

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.

## 滴灌施肥对设施菜地 $N_2O$ 排放的影响及减排贡献

江雨倩, 李虎\*, 王艳丽, 张婧, 孙媛, 王立刚, 黄诚诚, 张建峰

(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)

**摘要:**以京郊典型设施菜地为研究对象,设置了农民习惯(FP)、水肥一体化(FPD)、优化水肥一体化(OPTD)和对照(CK)4个处理,采用静态箱-气相色谱法,分析了设施菜地  $N_2O$  排放特征及其影响因素,评估了滴灌施肥对水氮利用效率的影响和  $N_2O$  排放量的减排贡献。结果表明: $N_2O$  排在施肥和灌溉事件后呈现出短而急促的排放峰,基肥期排放峰持续 10 d 左右,追肥持续时间为 3~5 d,水肥一体化技术能降低  $N_2O$  排放峰值和持续时间, $N_2O$  排放通量变化范围为  $-2.67\sim 22.56\text{ mg N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;在保持作物产量的条件下,FPD、OPTD 处理分别比 FP 处理减少  $N_2O$  排放 29.41%、32.63%,FPD 处理的氮肥偏生产力与灌溉水利用效率比漫灌 FP 处理分别增加 14.62%和 43.54%。可见,在相同施氮量的条件下,改常规漫灌方式为滴灌,能降低设施菜地  $N_2O$  排放 29.4%,同时氮肥和灌溉水利用效率分别提高 14.62%和 43.54%,是未来设施菜地值得推荐的一种生产技术。

**关键词:**滴灌施肥;设施菜地; $N_2O$  排放;减排贡献;水肥利用效率

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)08-1616-09 doi:10.11654/jaes.2016-0109

### Effects of fertigation on $N_2O$ emissions and their mitigation in greenhouse vegetable fields

JIANG Yu-qian, LI Hu\*, WANG Yan-li, ZHANG Jing, SUN Yuan, WANG Li-gang, HUANG Cheng-cheng, ZHANG Jian-feng

(Key Laboratory of Non-point Source Pollution Control, Ministry of Agriculture; CAAS-UNH Joint Laboratory for Sustainable Agro-ecosystem Research; Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In this paper, four treatments, i.e. control (CK), farmers' practice (FP), farmers' practice with drip irrigation (FPD), and optimal fertilization with drip irrigation (OPTD), were conducted in the suburbs of Beijing. FPD consisted of drip irrigation with fertilizers dissolved in the irrigation water. OPTD had the same fertigation but N fertilizer was reduced by 40%. Soil  $N_2O$  fluxes were measured year round by static chambers. Soil temperature, moisture, and nitrate levels were monitored in parallel with  $N_2O$  measurements for all plots. Finally, the effects of fertigation on water and fertilizer use efficiency and soil  $N_2O$  emissions in this system were analyzed. Results indicated that the  $N_2O$  emission fluxes in the treatments ranged from  $-2.67\text{ mg N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  to  $22.56\text{ mg N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . Fertilization and irrigation were the major factors inducing  $N_2O$  emission peaks for a certain time. The  $N_2O$  emission peaks lasted for 10 days after basic fertilization, and for 3 to 5 days after additional fertilization. The fertigation management reduced  $N_2O$  emission peaks and lasting time. Soil temperature was a significant factor affecting the  $N_2O$  emissions in cucumber season. Compared with the FP treatment, FPD and OPTD reduced the annual  $N_2O$  emissions by 29.41% and 32.63%, whereas FPD treatment increased the nitrogen partial productivity and irrigation water use efficiency by 14.62% and 43.54%, respectively. It is concluded that the fertigation management practice could not only increase water and fertilizer use efficiency, but also reduce  $N_2O$  emissions while maintaining or increasing crop yields from the greenhouse vegetable system.

**Keywords:** fertigation; greenhouse vegetable;  $N_2O$  emission; mitigation contribution; water and fertilizer utilization

收稿日期:2016-01-22

基金项目:农业部“948”项目(2015-Z14);国家自然科学基金青年基金项目(41201287)

作者简介:江雨倩(1991—),女,硕士,主要从事农田温室气体研究。E-mail:jiangyuqian1991@163.com

\*通信作者:李虎 E-mail:lihu0728@sina.com

我国是蔬菜生产和消费大国,目前蔬菜种植面积占农作物总播种面积的 25.56%<sup>[1]</sup>,其中设施菜地占蔬菜种植面积的 18%<sup>[2]</sup>。与种植粮食作物的农田相比,设施菜地具有施肥量大、灌溉频繁、复种指数高等特点,其平均每公顷施氮量甚至高达 1500 kg,是大田作物的 4~6 倍,而氮肥当季利用效率甚至不到 10%<sup>[3]</sup>。过量肥料投入所导致的环境污染、土壤质量退化等一系列后果也越来越严重,而且导致 N<sub>2</sub>O 大量排放<sup>[4]</sup>。有研究表明,我国农田 N<sub>2</sub>O 排放约 20%来源于蔬菜种植<sup>[5]</sup>,总体上呈现出高能耗、高排放和高污染等特征。以北京市为例,目前设施菜地面积约为 4 万 hm<sup>2</sup>,平均施氮量为 1732 kg·hm<sup>-2</sup>,为一般蔬菜氮素吸收量的 4.5 倍,相当于大田的 3.8 倍<sup>[6-7]</sup>。随着人口的增长和人民生活水平的提高,未来十年我国蔬菜需求量也将呈现刚性增长趋势,由蔬菜种植引起的温室气体排放等环境问题也将会越来越突出。同时,由于水资源供需矛盾突出,未来可能难以用高耗水的传统种植模式(大水漫灌)来达到需求的蔬菜产量。因此,在保障农产品的有效供给下,解决日益突出的用水矛盾同时减少农业温室气体排放,是我国农业可持续发展的现实要求。

滴灌施肥是利用管道灌溉系统,能同时将水、肥溶液输送到作物根部以供其直接吸收利用,适时、适量地满足农作物对水分和养分的需求,实现水肥同步管理和高效利用的农业节水节肥技术,目前已成为我国干旱缺水地区最有效的一种节水灌溉方式。研究表明,相比传统大水漫灌方式,滴灌施肥技术不仅能提高水肥利用效率分别达到 110%和 80%<sup>[8-9]</sup>,而且在相同施氮量情况下,比常规漫灌施氮能减少 30%~40%的 N<sub>2</sub>O 累积排放量<sup>[10]</sup>。目前我国滴灌施肥技术不仅在干旱、半干旱地区使用,而且已经成为非干旱区大田作物、设施蔬菜、果树等常用的一种节水、节肥措施。然而,滴灌施肥由于灌溉时间长、频率高、水肥交互作用较强,会显著影响到土壤水分状况及 O<sub>2</sub> 供应,势必会对土壤有机质的矿化分解、氮素的迁移转化产生重要的影响,从而影响 N<sub>2</sub>O 产生和排放过程。然而,目前的研究都集中在滴灌施肥对设施菜地水氮利用率的影响上,对 N<sub>2</sub>O 等温室气体排放的影响及减排的贡献研究仍不足。因此,本研究拟同时探讨设施菜地滴灌施肥对水氮利用率和 N<sub>2</sub>O 排放的影响,明确其减排贡献,以为设施蔬菜水肥优化管理提供技术储备,并为农业应对气候变化提供基础数据。这不仅是当前科学领域的前沿研究内容,也是滴灌节水技术广

泛推广应用的依据。

## 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′,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。供试大棚长 155 m、宽 6 m,为普通的半拱圆形塑料大棚。大棚塑料膜无色透明,在顶部和底部分别设有通风口。温室塑料膜上覆盖棉被,以保持夜间温室温度,雨雪天气时封闭通风口防止雨水进入。黄瓜定植后覆盖黑色地膜以保持水分、提高地温、防止杂草。由于试验设置于蔬菜大棚内,其气温高、湿度大的特点显著有别于大田环境,年均温 21.22℃,最高温可达 60.1℃,年平均相对湿度为 72.1%。试验开始之前该日光温室连续 5 年种植蔬菜。每年种植两茬蔬菜,黄瓜和芹菜轮作:2 月初至 6 月底种植黄瓜,7 月至 8 月休闲闷棚,9 月至 12 月初种植芹菜。供试土壤为褐土,质地为粉质壤土,土壤容重为 1.21 g·cm<sup>-3</sup>,0~20 cm 土层全氮 0.32 g·kg<sup>-1</sup>、全磷 0.16 g·kg<sup>-1</sup>、全钾 2.69 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 145.56 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 782.84 mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷 105.04 mg·kg<sup>-1</sup>、有机质含量 5.5%。黄瓜品种为金胚 98。

### 1.2 试验设计

试验设计了 4 个处理,分别为:对照处理(CK),农民习惯处理(FP),滴灌施肥处理(FPD),优化滴灌施肥处理(OPTD)。每个处理设置 3 次重复,共 12 个试验小区,每个小区由隔离带隔开,小区面积为 6 m×8 m=48 m<sup>2</sup>。各处理肥料施用量和水肥管理措施如表 1、表 2 所示。有机肥和磷肥均做底肥于定植前一次性施入,钾肥和氮肥分基肥和追肥施用于各处理。有机肥为牛粪(含水量 41.59%,含氮量 1.33%),氮肥为尿素(含氮量 46.4%),磷肥为过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%),钾肥为硫酸钾(K<sub>2</sub>O 33%)。基肥撒施后翻耕入土中,作物定植后漫灌。追肥时 CK 处理和 FP 处理用漫灌,肥料溶于灌溉水后随水施入;而 FPD 处理和 OPTD 处理采用滴灌,肥料随水滴入作物根部附近土壤。黄瓜生长季滴灌水量是漫灌的 25%(基肥时统一为漫灌灌溉,灌溉量无差异),化肥氮和钾肥基追比例 3:7。黄瓜于 2015 年 2 月 6 日定植,6 月 26 日拉秧。

### 1.3 气体采集与测定

采用自动静态箱-气相色谱法进行 N<sub>2</sub>O 气体的采集。箱体由不锈钢材料(厚度 2 mm)制成,箱体外均

表1 黄瓜季详细水肥管理表  
Table 1 Water and fertilizer management practices during cucumber season

处理 Treatment	日期:基肥施氮量、灌水量 Date:Basal fertilization, Irrigation/kg N·hm <sup>-2</sup> ,mm	灌水方式 Irrigation method	日期:追肥施氮量、灌水量 Date:Additional fertilization, Irrigation/kg N·hm <sup>-2</sup> ,mm	灌水方式 Irrigation method	施化肥氮总量 Total N/kg N·hm <sup>-2</sup>
CK	2/6:0,77.48	漫灌 Flood	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 Flood	0
FP	2/6:210,77.48	漫灌 Flood	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 Flood	700
FPD	2/6:210,77.48	漫灌 Flood	3/14:70,34.46;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 Drip	700
OPTD	2/6:126,77.48	漫灌 Flood	3/14:42,34.46;3/29:42,53.52; 4/14:42,48.47;5/11:42,39.58; 5/25:42,33.48;6/8:84,32.12;	滴灌 Drip	420

表2 各处理施肥量和灌溉量

Table 2 Total fertilizer and irrigation rates in different treatments

处理 Treatment	有机肥 Manure/ kg N·hm <sup>-2</sup>	化肥(折纯)Fertilizer/kg·hm <sup>-2</sup> N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	总灌溉量 Total irrigation/mm
CK	0	0	120	200	399
FP	500	700	120	200	399
FPD	500	700	120	200	319
OPTD	500	420	120	200	319

用30 mm厚的塑料泡沫板包裹保温,当植株生长超过60 cm时,增加中段箱。根据设施黄瓜的行株距,顶箱和中段箱箱体大小设计为长80 cm、宽70 cm、高60 cm,以便覆盖一部分植株一部分裸露的土壤,从而最大限度的保障原位监测气体取样的代表性。箱体上部装有自动取气系统,能根据需要每隔一定时间将箱内气体抽取到气袋中(图1),采集气体的气管顶部处于箱体中部,箱体内部装有搅拌空气的小风扇,保证箱体内气体均匀性,并配有温湿度传感器,箱体和底座之间用水密封,底座长70 cm、宽80 cm、高25 cm,同样由不锈钢制成,于定植前埋入地下。采样时,将箱体置于底座上,打开电源开关,自动抽取箱内气体于气袋中,每隔6 min抽取一次,共取样5次。通过箱体上的显示屏同时读取箱体内温度以及5 cm土壤温度。每次取样时间一般为早上8:00—10:00<sup>[11-13]</sup>,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N<sub>2</sub>O排放通量无差异时为止,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N<sub>2</sub>O浓度。各处理15 cm土壤体积含水量用TRIME-PICO 64测定。

#### 1.4 数据计算与分析

(1)N<sub>2</sub>O排放通量:根据气体浓度随时间的变化

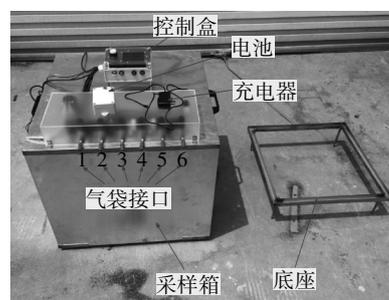


图1 自动静态采样箱示意图

Figure 1 Diagram of automatic sampling static chamber and base

速率计算气体排放通量,公式<sup>[14]</sup>为:

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

式中: $F$ 为N<sub>2</sub>O的排放通量,g N<sub>2</sub>O-N·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,负值表示土壤从大气中吸收气体,正值表示土壤向大气排放气体; $\rho$ 为标准大气压下N<sub>2</sub>O的密度,g·L<sup>-1</sup>; $H$ 为采样箱气室高度,m; $T$ 为采样箱内气温,°C; $dc/dt$ 为采样箱内N<sub>2</sub>O-N浓度的变化速率,μL·L<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>; $t$ 为扣箱后时间,h; $P$ 为采样时气压,mmHg; $P_0$ 为标准大气压,mmHg; $P/P_0 \approx 1$ 。

(2)N<sub>2</sub>O排放总量:利用内插法计算相邻两次监测之间未监测日期的排放总量,然后将每天的交换通量累加即可得到年度气体排放总量。

(3)N<sub>2</sub>O排放强度:指形成单位经济产量N<sub>2</sub>O排放量,即N<sub>2</sub>O排放总量与相应处理作物产量的比值。计算公式为:

$$I = F/Y$$

式中: $I$ 为排放强度,kg N·t<sup>-1</sup>; $F$ 为供试土壤N<sub>2</sub>O排放通量,kg N·hm<sup>-2</sup>; $Y$ 为作物产量,t·hm<sup>-2</sup>。

(4)作物产量:

$$Y=W/S$$

式中:  $W$  为每小区单位面积作物产量,  $t$ ;  $S$  为小区面积,  $hm^2$ 。

(5) N<sub>2</sub>O 排放系数: IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 将同期内由化肥氮施用引起的 N<sub>2</sub>O-N 排放量占总施氮量的百分比定义为 N<sub>2</sub>O 排放系数, 并建议化肥氮的 N<sub>2</sub>O-N 排放系数为 1%。计算公式为:

$$EF_N = 100(E_F - E_C)/N$$

式中:  $E_F$  和  $E_C$  分别为施氮肥和对照处理下作物生长季 N<sub>2</sub>O 排放总量,  $kg N \cdot hm^{-2}$ ;  $N$  为当季施氮肥量,  $kg N \cdot hm^{-2}$ 。

(6) 土壤孔隙含水量 (WFPS): 为 TRIME-PICO64 所测体积含水率转化而来。计算公式为:

$$WFPS = \frac{\theta_v}{1 - \rho_b / \rho_s}$$

式中:  $\theta_v$  是土壤体积含水量,  $cm^3 \cdot cm^{-3}$ ;  $\rho_b$  是土壤容重,  $g \cdot cm^{-3}$ ;  $\rho_s$  为土壤比重。

(7) 氮肥利用率, 用氮肥偏生产力 (PPF,  $kg \cdot kg^{-1}$ ) 表示:

$$PPF = Y/F$$

式中:  $Y$  为作物处理产量,  $kg \cdot hm^{-2}$ ;  $F$  为施氮量,  $kg \cdot hm^{-2}$ 。

(8) 灌溉水利用效率 (Irrigation water utilization efficiency,  $iWUE$ ):

$$iWUE = Y/W$$

式中:  $Y$  为作物产量,  $kg \cdot hm^{-2}$ ;  $W$  为灌溉水量,  $m^3 \cdot hm^{-2}$ 。

采用 Excel 2007 和 SAS9.2 统计软件对实验数据进行计算、制图和统计分析, 处理间各指标数值的双方面分类的方差分析采用 Duncan 法。

## 2 结果与分析

### 2.1 滴灌条件下 N<sub>2</sub>O 排放特征及影响因素

实验中各处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放峰值均发生在施肥和灌溉后, 一共出现 7 次 N<sub>2</sub>O 排放高峰, 由于外源氮施入土壤促进了土壤硝化反硝化过程的进行, 从而促进了 N<sub>2</sub>O 的排放。其中 2015 年 2 月 6 日施基肥定植后, N<sub>2</sub>O 排放峰持续了 7~10 d (图 2), 而追肥灌溉排放后峰值持续时间为 3~5 d。持续时间的差异是由于氮肥施入量不同以及反应底物不同所致, 基肥施入了折纯量为 500  $kg N \cdot hm^{-2}$  的有机肥以及 30% 的化肥氮, 而追肥分别施入 10% 化肥氮, 可见施用氮肥能显著提高 N<sub>2</sub>O 的排放。整个黄瓜生长季 N<sub>2</sub>O 排放最高出现在黄瓜定植后施基肥后的第 1 d, 以 FP 处理排放通量最高, 达到 16.09  $mg N \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ , 而在相同施肥量的条件下, FPD 处理相比 FP 处理降低了 N<sub>2</sub>O 排放峰

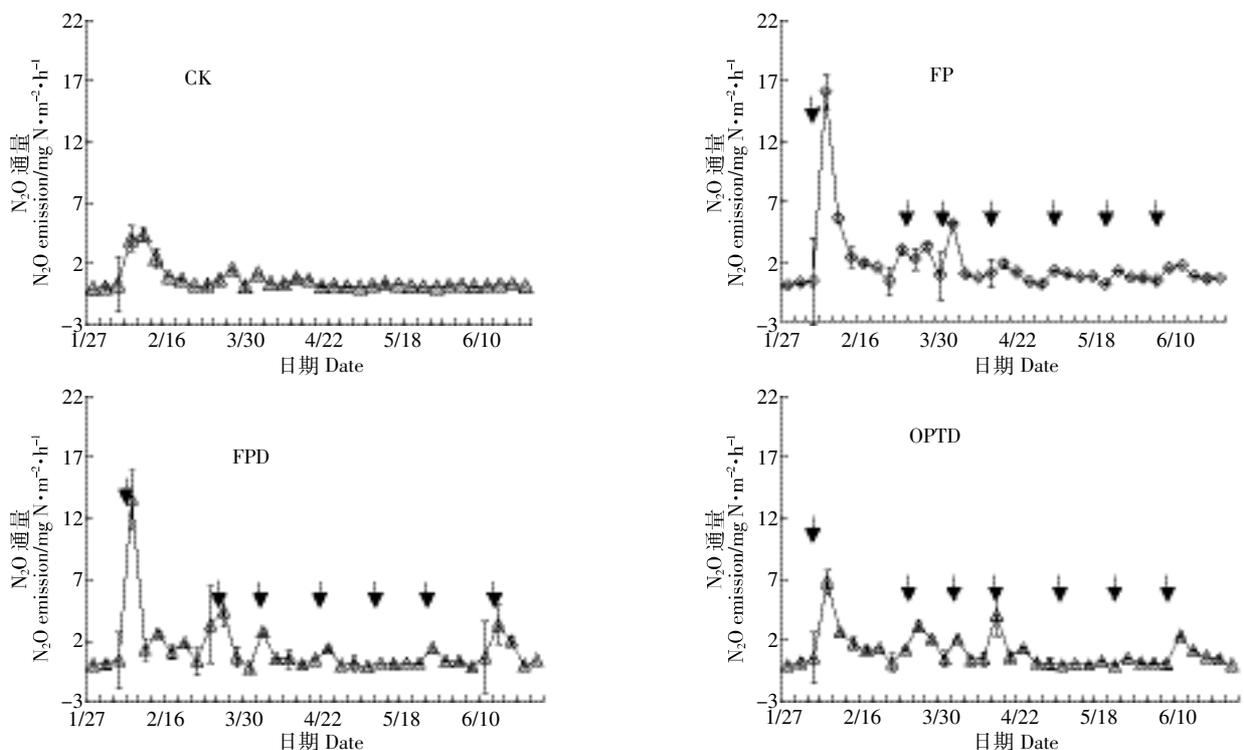


图 2 不同处理 N<sub>2</sub>O 排放通量动态变化 (箭头代表施肥日期)

Figure 2 Seasonal dynamics of N<sub>2</sub>O emission fluxes in four different management treatments (Arrows represent fertilization dates)

( $13.57 \text{ mg N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )及其持续的时间(图 2)。整个黄瓜季 CK、FP、FPD 和 OPTD 处理排放通量变化范围分别为: $0.04 \sim 4.40$ 、 $0.10 \sim 16.09$ 、 $-0.22 \sim 13.57$ 、 $0.00 \sim 6.81 \text{ mg N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。 $\text{N}_2\text{O}$  平均排放通量从大到小排列为  $\text{FP} > \text{FPD} > \text{OPTD} > \text{CK}$ , 分别为: $(0.67 \pm 0.21)$ 、 $(1.75 \pm 0.44)$ 、 $(1.29 \pm 0.64)$ 、 $(1.03 \pm 0.33) \text{ mg N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

水热条件是影响  $\text{N}_2\text{O}$  排放的主要环境因子。观测期间各处理土壤水分变化动态基本一致,处理间平均 WFPS 也没有明显差异(图 3),漫灌处理土壤表层 WFPS 为  $56.00 \sim 80.69\%$ ,滴灌处理为  $50.27\% \sim 78.57\%$ 。各处理土壤表层温度( $5 \text{ cm}$  深度)处于  $8.64 \sim 27.07 \text{ }^\circ\text{C}$ ,温度随季节变化明显。对各处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与  $5 \text{ cm}$  深度土壤温度的偏相关分析表明,CK、FP 和 OPTD 处理土壤  $5 \text{ cm}$  温度和  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量呈现显著的负相关关系( $P < 0.05$ ),而 FPD 与土壤温度无显著相关关系(表 3)。对各处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与 WFPS 的偏相关分析表明,只有 OPTD 处理土壤含水量与  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量呈显著相关性( $P < 0.05$ ),其余各处理 WFPS 与  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量无相关性(表 3)。

2.2 滴灌条件下  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量、排放强度和排放系数

不同施肥量与灌溉量对于作物生长期农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量影响不同。黄瓜季实验中各处理的排放总量

从大到小排序为  $\text{FP} > \text{FPD} > \text{OPTD} > \text{CK}$ , 常规施氮肥的处理  $\text{N}_2\text{O}$  年排放总量最高,各处理分别为( $11.36 \pm 1.77$ )、( $29.77 \pm 1.89$ )、( $21.01 \pm 2.61$ )、( $20.06 \pm 1.04$ ) $\text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 4)。不同处理间排放系数介于  $0.72\% \sim 1.53\%$  间,排放系数从大到小排序为  $\text{FP} > \text{FPD} > \text{OPTD}$ 。其中 FP 处理排放系数为  $1.53\%$ ,超出 IPCC 的默认值( $1\%$ );FPD 处理与 OPTD 处理排放系数分别为  $0.80\%$ 、 $0.72\%$ ,低于默认值。FPD 比 FP 处理减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量  $29.41\%$ ( $P < 0.05$ ),OPTD 比 FP 处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量减少  $32.63\%$ ( $P < 0.05$ ),且均达到了显著水平,说明在相同施肥量下改变施肥方式可显著减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放。而 FPD 与 OPTD 处理间排放总量差异不显著,

表 3 土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与  $5 \text{ cm}$  土温和 WFPS 的相关分析  
Table 3 Pearson's correlation coefficients of  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes with soil temperature and soil moisture in different management treatments

处理 Treatment	5 cm 土温 Soil temperature at 5 cm	土壤含水量 Soil moisture
CK	-0.65**	0.47
FP	-0.61**	0.10
FPD	-0.24	0.20
OPTD	-0.46**	0.43*

注:\*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

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

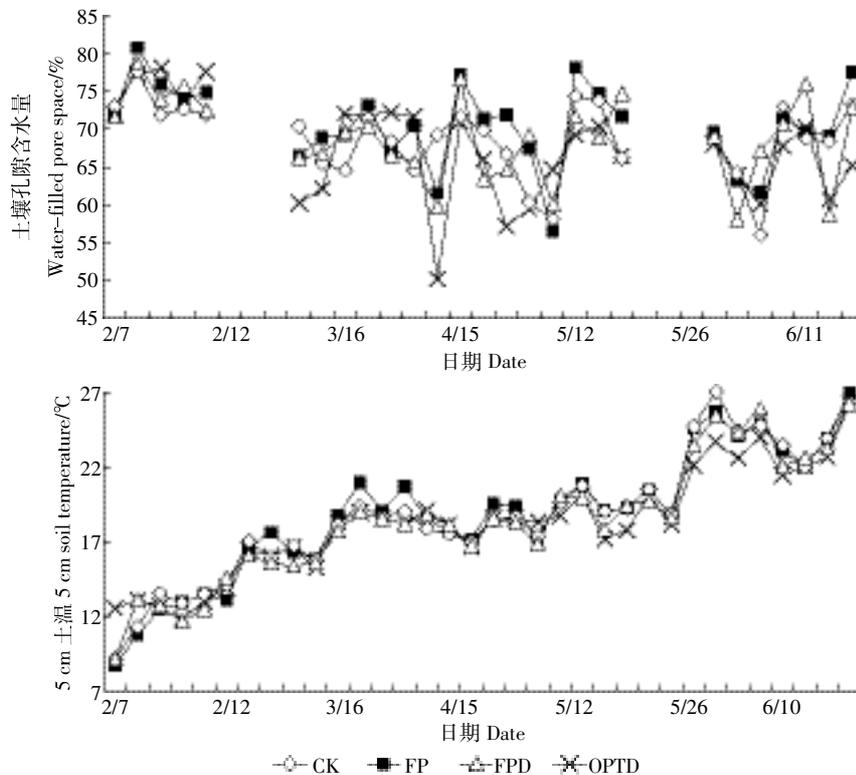


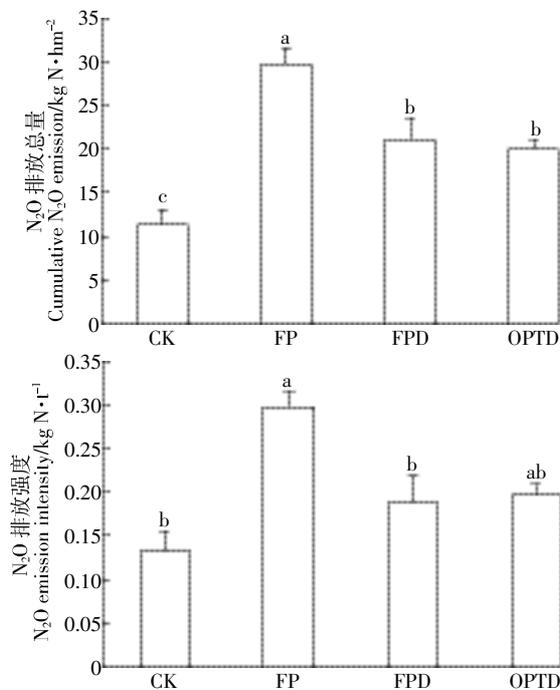
图 3 各处理  $5 \text{ cm}$  深度土壤温度、WFPS 变化

Figure 3 Dynamic changes of  $5 \text{ cm}$  soil temperature and water-filled pore space for each treatment

即在相同滴灌条件下降低氮肥施用量没有显著降低 N<sub>2</sub>O 排放。对于各处理 N<sub>2</sub>O 排放强度,与 FP 处理 (0.29 kg N·t<sup>-1</sup>) 相比,FPD 处理 (0.19 kg N·t<sup>-1</sup>) 减少了 36.77% 的 N<sub>2</sub>O 排放强度,而 OPTD 减少了 33.65% (图 4)。可见滴灌施肥措施在保持作物产量的条件下能有效减少 N<sub>2</sub>O 排放,值得推荐。

### 2.3 滴灌条件下水氮利用效率及其与 N<sub>2</sub>O 排放的关系

由表 4 可以看出,与 FP 处理相比,FPD 处理提高了设施黄瓜的产量。这是由于滴灌施肥可以精确而直接地将水分和养分输送到作物主要根系分布区,使灌溉水和氮肥利用效率分别提高了 45.54% 和 14.62%,从而增加了产量。值得一提的是,OPTD 处理相比 FP 处理虽然降低了 40% 的氮肥和 25% 的水分投入,但设施黄瓜的产量并没有降低,灌溉水和氮肥利用效率也分别提高了 27.59% 和 32.90%。此外,结合 2013—2014 年的观测数据<sup>[22]</sup>与本研究的数据,发现水肥利用效率与 N<sub>2</sub>O 排放强度具有显著的相关关系, R<sup>2</sup> 分别为 0.836 和 0.791 (图 5),灌溉水利用效率和氮肥施用效率的提高均显著减少了 N<sub>2</sub>O 的排放强度。可见,适宜的滴灌水肥管理方式在提高水肥利用效率的条件下,不仅能促进植株的营养和生殖生长、提高产量,而且对于减少 N<sub>2</sub>O 排放强度有着非常重要的作用。



不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著

图 4 不同处理 N<sub>2</sub>O 排放总量和排放强度

Figure 4 Estimated cumulative N<sub>2</sub>O emissions and N<sub>2</sub>O emission intensities of four different management treatments

## 3 讨论

### 3.1 滴灌施肥条件下 N<sub>2</sub>O 排放特征及影响因素

滴灌施肥是影响 N<sub>2</sub>O 排放的主要因素,本研究中每次施肥灌溉后各处理都会出现 N<sub>2</sub>O 的排放峰,施入基肥后 N<sub>2</sub>O 排放持续 10 d 左右,追肥一般持续 3~5 d,主要是由于本实验中基肥施入了大量的有机肥(牛粪)和化肥氮,并且远超出每次追肥的量。张婧等<sup>[14]</sup>、王艳丽等<sup>[10]</sup>对京郊设施菜地的监测结果也表明,N<sub>2</sub>O 排放峰在基肥后持续 10~15 d,追肥后持续 3~4 d。张仲新等<sup>[15]</sup>对设施菜地的研究也发现 N<sub>2</sub>O 排放出现在施肥后 0~3 d 内,但持续时间不长。而对于各处理之间,漫灌处

表 4 不同处理水肥利用效率

Table 4 Water and fertilizer use efficiencies for each treatment

处理 Treatment	产量 Yield/t·hm <sup>-2</sup>	灌溉水利用效率 iWUE/kg·m <sup>-3</sup>	氮肥偏生产力 FPF/kg·kg <sup>-1</sup>
CK	87.02±3.24b	16.33b	—
FP	100.24±1.64ab	18.81b	83.53b
FPD	114.89±11.66a	27.00a	95.74ab
OPTD	102.12±4.66ab	24.00a	111.01a

注:同列不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: Different letters after values indicate significant differences at 0.05 level.

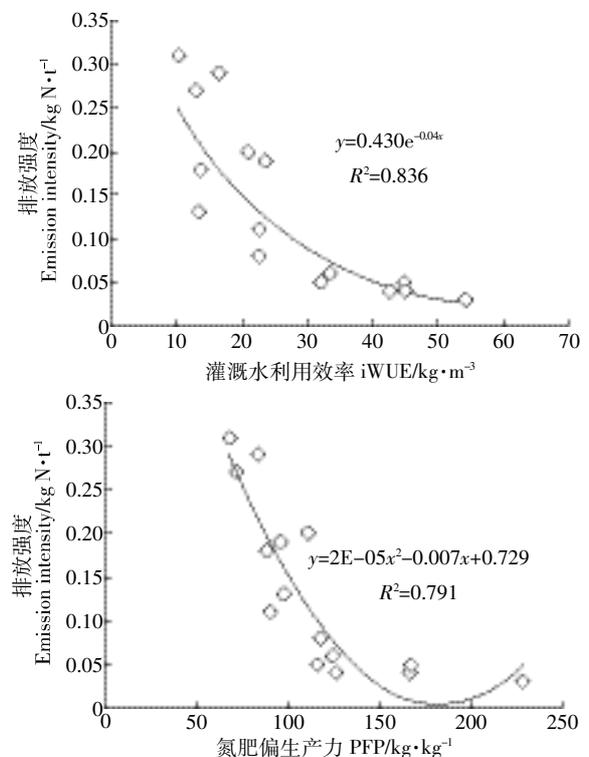


图 5 N<sub>2</sub>O 排放强度与水肥利用效率的关系

Figure 5 Relationship between N<sub>2</sub>O emission intensity and water and fertilizer use efficiencies

理  $N_2O$  每次排放峰值明显高于滴灌处理,可能由于滴灌处理湿润区是一个逐步扩大的过程,土壤水分条件不能迅速满足硝化或反硝化条件,影响了硝化和反硝化速率,因而滴灌施肥一般会产生稳定且少量的  $N_2O$  排放,相关研究也得到类似的结果<sup>[11-13]</sup>,但王维汉等、于亚军等<sup>[16-17]</sup>研究表明滴灌形成了明显的干湿交替过程,因而促进了  $N_2O$  排放。可见,滴灌施肥在不同的环境条件中对  $N_2O$  排放的影响不同。

土壤温度是影响  $N_2O$  排放的重要因子。本研究中滴灌与漫灌处理间温度差异不明显,灌溉水量的不同并没有造成两处理间的温度不同<sup>[18]</sup>。 $N_2O$  排放与 CK、FP 和 OPTD 处理土温均呈显著负相关,其主要由于在基肥期间  $N_2O$  平均排放通量大,随后是一个缓慢下降的过程,而土壤温度恰好是随着季节变化从春季到夏季而出现缓慢上升的过程,因而  $N_2O$  排放并没有表现出明显的季节动态变化规律。王艳丽等<sup>[10,22]</sup>对京郊设施黄瓜季的观测也得到了类似的结果。而于亚军等<sup>[17]</sup>研究表明,土壤温度与春季蔬菜生长期  $N_2O$  排放通量呈显著正相关,可能由于施氮量的不同造成了硝化或反硝化的反应底物浓度不同,从而温度对  $N_2O$  排放的影响也不同。土壤湿度是影响  $N_2O$  排放的又一重要因子,在同一实验基地 2013—2014 年的研究中<sup>[10,22]</sup>土壤中 WFPS 为  $N_2O$  排放主要影响因子。在本季试验中,WFPS 只对于 OPTD 处理影响显著,而对其他两个处理的影响不显著,可能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影响不同,而且温度和水分的交互作用可能掩盖了单一的水分对  $N_2O$  排放的影响。

综上所述,由于滴灌施肥可引起土壤中一系列的物理、化学及生物学属性的变化(如通气性、酸碱度、微生物群落大小与活性等),进而影响  $N_2O$  产生和排放的过程,这种影响会由于土壤条件、气候条件、反应底物浓度等的不同而不同。因此,未来在灌溉方式变化的条件下,应加强水、肥、温湿度等以及它们之间的交互作用对土壤  $N_2O$  排放的影响机理研究。

### 3.2 滴灌施肥条件下 $N_2O$ 排放总量及减排贡献

本研究中,设施黄瓜季在不改变施肥量的条件下,从漫灌方式改为滴灌方式, $N_2O$  排放量从  $(29.77 \pm 1.89) \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  减少到  $(21.01 \pm 2.61) \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,滴灌  $N_2O$  排放总量比漫灌减少了 29.41%,而在减氮 40% 的条件下, $N_2O$  排放总量滴灌比漫灌减少了 32.63%。本研究是在王艳丽等<sup>[10,22]</sup>的基础上进行的第三年实验,结合前两年的研究也表明  $N_2O$  排放总量年际差异

不大,黄瓜季  $N_2O$  排放量滴灌比漫灌分别减少 7.79% 以及 36.35%,多年的综合结果表明滴灌技术没有显著降低作物的产量,但显著减少了  $N_2O$  排放量。黄丽华等<sup>[23]</sup>对上海设施蔬菜地  $N_2O$  排放的研究表明,2006 年和 2007 年滴灌施肥区的单位作物产量  $N_2O$  排放量比常规区分别减少 1.50、1.56  $\text{g N} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,削减率分别达到 53.2% 和 58.9%。分析其原因,滴灌条件下较低的土壤孔隙含水量使得土壤中硝化作用高于反硝化作用,同时其  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  比漫灌更高,更能抑制反硝化作用<sup>[19-21]</sup>,从而减少了  $N_2O$  排放。也有研究表明<sup>[32]</sup>,滴灌滴头附近湿润的区域为  $N_2O$  排放源的可能性比较大,但滴头处的土壤 WFPS 通常会大于 80%,使得这部分土壤出现较强的反硝化作用,使  $N_2O$  进一步还原为  $N_2$ ,从而降低了  $N_2O$  的排放量。而另外一些研究者认为滴灌施肥减少  $N_2O$  排放的原因主要是:滴灌施肥条件下肥料直接施到作物根区,提高了作物肥料利用效率;滴灌施肥土壤含水量较低,反硝化产生的  $N_2O$  受到抑制<sup>[20,24-25]</sup>。Kennedy 等<sup>[26]</sup>研究也表明滴灌施肥增加了番茄产量,促进了番茄对水肥的吸收利用,减少了土壤中残留的氮素含量,因而减少了  $N_2O$  的排放。由于本文仅结合黄瓜季进行了综合研究,滴灌技术的减排机理仍需要进一步长期的观测研究。

### 3.3 滴灌施肥条件下作物产量、水肥利用效率与 $N_2O$ 排放的关系

由于滴灌适时适量地提供了设施黄瓜需要的水肥条件,促进了根系活力和对养分的吸收,有利于设施黄瓜的增产、丰产。本实验中相同施肥量下 FPD 处理产量  $(114.89 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$  高于 FP 处理  $(100.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$ ,结合 2013 和 2014 年两年的观测数据<sup>[10,22]</sup>表明,滴灌施肥条件下黄瓜产量虽然存在年际间的变化,但均比农民习惯增加了作物产量。聂斌等<sup>[27]</sup>对山东寿光的设施菜地研究结果也表明滴灌处理的产量显著高于农民习惯处理的产量。滴灌施肥降低养分及水分流失从而提高了水肥利用效率。本研究结合前两年的监测,从 2013—2015 年 FPD 处理的氮肥偏生产力分别为 72.07、90.30、95.74  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,与樊兆博等<sup>[28]</sup>在山东寿光的研究结果相近  $(85.64 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 。Zotarelli 等<sup>[29]</sup>研究也表明,滴灌较常规漫灌氮肥利用效率提高 37%~68%。周博等<sup>[30]</sup>对番茄的研究表明在相同施肥量的情况下,节水灌溉措施的水分利用效率显著高于常规灌溉。韦彦等<sup>[31]</sup>对温室黄瓜的研究结果表明,滴灌处理较漫灌水分利用效率可提高 49.90%。本研究表明滴

灌能有效地提高氮肥利用效率 14.62%~32.90%,灌溉水利用效率 27.58%~43.54%。作物水肥利用率的提高,对于减少 N<sub>2</sub>O 排放强度具有重要的作用。Van Groenigen 等<sup>[33]</sup>的研究表明提高水肥利用率与减少农业源 N<sub>2</sub>O 排放有着最直接的关系,王艳丽等<sup>[10]</sup>的研究也表明,滴灌施肥促进了作物的氮素吸收利用,相比漫灌处理其硝化和反硝化作用反应底物浓度降低,因而使得滴灌条件下 N<sub>2</sub>O 排放量更少。本研究中设施菜地土壤含水量一直保持在较高的水平,虽然形成了有利于硝化和反硝化反应的有利条件,但滴灌施肥提高了水肥利用效率,故具有显著的 N<sub>2</sub>O 减排效果。可见,滴灌施肥在保持或增加产量的前提下,既节水节肥又减排,不失为设施菜地值得推荐的一种技术。

#### 4 结论

(1)设施黄瓜生长季 N<sub>2</sub>O 排放峰值主要集中于灌水施肥事件后,基肥持续 10 d 左右,追肥持续 3~5 d,滴灌施肥能降低 N<sub>2</sub>O 排放峰值和其持续时间。

(2)相同氮肥施用量的条件下,只改变灌溉方式,滴灌相比常规漫灌能减少 N<sub>2</sub>O 排放总量 29.41%,而在减少 40%氮肥量下,在保持作物产量的条件下,滴灌施肥能显著减少 N<sub>2</sub>O 排放总量 32.63%。

(3)相同氮肥施用量的条件下,滴灌施肥比常规漫灌施肥产量能提高 14.61%,并且氮肥偏生产力和灌溉水利用效率能分别增加 14.62%和 43.54%。同时水肥利用效率与 N<sub>2</sub>O 排放强度呈显著负相关,水肥利用率的提高对减少 N<sub>2</sub>O 排放具有重要作用。

#### 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, 2013.  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013.
- [2] 郭世荣, 孙 锦, 束 胜, 等. 我国设施园艺概况及发展趋势[J]. 中国蔬菜, 2012(18): 1-4.  
GUO Shi-rong, SUN Jin, SHU Sheng, et al. Analysis of general situation, characteristics, existing problems and development trend of protected horticulture in China[J]. *China Vegetables*, 2012(18): 1-4.
- [3] 姜慧敏. 氮肥管理模式对设施菜地氮素残留与利用的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.  
JIANG Hui-min. Effects of nitrogen fertilizer management mode on nitrogen residue and utilization in greenhouse vegetable soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [4] 于亚军, 王小国, 朱 波. 紫色土菜地生态系统土壤 N<sub>2</sub>O 排放及其主要影响因素[J]. 生态学报, 2012, 36(6): 1830-1838.  
YU Ya-jun, WANG Xiao-guo, ZHU Bo. N<sub>2</sub>O emissions from vegetable farmland with purple soil and the main factors influencing these emissions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 36(6): 1830-1838.
- [5] Zheng X H, Han S H, Huang Y, et al. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N<sub>2</sub>O emission from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18. doi: 10.1029/2003GB002167
- [6] 张继宗, 刘培财, 左 强, 等. 北方设施菜地夏季不同填闲作物的吸氮效果比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2663-2667.  
ZHANG Ji-zong, LIU Pei-cai, ZUO Qiang, et al. Nitrogen uptake by different catch crops in facility vegetable field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2663-2667.
- [7] 杜连凤, 吴 琼, 赵同科, 等. 北京市郊典型农田施肥研究与分析[J]. 中国土壤与肥料, 2009(3): 75-78.  
DU Lian-feng, WU Qiong, ZHAO Tong-ke, et al. Analysis and study of typical farmland fertilization in Beijing Suburb[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009(3): 75-78.
- [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(25): 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(25): 106-111.
- [9] 周建斌, 陈竹君, 李生秀. Fertigation: 水肥调控的有效措施[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(4): 16-21.  
ZHOU Jian-bin, CHEN Zhu-jun, LI Sheng-xiu. Fertigation: Effective measures of water and fertilizer regulation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001, 19(4): 16-21.
- [10] 王艳丽, 李 虎, 王立刚, 等. 水肥一体化条件下设施菜地的 N<sub>2</sub>O 排放[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 2005-2014.  
WANG Yan-li, LI Hu, WANG Li-gang, et al. N<sub>2</sub>O emissions from a vegetable field with fertigation management and under greenhouse conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(7): 2005-2014.
- [11] 田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 等. 不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 879-888.  
TIAN Shen-zhong, NING Tang-yuan, CHI Shu-yun, et al. Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 879-888.
- [12] 李晓密, 伦小秀. 施肥与不施肥措施下小麦田的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放日变化特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 178-182.  
LI Xiao-mi, LUN Xiao-xiu. Diurnal variations of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from wheat land under the treatments of fertilization and no-fertilization[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(1): 178-182.
- [13] 段翠清, 张仁陟, 蔡立群, 等. 保护性耕作对黄土高原旱地春小麦成熟期农田温室气体通量日变化的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(21): 35-40.  
DUAN Cui-qing, ZHANG Ren-zhi, CAI Li-qun, et al. Effects of conservation tillage on daily dynamics of greenhouse gases flux from spring wheat during mature stage in dry land of the Loess Plateau[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(21): 35-40.

- [14] 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.
- [15] 张仲新, 李玉娥, 华 璐, 等. 不同施肥量对设施菜地  $N_2O$  排放通量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5):269-275.  
ZHANG Zhong-xin, LI Yu-e, HUA Luo, et al. Effects of different fertilizer levels on  $N_2O$  flux from protected vegetable land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(5):269-275.
- [16] 王维汉, 毛 前, 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, et al.  $N_2O$  Emission from green pepper field under drip irrigation[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014, 7:31-34.
- [17] 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.
- [18] Wang D, Shannon M C, Grieve C M, et al. Soil water and temperature regimes in drip and sprinkler irrigation, and implications to soybean emergence[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 43(1):15-28.
- [19] 郭树芳, 齐玉春, 董云社, 等. 滴灌对农田土壤  $CO_2$  和  $N_2O$  产生与排放的影响研究进展[J]. 中国环境科学, 2014, 34(11):2757-2763.  
GUO Shu-fang, QI Yu-chun, DONG Yun-she, et al. Response of production and emission of  $CO_2$  and  $N_2O$  of agricultural soil to drip irrigation[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(11):2757-2763.
- [20] Laura Sánchez-Martín, Ana Meijide, Lourdes García-Torres. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137(1):99-107.
- [21] Clemens Scheer, Reiner Wassmann, Kirsten Kienzler, et al. Nitrous oxide emissions from fertilized irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: Influence of nitrogen applications and irrigation practices[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2):290-301.
- [22] 王艳丽. 京郊设施菜地水肥一体化条件下土壤  $N_2O$  排放的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.  
WANG Yan-li.  $N_2O$  emission from a vegetable field with fertigation management under greenhouse conditions in Beijing Suburbs[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [23] 黄丽华, 沈根祥, 顾海蓉, 等. 肥水管理方式对蔬菜田  $N_2O$  释放影响的模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6):1319-1324.  
HUANG Li-hua, SHEN Gen-xiang, GU Hai-rong, et al. Simulation of some impacts of fertilization and water management on nitrous oxide emissions from vegetable field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6):1319-1324.
- [24] 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):251-260.
- [25] Laura Sánchez-Martín, Augusto Arce, Alejandro Benito, 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.
- [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 & Environment*, 2013, 170:16-27.
- [27] 聂 斌, 李文刚, 江丽华, 等. 不同灌溉方式对设施番茄土壤剖面硝态氮分布及灌溉水分效率的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3):102-107.  
NIE Bin, LI Wen-gang, JIANG Li-hua, et al. Effects of different irrigation methods on nitrate nitrogen distribution in soil profile and irrigation water use efficiency of tomato in greenhouse[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(3):102-107.
- [28] 樊兆博, 林 杉, 王敬国, 等. 滴灌施肥对设施番茄水氮利用效率及土壤硝态氮残留的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(1):135-143.  
FAN Zhao-bo, LIN Shan, WANG Jing-guo, et al. Effect of drip fertigation on water and nitrogen use efficiency and nitrate residues in a greenhouse of tomato[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(1):135-143.
- [29] Zotarelli L, Dukes M D, Scholberg J M, et al. Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(8):1247-1258.
- [30] 周 博, 周建斌. 不同水肥调控措施对日光温室土壤水分和番茄水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报自然科学版, 2009, 37(1):211-216.  
ZHOU Bo, ZHOU Jian-bin. Effects of different fertilizers and water managements on water distribution in soil and water use efficiency of tomato[J]. *Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed)*, 2009, 37(1):211-216.
- [31] 韦 彦, 孙丽萍, 王树忠, 等. 灌溉方式对温室黄瓜灌溉水分配及硝态氮运移的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8):67-72.  
WEI Yan, SUN Li-ping, WANG Shu-zhong, et al. Effects of different irrigation methods on water distribution and nitrate nitrogen transport of cucumber in greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8):67-72.
- [32] 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, 164:32-52.
- [33] Van Groenigen J W, G L Velthof, O Oenema, et al. Towards an agronomic assessment of  $N_2O$  emissions: A case study for arable crops[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(6):903-913.