

颜 芳, 刘继培, 王伊琨, 等. 连续多年施肥后设施土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量特征[J]. 江苏农业学报, 2020, 36( 4 ): 949-954.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.04.020

## 连续多年施肥后设施土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量特征

颜 芳<sup>1</sup>, 刘继培<sup>2</sup>, 王伊琨<sup>1</sup>, 张 蕾<sup>1</sup>, 赵凯丽<sup>1</sup>, 王维瑞<sup>1</sup>, 王胜涛<sup>1</sup>

(1.北京市土肥工作站, 北京 100029; 2.北京市大兴区土肥工作站, 北京 102600)

**摘要:** 为了研究连续多年施用有机肥、化肥后设施土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量特征, 设不施肥(T0)、有机无机配施(T1)、单施有机肥(T2)、单施化肥(T3)等4个处理, 采用密闭式静态箱-气相色谱法测定了长期不同施肥处理对设施菜地  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的影响。结果表明, 设施菜田土壤有机肥和氮肥基施均会显著增加土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 追施氮肥后0~3 d 也会出现明显的排放高峰。各处理在种植季内土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量的次序是:  $\text{T2}(\text{N } 5.72 \sim 5.85 \text{ kg/hm}^2) > \text{T1}(\text{N } 4.06 \sim 4.21 \text{ kg/hm}^2) > \text{T3}(\text{N } 3.08 \sim 3.68 \text{ kg/hm}^2) > \text{T0}(\text{N } 0.53 \sim 0.76 \text{ kg/hm}^2)$ 。可见, 有机肥的施用可以增加设施菜地  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 在氮素总量投入相同的前提下, 连续10年有机无机配施后, 土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量比单独施用有机肥低, 但比单独施用化肥高, 因此, 合理施用有机肥是减少温室气体  $\text{N}_2\text{O}$  排放的重要措施。

**关键词:** 氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ ); 长期施肥; 设施土壤

**中图分类号:** S131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)04-0949-06

## Effects of long-term fertilization on $\text{N}_2\text{O}$ emission flux from greenhouse soil

YAN Fang<sup>1</sup>, LIU Ji-pei<sup>2</sup>, WANG Yi-kun<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, ZHAO Kai-li<sup>1</sup>, WANG Wei-rui<sup>1</sup>,  
WANG Sheng-tao<sup>1</sup>

(1. Beijing Soil and Fertilizer Extension Service Station, Beijing 100029, China; 2. Daxing Soil and Fertilizer Station, Beijing 102600, China)

**Abstract:** In order to study the  $\text{N}_2\text{O}$  emission flux characteristics of greenhouse soil after applying organic fertilizer and chemical fertilizer for many years, four treatments were set up, including control treatment (T0), combined application of inorganic fertilizer and organic fertilizer (T1), organic fertilizer (T2) and chemical fertilizer (T3). The static chamber-gas chromatograph technique was used to identify the effects of long-term fertilization on  $\text{N}_2\text{O}$  emission flux from greenhouse soil. Results showed that the application of organic fertilizer and nitrogen fertilizer as base fertilizer significantly increased  $\text{N}_2\text{O}$  emission. The emission peak of  $\text{N}_2\text{O}$  generally occurred at 0~3 days after nitrogen topdressing. During the whole growing period, total  $\text{N}_2\text{O}$  emission followed the order of  $\text{T2}(\text{N } 5.72 \sim 5.85 \text{ kg/hm}^2) > \text{T1}(\text{N } 4.06 \sim 4.21 \text{ kg/hm}^2) > \text{T3}(\text{N } 3.08 \sim 3.68 \text{ kg/hm}^2) > \text{T0}(\text{N } 0.53 \sim 0.76 \text{ kg/hm}^2)$ . The application of organic fertilizer can increase soil  $\text{N}_2\text{O}$  emission. Under the premise of the same total nitrogen input, the  $\text{N}_2\text{O}$  emission in the treatment of T1 for ten years was higher than that in the treatment of T3, but lower than that in the treatment of T2. Therefore, rational application of organic fertilizer is an important measure to reduce  $\text{N}_2\text{O}$  emission.

**Key words:** nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ); long-term fertilization; greenhouse soil

收稿日期: 2019-11-27

基金项目: 北京市农业科技项目(20180206)

作者简介: 颜 芳(1988-), 女, 山东临朐人, 硕士, 农艺师, 从事科学施肥和耕地质量管理工作。(E-mail) yff19880927@163.com

通讯作者: 王胜涛, (E-mail) 24030940@qq.com

和  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  一样,  $\text{N}_2\text{O}$  也是重要的温室气体之一, 其增温效应约为  $\text{CO}_2$  的 320 倍<sup>[1]</sup>, 在大气中的滞留时间可达 150 年<sup>[2]</sup>。此外, 它还可以破坏平流层中

的臭氧<sup>[3]</sup>。N<sub>2</sub>O 对环境的巨大危害性,引起了科学界的广泛关注。研究发现,中国农田土壤直接和间接排放的 N<sub>2</sub>O 分别占全国 N<sub>2</sub>O 排放总量的 55.8% 和 15.1%<sup>[4]</sup>。农田中,N<sub>2</sub>O 的排放受土壤微生物种群结构和特征、土壤施氮量、有机碳含量、土壤温度及土壤含水量等因素的综合影响<sup>[5-6]</sup>。施肥量的增加会为土壤硝化和反硝化过程提供底物,进而提高 N<sub>2</sub>O 排放量<sup>[7-8]</sup>。与施用化学氮肥相比,施用有机肥能够显著增加 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[9]</sup>。有机肥料主要通过改变土壤 C/N 来影响微生物活性进而影响土壤 N<sub>2</sub>O 的产生和排放<sup>[10-11]</sup>。温度会影响土壤有机质分解和土壤生物活性,降低土壤温度能减少 N<sub>2</sub>O 排放。有研究者发现,当土温在 20~40 ℃ 时,N<sub>2</sub>O 排放量随着温度的升高而增加<sup>[12]</sup>。此外,菜田土壤 N<sub>2</sub>O 排放量与土壤水分含量呈极显著相关性<sup>[13]</sup>。依据土壤特性不同,N<sub>2</sub>O 排放的最佳含水量为 50%~80% 或 60%~90%<sup>[14]</sup>。干湿交替也会引起 N<sub>2</sub>O 剧烈排放。Cui 等<sup>[15]</sup> 研究发现,设施菜田土壤每次灌水均有 N<sub>2</sub>O 排放峰值产生,这主要是因为灌溉增加了土体土壤湿度,减少了土壤基质中氧气的含量,激发了土壤部分区域的反硝化作用。在施肥、水分、温度等各种因素综合作用下,设施土壤 N<sub>2</sub>O 排放量远远高于粮田和其他生态系统<sup>[16]</sup>。目前,大多数关于 N<sub>2</sub>O 排放特征的研究处理时间较短,对连续多年不同施肥处理后设施菜地 N<sub>2</sub>O 排放的研究相对较少。本研究利用原位监测手段,研究连续 10 年不同施肥处理后,设施菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放情况,以期对设施菜地土壤温室气体减排提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2018 年 1 月至 12 月在北京市大兴区青云店镇日光温室进行,供试土壤为潮土。该温室从 2008 年 1 月开始常年设有 4 个处理,分别为不施肥(T0)、有机无机配施(T1)、单施有机肥(T2)和单施化肥(T3)。每个处理 3 次重复,每个小区面积为 6.5 m×4.5 m。2008 年试验前表层(0~20 cm)土壤有机质 12.99 g/kg,全氮 1.24 g/kg,硝态氮 14.7 mg/kg,有效磷 52.4 mg/kg,速效钾 121.6 mg/kg,pH 7.7。

2017 年最后一季作物收获后,取表层(0~20 cm)土壤测试土壤氮素含量,T0、T1、T2、T3 各处理土壤全氮含量分别为 0.59 g/kg、2.42 g/kg、3.41

g/kg、0.91 g/kg。

### 1.2 试验设计

供试作物为京甜 3 号辣椒。辣椒种植行距 40 cm,株距 30 cm。采用滴灌方式灌溉施肥,具体管理措施见表 1。处理施用的有机肥为商品有机肥,原料为鸡粪。氮肥为尿素,磷肥为磷酸二铵,钾肥为硫酸钾。有机肥和磷肥全部作基肥于移栽前施入,20% 的尿素和硫酸钾作基肥于移栽前随水施入,80% 根据辣椒的生长趋势和天气状况分 3 次分别在门椒、对椒、四母斗时期随水追施(用量分配比例为 3:3:2)。试验期为 1 年,分春夏和秋冬两季,两季作物施肥量相同。不同处理每一季作物磷素总投入量为 356 kg/hm<sup>2</sup>,钾素总投入量为 381 kg/hm<sup>2</sup>,氮肥用量水平见表 2。

表 1 施肥、灌溉方案

Table 1 Fertilization and irrigation scheme

日期	春夏季作物 田间管理	日期	秋冬季作物 田间管理
2018-03-18	施用底肥	2018-08-13	施用底肥
2018-03-20	移栽	2018-08-16	移栽
2018-04-08	第 1 次追肥	2018-09-03	第 1 次追肥
2018-04-19	清水灌溉	2018-09-10	清水灌溉
2018-04-30	第 2 次追肥	2018-09-24	清水灌溉
2018-05-10	清水灌溉	2018-10-08	第 2 次追肥
2018-05-20	清水灌溉	2018-10-19	清水灌溉
2018-06-01	清水灌溉	2018-11-02	清水灌溉
2018-06-10	第 3 次追肥	2018-11-13	第 3 次追肥
2018-06-25	清水灌溉	2018-11-23	清水灌溉
2018-07-10	拉秧	2018-12-10	拉秧

表 2 各处理每一季的氮素施用水平

Table 2 Nitrogen application level of different treatments

处理	有机肥氮 (kg/hm <sup>2</sup> )	化肥氮 (kg/hm <sup>2</sup> )	氮素总投入 (kg/hm <sup>2</sup> )
T0	0	0	0
T1	331	229	560
T2	560	0	560
T3	0	560	560

### 1.3 气体样品采集及测定

试验中每个小区放置一个静态箱,静态箱为正方形的 PVC 材料罐,长宽均为 50 cm,高为 57 cm,

另有配套底座可插入土中,露出土面部分有与采样箱匹配的方形凹槽。箱体内顶部固定一个风扇以混匀气体,箱体内部分别放置采气管和温度探头。静态箱底座安放在种植垄上,取样前往配套底座凹槽注水后静置约 30 min,在 10:00 开始取样,采气时将采样箱扣在底座凹槽内,打开风扇,检查密封性,确认没有漏气现象后开始计时。迅速分别于 0 min、10 min、20 min、30 min 用带刻度注射器采集静态箱中 22 ml 气体于真空瓶中(取样瓶为 Lanco Exetainer),并记录取样时箱内温度,气体带回实验室进行测定。

测定使用的气相色谱仪型号为 Agilent 7890,测定 N<sub>2</sub>O 的检测器为电子捕获检测器(ECD),测定温度为 330 ℃,色谱柱为 Porpak Q 柱,柱温 70 ℃,载气为高纯 N<sub>2</sub>,流速为 25 L/min。采样频率为辣椒移栽后每 7 d 1 次,施肥后加密采样 1 次。

#### 1.4 计算公式

N<sub>2</sub>O 通量指单位时间单位面积静态箱内该气体的质量变化,用公式表示为: $F = \rho \times V / A \times 273 / (273 + T) \times \Delta c / \Delta t \times 60$ ,式中, $F$  为 N<sub>2</sub>O 排放通量 [N, mg/(m<sup>2</sup>·h)], $V$  为静态箱体积 (cm<sup>3</sup>), $A$  为静态箱内土壤面积 (cm<sup>2</sup>), $\rho$  为标准大气压下箱内气体密度 (g/cm<sup>3</sup>), $T$  是取样过程中静态箱内平均温度 (℃), $\Delta c / \Delta t$  是静态箱内气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率 (10<sup>-9</sup>, 1 min)。N<sub>2</sub>O 排放系数 = [(施氮处理 N<sub>2</sub>O 排放量 - 不施氮处理 N<sub>2</sub>O 排放量) / 施氮量] × 100%。

整个辣椒生长季的 N<sub>2</sub>O 排放总量采用插值法

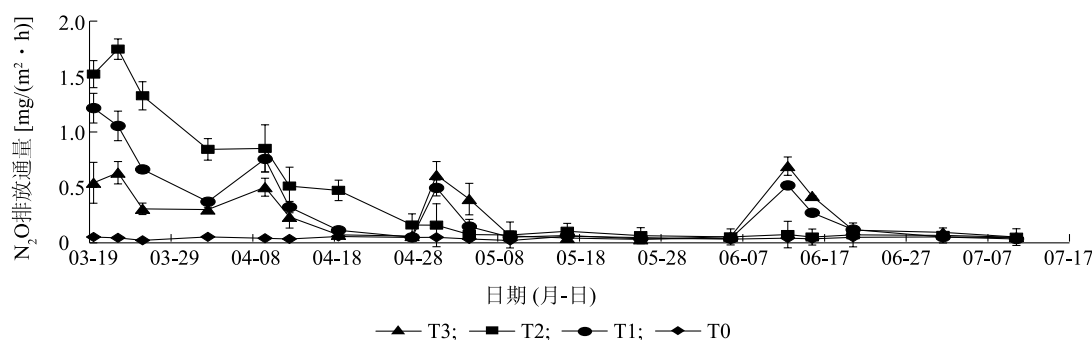
估算,多重比较用最小显著差异法(LSD)进行, Pearson 相关性分析,统计软件为 SPSS13.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 春夏季设施菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量变化

春夏季设施辣椒地不同施肥处理土壤 N<sub>2</sub>O 的排放通量如图 1 所示,T0 处理 N<sub>2</sub>O 排放通量始终处于较低水平,变化范围为 0.02~0.06 mg/(m<sup>2</sup>·h)。T1 处理 N<sub>2</sub>O 排放通量变化范围为 0.03~1.21 mg/(m<sup>2</sup>·h)。T2 处理 N<sub>2</sub>O 排放通量在有机肥一次性底施后约 30 d 的时间内都在 0.5 mg/(m<sup>2</sup>·h) 以上,后期排放量逐渐降低,变化范围为 0.05~1.75 mg/(m<sup>2</sup>·h)。T3 处理 N<sub>2</sub>O 排放通量变化范围为 0.03~0.69 mg/(m<sup>2</sup>·h)。T1 和 T3 处理在追肥后,土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量均呈现迅速上升的趋势,引起 N<sub>2</sub>O 排放峰值的出现,两个处理排放峰值均在追肥后 0~3 d 出现,能持续 3~5 d 左右。

从图 1 可以看出,定植后到第 1 次追肥这段时间,单施有机肥处理(T2)在有机肥一次性底施后 30 d 的时间内都在 0.5 mg/(m<sup>2</sup>·h) 以上,有机无机配施处理(T1)高排放量状态能维持 10 d 左右,均明显高于 T3 处理,说明底肥中施用有机肥会提高 N<sub>2</sub>O 排放通量。在相同施氮条件下,随着有机肥用量的增加土壤 N<sub>2</sub>O 损失加剧的现象在其他研究中也有发现<sup>[6,10-11,15]</sup>,其原因可能是苗期作物根系较弱,大量有机肥和氮肥的投入,为土壤微生物提供了足够的底物,从而导致土壤 N<sub>2</sub>O 大量排放。



各处理见表 2。

图 1 春夏季不同施肥条件下设施菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量

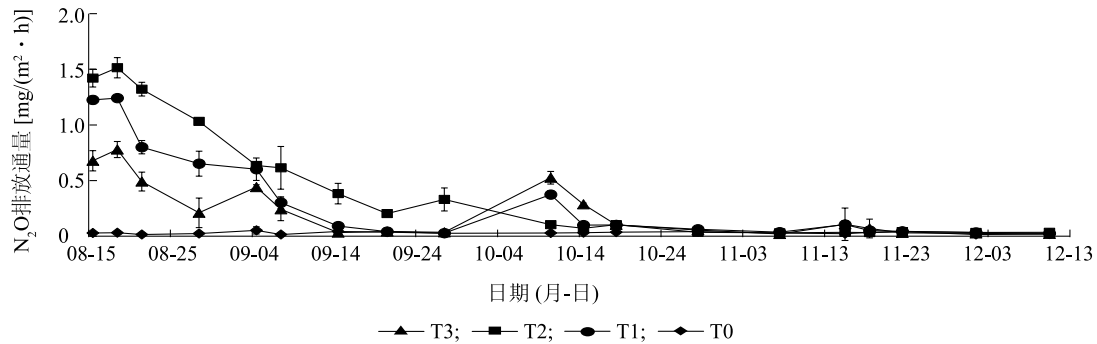
Fig.1 N<sub>2</sub>O emission fluxes from greenhouse vegetable soil under different fertilization treatments during spring-summer season

### 2.2 秋冬季设施菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量变化

秋冬季设施辣椒地不同施肥处理土壤 N<sub>2</sub>O 的排放通量如图 2 所示。整体而言,9 月中旬以前,所

有的施肥处理 N<sub>2</sub>O 排放通量都较高,这可能是因为棚内气温和土壤温度相对较高。其中 T2 处理最高,排放通量为 0.38~1.51 mg/(m<sup>2</sup>·h);其次为 T1 处

理,排放通量为 $0.09 \sim 1.24 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,T3 处理排放通量为 $0.03 \sim 0.78 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;T0 最低,排放通量为 $0.01 \sim 0.05 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。10 月份追肥后,出现了 1 个  $\text{N}_2\text{O}$  排放高峰,4 d 后下降,之后都维持在一个较低的水平,各处理排放通量均低于  $0.5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。



各处理见表 2。

图 2 秋冬季不同施肥条件下设施菜地土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量

Fig.2  $\text{N}_2\text{O}$  emission fluxes from greenhouse vegetable soil under different fertilization treatment during autumn-winter season

### 2.3 设施菜地不同施肥处理 $\text{N}_2\text{O}$ 排放总量及排放系数比较

由表 3 可见,不同处理春夏季和秋冬季  $\text{N}_2\text{O}$  排放量顺序均为  $\text{T2} > \text{T1} > \text{T3} > \text{T0}$ ,施用肥料的各处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放量要比不施肥处理高,其中,仅施有机肥处理(T2)比 T0 处理排放总量高 7~10 倍,有机无机配施处理(T1)比 T0 处理排放总量高 5~8 倍,仅施化肥处理(T3)比 T0 处理排放总量高 5~6 倍,表明无论施用有机肥还是化肥都对土壤环境产生了明显影响。

单施有机肥处理(T2)与单施化肥处理(T3)相比,春夏季和秋冬季土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量分别增加了 59.0%、85.7%。有机无机配施处理(T1)与单施化肥处理(T3)相比,春夏季和秋冬季土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量分别增加了 14.4%、31.8%。这说明,在底物相对一致的前提下,有机肥的施用为反硝化过程提供了所需的能量,从而促进了反硝化过程,增加了土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放量。

计算各处理  $\text{N}_2\text{O}$ -N 排放占其氮素投入的损失系数,结果表明各处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放系数介于 0.45% 和 0.93% 之间。单施有机肥处理(T2)  $\text{N}_2\text{O}$  排放系数最高,秋冬季为 0.93%,春夏季为 0.91%;其次为有机无机配施处理(T1)和单施化肥处理(T3)。

在定植后到第 1 次追肥前,各处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放规律与春夏季类似。T1 处理和 T3 处理追肥后 1~3 d  $\text{N}_2\text{O}$  排放量呈迅速上升趋势,均有一个较高的  $\text{N}_2\text{O}$  脉冲式排放,但后 2 次追肥后出现的峰值明显低于春夏季追肥后出现的排放峰值。

表 3 不同施肥处理条件下设施菜地土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量和排放系数

Table 3 Total  $\text{N}_2\text{O}$  emission and emission factors under different fertilization treatments in greenhouse vegetable soil

处理	$\text{N}_2\text{O}$ 排放总量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )		$\text{N}_2\text{O}$ 的排放系数 (%)	
	春夏季	秋冬季	春夏季	秋冬季
T0	$0.76 \pm 0.07\text{c}$	$0.53 \pm 0.80\text{d}$	—	—
T1	$4.21 \pm 0.39\text{b}$	$4.06 \pm 0.51\text{b}$	0.62	0.63
T2	$5.85 \pm 0.53\text{a}$	$5.72 \pm 0.49\text{a}$	0.91	0.93
T3	$3.68 \pm 0.24\text{b}$	$3.08 \pm 0.14\text{c}$	0.52	0.45

各处理见表 2。数值后不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

### 3 讨论

有研究者指出土壤中如果有足够的外源碳和氮输入且有适宜微生物活动的  $\text{C}/\text{N}$  的话,微生物活性就会得到增强,土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放量就会得到提高<sup>[17-19]</sup>。本试验发现有机肥的施用可以增加土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放,在氮素总量投入相对一致的前提下,连续 10 年有机无机混施后,与单独施用化肥相比,土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量增加了 14.4%~31.8%,这可能是因为连续多年仅投入化肥,土壤微生物可利用的碳源有限,其活性下降,而添加有机肥后微生物碳源相对较多,加之土壤温度、湿度适宜的情况下,矿化的氮素也会增加, $\text{C}/\text{N}$  适宜,微生物活性加强,从而导致土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放量增加。



本研究发现设施菜地连续 10 年有机无机混施后,与单独施用有机肥相比,土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量减少 28% 左右。这与王耀聪等<sup>[10]</sup>报道结论不一致,其有机无机混施处理比单独有机肥处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量增加了 1.5 倍。张仲新等<sup>[6]</sup>也报道了有机无机配合施用处理比单独施用有机肥处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量高 1.3 倍。这可能是其研究中有有机无机混施处理比单独施用有机肥处理氮素投入量低导致,此外,本研究是基于连续多年施肥处理后的土壤开展的,相比于单季处理的研究土壤物理和生物性状可能发生了一定变化,从而影响了土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放。

本试验中各处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量为 0.53~5.85  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,其中,单施化肥处理的一季  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量与武其甫等<sup>[7]</sup>在石家庄潮土上研究报道的 3.616  $\text{kg}/\text{hm}^2$  接近,但低于有关报道的 18.62~27.73  $\text{kg}/\text{hm}^2$ <sup>[8,10,20]</sup>。有机无机配合施用处理一季  $\text{N}_2\text{O}$  排放量总量为 4.06~4.21  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,低于张仲新等<sup>[6]</sup>报道的 8.266  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,远低于王耀聪等<sup>[10]</sup>报道的 112.46  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。单独施用有机肥处理一季  $\text{N}_2\text{O}$  排放量总量为 5.72~5.85  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,也低于王耀聪等<sup>[10]</sup>报道的 44.99  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,这可能与本研究监测频率偏低有关,试验只在施肥后进行了加密监测,在空水灌溉后未安排气体采集,可能没有捕捉到灌水产生的  $\text{N}_2\text{O}$  排放峰值<sup>[21-23]</sup>。此外,本试验氮素投入量低也可能是排放量低的原因。

不同学者对设施菜田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放系数研究结果差别很大,山东省寿光地区平均每年设施番茄生产体系  $\text{N}_2\text{O}$  排放占氮素投入的 0.27%~0.30%<sup>[24]</sup>,而南京市集约化大棚蔬菜地  $\text{N}_2\text{O}$  排放系数达 4.6%<sup>[25]</sup>,也有  $\text{N}_2\text{O}$  排放系数高达 6.8% 的报道<sup>[10]</sup>。本研究各处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放系数介于 0.45% 至 0.93% 之间,均低于 Bouwman 提出的  $\text{N}_2\text{O}$  排放系数 1.25%。 $\text{N}_2\text{O}$  排放系数差别较大,很可能是时间、地域差异以及土壤特性、施肥量和作物种类不同而造成的。

## 4 结 论

综上所述,设施菜田土壤有机肥和氮肥基施后均会显著增加土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放,追施氮肥后 0~3 d 也会出现明显的排放高峰。在氮素总量投入相同的前提下,连续 10 年有机无机配施后,土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放

量比单独施用有机肥低,但比单独施用化肥多。因此,合理施用有机肥是减少温室气体  $\text{N}_2\text{O}$  排放的重要措施。

## 参考文献:

- [1] BOTHE H, FERGUSON S J, NEWTON W E. Biology of the nitrogen cycle [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2007:1-427.
- [2] KIM K R, CRAIG H. Nitrogen-15 and oxygen-18 characteristics of nitrous oxide: a global perspective [J]. Science, 1993, 262: 1855-1857.
- [3] United Nations Environment Programme. Drawing down  $\text{N}_2\text{O}$  to protect climate and the ozone layer: a UNEP synthesis report [R]. Kenya: Nairobi, 2013.
- [4] 董红敏,李玉娥,陶秀萍,等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报,2008, 24(10): 269-273.
- [5] ZAMAN M, NGUYEN M L, ŠIMEK M, et al. Emissions of nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) and di-nitrogen ( $\text{N}_2$ ) from the agricultural landscapes, sources, sinks, and factors affecting  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{N}_2$  ratios [M]//LIU G X. Greenhouse gases-emission, measurement and management. Shanghai: InTech, 2012: 1-32.
- [6] 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.
- [7] 武其甫,武雪萍,李银坤,等. 保护地土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量特征研究[J]. 植物营养与肥料学报,2011, 17(4): 942-948.
- [8] 谢海宽,江雨倩,李 虎. 北京设施菜地  $\text{N}_2\text{O}$  和 NO 排放特征及滴灌优化施肥的减排效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 591-600.
- [9] ZHOU M H, ZHU B, WANG S J, et al. Stimulation of  $\text{N}_2\text{O}$  emission by manure application to agricultural soils may largely offset carbon benefits: a global meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2017, 23(10): 4068-4083.
- [10] 王耀聪,王利英,高志岭,等. 施用有机肥、化肥对设施番茄土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 河北农业大学学报, 2016, 39(3): 1-6.
- [11] 董玉红,欧阳竹,李运生,等. 不同施肥方式对农田土壤  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007(4): 34-39.
- [12] GRANLI T, BOCKMAN O C. Nitrogen oxide from agriculture [J]. Norwegian J Agric Sci, 1994, 12: 66-71.
- [13] 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.
- [14] BOUWMAN A F. Environmental science: Nitrogen oxides and tropical agriculture[J]. Nature, 1998, 392(6679): 866-867.
- [15] CUI F, YAN G X, ZHOU Z X, et al. Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from a wheat-maize cropping system on a silt loam calcareous soil in the North China Plain[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 48: 10-19.
- [16] LIN S, IQBAL J, HU R G, et al.  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from different land uses in mid-subtropical China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 136: 40-48.

- [17] 杨劲峰,韩晓日,战秀梅,等.不同施肥处理对棕壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量的影响[J].生态环境,2007,16(2):560-563.
- [18] 梁东丽,吴庆强,李生秀,等.旱地反硝化作用和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放影响因子的研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(12):93-98.
- [19] 邹建文,黄耀,宗良纲,等.不同种类有机肥施用对稻田 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的综合影响[J].环境科学,2003,24(4):7-12.
- [20] 丁洪,张玉树,王跃思,等.辣椒地土壤氮素反硝化损失与 $\text{N}_2\text{O}$ 排放研究[J].长江蔬菜(学术版),2010(8):86-89.
- [21] 宋贺.设施蔬菜生产体系中反硝化过程及环境效应研究[D].北京:中国农业大学,2012.
- [22] 宋志鹏.不同水氮管理下设施番茄土壤氧化亚氮的排放特征[D].北京:中国农业大学,2014.
- [23] 曹文超,宋贺,陈吉吉,等.水分和有机肥投入对设施菜田土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$ 和 $\text{CO}_2$ 排放及产物比的影响[J].土壤通报,2018,49(2):469-477.
- [24] 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: 1666-1672.
- [25] 贾俊香,张曼,熊正琴,等.南京市郊区集约化大棚蔬菜地 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放[J].应用生态学报,2012,23(3):739-744.

(责任编辑:张震林)