

谢海宽, 李贵春, 徐 驰, 等. 不同灌溉方式对设施菜地 N_2O 排放的影响及其年际差异[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 825–832.

XIE Hai-kuan, LI Gui-chun, XU Chi, et al. Effect of irrigation pattern on soil N_2O emissions and interannual variability in greenhouse vegetable fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 825–832.

不同灌溉方式对设施菜地 N_2O 排放的影响及其年际差异

谢海宽¹, 李贵春², 徐 驰¹, 丁武汉¹, 江雨倩¹, 王立刚¹, 李 虎^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部面源污染控制重点实验室, 中国农业科学院-美国新罕布什尔大学可持续农业生态系统研究联合实验室, 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘 要: 通过田间原位试验, 利用自动静态箱-气相色谱法对设施黄瓜季土壤 N_2O 排放进行了连续两年的观测, 探讨了不同灌溉方式(传统漫灌和滴灌)对 N_2O 排放的影响及其年际差异, 以期为设施菜地 N_2O 减排提供数据支撑和理论基础。试验设置 3 个处理, 分别为对照处理(CK)、漫灌施肥处理(FP)、滴灌施肥处理(FPD)。CK 处理不施氮肥, FP、FPD 处理氮肥施用量为有机肥 $500 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、化肥 $700 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中化肥根据作物养分需求多次施入。研究结果表明: 设施菜地 N_2O 排放峰主要集中于施肥和灌溉后, 基肥持续 7 d 左右, 追肥 N_2O 排放峰持续 3~5 d。土壤温度、水分和气温等因子都能显著影响 N_2O 排放通量的变化, 但不同年际之间对 N_2O 排放的影响不同, 2015 年 N_2O 排放通量的变化主要受土壤温度和气温影响, 而 2016 年主要受土壤湿度和温度影响; 改变灌溉方式, 对土壤湿度变化没有产生显著的影响; 相同氮肥施用量下, 滴灌相比常规漫灌在提高作物产量的同时, 能减少 N_2O 排放总量 29.4%~35.1%, 并且没有显著年际差异; 滴灌相比常规漫灌能减少 N_2O 排放强度(即单位经济产量 N_2O 排放量)34.5%~37.5%、排放系数 47.2%~47.7%, 两年的观测没有显著年际差异。可见, 滴灌相比漫灌在提高蔬菜产量的同时, 能显著减少 N_2O 排放, 而且年际之间没有显著差异, 是设施菜地值得推荐的一种减排技术, 并可为 N_2O 长期减排效果的估算提供参考。

关键词: 漫灌; 滴灌; 设施蔬菜; N_2O ; 年际变化

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)04-0825-08 **doi:**10.11654/jaes.2017-1485

Effect of irrigation pattern on soil N_2O emissions and interannual variability in greenhouse vegetable fields

XIE Hai-kuan¹, LI Gui-chun², XU Chi¹, DING Wu-han¹, JIANG Yu-qian¹, WANG Li-gang¹, LI Hu^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agricultural Non-point Source Pollution Control, China Joint Research Laboratory for Sustainable Agro-ecosystem Research between Chinese Academy of Agricultural Sciences and University of New Hampshire(CAAS-UNH), Beijing 100081, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Greenhouse vegetable (GV) fields are one of the most important sources of N_2O emissions, and drip irrigation has attracted increasing attention as an effective strategy for reducing such emissions. In the present study, we performed a two-year experiment in a GV field, which included two cucumber seasons, and used the static opaque chamber method to quantify N_2O emissions. We also discussed the influences of different irrigation methods (traditional flood irrigation and drip irrigation) on N_2O emissions and its interannual variation, in order to provide data support and theoretical basis for mitigating N_2O emissions in GV fields. Our study involved three irrigation treatments, including control (CK), flood irrigation (FP), and drip irrigation (FPD). There was no N fertilizer input for the CK treatment, whereas the organic and synthetic N inputs rates were 500 and 700 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively, for both the FP and FPD treatments, and multiple synthetic N applications were applied according to the nutrient demands of the crops. The N_2O emission peaks of the GV fields were induced by both fertilization and irrigation, and they usually lasted for 7 d after basal fertilizer application but only 3~5 d after topdressing events. Soil

收稿日期: 2017-10-09 录用日期: 2018-01-18

作者简介: 谢海宽(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事农田生态系统碳氮循环研究。E-mail: xie13673671962@163.com

* 通信作者: 李 虎 E-mail: lihu0728@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671303); 北京市自然科学基金项目(6162024); 中央级公益性科研院所基本科研业务费(1610132016042)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41671303); The Natural Science Foundation of Beijing, China(6162024); The Fundamental Research Funds for Central Non-profit Scientific Institution(1610132016042)

temperature, moisture, and air temperature significantly affected N_2O emission flux, but the dominant factors were different in 2015 and 2016; N_2O emission flux was mainly affected by soil and air temperature in 2015 but was mainly affected by soil moisture and temperature in 2016. There were no significant differences in the soil temperature or moisture of the FP or FPD treatments. Compared to FP, FPD increased crop yield also reduced the total N_2O emissions by 29.4%~35.1% on an equivalent N application rate. Compared with FP, FPD reduced N_2O emission intensity (N_2O emission per unit of economic yield) by 34.5%~37.5%, and the emission factor 47.2%~47.7% in two years. Compared to FP, FPD can significantly reduce N_2O emissions while also increasing vegetable yield, and its mitigation efficiency was no significantly interannual variation between 2015 and 2016. Therefore, FPD could be an effective N_2O mitigation strategy in GV fields and could provide reference for estimating the effects of N_2O emission on a long-term scale.

Keywords: flood irrigation; drip irrigation; greenhouse vegetable; N_2O ; interannual variability

近年来,我国蔬菜种植面积呈现持续增加的趋势。截至2015年,我国蔬菜种植面积占全国农作物总播种面积比例,已经从1995年的6.35%增长到了13.22%^[1]。其中设施菜地面积占蔬菜种植面积的18%^[2]。设施蔬菜种植系统不同于大田作物系统,不仅有独特的土壤环境,而且具有施肥量大、灌溉频繁、复种指数高等特点。而大量氮肥投入引起的 N_2O 排放等全球气候变化问题已经引起了广泛关注。有研究表明,农业生产 N_2O 排放量占全球排放总量的20%~30%^[3],其中约20%来源于蔬菜种植系统^[4]。随着社会的发展和人们生活水平的提高,设施蔬菜种植面积在未来几年中仍将呈现增加的趋势^[2]。因此研究设施菜地 N_2O 排放对于农业减排有重要意义。同时,由于我国水资源供需矛盾突出,而传统灌溉模式(大水漫灌)不仅具有耗水量大、水肥利用效率低、作物产量与品质低等缺点^[5],而且增加了土壤 N_2O 的排放^[6]。近年来,滴灌施肥作为设施菜地一种有效的节水节肥措施受到了广泛的推广和关注。滴灌施肥技术是将肥料溶解于灌溉水,通过管道将肥水溶液输送到作物根部附近土壤,使作物根系的土壤保持适宜的水肥和营养以供作物吸收利用,具有节水、节肥、提高产量的特点^[7]。滴灌施肥技术与常规漫灌技术相比,不仅可以提高作物产量10%~20%、节水50%~80%、提高水肥利用效率30%左右^[8-10];而且可以降低 N_2O 累积排放量30%~40%^[11-12]。虽然近些年来关于滴灌施肥技术对设施菜地 N_2O 排放特征影响的研究逐渐增多,然而,滴灌施肥由于其管理的复杂性,如灌溉时间长、频率高、水肥交互作用较强,对 N_2O 的减排作用仍存在较大不确定性。有研究表明灌溉方式的不同,会引起土壤湿度间存在差异。而在土壤温度适宜的情况下,土壤湿度会成为影响 N_2O 排放的主要因素,从而造成不同灌溉方式下 N_2O 排放的差异^[13]。这是由于土壤水分不仅影响微生物活性,也影响 N_2O 在土壤中的运输及向大气的扩散^[14]。也有研究表明,滴灌由于灌溉频率较传统漫灌

更高,通常会形成有利于反硝化作用发生的厌氧环境,反而增加了 N_2O 排放^[15]。尤其是在高温高湿受人为干扰强烈的设施菜地系统,势必会对 O_2 供应及氮素的迁移转化产生重要的影响,从而影响 N_2O 的产生和排放过程。因此,探讨设施菜地不同灌溉方式对 N_2O 排放的影响因素,尤其是滴灌技术对 N_2O 排放的影响的长期年际效应,将会为 N_2O 排放提供科学的数据支撑,对于制定合适的农田温室气体减排措施有重要意义。本研究拟通过对京郊典型设施蔬菜黄瓜在不同年份间的 N_2O 排放特征进行分析,以探讨漫灌和滴灌施肥措施下设施菜地 N_2O 排放特征及其年际差异,分析其主要因素,以明确 N_2O 排放的长期变化特征。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验地点位于北京市房山区窦店镇芦村芦西园,地处东经116°01'、北纬39°38',属于暖温带半湿润半干旱季风性气候,四季分明,年平均气温11.9℃,年平均降水量583 mm,年相对湿度为61%,全年平均日照时数2554 h。日光温室为普通的半拱圆形塑料大棚,长155 m、宽6 m。大棚塑料膜无色透明,其顶部和底部分别设有通风口。温室塑料膜上盖有棉被,以保持严寒季节夜间的温度,雨雪天气时封闭通风口防止雨水进入。蔬菜定植后覆盖黑色地膜以保持水分、提高地温、防止杂草。供试土壤为褐土,质地为粉质壤土,土壤表层(0~20 cm)基本理化性质见表1。

1.2 试验设计

本试验观测时间为2015年2—6月、2016年3—7月,种植作物为黄瓜。试验设置3个处理,分别为:对照处理(CK),漫灌施肥处理(FP),滴灌施肥处理(FPD)。本研究主要关注在相同施氮量条件下,漫灌施肥和滴灌施肥 N_2O 排放的差异,因此没有设置滴灌不施肥处理。每个处理设置3次重复,共9个试验小

表 1 土壤剖面基本理化性质
Table 1 Soil physical and chemical properties for soil profile

土壤	有机质/%	pH	全氮/%	全磷/%	全钾/%	碱解氮/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹
褐土	5.5	7.57	0.32	0.16	2.69	145.56	782.84	105.04

区,每个小区由隔离带隔开,小区面积为 6 m×8 m=48 m²。不同年份各处理施肥量和灌溉水量如表 2 所示。有机肥为牛粪(含水量 41.59%),氮肥为尿素(含氮量 46.4%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 12%),钾肥为硫酸钾(K₂O 33%)。有机肥和过磷酸钙均做底肥于定植前一次性施入,硫酸钾和尿素分基肥和追肥在不同时期施用于各小区内。基肥撒施后翻耕入土,作物定植后漫灌;追肥时 CK 处理和 FP 处理灌溉方式为漫灌,肥料溶于水后随水施入,而 FPD 处理采用滴灌方式进行灌溉,整个生长季滴灌水量是漫灌水量的 75%(基肥时统一为漫灌灌溉,各小区灌溉量相同),化肥氮和钾基肥与追肥比例为 3:7。供试黄瓜品种为金胚 98,2015 年黄瓜季于 2015 年 2 月 6 日定植,6 月 26 日拉秧;2016 年黄瓜季于 2016 年 3 月 9 日定植,7 月 8 日拉秧。2015 年和 2016 年黄瓜整个生长季基肥和追肥详细的施肥灌溉管理措施如表 3 所示。

1.3 取样和测定方法

采用自动静态箱-气相色谱法进行 N₂O 气体的采集。采样箱箱体由不锈钢材料制成,箱体外用 30 mm 厚的塑料泡沫板包裹保温,根据设施蔬菜的株行距,顶箱箱体设计为 70 cm×80 cm×60 cm 的长方体,从而最大限度保证取样气体的代表性。当植株生长超过 60 cm 时,增加中段箱(70 cm×80 cm×60 cm)以保证植株的正常生长和取样的顺利进行。底座(70 cm×80 cm×25 cm)由不锈钢制成,于定植时埋入地下。采

表 2 各处理施肥量和灌溉量

Table 2 Total fertilizer and irrigation amount in different treatments

种植季	处理	有机肥/ kg N·hm ⁻²	化肥/kg·hm ⁻²			总灌溉量/ mm
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
2015 年 黄瓜季	CK	0	0	120	200	399
	FP	500	700	120	200	399
	FPD	500	700	120	200	319
2016 年 黄瓜季	CK	0	0	120	200	418
	FP	500	700	120	200	418
	FPD	500	700	120	200	335

样时,将箱体置于底座上,用水密封,确保密封性良好;打开电源开关,自动抽取箱内气体于气袋中,每隔 6 min 取样一次,共取样 5 次。通过箱体上的显示屏同时读取箱体温度以及 5 cm 土壤温度。每次取样时间为早上 8:00—10:00,施肥和灌水后逐日观测一周,基肥延长观测时间,直至各处理与不施氮处理的 N₂O 排放量无差异为止,其余时间每周采样 1~2 次。气袋中的样品用改进的 Agilent 7890A 气相色谱仪分析 N₂O 浓度。各处理 15 cm 土壤体积含水量用 TRIME-PICO 64 测定。

1.4 数据分析

根据气体浓度随时间的变化速率计算气体排放通量。气体通量(F)计算公式为:

$$F=\rho\cdot H\cdot\frac{dc}{dt}\cdot\frac{273}{273+T}\cdot\frac{P}{P_0}$$

表 3 2015 年黄瓜季和 2016 年黄瓜季详细的灌溉施肥管理表
Table 3 Water and fertilizer management practices during the 2015—2016 growth periods

种植季	处理	基肥、灌水量(日期:施氮量、灌水量)/ kg·N·hm ⁻² 、mm	灌水方式	追肥、灌水量(日期:施氮量、灌水量)/ kg·N·hm ⁻² 、mm	灌水方式
2015 年黄瓜季	CK	2/6:0,77.48	漫灌	3/14:0,45.95;3/29:0,71.34;4/14:0,64.62; 5/11:0,52.76;5/25:0,44.64;6/8:0,42.82	漫灌
	FP	2/6:210,77.48	漫灌	3/14:70,45.95;3/29:70,71.34;4/14:70,64.62; 5/11:70,52.76;5/25:70,44.64;6/8:140,42.82	漫灌
	FPD	2/6:210,77.48	漫灌	3/14:70,34.4;3/29:70,53.52;4/14:70,48.47; 5/11:70,39.58;5/25:70,33.48;6/8:140,32.12	滴灌
2016 年黄瓜季	CK	3/9:0,87.17	漫灌	4/15:0,59.22;4/24:70,42.34;5/9:70,47.81; 5/20:70,85.31;6/2:70,59.53;6/8:140,36.56	漫灌
	FP	3/9:210,87.17	漫灌	4/15:70,59.22;4/24:70,42.34;5/9:70,47.81; 5/20:70,85.31;6/2:70,59.53;6/8:140,36.56	漫灌
	FPD	3/9:210,87.17	漫灌	4/15:70,44.38;4/24:70,31.72;5/9:70,35.78; 5/20:70,64.06;6/2:70,44.69;6/8:140,27.5	滴灌

式中: F 为 N_2O 的排放通量,正值表示土壤向大气排放,负值表示吸收, $mg\ N_2O-N\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$; ρ 为标准状态下气体的密度, $g\cdot L^{-1}$; H 为采样箱气室高度, m ; T 为采样箱内气温, $^{\circ}C$; dc/dt 为采样箱内 N_2O 气体浓度随时间变化的速率, $\mu L\cdot L^{-1}\cdot h^{-1}$; P 为采样时气压, $mmHg$; P_0 为标准大气压, $mmHg$; $P/P_0\approx 1$ 。

利用内插法计算相邻两次监测之间未监测日期的排放量,然后将每天的交换通量累加可得到年度气体排放的总量。

N_2O 排放强度指形成单位经济产量 N_2O 排放量,即 N_2O 排放总量与相应处理作物产量的比值。

N_2O 排放系数指施肥处理 N_2O 排放总量与对照处理 N_2O 排放总量之差占肥料投入量的比值。

采用Excel 2013和SAS 9.3统计软件对实验数据进行计算、制图和统计分析。

2 结果与分析

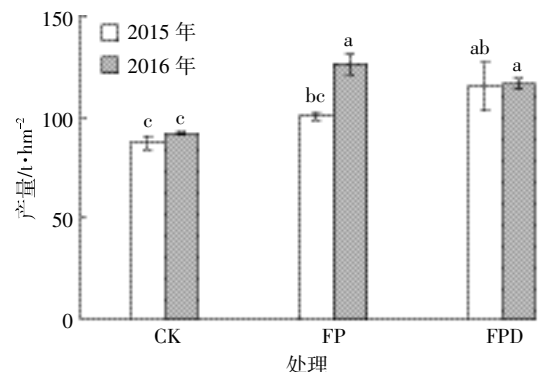
2.1 不同灌溉方式对产量和环境条件的影响

从不同灌溉方式下作物产量(图1)来看,2015年FP处理产量为 $100.2\ t\cdot hm^{-2}$,FPD处理产量增加了14.6%,达到了 $114.9\ t\cdot hm^{-2}$ 。2016年结果也相似,FP处理产量为 $119.5\ t\cdot hm^{-2}$,FPD处理产量增加了2%,达到了 $121.8\ t\cdot hm^{-2}$ 。从各处理土壤孔隙含水量(WFPS)变化特征(图2)来看,CK、FP、FPD处理2015年土壤WFPS范围分别为56.0%~77.5%、56.5%~80.7%、58.0%~78.8%;2016年范围分别为57.1%~81.3%、57.8%~82.4%、56.4%~80.4%。从土壤5 cm温度(图3)来看,各处理土壤温度均表现为相似的变化特征,CK、FP、FPD处理2015年土壤5 cm温度范围分别为9.1~27.1、8.6~27.0、9.1~26.3 $^{\circ}C$;2016年范围分别为15.4~26.3、15.4~28.3、16.2~25.4 $^{\circ}C$ 。FP与FPD处理之

间土壤WFPS、5 cm温度没有显著差异,说明与漫灌相比,滴灌并没有显著改变土壤WFPS和土壤5 cm温度。而土壤5 cm温度在2015年和2016年间存在极显著的年际差异($P<0.01$),这主要由棚内气温年际变化造成,2015年棚内气温变化范围为14.0~37.8 $^{\circ}C$,2016年棚内气温变化范围为22.5~35.8 $^{\circ}C$,比2015年明显增加。

2.2 不同灌溉方式对 N_2O 排放通量的影响及影响因素

从 N_2O 排放通量(图4)来看,2015年和2016年黄瓜季的整个监测周期内, N_2O 排放通量表现出相似的变化趋势:灌溉、灌溉施肥后各处理都会出现 N_2O 排放峰,施入基肥后,峰值持续7 d左右,追肥后峰值一般持续3~5 d,并且基肥期 N_2O 排放峰高于追肥期。各处理 N_2O 排放通量平均值的次序为FP>FPD>CK,其中CK处理 N_2O 排放通量一直保持着较低水平,2015年为 $0.04\sim 4.40\ mg\ N\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$,2016年为 $0.16\sim 4.02\ mg\ N\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$ 。CK、FP、FPD处理在灌溉、灌溉施肥事件后,均出现明显的 N_2O 排放峰,说明施肥和灌



不同字母表明在 $P<0.05$ 水平下存在显著差异。下同
Different letters indicate significant different at 0.05 level. The same below

图1 各处理产量变化

Figure 1 Dynamic changes of yield for each treatment

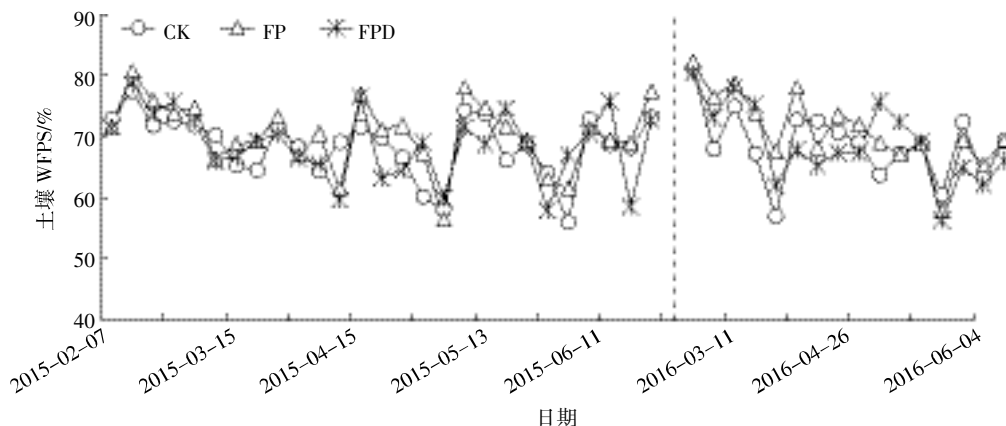


图2 各处理土壤孔隙含水量(WFPS)变化

Figure 2 Dynamic changes of soil water-filled pore space for each treatment

溉方式会影响 N₂O 的排放通量。不同灌溉方式下土壤 N₂O 排放通量差异明显,与 FP 处理相比,2015 年 FPD 处理 N₂O 平均排放通量减少 26.3%,2016 年减少 27.5%。从环境因子与 N₂O 排放通量的关系来看(表 4),2015 年各处理土壤 WFPS 与 N₂O 排放通量间均没有显著相关关系;2016 年 FP 处理土壤 WFPS 与 N₂O 排放通量达到了极显著相关 ($P<0.01$)。2015 年 FPD 处理土壤 5 cm 温度与 N₂O 排放通量没有显著相关关系,而其他处理两年的研究均表明 5 cm 温度与 N₂O 排放通量呈极显著负相关关系。2015 年 CK、FP 处理气温与 N₂O 排放通量达到极显著负相关关系 ($P<0.01$);2016 年各处理气温与 N₂O 排放通量均没有显著相关关系。

2.3 不同灌溉方式对 N₂O 排放总量、排放强度、排放系数的影响及年际差异

从 N₂O 排放总量(图 5)来看,CK、FP、FPD 3 个处理 2015 年 N₂O 排放总量分别为 11.4、29.8、21.0 kg

N·hm⁻²;2016 年分别为 7.3、28.7、18.6 kg N·hm⁻²。分析表明,CK、FP 处理 N₂O 排放总量存在显著差异 ($P<0.05$),说明氮肥的施用对 N₂O 排放总量影响较大。而施用氮肥的处理中,FP 处理的 N₂O 排放总量与 FPD 处理之间也存在显著差异 ($P<0.05$),并且表现为 FP

表 4 土壤 N₂O 排放通量与土壤 WFPS、土温和气温的相关分析(r)

Table 4 Pearson correlation coefficients of N₂O fluxes with soil moisture, soil temperature and air temperature in different management treatments(r)

处理	0~15 cm 土壤 WFPS		0~5 cm 土壤温度		气温	
	2015 年	2016 年	2015 年	2016 年	2015 年	2016 年
CK	0.47	0.68*	-0.65**	-0.51**	-0.55**	-0.16
FP	0.1	0.67**	-0.61**	-0.66**	-0.46**	-0.26
FPD	0.2	0.63*	-0.24	-0.72**	-0.34	-0.18

注:* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平下差异显著。

Note: * and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively.

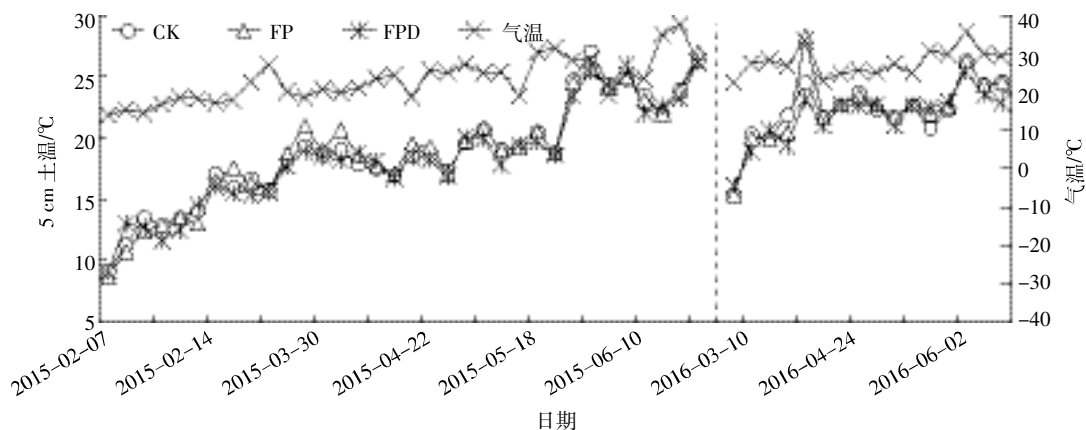
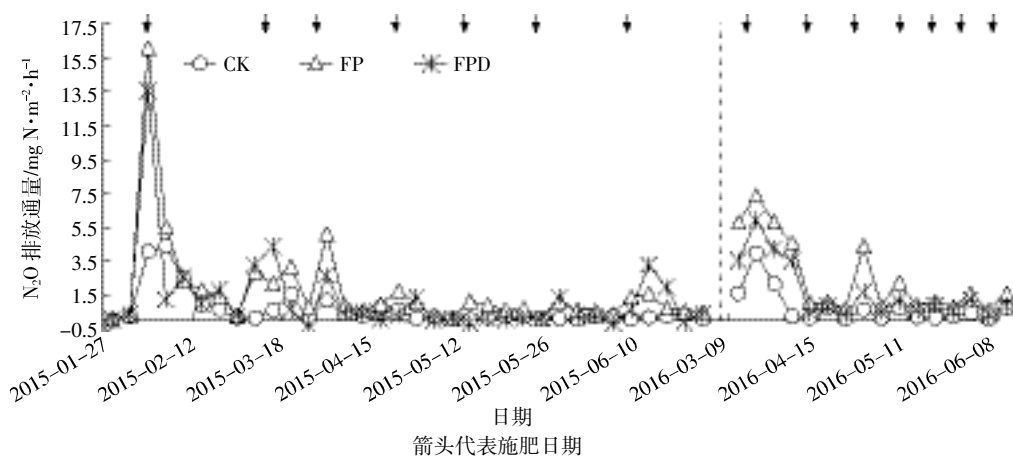


图 3 各处理土壤 5 cm 温度和气温的变化

Figure 3 Dynamic changes of 5 cm soil temperature and air temperature for each treatment



箭头代表施肥日期
Arrows represent fertilization dates

图 4 不同处理 N₂O 排放通量动态变化

Figure 4 Years dynamics of N₂O emission fluxes in different management treatments

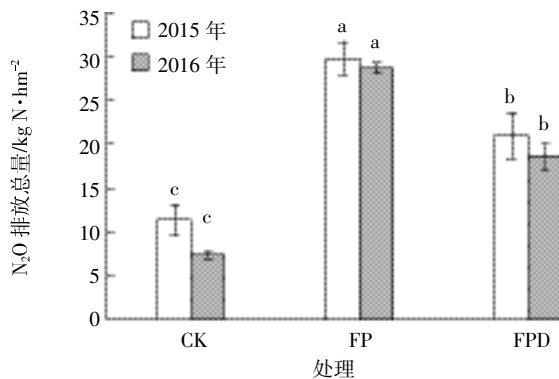


图5 各处理在不同年份土壤 N₂O 排放总量

Figure 5 The cumulative N₂O emission for each treatment in 2015 and 2016

处理 N₂O 排放量高于 FPD 处理。比较各处理 N₂O 排放总量的年际差异,方差分析结果显示,CK、FP、FPD 处理 N₂O 排放总量均没有显著的年际差异。比较不同年份间滴灌减少 N₂O 排放的效果,与 FP 处理相比,2015 年 FPD 处理减少 N₂O 排放总量 29.4%;2016 年 FPD 处理减少 N₂O 排放总量 35.1%。虽然滴灌在减少 N₂O 排放方面存在一定的波动,但是这种年际差异并没有达到显著水平。从 N₂O 排放强度(图 6)来看,CK、FP、FPD 3 个处理 2015 年 N₂O 排放强度分别为 0.13、0.29、0.19 kg N·t⁻¹;2016 年分别为 0.08、0.24、0.15 kg N·t⁻¹。FP 处理与 FPD 处理之间 N₂O 排放强度存在显著差异($P<0.05$)。与 FP 处理相比,2015 年 FPD 处理减少 N₂O 排放强度 34.5%;2016 年 FPD 处理减少 N₂O 排放强度 37.5%。并且双因素方差分析结果表明,FPD 处理在 2015 年和 2016 年减少 N₂O 排放强度方面没有显著差异。从 N₂O 排放系数来看,FP 处理与 FPD 处理之间 N₂O 排放系数存在显著差异($P<0.05$),相同处理在不同年份间没有显著差异。2015、2016 年 FP 处理 N₂O 排放系数分别为 1.53、

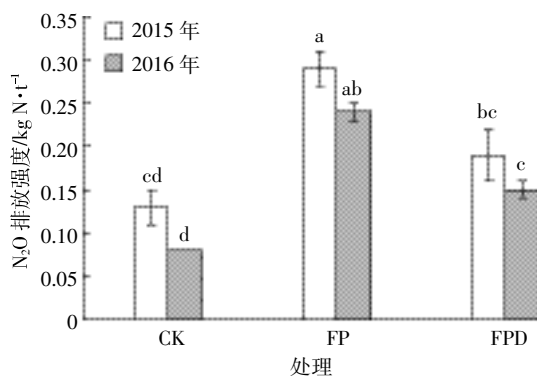


图6 各处理在不同年份土壤 N₂O 排放强度

Figure 6 The N₂O emission intensity for each treatment in 2015 and 2016

1.78,均高于 IPCC 的默认值 1%。而 FPD 处理的 N₂O 排放系数(0.80、0.94)均低于 1%这个默认值。与 FP 处理相比,FPD 处理两年间平均降低 N₂O 排放系数 47%,并且没有显著的年际差异。

3 讨论

3.1 不同灌溉方式下 N₂O 排放特征及影响因素

本研究两年的数据结果均显示,灌溉、灌溉施肥后各处理都会出现 N₂O 排放峰,施入基肥后,峰值持续 7 d 左右,追肥一般持续 3~5 d,并且基肥期 N₂O 排放通量高于追肥期。这是由于与追肥期相比,基肥期有机肥的施用对于反硝化速率的刺激作用高于化学氮肥^[16]。因为一方面有机肥作为碳源,可直接为反硝化细菌提供能量和电子,从而促进反硝化作用;另一方面,有机肥可以激发自养硝化和异养硝化,为反硝化作用提供底物^[16-17],从而增加 N₂O 的产生。王艳丽等^[11]、Vallejo 等^[18]的研究中也出现了类似的现象。各处理两年的研究均出现 7 次 N₂O 排放峰,且都发生在灌溉施肥后。这是由于外源氮的投入提高了土壤硝化势,以及氨氧化细菌和氨氧化古菌的数量,此外土壤的干湿交替使得土壤中硝化作用和反硝化作用交替循环进行,从而促进了 N₂O 的产生^[17,19]。

土壤湿度是影响 N₂O 排放的重要影响因子之一^[20],并且大多数研究表明土壤湿度与 N₂O 排放呈显著正相关关系^[6,21]。但本研究中土壤湿度在不同年份间对 N₂O 排放的影响不同,如 2015 年土壤 WFPS 与 N₂O 排放没有显著相关关系,但 2016 年土壤 WFPS 与土壤 N₂O 排放呈显著正相关($P<0.05$)或极显著正相关($P<0.01$)关系。在同一试验基地 2013—2014 年的研究^[11]中土壤 WFPS 与 N₂O 排放也呈现显著正相关关系。2015 年这种差异可能是由于灌水间隔时间较前两年长,土壤湿度和温度的年际差异变化造成的^[12]。土壤温度是影响 N₂O 排放的另一重要因子,本研究结果表明土壤 5 cm 温度与 N₂O 排放呈现出极显著负相关关系($P<0.01$),这是由于黄瓜主要生长季为春夏季, N₂O 排放随施肥量增加而增加,此时, N₂O 排放主要受施肥的影响。这与张婧等^[22]的研究结果相一致,当气温较高时,施氮量是影响 N₂O 排放的主要因素。而于亚军等^[23]的研究表明,土壤温度与 N₂O 排放呈显著正相关关系。韩冰等^[6]在设施菜地研究结果显示土壤温度与 N₂O 排放并没有显著相关关系。这说明土壤 N₂O 排放是受温度、湿度、施氮量共同调节的,这种因子之间的交互作用可能会掩盖单一因子对 N₂O 排放

的影响,因此今后也应该关注不同灌溉方式下温度、湿度及施肥量的交互作用对 N₂O 排放的影响机理。

3.2 不同灌溉方式对 N₂O 排放总量、排放强度的影响及年际差异分析

从各处理 N₂O 排放总量、排放强度、排放系数来看,2015 年滴灌施肥方式比漫灌施肥方式低 29.4%、34.5%、47.7%;2016 年滴灌施肥方式比漫灌施肥方式低 35.1%、37.5%、47.2%。结合不同灌溉方式下作物产量可以发现,与漫灌施肥方式相比,滴灌施肥在保障作物产量的前提下,能够减少土壤 N₂O 排放。不同灌溉方式下土壤产生 N₂O 主要途径存在差异,漫灌方式表层土壤(0~30 cm)湿润比滴灌迅速,当灌溉使土壤迅速充分湿润时,易形成厌氧环境,使得土壤反硝化菌活性更高^[6],从而增加反硝化作用产生的 N₂O^[24]。而与漫灌方式相比,滴灌不仅可以降低土壤孔隙含水量,使得反硝化作用产生的 N₂O 受到抑制^[21,24];而且滴头附近易形成湿度较大区域,当滴头附近土壤 WFPS 大于 80%时,产生的 N₂O 会进一步还原为 N₂^[25],进而减少滴灌条件下 N₂O 的产生。此外,滴灌施肥养分通过管道直接输送到作物根部,提高了其利用效率,促进作物对氮素的吸收利用,进而降低了硝化和反硝化作用反应底物浓度,从而减少 N₂O 排放^[11,26]。本研究中滴灌施肥没有显著降低土壤湿度,说明滴灌减少 N₂O 排放可能是由于滴头附近湿度过大以及提高了氮肥利用效率引起的。然而由于这些数据的不可获取性,下一步需对其进行观测分析,从机理上进一步解释。

从 N₂O 排放总量的年际差异来看,各处理 N₂O 排放总量年际差异不显著。这是由于设施大棚是一个相对稳定的环境,并且土壤的温度、湿度的年际变化较小。其中漫灌施肥处理的年际差异最小为 1.08 kg N·hm⁻²;对照处理的 N₂O 排放量年际差异最大为 4.04 kg N·hm⁻²。这是由于对照处理硝化反硝化作用所需底物得不到有效补充,其 N₂O 排放总量的年际差异较大;漫灌施肥处理硝化反硝化作用底物浓度充足,因此其 N₂O 排放总量的年际差异较小。而 Cai 等^[27]在大田实验的研究结果表明 N₂O 排放总量的年际差异显著,Kusa 等^[28]研究也表明 N₂O 排放的年际差异显著,达到了 3.5~15.6 kg N·hm⁻²。可见设施菜地与大田作物的 N₂O 排放年际差异有很大不同,然而目前关于设施菜地 N₂O 排放的年际差异的研究还较少,今后可以关注设施菜地 N₂O 排放的年际差异,以探讨设施菜地 N₂O 长期排放特征。从 N₂O 排放强度的年际差异来

看,各处理 N₂O 排放强度年际差异不显著,并且波动范围较小(0.04~0.05 kg N·t⁻¹)。综合考虑,在未来的研究中,如果没有多年的观测数据,可以用当年的排放强度变化估算长期的减排效果,以减少田间观测巨大的时间成本和经济成本。分析产量与 N₂O 排放量和排放强度的关系发现,产量与 N₂O 排放量、排放强度间存在一个此消彼长的趋势,这是由于当作物吸收更多氮素的时候,相应损失的氮素就会减少,从而间接减少 N₂O 排放量、排放强度。因此提高作物的氮素吸收率,也是减少 N₂O 排放的一个重要途径。

4 结论

(1)设施菜地施肥和灌溉是引起 N₂O 排放峰的主要因素,N₂O 排放通量的变化受土壤温度、水分和气温等因子的共同影响,不同年际之间其主要影响因素不同。

(2)氮肥施用量相同条件下,经过两年的观测,滴灌相比常规漫灌能减少 N₂O 排放总量 29.4%~35.1%,并且没有显著的年际差异,是设施菜地值得推荐的一种减排技术。

(3)滴灌相比常规漫灌能减少 N₂O 排放强度 36%、排放系数 47%左右,且不存在显著年际差异,可为长期减排效果的估算提供参考。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2016.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistic Press, 2016.
- [2] 中华人民共和国农业部. 农业部办公厅关于印发《全国设施蔬菜重点区域发展规划(2015—2020 年)》的通知[J]. 中华人民共和国农业部公报, 2015(3):33-46.
Ministry of Agriculture of the PRC. Notice issued by the General Office of the Ministry of Agriculture on issuing *The National Key Area Development Plan for Greenhouse Vegetables (2015—2020)*[J]. *Gazette of the Ministry of Agriculture of the PRC*, 2015(3): 33-46.
- [3] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [4] Zheng X H, Han S H, Huang Y, et al. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N₂O emission from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(2). doi: 10.1029/2003GB002167
- [5] 邢英英, 张富仓, 张 燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 713-726.
XING Ying-ying, ZHANG Fu-cang, ZHANG Yan, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 713-726.

- [6] 韩冰, 叶旭红, 张西超, 等. 不同灌溉方式设施土壤 N_2O 排放特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 310–321.
HAN Bing, YE Xu-hong, ZHANG Xi-chao, et al. Characteristics of soil nitrous oxide emissions and influence factors under different irrigation managements from greenhouse soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5): 310–321.
- [7] 杨晓宏, 严程明, 张江周, 等. 中国滴灌技术优缺点分析与对策[J]. 农学学报, 2014, 4(1): 76–80.
YANG Xiao-hong, YAN Cheng-ming, ZHANG Jiang-zhou, et al. The analysis of advantages and disadvantages of fertigation technology and development strategies in China[J]. *Journal of Agriculture*, 2014, 4(1): 76–80.
- [8] 刘虎成, 徐坤, 张永征, 等. 滴灌施肥技术对生姜产量及水肥利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 106–111.
LIU Hu-cheng, XU Kun, ZHANG Yong-zheng, et al. Effect of drip fertigation on yield, water and fertilizer utilization in ginger[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(1): 106–111.
- [9] 陈静, 王迎春, 李虎, 等. 滴灌施肥对免耕冬小麦水分利用及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10): 1966–1975.
CHEN Jing, WANG Ying-chun, LI Hu, et al. Effects of drip fertigation with no-tillage on water use efficiency and yield of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(10): 1966–1975.
- [10] 何帅, 尹飞虎, 马富裕. 不同灌溉量对滴灌棉花产量及土壤墒情的影响[J]. 新疆农垦科技, 2015(10): 40–42.
HE Shuai, YIN Fei-hu, MA Fu-yu. Effects of different irrigation amount on yield and soil moisture of cotton under drip irrigation[J]. *Xinjiang Farm Research of Science and Technology*, 2015(10): 40–42.
- [11] 王艳丽, 李虎, 孙媛, 等. 水肥一体化下设施菜地 N_2O 排放[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 2005–2014.
WANG Yan-li, LI Hu, SUN Yuan, et al. N_2O emissions from a vegetable field with fertigation management and under greenhouse conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(7): 2005–2014.
- [12] 江雨倩, 李虎, 王艳丽, 等. 滴灌施肥对设施菜地 N_2O 排放的影响及减排贡献[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1616–1624.
JIANG Yu-qian, LI Hu, WANG Yan-li, et al. Effects of fertigation on N_2O emissions and their mitigation in greenhouse vegetable fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1616–1624.
- [13] 张西超, 叶旭红, 韩冰, 等. 灌溉方式对设施土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(10): 1487–1496.
ZHANG Xi-chao, YE Xu-hong, HAN Bing, et al. Effects of irrigation methods on emissions of greenhouse gases from facilities soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(10): 1487–1496.
- [14] 潘莹, 胡正华, 吴扬周, 等. 保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2771–2775.
PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, et al. Effects of conservation tillage on soil CO_2 and N_2O emission during the following winter-wheat season[J]. *Environmental Sciences*, 2014, 35(7): 2771–2775.
- [15] 王维汉, 毛钱, 严爱兰. 滴灌下青椒地 N_2O 排放规律研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(7): 31–34.
WANG Wei-han, MAO Qian, YAN Ai-lan. N_2O emission from green pepper field under drip irrigation[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(7): 31–34.
- [16] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 292–304.
WANG Jing, CHENG Yi, CAI Zu-cong, et al. Effect of long-term fertilization on key processes of soil nitrogen cycling in agricultural soil: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2): 292–304.
- [17] 吕玉, 周龙, 龙光强, 等. 不同氮水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 3229–3236.
LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, et al. Effect of different nitrogen rates on the nitrification potential and abundance of ammonia-oxidizer in intercropping maize soils[J]. *Environmental Sciences*, 2016, 37(8): 3229–3236.
- [18] Vallejo A, Skiba U M, García-Torres L, et al. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced fertilization with treated pig slurries and composts[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2782–2793.
- [19] Broken W, Matzner E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(4): 808–824.
- [20] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展[J]. 中国农业气象, 2002, 23(4): 47–52.
XIE Jun-fei, LI Yu-e. A review of studies on mechanism of greenhouse gas(GHC) emission and its affecting factors in arable soils[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2002, 23(4): 47–52.
- [21] Kallenbach C M, Rolston D E, Horwath W R. Cover cropping affects soil N_2O and CO_2 emissions differently depending on type of irrigation[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137(3/4): 251–260.
- [22] 张婧, 李虎, 王立刚, 等. 京郊典型设施蔬菜地土壤 N_2O 排放特征[J]. 生态学报, 2014, 34(14): 4088–4098.
ZHANG Jing, LI Hu, WANG Li-gang, et al. Characteristics of nitrous oxide emissions from typical greenhouse vegetable fields in Beijing suburbs[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(14): 4088–4098.
- [23] 于亚军, 朱波, 荆光军. 成都平原土壤-蔬菜系统 N_2O 排放特征[J]. 中国环境科学, 2008, 28(4): 313–318.
YU Ya-jun, ZHU Bo, JING Guang-jun. N_2O emission from soil-vegetable system and impact factors in Chengdu Plain of Sichuan Basin[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(4): 313–318.
- [24] Sánchez-Martín L, Arce A, Benito A, et al. Influence of drip and furrow irrigation systems on nitrogen oxide emissions from a horticultural crop[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1698–1706.
- [25] Aguilera E, Lassaletta L, Sanz-Cobena A, et al. The potential of organic fertilizers and water management to reduce N_2O emissions in Mediterranean climate cropping systems: A review[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 164(4): 32–52.
- [26] Kennedy T L, Suddick E C, Six J. Reduced nitrous oxide emissions and increased yields in California tomato cropping systems under drip irrigation and fertigation[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 170(8): 16–27.
- [27] Cai Y J, Ding W X, Luo J F. Nitrous oxide emissions from Chinese maize-wheat rotation systems: A 3-year field measurement[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 65: 112–122.
- [28] Kusa K, Sawamoto T, Hu R, et al. Comparison of the closed-chamber and gas concentration gradient methods for measurement of CO_2 and N_2O fluxes in two upland field soils[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2008, 54(5): 777–785.