

# 施用畜禽粪便堆肥品的蔬菜地 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub> 排放特征

万合锋<sup>1,2</sup>, 赵晨阳<sup>1,3</sup>, 钟佳<sup>1</sup>, 葛振<sup>1,4</sup>, 魏源送<sup>1\*</sup>, 郑嘉熹<sup>1</sup>, 鄢玉龙<sup>2</sup>, 韩圣慧<sup>5\*</sup>, 郑博福<sup>2</sup>, 李洪枚<sup>3</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 南昌大学环境与化学工程学院, 南昌 330031; 3. 首都经济贸易大学安全与环境工程学院, 北京 100070; 4. 北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京 100044; 5. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 农田是重要的温室气体排放来源之一, 其中蔬菜地的温室气体排放日益受到人们关注. 以北京市郊某温室种植的油麦菜地为研究对象, 通过大棚试验, 考察和比较了油麦菜地施用不同类型畜禽粪便堆肥产品的 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub> 排放特征及其影响因素. 结果表明, 油麦菜地 NRM、RM、CF 处理的 CH<sub>4</sub> 排放系数分别为 0.2%、0.027%、0.004%; N<sub>2</sub>O 排放系数分别为 0.18%、0.63%、0.74%; NH<sub>3</sub> 排放系数分别为 2.00%、3.98%、2.53%. CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤温度和地表湿度相关, N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤温度、地表温度和湿度相关, CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub> 排放通量均受土壤含水率影响, 而温室中的气温不是影响 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub> 排放的主要因素.

**关键词:** 畜禽粪便堆肥品; 油麦菜; 温室气体; 氨气; 排放系数

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0892-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.03.012

## Emission of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts

WAN He-feng<sup>1,2</sup>, ZHAO Chen-yang<sup>1,3</sup>, ZHONG Jia<sup>1</sup>, GE Zhen<sup>1,4</sup>, WEI Yuan-song<sup>1</sup>, ZHENG Jia-xi<sup>1</sup>, WU Yu-long<sup>2</sup>, HAN Sheng-hui<sup>5</sup>, ZHENG Bo-fu<sup>2</sup>, LI Hong-mei<sup>3</sup>

(1. Research Center for Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. School of Safety and Environmental Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China; 4. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 5. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Greenhouse gas (GHG) emission from vegetable land is of great concern recently because agriculture land is one of the major sources contributing to global GHG emission. In this study, an experiment of *Lactuca sativa* L. land applied with different animal manure composts was carried out in a greenhouse vegetable land located in the suburb of Beijing to monitor the emission of GHG (CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) and ammonia *in situ*, and to analyze the affecting factors of GHG and ammonia emission. Results showed that the emission factors (EFs) of CH<sub>4</sub> from Treatment NRM, RM and CF were 0.2%, 0.027% and 0.004%, respectively, the EFs of N<sub>2</sub>O from these three treatments were 0.18%, 0.63% and 0.74%, respectively, and the EFs of ammonia were 2.00%, 3.98% and 2.53%, respectively. CH<sub>4</sub> emission flux was significantly affected by soil temperature and humidity, while N<sub>2</sub>O emission flux was related to soil temperature, surface temperature and humidity. The emission fluxes of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> were significantly affected by soil moisture, but there was little relation between CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> emissions and the ambient temperature in the greenhouse.

**Key words:** animal manure compost; *Lactuca sativa* L.; greenhouse gas; ammonia; emission factor

全球大气中温室气体 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的浓度值分别从 1750 年工业化前的约 715 × 10<sup>-9</sup>、270 × 10<sup>-9</sup> 增至 2005 年的 1 774 × 10<sup>-9</sup>、319 × 10<sup>-9</sup>, 其中农业活动是 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 浓度增加的主要原因之一. 据 IPCC (2007) 统计, 农业温室气体排放占全球温室气体排放量的 13.5% 左右<sup>[1]</sup>. 2005 年我国农业活动导致的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放分别占全国 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 总排放量的 56.62% 和 73.79%<sup>[2]</sup>. NH<sub>3</sub> 不仅是酸雨的重要影响

因素, 也是畜禽粪便堆肥及其土地利用过程氮素损失的主要途径之一, 进入大气的氨随降水或干湿沉降重新进入农田和自然生态系统, 导致土壤和水体

收稿日期: 2013-07-31; 修订日期: 2013-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41075090, 50578156); 公益性行业(农业)科研专项(201303091)

作者简介: 万合锋 (1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为有机固废资源化处理, E-mail: whfeng@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: yswei@ceees.ac.cn; shenghui\_han@post.iap.ac.cn

中氮素含量升高、植物种类更替和部分物种灭绝<sup>[3,4]</sup>。我国 1993 年颁布的《恶臭污染物排放标准》(GB 14554-93) 将氨气列入首要恶臭污染物。

随着生活水平的提高,蔬菜在人们饮食结构的比重增加,我国蔬菜地面积占农作物总播种面积的比例由 1980 年的 2.2% 增加到 2011 年的 11.8%<sup>[5]</sup>。蔬菜地与其它农田生态系统不同,具有受人类活动影响剧烈、复种指数高、有机肥用量大、投入养分高、移走养分多等特点<sup>[6-9]</sup>,因此,蔬菜地施肥量较一般粮田高,施肥量远超出作物平均需氮水平,例如,我国蔬菜生产规模前 10 位大省的氮肥平均施用量超 300 kg·hm<sup>-2</sup>,少数地区超过 500 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[10]</sup>;北京市温室蔬菜系统施氮量高达 1 000 kg·(hm<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>,山东有些地方高达 6 000 kg·(hm<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>,远高于农作物平均施氮水平 180 kg·(hm<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup><sup>[11]</sup>。因长期的高施肥量,造成蔬菜地土壤总氮量比一般田地高,有研究表明温室蔬菜地 0~200 cm 土层的总氮含量比一般农田高出 36.2%<sup>[12]</sup>。蔬菜地残留的氮素和新施加的氮素是 NH<sub>3</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的主要来源<sup>[4,13,14]</sup>,例如,有研究表明温室蔬菜地的施用氮肥中约占 TN 的 10% 以 NH<sub>3</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的形式排放<sup>[15]</sup>,甚至高达 TN 的 35.5% 以 N<sub>2</sub>O 形式的排放<sup>[16]</sup>。

国内外有关农业活动中 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的研究主要集中在农田、湿地、草地和森林,尤其是大宗作物(如水稻、小麦和玉米)<sup>[8,17-20]</sup>。近些年来,有关蔬菜地 N<sub>2</sub>O 排放的研究日益得到人们的重视,但却缺乏蔬菜地中有关 N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 和 NH<sub>3</sub> 同时排放的研究<sup>[6,18,21,22]</sup>。

畜禽粪便经堆肥处理后作为有机肥施用于农田是一种广为应用的方式。油麦菜(*Lactuca sativa* L.) 是我国重要的栽培蔬菜之一,生长迅

速,生育期短,需肥量较大。因此,针对当前国内外蔬菜地温室气体(N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>)和氨气排放研究的现状,本研究以油麦菜为对象,通过现场观测,考察不同畜禽粪便堆肥品施用条件下的蔬菜地 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub> 排放特征,以期为我国蔬菜地 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub> 的排放因子估算及其减排措施制订提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计及田间管理

试验于 2011 年 12 月~2012 年 2 月在北京市通州区某一蔬菜大棚中进行(39°71', 116°65'),供试蔬菜为油麦菜(*Lactuca sativa* L.),生长期 55 d,按照传统管理模式(如施肥、翻耕、灌溉、移栽等)管理菜地。2011 年 12 月上旬育苗,22 日施加基肥,24 日下午移栽,种植密度 36 穴·m<sup>-2</sup>,每穴 1 株,2012-02-17 日收割。

试验设置 4 个处理,分别为不施加有机肥(CK 处理)、“特锦浓”商品肥(CF 处理,属有机肥)、无添加赤泥的猪粪堆肥品(NRM 处理)、添加赤泥的猪粪堆肥品(RM 处理)3 种有机肥基本性状如表 1 所示<sup>[23,24]</sup>。每个处理随机设置 3 次重复,分别选取长×宽为 1.5 m×2 m 的试验地 12 块,总共用地 36 m<sup>2</sup>,各地块之间采用插入土壤表层下 30 cm 的 PVC 板隔开。为了解试验地土壤性状存在的差异,试验前测定了已划分的各小区土壤背景值(表 2)。各处理施加畜禽粪便堆肥品以基肥的形式一次性加入,施肥严格按照当地的传统模式,施量(以 N 计)分别为:CK: 0、CF: 0.13 kg·m<sup>-2</sup>、NRM: 0.13 kg·m<sup>-2</sup>、RM: 0.065 kg·m<sup>-2</sup>,田间管理与当地传统管理保持一致。*t* 检验结果表明 4 组处理的土壤背景值各指标均不存在显著性差异。

表 1 各畜禽粪便堆肥品的基本性质<sup>1)</sup>

Table 1 Properties of different manure compost products

类别	pH 值	有机质/%	TN/mg·g <sup>-1</sup>	TC/mg·g <sup>-1</sup>	TP/mg·g <sup>-1</sup>
特锦浓	8.81±0.24	57.11	23.24	219.19	11.00
无赤泥	9.79±0.15	55.25	21.84	202.86	18.45
添加赤泥	9.70±0.18	49.32	18.95	179.24	16.86

1) 除 pH 值外,其余指标以干重计

### 1.2 气体采集与分析

温室气体(N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>)采集:采用静态箱法采集气样<sup>[25]</sup>。采样箱为组合式不锈钢静态采样箱,由底座和顶箱两部分构成。底座尺寸(长×宽×高)50 cm×50 cm×20 cm,底座设有水封槽。在整个试验

期,底座固定埋在土壤里,上沿高出土壤表面 5 cm,露出水封槽,并保持底座处于水平位置。顶箱尺寸(长×宽×高)50 cm×50 cm×50 cm(封顶),内接有数字温度计探头。箱体外包一层优质泡沫,以防止太阳辐射下采样箱壁温度升高影响观测结果。箱

侧面装有采气三通阀和防止箱内产生负压的导气管。采样时将顶箱套在底座的水封槽上,里面加水密封,在封箱后的每 5 min 用 60 mL 注射器采样一次,共采 5 次,每次用注射器抽取 60 mL 气体,在 24 h 内完成测样。为了尽量减少人为扰动对土壤理化

特性的影响,采样在搭好的木桥上进行。在气体采样的同时,分别测量土壤表层下 5 cm 处温度、地表温度和湿度、箱内温度和大气温度。气样采集完毕后,采集适量的土壤样,用 5 号自封袋密封,带回实验室测量土壤含水率。

表 2 各试验地土壤的理化特性<sup>1)</sup>

Table 2 Properties of different experiment soils

取样时间	处理区	容重/g·cm <sup>-3</sup>	pH 值	TN/mg·g <sup>-1</sup>	TC/mg·g <sup>-1</sup>	TP/mg·g <sup>-1</sup>
2011-12-19 <sup>a</sup>	CK			2.22 ± 0.55	26.64 ± 3.04	1.66 ± 0.47
	CF		8.74 ± 0.1 <sup>*</sup>	2.01 ± 0.37	25.55 ± 1.88	1.61 ± 0.36
	NRM			1.99 ± 0.30	25.50 ± 2.03	1.66 ± 0.20
	RM			2.79 ± 0.18	31.84 ± 0.29	2.45 ± 0.23
2011-12-24 <sup>b</sup>	CK	1.12 ± 0.16	9.0 ± 0.2	2.10 ± 0.69	25.82 ± 4.18	1.66 ± 0.65
	CF	0.92 ± 0.24	9.0 ± 0.28	3.46 ± 0.81	36.25 ± 6.62	2.58 ± 0.51
	NRM	0.96 ± 0.23	8.7 ± 0.16	2.73 ± 0.83	30.61 ± 6.75	2.08 ± 0.61
	RM	0.90 ± 0.17	8.9 ± 0.18	2.91 ± 0.64	32.24 ± 5.24	2.37 ± 0.37
2012-02-28 <sup>c</sup>	CK		7.9 ± 0.37	2.92 ± 0.84	31.43 ± 6.90	2.33 ± 0.90
	CF		7.7 ± 0.48	3.21 ± 0.31	34.17 ± 2.83	2.51 ± 0.13
	NRM		7.8 ± 0.38	2.54 ± 0.22	29.10 ± 2.45	2.16 ± 0.34
	RM		8.1 ± 0.38	3.00 ± 0.35	33.16 ± 1.96	2.70 ± 0.20

1) a 表示 2011 年 12 月 19 日田间 4 组处理小区的土壤背景值; b 表示 2011 年 12 月 24 日施加的有机肥与土壤混匀; c 表示油菜收获; \* 土壤背景 pH 值

NH<sub>3</sub> 采集: 采用通气法氨气捕获装置<sup>[14,23]</sup>。试验开始前,分别在两片海绵(厚 17 mm)上均匀加入 15 mL 磷酸甘油(50 mL 磷酸加入 40 mL 丙三醇,定容至 1 L),放入 PC 管装置内的上下两端,下端吸收气体的海绵距管口 4 cm 并平行于采样平面放置,上端海绵齐管口即可。将装置装配好后轻放采样点位上,装置周围密封好。开始计时,1.5 h 左右收取,并记录结束时间。收取时将装置轻轻提起,把下端的海绵放入盛有 300 mL (1 mol·L<sup>-1</sup>) KCl 的塑料瓶中,用塑料膜封口,再旋紧瓶盖,避免运输过程中液体外漏。密封标记后带回实验室测定。

N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 样品采用美国安捷伦 4890D 气相色谱仪同时分析。N<sub>2</sub>O 浓度采用电子捕获检测器(GC/ECD)联机定量分析检测,检测温度 350℃,柱温 55℃; CH<sub>4</sub> 浓度采用氢火焰离子化检测器(GC/FID)联机定量检测,检测温度 200℃,柱温 55℃。前置柱采用不锈钢填充柱,内径 2 mm × 长 1 m,内填 80/100 目 porapakQ; 分析柱为内径 2 mm × 长 3 m、80/100 目 porapakQ 不锈钢填充柱; 载气: Ar-CH<sub>4</sub> (10%); 载气流速: 30 mL·min<sup>-1</sup>; 样品分析用量 15 mL,定量阀控制 10 mL 气样进入检测器分析。将得到的色谱峰面积数据转换成浓度。依据浓度值计算气体排放通量,即单位时间单位面积排放的气体质

量,计算公式为<sup>[26]</sup>:

$$f = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t} = h \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{M \times 273}{22.41 \times \left(273 + \frac{T_1 + T_2}{2}\right)} \times 60 \quad (1)$$

式中  $f$  为气体排放通量,  $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ;  $\Delta m$  为 N<sub>2</sub>O 气体中的 N 质量或 CH<sub>4</sub> 气体中的 C 质量,  $\mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ ;  $A$  为静态采样箱截面积,  $\text{m}^2$ ;  $h$  为静态采样箱有效高度,  $\mu\text{m}$ ;  $\Delta c / \Delta t$  为单位时间气体样品的浓度变化量,  $10^{-6} \text{ min}^{-1}$ ;  $M$  为 1 mol N<sub>2</sub>O 或 CH<sub>4</sub> 中对应的 N 或 C 元素摩尔质量,  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $273 / [273 + (T_1 + T_2) / 2]$  为温度校正系数;  $T_1$ 、 $T_2$  为取第 1 个和最后 1 个样品时静态采样箱内气体温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

NH<sub>3</sub> 分析: 把浸泡在 1 mol·L<sup>-1</sup> KCl 溶液的海绵拿出,采用纳氏试剂分光光度法测定浸提液氨氮的含量。NH<sub>3</sub> 挥发量计算公式(2)如下<sup>[14]</sup>:

$$f = \frac{c \cdot V}{A \cdot t} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中  $f$  为氨气挥发速率,  $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ;  $c$  为浸提液中氨氮的浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $V$  为浸提液的体积,  $\mu\text{L}$ ;  $A$  为吸收氨气的海绵的有效面积,  $\text{m}^2$ ;  $t$  为采样时间,  $\text{h}$ 。

气体排放累积量采用公式(3)和(4)计算<sup>[6]</sup>:

$$Q = \sum \Delta F_i t_i \quad (3)$$

$$\Delta F_i = (F_i + F_{i+1}) / 2 \quad (4)$$

式中  $i$  为取样次数;  $Q$  为各处理区气体排放总量 (以 N 或 C 质量计)  $g$  或  $mg$ ;  $F$  为气体排放通量,  $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ;  $t$  为相邻两次测定的间隔天数  $d$ .

由于温室气体排放具有明显的昼夜变化规律, 时间变异性很大, 因此采样时间的选择十分重要. 目前一般选择 08:00 ~ 12:00 作为当日采样时间, 并假定此测定值能代表当日交换通量<sup>[27]</sup>. 本研究的采样时间选择在上午 09:00 ~ 11:00. 每块试验地设置一个气体采样点, 共计 12 个采样点. 静态采样箱置于每块试验地的中间位置, 以除去边缘效应区域. 采样时人站在预先搭好的桥上采样, 最大程度减少人为活动的干扰. 气体采样频率: 前 11 d 每天采样, 随后分别在第 14、17、20、23、26、47、49、54、57 和 58 d 采样 (第 26 ~ 47 d 为春节假期), 每次气体采样同时监测环境温度.

### 1.3 土壤样品的采集和分析

土壤样品的采集: 每次气体样品采集同时监测土壤表面温、湿度、地表 5 cm 土壤温度以及土壤含水率. 土壤样品分别在试验开始前、试验添加有机肥后和油麦菜收获时取样 3 次, 在气体采样结束后按照五点“X”法进行土壤取样<sup>[28,29]</sup>. 土壤样品主要监测指标和方法如下: 含水率、有机质、TN、TC、TP. 称取 5.000 0 g 左右鲜样 105℃ 烘 24 h, 测其含水率, 在 600℃ 下灼烧 6 h, 测其有机质. 取部分土壤样品在通风橱中风干后, 研磨过 100 目筛, 用元素分析仪 (型号 Varion EL III 德国 Elementar 公司) 测定 TN、TC; TP 采用 HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 红外消煮-分光光度法测定.

蔬菜样品在移栽和收获期采样, 主要检测样品生物量和株高.

### 1.4 数据处理

数据处理采用 Excel 2010 和 Origin 8.1 统计分析应用 SPSS for Windows, Version 16.0 (Chicago, IL, USA).

## 2 结果与讨论

### 2.1 CH<sub>4</sub> 的排放通量和累积量变化

如图 1 所示, CK 处理的 CH<sub>4</sub> 排放通量在油麦菜生长期的第 3、9 和 17 d 出现峰值, 分别为 1.25、2.08 和 2.28  $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ , 且 CH<sub>4</sub> 排放主要集中在油麦菜生长的初期; RM 和 CF 处理的 CH<sub>4</sub> 排放

峰值出现在油麦菜生长的中期; NRM 处理的 CH<sub>4</sub> 排放集中在油麦菜生长的中后期 (第 26 ~ 54 d), 峰值 [2.58  $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ] 出现在第 47 d, 虽较其它处理滞后, 但高于其它处理. 4 组处理的 CH<sub>4</sub> 平均排放通量和变化范围分别如下: CK 0.881, -0.011 ~ 2.280  $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ; CF 0.035, -0.042 ~ 0.151  $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ; NRM 0.339, -0.234 ~ 2.580  $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ; RM 0.254, -0.051 ~ 0.803  $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ . RM 和 CF 试验地的 CH<sub>4</sub> 累积排放量明显低于 CK 处理, 4 个处理以 CH<sub>4</sub> 形式的平均累积 C 排放量 (Cumulative C) 次序为 NRM (3 525.47 mg) > CK (2 677.08 mg) > RM (985.71 mg) > CF (163.48 mg). Conrad 等<sup>[30]</sup>的研究表明, 氮肥施加导致土壤中各形态氮富足, 充足的铵在适宜的氧环境下有利甲烷氧化菌对 CH<sub>4</sub> 的氧化作用, 这解释了不施加氮肥的 CK 处理反而 CH<sub>4</sub> 排放量较高的原因; 另外, 在油麦菜移栽前后 (NRM 除外) 明显观测到 CH<sub>4</sub> 排放的巨大差异, 这可能是土壤中丰富的氮素在蔬菜种植、翻耕和浇水等人为扰动下, 影响了 CH<sub>4</sub> 氧化过程<sup>[20]</sup>, 也可能是油麦菜根际硝化对 CH<sub>4</sub> 的抑制, 这说明菜地是 CH<sub>4</sub> 的微弱汇<sup>[30]</sup>.

$t$  检验结果表明, CK 与 CF ( $P=0$ )、CK 与 RM ( $P=0$ )、CK 与 NRM ( $P=0.02$ )、CF 与 RM ( $P=0.004$ ) 之间的 CH<sub>4</sub> 排放通量均具有极显著差异, 但 CF 与 NRM ( $P=0.075$ )、RM 与 NRM ( $P=0.311$ ) 之间的 CH<sub>4</sub> 排放通量无显著差异.

### 2.2 N<sub>2</sub>O 的排放通量和累积量变化

如图 1 所示, 4 个处理的 N<sub>2</sub>O 排放具有相似的变化规律, 主要集中在前 20 d, 并且油麦菜移栽 (第 4 d) 时 N<sub>2</sub>O 排放增高, 这说明蔬菜移栽可同时影响 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放. 整个试验期 CF、RM 和 NRM 处理的 N<sub>2</sub>O 排放通量总体呈下降趋势, 但 CK 处理后期的 N<sub>2</sub>O 排放量仍较高.

4 组处理 N<sub>2</sub>O 的平均排放通量和变化范围分别是: CK 1.328, 0.50 ~ 3.507  $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ; CF 1.067, 0.101 ~ 2.746  $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ; RM 0.502, 0.089 ~ 1.626  $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ; NRM 0.282, 0.043 ~ 1.014  $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ; 4 个处理以 N<sub>2</sub>O 形式平均累积 N 排放量 (Cumulative N) 分别为 CK (3 881.23 mg) > CF (2 871.13 mg) > RM (1 232.42 mg) > NRM (691.90 mg). 从整个过程看, CK 处理排放的 N<sub>2</sub>O 高于其它处理, 这与许多研究认为施氮水平与 N<sub>2</sub>O 的排放通量呈正相关结论相反, 但是邱炜红<sup>[9]</sup>采用

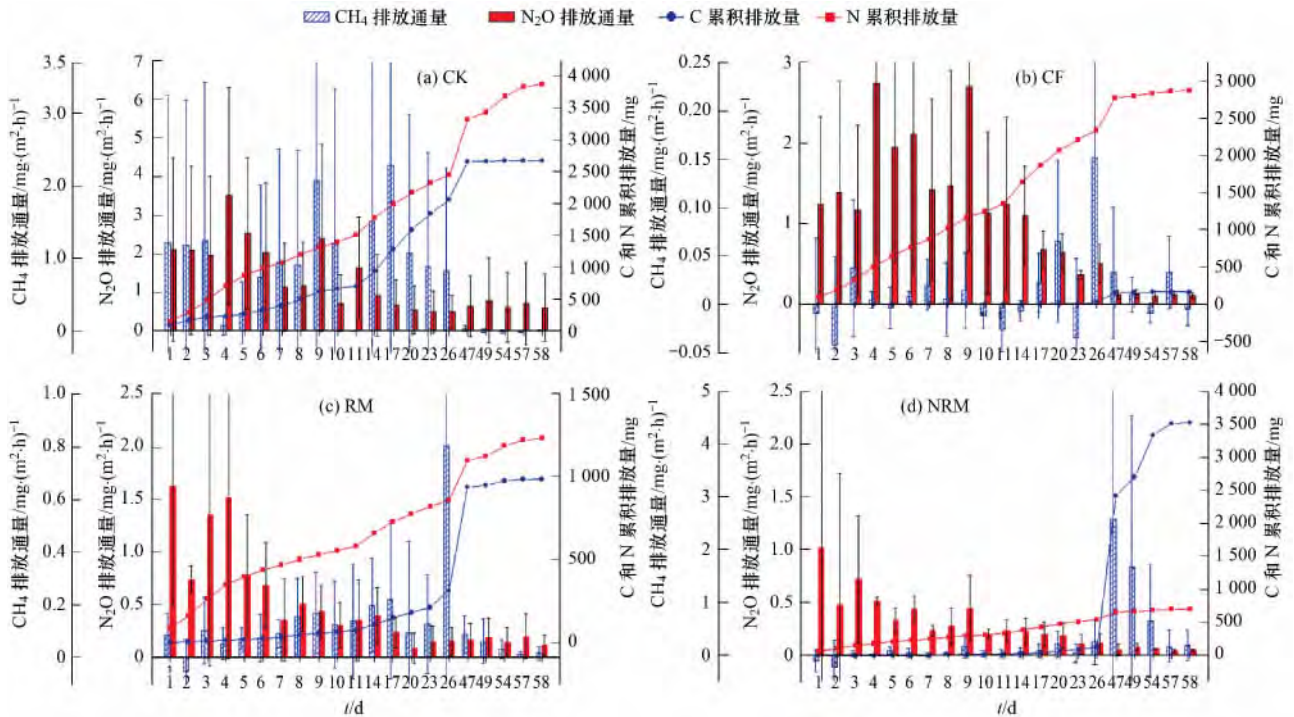


图1 油麦菜生长期各处理的温室气体( $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ )排放通量和累积排放量

Fig. 1 Fluxes and accumulative emissions of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  during the growth of *Lactuca sativa* L.

原状土柱试验研究了蔬菜地与裸地的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放差异,发现低施氮量( $500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,以N计)下裸地 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量是高施氮量( $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,以N计)下蔬菜地的2倍多.本研究CK处理的 $\text{N}_2\text{O}$ 累计排放量分别是CF、RM和NRM处理的1.4、3.1和5.6倍,这可能是CK的土壤含水率高于其它处理造成了利于 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的缺氧环境.

$t$ 检验结果表明,CK与RM( $P=0.001$ )、CK与NRM( $P=0.000$ )、CF与RM( $P=0.010$ )、CF与NRM( $P=0.000$ )的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量均具有极显著差异;但CK与CF( $P=0.321$ )、RM与NRM( $P=0.066$ )的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量无极显著差异.

### 2.3 $\text{NH}_3$ 的排放通量和累积量变化

如图2所示,4组处理的 $\text{NH}_3$ 排放峰值都出现在第1d和第54d,并且这段时间内均观测到 $\text{NH}_3$ 的排放,但54d后基本观测不到 $\text{NH}_3$ 的排放,开始有负排放量出现.导致这种现象的原因是试验开始时土壤N源充足,含有丰富的铵态和氨态氮<sup>[18]</sup>,加之开始阶段土壤的高pH值(8.7~9.0)和60%左右的湿度环境为 $\text{NH}_3$ 排放提供了较高的潜势<sup>[6,31]</sup>,而在试验后期N的消耗和迁移转化已经基本结束,观测不到 $\text{NH}_3$ 的排放.

4组处理的 $\text{NH}_3$ 平均排放通量和变化范围分别是:CK  $1.88$ ,  $-0.023 \sim 6.175 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ; CF

$2.95$ ,  $0.026 \sim 12.556 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ; RM  $1.89$ ,  $-0.003 \sim 8.566 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ; NRM  $1.88$ ,  $0.002 \sim 8.251 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ; 4组处理的 $\text{NH}_3$ 平均累积排放量分别为CF(9.88 g) > CK(7.88 g) > RM(7.80 g) > NRM(7.76 g),相应的pH值依次为9.0、9.0、8.9、8.7,可见碱性环境有利于铵态氮以 $\text{NH}_3$ 形式挥发.

$t$ 检验结果表明,CK与CF( $P=0.137$ )、CK与RM( $P=0.968$ )、CK与NRM( $P=0.985$ )、CF与RM( $P=0.170$ )、CF与NRM( $P=0.165$ )、RM与NRM( $P=0.984$ )之间的 $\text{NH}_3$ 排放通量均无极显著差异.

### 2.4 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 和 $\text{NH}_3$ 的排放系数

如表3所示, $\text{CH}_4$ 排放系数从大到小依次为NRM、RM、CF; $\text{NH}_3$ 排放系数从大到小依次为RM、CF、NRM;本试验NRM、RM、CF处理的 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放系数分别是0.18%、0.63%、0.74%,这些值低于文献[32]指出的全球因施用氮肥引起土壤的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放系数2.2%~2.7%,当然早期观测与现今的试验和检测条件存在差异,这些结果有待进一步研究.本试验各处理的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放系数介于国内研究的0.27%~1.13%之间<sup>[33]</sup>,而RM和CF处理的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放系数与南京郊区蔬菜地 $\text{N}_2\text{O}$ 平均排放系数0.73%较接近<sup>[33,34]</sup>.

表3 不同处理 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和 NH<sub>3</sub> 的排放总量和排放系数<sup>1)</sup>  
Table 3 Accumulative emission and emission factor of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub>

处理	CH <sub>4</sub>		N <sub>2</sub> O		NH <sub>3</sub>	
	总量/mg·m <sup>-2</sup>	排放系数/%	总量/mg·m <sup>-2</sup>	排放系数/%	总量/g·m <sup>-2</sup>	排放系数/%
CK	892.36	—	1 293.74	—	2.63	—
CF	54.49	0.004	957.05	0.74	3.29	2.53
RM	328.57	0.027	410.81	0.63	2.59	3.98
NRM	1 175.16	0.20	230.63	0.18	2.60	2.00

1) 排放系数: 以 C 或 N 计的气体排放总量占施用堆肥品初始总 C 或 N 量的百分比

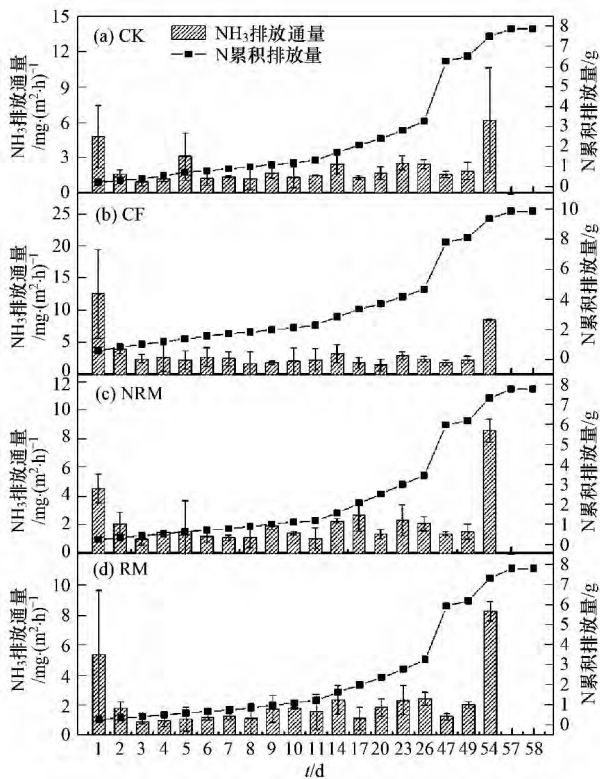


图2 油菜菜生长期各处理的氨气排放特征  
Fig. 2 Fluxes and accumulative of NH<sub>3</sub> emission during the growth of *Lactuca sativa* L.

2.5 环境因素对 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和 NH<sub>3</sub> 排放量的影响

农业活动(如翻耕、灌溉和施肥等)、土壤特性和环境因子(如温度、湿度和降雨量等)是影响N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放的主要因素<sup>[19, 20, 22, 30, 35, 36]</sup>。不同施肥方式、施肥量和添加剂(锯末、过磷酸钙)、土壤温度、pH值、时空差异和灌溉等都会影响氨气的挥发<sup>[4, 13, 14]</sup>。本研究对4组处理的CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和NH<sub>3</sub>与土壤的表层湿度和温度、土壤表层下5cm处温度以及大气温度和土壤含水率进行了Pearson相关性分析(表4)结果表明: ①CK处理的土壤含水率对NH<sub>3</sub>排放显著负相关(P=0.05),但CF、RM和NRM处理各环境因素对NH<sub>3</sub>排放均无显著相关; ②CK处理的CH<sub>4</sub>排放通量与地表湿度(P=0.038)

显著相关,与土温(P=0.030)显著负相关; CF处理各环境因素与CH<sub>4</sub>排放通量均无显著相关; RM处理的土壤含水率与CH<sub>4</sub>排放通量(P=0.052)显著相关; NRM处理的土温与CH<sub>4</sub>排放通量(P=0.016)显著相关; ③CK处理的N<sub>2</sub>O排放通量与土壤含水率(P=0.018)显著相关; CF处理的地表湿度(P=0.007)、地表温度(P=0.027)、土温(P=0.013)和土壤含水率(P=0.001)与N<sub>2</sub>O排放通量均显著相关; NRM处理的N<sub>2</sub>O排放通量与地表湿度(P=0.012)、地表温度(P=0.050)和土温(P=0.017)均显著相关。

比较图3与图1可知,第4d土温、气温和地表温度较前3d明显降至波谷,反观土壤湿度则出现第一次峰值,这种变化影响到了CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O转折排放,即N<sub>2</sub>O排放通量升高而CH<sub>4</sub>排放通量下降。整个试验期间土温、气温和地表温度的升高或下降都引起相应的含水率和湿度下降或上升,这种反复的波动情况,影响了CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和NH<sub>3</sub>的不规则波动排放。

环境因子(如土壤温度和含水率)是影响土壤CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和NH<sub>3</sub>排放的主要因素<sup>[22]</sup>。本研究的统计分析结果表明(表4)4个处理的CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和NH<sub>3</sub>排放通量大多受土壤含水率影响,且在不同处理下3种气体的排放与1~2个环境因素显著相关,但不同处理下的3种气体排放均与气温无关。由表4可知,某些处理中CH<sub>4</sub>和NH<sub>3</sub>的排放量与单环境因素均无显著相关,如CF处理的CH<sub>4</sub>和NH<sub>3</sub>、RM处理的N<sub>2</sub>O、NRM处理的NH<sub>3</sub>,这可能是各因素共同决定了气体的排放量,这种推测与许多研究一致,例如,当土壤水分变化较小时,N<sub>2</sub>O排放与温度呈正相关,当土壤水分变化大时,N<sub>2</sub>O排放不完全随温度的变化而变化;此外有分析发现N<sub>2</sub>O与土壤温度和水分均无相关性,说明N<sub>2</sub>O的排放是受二者共同作用的结果,当然不同种类有机肥的施加和土壤含碳氮水平都会影响CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和NH<sub>3</sub>的排放<sup>[22, 37-39]</sup>。上述结果表明,影响蔬菜地CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和NH<sub>3</sub>排放的

环境因素较为复杂,今后需要深入研究,例如,除了对气体通量与单个环境因素进行一定的相关分析外,还应增加包含多种环境因子的多元回归分析,以便进一步明确影响不同处理、不同气体通量的主控

因子以及不同因子的贡献权重.同时,今后的研究中应加强对反应底物如铵态氮、硝态氮、MBC、DOC 以及一些功能菌群与土壤酶的同时期分析,以便为相应的机制分析提供基础数据.

表4 温室气体( $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ )排放、氨气挥发与环境因素的 Pearson 相关分析<sup>1)</sup>

Table 4 Results of Pearson correlation analysis of greenhouse gas emission

处理	气体	地表湿度	地表温度	土温(5 cm)	气温	土壤含水率
CK	$\text{NH}_3$	-0.138	0.115	0.217	0.024	-0.530*
	$\text{CH}_4$	0.558*	-0.459	-0.578*	-0.189	0.411
	$\text{N}_2\text{O}$	0.512	-0.367	-0.460	-0.059	0.621*
CF	$\text{NH}_3$	-0.094	0.034	0.199	0.061	-0.254
	$\text{CH}_4$	0.232	-0.286	-0.024	-0.358	-0.392
	$\text{N}_2\text{O}$	0.680**	-0.588*	-0.646*	0.092	0.775**
RM	$\text{NH}_3$	0.122	-0.036	0.121	-0.06	0.042
	$\text{CH}_4$	0.158	-0.381	-0.287	-0.420	0.530*
	$\text{N}_2\text{O}$	0.488	-0.439	-0.491	-0.020	-0.351
NRM	$\text{NH}_3$	-0.016	0.072	0.202	0.007	-0.258
	$\text{CH}_4$	-0.408	0.357	0.629*	-0.021	-0.432
	$\text{N}_2\text{O}$	0.649*	-0.533*	-0.623*	-0.080	0.059

1) \* 表示置信水平 0.05; \*\* 表示置信水平 0.01

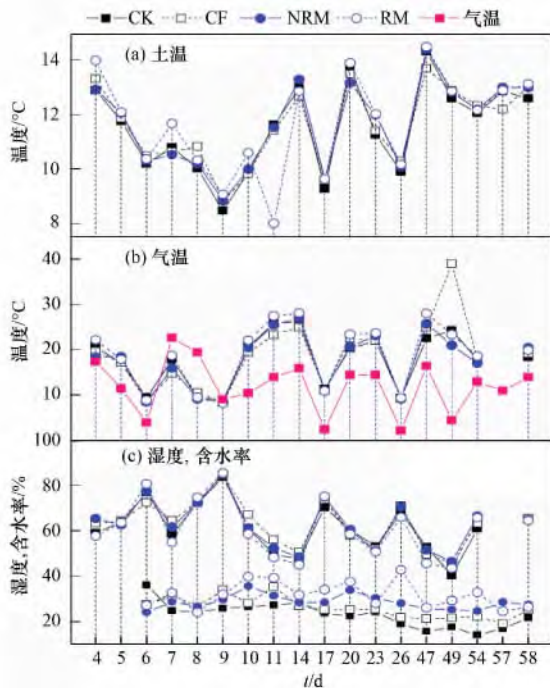


图3 油麦菜生长期各处理的环境因子变化情况

Fig. 3 Changes of environmental factor during the growth of *Lactuca sativa* L.

## 2.6 氮素平衡与生物量

本研究考察了 N 素以  $\text{NH}_3$  挥发、 $\text{N}_2\text{O}$  排放和蔬菜吸收利用这 3 种方式的损失量 [图 4 (a)], 其中, F-N、 $\text{N}_2\text{O}$ -N、 $\text{NH}_3$ -H 和 V-N 分别代表该组试验中, 种植结束后土壤中总氮、植物生长过程中以  $\text{N}_2\text{O}$  和

$\text{NH}_3$  形式挥发的氮元素以及植物累积吸收的氮元素各自所占比例. 结果表明, N 素损失比例最大的是以  $\text{NH}_3$  挥发, 其中 CF、RM 和 NRM 处理的  $\text{NH}_3$  挥发占 N 素损失比例分别为 2.53%、3.98% 和 2.0%, 这与碱性土壤环境下导致氨气的排放有关. 不同处理的 N 素损失途径并不一样, 如 RM 处理和 NRM 处理的 N 素另一主要去处是油麦菜吸收, 所占比例分别是 CF 和 NRM 处理的 2.7 和 2.5 倍, 而 CF 处理的 N 损失主要以  $\text{N}_2\text{O}$  排放为主. 总之, N 素以  $\text{NH}_3$  挥发损失的比例大小依次是 RM、CF、NRM; 油麦菜吸收利用比例大小依次是 RM、NRM、CF, 以  $\text{N}_2\text{O}$  损失比例大小依次是 CF、RM、NRM. 除本研究中考察的 N 素以 3 种形式损失外, 有许多研究表明 N 素主要以反硝化成  $\text{N}_2$  损失和硝酸盐的迁移及淋洗为主, 以不同形态残留在土壤的 N 素占 TN 的 37.5%, 且一般分布在土壤的 0~100 cm 层<sup>[6, 12]</sup>.

不同有机肥施用的油麦菜平均产量 (以鲜重计  $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ ) 大小依次为: CF ( $44.41 \pm 11.65$ )、RM ( $42.78 \pm 12.57$ )、NRM ( $39.51 \pm 10.29$ )、CK ( $38.62 \pm 17.38$ ), 见图 4 (b). CF、RM、NRM 增产量 (相对 CK 计) 分别是 14.9%、10.8%、2.3%, 说明施加有机肥一定能增加蔬菜产量, 同一施 N 水平下 NRM 蔬菜产量比商品肥 CF 处理产量低很多, 但是它们对 N 的吸收利用量相当 (CF 是 0.46%, NRM 是 0.51%); 反而 N 减半的 RM 处理与 CF 蔬菜产

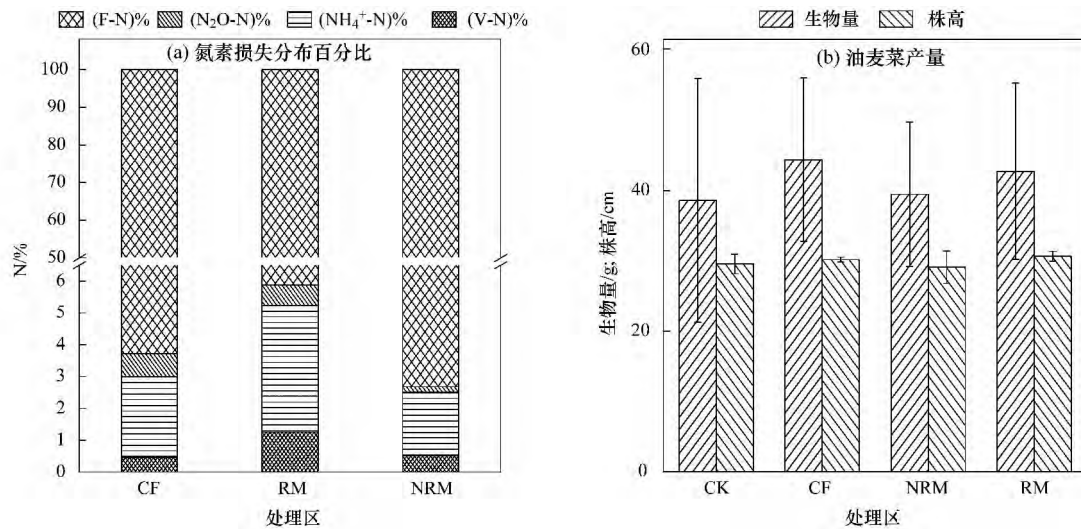


图4 不同处理的氮素损失分布百分比和油麦菜产量

Fig. 4 Nitrogen loss percents and *Lactuca sativa* L. yields

量最接近,这或许与 RM 处理 [图 4 (a)] 蔬菜对 N 的吸收率 (1.26%) 最高有关. 从温室气体减排及生物产量角度来看施加含有赤泥的有机肥效果比 CF 处理稍好,但其引起的以  $\text{NH}_3$  挥发损失的 N 也最多.

### 3 结论

(1) 现场观测结果表明,油麦菜地 NRM、RM、CF 处理的  $\text{CH}_4$  排放系数分别为 0.2%、0.027%、0.004%;  $\text{N}_2\text{O}$  的排放系数分别是 0.18%、0.63%、0.74%;  $\text{NH}_3$  的排放系数分别为 2.00%、3.98%、2.53%.

(2) 温室油麦菜种植过程中,土壤温度和地表湿度会显著地影响  $\text{CH}_4$  排放通量变化; 而土壤温度、地表温度和湿度与  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量显著相关.  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{NH}_3$  排放通量均显著受土壤含水率影响,在温室蔬菜种植中气温不是影响  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{NH}_3$  排放的主要因素.

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. New York: Nature Publishing Group, 2007. 987-995.
- [2] 国家发展改革委员会. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [3] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氮挥发和氧化亚氮排放的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 99-104.
- [4] 李剑睿, 苏芳, 黄彬香, 等. 鸡粪施入农田土壤的氮挥发研究 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1959-1964.
- [5] 中华人民共和国农业部. 2011 中国农业发展报告 [M]. 北

京: 中国农业出版社, 2011.

- [6] 曹兵, 贺发云, 徐秋明, 等. 南京郊区番茄地中氮肥的效应与去向 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1839-1844.
- [7] 曹兵, 贺发云, 徐秋明, 等. 露地种植大白菜的氮肥效应与氮素损失研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1116-1122.
- [8] 于亚军, 朱波, 荆光军. 成都平原土壤-蔬菜系统  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征 [J]. 中国环境科学, 2008, 28(4): 313-318.
- [9] 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. 11-17.
- [10] 陈清, 张福锁. 蔬菜养分资源综合管理理论与实务 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006. 147-152.
- [11] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2-3): 117-127.
- [12] 胡晓霞, 丁洪, 张玉树, 等. 不同菜地土壤硝化与反硝化活性 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2657-2662.
- [13] 马腾飞, 危常州, 王娟, 等. 不同灌溉方式下土壤中氮挥发损失及动态变化 [J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2010, 28(3): 294-298.
- [14] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氮挥发的原位测定——通气法 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205-209.
- [15] Min J, Zhao X, Shi W M, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in Southeastern China [J]. Pedosphere, 2011, 21(4): 464-472.
- [16] 杨芊葆. 长期不同施肥对中国东北黑土甲烷氧化菌群落特征与功能的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010. 37-41.
- [17] 石生伟, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同氮、磷肥用量下双季稻田的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放 [J]. 环境科学, 2011, 32(7): 1899-1907.
- [18] 金雪雷, 范晓晖, 蔡贵信, 等. 菜地土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放及其氮素反硝化损失 [J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 861-865.



- [19] 张军科,江长胜,郝庆菊,等. 耕作方式对紫色水稻土农田生态系统  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 环境科学,2012,33(6): 1979-1986.
- [20] 裴淑玮,张圆圆,刘俊锋,等. 施肥及秸秆还田处理下玉米季温室气体的排放[J]. 环境化学,2012,31(4): 407-414.
- [21] 邱炜红,刘金山,胡承孝,等. 不同施氮水平对菜地土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(11): 2238-2243.
- [22] 邱炜红,刘金山,胡承孝,等. 菜地系统土壤氧化亚氮排放的日变化[J]. 华中农业大学学报,2011,30(2): 210-213.
- [23] 邬玉龙. 猪粪堆肥过程  $\text{NH}_3$  和温室气体 ( $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$ ) 排放特征及减排[D]. 南昌: 南昌大学,2011. 14-16.
- [24] 郑嘉熹,魏源送,吴晓凤,等. 猪粪堆肥过程保氮固磷及温室气体 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) 减排研究[J]. 环境科学,2011,32(7): 2047-2055.
- [25] 王艳强. 川中丘陵区草地土壤-植物系统  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  通量研究[D]. 重庆: 西南农业大学,2005. 21-23.
- [26] 母国宏. 不同土地利用状况下土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放及其估算[D]. 杨凌: 西北农林科技大学,2008. 33-36.
- [27] 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.
- [28] 蒋小芳. 不同堆肥原料有机无机复混肥对辣椒和油菜生长及土壤供氮特性的影响[D]. 南京: 南京农业大学,2008. 53-56.
- [29] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社,2000. 149-156.
- [30] Conrad R, Rothfuss F. Methane oxidation in the soil surface layer of a flooded rice field and the effect of ammonium[J]. *Biology and Fertil of Soils*,1991,12(1): 28-32.
- [31] 徐雨晴,何吉成,李凌浩,等. 内蒙古半干旱草原的氨气挥发研究[J]. 资源与生态学报(英文版),2010,1(1): 68-74.
- [32] Van Beek C L, Pleijter M, Kuikman P J. Nitrous oxide emissions from fertilized and unfertilized grasslands on peat soil [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*,2011,89(3): 453-461.
- [33] He F, Jiang R, 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.
- [34] Xiong Z, Xie Y, Xing G, et al. Measurements of nitrous oxide emissions from vegetable production in China [J]. *Atmospheric Environment*,2006,40(12): 2225-2234.
- [35] 裴淑玮,张圆圆,刘俊锋,等. 华北平原玉米-小麦轮作农田  $\text{N}_2\text{O}$  交换通量的研究[J]. 环境科学,2012,33(10): 3641-3646.
- [36] 廖千家骅,颜晓元. 亚洲地区稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放影响因子统计模拟分析[J]. 环境科学,2011,32(1): 38-45.
- [37] Zhang H H, He P J, Shao L M. Ammonia volatilization,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  emissions from landfill leachate-irrigated soils [J]. *Waste Management*,2010,30(1): 119-124.
- [38] Gregorich E G, Rochette P, VandenBygaart A J, et al. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada [J]. *Soil and Tillage Research*,2005,83(1): 53-72.
- [39] 黄丽华,沈根祥,顾海蓉,等. 肥水管理方式对蔬菜田  $\text{N}_2\text{O}$  释放影响的模拟研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(6): 1319-1324.