

DOI: 10.5846/stxb201409301932

王艳丽, 李虎, 孙媛, 王立刚. 水肥一体化条件下设施菜地的  $N_2O$  排放. 生态学报, 2016, 36(7): - .

Wang Y L, Li H, Sun Y, Wang L G.  $N_2O$  emissions from a vegetable field with fertigation management and under greenhouse conditions. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): - .

## 水肥一体化条件下设施菜地的 $N_2O$ 排放

王艳丽, 李 虎, 孙 媛, 王立刚\*

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:**在保证作物产量的前提下,研究减少农田土壤  $N_2O$  排放的水肥统筹管理措施对全球温室气体减排具有重要意义。本研究以京郊典型设施菜地为例,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,对果菜-叶菜(黄瓜-芹菜)轮作周期内土壤  $N_2O$  排放进行了观测,并分析了氮肥施用量、灌溉方式、土壤温度和湿度等因素对土壤  $N_2O$  排放的影响。结果表明:在黄瓜-芹菜种植模式中,各施氮处理除基肥施用后  $N_2O$  排放峰持续 10—15 天外,一般施肥、施肥+灌溉事件后土壤  $N_2O$  排放峰均呈现 3—5 天短而急促的情形。黄瓜生长季  $N_2O$  排放通量与土壤湿度(WFPS)之间呈现显著相关的关系;芹菜生长季  $N_2O$  排放通量与土壤温度之间呈现显著相关的关系。观测期内 FP 处理  $N_2O$  排放量为  $(31.00 \pm 2.15) \text{ kg N hm}^{-2}$ , FPD 处理与之相比  $N_2O$  排放量减少了 4.2%,而 OPTD 处理在减少 40%化肥氮量的情况下,  $N_2O$  累积排放量比 FP 处理减少了 42.7%,且达到显著水平。说明在水肥一体化条件下,合理改变施肥体系是减少  $N_2O$  排放的前提,在此基础上进行水肥优化是设施菜地保持产量、减少  $N_2O$  排放的重要技术措施。

**关键词:**设施菜地;水肥一体化技术; $N_2O$  排放

## $N_2O$ emissions from a vegetable field with fertigation management and under greenhouse conditions

WANG Yanli, LI Hu, SUN Yuan, WANG Ligang\*

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:** Fertigation is an alternative cropping management practice that combines fertilization and irrigation, and it is being employed in China to reduce nitrous oxide ( $N_2O$ ) emissions while increasing fertilizer use efficiency. A field experiment was conducted at a vegetable field with cucumber and celery planted under greenhouse conditions, in the suburbs of Beijing. The field was divided into 12 plots with 4 treatments. These were a control (CK), routine farmers' practice treatment (FP), farmers' practice with drip irrigation treatment (FPD), and optimal fertilization with drip irrigation treatment (OPTD). 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 by static chambers all year round, and the soil temperature, and soil moisture, ammonium, and nitrate levels were monitored in parallel with the  $N_2O$  measurements for all the treatment plots. The application event induced  $N_2O$  emission peaks that lasted for about 10—15 days in all the plots. However, all the later dressing events caused relatively short  $N_2O$  emissions lasting 3—5 days. During the observation period, the accumulative  $N_2O$  emissions differed across the treatments. In comparison with the annual  $N_2O$

基金项目:国家自然科学基金青年基金(41201287);公益性行业(农业)科研专项(201103039)

收稿日期:2014-09-30; 网络出版日期:2015- -

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangligang@caas.cn

emission rate of  $31.00 \pm 2.15 \text{ kg N hm}^{-2}$  measured in FP, the  $\text{N}_2\text{O}$  emission rates measured in FPD and OPTD were 4.16% and 42.71% lower, respectively. During the cucumber growing season, the  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes were significantly correlated with the soil water filled pore space (WFPS) for all treatments, but during the celery growing season, the  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes were significantly correlated with soil temperature for all treatments. The results indicated that optimizing fertilization-irrigation by adopting fertigation could reduce  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from agricultural systems.

**Key Words:** greenhouse vegetable; fertigation technology;  $\text{N}_2\text{O}$  emission

$\text{N}_2\text{O}$  是一种重要的痕量温室气体<sup>[1]</sup>,其 100 年全球增温潜势是  $\text{CO}_2$  的 310 倍<sup>[2]</sup>,在大气中的寿命长达 114 年,远高于另外两种主要温室气体  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$ <sup>[3]</sup>。农业生产是  $\text{N}_2\text{O}$  主要排放源之一<sup>[4]</sup>,约占全球  $\text{N}_2\text{O}$  年总排放量的 35%<sup>[5]</sup>。我国是蔬菜生产和消费大国,与种植粮食作物的农田相比,设施蔬菜地具有施肥量大、灌溉频繁、复种指数高等特点,平均每公顷施氮量是大田作物的 4.5—10 倍<sup>[6-7]</sup>,灌溉量达到 4—7 倍<sup>[8-9]</sup>,不仅造成水肥资源利用率低,而且导致大量  $\text{N}_2\text{O}$  排放(单位面积  $\text{N}_2\text{O}$  排放量约是粮食作物的 1.5—3.5 倍<sup>[10-13]</sup>),总体上呈现出高能耗、高排放和高污染等特征。近年来,我国蔬菜需求量呈现快速增长的趋势,因此,探讨不同管理方式下设施蔬菜系统  $\text{N}_2\text{O}$  排放规律,对于准确核算该系统  $\text{N}_2\text{O}$  排放量,编制我国农田温室气体排放清单具有重要意义。

水肥一体化技术被认为是一种节水、节肥、减排的高效管理措施<sup>[14]</sup>,可提高水分和肥料利用效率分别高达 110%<sup>[15]</sup> 和 80%<sup>[16]</sup>。这是因为与传统的施肥方法相比,水肥一体化技术可以将水肥通过滴灌系统直接输送到作物根区附近,保证养分被根系快速吸收,从而提高水肥的利用效率,获得相当或更高的作物产量。然而农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放是一个极其复杂的过程,这些过程受多种因素的影响和制约,尤其在水肥一体化条件下人为高强度干扰下会更加复杂。高频率的滴灌施肥通常能使土壤含水量和土壤营养元素保持在较高的状态,而且滴头和湿润峰之间会形成一个水势梯度和一个反向的空气梯度<sup>[17-18]</sup>,这势必会影响土壤气候条件以及土壤氮素迁移转化,进而影响土壤硝化-反硝化反应过程和  $\text{N}_2\text{O}$  排放,势必会影响对该管理措施下  $\text{N}_2\text{O}$  排放的准确核算。Wu 等在棉花地研究表明滴灌比漫灌减少 36.1%  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[19]</sup>,而 Kallenbach 研究表明施肥后 60 天内深层滴灌和漫灌之间  $\text{N}_2\text{O}$  排放无显著差异<sup>[20]</sup>,王维汉等研究表明青椒整个生育期滴灌比漫灌  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量高出 27.90%<sup>[21]</sup>。由此看来,目前对于设施菜地水肥一体化条件下  $\text{N}_2\text{O}$  排放规律及其排放量都尚不明确,因此,本研究以京郊典型设施菜地(黄瓜-芹菜轮作模式)为例,探讨水肥一体化条件下  $\text{N}_2\text{O}$  排放规律、排放总量及其主要影响因素,为科学评估设施菜地  $\text{N}_2\text{O}$  排放提供数据支撑,为制定设施菜地温室气体综合减排措施提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地点位于北京市房山区窦店镇芦村芦西园,地处东经  $116^\circ 01'$ ,北纬  $39^\circ 38'$ ,属于暖温带半湿润半干旱性季风气候区,四季分明,年平均气温  $11.9^\circ\text{C}$ ,年平均降水量 583mm,年相对湿度为 61%,全年平均日照时数 2554 小时。日光温室是普通的半拱圆形塑料温室,长为 155m,宽 6m。温室塑料膜无色透明,在顶部和底部分别设有通风口。初春、秋末以及寒冬在温室塑料膜上覆盖棉被,以保持夜间温室内温度。本试验开始之前该日光温室连续 4 年种植蔬菜。本试验种植模式为果菜-叶菜轮作(黄瓜-芹菜),供试土壤为褐土,质地为粉质壤土,土壤剖面基本理化性质如表 1。

### 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),水肥一体化处理(FPD),优化水肥一体化处理(OPTD)。每个处理 3 次重复,试验小区面积为  $48 \text{ m}^2$ 。黄瓜品种为中农 26,芹菜品种为文图拉。黄

瓜于 2013 年 3 月 18 日定植,7 月 16 日拉秧;7 月 17 日—9 月 14 日之间为休闲季,不种植作物;芹菜于 2013 年 9 月 15 日定植,2014 年 1 月 14 日一次收获。

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

| 土层<br>Soil layer/<br>cm | 全氮<br>Total N/<br>% | 全磷<br>Total P/<br>% | 全钾<br>Total K/<br>% | 有机质<br>Organic matter/<br>% | pH   | 碱解氮<br>Alkali-hydrolyzale N/<br>(mg/kg) | 速效钾<br>Available K/<br>(mg/kg) | 有效磷<br>Effective P/<br>(mg/kg) |
|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|------|-----------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0—20                    | 0.32                | 0.16                | 2.69                | 5.5                         | 7.57 | 145.56                                  | 782.84                         | 105.04                         |
| 20—40                   | 0.14                | 0.10                | 2.71                | 2.2                         | 7.77 | 73.21                                   | 157.70                         | 24.23                          |
| 40—60                   | 0.09                | 0.09                | 2.61                | 1.5                         | 7.80 | 65.27                                   | 68.91                          | 10.11                          |
| 60—80                   | 0.08                | 0.09                | 2.62                | 1.2                         | 7.83 | 44.77                                   | 67.23                          | 7.94                           |
| 80—100                  | 0.08                | 0.08                | 2.53                | 1.2                         | 7.80 | 77.66                                   | 75.13                          | 16.18                          |

FP、FPD、OPTD 处理施用有机肥用量相同,CK、FP、FPD、OPTD 处理四个处理施用磷钾肥用量相同,全部的有机肥和磷肥均做底肥,钾肥和氮肥分基肥和追肥施用。黄瓜生长季有机肥用量为 500kg N hm<sup>-2</sup>,有机肥(牛粪)含水量为 41.59%,含氮量为 1.33%,磷肥用量为 120kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> hm<sup>-2</sup>,钾肥用量为 200 kg K<sub>2</sub>O hm<sup>-2</sup>,芹菜生长季有机肥用量为 500 kg N hm<sup>-2</sup>,有机肥(牛粪)含水量为 60.13%,含氮量为 0.94%,磷肥用量为 120kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> hm<sup>-2</sup>,钾肥用量为 180 kg K<sub>2</sub>O hm<sup>-2</sup>。两季作物基肥均是撒施,翻耕,作物定植后漫灌;追肥时 CK 处理和 FP 处理用漫灌,肥料随水冲施,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%,芹菜生长季滴灌水量是漫灌的 40%。FP 和 FPD 处理化肥氮施用量均为 700kg N hm<sup>-2</sup>,OPTD 化肥氮素投入比之减少了 40%。具体灌溉、化肥氮管理情况见表 2。

表 2 生长季灌溉、化肥氮管理情况  
Table 2 Irrigation and nitrogen fertilizer management during growing seasons

| 作物生长季<br>Crops growing<br>season | 处理<br>Treatments | 基肥<br>(日期:施氮量)<br>Basic fertilizer/<br>(kg N/hm <sup>2</sup> ) | 灌水方式<br>Irrigation<br>method | 追肥<br>(日期:施氮量)<br>Fertilizer/<br>(kg N/hm <sup>2</sup> )              | 灌水方式<br>Irrigation<br>method | 施化肥总量<br>Total N/<br>(kg N/hm <sup>2</sup> ) |
|----------------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|
| 黄瓜<br>Cucumber                   | CK               | 3/18;0                                                         | 漫灌                           | 3/27;0,4/20;0,4/27;0,5/1;0,5/10;0,5/22;0,5/30;0,6/15;0,6/29;0         | 漫灌                           | 0                                            |
|                                  | FP               | 3/18;210                                                       | 漫灌                           | 3/27;0,4/20;35,4/27;70,5/1;70,5/10;70,5/22;70,5/30;70,6/15;70,6/29;35 | 漫灌                           | 700                                          |
|                                  | FPD              | 3/18;210                                                       | 漫灌                           | 3/27;0,4/20;35,4/27;70,5/1;70,5/10;70,5/22;70,5/30;70,6/15;70,6/29;35 | 滴灌                           | 700                                          |
|                                  | OPTD             | 3/18;126                                                       | 漫灌                           | 3/27;0,4/20;21,4/27;42,5/1;42,5/10;42,5/22;42,5/30;42,6/15;42,6/29;21 | 滴灌                           | 420                                          |
| 芹菜<br>Celery                     | CK               | 9/15;0                                                         | 漫灌                           | 12/4;0,12/21;0                                                        | 漫灌                           | 0                                            |
|                                  | FP               | 9/15;88                                                        | 漫灌                           | 12/4;66,12/21;66                                                      | 漫灌                           | 220                                          |
|                                  | FPD              | 9/15;88                                                        | 漫灌                           | 12/4;66,12/21;66                                                      | 滴灌                           | 220                                          |
|                                  | OPTD             | 9/15;52.8                                                      | 漫灌                           | 12/4;39.6,12/21;39.6                                                  | 滴灌                           | 132                                          |

表中“日期:数值”表示施肥日期和氮肥用量,日期为月/日,氮肥用量为以纯氮计算的施肥量,单位为 kg N hm<sup>-2</sup>。The table “Date: Value” means the date of fertilization and nitrogen fertilizer. CK 代表不施氮肥处理 CK represents control treatment;FP 代表农民习惯施肥处理 FP represents farmers’ practice treatment;FPD 代表水肥一体化处理 FPD represents farmers’ practice and drip irrigation treatment;OPTD 代表优化水肥一体化处理 OPTD represents optimal fertilization and drip irrigation treatment

### 1.3 气体采集与测定

利用静态箱-气相色谱法对水肥一体化条件下设施菜地黄瓜-芹菜轮作周期内土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量进行观测。采样箱由顶箱、中断和底座组成,由不锈钢材料制成。采样箱体根据设施菜地种植作物和耕作方式,在标准采样箱的基础上进行了改进,顶箱和中断箱箱体长 70cm,宽 80cm,高 60cm,最大限度的保障气体取样代表

性,箱体外用塑料泡沫包裹,顶箱内部装有搅拌空气的小风扇,保证箱体内气体均匀性,侧面装有风扇电源插头、气体样品接口和一个温度传感器,顶箱和中断箱底部边缘粘有密封条;当植株生长超过 60 cm 时,增加中断箱,且用四个铁夹子将顶箱与中断箱固定,既保证植株正常生长和顺利取样又可保证箱体密封性;底座长 70 cm,宽 80 cm,高 25 cm,于定植前将其埋入地下。采样时,将箱体置于底座上,用夹子将箱体和底座夹在一起,然后用 100ml 注射器在 0, 7, 14, 21, 28 min 抽取箱内气体于气袋中,同时用 JM624 测土壤 5 cm 温度,用 TRIME-PICO64C 测 15 cm 土层体积含水量,采样结束后将采样箱移开,将气袋带回实验室测定。采样时间一般为早上 9:00—11:00,每周采样一次;施肥和灌水后连续采样,至各个处理和 CK 处理间  $N_2O$  浓度没有显著差异时停止取样。

气袋中的样品用 Agilent 7890A 气相色谱仪分析  $N_2O$  浓度,采用电子捕获检测器(ECD)分析  $N_2O$  浓度。

#### 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:

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

式中, $F$  为气体的交换通量( $g N_2O-N m^{-2} h^{-1}$ ), $F$  为负值表示土壤从大气中吸收该气体,为正值表示土壤向大气排放该气体。 $\rho$  为标准大气压下  $N_2O$  的密度( $g/L$ ), $H$  为采样箱气室高度(m), $T$  为采样箱内气温( $^{\circ}C$ ), $P$  为采样时气压(mm Hg), $P_0$  为标准大气压(mm Hg), $dc/dt$  为采样箱内  $N_2O-N$  浓度的变化速率( $\mu L L^{-1} h^{-1}$ ), $t$  为扣箱后时间(h),对  $c/t$  求导数即是气体浓度的变化速率。

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。

$N_2O$  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。

$N_2O$  排放系数由施肥处理  $N_2O$  排放总量与对照  $N_2O$  排放总量之差占肥料投入量的比值。采用 Excel 2007、origin8.5 和 SAS9.2 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 土壤 $N_2O$ 排放通量变化规律

在整个监测周期中,各处理施肥土壤  $N_2O$  排放灌溉、施肥+灌溉事件后呈现出一段短而急促的排放峰,各处理变化趋势一致,而在休闲季,基本上不出现  $N_2O$  排放峰值(图 1a)。这说明,施肥、灌溉是影响农田土壤  $N_2O$  排放最重要的人为因素,排放峰的大小与之密切相关。本试验中,两种蔬菜作物定植时土壤  $N_2O$  排放峰持续 10—15 天,而其余灌溉、追肥+灌溉后土壤  $N_2O$  排放峰一般只持续 3—5 天,这是因为作物生长季全部有有机肥和 20%氮肥(黄瓜生长季)和 40%氮肥(芹菜生长季)做底肥施入到土壤中,再加以大量灌溉,为微生物进行硝化-反硝化反应过程提供了丰富的反应底物(氮源)、能量来源(碳源)以及适宜环境因子(水分),致使定植期土壤  $N_2O$  排放峰值持续时间较长。整个监测期内,不同处理间土壤  $N_2O$  平均排放通量大小次序为  $FP > FPD > OPTD > CK$ 。CK 处理的  $N_2O$  排放通量最低,介于  $-113.25—708.44 \mu g N m^{-2} h^{-1}$ ,平均通量为  $152.15 \mu g N m^{-2} h^{-1}$ ,这是由于两个作物生长季中没有投入氮素,缺乏  $N_2O$  排放的反应基质。FP 处理、FPD 处理、OPTD 处理  $N_2O$  排放通量范围分别为  $-85.50—8338.64 \mu g N m^{-2} h^{-1}$ 、 $-127.09—8504.60 \mu g N m^{-2} h^{-1}$ 、 $12.41—3143.04 \mu g N m^{-2} h^{-1}$ 。FP 处理  $N_2O$  平均排放通量最高,OPTD 处理  $N_2O$  排放通量与 FPD 处理具有明显差异,说明施氮量显著影响土壤  $N_2O$  排放通量。黄瓜生长季 CK、FP、FPD、OPTD 处理的平均排放通量介于  $215.83—1745.73 \mu g N m^{-2} h^{-1}$  之间,明显大于芹菜生长季不同处理的平均排放通量( $76.39—344.99 \mu g N m^{-2} h^{-1}$ ),这与黄瓜生长季氮肥施用量大、灌溉次数多、灌溉量大以及土壤平均温度高于芹菜生长季等有关。

### 2.2 $N_2O$ 累积排放量和排放强度

试验期间 CK、FP、FPD、OPTD 处理的  $N_2O$  累积排放量依次为  $8.61 \pm 0.70 kg N hm^{-2}$ 、 $31.00 \pm 2.15 kg N$

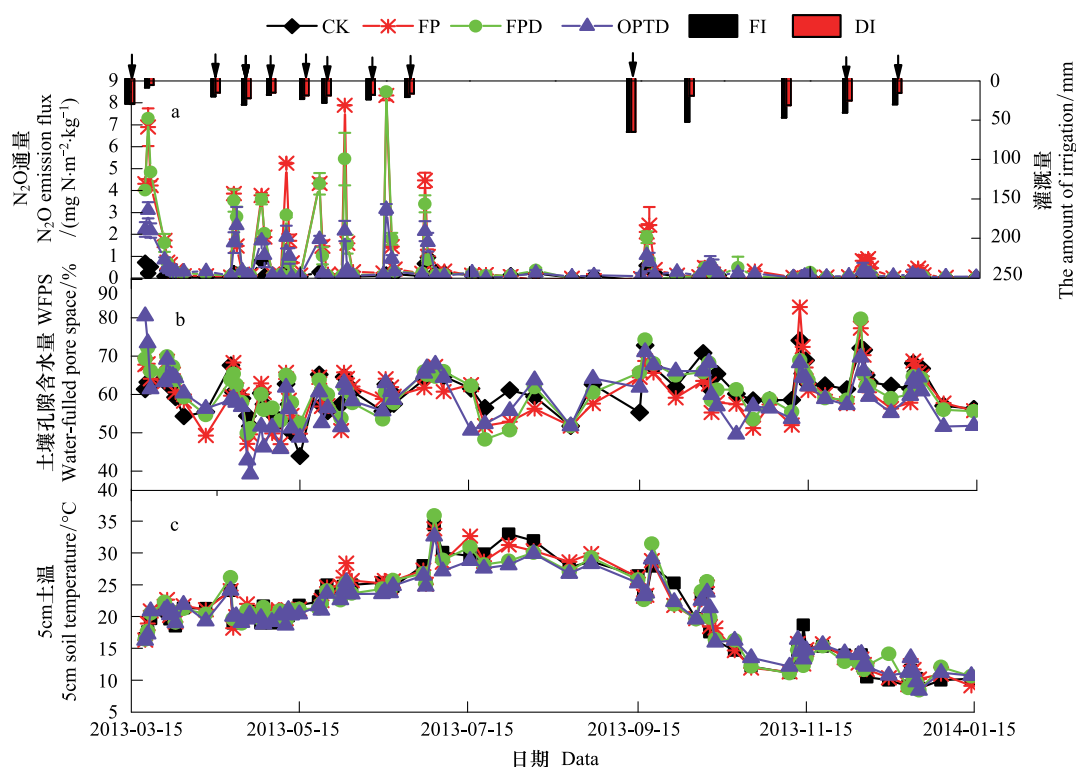


图1 不同处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量动态变化(箭头代表施肥日期,竖线代表灌溉时期)

Fig. 1 The dynamic of N<sub>2</sub>O emission flux under different treatments

(Arrow represents the date of fertilization, the vertical bar represents the date of irrigation)

CK 代表不施氮肥处理 CK represents control treatment; FP 代表农民习惯施肥处理 FP represents farmers' practice treatment; FPD 代表水肥一体化处理 FPD represents farmers' practice and drip irrigation treatment; OPTD 代表优化水肥一体化处理 OPTD represents optimal fertilization and drip irrigation treatment. FI 指漫灌 FI indicates furrow irrigation; DI 指滴灌 DI indicates drip irrigation.

hm<sup>-2</sup>、29.71±0.65 kg N hm<sup>-2</sup>、17.76±2.10 kg N hm<sup>-2</sup>, CK 处理 N<sub>2</sub>O 累积排放量最低, FP、FPD、OPTD 处理 N<sub>2</sub>O 累积排放量分别是 CK 的 3.60、3.45、2.06 倍(图 2)。相同氮素投入,滴灌措施下的 FPD 处理 N<sub>2</sub>O 累积排放量比 FP 处理减少了 4.16%; OPTD 处理在减少 40% 化肥氮量的情况下, N<sub>2</sub>O 累积排放量比 FP 处理显著减少了 42.71%, 且达到显著水平 (P<0.05)。黄瓜生长季 CK、FP、FPD、OPTD 处理 N<sub>2</sub>O 累积排放量占试验期间各处理累积排放量 66.44%, 81.12%, 81.14%, 67.00%, 表明在黄瓜-芹菜轮作周期内黄瓜生长季土壤 N<sub>2</sub>O 排放量较多, 芹菜生长季土壤 N<sub>2</sub>O 排放量相对较少, 究其原因有三个方, 一是与施肥量有关, 黄瓜生长季施氮量比芹菜生长季多; 二是黄瓜生长季(春夏季)水热状况相对较好, 促进了土壤微生物的活动; 三是可能与覆膜有关, 黄瓜生长季覆盖地膜, 芹菜生长季不覆膜(陶丽佳<sup>[22]</sup>等研究表明覆膜增加土壤 N<sub>2</sub>O 排放)。

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)将同期内由氮肥施用引起的 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 N<sub>2</sub>O-N 排放系数为 1%。排放系数是评价不同管理措施减排效

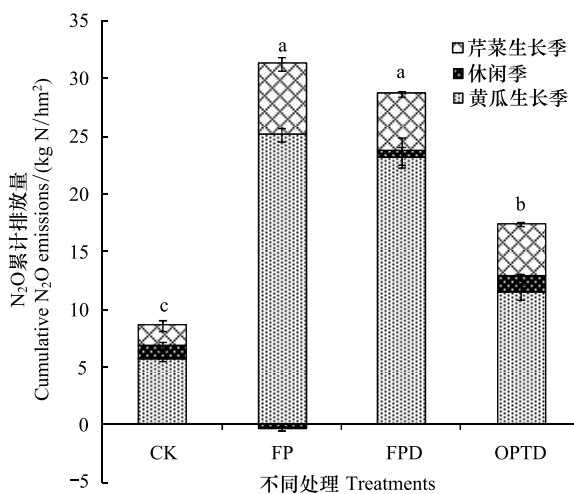


图2 不同处理土壤 N<sub>2</sub>O 累积排放量

Fig. 2 The annual cumulative N<sub>2</sub>O emissions for each treatment

果的参考指标。表 3 看出,FP 排放系数最大,黄瓜生长季 N<sub>2</sub>O 排放系数(1.62%)要明显高于芹菜生长季(0.61%)。本研究中整个观测期内 N<sub>2</sub>O 排放系数次序为 FP>FPD>OPTD,FP、FPD 处理为 N<sub>2</sub>O 排放系数 1.17%,1.10%,高于 IPCC 1%的默认值,而 OPTD 处理 N<sub>2</sub>O 排放系数为 0.58%,显著低于 IPCC 1%的默认值。

表 3 不同处理 N<sub>2</sub>O 排放强度  
Table 3 Emission intensity under different treatments

| 生长季<br>Growing season | 处理<br>Treatment | 产量<br>Yield/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | N <sub>2</sub> O 排放总量<br>Cumulative N <sub>2</sub> O emissions/<br>(kg/N hm <sup>2</sup> ) | 排放强度<br>Emission intensity/<br>(kg N/t) | 排放系数<br>Emission factor/<br>% |
|-----------------------|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|
| 黄瓜<br>Cucumber        | CK              | 78.23±0.15b                          | 5.72±0.15c                                                                                 | 0.07±0.01b                              | —                             |
|                       | FP              | 81.65±1.58b                          | 25.15±0.58a                                                                                | 0.31±0.02a                              | 1.62                          |
|                       | FPD             | 86.48±0.87a                          | 23.19±0.87a                                                                                | 0.27±0.01a                              | 1.46                          |
|                       | OPTD            | 89.40±0.68a                          | 11.51±0.68b                                                                                | 0.13±0.01b                              | 0.63                          |
| 芹菜<br>Celery          | CK              | 117.26±16.11b                        | 1.76±0.44c                                                                                 | 0.02±0.01d                              | —                             |
|                       | FP              | 120.21±8.22b                         | 6.16±0.60a                                                                                 | 0.05±0.01a                              | 0.61                          |
|                       | FPD             | 119.92±4.08b                         | 5.00±0.24ab                                                                                | 0.04±0.01b                              | 0.45                          |
|                       | OPTD            | 144.13±8.16a                         | 4.55±0.21b                                                                                 | 0.03±0.01c                              | 0.44                          |

数值后的字母代表不同处理在  $P=0.05$  水平上显著。The letter after values indicates significant difference at 0.05 level. CK 代表不施氮肥处理 CK represents control treatment; FP 代表农民习惯施肥处理 FP represents farmers' practice treatment; FPD 代表水肥一体化处理 FPD represents farmers' practice and drip irrigation treatment; OPTD 代表优化水肥一体化处理 OPTD represents optimal fertilization and drip irrigation treatment

黄瓜、芹菜生长季 FP 处理排放强度最大,CK 处理排放强度最小,且黄瓜生长季排放强度显著大于芹菜生长季排放强度。两个生长季 OPTD 处理 N<sub>2</sub>O 排放强度显著低于 FP 处理,说明在优化施肥基础上水肥一体化能够在增加产量的前提下有效减少 N<sub>2</sub>O 排放,是值得推荐的增产减排技术措施。

2.3 环境因子对 N<sub>2</sub>O 排放的影响

2.3.1 土壤温湿度对 N<sub>2</sub>O 排放的影响

设施菜地中,整个生长季表层(0—15cm)土壤孔隙含水量(WFPS)一直维持在较高水平,介于 45%—80% 之间,土壤湿度在灌水后有所上升,不同处理之间 WFPS 变化趋势相似,但 FPD 和 OPTD 处理 WFPS 出现峰值比 FP 和 CK 处理低(图 1b),与 Sanchez-Martín 等在番茄地研究漫灌后土壤平均 WFPS 高于滴灌的结果类似<sup>[23]</sup>。通过对 WFPS 与 N<sub>2</sub>O 排放进行相关性分析,发现整个观测期不同处理 N<sub>2</sub>O 排放通量与 WFPS 没有显著相关性,但是经回归分析发现黄瓜生长季不同处理 N<sub>2</sub>O 排放通量与 WFPS 之间显著相关,且可以用对数方程进行拟合。芹菜生长季不同处理 N<sub>2</sub>O 排放通量与 WFPS 没有显著相关性,表明黄瓜生长季土壤湿度是影响 N<sub>2</sub>O 排放的主要环境因子。

表 4 不同处理 N<sub>2</sub>O 通量与 5cm 土温与 WFPS 的相关性  
Table 4 Correlation coefficients between N<sub>2</sub>O flux and soil temperature and moisture under different treatments

| 处理<br>Treatment | 黄瓜生长季<br>Cucumber growing season |                      | 芹菜生长季<br>Celery growing season |                      |
|-----------------|----------------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|
|                 | WFPS                             | 5cm 土温               | WFPS                           | 5cm 土温               |
|                 | Water-Filled Pore Space          | 5cm soil temperature | Water-Filled Pore Space        | 5cm soil temperature |
| CK              | 0.41 **                          | −0.01                | 0.32                           | 0.52 **              |
| FP              | 0.40 *                           | −0.24                | 0.32                           | 0.30 *               |
| FPD             | 0.42 **                          | −0.21                | 0.23                           | 0.30 *               |
| OPTD            | 0.48 **                          | −0.14                | 0.24                           | 0.59 **              |

\* 和 \*\* 分别表示在  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平上显著。

设施蔬菜地整个观测期土壤温度有很明显的季节性,介于 8—35℃ 之间,漫灌和滴灌的土壤温度基本没差异,变化趋势一致(图 1c)。韦彦<sup>[24]</sup>等研究表明滴灌灌水量是漫灌的 50%—60% 时,一天中 12:00—14:00

滴管的地表 5cm 土温比漫灌高 1℃ 左右,其他时间段差异不显著。本研究中滴灌灌水量是漫灌的 25% (黄瓜生长季)和 40% (芹菜生长季),试验监测时间主要介于 9:00—11:00 之间,导致滴灌与漫灌表层 5cm 土温相差不显著。黄瓜生长季、芹菜生长季土壤温度分别介于 15—35℃、8—30℃ 之间,均有利于土壤进行硝化-反硝化反应的发生。经相关性分析,整个黄瓜生长季不同处理  $N_2O$  排放通量与土壤温度之间没有显著相关,但芹菜季不同处理  $N_2O$  排放通量与土壤温度之间显著相关,可以用对数方程拟合。Vallejo 在马铃薯地研究表明水肥一体化条件下温度极显著的影响了  $N_2O$  排放通量<sup>[25]</sup>,于亚军等研究表明玉米季  $N_2O$  排放与 5cm 土温没有显著相关性,而冬小麦季  $N_2O$  排放与 5cm 深度土温显著正相关<sup>[11]</sup>。可见在外界环境温度相对较低的情况下(本试验的秋冬季节),土壤温度是影响芹菜生长季  $N_2O$  排放的主要因子之一。

### 2.3.2 土壤无机氮对 $N_2O$ 排放的影响

土壤  $N_2O$  主要来自于土壤的硝化和反硝化作用,  $N_2O$  排放除了受环境因子(土壤温度和湿度)影响外,还主要受反应底物浓度(铵态氮和硝态氮)的影响。整个研究周期内,土壤硝态氮含量介于 11.94—669.86 mg/kg 之间,铵态氮含量介于 0.30—15.50mg/kg 之间,显著小于硝态氮含量(图 3)。黄瓜生长季于 4 月 22 日开始追肥 7 次,土壤无机氮在 4、5、6 月份含量较高,而 3 月 22 日(黄瓜于 3 月 20 日-21 日定植)则没有出现峰值。芹菜生长季土壤无机氮含量峰值出现在 9 月 18 日(芹菜定植)、10 月 8 日(定植 20 天后灌水)。FP、FPD 处理土壤硝态氮含量主要介于 150—250 mg/kg 之间,始终维持在较高水平。不同处理土壤平均硝态氮含量高低分别为 102.96 mg/kg、178.00 mg/kg、217.41 mg/kg 和 109.66 mg/kg,则 FPD>FP>OPTD>CK,说明滴灌相对漫灌可以增加表层土壤氮素累积,土壤硝态氮是土壤进行反硝化作用的底物。基肥时 FP 处理无机氮峰值与 FPD 峰值大小相近,因为作物定植时 FP、FPD 处理施氮肥一样,均采用漫灌,导致峰值差异不显著。追肥后土壤无机氮含量呈逐渐增加的趋势,与土壤  $N_2O$  通量峰值变化趋势一致。但经相关性分析,本研究中不同处理  $N_2O$  排放通量与无机氮之间也没有显著相关关系(见表 4)。就 FP 和 FPD 处理而言,FPD 处理比 FP 处理表层硝态氮累积多, $N_2O$  排放通量却较低,推测滴灌条件下以滴头为中心,土壤形成一个顺势水分梯度和逆势通气性, $N_2O$  排放可能主要以硝化作用为主。

## 3 讨论

(1)水肥一体化条件下  $N_2O$  排放规律。在人为调控环境以及水肥用量高的条件下,本研究中设施菜地在农民习惯管理措施  $N_2O$  排放呈现出峰值高、持续时间短(除了基肥施用事件后)的排放特点,而水肥一体化降低了  $N_2O$  排放峰值。追肥后农民习惯(FP)处理  $N_2O$  排放持续 3—5 天,这种排放规律与于亚军在成都平原蔬菜地  $N_2O$  排放峰在基肥和追肥后持续大约 1—3 周的结果不同<sup>[26]</sup>,但与陈海燕<sup>[27]</sup>、张婧<sup>[28]</sup>等在京郊地区番茄地土壤  $N_2O$  排放峰出现在施肥后 3—4 天,单独灌水后 2—3 天的监测结果相类似。FP 处理  $N_2O$  排放通量介于 -85.50—8338.64  $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$  之间,小于南京市郊区大棚蔬菜地  $N_2O$  排放通量 60—10033  $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ <sup>[29]</sup>,高于山东寿光设施菜地  $N_2O$  排放通量 -48—1905  $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ <sup>[30]</sup>。与 FP(平均排放通量 1069.00  $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )传统漫灌相比,采用滴灌的水肥一体化(FPD)处理  $N_2O$  平均排放通量相对较小,为 932.27  $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ,但仍是其它研究中滴灌条件下  $N_2O$  平均排放通量的 30 多倍,Cynthi<sup>[31]</sup>研究表明漫灌处理下土壤  $N_2O$  排放通量介于 0—400  $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$  之间,滴灌条件下土壤  $N_2O$  排放通量一直小于 50  $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ,这可能是由于本试验地基础有机质含量高,且黄瓜-芹菜轮作模式施氮肥量大,灌水多等因素有关。众多的研究均表明<sup>[27,30,32-33]</sup>,灌溉与施肥同时进行会更有利于  $N_2O$  排放,但对于设施菜地,“水”和“肥”互作如何影响  $N_2O$  排

表 5 不同处理  $N_2O$  通量与无机氮的相关性

Table 5 Correlation coefficients between  $N_2O$  flux and inorganic nitrogen under different treatments

| 处理<br>Treatment | 生长季<br>Growing season    |                          |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|
|                 | $\text{NH}_4^+-\text{N}$ | $\text{NO}_3^--\text{N}$ |
|                 | Ammonium nitrogen        | Nitrate nitrogen         |
| CK              | 0.42 *                   | 0.19                     |
| FP              | 0.32                     | 0.40                     |
| FPD             | 0.18                     | 0.25                     |
| OPTD            | 0.03                     | 0.28                     |

\* 和 \*\* 分别表示在  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平上显著。

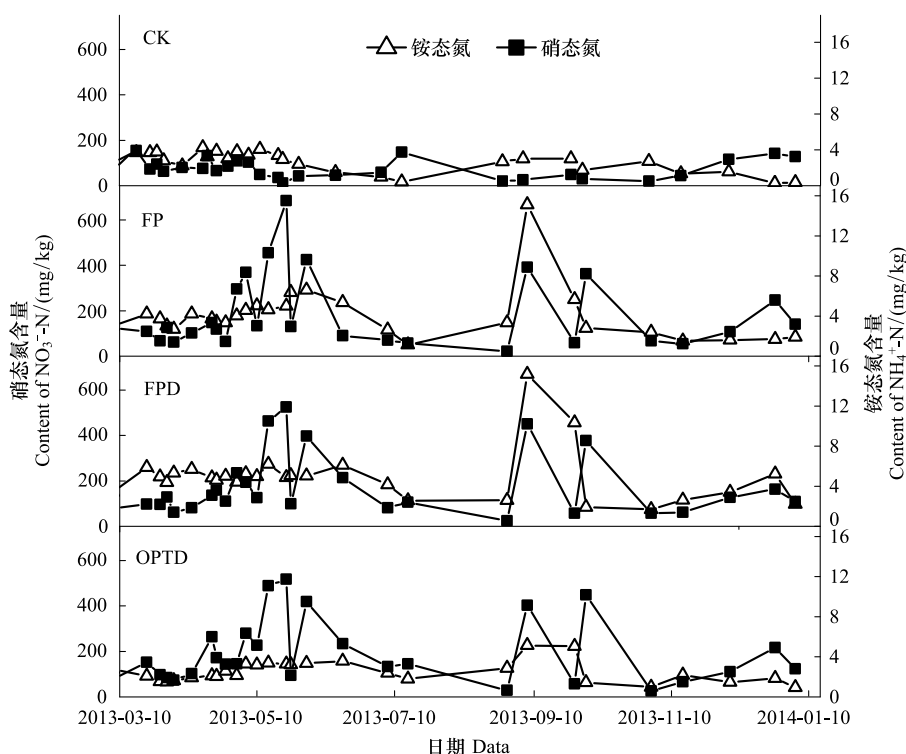


图3 不同处理0—20cm 土层无机氮含量变化

Fig. 3 The dynamic of the mineral N in 0–20cm soil layer under different treatments

放,不同水肥配比下  $N_2O$  排放规律有何变化尚需进一步深入研究。

(2) 水肥一体化条件下  $N_2O$  累积排放量。本研究观测期内,FP 处理  $N_2O$  排放总量 ( $31.00 \pm 2.15 \text{ kg N hm}^{-2}$ ) 大于邱炜红<sup>[32]</sup>在2年蔬菜地土壤  $N_2O$  年平均累积排放量  $13.51 \text{ kg N hm}^{-2}$ ,而排放系数为 1.17% 小于其  $N_2O$  平均排放系数(1.21%)。黄瓜、芹菜生长季水肥一体化处理(FPD)土壤  $N_2O$  累积排放量比农民习惯处理(FP)分别减少了 7.79%、18.83%,而 Kennedy<sup>[33]</sup>研究表明深层滴灌处理下土壤  $N_2O$  累积排放量比漫灌处理减少了 71.14%; Sanchez-Martín<sup>[34]</sup>研究结果表明,滴灌  $N_2O$  累积排放量比漫灌处理减少了 50%,导致本研究中  $N_2O$  排放总量与其他研究不同的可能原因有二:其一,其他研究只是一次性施肥或作物生长季追肥 2—3 次<sup>[20,22]</sup>,而本试验中根据作物生长需要进行灌溉 14 次,其中 11 次施用氮肥,且其中 2 次灌水离基肥很近,施肥对  $N_2O$  排放的影响掩盖了灌溉对  $N_2O$  排放的影响;其二,本试验处理中滴管布置密集,之间相隔只有 25cm,虽然本实验滴灌比漫灌减少了 25%(黄瓜生长季)和 40%(芹菜生长季)的灌溉量,但在漫灌和滴灌条件下土壤湿度差异不显著,且滴灌条件下土壤表层无机氮含量相对较大,保障了  $N_2O$  排放具有较高浓度的底物浓度。优化水肥一体化处理(OPTD)保证作物产量前提下,年累积排放量比农民习惯处理(FP)减少了 42.71%,大于其它试验优化 40% 施肥量只减少  $N_2O$  排放 30% 左右的试验结果<sup>[35–36]</sup>,且排放强度显著低于 FP 处理,这表明在现行的农民管理措施下,在优化施肥的基础上改变灌溉方式是一种良好的减排措施。

(3) 环境因子对水肥一体化条件下  $N_2O$  排放的影响。其一,土壤温度是影响  $N_2O$  排放的主要因素之一。郑循华等研究表明,土壤温度在 15—40℃ 范围内,硝化作用随温度的升高而升高<sup>[37]</sup>。本研究中,滴灌和漫灌条件下土壤温度变化趋势一致,差异不显著。黄瓜生长季处于水热条件较好的春夏季, $N_2O$  排放随施肥量的增加而增加,施肥对  $N_2O$  排放影响大于土温;而芹菜生长季处于秋冬季,温度成为其限制因子,土温对  $N_2O$  排放的影响较大。其二,灌溉影响土壤的水分运移和氮素运移,进而影响  $N_2O$  排放。杨岩等研究表明低灌溉量  $N_2O$  排放通量小于高灌溉量  $N_2O$  排放通量<sup>[38]</sup>。Hosono 研究表明 WFPS 大于 50% 时,NO/ $N_2O$  比值为 1—2 之间,反硝化作用为主;WFPS 小于 40% 时,NO/ $N_2O$  比值为 4–5 之间,硝化作用为主,滴灌处理中干土区  $N_2O$  排

放小于湿土区,且滴灌处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放小于漫灌<sup>[39]</sup>。与漫灌相比,滴灌只是在滴头下面土壤湿度呈饱和状,肥料随水运移,土壤进行反硝化作用的面积相对较小。而漫灌后土壤氮素、湿度均匀,表层达到饱和,反硝化作用迅速增加,但是漫灌后致使土壤透气性减小,有阻止了  $\text{N}_2\text{O}$  的扩散,进一步还原转化成  $\text{N}_2$  的可能。鉴于本研究中设施菜地水肥一体化条件下不同处理土壤温度变化差异不显著,滴灌可以降低土壤湿度,因此设施菜地对湿度的控制就显得尤为重要,但是怎样通过控制滴头流量、灌溉次数控制土壤湿度来减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放,从机理和减排技术角度都还需要进一步探讨。

## 4 结论

(1) 整个生长季,除基肥施用后排放峰持续 10—15 天外,施氮肥处理在施肥、施肥+灌水事件后土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放呈现出一段短而急促的排放峰,追肥、灌水排放峰持续 3—5 天,表明施肥和灌水是引起  $\text{N}_2\text{O}$  排放的主要管理因素。

(2) 试验观测期内 FP 处理  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量为  $31.00 \pm 2.15 \text{ kg N hm}^{-2}$ , FPD 处理  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量只比 FP 处理减少了 4.16%; 而 OPTD 处理在优化 40% 化肥氮量情况下,  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量比 FP 处理显著减少了 42.71%, 且达到显著水平, 表明在优化施肥基础上进行水肥一体化管理是保障产量且减少设施菜地  $\text{N}_2\text{O}$  排放的“双赢”措施。

(3) 土壤无机氮含量、土壤湿度(WFPS)和土壤温度是影响  $\text{N}_2\text{O}$  排放的重要因素。土壤无机氮与  $\text{N}_2\text{O}$  排放变化趋势一致; 黄瓜季  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与 WFPS 显著相关, 芹菜季  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与土壤温度显著相关, 表明土壤湿度是影响黄瓜生长季  $\text{N}_2\text{O}$  排放的主要环境因子, 土壤温度是影响芹菜生长季  $\text{N}_2\text{O}$  排放的主要环境因子。

## 参考文献 (References):

- [1] Hutchinson G L, Mosier A R. Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(2): 311-316.
- [2] McCarthy J J, Canziani O F, Leary N A, Dokken D J. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] Montzka S A, Fraser P J, Butler J H, Cunnold D M, Daniel J S, Derwent R G, Lal S, McCulloch A, Oram D E, Reeves C E, Sanhueza E, Steele L P, Velders G J M, Weiss R F, Zander R. *Controlled Substances and Other Source Gases, Chapter 1 of the Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002*. Genève: World Meteorological Organization, 2003.
- [4] Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L. *Climate change 2007: The physical science basis // Contribution of Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [5] Yoshida N, Toyoda S. Constraining the atmospheric  $\text{N}_2\text{O}$  budget from intramolecular site preference in  $\text{N}_2\text{O}$  isotopomers. *Nature*, 2000, 405(6784): 330-334.
- [6] 杜连凤, 吴琼, 赵同科, 刘继培, 安志装, 刘宝存, 张东兴. 北京市郊典型农田施肥研究与分析. *中国土壤与肥料*, 2009, (3): 75-78.
- [7] 陆轶峰, 李宗逊, 雷宝坤. 滇池流域农田氮、磷肥施用现状与评价. *云南环境科学*, 2003, 22(1): 34-37.
- [8] 袁新民, 李晓林, 张福锁, 同延安. 粮田改种蔬菜后土壤剖面硝态氮的变化. *生态农业研究*, 2000, 8(2): 31-33.
- [9] 张永丽, 于振文. 灌水量对不同小麦品种籽粒品质、产量及土壤硝态氮含量的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(5): 155-158.
- [10] 林森, 郭李萍, 谢立勇, 林佳, 张贺, 阎宏亮. 菜地土壤  $\text{CO}_2$  与  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征及其规律. *中国土壤与肥料*, 2012, (4): 11-17.
- [11] 于亚军, 高美荣, 朱波. 小麦-玉米轮作田与菜地  $\text{N}_2\text{O}$  排放的对比研究. *土壤学报*, 2012, 49(1): 96-103.
- [12] 姚志生, 郑循华, 周再兴, 谢宝华, 梅宝玲, 顾江新, 王定勇. 太湖地区冬小麦田与蔬菜地  $\text{N}_2\text{O}$  排放对比观测研究. *气候与环境研究*, 2006, 11(6): 691-701.
- [13] Kaiser E-A, Kohrs K, Kücke M, Schnug E, Heinemeyer O, Munch J C. Nitrous oxide release from arable soil: importance of N-fertilization, crops and temporal variation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(12): 1553-1563.
- [14] 张承林, 邓兰生. *水肥一体化技术*. 北京, 中国农业出版社, 2012.
- [15] 刘虎成, 徐坤, 张永征, 孙敬强. 滴灌施肥技术对生姜产量及水肥利用率的影响. *农业工程学报*, 2012, 28(增刊1): 106-111.
- [16] 周建斌, 陈竹君, 李生秀. Fertigation-水肥调控的有效措施. *干旱地区农业研究*, 2001, 19(4): 16-21.

- [17] 张鑫, 蔡焕杰, 邵光成, 张振华. 膜下滴灌的生态环境效应研究. 灌溉排水, 2002, 21(2): 1-4.
- [18] Vázquez N, Pardo A, Suso M L, Quemada M. A methodology for measuring drainage and nitrate leaching in unevenly irrigated vegetable crops. *Plant and Soil*, 2005, 269(1/2): 297-308.
- [19] Wu J, Guo W, Feng J F, Li L H, Yang H S, Wang X H, Bian X M. Greenhouse gas emissions from cotton field under different irrigation methods and fertilization regimes in Arid Northwestern China. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: Article ID 407832.
- [20] Kallenbach C M. The use of subsurface drip irrigation, cover crops and conservation tillage in reducing soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from an irrigated row-crop system [D]. Davis: University of California, 2008.
- [21] 王维汉, 毛前, 严爱兰. 滴灌下青椒地 N<sub>2</sub>O 排放规律研究. 中国农村水利水电, 2014, (7): 31-34.
- [22] 陶丽佳, 王凤新, 顾小小. 覆膜滴灌对温室气体产生及排放的影响研究进展. 中国农学通报, 2013, 29(3): 17-23.
- [23] Sánchez-Martín L, Vallejo A, Dick J, Skiba U M. The influence of soluble carbon and fertilizer nitrogen on nitric oxide and nitrous oxide emissions from two contrasting agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(1): 142-151.
- [24] 韦彦, 赵景文, 张正伟, 高丽红. 灌溉方式对温室主要环境因子及黄瓜生长发育的影响. 内蒙古农业大学学报, 2007, 28(3): 204-208.
- [25] Vallejo A, Skiba U M, García-Torres L, Arce A, López-Fernández S, Sánchez-Martín L. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2782-2793.
- [26] 于亚军, 朱波, 荆光军. 成都平原土壤—蔬菜系统 N<sub>2</sub>O 排放特征. 中国环境科学, 2008, 28(4): 313-318. [27] 陈海燕, 李虎, 王立刚, 邱建军. 京郊典型设施蔬菜地 N<sub>2</sub>O 排放规律及影响因素研究. 中国土壤与肥料, 2012, (5): 5-10.
- [28] 张婧, 李虎, 王立刚, 邱建军. 京郊典型设施蔬菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放特征. 生态学报, 2014, 34(14): 4088-4098.
- [29] 贾俊香, 张曼, 熊正琴, 李叶. 南京市郊区集约化大棚蔬菜地 N<sub>2</sub>O 的排放. 应用生态学报, 2012, 23(3): 739-744.
- [30] He F F, Jiang R F, Chen Q, Zhang F S, Su F. Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China. *Environmental Pollution*, 2009, 157(5): 1666-1672.
- [31] Kallenbach C M, Rolston D E, Horwath W R. Cover cropping affects soil N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions differently depending on type of irrigation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(3/4): 251-260.
- [32] 邱炜红. 菜地土壤温室气体氧化亚氮排放及其控制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [33] 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 170: 16-27.
- [34] Sanchez-Martín L, Meijide A, Garcia-Torres L, Vallejo A. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(1/2): 99-107.
- [35] 梁东丽, 同延安, Emteryd O, 方日尧, 张树兰. 干湿交替对旱地土壤 N<sub>2</sub>O 气态损失的影响. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 28-31.
- [36] 武其甫, 武雪萍, 李银坤, 吴会军, 闫鹏, 张彦才, 李若楠, 王丽英, 王小彬, 蔡典雄. 保护地土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量特征研究. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 942-948.
- [37] 郑循华, 王明星, 王跃思, 沈壬兴, 张文, 龚晏邦. 温度对农田 N<sub>2</sub>O 产生与排放的影响. 环境科学, 1997, 18(5): 1-5.
- [38] 杨岩, 孙钦平, 李吉进, 刘春生, 刘本生, 许俊香, 高利娟. 不同水肥处理对设施菜地 N<sub>2</sub>O 排放的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 19(2): 430-436.
- [39] Hosono T, Hosoi N, Akiyama H, Tsuruta H. Measurements of N<sub>2</sub>O and NO emissions during tomato cultivation using a flow-through chamber system in a glasshouse. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 75(1/3): 115-134.