

陈秋会, 王磊, 席运官, 等. 太湖地区有机与常规种植方式下稻麦轮作农田温室气体短期排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2642–2649.

CHEN Qiu-hui, WANG Lei, XI Yun-guan, et al. Short-term greenhouse gas emissions from organic and conventional rice-wheat rotation cropping systems in Taihu Lake region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2642–2649.

## 太湖地区有机与常规种植方式下稻麦轮作农田 温室气体短期排放特征

陈秋会<sup>1,2</sup>, 王磊<sup>1,2</sup>, 席运官<sup>1,2\*</sup>, 田伟<sup>1,2</sup>, 金淑<sup>1,2</sup>, 张弛<sup>1,2</sup>, 李妍<sup>1,2</sup>, 肖兴基<sup>1,2</sup>

(1. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. 生态环境部有机食品发展中心, 南京 210042)

**摘要:**为探明有机种植模式对农田温室气体排放的影响,以太湖地区有机与常规种植模式下稻麦轮作农田为研究对象,采用静态箱-气相色谱法监测农田温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O)排放的动态变化特征,并运用温室气体增温潜势(GWP)和排放强度(GHGI)进行温室效应估算。结果表明:在稻麦轮作季,有机与常规种植模式下温室气体排放通量整体动态变化趋势基本一致。在稻季,有机种植土壤CH<sub>4</sub>排放总量为195.56 kg·hm<sup>-2</sup>,显著高于常规种植(119.77 kg·hm<sup>-2</sup>),而CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O排放总量与常规种植无显著差异;在麦季,有机种植土壤CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放总量分别为12 554.92、1.44 kg·hm<sup>-2</sup>和7.02 kg·hm<sup>-2</sup>,常规种植土壤分别为8 096.61、2.67 kg·hm<sup>-2</sup>和6.74 kg·hm<sup>-2</sup>。稻季有机种植土壤温室气体GWP和GHGI显著高于常规种植,而在麦季常规种植较高。在整个稻麦轮作季,有机种植模式下温室气体GWP和GHGI分别为6 501.69 kg CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>和0.44 kg·kg<sup>-1</sup>,显著高于常规种植模式(4 745.38 kg CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>和0.37 kg·kg<sup>-1</sup>)。有机种植模式在稻季温室气体减排方面无明显优势,但是有利于麦季农田土壤温室气体的减排。

**关键词:**稻麦轮作;有机种植;温室气体;增温潜势;排放强度

**中图分类号:**X511;S345 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2019)11-2642-08 doi:10.11654/jaes.2019-0635

### Short-term greenhouse gas emissions from organic and conventional rice-wheat rotation cropping systems in Taihu Lake region, China

CHEN Qiu-hui<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>, XI Yun-guan<sup>1,2\*</sup>, TIAN Wei<sup>1,2</sup>, JIN Shu<sup>1,2</sup>, ZHANG Chi<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>1,2</sup>, XIAO Xing-ji<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. Organic Food Development Center, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** To evaluate the impact of organic cropping system on global warming, a field experiment on greenhouse gas (GHG) emissions from organic and conventional rice-wheat rotation cropping systems was conducted in Taihu Lake region. Greenhouse gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O emission fluxes were measured using the static chamber-gas chromatograph method. Greenhouse warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI) were also used to analyze their warming effects. The results showed that the character of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O emissions flux dynamics were almost the same for organic and conventional rice-wheat rotation systems. The amount of CH<sub>4</sub> emission from organic rice paddy field was 195.56 kg·hm<sup>-2</sup>, significantly greater than conventional field (119.77 kg·hm<sup>-2</sup>), whereas no significant differences were observed for CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions. Further, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, and CH<sub>4</sub> emissions were 8 096.61, 2.67, and 6.74 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively, from conventional wheat field and 12 554.92, 1.44, and 7.02 kg·hm<sup>-2</sup> respectively from organic field. GWP and GHGI of organic field in

收稿日期:2019-06-05 录用日期:2019-07-30

作者简介:陈秋会(1982—),女,河南省商丘人,博士,助理研究员,主要从事有机农业与生态修复方面的研究。E-mail: cqhofree@126.com

\*通信作者:席运官 E-mail: xygofree@126.com

基金项目:环保公益行业科研专项(201309036);云南省环保厅项目(YNZDZB[2017]002)

**Project supported:** The Special Scientific Research Fund of Environmental Protection Public Welfare Profession of China (201309036); The Special Fund for Environmental Protection of Yunnan Province(YNZDZB[2017]002)

rice season were significantly higher than those of conventional field, but contrarily in wheat season. GWP and GHGI of organic rice-wheat rotation field were  $6\,501.69\text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$  and  $0.44\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$  respectively, significantly higher than those from convention field ( $4\,745.38\text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$  and  $0.37\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$  respectively). The results suggest that organic cropping system may not be an effective way to reduce greenhouse gas emissions in rice paddy ecosystem, but is effective in mitigating greenhouse gas emissions in wheat fields.

**Keywords:** rice-wheat rotation; organic cropping; greenhouse gas; global warming potential; emission intensity

2016年,全球大气中 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的浓度分别为 $403.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1853\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $328.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,分别比工业化前增加45%、157%和22%<sup>[1]</sup>。IPCC报告<sup>[2]</sup>指出农业源温室气体排放量占全球人为温室气体排放总量的10%~12%,其中 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 分别占全球人为温室气体排放总量的50%和60%,因此农田生态系统中 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放与吸收在全球气候变化进程中具有重要影响。据《中华人民共和国气候变化第一次两年更新报告》,2012年我国农业活动温室气体排放总量由1994年的6.05亿t二氧化碳当量升至9.38亿t二氧化碳当量,其中水稻种植温室气体排放量为1.78亿t,占农业源温室气体排放总量的18.9%;农业源 $\text{CH}_4$ 排放总量为2 288.6万t,水稻种植 $\text{CH}_4$ 排放量占 $\text{CH}_4$ 排放总量的37.0%。

近年来,有机农业蓬勃发展。2016年全球有机农地面积为5 780万 $\text{hm}^2$ ,我国有机种植面积为230万 $\text{hm}^2$ ,其中稻、麦生产面积为42.3万 $\text{hm}^2$ ,占总面积的18.4%<sup>[3]</sup>。由于生产过程和投入品的不同,有机农业与常规农业相比呈现不同的环境效益。研究表明,有机农业在提高土壤肥力、增加生物多样性和降低农业面源污染等方面有积极作用。国外针对有机农业在温室气体减排方面的研究结果表明<sup>[4-7]</sup>,与常规农业相比,有机农业在一定程度上可减少温室气体的排放。然而,研究多采用生命周期评估法,国内外有关有机种植模式下温室气体排放特征的研究较少<sup>[8-9]</sup>。因此,本文通过研究有机种植稻麦轮作农田温室气体排放特征,明确种植模式转变对温室气体排放的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验地位于太湖流域江苏省常州市雪堰镇万寿村( $120^{\circ}05'05''\text{E}$ ,  $31^{\circ}29'24''\text{N}$ ),距太湖2 km,所处地形为丘陵谷地。常规与有机种植长期定位对比试验始于2011年6月,土壤类型为水稻土,质地为壤土。试验前0~20 cm耕层土壤 $\text{pH}5.13$ ,有机质 $31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,总氮 $1.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,碱解氮 $164\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,总磷 $1.17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效磷 $11.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

该地区种植制度为稻麦轮作,水稻耕作方式为常规翻耕,小麦为免耕;供试作物品种水稻为9998-3,冬小麦为扬麦11号。

### 1.2 试验设计

野外田间原位观测试验时间为2013年6月—2014年6月。水稻于2013年6月19日移栽,2013年10月29日收获;小麦于2013年11月15日播种,2014年5月30日收获。设置3个处理:(1)空白对照(CK):不施肥,采用当地病虫害防治方法;(2)常规种植模式(CF):在广泛调查的基础上,采用当地农民的平均施肥量、施肥方式和病虫害防治方法;(3)有机种植模式(OF):施用和常规组等氮量的有机肥,种植期间全部采用商品有机肥和植物源农药,不使用任何人工农药和化肥等,严格执行有机产品生产行业标准。每个处理设3次重复,各试验小区随机排列,每个小区30  $\text{m}^2$ 。所用有机肥为“田娘”商品有机肥(含N 1.42%、 $\text{P}_2\text{O}_5$  2.00%、 $\text{K}_2\text{O}$  1.58%)。稻麦轮作期间各处理具体施肥情况见表1。

表1 有机和常规种植模式下的施肥种类和施肥量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

Table 1 Fertilization application rates of organic and conventional cultivation patterns( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

| 项目 Item            | 施肥时间 Time  | 常规种植 Conventional cultivation (CF) |                         | 有机种植 Organic cultivation (OF) |
|--------------------|------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
|                    |            | 尿素 Urea                            | 复合肥 Compound fertilizer | 有机肥 Organic fertilizer        |
| 稻季<br>Rice season  | 2013-06-24 | 150                                | 450                     | 13 335                        |
|                    | 2013-07-16 | 150                                | —                       | 3 000                         |
|                    | 2013-08-13 | 150                                | 150                     | 4 707                         |
| 麦季<br>Wheat season | 2013-11-14 | 150                                | 300                     | 8 432                         |
|                    | 2014-02-20 | 150                                | —                       | 4 540                         |

### 1.3 稻麦轮作季水分和气温情况

稻麦轮作季降雨总量为644.4 mm,其中稻季为326.2 mm,麦季为318.2 mm。稻季较大的两次降雨发生在2013年10月7日和10月8日,降雨量分别为58.1 mm和46.3 mm;麦季较大的两次降雨发生在2014年4月12日和5月11日,降雨量分别为48.6 mm和41.8 mm。在整个稻季共灌溉20次,灌溉水量为1000 mm,每隔3~6 d灌溉一次,在8月9日—9月2日土壤保持干湿交替状态(图1)。

### 1.4 温室气体采集与分析

2013年6月至2014年6月进行稻麦轮作农田温室气体排放的观测。 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 3种温室气体的采集与分析测定采用静态箱-气相色谱监测体系进行。采样频率为每周1次,当土壤水分(如晒田等)及养分(如追肥等)管理发生明显改变时增加采样频率,为每2 d一次,采样时间为每日上午8:00—10:00。采样箱由不透明的PVC材质制成,底横截面积为 $0.25 \text{ m}^2$ ( $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ),箱体高度随作物高度而增加,采样箱内顶部装有小风扇以充分混匀箱内气体。样地中埋设回字形不锈钢底座,采样时将静态箱放入底座并用水进行液封,罩箱后每隔10 min采一次样,共4次,抽出混匀的50 mL气体保存于专用气袋带回实验室分析。

气体样品采用Agilent6890D气相色谱进行分析测定, $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 采用火焰离子检测器(FID)测定, $\text{N}_2\text{O}$ 采用电子捕获检测器(ECD)测定,检测器温度分别为200℃和330℃,柱温为55℃;载气为高纯氮气。

温室气体排放量均以排放通量表示,排放通量为正值表示向大气排放,负值表示吸收。排放通量采用下式计算:

$$F = \rho \cdot H \cdot (dC/dt) \cdot [273/(273+T)]$$

$F$ 为温室气体的排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $\rho$ 为标准状态下气体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $H$ 为采集箱高度,m; $dC/dt$ 为单位时间内采集箱内气体的浓度变化量, $\text{mL} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 $\mu\text{L} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ , $T$ 为采样箱内平均气温,℃。

通过插值法进行累积排放量计算,即:以相邻两次监测日的平均通量乘以此期间天数为该段时间的排放量,以此类推,各个时间段的排放量之和即为整个监测期累积排放量。

### 1.5 温室气体增温潜势和排放强度的计算

根据 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 在100年尺度上的全球增温潜势(Global warming potential, GWP)分别为 $\text{CO}_2$ 的28倍和265倍<sup>[2]</sup>,计算不同处理排放温室气体产生的综合增温潜势( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,以 $\text{CO}_2$ 当量计):

$$\text{GWP} = \text{CH}_4 \text{排放量} \times 28 + \text{N}_2\text{O} \text{排放量} \times 265$$

温室气体排放强度(Greenhouse gas intensity, GHGI,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )的定义为单位经济产出的温室气体排放量<sup>[10]</sup>,即单位产量的 $\text{CO}_2$ 当量,计算公式为:

$$\text{GHGI} = \text{GWP} / \text{产量}$$

### 1.6 数据分析

数据分析采用Microsoft Excel 2010和SPSS 18.0统计软件完成,不同处理间显著性差异的检验采用单因素ANOVA方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 有机与常规种植模式下稻麦轮作农田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放规律

稻麦轮作期内 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量动态如图2所示,有

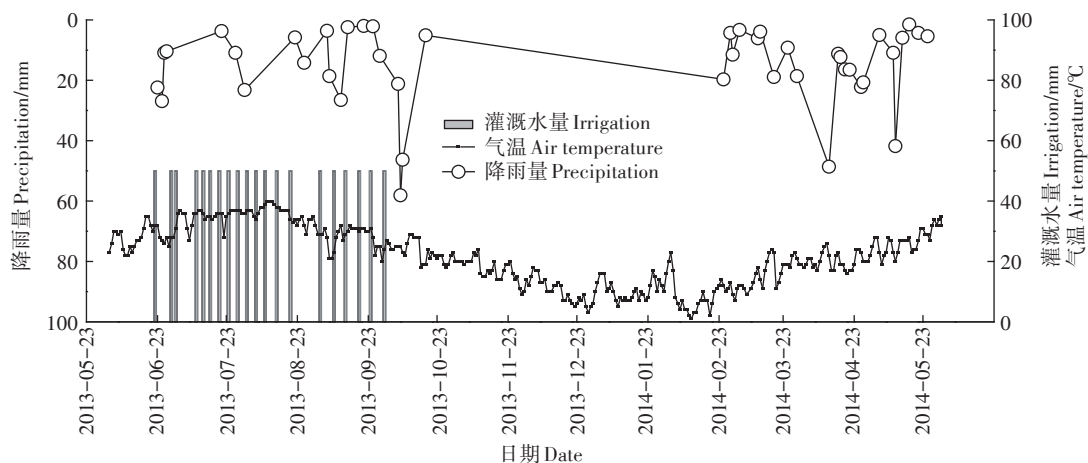


图1 稻麦轮作期间水分和气温情况

Figure 1 Situations of precipitation, irrigation and air temperature in rice-wheat rotation system

机与常规种植模式下稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量整体动态变化趋势基本一致。在整个水稻生长季,不施肥对照、有机和常规种植下稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量变化幅度分别为  $0\sim 26.42$ 、 $0\sim 744.56 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $2.40\sim 787.40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,平均排放通量分别为  $6.90$ 、 $82.27 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $91.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,有机与常规种植处理间无显著差异。与对照相比,在基肥和第一次追肥施用后,有机和常规种植下  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量有所增加,由于稻田处于浅水层淹水状态,仅出现小高峰。8月9日后水分管理发生变化,稻田呈干湿交替状态,在8月13日第二次追肥后,有机和常规种植下的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量呈脉冲式上升,峰值分别为  $744.56 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $787.40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,对照处理也有明显增加。

小麦季各处理  $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量变化规律一致,  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量变化范围为  $0\sim 248.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,有机和常规种植有明显的  $\text{N}_2\text{O}$  排放。施基肥后  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量呈增加趋势,在12月23日出现一个排放高峰,显著高于对照,峰值分别为  $166.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $248.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;在2月施追肥后一周内  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量达到峰值,尤其是常规种植 ( $75.87 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ );在4月中旬出现第三个峰值,分别为  $61.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $165.53 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。整个小麦生长季,不施肥对照、有机和常规种植  $\text{N}_2\text{O}$  的平均排放通量分别为  $7.63$ 、 $31.70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $59.22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

## 2.2 有机与常规种植模式下稻麦轮作农田 $\text{CO}_2$ 排放规律

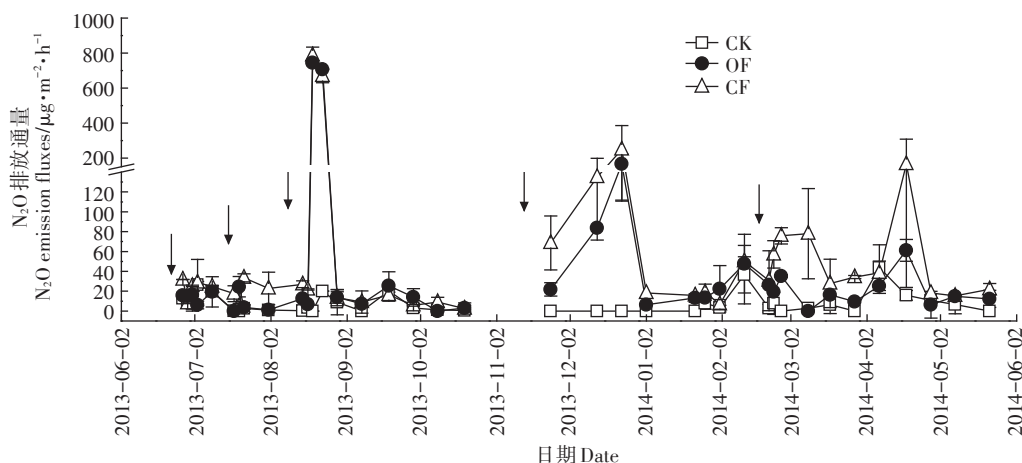
由图3可见,整个水稻生育期,不同处理稻田  $\text{CO}_2$

排放变化规律基本一致,整体呈先增加后降低的趋势,期间存在一定的波动。不施肥、有机和常规处理的  $\text{CO}_2$  排放通量变幅分别为  $30.72\sim 910.70$ 、 $10.96\sim 1407.91 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $17.40\sim 971.66 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,平均值分别为  $321.34$ 、 $366.43 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $360.90 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,各处理间无显著差异。在8月底各处理  $\text{CO}_2$  排放通量达到峰值,不施肥、有机和常规处理的排放峰值分别为  $910.70$ 、 $1407.91 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $971.66 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;在10月份,  $\text{CO}_2$  排放较为平缓,排放通量变幅为  $87.45\sim 381.72 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

冬小麦生长期,农田土壤  $\text{CO}_2$  的排放速率主要为正值,是  $\text{CO}_2$  排放的源,表现为前后期排放通量高,中期排放通量低。基肥施用后,有机和常规种植农田  $\text{CO}_2$  排放通量明显增加,在12月中旬达到整个生育期的峰值,分别为  $1698.14 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $827.56 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,之后  $\text{CO}_2$  排放通量降低,并趋于平缓,变化幅度为  $0\sim 103.81 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。追肥后,有机和常规种植处理农田  $\text{CO}_2$  排放通量开始增加,在4月和5月中旬出现2个  $\text{CO}_2$  排放高峰期,且有机种植排放峰值明显高于常规种植,之后有所降低。在小麦生长季,有机种植模式下的农田  $\text{CO}_2$  平均排放通量高于常规种植和不施肥对照,均值分别为  $427.00$ 、 $250.07 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $83.91 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

## 2.3 有机与常规种植模式下稻麦轮作农田 $\text{CH}_4$ 排放规律

由图4可见,  $\text{CH}_4$  的显著排放只出现在水稻生长季,总体呈先陡增后缓降的趋势。在水稻分蘖期、拔



图中箭头标注的为施肥时间。下同  
The arrow denotes the timing of fertilizer. The same below

图2 稻麦轮作农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放动态

Figure 2 Dynamics of  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from rice-wheat rotation fields



节期,根系发达, $\text{CH}_4$ 排放最为强烈,在结实成熟期排放较为微弱,排放通量接近于0。在8月中旬,稻田水落干,土壤中产甲烷菌活动受到抑制, $\text{CH}_4$ 排放通量迅速降低,灌水后 $\text{CH}_4$ 排放通量有所增加。在整个水稻生育期,有机种植稻田 $\text{CH}_4$ 平均排放通量( $6.32 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )高于常规种植( $3.62 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ),不施肥处理的 $\text{CH}_4$ 平均排放通量最低( $2.59 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )。在有机种植模式下,稻田 $\text{CH}_4$ 排放通量峰值( $15.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )出现在第一次追肥后,而常规种植模式下的峰值( $8.87 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )低于有机种植,且出现在第二次追肥后,不施肥处理峰值( $5.77 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )出现时间与常规种植一致,之后 $\text{CH}_4$ 排放通量持续下降。

整个冬小麦生长季 $\text{CH}_4$ 排放通量显著低于水稻季,整体表现为 $\text{CH}_4$ 排放,在生长初期,基肥的施用使得有机和常规种植农田 $\text{CH}_4$ 排放通量明显高于不施肥对照,在常规种植麦季后期检测到 $\text{CH}_4$ 的吸收

( $0.0067 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ),对照、有机种植和常规种植农田 $\text{CH}_4$ 平均排放通量分别为0.06、0.21、0.20  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

#### 2.4 稻麦轮作农田温室气体排放量及增温潜势和产量

稻麦轮作农田各处理温室气体排放总量如表2所示。温室气体对温室效应的贡献采用增温潜势作为评价指标。结果显示,在稻季,有机种植 $\text{CH}_4$ 排放量显著高于常规种植,是常规种植的1.63倍;而有机种植 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量与常规种植的差异未达到显著水平。有机种植温室气体增温潜势GWP是常规种植的1.18倍。有机与常规种植方式下水稻产量无明显差异,但有机种植温室气体GHGI显著高于常规种植,为其的1.12倍。

在麦季,与常规种植方式相比,有机种植方式显著增加了 $\text{CO}_2$ 排放总量,而显著降低了 $\text{N}_2\text{O}$ 排放总量,二者 $\text{CH}_4$ 排放总量无显著差异。常规种植温室气

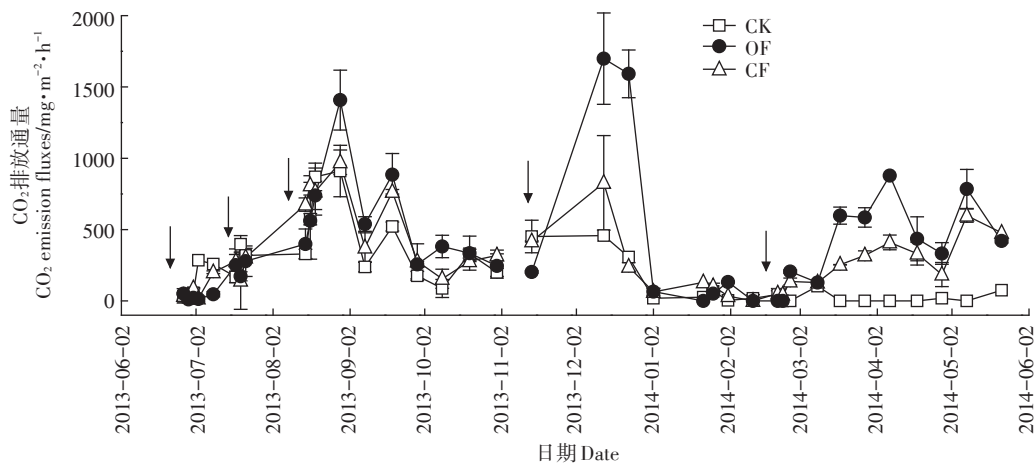


图3 稻麦轮作农田 $\text{CO}_2$ 排放动态

Figure 3 Dynamics of  $\text{CO}_2$  emissions from rice-wheat rotation fields

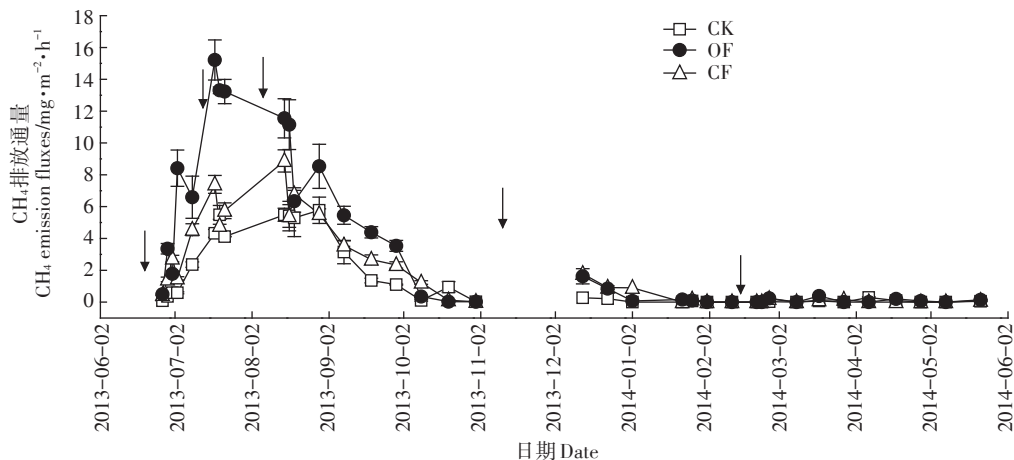


图4 稻麦轮作农田 $\text{CH}_4$ 排放动态

Figure 4 Dynamics of  $\text{CH}_4$  emissions from rice-wheat rotation fields

表2 稻麦产量和农田土壤温室气体排放量与增温潜势

Table 2 Rice and wheat yields and amounts of GHG emissions and their calculated GWP and GHGI in rice-wheat rotation fields

| 处理 Treatment                |    | 产量 Yield/t·hm <sup>-2</sup> | CO <sub>2</sub> /kg·hm <sup>-2</sup> | N <sub>2</sub> O/kg·hm <sup>-2</sup> | CH <sub>4</sub> /kg·hm <sup>-2</sup> | GWP/kg CO <sub>2</sub> -eq·hm <sup>-2</sup> | GHGI/kg·kg <sup>-1</sup> |
|-----------------------------|----|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|
| 稻季<br>Rice season           | CK | 6.63a                       | 10 631.82a                           | 0.19a                                | 94.43a                               | 2 694.29a                                   | 0.41a                    |
|                             | OF | 10.48b                      | 13 738.61b                           | 1.69b                                | 195.56c                              | 5 923.53c                                   | 0.57b                    |
|                             | CF | 9.94b                       | 12 849.33b                           | 1.87b                                | 119.77b                              | 3 849.11b                                   | 0.39a                    |
| 麦季<br>Wheat season          | CK | 1.28a                       | 5 213.90a                            | 0.33a                                | 2.20a                                | 149.05a                                     | 0.12a                    |
|                             | OF | 4.30c                       | 12 554.92c                           | 1.44b                                | 7.02b                                | 578.16b                                     | 0.13a                    |
|                             | CF | 2.90b                       | 8 096.61b                            | 2.67c                                | 6.74b                                | 896.27c                                     | 0.31b                    |
| 稻麦轮作<br>Rice-wheat rotation | CK | 7.92a                       | 15 845.72a                           | 0.52a                                | 96.63a                               | 2 843.44a                                   | 0.36a                    |
|                             | OF | 14.78c                      | 26 293.53c                           | 3.13b                                | 202.58c                              | 6 501.69c                                   | 0.44b                    |
|                             | CF | 12.84b                      | 20 945.94b                           | 4.54c                                | 126.51b                              | 4 745.38b                                   | 0.37a                    |

注:表中不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ) among different treatments.

体GWP显著高于有机种植,且有机种植小麦产量是常规种植的1.48倍,二者GHGI差异达显著水平。

整个稻麦轮作季,有机种植方式显著增加稻麦产量、土壤温室气体CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>的排放总量,温室气体增温潜势GWP较常规种植增加37%,且GHGI显著高于常规种植。

### 3 讨论

农田生态系统中温室气体的排放受施肥、灌溉、耕作方式等农业措施的影响。农田土壤N<sub>2</sub>O的产生与排放主要源于土壤氮素的硝化和反硝化作用,施肥作为最主要的农田耕作措施是影响N<sub>2</sub>O排放的重要因素。研究表明,由于氮肥分解为氮硝化和反硝化过程提供反应底物,施肥可增强农田N<sub>2</sub>O的排放强度<sup>[11-12]</sup>。与对照相比,在基肥和第一次追肥施用后,有机和常规种植方式下稻田N<sub>2</sub>O排放通量有所增加,尤其是常规种植,这主要与化肥中氮的快速分解释放为硝化和反硝化提供底物有关,然而由于稻田处于浅水层淹水状态,N<sub>2</sub>O排放仅出现小高峰。在8月13日第二次追肥,稻田处于干湿交替状态,有机和常规种植模式下的N<sub>2</sub>O排放通量呈脉冲式上升,对照处理N<sub>2</sub>O排放通量也有明显增加;在麦季发现同样的现象,自2月中旬起,降雨频率和降雨量增加,对照处理N<sub>2</sub>O排放通量变化幅度较大,有机和常规种植方式下农田土壤在追肥施用后N<sub>2</sub>O排放量增加,表明施肥和干湿交替协同作用有利于促进稻田土壤硝化和反硝化作用的发生,释放更多的N<sub>2</sub>O。在整个稻麦生长季,有机与常规种植农田N<sub>2</sub>O排放总量分别为3.13 kg·hm<sup>-2</sup>和4.54 kg·hm<sup>-2</sup>,二者差异显著,这种差异性

主要体现在麦季。麦季常规种植N<sub>2</sub>O排放总量(2.67 kg·hm<sup>-2</sup>)显著高于有机种植(1.44 kg·hm<sup>-2</sup>),是有机种植的1.85倍,表明不同种植方式下的氮源形态和氮有效性对N<sub>2</sub>O排放有一定的影响,有机种植方式有利于土壤N<sub>2</sub>O减排。一方面是由于有机肥较低的速效氮含量使得N<sub>2</sub>O排放量较少<sup>[13-14]</sup>;另一方面是有机肥增加了外源碳,有机碳可固定土壤中的速效氮并促进N<sub>2</sub>O转化为N<sub>2</sub>的反硝化过程,减少了N<sub>2</sub>O的排放<sup>[15]</sup>。Kramer等<sup>[16]</sup>指出,有机种植土壤潜在反硝化菌活性、反硝化速率和效率明显高于常规种植,N<sub>2</sub>排放量较高。有研究指出,等氮量有机肥替代化肥措施可有效降低旱地N<sub>2</sub>O排放<sup>[17-19]</sup>。

在稻麦轮作季,有机与常规种植方式下农田CO<sub>2</sub>排放通量动态变化趋势基本一致,水稻生长中期和小麦生长后期CO<sub>2</sub>排放通量较高,这主要与水稻和小麦的旺盛生长及较高的气温有关。有机与常规种植方式下稻田CO<sub>2</sub>排放量无明显差异,而显著高于对照,表明施肥增加CO<sub>2</sub>排放,但种植方式的改变对稻田CO<sub>2</sub>排放无明显影响,其受水分、气温和水稻生长的影响较大。赵峥等<sup>[14]</sup>指出施肥显著增加稻田CO<sub>2</sub>的排放,但化肥与有机肥的影响无显著差异。有研究显示,有机肥施用有利于削弱土壤碳释放对大气CO<sub>2</sub>浓度升高的影响,长期施用有机肥条件下土壤碳固定量远超过释放量<sup>[20]</sup>。然而,麦季有机种植方式下的CO<sub>2</sub>排放总量显著高于常规种植,分别是对照的2.41倍和1.55倍,这主要是由于有机肥施用使得旱地土壤通气状况得到改善,促进土壤微生物活性以及根系的生长和活力<sup>[21]</sup>,从而显著提高农田土壤CO<sub>2</sub>的排放量,这与董玉红等<sup>[22]</sup>的研究结果一致。本研究结果显示有

机种植方式在麦季和稻季对CO<sub>2</sub>排放的影响有所不同,这可能与作物类型、生长期水分和温度状况、施肥情况等密切相关。本研究还发现,稻季农田CO<sub>2</sub>排放量显著高于麦季,究其原因可能与稻田长期淹水、生长期较高的气温、较高的施肥量和生物量有关。蔡祖聪<sup>[23]</sup>指出,长期淹水处理土壤的CO<sub>2</sub>排放量显著高于好气处理。Ding等<sup>[24]</sup>发现,土壤CO<sub>2</sub>排放量与作物生物量有显著正相关关系。

本研究中,CH<sub>4</sub>排放主要集中在稻季,排放量为94.43~195.56 kg·hm<sup>-2</sup>,占农田周年CH<sub>4</sub>总排放量的94.67%~97.72%;麦季农田CH<sub>4</sub>排放量仅为2.20~7.02 kg·hm<sup>-2</sup>。由此可见,在整个稻麦轮作周期,CH<sub>4</sub>的排放主要受土壤水分状况的影响,在麦季由于缺乏有利于CH<sub>4</sub>产生的厌氧条件,因此不会发生明显的CH<sub>4</sub>排放。在稻麦轮作季,有机种植CH<sub>4</sub>排放量显著高于常规种植,其中稻季有机种植CH<sub>4</sub>排放量是常规种植的1.63倍,而麦季有机种植CH<sub>4</sub>排放量高于常规种植,但二者差异不显著,表明种植方式改变对稻季CH<sub>4</sub>排放的影响更为显著。CH<sub>4</sub>的产生是产CH<sub>4</sub>菌在厌氧条件下还原土壤有机碳的产物<sup>[25]</sup>,稻季农田处于淹水厌氧状态,而且有机种植投入有机肥,为产甲烷菌提供可利用的有机碳,因此,稻季有机种植CH<sub>4</sub>排放量较高,这与赵峥等<sup>[14]</sup>的研究结果一致。

温室气体GHGI表示实际生产过程中单位产量的作物对气候变化潜在的影响,经常作为衡量农田温室效应和经济效益的一项综合指标。在稻麦轮作季,稻季温室气体增温潜势GWP和GHGI显著高于麦季,主要体现在稻季较高的CH<sub>4</sub>排放,这与稻季农田淹水密切相关。本研究中稻季有机种植方式下农田土壤温室气体GWP和GHGI显著高于常规种植,Qin等<sup>[9]</sup>的研究结果显示,有机稻田在持续淹水时GWP和GHGI明显高于常规稻田,而在间歇灌溉时由于CH<sub>4</sub>排放量增加,而N<sub>2</sub>O排放量减少,从而使得GWP与常规稻田无明显差异。因此,通过优化稻田水肥管理措施如间歇灌溉<sup>[9]</sup>、稻田种养结合<sup>[26-27]</sup>、施用完全腐熟的堆肥<sup>[28]</sup>等可减缓稻田温室效应。在麦季,有机种植方式下农田土壤温室气体GWP和GHGI显著低于常规种植,表明有机种植方式有利于麦季农田温室气体减排。王宏燕等<sup>[8]</sup>指出,有机种植对盐碱土大豆、玉米等旱田的温室气体有减排作用。由于稻季较高的增温潜势,整个稻麦轮作季有机种植方式下农田土壤温室气体增温潜势显著高于常规种植。本研究表明有机种植方式有利于减缓麦季农田温室效应,而在稻季

无明显优势。然而,从整个农业生产体系的角度来考虑,常规农业施用化肥和农药,而有机农业则采用免耕、种植绿肥、施用有机肥等农业措施提高土壤有机碳含量,提高土壤的固碳能力,从而减少温室气体的排放,而且减少了化肥、农药生产过程中的能耗,降低畜禽粪便、秸秆等废弃物因没有被资源化利用而带来的环境风险和温室效应,由此可见,有机农业生产体系在温室气体减排方面具有明显优势。

## 4 结论

(1)在稻麦生长周期内,农田温室气体排放通量变化规律主要受水分、气温和施肥时间等的影响,有机与常规种植方式下的变化规律基本一致。

(2)有机与常规种植方式下稻季农田温室气体排放总量、增温潜势GWP和排放强度GHGI显著高于麦季。

(3)种植方式对水稻和小麦农田温室气体排放量有显著影响,与常规种植方式相比,有机种植方式显著增加稻季农田温室气体排放总量、增温潜势和排放强度,而显著降低麦季农田温室气体排放。

## 参考文献:

- [1] WMO. Greenhouse gas bulletin: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2017[EB/OL]. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=5455](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5455). 2018-11-22.
- [2] IPCC. 2013: Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R/OL]. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_all\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf). 2018-11-01.
- [3] Willer H, Youssefi M. The world of organic agriculture—statistics and emerging trends 2018[R/OL]. <https://www.organic-world.net/yearbook/yearbook-2018/pdf.html>. 2018-02-14.
- [4] Aguilera E, Guzman G, Alonso A. Greenhouse gas emissions from conventional and organic cropping systems in Spain. I. Herbaceous crops[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2): 713-724.
- [5] Aguilera E, Guzman G, Alonso A. Greenhouse gas emissions from conventional and organic cropping systems in Spain. II. Fruit tree orchards[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2): 725-737.
- [6] Hoffman E, Cavigelli M A, Camargo G, et al. Energy use and greenhouse gas emissions in organic and conventional grain crop production: Accounting for nutrient inflows[J]. *Agricultural Systems*, 2018, 162: 89-96.
- [7] Perry A. Greenhouse gas emissions and yields from organic and conventional systems[J]. *Agricultural Research*, 2013, 61(10): 14.
- [8] 王宏燕, 宋冰冰, 聂颖, 等. 有机种植对盐碱土壤N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>排放通量的影响[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(9): 1580-1587.
- WANG Hong-yan, SONG Bing-bing, NIE Ying, et al. Effect of organic



- farming on emissions of carbon dioxide and nitrogen oxide in alkali saline soil[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2016, 28(9):1580-1587.
- [9] Qin Y M, Liu S W, Guo Y Q, et al. Methane and nitrous oxide emissions from organic and conventional rice cropping systems in southeast China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(8):825-834
- [10] Herzog T, Baumert K, Pershing J. Target-Intensity: An analysis of greenhouse gas intensity targets[M]. Washington: World Resources Institute, 2006.
- [11] 孙小静, 侯玉兰, 王东启, 等. 崇明岛稻麦轮作生态系统主要温室气体排放特征及影响因素分析[J]. 环境化学, 2015, 34(5):832-841.
- SUN Xiao-jing, HOU Yu-lan, WANG Dong-qi, et al. Emission characteristic and effect factors of major greenhouse gases from rice-wheat rotation system in Chongming Island[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(5):832-841.
- [12] 吴家梅, 纪雄辉, 彭 华, 等. 不同有机肥对稻田温室气体排放及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4):162-169.
- WU Jia-mei, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effects of different organic fertilizers on greenhouse gas emissions and yield in paddy soils [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(4):162-169.
- [13] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  排放的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(2):4381-4389.
- LI Yan-qing, TANG Ji-wei, CHE Sheng-guo, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$  from the summer maize field in the North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(2):4381-4389.
- [14] 赵 峥, 岳玉波, 张 翼, 等. 不同施肥条件对稻田温室气体排放特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2273-2278.
- ZHAO Zheng, YUE Yu-bo, ZHANG Yi, et al. Impact of different fertilization practices on greenhouse gas emission from paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2273-2278.
- [15] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):578-584.
- XIE Yi-qin, ZHANG Jian-feng, JIANG Hui-min, et al. Effects of different fertilization practices on greenhouse gas emissions from paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):578-584.
- [16] Kramer S B, Reganold J P, Glover J D, et al. Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(12):4522-4527.
- [17] Zhang M, Xiong Z Q. Organic fertilizer effects on greenhouse gas emissions and greenhouse gas intensity in a vegetable field in South-eastern China[J]. *Acta Horticulturae*, 2018(1192):113-120.
- [18] 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 等. 配施猪粪对麦季  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放及温室效应的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(4):349-354.
- SUN Guo-feng, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Effects of application of pig manure in combination with chemical fertilizers on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and their greenhouse effects in wheat field[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(4):349-354.
- [19] 李梦雅, 徐明岗, 王伯仁, 等. 长期不同施肥下我国旱地红壤  $\text{N}_2\text{O}$  释放特征及其对土壤性质的响应[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2645-2650.
- LI Meng-ya, XU Ming-gang, WANG Bo-ren, et al. Effect of long-term fertilization on  $\text{N}_2\text{O}$  emission and its relationship with soil properties in red soil of southern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2645-2650.
- [20] 陈 义, 吴春艳, 水建国, 等. 长期施用有机肥对水稻土  $\text{CO}_2$  释放与固定的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12):2468-2473.
- CHEN Yi, WU Chun-yan, SHUI Jian-guo, et al. Emission and fixation of  $\text{CO}_2$  from soil system as influenced by long-term application of organic manure in paddy soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12):2468-2473.
- [21] Ginting D, Kessavalou A, Eghball B, et al. Greenhouse gas emissions and soil indicators four years after manure and compost applications [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(1):23-32.
- [22] 董玉红, 欧阳竹. 有机肥对农田土壤二氧化碳和甲烷通量的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(7):1303-1307.
- DONG Yu-hong, OUYANG Zhu. Effects of organic manures on  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  fluxes of farmland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7):1303-1307.
- [23] 蔡祖聪. 水分类型对土壤排放的温室气体组成和综合温室效应的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(4):484-491.
- CAI Zu-cong. Effects of water regime on  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and overall potential for greenhouse effect caused by emitted gases[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(4):484-491.
- [24] Ding W X, Meng L, Yin Y F, et al.  $\text{CO}_2$  emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39:669-679.
- [25] Sakai S, Imachi H, Sekiguchi Y, et al. Isolation of key methanogens for global methane emission from rice paddy fields: A novel isolate affiliated with the clone cluster rice cluster II[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(13):4326-4331.
- [26] Xu G H, Liu X, Wang Q S, et al. Integrated rice-duck farming mitigates the global warming potential in rice season[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575:58-66.
- [27] 展 茗, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭复合系统的温室气体排放及其温室效应[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2):420-426.
- ZHAN Ming, CAO Cou-gui, WANG Jin-ping, et al. Greenhouse gas emissions from an integrated rice-duck system and its global warming potentials (GWPs) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2):420-426.
- [28] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的全年观测研究[J]. 大气科学, 2011, 35(4):707-720.
- SHI Sheng-wei, LI Yu-e, LI Ming-de, et al. Annual  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from double rice cropping systems under various fertilizer regimes in Hunan Province, China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2011, 35(4):707-720.