

# 中国北方设施菜田垄-畦土壤 N<sub>2</sub>O 和 NO 年排放特征比较

宋 贺<sup>1</sup>, 潘广元<sup>1</sup>, 陈 清<sup>2</sup>, 曹文超<sup>2</sup>, 王敬国<sup>2\*</sup>

(1.安徽农业大学农学院, 合肥 230036; 2.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:**为弄清设施菜田垄上和畦上土壤的 N<sub>2</sub>O 和 NO 排放特征,准确估算我国设施菜田痕量气体年排放量,依靠一个田间原位试验,用静态暗箱-气相色谱法和氮氧化物分析仪分别监测了一年设施菜田垄上及畦上土壤的 N<sub>2</sub>O 和 NO 排放通量。研究结果表明畦上和垄上 N<sub>2</sub>O 和 NO 年排放量差异显著。畦上和垄上 N<sub>2</sub>O 累积年排放分别为 11.60、4.23 kg N·hm<sup>-2</sup>, NO 的累积年排放分别为 1.27、0.43 kg N·hm<sup>-2</sup>;考虑到畦垄面积比为 3:1,修正后设施菜田 N<sub>2</sub>O 和 NO 累积年排放分别为 9.65、1.06 kg N·hm<sup>-2</sup>。因此在气体取样时,取样点在畦上,会分别高估 N<sub>2</sub>O 和 NO 年排放量 1.95 kg N·hm<sup>-2</sup> 和 0.21 kg N·hm<sup>-2</sup>。垄上 CO<sub>2</sub> 的排放量远低于畦上,间接说明垄上土壤缺乏碳源可能是氮素反硝化的限制因子,施用有机肥时应适当远离垄,以免增大氮素损失。此外,垄是重要无机氮汇,估算氮素平衡和硝酸盐淋洗时,应该给予足够重视。

**关键词:**设施菜田;痕量气体;N<sub>2</sub>O 排放;NO 排放

**中图分类号:**S153 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)12-2472-06 **doi:**10.11654/jaes.2014.12.027

## Comparison of N<sub>2</sub>O and NO Emissions from Ridged and Furrowed Soils in a Greenhouse in Northern China

SONG He<sup>1</sup>, PAN Guang-yuan<sup>1</sup>, CHEN Qing<sup>2</sup>, CAO Wen-chao<sup>2</sup>, WANG Jing-guo<sup>2\*</sup>

(1.College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2.College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** In greenhouse vegetable cropping systems, elevated N fertilizer inputs may increase N<sub>2</sub>O and NO emissions from soils. Here N<sub>2</sub>O and NO emissions from ridged and furrowed soils in a greenhouse were monitored to obtain accurate estimates of annual emissions of trace gases from Chinese greenhouse soils. The results showed that N<sub>2</sub>O and NO emissions were significantly different between ridged and furrowed soils. Annual N<sub>2</sub>O emissions were 11.60 and 4.23 kg N·hm<sup>-2</sup> and annual NO emissions 1.27 and 0.43 kg N·hm<sup>-2</sup>, from furrowed and ridged soils, respectively. Taking the ratio of furrow to ridge area (3:1) into account, corrected annual emissions of N<sub>2</sub>O and NO were 9.65 和 1.06 kg N·hm<sup>-2</sup>, respectively. If sampled in furrowed soils, the annual emissions of soil N<sub>2</sub>O and NO would be overestimated at 1.95 kg N·hm<sup>-2</sup> and 0.21 NO kg N·hm<sup>-2</sup>. The CO<sub>2</sub> emissions from ridged soils were far lower than from furrowed soils, implying that C resource might be the factor limiting denitrification. Therefore, manure should be applied away from the ridge to prevent N losses. In addition, ridge soils as a sink of inorganic N should not be ignored when estimating N budgets and nitrate leaching in greenhouse vegetable cropping systems.

**Keywords:** greenhouse vegetable cropping system; trace gases; N<sub>2</sub>O emission; NO emission

N<sub>2</sub>O 和 NO 是大气中重要的痕量气体,可破坏臭氧层,且对全球气候变暖起到重要作用<sup>[1-3]</sup>。农田是 N<sub>2</sub>O 和 NO 重要排放源。全球耕地 N<sub>2</sub>O 年排放量约为 3.3 Tg N<sup>[4]</sup>,占人为排放总量的 50%<sup>[5]</sup>。耕地的 NO 年排放约为 1.4 Tg N,约是全球土壤 NO 总排放量的 18%<sup>[4]</sup>。

农田 N<sub>2</sub>O 和 NO 的排放与活性氮的投入密切相关<sup>[6-7]</sup>。在中国农田系统中,设施菜田无疑是氮肥投入最多的系统,每年仅化学氮肥的投入量就在 1200 kg·hm<sup>-2</sup> 以上<sup>[8-9]</sup>,是粮田的 2~4 倍<sup>[10]</sup>。如此高的氮肥投入必然会极大促进 N<sub>2</sub>O 和 NO 的排放。研究表明,北京一年两茬设施菜田的年排放量可达 15.9 kg N·hm<sup>-2</sup><sup>[11]</sup>,是粮田 N<sub>2</sub>O 排放量的 4~5 倍<sup>[12-13]</sup>。可见,设施菜田是重要的 N<sub>2</sub>O 农业排放源。近年来,设施菜田作为蔬菜生产的主导产业种植面积在不断扩大,与 1980 年相比增加了 500 倍,2008 年已达 334.7 万 hm<sup>2</sup><sup>[14-15]</sup>。因此,准确

收稿日期:2014-05-15

基金项目:国家自然科学基金(41301258,41230856,31371566);安徽省自然科学基金(1408085QC68)

作者简介:宋 贺(1982—),男,安徽萧县人,博士,主要从事土壤氮素循环方面的研究。E-mail:songhesonghe@foxmail.com

\* 通信作者:王敬国 E-mail:wangjgc@163.com

估算该系统的 N<sub>2</sub>O 和 NO 排放量,对编制我国农田温室气体排放清单,降低菜地痕量气体排放估算的不确定性具有重要意义。

近年来对设施菜田 N<sub>2</sub>O 排放的有限研究主要集中在菜地的畦上进行,没有考虑垄的 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[7,11,16]</sup>。我国的设施菜地,特别是北方的菜地一般由畦和垄两部分组成,畦较低,种植作物有利于灌溉和施肥,而垄较高且土壤紧实度高,方便蔬菜的采摘和喷洒农药。我们调查发现畦和垄的面积比约为 3:1,可见,垄在设施菜田中所占面积较大,忽略垄上的 N<sub>2</sub>O 排放将会影响设施菜田 N<sub>2</sub>O 排放估算的准确性。此外,通过侧渗作用垄上会聚集大量来自畦的无机氮素,这为氮素硝化和反硝化作用提供了大量的底物,可能会造成 N<sub>2</sub>O 的大量排放。本研究通过一年的设施蔬菜田间试验观察,定量测定垄上 N<sub>2</sub>O 和 NO 的排放,希望为未来准确定量我国设施菜田 N<sub>2</sub>O 和 NO 排放,提出有效减排措施提供基础和依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点概况

长期定位试验点位于山东省寿光市罗家村(36°55'N, 118°45'E),始于 2004 年 2 月,每年种植冬春季和秋冬季两季番茄,在两个生长季之间有 1~2 个月的休闲季,不种任何作物。该地区年平均温度为 12.4℃,降雨量约为 558 mm。初始试验点表层土壤有机质含量为 18.3 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量 1.37 g·kg<sup>-1</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 为 160 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾和速效磷均为 299 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 为 5.71<sup>[17]</sup>。供试温室为北方典型的冬温式大棚,采用后土墙-两侧扇形土墙构成,全年用乙烯-醋酸乙烯复合膜覆盖,冬天晚上加盖草帘子保温,全年不接受自然降雨,但在 2010 年 7 月 31 日,因更换新棚膜,接受一次自然降雨,面积为 655 m<sup>2</sup>(84 m×7.8 m)。

### 1.2 试验处理

试验处理主要包括两个:垄上处理(RT),垄上土壤全年没有翻耕和施肥。畦上处理(FT),施肥量和当地农民传统的施肥量一致,在番茄移栽前,撒施风干的鸡粪并翻耕到田里,其中冬春季 8 t·hm<sup>-2</sup>,相当于 146 kg N·hm<sup>-2</sup>,秋冬季 10 t·hm<sup>-2</sup>,相当于 211 kg N·hm<sup>-2</sup>。尿素随灌溉水一起施用,每次用量 120 kg N·hm<sup>-2</sup>,冬春季施肥灌溉 6 次,秋冬季共 5 次。全年除溶肥灌溉 11 次外,还有 9 次是纯水灌溉(无肥)。全年投入灌溉水 9192 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,年平均铵态氮、硝态氮和全氮浓度分别为 16.0、18.1、34.1 g N·L<sup>-1</sup>,全年灌溉水带

来的氮为 313 kg N·hm<sup>-2</sup>。单次灌溉量约为 50 mm,钾肥和磷肥施用量分别为 460 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup> 和 180 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>。垄上处理的小区尺寸为 7.8 m×0.6 m,畦上处理小区尺寸为 7.8 m×1.8 m,每个处理三次重复。本试验监测时间为 2010 年 1 月 11 日—2011 年 1 月 13 日。

### 1.3 N<sub>2</sub>O、NO 和 CO<sub>2</sub> 排放通量测定

采用静态暗箱-气相色谱法测定设施菜田 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 气体的排放通量,NO 排放通量采用静态暗箱-氮氧化物分析仪法测定。取样前 3 周,在各小区土壤中安装带有水槽的不锈钢箱底座,箱底座下面刀口约 10 cm 埋在土中,其上面的水槽下沿与地表平,边缘用土压实。垄上土壤由于较为紧实且离根较远,几乎不受根系影响,而畦上处理土壤受根系影响较大。为了更好地比较垄上处理和畦上处理的差异,消除根系干扰,在畦上处理箱底座埋设 4 张 0.3 m 的塑料薄膜。取样箱的长、宽和高分别为 0.5、0.3 m 和 0.5 m。材料为聚甲基丙烯酸甲酯,外面锡纸胶带和绝热材料缠绕包装成绝热暗箱。取样箱的一侧连接电子温度计探头测箱内温度,为了保证箱与底座连接处的气密性,取样前密封水槽内注水。取样时间为上午 8:30—11:00,每 1~3 d 取样一次。N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 用 60 cm 注射器取样,由三通阀保证气密性,每 6 min 一次,共 5 次。五点线性回归系数保证大于 0.95。NO 由 5 L 不透明气袋取样,通过气泵(KNF Neuberger GmbH, Freiburg, 德国)抽取,每 5 min 一次,共 2 次,抽取约 1.5 L 气体<sup>[18]</sup>。由于仪器出现故障,2010 年 9 月 27 日—10 月 22 日,NO 气体的排放通量没有监测。

气体采集后,在 24 h 内上气相色谱(Agilent 6890, 美国)测量 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 浓度。该色谱采用装有微池电子捕获检测器 HP 6890 Miceo-ECD 和 TCD,检测器温度分别为 330℃和 250℃,柱温为 55℃。载气流速为 25 mL·min<sup>-1</sup>,纯度为 99.999%的高纯氮气。NO 浓度用化学发光式氮氧化物分析仪(Thermo Environmental Instruments Inc, 美国)测量。NO 通量计算方法与 Mei 等<sup>[18]</sup>相同。

N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 通量按下式计算:

$$F = \rho \times V / A \times \Delta c / \Delta t \times 273 / (273 + T)$$

式中:  $F$  为换算成 N<sub>2</sub>O-N 的 N<sub>2</sub>O 排放通量,  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  或 CO<sub>2</sub>-C 的 CO<sub>2</sub> 排放通量,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $\rho$  为标准状态下 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $V$  为气体采样箱体积,  $\text{m}^3$ ;  $A$  为气体采样箱下的土壤面积,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta c / \Delta t$  为单位时间内采样箱 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 随时间的浓度变化率,

$10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $T$  为气体采样箱内平均空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

$\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{NO}$  的年累计排放量是一年内每天排放量累加值。日排放量为排放通量乘以 24 h, 两次间的排放通量采用插值法计算。

#### 1.4 土壤无机氮含量和土壤孔隙含水量的测定

与每次采气同步, 取 0~5 cm 表层土壤, 用  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  KCl 溶液进行浸提过滤, 放在  $-20^{\circ}\text{C}$  冰箱冷藏。解冻后由连续流动分析仪 (TRACCS2000, 德国) 测定土壤样品中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的含量并换算成每克干土无机氮含量。土壤的质量含水量是在  $105^{\circ}\text{C}$  条件下烘干土壤 12 h 后测定。土壤孔隙含水量由以下公式换算:

$$\text{WFPS}(\%) = \frac{\text{土壤体积含水量}}{(1 - \text{土壤容重}/2.65)} \times 100\%$$

#### 1.5 数据处理

数据由 Excel 2007 作图, 用 SPSS 19 分析软件进行单因素方差分析, 其显著水平为  $P < 0.05$ 。图表中数据为处理平均值  $\pm$  标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤无机氮含量和土壤孔隙含水量变化

从图 1 可以看出, 垄上处理土壤的铵态氮含量高于畦上处理土壤, 在每个生长季的后期这种表现更加突出。垄上土壤铵态氮年平均含量为  $21.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 几乎是畦上土壤 ( $11.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 的两倍。两个处理土壤硝态氮的监测结果 (图 2) 显示, 垄上处理的硝态氮含量远高于畦上处理, 最高时达到  $7036 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其年平均含量为  $1101.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 是畦上土壤 ( $91.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 的 10 倍以上。在两个生长季中, 冬春季的无机氮含量显著高于秋冬季, 可能和两季鸡粪的质量有关: 在番茄移栽前, 鸡粪会在棚外储存 1 个月左右, 因在秋冬季前的夏季温度较高, 鸡粪分解较快, 而冬春季前则温度较低鸡粪分解慢, 所以冬春季鸡粪质量要优于秋冬季。从图 3 看出, 设施菜田畦上土壤和垄上土壤的孔隙含水量 (WFPS) 均较高, 年平均值分别为 54.2% 和 63.2%。

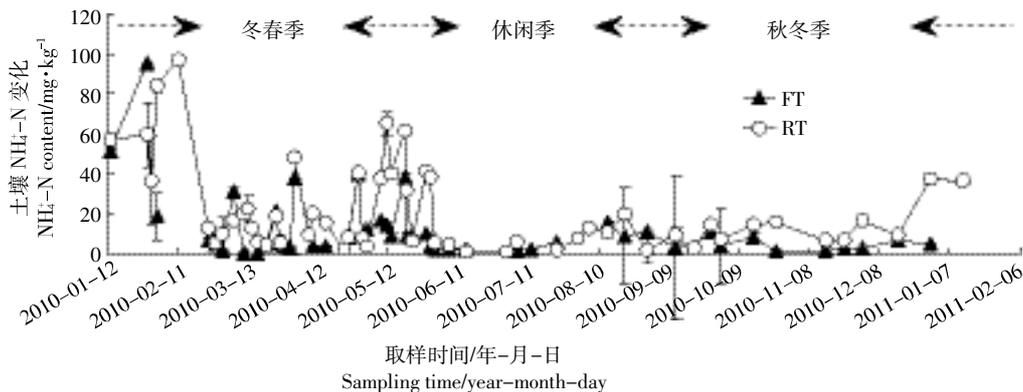


图 1 2010 年 1 月—2011 年 1 月供试温室不同处理 0~5 cm 土层土壤铵态氮变化

Figure 1 Dynamics of ammonium-N contents in 0~5 cm soil layer under different treatments from Jan. 2010 to Jan. 2011

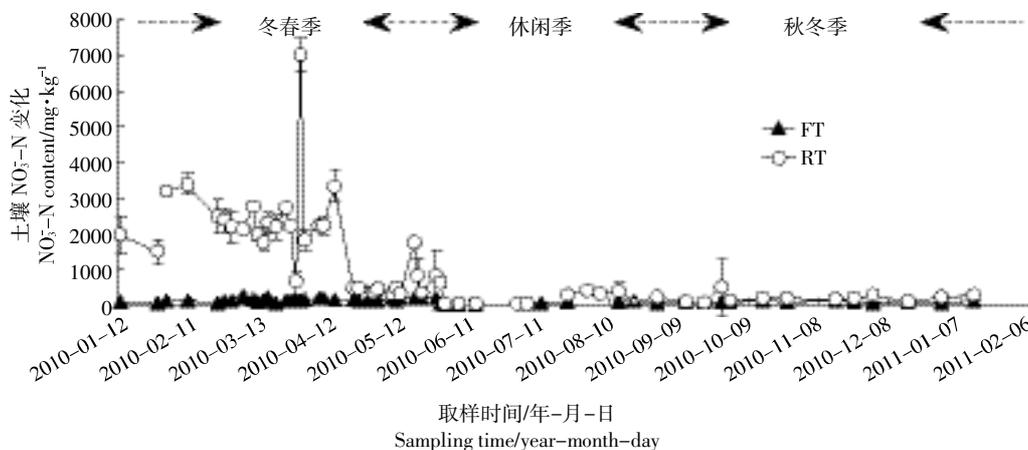


图 2 2010 年 1 月—2011 年 1 月供试温室不同处理 0~5 cm 土层土壤硝态氮变化

Figure 2 Dynamics of nitrate-N contents in 0~5 cm soil layer under different treatments from Jan. 2010 to Jan. 2011

## 2.2 设施菜田土壤 N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 和 NO 季节性排放

图4显示两个处理的 N<sub>2</sub>O 排放峰值主要集中在每个生长季的前期,可能与鸡粪施用有关。虽然和畦上 N<sub>2</sub>O 排放量相比,垄上处理的 N<sub>2</sub>O 排放量较低,但垄上仍有一定排放,其 N<sub>2</sub>O 年平均排放通量可达 50.2 μg N·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。两个处理 CO<sub>2</sub> 的排放峰值也出现在每个生长季鸡粪施用后两周左右的时间里(图5)。畦上处理的 CO<sub>2</sub> 年平均排放通量为 106.7 mg C·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,是垄上处理的两倍多。与 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 的排放规律不同,NO 的排放受鸡粪施用的影响较小,排放峰值主要集中在3月底至10月底这段温度较高时期(图6)。尽管垄上处理的 NO 排放低于畦上,但仍有一定的排放。

## 2.3 设施菜田土壤 N<sub>2</sub>O、NO 累计排放量

从表1可以看出,畦上和垄上 N<sub>2</sub>O 和 NO 年排放量差异显著,其中畦上和垄上 N<sub>2</sub>O 累计年排放分别为 11.60、4.23 kg N·hm<sup>-2</sup>,NO 的累计年排放分别为 1.27、0.43 kg N·hm<sup>-2</sup>。考虑到垄上和畦上的面积比为 1:3,

我们经过修正发现菜田 N<sub>2</sub>O 和 NO 的年累计排放量分别为 9.65、1.06 kg N·hm<sup>-2</sup>,这意味着如果气体取样点全部在畦上,N<sub>2</sub>O 和 NO 年排放量分别高估了 1.95 kg N·hm<sup>-2</sup> 和 0.21 kg N·hm<sup>-2</sup>。

## 3 讨论

与其他农业生产系统相比,设施菜田获得最高的水肥投入,其痕量气体 N<sub>2</sub>O 和 NO 的排放量也被认为最不确定<sup>[7]</sup>。区分垄上和畦上的 N<sub>2</sub>O 和 NO 排放贡献量是准确估算我国设施菜田痕量气体排放量的关键。本研究通过一年的田间原位监测发现,垄上和畦上土壤 N<sub>2</sub>O 和 NO 年排放量相差较大。畦上处理的 N<sub>2</sub>O 排放量为 11.6 kg N·hm<sup>-2</sup>,是粮田的 3~4 倍<sup>[12-13]</sup>,也是一般菜田的 2 倍以上<sup>[9]</sup>,该排放量与 He 等<sup>[6]</sup>的研究结果相近。畦上 N<sub>2</sub>O 排放系数为 0.58%(结果未显示),在其他有关设施菜田 N<sub>2</sub>O 排放系数研究的范围(0.3%~2.2%)内<sup>[16,20]</sup>。垄上处理的 N<sub>2</sub>O 排放量显著低

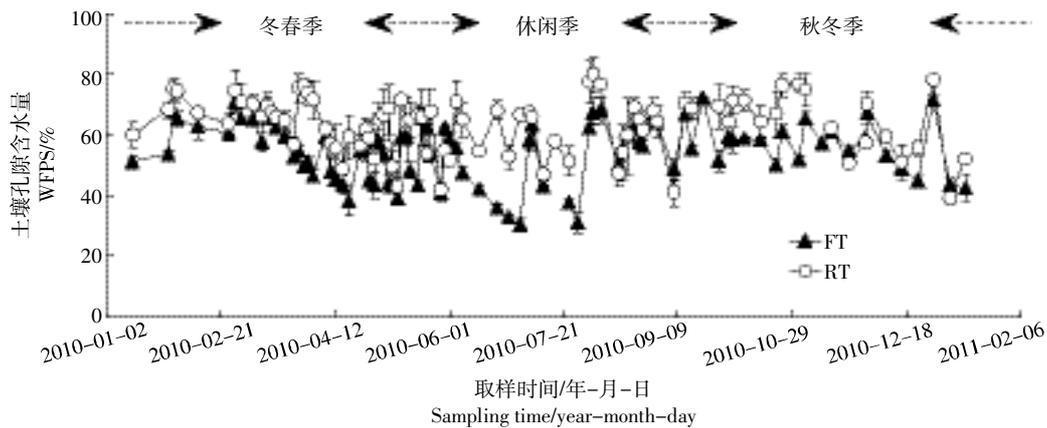


图3 2010年1月—2011年1月供试温室不同处理0~5 cm 土层土壤孔隙含水量变化

Figure 3 Dynamics of soil water-filled pore space (WFPS) in 0~5 cm soil layer under different treatments from Jan. 2010 to Jan. 2011

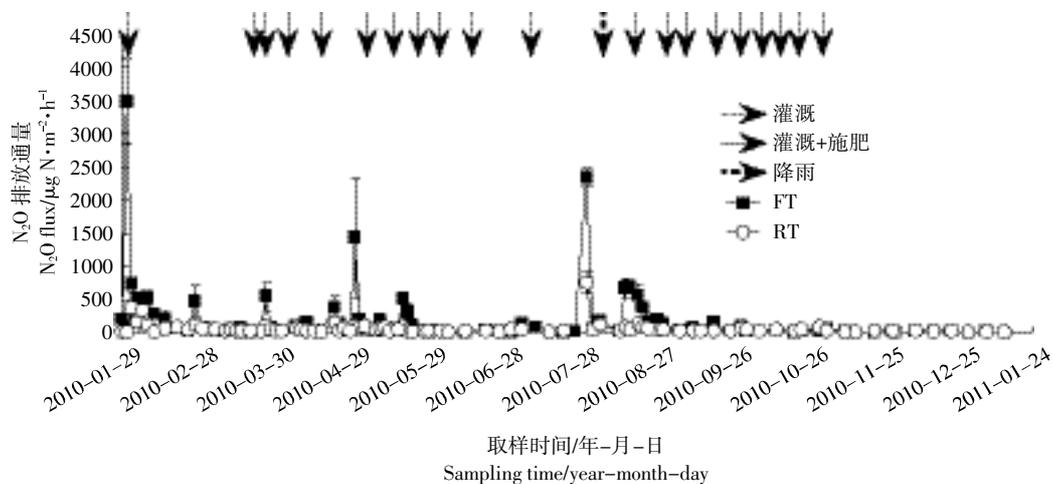


图4 2010年1月—2011年1月供试温室不同处理下土壤 N<sub>2</sub>O 排放变化

Figure 4 Dynamics of N<sub>2</sub>O emissions under different treatments from Jan. 2010 to Jan. 2011

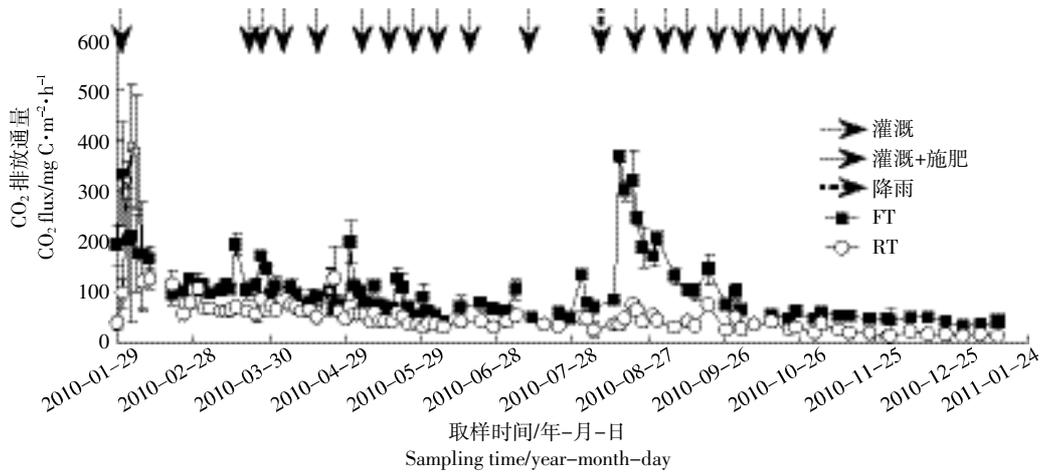
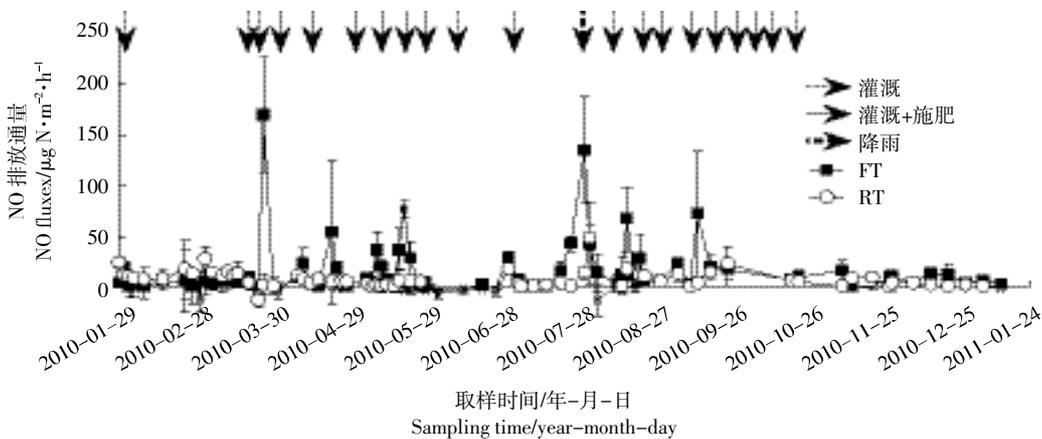
图5 2010年1月—2011年1月供试温室不同处理下土壤CO<sub>2</sub>排放变化Figure 5 Dynamics of CO<sub>2</sub> emissions in different treatments from Jan. 2010 to Jan. 2011

图6 2010年1月—2011年1月供试温室不同处理下土壤NO排放变化

Figure 6 Dynamics of NO emissions in different treatments from Jan. 2010 to Jan. 2011

表1 2010年1月—2011年1月不同处理的N<sub>2</sub>O和NO累计排放量Table 1 Cumulative emissions of N<sub>2</sub>O and NO in different treatments from Jan. 2010 to Jan. 2011

处理 Treatment	总氮投入 Total N input/kg N·hm <sup>-2</sup>	N <sub>2</sub> O 累计排放量 Cumulative N <sub>2</sub> O emission/kg N·hm <sup>-2</sup>	NO 累计排放量 Cumulative NO emission/kg N·hm <sup>-2</sup>
FT	1990	11.60a	1.27a
RT	—	4.23b	0.43b
3/4 FT+1/4 RT	1990	9.65	1.06

注:不同字母表示处理间显著差异( $P < 0.05$ )。Note: Different letters mean significant difference between treatments at  $P < 0.05$ .

于畦上,其排放量为  $4.23 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,该排放量与传统施肥的粮田相当<sup>[12-13]</sup>。在设施菜田 N<sub>2</sub>O 排放的估算研究中,如果气体取样点全部在畦上,N<sub>2</sub>O 年排放量将高估了  $1.95 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,整个环渤海湾地区设施菜田一年所高估的 N<sub>2</sub>O 排放量高达  $29.1 \text{ t N}$ 。

与 N<sub>2</sub>O 相比,畦上 NO 的排放量较低,仅为  $1.27 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,低于玉米-小麦田的  $3.0 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[13]</sup>,与施肥量更低的棉田的排放量相当<sup>[21]</sup>。这可能与含水量有关,本供试菜田畦上的年平均含水量高达  $54.2\%$ ,Laville 等<sup>[22]</sup>研究发现,NO 受土壤孔隙含水量的影响较大,高含水量将会促进 NO 的还原,当孔隙含水量超过  $60\%$  时其排放量几乎可以忽略。垄上孔隙含水量高达  $63.2\%$ ,所以垄上 NO 的排放量更低,仅为  $0.43 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。NO 排放的估算研究时,如果气体取样点全部在畦上,NO 年排放量会被高估  $0.21 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

此外,比较垄上和畦上土壤发现,垄上土壤的无机氮含量显著高于畦上,但其 N<sub>2</sub>O 和 NO 的排放量却低于垄上。造成这一现象的根本原因可能在于垄上土壤缺少微生物可利用碳源,进而限制了反硝化过程。我们发现垄上土壤 CO<sub>2</sub> 的排放量显著低于畦上,而 CO<sub>2</sub> 反映可利用有机碳的含量<sup>[23]</sup>。因此,为了降

低氮素反硝化损失,在施用有机肥的时候应当远离垄。此外,由于垄上 NO<sub>3</sub>-N 含量远高于畦上,而目前很多菜田 NO<sub>3</sub>-N 淋洗的研究主要集中在畦上<sup>[24-25]</sup>,而没有考虑到垄上 NO<sub>3</sub>-N 含量,这将明显低估 NO<sub>3</sub>-N 的淋洗排放量。同样,由于垄上是重要的无机氮的汇,在研究设施菜田氮素平衡的时候应该给予充分考虑,以免无法查清氮素转化主要路径。

#### 4 结论

设施菜田垄上和畦上的 N<sub>2</sub>O 和 NO 年排放通量差异较大,在定量设施菜田痕量气体排放时应充分考虑垄上和畦上土壤排放差异,区分它们的排放贡献。把垄和畦作为一个整体的研究无法准确定量设施菜田痕量气体的排放量。此外,垄是重要的无机氮的汇,估算氮素平衡和研究硝酸盐淋洗时,应该给予足够重视。

#### 参考文献:

- [1] Bothe H, Ferguson S J, Newton W E. Biology of the nitrogen cycle[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2007.
- [2] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide(N<sub>2</sub>O): The dominant ozone depleting substance emitted in the 21st century[J]. *Science*, 2009, 326: 123-125.
- [3] 蔡祖聪. 土壤痕量气体研究展望[J]. 土壤学报, 1993, 30(2): 117-124. CAI Zu-cong. Prospects for the research on soil trace gases[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(2): 117-124.
- [4] Stehfest E, Bouwman L. N<sub>2</sub>O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74(2): 207-228.
- [5] Mosier A, Kroeze C, Nevison C, et al. Closing the global atmospheric N<sub>2</sub>O budget: Nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle[J]. *OECD/IPCC/IEA Phase II Development of IPCC Guidelines*, 1998, 52(2): 225-248.
- [6] Gruber N, Galloway J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 293-296.
- [7] Liu Q H, Qin Y M, Zou J W, et al. Annual nitrous oxide emissions from open-air and greenhouse vegetable cropping systems in China[J]. *Plant Soil*, 2013, 370(1-2): 223-233.
- [8] Zhu J H, Li X L, Christie P, et al. Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilized hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 111(1): 70-80.
- [9] 王敬国. 设施菜田退化土壤修复与资源高效利用[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011: 1-18. WANG Jing-guo. Management of degraded vegetable soils in greenhouses[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011: 1-18.
- [10] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [11] 张仲新, 李玉娥, 华璐, 等. 不同施肥量对设施菜地 N<sub>2</sub>O 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<sub>2</sub>O flux from protected vegetable land[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(5): 269-275.
- [12] Ding W X, Cai Y, Cai Z C, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 373(2-3): 501-511.
- [13] 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.
- [14] 张真和. 我国蔬菜产业发展中的问题与对策[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(4): 57-60. ZHANG Zhen-he. Review of China agricultural science and technology[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2001, 3(4): 57-60.
- [15] 张真和, 陈青云, 高丽红, 等. 我国设施蔬菜产业发展对策研究[J]. 蔬菜, 2010, 5: 1-4. ZHANG Zhen-he, CHEN Qing-yun, GAO Li-hong, et al. Countermeasures concerning the development of greenhouse production industry in China[J]. *Vegetables*, 2010, 5: 1-4.
- [16] He F F, Jiang R F, Chen Q, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(5): 1666-1672.
- [17] He F F, Chen Q, Jiang R F, et al. Yield and nitrogen balance of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) with conventional and site-specific nitrogen management in Northern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 77: 1-14.
- [18] Mei B L, Zheng X H, Xie B H, et al. Nitric oxide emissions from conventional vegetable fields in south eastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(17): 2762-2769.
- [19] Pang X B, Mu Y J, Lee X Q, et al. Nitric oxides and nitrous oxide fluxes from typical vegetables cropland in China: Effects of canopy, soil properties and field management[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(16): 2571-2578.
- [20] 杨岩, 孙钦平, 李吉进, 等. 不同水肥处理对设施菜地 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 430-436. YANG Yan, SUN Qin-ping, LI Ji-jin, et al. Effects of different fertilizer and irrigation levels on N<sub>2</sub>O emission from greenhouse vegetable lands[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 430-436.
- [21] Liu C Y, Zheng X H, Zhou Z X, et al. Nitrous oxide and nitric oxide emissions from an irrigated cotton field in Northern China[J]. *Plant and Soil*, 2010, 332(1-2): 123-134.
- [22] Laville P, Lehuger S, Loubet B, et al. Effect of management, climate and soil conditions on N<sub>2</sub>O and NO emissions from an arable crop rotation using high temporal resolution measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(2): 228-240.
- [23] Wang W J, Dalal R C, Moodya P W, et al. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2003, 35(2): 273-284.
- [24] Zhao C S, Hu C X, Wei H, et al. A lysimeter study of nitrate leaching and optimum nitrogen application rates for intensively irrigated vegetable production systems in Central China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(1): 9-17.
- [25] Song X Z, Zhao C X, Wang X L, et al. Study of nitrate leaching and nitrogen fate under intensive vegetable production pattern in Northern China[J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2009, 332(4): 385-392.