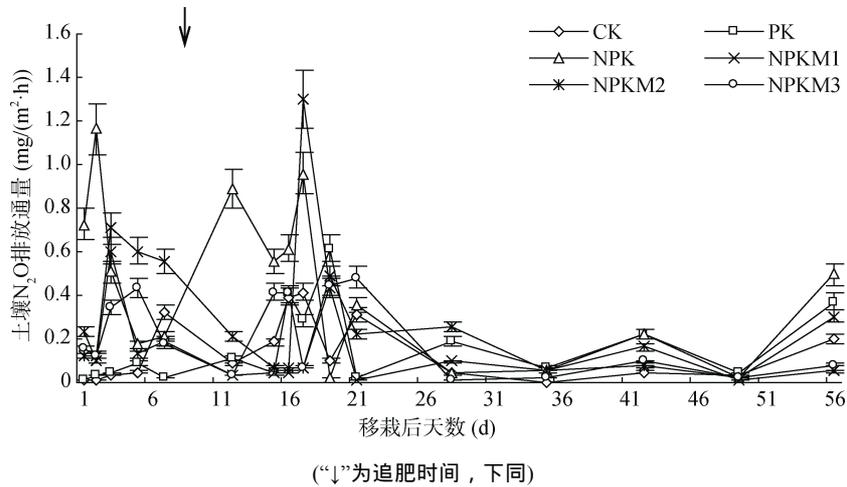


图 1 不同有机无机肥配施下莴苣土壤 N<sub>2</sub>O 的排放通量

Fig. 1 Emission fluxes of soil N<sub>2</sub>O during lettuce growing season under different combined application of organic and inorganic N fertilizers

由表 2 可知，莴苣生育期各处理土壤 N<sub>2</sub>O 平均排放通量介于 0.10 ~ 0.25 mg/(m<sup>2</sup>·h)，大小表现为 NPK>NPKM2>PK>NPKM1>NPKM3>CK。与 CK 相比，PK、NPK、NPKM1、NPKM2 和 NPKM3 处理土壤 N<sub>2</sub>O 平均排放通量分别增加 36.07%、149.21%、29.40%、85.03% 和 28.85%，其中 NPK 处理增加最显著。与 PK 处理相比，NPK、NPKM1、NPKM2 和 NPKM3 处理土壤 N<sub>2</sub>O 平均排放通量分别增加 60.26%、-16.79%、18.98% 和 -17.14%，其中 NPK 处理增加最显著。与 NPK 处理相比，NPKM1、NPKM2 和 NPKM3 处理土壤 N<sub>2</sub>O 平均排放通量分别显著降低 48.08%、25.75% 和 48.30%。可见，有机无机配比施肥较纯化肥处理能有效降低菜地土壤 N<sub>2</sub>O 平均排放通量。

**2.1.2 土壤 N<sub>2</sub>O 累积排放量** 由图 2 可知，莴苣生育期土壤 N<sub>2</sub>O 累积排放量变化呈上升趋势。基肥施用一周内，土壤 N<sub>2</sub>O 累积排放量增长速度缓慢，

追肥后出现拐点，然后平缓增加；追肥 7 天之后，再次出现拐点，后期呈逐渐上升趋势。其中，以 NPK 和 NPKM2 处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放量累积速度较快。

由表 2 可知，莴苣生育期各处理土壤 N<sub>2</sub>O 累积排放量介于 1.37 ~ 3.42 kg/hm<sup>2</sup>，大小表现为 NPK>NPKM2>PK>NPKM1>NPKM3>CK。与 CK 相比，PK、NPK、NPKM1、NPKM2 和 NPKM3 处理土壤 N<sub>2</sub>O 累积排放量分别增加 36.07%、149.21%、29.40%、85.03% 和 28.85%，其中 NPK 处理增加最显著。与 PK 处理相比，NPK、NPKM1、NPKM2 和 NPKM3 处理土壤 N<sub>2</sub>O 累积排放量分别增加 83.15%、-4.90%、35.98% 和 -5.31%，其中 NPK 处理增加最显著。与 NPK 处理相比，NPKM1、NPKM2 和 NPKM3 处理分别显著降低 48.08%、25.75% 和 48.30%。可见，有机无机配比施肥较纯化肥处理能有效减少土壤 N<sub>2</sub>O 排放，以猪粪类配施效果最好。

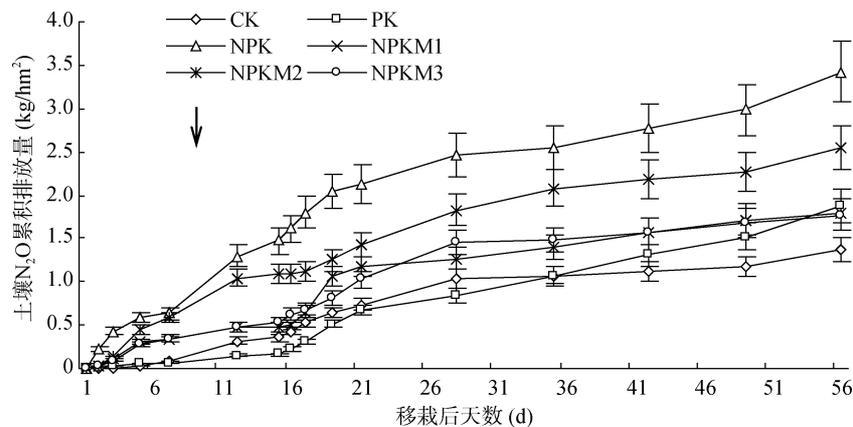


图 2 不同有机无机肥配施下莴苣土壤 N<sub>2</sub>O 的累积排放量

Fig. 2 Accumulation emission fluxes of soil N<sub>2</sub>O during lettuce growing season under different combined application of organic and inorganic N fertilizers

**2.1.3 土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数** 由表 2 可知, 莴苣生育期各处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数介于 0.13%~0.68%, 大小表现为 NPK>NPKM2>NPKM1>NPKM3。与 NPK 处理相比, NPKM1、NPKM2 和 NPKM3 处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数分别降低 0.55、0.29 和 0.55 个百分点。可见, 有机无机配比施肥较纯化肥处理能有效降低菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数。

## 2.2 莴苣产量

由表 2 可知, 各处理莴苣产量介于 0.26~0.57 kg/株, 大小表现为 NPKM3>NPKM1>NPKM2>NPK>PK>

CK。与 CK 相比, PK、NPK、NPKM1、NPKM2 和 NPKM3 处理莴苣产量分别增加 17.05%、44.31%、114.53%、76.24% 和 121.89%。与 PK 处理相比, NPK、NPKM1、NPKM2 和 NPKM3 处理莴苣产量分别增加 23.29%、83.28%、50.57% 和 89.57%。与 NPK 处理相比, NPKM1、NPKM2 和 NPKM3 处理莴苣产量分别增加 48.66%、22.13% 和 53.76%。可见, 有机无机配比施肥较纯化肥处理能提供多种无机和有机养分, 肥效持久稳定, 更易为植物所吸收, 有效提高莴苣产量。

表 2 不同有机无机肥配施下莴苣土壤 N<sub>2</sub>O 排放量和排放系数及产量

Table 2 Soil N<sub>2</sub>O emission flux, emission factors and lettuce yield under different combined application of organic and inorganic N fertilizers

处理	平均通量 (mg/(m <sup>2</sup> ·h))	排放总量 (kg/hm <sup>2</sup> )	较 CK 增排 (%)	排放系数 (%)	产量 (kg/株)	较 CK 增产 (%)
CK	0.10 ± 0.01 c	1.37 ± 0.10 d	—	—	0.26 ± 0.02 e	—
PK	0.14 ± 0.01 c	1.87 ± 0.13 c	36.07	0.17	0.30 ± 0.02 de	17.05
NPK	0.25 ± 0.02 a	3.42 ± 0.25 a	149.21	0.68	0.37 ± 0.03 cd	44.31
NPKM1	0.13 ± 0.01 c	1.78 ± 0.13 cd	29.40	0.13	0.55 ± 0.04 ab	114.53
NPKM2	0.19 ± 0.01 b	2.54 ± 0.18 b	85.03	0.39	0.45 ± 0.03 bc	76.24
NPKM3	0.13 ± 0.01 c	1.77 ± 0.13 cd	28.85	0.13	0.57 ± 0.04 a	121.89

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 有机无机氮肥配施对莴苣土壤 N<sub>2</sub>O 排放规律的影响

施用氮肥的农田类型及所用氮肥种类、施用量等都会影响其对 N<sub>2</sub>O 排放的贡献<sup>[10]</sup>。郝小雨等<sup>[19]</sup>研究发现, 不论芹菜季还是番茄季, 施氮后土壤 N<sub>2</sub>O 排放均出现上升趋势, 在施肥(结合灌水)后 7 d 内出现排放峰。张仲新等<sup>[15]</sup>研究发现, 设施菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量的季节变化有明显的时间变异性, 初期受基肥影响, 土壤 N<sub>2</sub>O 排放量较大, 随着时间的推移有所减少并保持稳定; 后期由于追肥, 出现一次排放高峰, 且持续时间较长。本研究结果与上述研究一致, 基肥施用后 NPK 处理莴苣土壤 N<sub>2</sub>O 排放先出现峰值, 峰值大小表现为 NPK>NPKM2>NPKM1>NPKM3>CK>PK, 且 NPK 处理在移栽后 12 d 又出现 N<sub>2</sub>O 排放高峰, 主要是由于纯化肥处理养分释放快, 底物增多, 促进硝化/反硝化作用产生。追肥施用后 NPK 和 NPKM1 处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放先出现峰值, 峰值大小表现为 NPKM1>NPK>PK>NPKM2>NPKM3>CK。

土壤微生物参与的硝化/反硝化过程是生成 N<sub>2</sub>O 的主要途径, 其生成与排放受反应底物碳和氮的双重影响。当有机肥料等碳量施用, N<sub>2</sub>O 的排放主要受

外源氮供应水平的制约; 而当有机肥料等氮量施用时, 则主要受外源碳供应水平的制约<sup>[20]</sup>。可见, 有机肥替代化肥不仅为微生物活动提供所需能量, 而且改变氮素输入形态, 调节土壤 C/N 比来影响微生物活动, 进而影响硝化/反硝化作用产物 N<sub>2</sub>O 的生成与排放。目前, 对于施用有机肥影响土壤 N<sub>2</sub>O 排放的报道较多, 但结论不一<sup>[21]</sup>。通常土壤微生物适宜的 C/N 比为(25~30)/1; 大于此, 则有机质分解变慢, 微生物活性减弱, N<sub>2</sub>O 排放受到抑制; 反之, 则促进 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[22]</sup>。而 Miller 等<sup>[23]</sup>认为, 由于有机肥含有大量的可溶性有机碳, 施入土壤后微生物活性比单施化肥处理强, 硝化/反硝化过程共同产生的 N<sub>2</sub>O 增高, 从而排放通量较高。

Vallejo 等<sup>[24]</sup>研究发现, 等氮量施肥条件下, 猪粪较化肥能减少马铃薯田中 N<sub>2</sub>O 的排放。孟磊等<sup>[25]</sup>研究发现, 等氮条件下, 施用化肥、有机肥(秸秆和饼肥堆肥)、1/2 化肥+1/2 有机肥处理间潮土的 N<sub>2</sub>O 排放通量差异不显著。张仲新等<sup>[15]</sup>研究发现, 设施菜地各处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放总量的次序: 常规施肥量+鸡粪>3/4 常规施肥量+鸡粪>1/4 常规施肥量+鸡粪>1/2 常规施肥量+鸡粪>鸡粪>无肥处理。郝小雨等<sup>[19]</sup>研究发现, 芹菜季和番茄季施用秸秆和猪粪肥较化肥均显著降低 N<sub>2</sub>O 的排放; 相同有机肥氮用量下, 施

用秸秆较有机肥有效降低土壤 N<sub>2</sub>O 的排放，且与猪粪和秸秆化学组成的不同有关。彭永红等<sup>[26]</sup>研究发现，以相同施氮量计，潮土施加沼液引起的 N<sub>2</sub>O 排放速率远高于尿素或硫酸铵等氮肥。杨园园等<sup>[27]</sup>研究发现，单施尿素、腐熟牛粪混施、沼液混施和减量尿素牛粪混施处理苜蓿中 N<sub>2</sub>O 排放分别增加 52.2%、89.1%、133.7% 和 59.4%。易琼等<sup>[18]</sup>研究发现，无机氮配施有机氮肥减少生菜土壤 52.4% 的 N<sub>2</sub>O 排放量。可见，因试验地区的环境因素、土壤类型、耕作制度及肥料投入比例和类型等因素的不同，有机肥对土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响也不同<sup>[28]</sup>。

本研究中，茼蒿生育期各处理土壤 N<sub>2</sub>O 平均排放通量及累积排放量分别介于 0.10 ~ 0.25 mg/(m<sup>2</sup>·h) 和 1.37 ~ 3.42 kg/hm<sup>2</sup>，大小均表现为 NPK>NPKM2>PK>NPKM1>NPKM3>CK。其中，PK 处理土壤 N<sub>2</sub>O 平均排放通量及累积排放量均比 CK 高，可能是由于土壤磷供应状况的改善会促进硝化作用所致<sup>[29]</sup>。而 NPK 处理土壤 N<sub>2</sub>O 平均排放通量及累积排放量均最高，可能是由于施用氮肥会提高酸性土壤的硝化活性，而鲜猪粪或猪粪堆肥配施无机肥能减缓酸性菜地土的硝化作用<sup>[30]</sup>。因此，菜地土壤施用纯化肥会促进 N<sub>2</sub>O 的排放，而不同种类有机无机氮肥配施可减少土壤 N<sub>2</sub>O 生成和排放，其中以猪粪类配施效果最佳。

### 3.2 有机无机氮肥配施对茼蒿土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数的影响

我国旱地农田 N<sub>2</sub>O 背景排放量为 N<sub>2</sub>O-N 0.70 ~ 3.14 kg/hm<sup>2</sup>，其中蔬菜地 N<sub>2</sub>O 排放系数最高(0.61% ~ 1.13%)，随无机氮肥施用量的增加而增加<sup>[31]</sup>。Kusa 等<sup>[32]</sup>研究发现，持续 6 a 洋葱生长季(4—10 月)肥料引起的 N<sub>2</sub>O 排放系数为 1.1% ~ 6.4%。丁洪等<sup>[33]</sup>研究发现，茄子地 N<sub>2</sub>O 排放量占施肥量的 8.6%。Cao 等<sup>[34]</sup>研究发现，南京地区大白菜地 N<sub>2</sub>O 排放系数为 1.09% ~ 1.63%。He 等<sup>[14]</sup>研究发现，山东寿光温室大棚中番茄轮作体系下 N<sub>2</sub>O 排放系数仅为 0.27% ~ 0.30%。邱炜红等<sup>[35]</sup>研究发现，武汉地区种植辣椒、萝卜、菠菜和小白菜地 N<sub>2</sub>O 排放系数为 0.33% ~ 1.13%。林森等<sup>[36]</sup>研究表明，春黄瓜生育期间化肥氮的 N<sub>2</sub>O 排放系数为 1.86% ~ 4.71%，其中新菜地排放系数高于老菜地，设施菜地排放系数高于露地；但有机肥氮排放系数(0.11%)则远远低于化肥氮。杨园园等<sup>[27]</sup>研究发现，苜蓿生产中尿素和牛粪处理 N<sub>2</sub>O 排放系数为 0.25% ~ 0.28%，而沼液处理为 0.64%。可见，N<sub>2</sub>O 排放系数差别较大，可能是由于时间地域差异、气候因素、土壤特性、施肥量及作物种类的不同而造成的。

本研究中，茼蒿生育期各处理的土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数范围介于 0.13% ~ 0.68%，大小表现为 NPK>NPKM2>NPKM1>NPKM3。且各施肥处理 N<sub>2</sub>O 排放系数均较低，可能与土壤中硝化/反硝化作用的强度有关，涉及土壤中与微生物活性有关的有机碳和氮素含量。

## 4 结论

1) 茼蒿生育期各处理土壤 N<sub>2</sub>O 平均排放通量及累积排放量大小均表现为 NPK>NPKM2>PK>NPKM1>NPKM3>CK。施用纯化肥会促进菜地土壤 N<sub>2</sub>O 的排放，而有机无机氮肥配施可减少土壤 N<sub>2</sub>O 的排放，其中以猪粪类配施效果最佳。

2) 不同种类有机肥配施无机氮肥条件下，茼蒿生育期各处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数范围介于 0.13% ~ 0.68%，大小表现为 NPK>NPKM2>NPKM1>NPKM3。

### 参考文献：

- [1] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. *Science*, 2009, 326(5949): 123-125
- [2] Kim Y, Seo Y, Kraus D, et al. Estimation and mitigation of N<sub>2</sub>O emission and nitrate leaching from intensive crop cultivation in the Haean catchment, South Korea[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 529(5): 40-53
- [3] 阎宏亮, 张璇, 谢立勇, 等. 菜地土壤施用铵态氮肥后 N<sub>2</sub>O 排放来源及其动态[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(2): 141-148
- [4] Yan H L, Xie L Y, Guo L P, et al. Characteristics of nitrous oxide emissions and the affecting factors from vegetable fields on the North China Plain[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 144(1): 316-321
- [5] 王军, 施雨, 李子媛, 等. 生物炭对退化蔬菜地土壤及其修复过程中 N<sub>2</sub>O 产排的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(3): 713-723
- [6] 杜连凤, 赵同科, 张成军, 等. 京郊地区 3 种典型农田系统硝酸盐污染现状调查[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2837-2843
- [7] 余海英, 李廷轩, 张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(3): 514-522
- [8] 张迪, 牛明芬, 王少军, 等. 不同有机肥处理对设施菜地土壤硝态氮分布影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(S): 156-161
- [9] Min J, Shi W, Xing G, et al. Nitrous oxide emissions from vegetables grown in a polytunnel treated with high rates of applied nitrogen fertilizers in Southern China[J]. *Soil Use & Management*, 2012, 28(1): 70-77

- [10] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 ( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ )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
- [11] 黄界颖, 伍震威, 高连芬, 等. 沼液对土壤质量及小白菜产量品质的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(5): 849–854
- [12] 刘荣厚, 郝元元, 叶子良, 等. 沼气发酵工艺参数对沼气及沼液成分影响的实验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(s1): 85–88
- [13] Xiong Z, Xie Y, Xing G, et al. Measurements of nitrous oxide emissions from vegetable production in China[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(12): 2225–2234
- [14] He F F, Jiang R F, Chen Q, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(5): 1666–1672
- [15] 张仲新, 李玉娥, 华璐, 等. 不同施肥量对设施菜地  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 269–275
- [16] Liu H, Li J, Li X, et al. Mitigating greenhouse gas emissions through replacement of chemical fertilizer with organic manure in a temperate farmland[J]. Science Bulletin, 2015, 60(6): 598–606
- [17] 李银坤, 武雪萍, 郭文忠, 等. 不同氮水平下黄瓜-番茄日光温室栽培土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 260–267
- [18] 易琼, 黄旭, 张木, 等. 氮肥施用水平及种类对生菜产量及菜地  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 2019–2025
- [19] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1073–1085
- [20] Chadwick D R, Pain B F, Brookman S K E. Nitrous oxide and methane emissions following application of animal manures to grassland[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(29): 277–287
- [21] Zhang M, Li B, Xiong Z Q. Effects of organic fertilizer on net global warming potential under an intensively managed vegetable field in southeastern China: A three-year field study[J]. Atmospheric Environment, 2016, 145: 92–103
- [22] Lin S, Iqbal J, Hu R, et al. Nitrous oxide emissions from yellow brown soil as affected by incorporation of crop residues with different carbon-to-nitrogen ratios: A case study in central China[J]. Archives of Environmental Contamination & Toxicology, 2013, 65(2): 183–192
- [23] Miller M N, Zebarth B J, Dandie C E, et al. Crop residue influence on denitrification,  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and denitrifier community abundance in soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(10): 2553–2562
- [24] Vallejo A, Skiba U M, García-Torres L, et al. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(9): 2782–2793
- [25] 孟磊, 蔡祖聪, 丁维新. 长期施肥对华北典型潮土 N 分配和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6197–6203
- [26] 彭永红, 陈永根, 宋照亮, 等. 沼液施用对潮土氧化亚氮排放通量的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(6): 954–959
- [27] 杨园园, 高志岭, 王雪君. 有机、无机氮肥施用对苜蓿产量、土壤硝态氮和温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 822–828
- [28] 谢立勇, 叶丹丹, 张贺, 等. 旱地土壤温室气体排放影响因子及减排增汇措施分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(4): 481–487
- [29] 蔡祖聪, 赵维. 土地利用方式对湿润亚热带土壤硝化作用的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 795–801
- [30] 何飞飞, 梁运姍, 易珍玉, 等. 有机无机肥配施对酸性菜地土壤硝化作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 534–540
- [31] 徐玉秀, 郭李萍, 谢立勇, 等. 中国主要旱地农田  $\text{N}_2\text{O}$  背景排放量及排放系数特点[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1729–1743
- [32] Kusa K, Sawamoto T, Hatano R. Nitrous oxide emissions for 6 years from a gray lowland soil cultivated with onions in Hokkaido, Japan[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2/3): 239–247
- [33] 丁洪, 王跃思, 项虹艳, 等. 菜田氮素反硝化损失与  $\text{N}_2\text{O}$  排放的定量评价[J]. 园艺学报, 2004, 31(6): 762–766
- [34] Cao B, He F Y, Xu Q M, et al. Denitrification losses and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from nitrogen fertilizer applied to a vegetable field[J]. Pedosphere, 2006, 16(3): 390–397
- [35] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 等. 不同施氮水平对菜地土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2238–2243
- [36] 林森, 郭李萍, 谢立勇, 等. 菜地土壤  $\text{CO}_2$  与  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征及其规律[J]. 中国土壤与肥料, 2012(4): 11–17

## Effects of Combined Application of Organic and Inorganic Nitrogen Fertilizers on Soil Nitrous Oxide Emission from Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Fields

TANG Guirong<sup>1,2</sup>, ZHOU Xuan<sup>3</sup>, TIAN Chang<sup>1</sup>, PENG Huihui<sup>2</sup>, ZHANG Yuping<sup>1</sup>, RONG Xiangmin<sup>1\*</sup>

(1 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2 Changsha Environmental Protection College, Changsha 410004, China; 3 Soil and Fertilizer Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China)

**Abstract:** A pot experiment was conducted with static box-gas chromatographic method to investigate the effects of different combined application of organic and inorganic nitrogen (N) fertilizers on soil N<sub>2</sub>O emissions from lettuce (*Lactuca sativa* L.) field. There were six treatments, including 1) no fertilizer (CK), 2) no N fertilizer (PK), 3) pure fertilizer (NPK), 4) organic and inorganic fertilizer 1 (20% pig manure N + 80% chemical fertilizer N, NPKM1), 5) organic and inorganic fertilizer 2 (20% biogas manure N + 80% chemical fertilizer N, NPKM2), and 6) organic and inorganic fertilizer 3 (20% pig manure composting N + 80% chemical fertilizer N, NPKM3). Results showed that N<sub>2</sub>O emission peaks appeared after fertilizer application during lettuce growing season, and the peak time and intensities were differed among different treatments. N<sub>2</sub>O accumulation emission gradually increased along with the growth period. Soil average N<sub>2</sub>O emission flux and N<sub>2</sub>O accumulation emission were 0.10–0.25 mg/(m<sup>2</sup>·h) and 1.37–3.42 kg/hm<sup>2</sup>, and in the order of NPK > NPKM2 > PK > NPKM1 > NPKM3 > CK. Soil N<sub>2</sub>O emission factor was 0.13%–0.68%, and in the order of NPK > NPKM2 > NPKM1 > NPKM3. Compared with NPK treatment, NPKM1, NPKM2 and NPKM3 treatments reduced soil N<sub>2</sub>O accumulation emission by 48.08%, 25.75% and 48.30%, and increased lettuce yield by 48.66%, 22.13% and 53.76%, respectively. In conclusion, soil N<sub>2</sub>O emission from lettuce field was promoted by pure fertilizer application, while decreased by the addition of different organic N fertilizers with higher production, especially in pig manure (composting or not) treatments. Therefore, combined application of organic and inorganic N fertilizers is an effective way to reduce N<sub>2</sub>O and N loss by emission in vegetable field.

**Key words:** Organic and inorganic nitrogen fertilizers combined application; Lettuce; Nitrous oxide; Emission characteristics